

OPTIMASI PEMANFAATAN KAWASAN TAMBAK DAN EKOSISTEM MANGROVE DI PESISIR KECAMATAN BREBES

MOCH FARID



**PROGRAM MAGISTER
PENGELOLAAN SUMBERDAYA PESISIR DAN LAUTAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa penelitian dengan judul “Optimasi Pemanfaatan Kawasan Tambak dan Ekosistem Mangrove di Pesisir Kecamatan Brebes” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis proposal penelitian saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2026

Moch Farid
C2502222011

RINGKASAN

MOCH FARID. Optimasi Pemanfaatan Kawasan Tambak dan Ekosistem Mangrove di Pesisir Kecamatan Brebes. Dibimbing oleh TARYONO dan BAMBANG WIDIGDO.

Kawasan pesisir Kecamatan Brebes mengalami perubahan penggunaan lahan seluas 891,561 hektare dalam sepuluh tahun terakhir, ditandai penurunan luasan tambak dari 3.382,495 hektare menjadi 3.173,220 hektare dan penambahan mangrove seluas 281,065 hektare, sehingga menimbulkan persaingan pemanfaatan ruang yang memerlukan model pemanfaatan optimal. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi biofisik, menganalisis kesesuaian pemanfaatan lahan, menghitung nilai jasa ekosistem, dan merumuskan model pemanfaatan optimal pada kawasan tambak dan ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes.

Penelitian dilaksanakan pada bulan Februari sampai April 2025 di enam stasiun, terdiri atas tiga stasiun mangrove alami dan tiga stasiun tambak *silvofishery* di Desa Kaliwlingi dan Desa Randusanga Kulon. Kondisi biofisik dianalisis melalui kualitas air, vegetasi mangrove, biomassa tegakan, dan simpanan karbon tanah. Kesesuaian lahan dianalisis menggunakan *Multi Criteria Decision Analysis* berbasis Sistem Informasi Geografis dengan metode *Weighted Linear Combination* untuk tiga peruntukan, yaitu tambak budidaya, rehabilitasi mangrove, dan ekowisata mangrove. Nilai jasa ekosistem dihitung menggunakan pendekatan net benefit, dengan responden nelayan, petambak, dan wisatawan masing-masing sebanyak 30 orang. Model pemanfaatan optimal dirumuskan melalui *linear programming* dengan bantuan perangkat lunak LINDO 6.1.

Kerapatan tegakan mangrove alami mencapai 3.883 individu per hektare dan simpanan karbon biomassa 71,13 megagram karbon per hektare, jauh lebih tinggi dibandingkan tambak *silvofishery* sebanyak 966 individu per hektare dan 10,75 megagram karbon per hektare, sedangkan simpanan karbon sedimen relatif setara pada kedua tipe lahan. Kawasan sesuai untuk tambak budidaya seluas 2.195,45 hektare atau 23,14 persen, untuk rehabilitasi mangrove seluas 3.638,15 hektare atau 38,34 persen, dan untuk ekowisata mangrove hanya 506,02 hektare atau 5,33 persen tanpa satu pun kelas Sangat Sesuai. Net benefit mangrove alami mencapai Rp189.793.035 per hektare per tahun, sekitar 10,4 kali lebih tinggi daripada tambak *silvofishery* sebesar Rp18.207.833 per hektare per tahun.

Model optimasi *linear programming* merekomendasikan Skenario S2 sebagai model terpilih, yaitu mempertahankan 2.031,84 hektare tambak *silvofishery* dan menambahkan 677,28 hektare rehabilitasi mangrove, sehingga luas mangrove kawasan meningkat dari 645,29 hektare menjadi 1.322,57 hektare. Model ini menghasilkan net benefit ekuilibrium Rp288,34 miliar per tahun, meningkat 67,7 persen dari kondisi baseline, dengan kendala luas kawasan dan retensi minimum tambak sebagai faktor pembatas utama. Hasil ini memberikan dasar kuantitatif bagi kebijakan alokasi lahan pesisir Kecamatan Brebes yang seimbang antara budidaya dan konservasi mangrove.

Kata kunci: ekosistem mangrove, kesesuaian lahan, net benefit, optimasi lahan, tambak *silvofishery*



SUMMARY

MOCH FARID. Optimization of Pond and Mangrove Ecosystem Utilization in the Coastal Area of Brebes Subdistrict. Supervised by TARYONO and BAMBANG WIDIGDO.

The coastal area of Brebes Subdistrict experienced a land use change of 891.561 hectares over the past ten years, marked by a decline in pond area from 3,382.495 hectares to 3,173.220 hectares and an increase in mangrove area of 281.065 hectares, creating competition for space utilization that requires an optimal utilization model. This study aimed to analyze the biophysical condition, analyze land suitability, calculate ecosystem service value, and formulate an optimal utilization model for the pond and mangrove ecosystem area in the coastal zone of Brebes Subdistrict.

The study was conducted from February to April 2025 at six stations, consisting of three natural mangrove stations and three silvofishery pond stations in Kaliwlingi and Randusanga Kulon Villages. The biophysical condition was analyzed through water quality, mangrove vegetation, stand biomass, and soil carbon stock. Land suitability was analyzed using Multi Criteria Decision Analysis based on a Geographic Information System with the weighted linear combination method for three land uses, namely pond aquaculture, mangrove rehabilitation, and mangrove ecotourism. Ecosystem service value was calculated using a net benefit approach, involving fishermen, pond farmers, and tourist respondents of 30 each. The optimal utilization model was formulated through linear programming using LINDO 6.1 software.

Natural mangrove stand density reached 3,883 individuals per hectare with a biomass carbon stock of 71.13 megagrams of carbon per hectare, considerably higher than the silvofishery pond at 966 individuals per hectare and 10.75 megagrams of carbon per hectare, while soil carbon stock was relatively similar between the two systems. Land suitable for pond aquaculture covered 2,195.45 hectares or 23.14 percent, for mangrove rehabilitation 3,638.15 hectares or 38.34 percent, and for mangrove ecotourism only 506.02 hectares or 5.33 percent, with no area classified as highly suitable. The net benefit of natural mangrove reached Rp189,793,035 per hectare per year, approximately 10.4 times higher than the silvofishery pond at Rp18,207,833 per hectare per year.

The linear programming optimization model recommended Scenario S2 as the selected model, retaining 2,031.84 hectares of silvofishery ponds and adding 677.28 hectares of mangrove rehabilitation, increasing the area's mangrove cover from 645.29 hectares to 1,322.57 hectares. This model produced an equilibrium net benefit of Rp288.34 billion per year, a 67.7 percent increase from baseline conditions, with the total area constraint and minimum pond retention constraint as the main limiting factors. These findings provide a quantitative basis for balanced coastal land allocation policy between aquaculture and mangrove conservation in Brebes Subdistrict.

Keywords: land optimization, land suitability, mangrove ecosystem, net benefit, silvofishery pond



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026 Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

OPTIMASI PEMANFAATAN KAWASAN TAMBAK DAN EKOSISTEM MANGROVE DI PESISIR KECAMATAN BREBES

MOCH FARID

Tesis
Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Sains pada
Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Lautan

**PROGRAM MAGISTER
PENGELOLAAN SUMBERDAYA PESISIR DAN LAUTAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:

1. Dr. Ir. Gatot Yulianto, M.Si
2. Dr. Ir. Zairion, M.Sc.

Judul Penelitian : Optimasi Pemanfaatan Kawasan Tambak dan Ekosistem Mangrove di Pesisir Kecamatan Brebes

Nama : Moch Farid

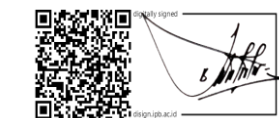
NIM : C2502222011

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Taryono, S.Pi, M.Si.



Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. Bambang Widigdo



Diketahui oleh

Ketua Program Studi
Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Lautan:

Dr. Ir. Zairion, M.Sc.
NIP. 19640703 199103 1003



Dekan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan:

Dr. Beginer Subhan, S.Pi, M.Si.
NIP. 19800118 200501 1003



Tanggal Ujian: 10 Juli 2026

Tanggal Lulus:



PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanahu wata'ala atas segala karunia-Nya sehingga Penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Februari sampai bulan April 2025 yang berjudul "Optimasi Pemanfaatan Kawasan Tambak dan Eksositem Mangrove di Pesisir Kecamatan Brebes". Tesis ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains di Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Lautan, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor. Keberhasilan penulis dalam menyelesaikan tesis ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Penulis mengucapkan terimakasih dan penghargaan kepada:

1. Institut Pertanian Bogor yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menempuh studi di Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Lautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan tahun 2022.
2. Dr. Taryono, S.Pi, M.Si. dan Prof. Dr. Ir. Bambang Widigdo selaku Komisi Pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, saran, dan bimbingan kepada penulis dalam penyelesaian tesis ini.
3. Dr. Ir. Zairion, M.Sc. selaku Ketua Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Lautan serta seluruh civitas akademik Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor, dalam transfer ilmu pikiran dan bantuan selama perkuliahan, penyelesaian tugas akhir, dan pelayanan administrasi.
4. Dr. Ir. Gatot Yulianto, M.Si. selaku dosen penguji luar komisi dan Dr. Ir. Zairion, M.Sc. selaku pimpinan sidang ujian yang telah memberikan saran dan masukan dalam penyempurnaan penyusunan tesis ini.
5. Lembaga Pengelolaan Dana Pendidikan, Kementerian Keuangan, melalui beasiswa LPDP batch satu tahun 2022.
6. Rasa hormat dan terima kasih yang sedalam - dalamnya bagi penulis sampaikan kepada pihak keluarga (Ayah H. Yahya dan Ibu Hj. Muntiah), atas doa, motivasi, kasih sayang, dan dukungan selama proses masa studi.
7. Segenap rekan seperjuangan SPL-IPB 2022, atas dukungan selama proses masa studi.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan pengembangan ilmu pengetahuan kedepannya bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Agustus 2026

Moch Farid
C2502231017



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xi
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.6 Kerangka Pikir Penelitian	4
II METODE	6
2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	6
2.2 Alat dan Bahan	7
2.3 Pengumpulan Data	7
2.4 Analisis Data	12
III HASIL DAN PEMBAHASAN	33
3.1 Kondisi Biofisik Kawasan Pesisir Kecamatan Brebes	33
3.2 Kesesuaian Lahan Kawasan Pesisir Kecamatan Brebes	45
3.3 Jasa Ekosistem dan Nilai Ekonomi Total Ekosistem Mangrove	53
3.4 Optimasi Alokasi Lahan Kawasan Pesisir Kecamatan Brebes	61
IV SIMPULAN DAN SARAN	69
4.1 Simpulan	69
4.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	83
RIWAYAT HIDUP	101



DAFTAR TABEL

1 Rincian penggunaan lahan di pesisir Kabupaten Brebes pada tahun 2015 dan 2020	1
2 Titik lokasi dan koordinat stasiun penelitian di Kecamatan Brebe	6
3 Jenis dan metode pengumpulan data	7
4 Parameter data kualitas air	8
5 Parameter data hidrooseanografi	8
6 Parameter analisis tanah sedimen mangrove	11
7 Persamaan allometrik pendugaan biomassa mangrove pesisir Brebes	13
8 Matriks kesesuaian lahan untuk tambak budidaya	16
9 Matriks kesesuaian lahan untuk rehabilitasi ekosistem mangrove	16
10 Matriks kesesuaian lahan untuk kegiatan ekowisata mangrove	17
11 Klasifikasi kelas kesesuaian lahan	19
12 Kerangka net benefit per kawasan ekosistem pesisir Kecamatan Brebes	19
13 Kriteria penilaian kelayakan finansial usaha tambak <i>silvofishery</i>	27
14 Variabel keputusan model <i>linear programming</i>	27
15 Koefisien fungsi tujuan model <i>linear programming</i>	28
16 Kendala model <i>linear programming</i> optimasi	29
17 Desain skenario optimasi <i>linear programming</i> kawasan pesisir Brebes	30
18 Parameter analisis sensitivitas model <i>linear programming</i>	31
19 Sintaks formulasi LINDO 6.1 untuk setiap skenario optimasi	31
20 Output yang dilaporkan dari setiap skenario optimasi	32
21 Nilai parameter kualitas air pada setiap stasiun pengamatan	33
22 Nilai hasil analisis hidrooseanografi (gelombang, pasang surut dan kecepatan arus) pesisir Kecamatan Brebes 2025	36
23 Sebaran jenis mangrove pada setiap stasiun pengamatan	39
24 Karakteristik vegetasi mangrove pada setiap stasiun pengamatan	40
25 Simpanan karbon biomassa pada kawasan hutan mangrove dan tambak <i>silvofishery</i>	42
26 Simpanan karbon sedimen pada tiga interval kedalaman di setiap stasiun pengamatan	44
27 Rekapitulasi luasan kelas kesesuaian lahan tambak budidaya	46
28 Rekapitulasi luasan kelas kesesuaian lahan rehabilitasi ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes	48
29 Rekapitulasi luasan kelas kesesuaian lahan ekowisata mangrove di pesisir Kecamatan Brebes	50
30 Rekapitulasi <i>total economic value</i> ekosistem mangrove alami	56
31 Komposisi penerimaan petambak <i>silvofishery</i> per komoditas	59
32 Rekapitulasi <i>total economic value</i> tambak <i>silvofishery</i>	59
33 Ringkasan hasil optimasi <i>linear programming</i> kawasan pesisir Kecamatan Brebes	62
34 Status kendala (<i>binding analysis</i>) hasil optimasi <i>linear programming</i>	63
35 <i>Ranging analysis</i> koefisien fungsi tujuan hasil optimasi <i>linear programming</i>	64

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR GAMBAR

1	Kerangka Pikir Peneliti	5
2	Lokasi Penelitian dan Titik Stasiun Pengambilan Data	6
3	Ilustrasi transek pengambilan data di kawasan hutan mangrove	9
4	Ilustrasi transek pengambilan data mangrove di kawasan tambak	10
5	Ilustrasi pengukuran diameter mangrove	10
6	Ilustrasi transek pengambilan sampel tanah	11
7	Tinggi gelombang signifikan (h_s) bulanan tahun 2025	36
8	Kisaran pasang surut (tidal range) bulanan pada tiga stasiun pengamatan tahun 2025	37
9	Kecepatan arus rata-rata pada titik grid di perairan Pesisir Kecamatan Brebes tahun 2025	37
10	Peta sebaran mangrove di kawasan Pesisir Kecamatan Brebes tahun 2021	39
11	Simpanan karbon biomassa (CAG dan CGB) pada setiap stasiun pengamatan	43
12	Distribusi vertikal simpanan karbon sedimen pada kawasan hutan mangrove dan tambak <i>silvofishery</i>	44
13	Nilai <i>bulk density</i> sedimen pada kawasan hutan mangrove dan tambak <i>silvofishery</i>	45
14	Peta kesesuaian lahan untuk tambak budidaya di pesisir Kecamatan Brebes	46
15	Peta kesesuaian lahan untuk rehabilitasi ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes	48
16	Peta kesesuaian lahan untuk ekowisata mangrove di pesisir Kecamatan Brebes	51
17	Hasil analisis persepsi jasa ekosistem mangrove kategori <i>provisioning services</i>	54
18	Hasil analisis persepsi jasa ekosistem mangrove kategori <i>regulating services</i>	54
19	Hasil analisis persepsi jasa ekosistem mangrove kategori <i>supporting services</i>	55
20	Hasil analisis persepsi jasa ekosistem mangrove kategori <i>cultural services</i>	55

DAFTAR LAMPIRAN

1	Perhitungan present value net benefit tambak <i>silvofishery</i> per tahun	84
2	Perhitungan NPV rehabilitasi mangrove per tahun (model utama, $\phi_t = t/20$)	85
3	Analisis korelasi simpanan karbon biomassa	85
4	Uji Beda simpanan karbon sedimen	86
5	Analisis korelasi Bulk Density dengan simpanan C Sedimen	86
6	Perhitungan <i>total economic value</i> (TEV) ekosistem mangrove alami	87
7	Perhitungan TEV Tambak <i>silvofishery</i>	93
8	Perhitungan Optimalisasi menggunakan linier program	96
9	Dokumentasi Penelitian	98

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Wilayah pesisir merupakan kawasan yang memiliki nilai strategis karena menjadi tempat berlangsungnya berbagai aktivitas ekonomi sekaligus menyediakan jasa ekosistem yang penting bagi keberlanjutan lingkungan. Ekosistem mangrove, terumbu karang, padang lamun, serta kawasan estuari menyediakan berbagai manfaat berupa sumber daya hayati, perlindungan pantai, penyimpanan karbon, hingga penopang mata pencaharian masyarakat pesisir (Bengen 2001; Safitri *et al.* 2022). Tingginya produktivitas kawasan pesisir menjadikannya sebagai salah satu wilayah yang paling intensif dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan pembangunan.

Pemanfaatan kawasan pesisir terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan perkembangan ekonomi. Sekitar 60% penduduk Indonesia bermukim di wilayah pesisir (Rudiarto *et al.* 2018), sementara sebagian besar masyarakat pesisir menggantungkan kehidupannya pada sektor kelautan dan perikanan sebagai sumber pangan dan pendapatan (Foale *et al.* 2013). Kondisi tersebut mendorong berkembangnya berbagai bentuk pemanfaatan ruang, seperti kawasan permukiman, wisata, budidaya perikanan, reklamasi, maupun infrastruktur pesisir (Opa 2011). Di sisi lain, peningkatan kebutuhan terhadap ruang dan sumber daya memicu persaingan antar pengguna yang berpotensi menimbulkan konflik pemanfaatan lahan serta menurunkan kualitas lingkungan apabila tidak dikelola secara berkelanjutan (Burke *et al.* 2015; Damai 2012).

Kabupaten Brebes merupakan salah satu wilayah pesisir di pantai utara Jawa yang memiliki potensi sumber daya pesisir yang besar. Dengan garis pantai sekitar $\pm 72,93$ km (Suhardi *et al.* 2020), kawasan ini didominasi oleh ekosistem mangrove, tambak, muara sungai, serta lahan pertanian yang tersebar pada lima kecamatan pesisir. Data penggunaan lahan menunjukkan adanya perubahan yang cukup signifikan selama periode 2015–2020 (Tabel 1), yaitu peningkatan luas mangrove dari 293,07 ha menjadi 533,23 ha, sementara luas tambak menurun dari 8.882,22 ha menjadi 7.311,84 ha (Azzahra *et al.* 2020). Perubahan tersebut mengindikasikan adanya dinamika pemanfaatan ruang pesisir yang memerlukan pengelolaan secara lebih terarah.

Tabel 1 Rincian penggunaan lahan di pesisir Kabupaten Brebes pada tahun 2015 dan 2020

<i>Land Cover/Land Use</i>	Tahun 2015 (Ha)	Tahun 2020 (Ha)	Perubahan luas <i>land cover</i> (Ha)
Mangrove	293,07	533,23	240,16
Permukiman dan Campuran	4.961,12	6.617,62	1.656,50
Sawah/Tegalan	30.513,77	30.187,48	-326,29
Tambak	8.882,22	7.311,84	-1.570,38

Sumber: (Azzahra *et al.* 2020)

Besarnya potensi tersebut memberikan kontribusi penting terhadap perekonomian daerah. Nilai ekonomi ekosistem mangrove di Desa Kaliwlingi dan Sawojajar masing-masing mencapai Rp12,91 miliar dan Rp5,52 miliar (Christy *et*

al. 2019). Pada sisi lain, produksi perikanan tambak di lima kecamatan pesisir Kabupaten Brebes pada tahun 2021 mencapai 71.987,789 ton dengan nilai ekonomi sekitar Rp491,37 miliar. Kontribusi sektor pertanian, kehutanan, dan perikanan terhadap Produk Domestik Regional Bruto Kabupaten Brebes tahun 2023 mencapai 34,28%, sedangkan subsektor perikanan menyumbang sekitar Rp1,47 triliun atau 7,46% dari total PDRB (BPS Kabupaten Brebes 2024). Data tersebut menunjukkan bahwa ekosistem pesisir merupakan fondasi yang cukup penting bagi pembangunan ekonomi daerah.

Kontribusi ekonomi yang tinggi belum sepenuhnya diikuti oleh pengelolaan pemanfaatan ruang yang mampu menyeimbangkan kepentingan ekonomi dan kelestarian lingkungan. Masyarakat pesisir masih menghadapi berbagai persoalan, seperti rendahnya kesejahteraan, tekanan terhadap sumber daya alam, serta konflik pemanfaatan lahan (Hanim dan Noorman 2017; Imadoeddin *et al.* 2022). Di pesisir Kecamatan Brebes, konflik tersebut tercermin dari kebutuhan mempertahankan tambak sebagai sumber produksi perikanan sekaligus menjaga keberadaan mangrove yang memiliki fungsi ekologis penting, seperti perlindungan pantai, penyimpanan karbon, habitat biota, dan penyanga kualitas perairan.

Pengambilan keputusan terkait pemanfaatan ruang pesisir sering kali lebih didasarkan pada manfaat ekonomi langsung dibandingkan manfaat ekologis yang bersifat nonpasar. Akibatnya, fungsi-fungsi ekosistem mangrove, seperti perlindungan pantai, penyimpanan karbon, serta penyediaan jasa pendukung kehidupan, belum sepenuhnya diperhitungkan dalam proses perencanaan penggunaan lahan. Kondisi tersebut menyebabkan berbagai alternatif pemanfaatan lahan sulit dibandingkan secara objektif karena masing-masing menghasilkan manfaat dalam bentuk yang berbeda.

Pendekatan *Total Economic Value* (TEV) memberikan kerangka yang komprehensif untuk mengatasi permasalahan tersebut. TEV mengintegrasikan nilai guna langsung, nilai guna tidak langsung, nilai pilihan, serta nilai bukan guna ke dalam satuan moneter sehingga seluruh manfaat ekosistem dapat dihitung secara menyeluruh (Barbier *et al.* 2011). Melalui pendekatan ini, manfaat ekologis mangrove dapat diperbandingkan secara setara dengan manfaat ekonomi dari kegiatan budidaya tambak sehingga menjadi dasar yang lebih rasional dalam penyusunan alternatif pemanfaatan lahan.

Selain mempertimbangkan aspek ekonomi, diperlukan alternatif pengelolaan yang mampu mengintegrasikan kepentingan produksi dan konservasi. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah sistem *silvofishery*, yaitu sistem budidaya yang mengombinasikan tambak dengan penanaman mangrove dalam satu kesatuan lahan. Sistem ini memungkinkan kegiatan produksi perikanan tetap berlangsung tanpa menghilangkan fungsi ekologis mangrove sehingga dipandang sebagai bentuk pemanfaatan lahan yang lebih berkelanjutan dibandingkan pemisahan fungsi produksi dan konservasi secara terpisah (Putra *et al.* 2025).

Alternatif pemanfaatan lahan yang memiliki nilai ekonomi berbeda memerlukan suatu metode untuk menentukan kombinasi penggunaan lahan yang memberikan manfaat paling optimal. *Linear programming* merupakan metode optimasi yang banyak digunakan dalam perencanaan penggunaan lahan karena mampu menentukan alokasi sumber daya terbaik berdasarkan fungsi tujuan dan berbagai kendala yang tersedia (Kaim *et al.* 2018). Dalam konteks penelitian ini, metode tersebut digunakan untuk mengoptimalkan alokasi lahan mangrove dan

tambak *silvofishery* dengan mempertimbangkan keterbatasan luas lahan serta kesesuaian pemanfaatannya.

Berbagai penelitian sebelumnya umumnya mengkaji valuasi ekonomi ekosistem mangrove, kesesuaian lahan, maupun sistem *silvofishery* secara terpisah. Penelitian yang mengintegrasikan valuasi ekonomi berbasis TEV, analisis kesesuaian lahan, serta optimasi alokasi ruang menggunakan *linear programming* untuk menentukan komposisi pemanfaatan kawasan pesisir masih relatif terbatas, khususnya pada kawasan pesisir Kecamatan Brebes. Padahal, integrasi ketiga pendekatan tersebut diperlukan agar keputusan pengelolaan kawasan tidak hanya mempertimbangkan keuntungan ekonomi, tetapi juga menjaga fungsi ekologis dan keberlanjutan sumber daya pesisir.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk merumuskan model optimalisasi pemanfaatan kawasan mangrove dan tambak *silvofishery* di pesisir Kecamatan Brebes melalui integrasi pendekatan TEV, analisis kesesuaian lahan, dan *linear programming*. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam penyusunan kebijakan pengelolaan kawasan pesisir yang mampu meningkatkan manfaat ekonomi sekaligus mempertahankan keberlanjutan fungsi ekologis ekosistem pesisir.

1.2 Perumusan Masalah

Dinamika pemanfaatan kawasan pesisir Kecamatan Brebes menunjukkan perlunya pengelolaan yang mampu menyeimbangkan kepentingan ekonomi dan kelestarian ekosistem. Upaya tersebut memerlukan informasi mengenai kondisi biofisik, kesesuaian lahan, dan nilai ekonomi dari setiap alternatif pemanfaatan sebagai dasar dalam menyusun model optimasi penggunaan lahan. Dengan demikian, pemanfaatan kawasan pesisir diharapkan dapat memberikan manfaat ekonomi yang optimal tanpa mengabaikan fungsi ekologisnya.

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana kondisi biofisik kawasan mangrove dan tambak *silvofishery* di pesisir Kecamatan Brebes saat ini sebagai dasar penentuan kesesuaian pemanfaatan lahan?
- Bagaimana tingkat kesesuaian pemanfaatan lahan pada kawasan mangrove dan tambak *silvofishery* di pesisir Kecamatan Brebes?
- Berapakah nilai *Total Economic Value* (TEV) yang dihasilkan dari setiap alternatif pemanfaatan kawasan mangrove dan tambak *silvofishery* di pesisir Kecamatan Brebes?
- Bagaimana model optimalisasi pemanfaatan kawasan mangrove dan tambak *silvofishery* di pesisir Kecamatan Brebes menggunakan *linear programming* berdasarkan nilai ekonomi dan kesesuaian lahannya?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kondisi biofisik pada kawasan tambak dan ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes.
2. Menganalisis kesesuaian pemanfaatan lahan pada kawasan tambak dan ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes.

3. Mengidentifikasi dan menghitung nilai jasa ekosistem mangrove serta biaya pengelolaan pada kawasan tambak dan ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes.
4. Merumuskan model pemanfaatan yang optimal pada kawasan tambak dan ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes.

1.4 Manfaat

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan data dan informasi terkait kondisi biofisik, pemanfaatan dan pengelolaan serta nilai jasa ekosistem yang ada di Kecamatan Brebes, sehingga data dan informasi tersebut dapat menjadi masukan dalam pengelolaan pesisir yang optimal bagi pemerintah setempat.

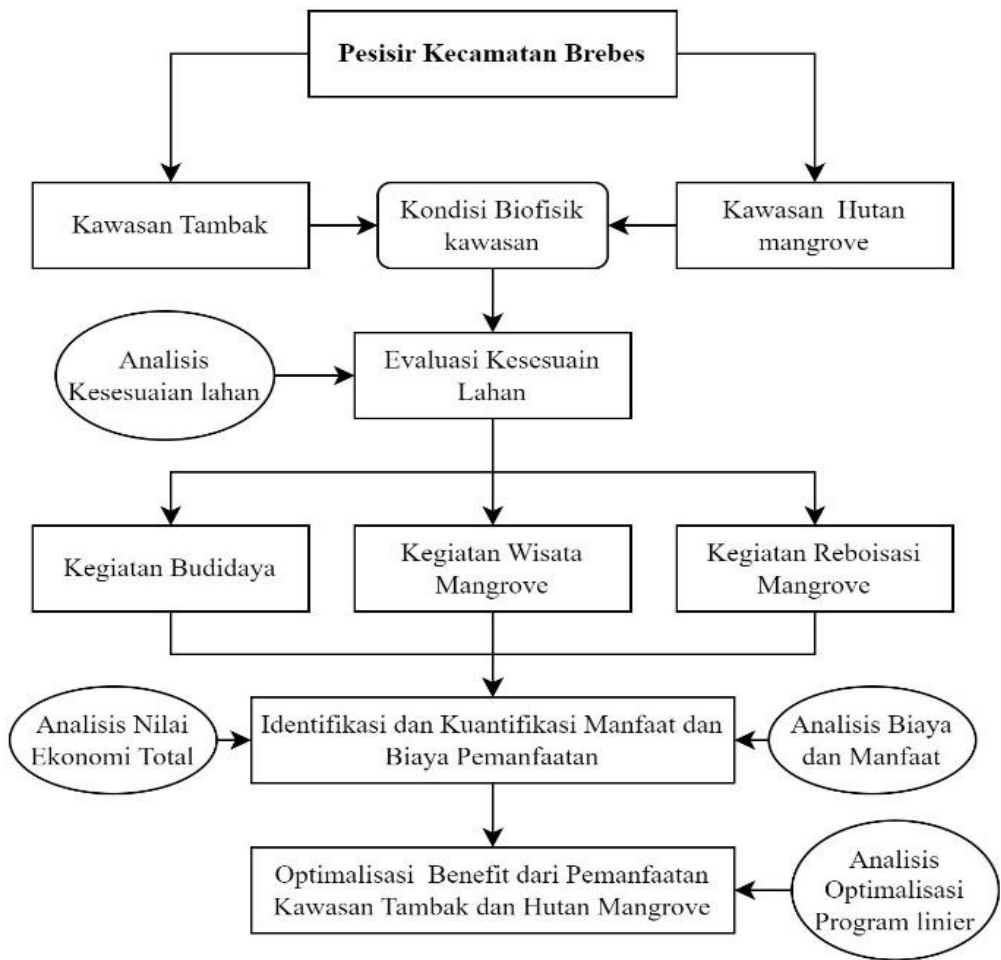
1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi oleh beberapa hal, yaitu:

1. Wilayah studi berada di kawasan pesisir Kecamatan Brebes, Kabupaten Brebes Provinsi Jawa Tengah.
2. Ekosistem yang dikaji yaitu terbatas pada ekosistem mangrove dan tambak yang ada di kawasan pesisir tersebut.
3. Kegiatan pemanfaatan yang dikaji di wilayah studi merupakan aktivitas yang bernilai ekonomi dengan memperhatikan aspek keberlanjutan secara ekologi, yaitu kegiatan budidaya tambak, kegiatan ekowisata mangrove dan kegiatan nelayan di sekitar ekosistem mangrove.
4. Nilai ekonomi karbon terbatas hanya pada penilaian simpanan karbon pada biomassa *above ground*, *below ground* dan simpanan karbon pada tanah.

1.6 Kerangka Pikir Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan dalam satu kerangka kerja (*roadmap*) yang didasarkan pada perubahan pola pemanfaatan lahan di kawasan pesisir Kecamatan Brebes. Variabel yang digunakan dalam kerangka kerja penelitian ini di antaranya yaitu: 1) aspek lingkungan: berisikan parameter fisika, kimia, dan biologi dari kawasan pesisir dengan *output* berupa data kondisi biofisik aktual saat ini dari yang kemudian akan digunakan sebagai acuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian pemanfaatan lahan di kawasan pesisir Kecamatan Brebes, 2) aspek sosial: berupa pengelolaan, pemanfaatan sumber daya dan persepsi masyarakat terkait pemanfaatan ekosistem pesisir dengan *output* berupa pola pengelolaan dan pemanfaatan, serta pandangan masyarakat terkait pemanfaatan pesisir Kecamatan Brebes, dan 3) aspek ekonomi: berupa penghitungan nilai jasa ekosistem yang ada pada ekosistem pesisir dengan *output* nilai jasa ekosistem pesisir Kecamatan Brebes. Selanjutnya akhir dari kerangka kerja ini yaitu untuk akan dirumuskan suatu model pemanfaatan yang optimal yang memperhatikan ketiga variabel diatas untuk mewujudkan pemanfaatan yang berkelanjutan. Rangkaian kerangka tersebut disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Kerangka Pikir Peneliti

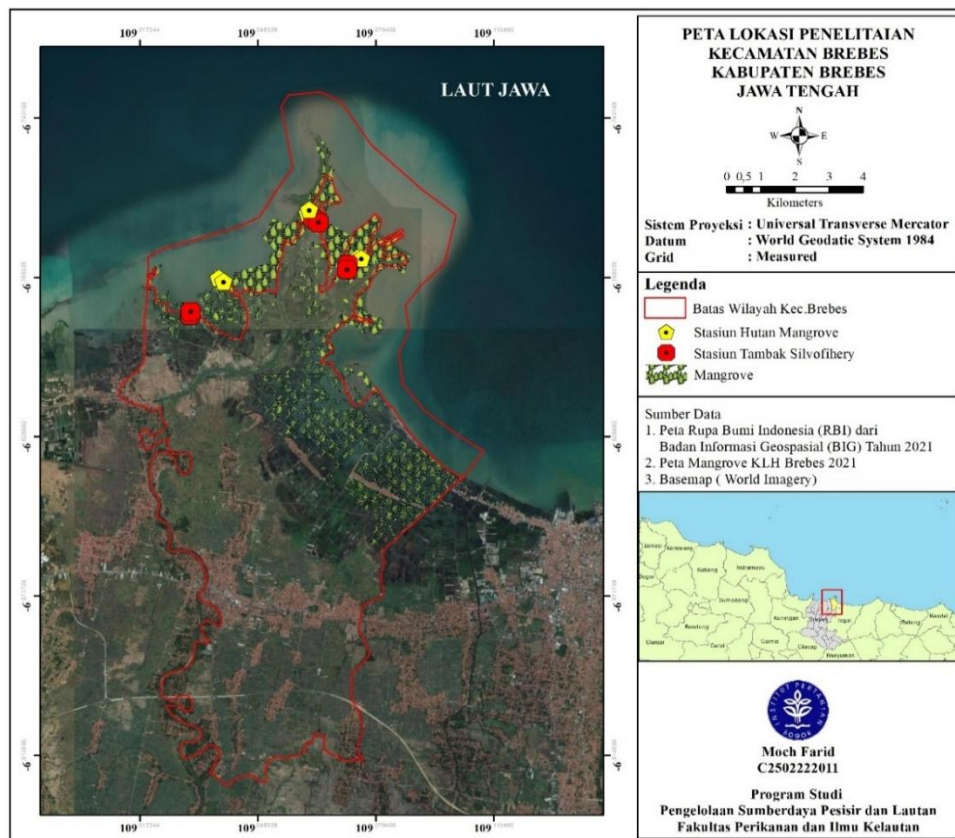
II METODE

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama bulan Februari sampai bulan April 2025 di wilayah pesisir Kecamatan Brebes Kabupaten Brebes. Terdapat enam titik lokasi pengambilan data yang dipilih berdasarkan pertimbangan keterwakilan setiap kegiatan yang di antaranya yaitu tambak *silvofishery* dan ekosistem hutan mangrove di Kecamatan Brebes. Lokasi pengambilan data dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 2.

Tabel 2 Titik lokasi dan koordinat stasiun penelitian di Kecamatan Brebes

Stasiun	Desa	Lat (Y)	Ing (X)	Keterangan
M1	Kaliwlingi	-6,788923	109,046907	Ekosistem mangrove
T1	Kaliwlingi	-6,797753	109,033944	Tambak <i>silvofishery</i>
M2	Kaliwlingi	-6,774220	109,055141	Ekosistem mangrove
T2	Kaliwlingi	-6,793292	109,063648	Tambak <i>silvofishery</i>
M3	Kaliwlingi	-6,778530	109,079743	Ekosistem mangrove
T3	Randusanga Kulon	-6,820101	109,053675	Tambak <i>silvofishery</i>



Gambar 2 Lokasi Penelitian dan Titik Stasiun Pengambilan Data

2.2 Alat dan Bahan

Penelitian menggunakan komputer/laptop dengan perangkat lunak ArcMap, Microsoft Excel, dan LINDO 6.1; GPS untuk penentuan koordinat lapangan; serta alat ukur kualitas air (DO meter, refraktometer, dan pH meter). Peralatan vegetasi dan tanah mencakup roll meter, transek, dan pipa corer. Kuesioner terstruktur digunakan untuk wawancara responden, dilengkapi kamera untuk dokumentasi, serta kantong dan box untuk penyimpanan sampel tanah dan air.

2.3 Pengumpulan Data

Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung di lapangan dan laboratorium untuk memperoleh kondisi biofisik yang faktual dan terperinci, serta melalui wawancara terpandu menggunakan kuesioner untuk data jasa ekosistem. Data sekunder diperoleh melalui studi dokumentasi dan basis data instansi resmi untuk memperkuat dan melengkapi hasil pengamatan lapangan. Jenis data, tujuan analisis, dan metode analisis yang digunakan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Jenis dan metode pengumpulan data

No	Tujuan	Jenis data	Metode analisis data
1.	Menganalisis kondisi biofisik pada kawasan tambak dan ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes	Kualitas air; biologi dan karbon mangrove; karakteristik tanah	Analisis kualitas air; vegetasi mangrove; biomassa mangrove; <i>bulk density</i> ; <i>loss on ignition</i>
2.	Menganalisis kesesuaian pemanfaatan lahan pada kawasan tambak dan ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes	Data biofisik dan spasial	Analisis kesesuaian lahan (GIS-MCDA/WLC)
3.	Mengidentifikasi dan menghitung nilai jasa ekosistem mangrove serta biaya pengelolaan pada kawasan tambak dan ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes	Manfaat langsung dan tidak langsung; komponen biaya pengelolaan kawasan mangrove dan tambak	<i>Total Economic Value (TEV)</i> ; analisis biaya dan manfaat
4.	Merumuskan model pemanfaatan yang optimal pada kawasan tambak dan ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes	Ketersediaan lahan sesuai; nilai net benefit pemanfaatan kawasan	Optimalisasi <i>linear programming</i>

2.3.1 Data Biofisik

Data biofisik mencakup empat komponen: parameter kualitas air, hidrooceanografi, struktur komunitas vegetasi mangrove, serta cadangan karbon dan karakteristik tanah. Data kualitas air, vegetasi, serta karbon dan karakteristik

tanah dikumpulkan secara *in situ* pada stasiun pengamatan; data hidrooseanografi diperoleh dari penelusuran data sekunder instansi resmi sesuai cakupan spasial-temporal kawasan penelitian. Sampel yang memerlukan analisis lanjutan, khususnya parameter kimia air serta sampel vegetasi dan tanah, dianalisis di laboratorium menggunakan metode standar yang berlaku.

a. Parameter Kualitas Air

Pengukuran kualitas air bertujuan mengetahui kondisi aktual perairan pada ekosistem mangrove dan tambak di pesisir Brebes. Pengamatan dilakukan pada enam stasiun (tiga stasiun mangrove, tiga stasiun tambak) dengan dua kali ulangan per stasiun, sehingga total unit pengamatan berjumlah 12 unit. Parameter suhu, salinitas, oksigen terlarut (DO), dan pH diukur *in situ*; amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$) dan nitrit ($\text{NO}_2\text{-N}$) dianalisis di Laboratorium PT Central Proteina Prima mengacu pada APHA (2017). Seluruh hasil dibandingkan terhadap baku mutu air laut untuk biota laut sesuai KepMenLH No. 51 Tahun 2004. Detail parameter dan data kualitas air tersedia pada Tabel 4.

Tabel 4 Parameter data kualitas air

No	Parameter	Satuan	Alat/Metode	Lokasi analisis
1	Suhu	°C	Termometer	<i>In situ</i>
2	Salinitas	‰	Refraktometer	<i>In situ</i>
3	Oksigen Terlarut (DO)	mg/L	DO meter	<i>In situ</i>
4	Derajat Keasaman (pH)	-	pH meter	<i>In situ</i>
5	Amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$)	mg/L	APHA (2017)	Lab. PT Central Proteina Prima
6	Nitrit ($\text{NO}_2\text{-N}$)	mg/L	APHA (2017)	Lab. PT Central Proteina Prima

b. Data Hidrooseanografi

Data hidrooseanografi yang dikumpulkan meliputi gelombang, pasang surut, dan arus laut sebagai data sekunder pada periode tahun 2025. Data pasang surut bersumber dari Badan Informasi Geospasial (BIG) pada tiga titik pengamatan tersendiri (T1, T2, T3) yang tidak identik dengan lokasi stasiun kualitas air, sedangkan data gelombang dan arus laut bersumber dari Copernicus Marine Service. Rincian parameter tersaji pada Tabel 5.

Tabel 5 Parameter data hidrooseanografi

No	Parameter	Variabel	Sumber dan Produk	Cakupan waktu	Resolusi
1	Pasang surut	Tinggi muka air laut (z), datum lokal BIG	BIG, tide gauge/model lokal, 3 stasiun (T1, T2, T3)	1 Januari sampai 31 Desember 2025, per jam	1 jam

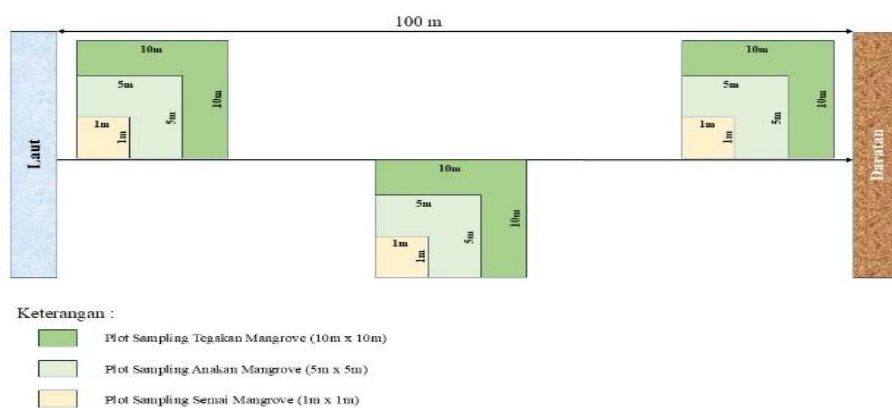
No	Parameter	Variabel	Sumber dan Produk	Cakupan waktu	Resolusi
2	Gelombang	VHM0 (Hs), VTPK (Tp), VMDR (Dir)	Copernicus Marine Service, GLOBAL_ANALYSISFOR ECAST_WAV_001_027 (cmems_mod_glo_wav_anfc _0.083deg_PT3H-i)	1 Januari sampai 31 Desember 2025, interval 3 jam	0,083 derajat (kurang lebih 9 km)
3	Arus laut	uo, vo (komponen arus permukaan)	Copernicus Marine Service, GLOBAL_ANALYSISFOR ECAST_PHY_001_024 (cmems_mod_glo_phy- cur_anfc_0.083deg_P1M-m)	Januari sampai Desember 2025, rata- rata bulanan	0,083 derajat (kurang lebih 9 km), kedalam an 0,494 m

Sumber: BIG (2025); Copernicus Marine Service (2025)

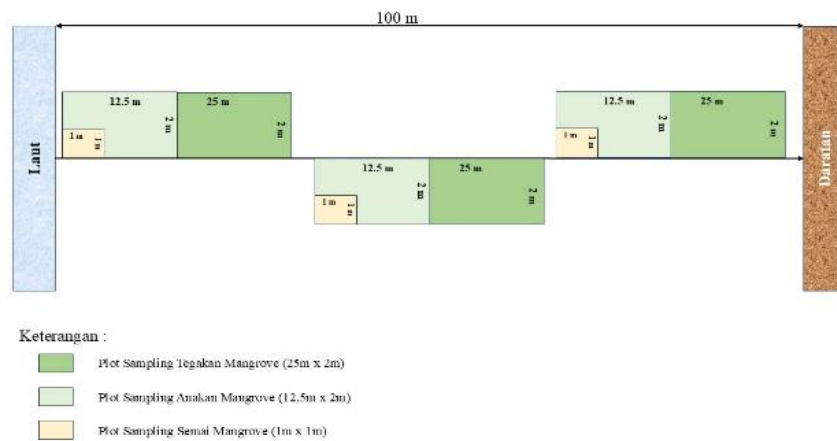
c. Vegetasi Mangrove

Data vegetasi dikumpulkan pada kawasan hutan mangrove dan tambak *silvofishery* menggunakan metode transek kuadrat bersarang (*nested quadrat transect*) dengan penentuan plot secara *purposive sampling*, mempertimbangkan keterwakilan komposisi dan struktur vegetasi.

Pada kawasan hutan mangrove, setiap stasiun memiliki dua jalur transek tegak lurus garis pantai sepanjang 100 m mengikuti gradien zonasi, berjarak 30–50 m antar transek, dengan tiga plot 10 m × 10 m per transek (total 18 plot; Gambar 3). Pada tambak *silvofishery*, plot ditempatkan mengikuti distribusi mangrove pada tanggul dengan upaya sampling setara kawasan hutan (Gambar 4).



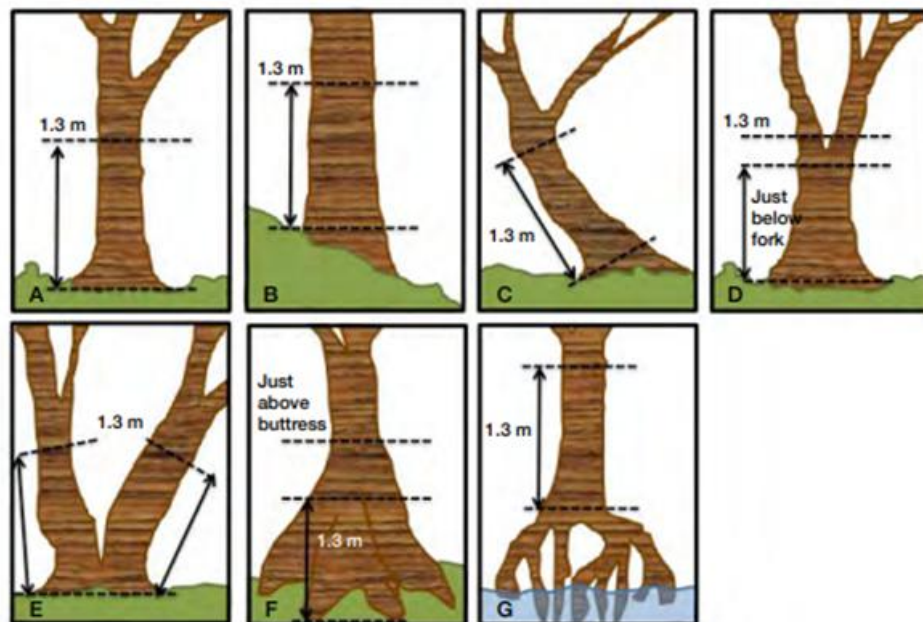
Gambar 3 Ilustrasi transek pengambilan data di kawasan hutan mangrove



Gambar 4 Ilustrasi transek pengambilan data mangrove di kawasan tambak

Setiap plot menggunakan sistem bersarang bertingkat sesuai kategori pertumbuhan. Pada hutan mangrove: plot 10 m × 10 m (pohon dan tiang), 5 m × 5 m (pancang), 1 m × 1 m (semai). Pada tambak *silvofishery*: plot 2 m × 25 m (pohon dan tiang), 2 m × 12,5 m (pancang), 1 m × 1 m (semai). Kategori tegakan mengacu pada Kusmana (1997): pohon berdiameter ≥20 cm, tiang 10–<20 cm, pancang 2–<10 cm, semai <2 cm.

Data yang dicatat meliputi jenis spesies, jumlah individu per kategori, dan diameter batang. Pengukuran *Diameter at Breast Height* (DBH) dilakukan pada ketinggian 1,3 m mengacu pada Howard *et al.* (2014) (Gambar 5); khusus *Rhizophora* spp. yang berakar tunjang, pengukuran dilakukan di atas titik percabangan akar tertinggi sesuai Komiyama *et al.* (2005).



Gambar 5 Ilustrasi pengukuran diameter mangrove

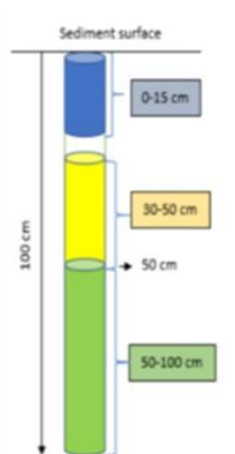
d. Sampel dan Karbon Tanah

Sampel tanah diambil pada setiap plot pengamatan sehingga satu sampel mewakili satu plot, mengacu pada Verisandria *et al.* (2018), menggunakan pipa corer yang dimasukkan vertikal ke dalam sedimen hingga kedalaman 100 cm setelah permukaan dibersihkan dari serasah. Sampel dibagi horizontal ke dalam tiga interval kedalaman (Gambar 6): 0-15 cm, 15-50 cm, dan 50-100 cm. Dari tiap interval diambil sub-sampel setebal 5 cm yang mewakili nilai tengahnya, yaitu kedalaman 5-10 cm, 35-40 cm, dan 75-80 cm. Sub-sampel disimpan dalam kantong plastik berlabel. Parameter tanah yang dianalisis tersaji pada Tabel 6.

Tabel 6 Parameter analisis tanah sedimen mangrove

Parameter	Metode Analisis	Satuan
Bulk Density (BD)	Gravimetri	g/cm ³
Bahan Organik (BO)	Loss on Ignition (LOI)	%
Karbon Organik (%C)	Konversi dari LOI	%
Densitas Karbon	Kalkulasi $BD \times \%C$	g/cm ³
Simpanan Karbon Tanah	Kalkulasi per interval	Mg/ha

Sumber: Howard *et al.* (2014)



Gambar 6 Ilustrasi transek pengambilan sampel tanah

2.3.2 Data Jasa Ekosistem

Data jasa ekosistem dikumpulkan melalui wawancara terstruktur menggunakan kuesioner terhadap tiga kelompok responden, yaitu nelayan, petambak *silvofishery*, dan wisatawan ekowisata mangrove di Kecamatan Brebes. Pengambilan responden dilakukan secara sengaja (*purposive sampling*) berdasarkan keterwakilan jenis kegiatan pemanfaatan sumber daya pesisir (Fauzi dan Anna 2005). Jumlah responden ditetapkan sebanyak 30 orang per kelompok secara sengaja berdasarkan keterwakilan jenis pemanfaatan, konsisten dengan praktik penelitian valuasi ekonomi ekosistem mangrove dan *silvofishery* di pesisir Jawa yang menggunakan rentang 30 sampai 35 responden per strata pemanfaatan (Novida *et al.* 2025; Fauzi 2014).

Pemilihan nelayan mempertimbangkan keterwakilan zona penangkapan di sekitar kawasan mangrove Kaliwlingi dan Randusanga Kulon. Pemilihan petambak didasarkan pada keberadaan unit tambak *silvofishery* aktif dengan masa operasi minimal satu siklus produksi penuh. Pemilihan wisatawan dilakukan di lokasi ekowisata mangrove Pandansari pada hari kunjungan aktif, dengan syarat responden telah menyelesaikan kunjungan. Data yang dikumpulkan mencakup komponen manfaat langsung, manfaat tidak langsung, dan biaya operasional pemanfaatan per kelompok, termasuk data kesediaan membayar (*willingness to pay*) wisatawan melalui pendekatan *Contingent Valuation Method* (CVM).

2.4 Analisis Data

2.4.1 Analisis Parameter Kualitas dan Hidrooseanografi

a. Analisis Kualitas Air

Data dari 12 unit pengamatan dianalisis deskriptif untuk memperoleh rata-rata dan kisaran tiap parameter, dibandingkan antara stasiun mangrove alami (M1–M3) dan tambak *silvofishery* (T1–T3) terhadap baku mutu KepMenLH No. 51 Tahun 2004; nilai yang melampaui baku mutu ditandai eksplisit pada tabel hasil.

b. Analisis Gelombang

Data tinggi gelombang signifikan (H_s), periode puncak (T_p), dan arah datang (Dir) dianalisis deskriptif (rata-rata, simpangan baku, kisaran, median, persentil 95). *Wave steepness* dihitung dari H_s dibagi ($1,56 \times T_p^2$). Data H_s dikelompokkan ke tiga kelas ($<0,5$ m; $0,5–1,0$ m; $>1,0$ m) untuk distribusi frekuensi kumulatif dan pola musiman bulanan. Klasifikasi kesesuaian mengacu pada ambang $H_s <0,5$ m sebagai kategori Sangat Sesuai, mengikuti kriteria Saru *et al.* (2018).

c. Analisis Pasang Surut

Data muka air per jam dianalisis menggunakan Python (*numpy*, *scipy*) untuk menghitung statistik muka air — *Mean Sea Level* (MSL), *Highest/Lowest High-Low Water Level* (HHWL, LLWL), *Mean High/Low Water Level* (MHWL, MLWL), dan kisaran pasang surut (HHWL – LLWL) — serta analisis harmonik menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengekstraksi amplitudo empat komponen utama: M2, S2 (semidiurnal), K1, O1 (diurnal). Tipe pasang surut diklasifikasikan menggunakan bilangan Formzahl (F), yaitu rasio amplitudo komponen diurnal ($K1+O1$) terhadap semidiurnal ($M2+S2$), dengan kriteria $F \leq 0,25$ (semidiurnal), $0,25–1,5$ (campuran dominan semidiurnal), $1,5–3,0$ (campuran dominan diurnal), dan $>3,0$ (diurnal) (Pond dan Pickard 2013).

d. Analisis Arus Laut

Kecepatan arus tiap titik grid dihitung dari resultan komponen u_o dan v_o (akar kuadrat jumlah kuadrat u_o dan v_o), dirata-ratakan tahunan per titik. Analisis dilakukan pada dua cakupan spasial, yaitu seluruh titik grid pada *domain* data dan *subset* sembilan titik grid yang berbatasan langsung dengan garis pantai Kecamatan Brebes, untuk membandingkan kondisi arus umum dengan kondisi pada zona pesisir yang relevan langsung dengan kawasan kajian.

2.4.2 Analisis Vegetasi Mangrove

Kondisi ekosistem mangrove dianalisis melalui indikator kerapatan jenis (*density*), penutupan jenis (*cover*), dan frekuensi jenis (*frequency*). Ketiga parameter tersebut dihitung berdasarkan data hasil pengukuran vegetasi pada setiap plot contoh sebagaimana dijelaskan pada subbab pengumpulan data. Analisis vegetasi mengacu pada metode analisis vegetasi mangrove yang dikemukakan oleh English *et al.* (1997) dan Bengen (2004):

a. Kerapatan Jenis

$$Di = \frac{ni}{A}$$

Keterangan:

Di = Kerapatan jenis

ni = Jumlah total individu dari jenis-i

A = Luas area total pengambilan contoh

b. Penutupan Jenis

$$Ci = \frac{\sum BA}{A}$$

Keterangan:

Ci = Penutupan jenis

BA = $\pi \text{ DBH}^2 / 4$ (dalam cm^2)

π = Konstanta

DBH = Diameter pohon dari jenis i

A = Luas area total pengambilan contoh

c. Frekuensi Jenis

$$Fi = \frac{Pi}{\sum P}$$

Keterangan:

Fi = Frekuensi jenis i

Pi = Jumlah plot contoh dimana ditemukan jenis i

$\sum P$ = Jumlah total plot contoh yang diamati

2.4.3 Analisis Biomassa Tegakan Mangrove

Pendugaan biomassa dilakukan secara non-destruktif menggunakan persamaan allometrik berbasis DBH lapangan, dipilih untuk menghindari kerusakan ekosistem yang diteliti. Persamaan yang digunakan memiliki koefisien determinasi (R^2) di atas 0,90 (Azzahra *et al.* 2020) dan tersaji pada Tabel 7.

Tabel 7 Persamaan allometrik pendugaan biomassa mangrove pesisir Brebes

Spesies	Komponen	Persamaan Allometrik	Satuan	Sumber
<i>Avicennia marina</i>	AGB	$B = 0,1848 \times D^{2,3524}$	kg/pohon	Dharmawan (2008)

Spesies	Komponen	Persamaan Allometrik	Satuan	Sumber
<i>Avicennia marina</i>	BGB	$B = 0,199 \times \rho^{0,899} \times D^{2,22}$	kg/pohon	Komiyama <i>et al.</i> (2005)
<i>Rhizophora mucronata</i>	AGB	$B = 0,1466 \times D^{2,3136}$	kg/pohon	Dharmawan (2013)
<i>Rhizophora mucronata</i>	BGB	$B = 0,199 \times \rho^{0,899} \times D^{2,22}$	kg/pohon	Komiyama <i>et al.</i> (2005)

Keterangan: B = Biomassa (kg/pohon); D = Diameter setinggi dada/DBH (cm); ρ = kerapatan kayu (wood density) dalam g/cm³, dengan nilai ρ *A. marina* = 0,71 g/cm³ dan *R. mucronata* = 0,79 g/cm³ (Zanne *et al.* 2009)

Total biomassa per satuan luas dijumlahkan dari seluruh individu dalam plot lalu dikonversi ke ton/ha. Simpanan karbon tegakan (*Above Ground Carbon/AGC* dan *Below Ground Carbon/BGC*) dihitung berdasarkan SNI 7724:2011 dengan persamaan:

$$C = 0,47 \times B$$

Keterangan:

C = Cadangan karbon (ton/ha)

B = Total biomassa (ton/ha)

0,47 = Fraksi karbon (Kauffman dan Donato 2012)

2.4.4 Analisis Simpanan Karbon Tanah

Perhitungan data cadangan karbon sedimen mengacu pada Howard *et al.* (2014) melalui tahapan berikut:

1. Densitas tanah dihitung dari massa sampel kering dibagi volume sampel, dengan persamaan:

$$BD \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Massa sampel yang dikeringkan (g)}}{\text{Volume sampel (cm}^3\text{)}}$$

2. Bahan organik (%BO) dihitung dari selisih berat sebelum dan sesudah pembakaran *loss on ignition* (450°C, 4 jam):

$$\% BO = \frac{W_o - W_t}{W_o} \times 100$$

Keterangan:

% BO = Bahan organik sedimen yang hilang pada proses pembakaran.

W_o = Berat awal (3 gram)

W_t = Berat akhir setelah pembakaran (gram)

3. Persentase bahan organik dikonversi menjadi persentase karbon organik dengan rumus:

$$\% C = (0,580) \times \% BO$$

Keterangan:

%C = Kandungan karbon bahan sedimen organik.

0,580 = Konstanta untuk mengkonversi % bahan organik menjadi % C organik.

4. Densitas karbon (C) dihitung dengan menggunakan:

$$\text{Soil C density (g/cm}^3\text{)} = (\% \text{ C}/100) \times \text{Bulk Density (g/cm}^3\text{)}$$

5. Kandungan karbon pada tanah diestimasi menggunakan:

$$\text{Soil C (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{BD} \times \text{SDI (Soil Depth Interval)} \times (\% \text{C}) \times 100$$

Keterangan:

SCD = *Soil carbon density* (Densitas karbon)

SDI = Interval kedalaman sampel (cm)

6. Kandungan karbon (Mg/ha) diestimasi dengan menggunakan:

$$\text{Soil Carbon (Mg/ha)} = \text{Soil C (g/cm}^2\text{)} \times 100$$

2.4.5 Analisis Kesesuaian Lahan

Analisis kesesuaian lahan mengevaluasi tingkat kesesuaian kawasan pesisir Kecamatan Brebes terhadap tiga peruntukan: (1) budidaya tambak, (2) rehabilitasi ekosistem mangrove, dan (3) ekowisata mangrove. Pendekatan yang digunakan mengintegrasikan kriteria fisik oseanografi-ekologi dan parameter spasial-aksesibilitas yang seluruhnya bersumber dari data terbuka (*open source*) terverifikasi, mengikuti pendekatan *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) berbasis GIS yang telah diaplikasikan luas dalam studi kesesuaian lahan budidaya perikanan dan ekowisata (Radiarta *et al.* 2008; Nayak *et al.* 2014; Yulianda 2019), sebagaimana tersaji pada Tabel 8, 9, dan 10.

Parameter kualitas air kimia yang bersifat dinamis (DO, amonia, nitrit) dianalisis terpisah sebagai indikator daya dukung lingkungan dan tidak dimasukkan ke dalam matriks kesesuaian spasial, mengingat jumlah dan sebaran titik pengamatan tidak memenuhi syarat minimum interpolasi spasial.

a. Membangun matriks kesesuaian

Matriks kesesuaian disusun untuk setiap peruntukan berdasarkan sintesis referensi tervalidasi ilmiah. Setiap parameter memiliki justifikasi ilmiah dari referensi primer, sumber data spasial terbuka, dan rentang kategori berdasarkan kondisi ekologis pesisir tropis. Sistem penilaian menggunakan skor bertingkat 0, 1, 3, dan 5 mengacu pada Radiarta *et al.* (2008) dan Yulianto *et al.* (2016): 0 = tidak sesuai, 1 = sesuai bersyarat, 3 = cukup sesuai, 5 = sangat sesuai.

b. Pembobotan parameter kesesuaian

Parameter kesesuaian lahan untuk masing-masing peruntukan diadaptasi dari kerangka acuan dominan yang relevan dengan tipe ekosistem dan komoditas kajian: Pariakan *et al.* (2024) untuk tambak budidaya, Saru *et al.* (2018) untuk rehabilitasi ekosistem mangrove, dan Yulianda (2019) untuk ekowisata mangrove. Parameter yang tidak dapat dianalisis secara spasial pada kawasan kajian atau tidak tersedia datanya secara konsisten dieliminasi dari matriks masing-masing peruntukan. Bobot parameter kemudian disesuaikan berdasarkan kajian literatur GIS-MCDA sejenis (Radiarta *et al.* 2008; Nayak *et al.* 2014; Malczewski 1999) dan dinormalisasi sehingga total bobot pada setiap matriks bernilai 1,00 (Tabel 8, 9, dan 10). Proses ini merupakan adaptasi kualitatif terhadap kerangka acuan asli, bukan replikasi langsung skema pembobotan aslinya maupun penerapan *Analytic Hierarchy Process* (AHP) formal.

Tabel 8 Matriks kesesuaian lahan untuk tambak budidaya

No	Parameter	Bobot	Kategori	Skor	Kelas	Referensi
1	Tipe Penggunaan Lahan	0,22	Tambak eksisting	5	S1	Radiarta <i>et al.</i> (2008); Nayak <i>et al.</i> (2014)
			Sawah / lahan basah	3	S2	
			Badan Perairan	1	S3	
			Permukiman / Mangrove	0	N	
2	Ketinggian Lahan (m)	0,21	0 – 2,5	5	S1	Utama <i>et al.</i> (2022) ;
			2,5 - 4	3	S2	
			> 0 ; <4	1	S3	
			-	0	N	
3	Jarak dari Garis Pantai (m)	0,20	130 - 600	5	S1	Utama <i>et al.</i> (2022) ;
			600- 900	3	S2	
			>900	1	S3	
			-	0	N	
4	Jarak dari Sungai (m)	0,195	50 - 200	5	S1	Utama <i>et al.</i> (2022) ; Bandira <i>et al.</i> (2021)
			200 - 400	3	S2	
			>400	1	S3	
			-	0	N	
5	Jarak dari Jalan (m)	0,175	< 500	5	S1	Nayak <i>et al.</i> (2014)
			500–1.000	3	S2	
			1.000–2.000	1	S3	
			> 2.000	0	N	

Tabel 9 Matriks kesesuaian lahan untuk rehabilitasi ekosistem mangrove

No	Parameter	Bobot	Kategori	Skor	Kelas	Referensi
1	Tipe Penggunaan Lahan	0,403333	Tambak	5	S1	PerMen LHK P.23/2021; Syahid <i>et al.</i> (2020)
			Lahan terbuka / pantai /	3	S2	

No	Parameter	Bobot	Kategori	Skor	Kelas	Referensi
2	Kelerengan (%)	0,303333	Badan perairan Hutan Mangrove / Sawah	1	S3	Saru <i>et al.</i> (2018)
			Permukiman / Infrastruktur	0	N	
3	Jarak dari Pantai (m)	0,293333	< 2	5	S1	Prayudha <i>et al</i> (2026)
			2–5	3	S2	
			> 5	1	S3	
			< 200	5	S1	
			200–500	3	S2	
			500–1.000	1	S3	
			> 1.000	0	N	

Tabel 10 Matriks kesesuaian lahan untuk kegiatan ekowisata mangrove

No	Parameter	Bobot	Kategori	Skor	Kelas	Referensi
1	Ketebalan Mangrove (m)	0,38	> 500	5	S1	Yulianda (2019)
			200–500	3	S2	
			50–200	1	S3	
			< 50	0	N	
2	Kerapatan Mangrove (ind/100 m ²)	0,25	16–20	5	S1	Yulianda (2019)
			10–15 ; > 20	3	S2	
			5–9	1	S3	
			< 5	0	N	
3	Jumlah Jenis Mangrove	0,15	> 5 jenis	5	S1	Yulianda (2019)
			3–5 jenis	3	S2	
			1–2 jenis	1	S3	
			0	0	N	
4	Tipe Penggunaan Lahan	0,12	Hutan Mangrove Primer	5	S1	Mankelkelot <i>et al.</i> (2026)
			Hutan Mangrove Sekunder	3	S2	
			Tambak <i>silvofishery</i>	1	S3	



No	Parameter	Bobot	Kategori	Skor	Kelas	Referensi
			Non-vegetasi / Sawah/ Permukiman	0	N	
5	Objek Biota	0,1	≥ 5 jenis	5	S1	Yulianda (2019)
			3–4 jenis	3	S2	
			1–2 jenis	1	S3	
			Tidak ada	0	N	

c. Analisis Spasial GIS

Analisis spasial dilakukan menggunakan ArcMap dan Google Earth Engine (GEE) melalui lima tahap. *Pertama*, akuisisi dan praproses data: seluruh data terbuka diunduh dari platform, dengan harmonisasi resolusi spasial 10 m menggunakan resampling bilinear sesuai resolusi Sentinel-2 (Syahid *et al.* 2020). *Kedua*, klasifikasi tutupan lahan: tipe penggunaan lahan diekstraksi dari citra Sentinel-2 menggunakan klasifikasi *Random Forest* di GEE, divalidasi dengan peta tutupan lahan KLHK (2021). *Ketiga*, analisis kedekatan (*proximity analysis*): jarak dari jalan, sungai, permukiman, dan mangrove eksisting dihitung menggunakan fungsi *Euclidean Distance* (ArcMap Spatial Analyst) dari data BIG RBI dan OSM, menghasilkan raster jarak kontinu yang diklasifikasi ulang sesuai matriks kesesuaian. *Keempat*, skoring dan *Weighted Linear Combination* (WLC): setiap layer raster parameter diberi skor (0/1/3/5) menggunakan *Raster Calculator* (ArcMap Spatial Analyst); *overlay* WLC dilakukan dengan menjumlahkan seluruh layer skor tertimbang, menghasilkan raster Indeks Kesesuaian (IK) kontinu 0–100%. *Kelima*, klasifikasi, luasan, dan validasi: raster IK diklasifikasikan ke kelas S1–S2–S3–N; luasan tiap kelas dihitung dalam hektare dan digunakan sebagai kendala lahan (*land constraint*) pada model optimasi. Validasi lapang dilakukan pada titik stasiun pengamatan dengan target *Overall Accuracy* ≥80%.

d. Menilai kesesuaian lahan

Penilaian kesesuaian dilakukan melalui pengelompokan nilai ke dalam kelas kesesuaian berdasarkan Indeks Kesesuaian (IK), dihitung dari perbandingan total nilai parameter terhadap nilai maksimum yang dapat dicapai, dinyatakan dalam persentase menggunakan persamaan berikut:

$$IK = \left(\sum_{i=1}^n \frac{Ni}{N_{maks}} \right) \times 100$$

Keterangan :

IK = Indeks kesesuaian (%)

Ni = Nilai parameter ke-i (bobot x skor) atas nilai parameter ke- i

Nmaks = Nilai maksimum kelas

N = 1, 2, 3,,9

Batas antar kelas ditentukan dengan membagi selisih nilai indeks maksimum dan minimum dengan jumlah kelas kesesuaian yang ditetapkan. Nilai IK selanjutnya diklasifikasikan ke dalam empat kelas kesesuaian lahan, yaitu Sangat Sesuai (S1), Cukup Sesuai (S2), Sesuai Bersyarat (S3), dan Tidak Sesuai (N). Klasifikasi tersebut disusun berdasarkan rentang nilai indeks kesesuaian yang ditetapkan sebagaimana disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11 Klasifikasi kelas kesesuaian lahan

Kelas	IK (%)	Kategori	Deskripsi
S1	> 80–100%	Sangat Sesuai	Tidak ada pembatas berarti; dapat langsung dikembangkan
S2	> 60–80%	Cukup Sesuai	Pembatas ringan; diperlukan pengelolaan sederhana
S3	> 40–60%	Sesuai Bersyarat	Pembatas sedang; perlu intervensi teknis khusus
N	≤ 40%	Tidak Sesuai	Pembatas berat; tidak direkomendasikan

Sumber: Yulianda (2019) yang dimodifikasi

2.4.6 Analisis Nilai Jasa Ekosistem

Penilaian nilai jasa ekosistem dihitung menggunakan pendekatan *Net Benefit*, pengembangan dari kerangka Nilai Ekonomi Total (*Total Economic Value/TEV*). Manfaat dihitung bruto per komponen, sementara seluruh biaya pemanfaatan diidentifikasi dan dikuantifikasi terpisah; selisih keduanya menghasilkan nilai manfaat bersih per hektare per tahun untuk masing-masing tipe kawasan (TEEB 2010; Fauzi dan Anna 2005).

Pendekatan *net benefit* dipilih karena menghasilkan ukuran ekonomi yang lebih representatif melalui pengurangan seluruh komponen biaya terhadap manfaat sehingga nilai yang diperoleh dapat diperbandingkan secara konsisten antar tipe kawasan. Selain itu, nilai *net benefit* yang dinyatakan dalam satuan rupiah per hektare per tahun dapat digunakan secara langsung sebagai koefisien fungsi tujuan dalam model optimasi alokasi ruang. Pendekatan ini juga memiliki tingkat transparansi yang tinggi karena setiap komponen manfaat dan biaya dihitung secara eksplisit sehingga dapat ditelusuri, diverifikasi, dan divalidasi secara independen (Mishan dan Quah 2020; OECD 2018; Newton *et al.* 2012). Analisis dilakukan terpisah untuk kawasan hutan mangrove dan tambak *silvofishery*, kerangka lengkap komponennya tersaji pada Tabel 12.

Tabel 12 Kerangka net benefit per kawasan ekosistem pesisir Kecamatan Brebes

Kawasan	Kode	Sub-komponen	Metode
HUTAN MANGROVE	ML ₁	Perikanan tangkap (ikan, kepiting, udang)	Market price (nilai bruto)
	ML ₂	Ekowisata mangrove	Simplified TCM (nilai bruto)

Kawasan	Kode	Sub-komponen	Metode
TAMBAK SILVOFISHERY	MTL ₁	Penahan abrasi pantai	<i>Replacement cost</i> breakwater
	MTL ₂	Penyedia unsur hara (serasah mangrove)	<i>replacement cost method</i>
	MTL ₃	Penyerap karbon (biomassa + sedimen)	Harga karbon Rp 30.000/ton CO ₂ -eq
	MP	Keanekaragaman hayati (option value)	Benefit transfer Costanza <i>et al.</i> (2014)
	C_Nelyn	Operasional nelayan (BBM, alat, kapal, konsumsi, amortisasi kapal dan alat)	Wawancara langsung
	C_Rehab	Rehabilitasi dan penanaman mangrove (bibit, tanam, pemeliharaan)	Wawancara langsung
	C_Ekowis	Pengelolaan ekowisata (pemandu, fasilitas, administrasi)	TCM
	ML ₁ _S	Produksi tambak (ikan, kepiting, udang)	<i>Market price</i> (nilai bruto)
	MTL ₁ _S	Penahan erosi tanggul (cost saving approach)	Penghematan biaya perbaikan tanggul
	MTL ₂ _S	Penyedia nutrisi kolam (penghematan pupuk)	<i>Cost saving</i> pupuk terhindarkan
	MTL ₃ _S	Penyerap karbon (biomassa <i>silvofishery</i>)	Harga karbon Rp 30.000/ton CO ₂ -eq
	TC_Var	Biaya variabel produksi (benih, alat panen, upah panen)	Wawancara langsung
	C_Inv	Amortisasi investasi (lahan, tanggul, pintu air, peralatan) ÷ 10 tahun	Wawancara langsung
	C_Operas	Biaya operasional tetap (obat-obatan, BBM, tenaga kerja tetap)	Wawancara langsung

Sumber: TEEB (2010); MEA (2005); Costanza *et al.* (2014); UU HPP No. 7/2021; dan data primer kuesioner yang dimodifikasi

a. Net Benefit Kawasan Hutan mangrove

Net benefit kawasan hutan mangrove dihitung sebagai selisih antara total manfaat bruto yang diperoleh dari ekosistem hutan mangrove dengan total biaya yang dikeluarkan untuk menghasilkan manfaat tersebut:

$$NB_mangrove = (ML_1 + ML_2 + MTL_1 + MTL_2 + MTL_3 + MP) - (C_nelayan + C_rehabilitasi + C_ekowisata)$$

1) ML_1 — Manfaat Langsung Perikanan Tangkap

ML_1 dihitung menggunakan pendekatan harga pasar (*Market price method*), yaitu mengalikan rata-rata hasil tangkap per trip dengan harga jual masing-masing komoditas, kemudian dikonversi menjadi nilai tahunan berdasarkan jumlah hari aktif melaut. Rata-rata hasil tangkap diperoleh dari rata-rata musim banyak dan musim sedikit untuk mewakili variasi produksi selama satu tahun (Freeman *et al.* 2014; FAO 1999). Perhitungan hanya mencakup ikan, kepiting, dan udang, sedangkan kerang tidak diikutsertakan karena jumlah responden penangkap kurang dari tiga orang.

$$ML_1 = \sum [(Q_banyak + Q_sedikit) / 2 \times H_i] \times D_aktif$$

Keterangan:

ML_1	=	Manfaat langsung perikanan tangkap (Rp/tahun)
Q_banyak	=	Hasil tangkap musim banyak per trip (kg/trip)
$Q_sedikit$	=	Hasil tangkap musim sedikit per trip (kg/trip)
H_i	=	Harga jual rata-rata komoditas ke-i (Rp/kg)
D_aktif	=	Hari aktif melaut = $(12 - B_tdk) \times (30 - H_tdk)$ hari/tahun
i	=	ikan (belanak, bandeng, dll), kepiting, udang

2) ML_2 — Manfaat Langsung Ekowisata Mangrove

ML_2 diestimasi menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk mengestimasi manfaat langsung ekowisata mangrove melalui *Simplified Travel Cost Method* (STCM). Metode *Travel Cost* banyak digunakan dalam valuasi ekonomi kawasan wisata alam karena mengestimasi nilai rekreasi berdasarkan biaya yang dikeluarkan pengunjung selama berkunjung, termasuk biaya tiket masuk dan pengeluaran lainnya (Zulpikar *et al.* 2017; Sakti dan Fauzi 2020; Fattah *et al.* 2023). Berikut adalah persamaan yang digunakan:

$$ML_2 = N_total \times (Tiket + Pengeluaran_tambahan_per_kunjungan)$$

Keterangan:

ML_2	=	Manfaat langsung ekowisata (Rp/tahun)
N_total	=	Total kunjungan per tahun — data pengelola Pandansari
Tiket	=	Harga tiket masuk (Rp/orang)
Pengeluaran_tambahan	=	Konsumsi + wahana + dokumentasi per kunjungan (Rp)

3) MTL_1 — Penahan Abrasi Pantai

MTL_1 diestimasi menggunakan metode biaya pengganti (*replacement cost method*), yaitu dengan menghitung biaya pembangunan *breakwater* beton yang memiliki fungsi perlindungan pantai setara dengan ekosistem mangrove. Estimasi biaya konstruksi mengacu pada Harga Satuan Pekerjaan Kementerian PUPR (2024), kemudian dikonversi menjadi nilai manfaat tahunan dengan membagi biaya konstruksi terhadap umur ekonomis *breakwater* selama 20 tahun. Nilai manfaat

penahan abrasi (MTL_1) dihitung sebagai hasil perkalian biaya konstruksi *breakwater* per meter dengan panjang garis pantai yang dilindungi mangrove, kemudian dibagi dengan umur ekonomis struktur. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian valuasi jasa ekosistem mangrove di Indonesia yang menempatkan fungsi perlindungan pantai sebagai salah satu komponen utama nilai guna tidak langsung (Apriadi *et al.* 2025; Yoni dan Heriyanti 2025). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$MTL_1 = (H_{konstruksi} \times L_{pantai}) \div 20$$

Keterangan:

MTL_1	=	Nilai penahan abrasi per tahun (Rp/tahun)
$H_{konstruksi}$	=	Biaya konstruksi <i>breakwater</i> per meter (Rp/m)
L_{pantai}	=	Panjang garis pantai yang dilindungi mangrove (m)
20	=	Umur ekonomis <i>breakwater</i> (tahun)

4) MTL_2 — Penyedia Unsur Hara / Serasah

Pendekatan yang digunakan untuk mengestimasi nilai manfaat ini adalah metode biaya pengganti (*replacement cost method*), yaitu dengan menghitung biaya yang harus dikeluarkan untuk membeli pupuk kimia (urea dan SP-36) yang setara dengan kandungan unsur hara nitrogen dan fosfor yang dihasilkan dari proses dekomposisi serasah mangrove (Novizantara *et al.* 2022), persamaan yang digunakan yaitu:

$$MTL_2 = A \times L_{serasah} \times [(\rho N \times H_{urea}) + (\rho P \times H_{SP36})]$$

Keterangan:

MTL_2	=	Nilai penyedia unsur hara (Rp/tahun)
A	=	Luas ekosistem hutan mangrove (ha)
$L_{serasah}$	=	Laju jatuhnya serasah (ton/ha/tahun)
$\rho N, \rho P$	=	Kandungan nitrogen dan fosfor dalam serasah (%)
H_{urea}	=	Harga pupuk urea (Rp/ton)
H_{SP36}	=	Harga pupuk SP-36 (Rp/ton)
MTL_2	=	Nilai penyedia unsur hara (Rp/tahun)

5) MTL_3 — Penyerap Karbon / Blue Carbon

Nilai penyerap karbon dihitung dengan mengalikan total stok karbon (ton CO_2 -eq/ha) dengan luas ekosistem mangrove dan harga karbon yang berlaku. Metode ini merujuk pada penelitian Lubis *et al.* (2025) yang menghitung nilai ekonomi karbon mangrove menggunakan skenario pasar domestik sesuai Undang-Undang Harmonisasi Peraturan Perpajakan (UU HPP), dengan tarif pajak karbon sebesar Rp 30.000 per ton CO_2 ekuivalen. Tarif tersebut merupakan tarif minimum yang ditetapkan dalam Pasal 13 UU Nomor 7 Tahun 2021 tentang Harmonisasi Peraturan Perpajakan. Perhitungan yang digunakan sebagai berikut:

$$MTL_3 = C_{total} \text{ (ton } CO_2\text{-eq/ha)} \times A \text{ (ha)} \times Rp \text{ 30.000}$$

Keterangan:

MTL_3	=	Nilai penyerap karbon (Rp/tahun)
C_{total}	=	Stok karbon biomassa + sedimen (ton CO_2 -eq/ha)

A = Luas mangrove (ha)
Rp 30.000 = Harga karbon (Rp/ton CO₂-eq)

6) MP — Manfaat Pilihan / Keanekaragaman Hayati

Nilai keanekaragaman hayati diestimasi menggunakan metode transfer manfaat berdasarkan nilai biodiversitas mangrove global (Costanza *et al.* 2014):

$$MP = USD\ 1.779 \times A\ (ha) \times Kurs_BI\ (Rp/USD)$$

Keterangan:

MP = Nilai keanekaragaman hayati (Rp/tahun)
A = Luas ekosistem hutan mangrove (ha)
1.779 = Nilai biodiversitas mangrove (USD/ha/tahun)
Kurs_BI = Kurs tengah USD/IDR Bank BI pada periode survei

7) Biaya Kawasan Hutan mangrove

C_{nelayan} merupakan Biaya Operasional Nelayan. Mencakup seluruh biaya yang dikeluarkan nelayan untuk kegiatan penangkapan ikan di sekitar ekosistem mangrove, meliputi biaya bahan bakar, pelumas, konsumsi, perawatan kapal, serta amortisasi investasi kapal dan alat tangkap:

$$C_{nelayan} = (BBM \times D_{aktif}) + (Olie \times 12) + C_{konsumsi} + C_{perawatan} + (H_{kapal} \div UE_{kapal}) + (H_{alat} \div UE_{alat})$$

Keterangan:

BBM = Biaya BBM per trip (Rp/trip)
Olie = Biaya pelumas per bulan (Rp/bulan)
C_{konsumsi} = Biaya konsumsi per trip × D_{aktif}
C_{perawatan} = Biaya perawatan kapal per tahun
H_{kapal} = Harga kapal
H_{alat} = Harga alat tangkap
UE_{kapal} = Umur ekonomis kapal
UE_{alat} = Umur alat

C_{rehabilitasi} adalah Biaya Rehabilitasi Mangrove. Biaya pemeliharaan ekosistem hutan mangrove diperoleh melalui wawancara dengan kelompok masyarakat yang menjadi pengelola atau penyalur kegiatan rehabilitasi mangrove di Kecamatan Brebes yang difasilitasi oleh BPDAS Pemali Jratun dan Dinas LHK Kabupaten Brebes. Nilai yang diperoleh merupakan rata-rata biaya rehabilitasi per hektar yang mencakup seluruh rangkaian kegiatan pemulihan ekosistem.

C_{ekowisata} merupakan Biaya Pengelolaan Ekowisata. Mencakup seluruh biaya operasional yang dikeluarkan pengelola ekowisata mangrove Pandansari, meliputi honorarium pemandu wisata, biaya perawatan fasilitas (jembatan, gazebo, perahu), biaya administrasi, dan biaya retribusi kawasan:

$$C_{ekowisata} = C_{pemandu} + C_{fasilitas} + C_{administrasi}\ (Rp/tahun)$$

b. Net Benefit Kawasan Tambak *Silvofishery*

Net benefit kawasan tambak *silvofishery* dihitung sebagai selisih antara total manfaat bruto dari kegiatan budidaya dan jasa ekosistem mangrove pematang dengan total biaya produksi dan pengelolaan:

$$NB_{silvo} = (ML_1_S + MTL_1_S + MTL_2_S + MTL_3_S) - (TC_{variabel} + C_{investasi} + C_{operasional})$$

1) ML_1_S - Manfaat Langsung Produksi Tambak

ML_1_S dihitung dari total penerimaan bruto hasil budidaya seluruh komoditas yang dipanen dari sistem tambak *silvofishery*, yaitu ikan (bandeng), kepiting, dan udang:

$$ML_1_S = \sum (Q_i \times H_i \times F_i) \text{ per ha per tahun}$$

Keterangan:

ML_1_S	=	Manfaat langsung produksi tambak (Rp/ha/tahun)
Q_i	=	Hasil panen per siklus komoditas ke-i (kg/ha/siklus)
H_i	=	Harga jual komoditas ke-i (Rp/kg)
F_i	=	Frekuensi panen per tahun (siklus/tahun)
i	=	Ikan (bandeng), kepiting, udang

2) MTL_1_S - Penahan Erosi Tanggul

MTL_1_S dihitung menggunakan pendekatan *reverse avoided cost*, karena mangrove telah menutupi seluruh tanggul tambak saat survei (tutupan 100%), sehingga biaya perbaikan tanggul yang dilaporkan responden merupakan biaya residual setelah mangrove bekerja. Pendekatan ini konsisten dengan temuan Bosma *et al.* (2020) bahwa mangrove tanggul tambak menurunkan biaya pemeliharaan tanggul pada sistem *silvofishery* Jawa Tengah. Biaya perbaikan tanggul tanpa mangrove direkonstruksi dengan membagi biaya aktual dengan proporsi residual ($1 - f$), mengikuti Dasgupta *et al.* (2019).

$$MTL_1_S = C_{tanggul_per_ha} \times f_{penghematan} / (1 - f)$$

Keterangan:

MTL_1_S	=	Nilai penghematan perbaikan tanggul (Rp/ha/tahun)
$C_{tanggul_per_ha}$	=	Biaya perbaikan tanggul aktual per hektar dalam kondisi existing dengan mangrove (Rp/ha/tahun)
$f_{penghematan}$	=	Faktor efektivitas mangrove mereduksi erosi tanggul, ditetapkan 0,30 sebagai skenario konservatif mengingat karakteristik mangrove tanggul di lokasi penelitian yang tipis dan berkerapatan rendah, konsisten dengan rentang penghematan biaya infrastruktur tanggul 25–41% pada literatur (Verhagen 2019; Gijón <i>et al.</i> 2024)
$(1 - f)$	=	Proporsi biaya perbaikan yang masih ditanggung petambak meskipun mangrove sudah ada (= 0,70)

3) MTL₂ S - Penyedia Nutrien Kolam

MTL₂ S dihitung menggunakan pendekatan biaya pengganti (*replacement cost method*), yaitu nilai pupuk anorganik yang dapat disubstitusi oleh nutrien nitrogen dan fosfor dari dekomposisi serasah mangrove ke kolam tambak (Hussain dan Badola 2008) Nilai manfaat dihitung melalui persamaan:

$$MTL_2_{silvo} = V_n + V_p$$

dengan:

$$V_n = (L_s \times fN \times A_m \div KN_{urea}) \times H_{urea}$$

$$V_p = (L_s \times fP \times A_m \times kP \div KP_{sp36}) \times H_{sp36}$$

Keterangan :

L_s = Laju serasah *silvofishery* (7.026,25 kg/ha/tahun)

fN = Fraksi N serasah (0,01262 (1,262%BK))

fP = Fraksi P serasah (0,00063 (0,063% BK))

KN_{urea} = Kadar N Urea (0,46)

kP = Faktor konversi $P \rightarrow P_2O_5$ (2,291)

KP_{sp36} = Kadar P_2O_5 SP-36 (0,36)

H_{urea} = Harga Urea HET subsidi 2025 (Rp 1.800/kg)

H_{sp36} = Harga SP-36 HET subsidi 2025 (Rp 1.840/kg)

A_m = Luas mangrove tanggul *silvofishery*

4) MTL₃ S - Penyerap Karbon *Silvofishery*

Mangrove pada pematang tambak berkontribusi pada penyimpanan karbon biomassa, meskipun dalam skala lebih kecil karena tutupan mangrove yang terbatas (8–26%). Estimasi menggunakan hasil pengukuran biomassa sub-bab 2.4.3:

$$MTL_3_S = C_{Total_{silvo}} (ton CO_2-eq/ha) \times A_{silvo} (ha) \times Rp 30.000$$

Keterangan:

$C_{Total_{silvo}}$ = Stok karbon biomassa + sedimen (ton CO₂-eq/ha)

A_{silvo} = Luas mangrove *silvofishery* (ha)

Rp 30.000 = Tarif minimum pajak karbon (UU HPP No. 7/2021 Pasal 13)

5) Biaya Kawasan Tambak *Silvofishery*

TC_{variabel} adalah Biaya Variabel Produksi. Biaya yang secara langsung terkait dengan proses produksi setiap komoditas per siklus panen, meliputi biaya pengadaan benih, peralatan panen, dan upah tenaga kerja panen. Biaya ini dikalikan dengan frekuensi panen per tahun:

$$TC_{variabel} = \sum (Benih_i + Alat_i + Upah_i) \times F_i \text{ per ha per tahun}$$

$C_{investasi}$ merupakan Amortisasi Investasi. Seluruh biaya investasi awal (lahan, tanggul, pintu air, pondok, perahu, mesin, dan peralatan) diamortisasi selama 10 tahun:

$$C_{investasi} = Total_{investasi} (Rp/ha) \div 10$$

$C_{operasional}$ yaitu Biaya Operasional Tetap. Biaya rutin tahunan di luar biaya variabel produksi, meliputi obat-obatan/probiotik, bahan bakar operasional, dan upah tenaga kerja tetap:

$$C_{operasional} = C_{obat} + C_{BBM} + C_{TK_{tetap}} \quad (Rp/ha/tahun)$$

Keterangan:

- C_{obat} = Rp 627.679/ha/tahun rata-rata (kuesioner, n=28)
 C_{BBM} = Rp 1.425.556/ha/tahun rata-rata (kuesioner, n=18)
 $C_{TK_{tetap}}$ = Upah tenaga kerja tetap non-panen (kuesioner petambak)

2.4.7 Analisis Kelayakan Finansial Tambak *Silvofishery*

Analisis kelayakan finansial mengevaluasi viabilitas investasi budidaya dari perspektif petambak individual, menggunakan data arus kas aktual hasil kuesioner. Periode analisis ditetapkan 10 tahun dengan *discount rate* 12%, mengacu kisaran tingkat diskonto yang lazim pada analisis kelayakan usaha perikanan Indonesia sebesar 10–15% (Primyastanto 2011; Kadariah 2001).

a. Analisis Pendapatan dan Biaya

Pendapatan bersih (π) usaha tambak dihitung sebagai selisih antara total penerimaan dan total biaya per periode:

$$\pi = TR - TC$$

Keterangan:

- π = Pendapatan bersih (Rp/ha/tahun)
 TR = ML_1_S (penerimaan bruto seluruh komoditas tambak)
 TC = $TC_{variabel} + C_{operasional}$ (total biaya produksi per tahun)

b. Analisis Kelayakan Finansial

Net Present Value (NPV): mengukur nilai kini bersih arus kas selama 10 tahun pada DR 12%:

$$NPV = \sum [(B_t - C_t) / (1 + 0,12)^t] \quad \text{untuk } t = 0, 1, 2, \dots, 10$$

Keterangan:

B_t = Penerimaan tahun ke- t ;

C_t = Total biaya tahun ke- t

Kriteria: $NPV > 0 \rightarrow$ layak (Kriteria penilaian kelayakan finansial usaha tambak *silvofishery* disajikan dalam Tabel 13)

Net Benefit-Cost Ratio (Net B/C): efisiensi manfaat terhadap biaya:

$$Net\ B/C = \sum [(B_t - C_t) / (1 + i)^t]^+ \div \sum [(B_t - C_t) / (1 + i)^t]^-$$

Kriteria: $Net\ B/C > 1 \rightarrow$ layak

Tabel 13 Kriteria penilaian kelayakan finansial usaha tambak *silvofishery*

Kriteria	Layak	Tidak Layak	Interpretasi
NPV	$NPV > 0$	$NPV \leq 0$	Nilai kini bersih manfaat melebihi biaya selama 10 tahun pada DR 12%
Net B/C	$Net\ B/C > 1$	$Net\ B/C \leq 1$	Setiap Rp 1 biaya menghasilkan manfaat lebih dari Rp 1
IRR	$IRR > 12\%$	$IRR \leq 12\%$	Tingkat pengembalian internal melebihi DR 12%

Sumber: Gittinger (1986); Kadariah (2001); Primyastanto (2011)

2.4.8 Analisis Optimalisasi

Optimasi pemanfaatan kawasan tambak *silvofishery* dan ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes dilakukan menggunakan metode *linear programming* (LP) dengan bantuan perangkat lunak LINDO 6.1. Metode ini dipilih karena mampu mengoptimalkan alokasi sumber daya dengan mengintegrasikan nilai *total economic value* (TEV) sebagai koefisien fungsi tujuan. Pendekatan tersebut telah banyak diterapkan dalam pengelolaan sumber daya pesisir tropis yang menghadapi konflik antara kegiatan budidaya dan konservasi mangrove (Aguero *et al.* 1996; Cruz-Trinidad *et al.* 1996)

Model dibangun berdasarkan kerangka *Integrated Functional Coefficients* (IFC) yang dikembangkan Aguero *et al.* (1996), yaitu mengonsolidasikan nilai ekonomi berbagai penggunaan lahan ke dalam satuan moneter (*numeraire*). Nilai net benefit (NB) per hektare per tahun yang diperoleh pada Tujuan 3 digunakan sebagai koefisien fungsi tujuan *linear programming*. Variabel keputusan model disajikan pada Tabel 14.

Tabel 14 Variabel keputusan model *linear programming*

Variabel	Simbol	Definisi	Satuan
Luas tambak <i>silvofishery</i> yang dipertahankan	X_1	Luas kawasan tambak <i>silvofishery</i> yang secara optimal dipertahankan dalam jangka waktu perencanaan 20 tahun; bersumber dari tambak eksisting yang sudah beroperasi	ha
Luas rehabilitasi mangrove tambahan	X_2	Luas tambak yang dikonversi menjadi kawasan rehabilitasi mangrove; setelah berhasil, bergabung dengan kawasan mangrove alami eksisting (645,29 ha) membentuk total kawasan mangrove	ha

Sumber: Hasil analisis (2025); Cruz-Trinidad *et al.* (1996)

Fungsi tujuan model LP adalah memaksimalkan total nilai kini (*present value*) kawasan pesisir Brebes selama periode perencanaan 20 tahun dengan *discount rate* 12% per tahun. Fungsi tujuan dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Maks } Z = \text{PV}_{\text{silvo}} \cdot X_1 + \text{NPV}_{\text{rehab}} \cdot X_2 \dots\dots\dots (1)$$

Dengan:

- Z = Total nilai kini kawasan hasil keputusan alokasi lahan (Rp)
 PV_{silvo} = Nilai kini *net benefit* tambak *silvofishery* selama 20 tahun (Rp/ha);
 $\text{NPV}_{\text{rehab}}$ = Nilai kini bersih rehabilitasi mangrove selama 20 tahun (Rp/ha);
 X_1 = Luas tambak *silvofishery* yang dipertahankan (ha);
 X_2 = Luas rehabilitasi mangrove tambahan (ha).

Koefisien PV_{silvo} dihitung menggunakan pendekatan *present value* karena tambak yang dipertahankan merupakan tambak eksisting sehingga tidak memerlukan investasi awal. Sebaliknya, $\text{NPV}_{\text{rehab}}$ dihitung menggunakan *net present value* karena rehabilitasi mangrove memerlukan investasi pada tahun pertama sebelum menghasilkan manfaat ekonomi secara bertahap.

Periode analisis selama 20 tahun ditetapkan berdasarkan lama rehabilitasi mangrove Kaliwlingi (2004–2024), sedangkan *discount rate* sebesar 12% mengacu pada kisaran tingkat diskonto yang umum digunakan dalam analisis kelayakan usaha perikanan di Indonesia (Primyastanto 2011; Kadariah 2001). Koefisien PV_{silvo} dihitung menggunakan faktor anuitas selama 20 tahun sebagaimana disajikan pada Persamaan (2), sedangkan rincian perhitungannya disajikan pada Lampiran 1.

$$\text{PV}_{\text{silvo}} = 18.207.833 \times [(1 - (1,12)^{-20}) / 0,12] = 18.207.833 \times 7,4694 = \text{Rp } 136.002.382/\text{ha} \dots (2)$$

Koefisien X_2 ($\text{NPV}_{\text{rehab}}$) mencerminkan nilai kini dari aliran manfaat mangrove yang tumbuh bertahap selama 20 tahun, dikurangi biaya rehabilitasi di tahun pertama. Kurva pemulihan ekosistem diasumsikan linear ($\phi_t = t/20$) sebagai pendekatan paling konservatif yang menghasilkan estimasi $\text{NPV}_{\text{rehab}}$ terendah di antara berbagai bentuk kurva pemulihan yang mungkin, detail perhitungan disajikan pada Lampiran 2, persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$\text{NPV}_{\text{rehab}} = \sum_{t=1}^{20} [(t/20) \times 189.793.035 / (1,12)^t] - 70.000.000 = \text{Rp } 427.608.992/\text{ha} \dots (3)$$

Kedua koefisien dan basis perhitungannya disajikan pada Tabel 15. Rasio $\text{NPV}_{\text{rehab}}/\text{PV}_{\text{silvo}} = 1:3,15$ — jauh lebih seimbang dari rasio NB tahunan langsung (1:10,4) — menghasilkan *trade-off* yang bermakna dalam proses optimasi.

Tabel 15 Koefisien fungsi tujuan model *linear programming*

Koefisien	Var.	Nilai (Rp/ha)	Basis Perhitungan
PV net benefit tambak (PV_{silvo})	X_1	136.002.382	$\text{NB}_{\text{silvo}} \times \text{annuity factor (12\%, 20 tahun)} = \text{Rp } 18.207.833 \times 7,4694$; DR 12% mengacu pada analisis kelayakan

Koefisien	Var.	Nilai (Rp/ha)	Basis Perhitungan
NPV rehabilitasi mangrove (NPV_rehab)	X ₂	427.608.992	finansial T3 penelitian ini (Primyastanto 2011; Kadariah 2001) $\sum_{t=1}^{20} [\varphi_t \times \text{NB_mangrove} / (1,12)^t] - C_{\text{rehab}}$; $\varphi_t = t/20$ (kurva <i>linear</i>); NB_mangrove = Rp 189.793.035 /ha/tahun; C_rehab = Rp 70.000.000/ha; jangka waktu 20 tahun berbasis data aktual rehabilitasi mangrove Brebes 2004–2024

Sumber: Hasil analisis (2025); T3 penelitian ini; Primyastanto (2011); Kadariah (2001)

Model LP memiliki lima kendala yang mencerminkan batasan fisik, ekologis, dan sosial-ekonomi kawasan. Kendala K1 menggunakan luas tambak eksisting total (2.709,12 ha) sebagai batas atas, bukan luas kesesuaian lahan S1+S2 (2.195,45 ha). Ini mengikuti preseden Cruz-Trinidad *et al.* (1996) yang menggunakan luas eksisting setiap tipe lahan sebagai batas atas kendala LP, dengan justifikasi bahwa analisis kesesuaian lahan berlaku untuk lokasi pengembangan baru, sementara tambak yang sudah beroperasi memiliki infrastruktur dan izin yang menjadikannya layak secara praktis untuk dipertahankan. Luas S1+S2 tambak tetap digunakan dalam pembahasan sebagai informasi proporsi tambak yang optimal secara ekologis dan sebagai kandidat prioritas yang tidak perlu dikonversi. Kelima kendala disajikan pada Tabel 16.

Tabel 16 Kendala model *linear programming* optimasi

Kode	Formulasi	Deskripsi	Justifikasi
K1	$X_1 \leq 2.709,12$	Luas tambak yang dipertahankan tidak melebihi luas tambak eksisting yang sudah beroperasi; analisis kesesuaian lahan berlaku untuk lokasi baru, bukan operasi eksisting	Luas tambak eksisting (data lapang); Cruz-Trinidad <i>et al.</i> (1996) — batas atas menggunakan luas eksisting setiap tipe lahan
K2	$X_2 \leq 3.638,15$	Luas rehabilitasi tidak melebihi luas lahan yang secara ekologis sesuai (kelas S1+S2) dari analisis kesesuaian lahan T2; mencegah rehabilitasi di lahan yang tidak cocok secara ekologis	Output T2 (GIS-WLC): S1=1.703,48 ha + S2=1.934,67 ha; Saru <i>et al.</i> (2018)
K3	$X_1 + X_2 \leq 2.709,12$	Total lahan yang diputuskan (tambak dipertahankan + tambak dikonversi ke rehabilitasi) tidak melebihi total tambak eksisting; lahan	Prinsip keseimbangan lahan; Cruz-Trinidad <i>et al.</i> (1996)

Kode	Formulasi	Deskripsi	Justifikasi
		rehabilitasi hanya bersumber dari tambak yang dilepaskan	
K4	$X_1 \geq \alpha \times 2.709,12$	Luas tambak yang dipertahankan tidak kurang dari proporsi minimum (α) untuk menjamin keberlanjutan mata pencaharian petambak; nilai α bervariasi antar skenario	Kendala sosial-ekonomi; data kuesioner petambak ($n=30$); Cruz-Trinidad <i>et al.</i> (1996)
K5	$X_1, X_2 \geq 0$	Luas lahan tidak dapat bernilai negatif	Syarat non-negativitas standar LP; Agüero <i>et al.</i> (1996)

Sumber: Hasil analisis (2025); Cruz-Trinidad *et al.* (1996); Agüero *et al.* (1996)

Kendala K3 dalam bentuk $X_1 + X_2 \leq 2.709,12$ ha secara efektif menyatakan bahwa $X_2 \leq 2.709,12 - X_1$, yaitu lahan rehabilitasi hanya bisa bersumber dari tambak yang dilepaskan. Kendala ini menciptakan *trade-off* langsung antara X_1 dan X_2 : setiap hektar tambak yang dilepaskan memungkinkan penambahan satu hektar rehabilitasi. Nilai α pada K4 ditetapkan berdasarkan data kuesioner petambak ($n = 30$ responden) terkait tingkat ketergantungan mata pencaharian.

Model dijalankan dalam tiga skenario dengan variasi nilai α , mengikuti pendekatan skenario komparatif Cruz-Trinidad *et al.* (1996). Perbandingan hasil antar skenario mengkuantifikasi nilai ekonomi dari kebijakan konservasi pada berbagai tingkat perlindungan mata pencaharian. Desain skenario disajikan pada Tabel 17.

Tabel 17 Desain skenario optimasi *linear programming* kawasan pesisir Brebes

Skenario	α	X_1 min (ha)	Maks X_2 efektif (ha)	Deskripsi
S1- Baseline	1,00	2.709,12	0	Status quo; tidak ada perubahan alokasi lahan; nilai acuan pembanding skenario S2 dan S3
S2- Konservasi Moderat	0,75	2.031,84	677,28	Minimal 75% tambak eksisting dipertahankan; hingga 677,28 ha tambak dapat dikonversi ke rehabilitasi mangrove
S3- Konservasi Maksimal	0,50	1.354,56	1.354,56	Minimal 50% tambak eksisting dipertahankan; hingga 1.354,56 ha tambak dapat dikonversi ke rehabilitasi mangrove

Sumber: Hasil analisis (2025); Cruz-Trinidad *et al.* (1996)

Analisis sensitivitas bertujuan untuk menguji robustness hasil terhadap ketidakpastian asumsi kurva pemulihan ekosistem. Sebagai batas atas alternatif,

digunakan $\phi = 0,81$ dari meta-analisis Su *et al.* (2021) yang melaporkan *log response ratio* $RR' = -0,21$ antara mangrove rehabilitasi dan mangrove alami — dikonversi menggunakan $e^{(-0,21)} \approx 0,81$. Sensitivitas dijalankan untuk Skenario S2. Apabila rekomendasi alokasi lahan (X_1^* dan X_2^*) tidak berubah antara model utama dan sensitivitas, model dinyatakan robust. Parameter sensitivitas disajikan pada Tabel 18.

Tabel 18 Parameter analisis sensitivitas model *linear programming*

Parameter	Nilai ϕ	NPV_rehab (Rp/ha)	Sumber
Model utama — kurva linear	$\phi_t = t/20$	427.608.992	Data rehabilitasi mangrove Brebes 2004–2024; asumsi pertumbuhan linear sebagai pendekatan konservatif
Sensitivitas rata-rata agregat global	$\phi = 0,81$	1.079.123.439	Su <i>et al.</i> (2021): $RR' = -0,21$ dikonversi dengan $e^{(-0,21)} \approx 0,81$; meta-analisis 167 studi restorasi mangrove global; Nat Commun 12:5050

Sumber: Su *et al.* (2021); data rehabilitasi mangrove Brebes (2004–2024)

Seluruh koefisien dihitung di Microsoft Excel, kemudian dimasukkan ke LINDO 6.1 dengan sintaks sebagaimana disajikan pada Tabel 19. Setiap skenario dijalankan secara terpisah dengan mengubah nilai K4. LINDO 6.1 menghasilkan solusi optimal X_1^* , X_2^* , dan Z^* , beserta *ranging analysis* yang menunjukkan kisaran koefisien dan nilai *right-hand side* yang masih mempertahankan solusi basis yang sama akan digunakan untuk memperkuat analisis sensitivitas.

Tabel 19 Sintaks formulasi LINDO 6.1 untuk setiap skenario optimasi

Elemen	S1 ($\alpha=1,00$)	S2 ($\alpha=0,75$)	S3 ($\alpha=0,50$)
Fungsi tujuan	MAX 136002382 X1 + 427608992 X2	MAX 136002382 X1 + 427608992 X2	MAX 136002382 X1 + 427608992 X2
K1	$X1 \leq 2709,12$	$X1 \leq 2709,12$	$X1 \leq 2709,12$
K2	$X2 \leq 3638,15$	$X2 \leq 3638,15$	$X2 \leq 3638,15$
K3	$X1 + X2 \leq 2709,12$	$X1 + X2 \leq 2709,12$	$X1 + X2 \leq 2709,12$
K4	$X1 \geq 2709,12$	$X1 \geq 2031,84$	$X1 \geq 1354,56$
Non-negativitas	$X1 \geq 0$; $X2 \geq 0$ (default kontinu)	$X1 \geq 0$; $X2 \geq 0$ (default kontinu)	$X1 \geq 0$; $X2 \geq 0$ (default kontinu)

Sumber: Hasil analisis (2025)

Output primer setiap skenario berupa X_1^* , X_2^* , dan Z^* dari LINDO 6.1. Output turunan dihitung setelah optimasi dan disajikan pada Tabel 20. Perbedaan total NB kawasan antar skenario menjadi dasar kuantitatif rekomendasi alokasi lahan optimal sebagai jawaban Tujuan 4 penelitian ini.

Tabel 20 Output yang dilaporkan dari setiap skenario optimasi

Output	Formula / Keterangan
X₁* — Luas tambak optimal (ha)	Nilai optimal X ₁ hasil LINDO 6.1
X₂* — Luas rehabilitasi optimal (ha)	Nilai optimal X ₂ hasil LINDO 6.1
Z* — Nilai fungsi tujuan (Rp)	$Z^* = PV_{\text{silvo}} \times X_1^* + NPV_{\text{rehab}} \times X_2^*$ [output langsung LINDO 6.1]
Total luas mangrove akhir (ha)	$645,29 + X_2^*$
Total NB kawasan equilibrium (Rp/tahun)	$(NB_{\text{silvo}} \times X_1^*) + (NB_{\text{mangrove}} \times (645,29 + X_2^*))$ Nilai tahunan kawasan setelah ekosistem mangrove rehabilitasi mencapai fungsi penuh pada t=20
Peningkatan NB vs S1 (Rp/tahun dan %)	Total NB skenario S _n – Total NB S1; dinyatakan dalam nilai absolut dan persentase

Sumber: Hasil analisis (2025)



III HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kondisi Biofisik Kawasan Pesisir Kecamatan Brebes

Kondisi biofisik kawasan pesisir Kecamatan Brebes menjadi dasar penting dalam menentukan kesesuaian dan keberlanjutan pemanfaatan ruang, baik untuk kegiatan budidaya tambak maupun rehabilitasi ekosistem mangrove. Boagian ini menyajikan empat aspek biofisik utama yang saling berkaitan, yaitu kualitas air, kondisi hidrooseanografi, komunitas vegetasi mangrove, dan cadangan karbon mangrove. Keempat aspek tersebut dianalisis pada enam stasiun pengamatan yang terbagi menjadi tiga stasiun hutan mangrove (M1, M2, M3) di kawasan Kaliwlingi/Pandansari dan tiga stasiun tambak *silvofishery* (T1, T2, T3) yang mencakup Kaliwlingi dan Randusanga Kulon.

Penyajian keempat aspek tersebut disusun secara berurutan dan saling terkait. Kondisi kualitas air dan hidrooseanografi diuraikan terlebih dahulu sebagai parameter lingkungan dasar yang membentuk karakteristik fisik dan kimiawi perairan. Kondisi ini selanjutnya menjadi konteks untuk memahami komunitas vegetasi mangrove yang tumbuh dan berkembang di kawasan tersebut, baik pada ekosistem hutan mangrove maupun pada tambak *silvofishery*. Struktur dan kerapatan vegetasi yang terbentuk kemudian menjadi dasar bagi analisis cadangan karbon mangrove, mengingat besaran biomassa danutupan vegetasi secara langsung memengaruhi kapasitas penyimpanan karbon pada kedua tipe ekosistem.

3.1.1 Kualitas Air

Pengukuran kualitas air dilakukan pada enam stasiun pengamatan dengan parameter yang meliputi suhu, salinitas, derajat keasaman (pH), oksigen terlarut (DO), amonia (NH₃-N), dan nitrit (NO₂-N). Pengukuran parameter fisika dilakukan secara *in situ*, sedangkan parameter kimia dianalisis di laboratorium PT Central Proteina Prima. Hasil pengukuran selengkapnya disajikan pada Tabel 21.

Tabel 21 Nilai parameter kualitas air pada setiap stasiun pengamatan

Stasiun	Suhu (°C)	Salinitas (ppt)	pH	DO (mg/L)	Amonia(mg/L)	Nitrit(mg/L)
M1	32,75	24,20	8,10	4,98	0,0025	0,0270
M2	28,30	0,10	7,70	4,59	0,0085	0,2415*
M3	29,60	0,10	7,70	3,61	0,0090	0,0515
T1	32,80*	19,60	8,40	5,84	0,0135	0,0205
T2	31,35	16,35	8,15	4,74	0,0030	0,0190
T3	32,20	18,90	8,10	2,49*	0,0125	0,0225
Baku mutu	28 sampai 32	≤ 34	7 sampai 8,5	≥ 5	≤ 0,3	≤ 0,06

Keterangan: M = stasiun hutan mangrove; T = stasiun tambak *silvofishery*; * = melampaui baku mutu. Baku mutu mengacu pada KepMenLH No. 51 Tahun 2004 untuk biota laut. Sumber: Hasil pengukuran lapang dan analisis laboratorium (2024)

Berdasarkan Tabel 21, kualitas perairan di lokasi penelitian secara umum masih memenuhi baku mutu untuk sebagian besar parameter. Suhu berkisar 28,30 - 32,80°C dengan satu stasiun (T1) sedikit melebihi baku mutu, sedangkan pH (7,70 - 8,40) dan amonia (0,0025-0,0135 mg/L) memenuhi baku mutu di seluruh stasiun. Salinitas menunjukkan variasi terbesar, yaitu 0,10 - 24,20 ppt. Sebaliknya, DO berkisar 2,49 - 5,84 mg/L dengan hanya T1 memenuhi baku mutu, sedangkan nitrit berkisar 0,0190 - 0,2415 mg/L dan melampaui baku mutu di stasiun M2.

Perbedaan kualitas air antara ekosistem mangrove dan tambak *silvofishery* dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik hidrologi dan tutupan lahan pada kedua sistem. Suhu permukaan air di kawasan mangrove cenderung lebih rendah dibandingkan tambak karena tutupan vegetasi yang lebih rapat mampu mereduksi radiasi matahari melalui efek peneduhan dan *evapotranspirasi*, sehingga menciptakan iklim mikro yang lebih stabil. Selain itu, proses pertukaran massa air akibat pasang surut meningkatkan pencampuran dan pembaruan massa air, yang turut menjaga kestabilan kondisi termal perairan. Temuan ini sejalan dengan Aryanto *et al.* (2025), yang melaporkan bahwa peningkatan kerapatan mangrove berkaitan dengan penurunan suhu permukaan.

Salinitas menunjukkan pola yang berbeda antara ekosistem mangrove dan tambak *silvofishery*. Nilai salinitas yang sangat rendah pada stasiun M2 dan M3 disebabkan oleh dominasi aliran air tawar dari badan sungai, sedangkan kisaran salinitas tambak yang relatif stabil dipengaruhi oleh pengaturan hidrologi melalui pintu air. Hasil ini sejalan dengan Hartati *et al.* (2022), yang melaporkan salinitas tambak Kaliwlingi sebesar 16,9–19 ppt. Kisaran salinitas tersebut masih sesuai bagi budidaya bandeng dan udang yang tumbuh optimal pada salinitas 15–25 ppt (Boyd 2015). Sebaliknya, Gemilang dan Kusumah (2017) serta Nisa *et al.* (2025) melaporkan salinitas ekosistem mangrove yang lebih tinggi, masing-masing sebesar 23–32,8 ppt dan rata-rata 25 ppt. Perbedaan tersebut disebabkan oleh karakteristik lokasi pengukuran, di mana stasiun M2 dan M3 berada pada badan sungai yang didominasi aliran air tawar dan pengambilan sampel dilakukan saat kondisi surut, sehingga menghasilkan nilai salinitas yang lebih rendah dibandingkan lokasi mangrove yang lebih dipengaruhi oleh intrusi air laut.

Perbedaan konsentrasi oksigen terlarut (DO) antara ekosistem mangrove dan tambak *silvofishery* dipengaruhi oleh perbedaan proses dekomposisi bahan organik dan dinamika sirkulasi air pada kedua ekosistem. Konsentrasi DO yang rendah pada hampir seluruh stasiun menunjukkan bahwa laju konsumsi oksigen lebih besar dibandingkan suplai oksigen melalui difusi atmosfer maupun sirkulasi air. Pada ekosistem mangrove, kondisi tersebut disebabkan oleh tingginya akumulasi serasah dan bahan organik dalam sedimen yang meningkatkan aktivitas mikroorganisme dekomposer dan kebutuhan oksigen biologis. Alongi (2014) menjelaskan bahwa tingginya respirasi mikroba pada sedimen mangrove merupakan karakteristik alami yang berkontribusi terhadap rendahnya DO. Sebaliknya, pada tambak *silvofishery*, rendahnya DO di stasiun T3 dipengaruhi oleh terbatasnya pergantian air akibat letaknya yang lebih jauh dari sumber air laut, sehingga akumulasi bahan organik meningkat dan konsumsi oksigen menjadi lebih besar (Boyd 2015). Hasil ini konsisten dengan Gemilang dan Kusumah (2017) yang melaporkan DO sebesar 3,18–4,45 mg/L pada kawasan mangrove serta Nisa *et al.* (2025) yang memperoleh kisaran 4,20–5,33 mg/L di Muara Sigempol. Kesamaan pola tersebut menunjukkan bahwa rendahnya DO merupakan karakteristik umum perairan pesisir Brebes yang

dipengaruhi oleh tingginya beban bahan organik dan terbatasnya sirkulasi air. Oleh karena itu, DO dapat digunakan sebagai indikator utama kesehatan ekosistem pesisir karena mencerminkan keseimbangan antara proses produksi dan konsumsi oksigen yang mendukung keberlangsungan biota akuatik.

Konsentrasi amonia yang rendah pada seluruh stasiun menunjukkan bahwa parameter tersebut masih memenuhi baku mutu. Hasil ini sejalan dengan Nisa *et al.* (2025), yang melaporkan konsentrasi amonia di Muara Sigempol juga berada di bawah baku mutu. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa nitrogen anorganik masih dapat dimanfaatkan oleh vegetasi mangrove dan fitoplankton atau ditransformasikan oleh mikroorganisme melalui proses mineralisasi, nitrifikasi, dan denitrifikasi, sehingga tidak terjadi akumulasi amonia di perairan (Alongi 2013). Dengan demikian, rendahnya konsentrasi amonia mencerminkan bahwa fungsi biogeokimia ekosistem mangrove dalam mendaur ulang nitrogen masih berlangsung secara efektif.

Berbeda dengan amonia, konsentrasi nitrit pada stasiun M2 melampaui baku mutu. Kondisi ini sejalan dengan Deng *et al.* (2015), yang melaporkan bahwa nitrit cenderung terakumulasi pada perairan estuari dengan beban nitrogen tinggi dan konsentrasi oksigen terlarut yang rendah. Seitzinger *et al.* (2006) juga menyatakan bahwa akumulasi nitrit terjadi ketika masukan nitrogen dari daerah aliran sungai melebihi kapasitas transformasi nitrogen di ekosistem estuari. Pada lokasi penelitian, tingginya nitrit di stasiun M2 dipengaruhi oleh masukan nitrogen anorganik dari aktivitas pertanian dan permukiman di wilayah hulu yang dialirkan melalui sungai, serta rendahnya konsentrasi DO yang menghambat oksidasi nitrit menjadi nitrat. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan nitrit lebih mencerminkan tekanan lokal dari daerah aliran sungai dibandingkan penurunan fungsi ekologis ekosistem mangrove. Temuan ini melengkapi hasil penelitian Hartati *et al.* (2022) dan Gemilang dan Kusumah (2017), yang menunjukkan bahwa tekanan kualitas air di pesisir Brebes terutama dipengaruhi oleh dinamika nutrien dan proses estuari.

Secara keseluruhan, kondisi kualitas air di kawasan penelitian masih mendukung fungsi ekologis ekosistem pesisir. Suhu, salinitas, pH, dan amonia berada dalam kisaran yang sesuai untuk mendukung pertumbuhan mangrove, kehidupan biota akuatik, dan sistem budidaya *silvofishery*, sedangkan oksigen terlarut (DO) dan nitrit menjadi parameter pembatas pada beberapa lokasi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kualitas perairan lebih dipengaruhi oleh dinamika hidrologi, masukan bahan organik, dan beban nutrien dari daerah aliran sungai dibandingkan faktor fisika perairan lainnya.

Implikasi pengelolaan menunjukkan bahwa kesehatan ekosistem pesisir bergantung pada keterpaduan antara pelestarian mangrove, pengelolaan hidrologi, dan pengendalian masukan nutrien. Vegetasi mangrove berfungsi sebagai penyangga ekologis melalui penyerapan unsur hara, penjebakan sedimen, dan stabilisasi substrat (Bosma *et al.* 2017), sedangkan pengelolaan sirkulasi air yang baik diperlukan untuk menjaga sirkulasi perairan dan mencegah akumulasi bahan organik. Oleh karena itu, pengelolaan kawasan pesisir yang mengintegrasikan ketiga aspek tersebut menjadi kunci dalam menjaga kesehatan ekosistem mangrove, keberlanjutan habitat biota pesisir, dan sistem budidaya *silvofishery*.

3.1.2 Kondisi Hidrooseanografi

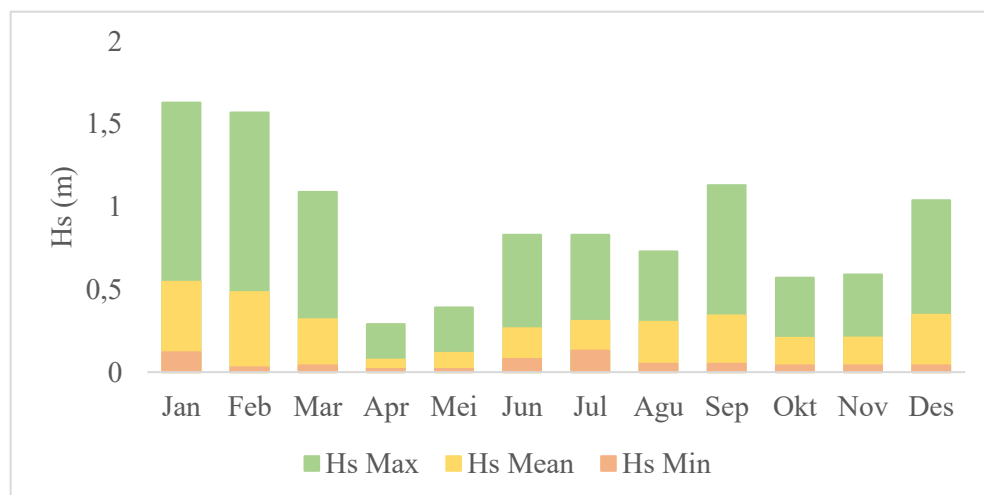
Analisis hidrooseanografi dilakukan menggunakan data gelombang dan arus dari Copernicus Marine Service serta data pasang surut dari Badan Informasi Geospasial (BIG) sepanjang tahun 2025. Parameter yang dianalisis meliputi tinggi gelombang signifikan (H_s), pasang surut, dan arus laut sebagai faktor pengendali dinamika perairan pesisir. Ringkasan hasil pengukuran disajikan pada Tabel 22.

Tabel 22 Nilai hasil analisis hidrooseanografi (gelombang, pasang surut dan kecepatan arus) pesisir Kecamatan Brebes 2025

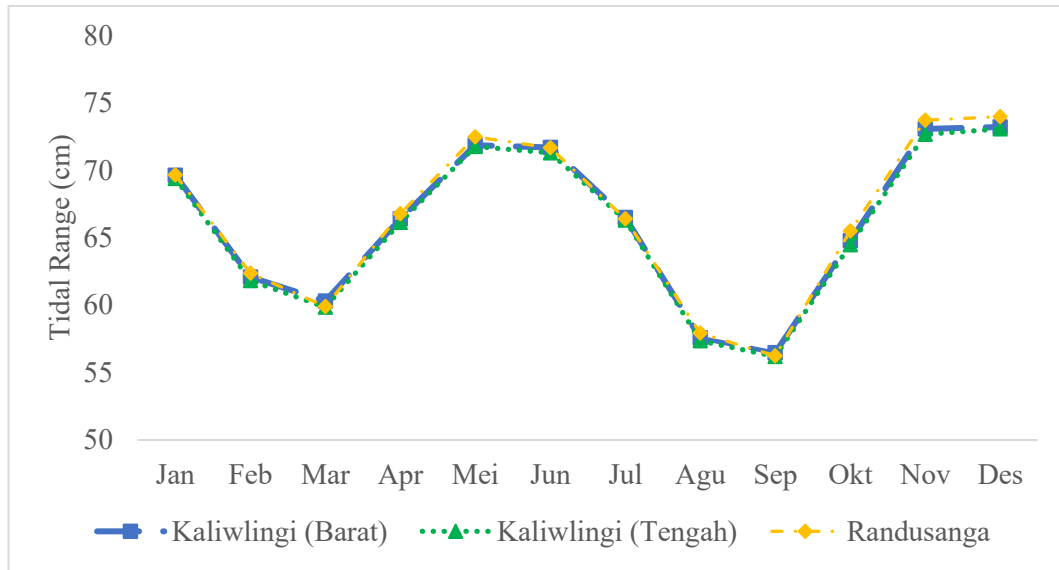
Parameter	Nilai
Hs rata-rata	0,293 m
Hs maksimum	1,63 m
Persentase Hs <0,5 m	84 %
Periode gelombang	4,52 detik
Arah dominan gelombang	Timur–Timur Laut
Tidal range rata-rata	67,14 cm
Bilangan Formzahl	1,10
Tipe pasang surut	Campuran dominan semidiurnal
Kecepatan arus rata-rata	0,042 m/s
Kecepatan arus zona pesisir	0,0268 m/s
Arah arus dominan	Barat Laut

Sumber: Hasil analisis data BIG (2025), Hasil analisis data Copernicus Marine Service GLOBAL_ANALYSISFORECAST_WAV_001_027 (2025)

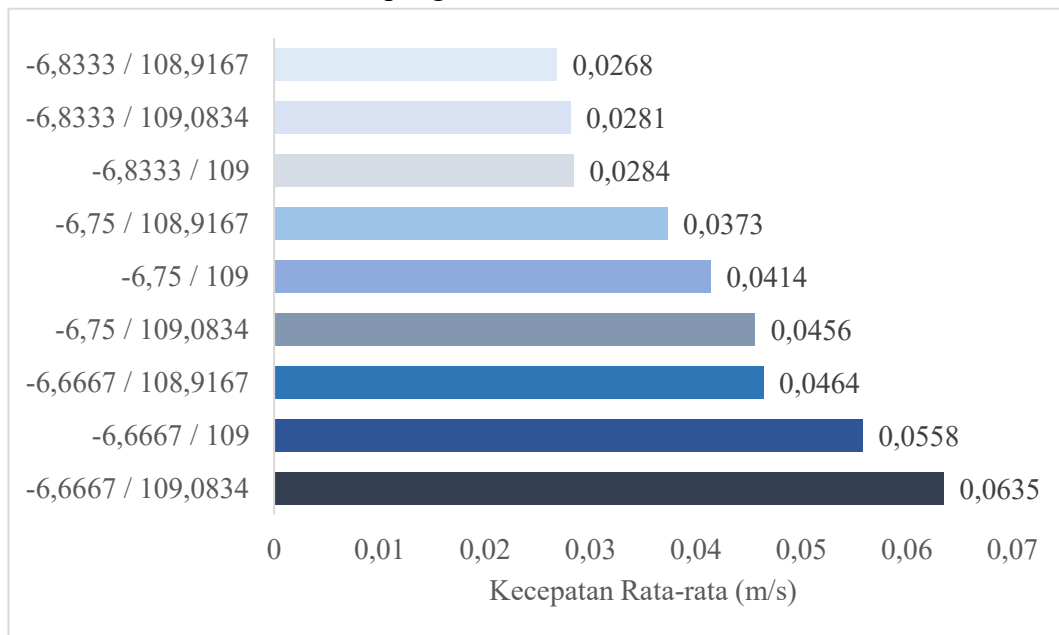
Berdasarkan Tabel 22 dan Gambar 7, tinggi gelombang signifikan berkisar antara 0,02–1,63 m dengan rata-rata 0,293 m, di mana 84% kejadian memiliki tinggi gelombang kurang dari 0,5 m. Pasang surut menunjukkan tidal range rata-rata 67,14 cm dengan bilangan Formzahl 1,10 yang mengindikasikan tipe pasang surut campuran dominan semidiurnal (Gambar 8). Kecepatan arus berkisar 0,020–0,081 m/s, dengan rata-rata 0,042 m/s (Gambar 9) dan arah dominan menuju barat laut.



Gambar 7 Tinggi gelombang signifikan (hs) bulanan tahun 2025



Gambar 8 Kisaran pasang surut (tidal range) bulanan pada tiga stasiun pengamatan tahun 2025



Gambar 9 Kecepatan arus rata-rata pada titik grid di perairan Pesisir Kecamatan Brebes tahun 2025

Hasil analisis hidrooseanografi menunjukkan bahwa pesisir Kecamatan Brebes memiliki karakter hidrodinamika berenergi rendah yang dicirikan oleh dominasi gelombang rendah, arus permukaan yang lemah, dan tipe pasang surut campuran dominan semidiurnal. Karakteristik ini sejalan dengan Gemilang *et al.* (2017) yang melaporkan kecepatan arus di Muara Pemali dan Muara Nipon berkisar 0,001–0,10 m/s serta Wijaya *et al.* (2019) yang mengidentifikasi tipe pasang surut campuran dominan semidiurnal di pesisir Brebes. Kondisi tersebut juga konsisten dengan karakter umum Pantai Utara Jawa yang berkembang pada perairan dangkal Laut Jawa, di mana energi gelombang relatif rendah akibat fetch yang pendek dan kedalaman perairan yang dangkal (Solihuddin *et al.* 2020). Karakter hidrodinamika

ini menunjukkan bahwa dinamika perairan pesisir Brebes lebih dikendalikan oleh proses hidrodinamika yang berlangsung secara gradual dibandingkan kejadian ekstrem, sehingga membentuk lingkungan estuari yang relatif stabil.

Interaksi antara gelombang, arus, dan pasang surut menjadi faktor utama yang mengendalikan transport sedimen dan pertukaran massa air di pesisir Brebes. Energi gelombang yang rendah membatasi kemampuan perairan menggerakkan sedimen, sedangkan arus yang relatif lemah menurunkan kapasitas transport sedimen sehingga fraksi sedimen halus lebih mudah terdeposisi di kawasan estuari dan sekitar hutan mangrove. Temuan ini sejalan dengan Gemilang *et al.* (2018), yang melaporkan bahwa sedimen pesisir Brebes didominasi oleh lanau, lanau pasiran, pasir lanauan, dan pasir dengan distribusi yang dipengaruhi oleh kondisi hidrooseanografi. Menurut Dyer (1997), estuari berenergi rendah berfungsi sebagai *sediment trap*, yaitu lingkungan yang mempertahankan sedimen halus melalui kombinasi arus lemah, pengaruh pasang surut, dan proses flokulasi. Akumulasi sedimen tersebut membentuk substrat berlumpur yang stabil, meningkatkan retensi bahan organik dan nutrisi, serta menyediakan habitat yang sesuai bagi perkembangan ekosistem mangrove. Di sisi lain, pasang surut campuran dominan semidiurnal mempertahankan pertukaran massa air (*tidal exchange*) secara periodik antara laut, estuari, dan kawasan mangrove, sehingga distribusi sedimen, nutrisi, dan material organik berlangsung secara berkesinambungan.

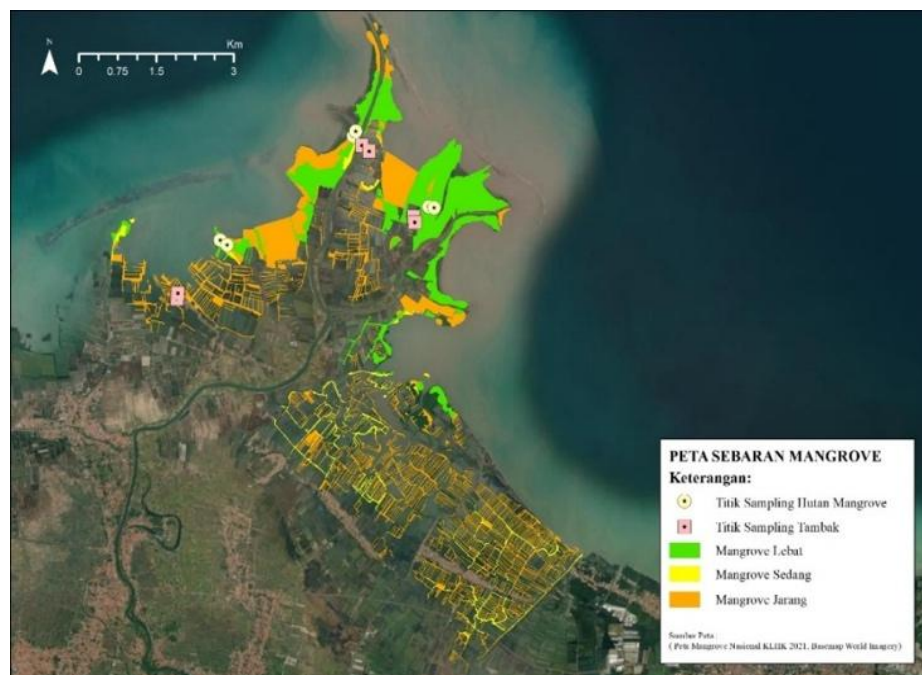
Proses sedimentasi dan pertukaran massa air tersebut selanjutnya memengaruhi dinamika ekologis kawasan pesisir. Pertukaran massa air yang berlangsung secara periodik menjaga kestabilan salinitas, mendukung distribusi oksigen dan unsur hara, serta mengoptimalkan proses biogeokimia yang mengendalikan transformasi nitrogen di perairan. Mekanisme ini selaras dengan hasil analisis kualitas air yang menunjukkan bahwa variasi salinitas, oksigen terlarut (DO), amonia, dan nitrit dipengaruhi oleh interaksi antara proses hidrologi, masukan nutrisi, dan sirkulasi perairan. Selain memengaruhi kualitas perairan, arus pasang surut juga berperan sebagai media utama penyebaran propagul mangrove sehingga mendukung regenerasi alami, pembentukan tegakan baru, dan dinamika kolonisasi pada zona intertidal (Adame dan Lovelock 2011; Sousa *et al.* 2007). Dengan demikian, interaksi antara gelombang, arus, dan pasang surut tidak hanya mengendalikan proses fisik perairan, tetapi juga menentukan keterkaitan antara sedimentasi, kualitas air, dan fungsi ekologis ekosistem mangrove.

Secara keseluruhan, karakter hidrooseanografi pesisir Brebes menunjukkan bahwa kawasan penelitian memiliki kapasitas hidrodinamika yang mendukung keberlanjutan fungsi ekologis maupun pemanfaatan kawasan pesisir. Stabilitas substrat akibat dominasi sedimentasi, disertai pertukaran massa air yang berlangsung secara teratur, menciptakan kondisi yang mendukung rehabilitasi mangrove, mempertahankan habitat biota pesisir, serta menunjang keberlanjutan sistem budidaya *silvofishery*. Hasil ini sejalan dengan Saru *et al.* (2018), yang menyatakan bahwa keberhasilan rehabilitasi mangrove lebih tinggi pada kawasan dengan energi gelombang rendah dan sedimentasi yang memadai karena propagul memiliki peluang lebih besar untuk berakar sebelum terlepas oleh arus atau gelombang. Oleh karena itu, aspek hidrooseanografi tidak hanya memenuhi kriteria Sangat Sesuai (S1) dalam analisis kesesuaian lahan berbasis GIS-MCDA, tetapi juga memberikan dasar ilmiah bahwa pengelolaan kawasan pesisir Brebes perlu

mempertahankan keseimbangan proses hidrodinamika, sedimentasi, dan pertukaran massa air sebagai fondasi keberlanjutan fungsi ekologis dan produktivitas kawasan.

3.1.3 Komunitas Vegetasi Mangrove (Sebaran, Komposisi, dan Struktur Vegetasi Mangrove)

Sebaran mangrove di pesisir Kecamatan Brebes menunjukkan perbedaan spasial antara kawasan hutan mangrove dan tambak *silvofishery* (Gambar 10). Hutan mangrove membentuk tutupan vegetasi yang relatif kontinu di sepanjang garis pantai, sedangkan pada sistem *silvofishery* vegetasi berkembang secara linier mengikuti tanggul tambak. Berdasarkan Peta Mangrove Nasional Tahun 2021, luas mangrove di wilayah penelitian mencapai 1.065,24 ha, terdiri atas 645,29 ha pada hutan mangrove dan 419,95 ha pada kawasan *silvofishery*. Komposisi jenis mangrove pada setiap stasiun disajikan pada Tabel 23 dan pada stasiun pengamatan hanya ditemukan dua jenis mangrove, yaitu *Avicennia marina* dan *Rhizophora mucronata*. Kedua jenis ditemukan bersama pada stasiun M1, M2, T2, dan T3, sedangkan stasiun M3 hanya didominasi *A. marina* dan stasiun T1 hanya ditumbuhi *R. mucronata*.



Gambar 10 Peta sebaran mangrove di kawasan Pesisir Kecamatan Brebes tahun 2021

Tabel 23 Sebaran jenis mangrove pada setiap stasiun pengamatan

No	Jenis	Hutan mangrove			Tambak <i>silvofishery</i>		
		M1	M2	M3	T1	T2	T3
1	<i>Avicennia marina</i>	+	+	+	—	+	+
2	<i>Rhizophora mucronata</i>	+	+	—	+	+	+

Keterangan: + = ditemukan; — = tidak ditemukan; M = stasiun hutan mangrove; T = stasiun tambak *silvofishery*. Sumber: Hasil pengamatan lapang (2025)

Struktur vegetasi mangrove didominasi oleh *A. marina* dan *R. mucronata* (Tabel 24), dengan kerapatan jenis berkisar 2.367–5.200 ind/ha pada hutan mangrove dan 6.233 ind/ha pada transek *silvofishery*. Diameter batang (DBH) berkisar 1,91–20,22 cm dengan rerata $9,16 \pm 4,14$ cm pada hutan mangrove dan $9,73 \pm 4,79$ cm pada *silvofishery*. Komposisi jenis tersebut sejalan dengan Nainggolan *et al.* (2022), yang melaporkan dominasi *R. mucronata* dan *A. marina* pada kawasan rehabilitasi Hutan Mangrove Pandansari. Namun, penelitian tersebut memperoleh kerapatan semai yang lebih rendah, yaitu 400–1.767 ind/ha, dengan diameter batang 3,8–5,4 cm. Sementara itu, Nugraha *et al.* (2020) melaporkan kerapatan tegakan sebesar 17–83 pohon per 100 m² (setara dengan 1.700–8.300 ind/ha) dengan diameter batang rata-rata 4,30–8,29 cm pada kawasan rehabilitasi mangrove di pesisir Brebes. Dibandingkan dengan kedua penelitian tersebut, tegakan mangrove pada penelitian ini memiliki diameter batang yang relatif lebih besar, sedangkan nilai kerapatannya masih berada pada kisaran yang sebanding dengan kawasan rehabilitasi mangrove di pesisir Brebes.

Tabel 24 Karakteristik vegetasi mangrove pada setiap stasiun pengamatan

St	Jenis	Area Vegetasi Mangrove (%)	Ki (Ind/ha)	Ki Kawasan (Ind/ha)	Mean D (Cm)	Min D (Cm)	Max D (Cm)
M1	<i>A. marina</i>	100	100	100	$15,98 \pm 2,18$	13,22	19,43
	<i>R. mucronata</i>		5200	5200	$6,97 \pm 0,93$	2,23	14,01
M2	<i>A. marina</i>	100	3783	3783	$7,16 \pm 0,57$	2,07	14,33
	<i>R. mucronata</i>		200	200	$5,62 \pm 2,54$	3,82	9,24
M3	<i>A. marina</i>	100	2367	2367	$10,08 \pm 0,18$	2,39	20,22
Summary		100	3883	3883	$9,16 \pm 4,14$	2,07	20,22
T1	<i>R. mucronata</i>	15.50	6067	940	$8,28 \pm 0,07$	2,23	14,97
T2	<i>A. marina</i>		150	23	$13,88 \pm 2,17$	7,32	16,72
	<i>R. mucronata</i>		4900	760	$6,98 \pm 0,68$	1,91	13,69
T3	<i>A. marina</i>		17	3	$15,45 \pm 0,0$	15,45	15,45
	<i>R. mucronata</i>		7567	1173	$4,05 \pm 0,24$	1,91	14,97
Summary		15.50	6233	966	$9,73 \pm 4,79$	1,91	16,72

Keterangan: Ki = kerapatan jenis; DBH = *diameter at breast height*; M = stasiun hutan mangrove; T = stasiun tambak *silvofishery*. Sumber: Hasil pengamatan lapang (2025)

Perbedaan struktur vegetasi dengan penelitian sebelumnya dipengaruhi oleh karakteristik tegakan, kondisi tapak, dan riwayat rehabilitasi. Diameter batang yang relatif lebih besar mengindikasikan bahwa tegakan telah berkembang dengan baik, sedangkan variasi kerapatan mencerminkan perbedaan pola penanaman dan tingkat regenerasi alami. Bosire *et al.* (2008) menjelaskan bahwa struktur tegakan mangrove dipengaruhi oleh umur tegakan, kondisi lingkungan, dan pengelolaan rehabilitasi. Di lokasi penelitian, kondisi hidrooseanografi tergolong berenergi rendah, substrat berlumpur, dan kualitas perairan yang sesuai mendukung pertumbuhan *A. marina* dan *R. mucronata*. Oleh karena itu, variasi struktur vegetasi lebih mencerminkan perbedaan kondisi lingkungan dan pengelolaan rehabilitasi daripada perubahan komposisi jenis.

Pola sebaran vegetasi menunjukkan bahwa fungsi kawasan berperan penting dalam membentuk komunitas mangrove. Pada hutan mangrove, vegetasi

berkembang membentuk tutupan yang relatif kontinu, sedangkan pada sistem *silvofishery* mangrove ditanam mengikuti tanggul tambak untuk mempertahankan fungsi budidaya sekaligus memberikan perlindungan pantai. Pola ini sesuai dengan Bosma *et al.* (2012), sedangkan distribusi mangrove hasil rehabilitasi yang masih mengikuti lokasi penanaman juga dilaporkan oleh Nugraha *et al.* (2020). Dominasi *A. marina* dan *R. mucronata* merupakan karakter umum kawasan rehabilitasi mangrove di Indonesia (Cahyaningsih *et al.* 2022; Nainggolan *et al.* 2022; Ahmed *et al.* 2023; Muallimah *et al.* 2025). Selain dipengaruhi oleh pemilihan jenis dalam rehabilitasi, kedua spesies tersebut memiliki toleransi tinggi terhadap lingkungan pesisir berlumpur dengan hidrodinamika yang relatif tenang sehingga mampu membentuk komunitas yang stabil.

Perbedaan struktur tegakan antara hutan mangrove dan sistem *silvofishery* juga perlu dipahami pada skala kawasan. Meskipun kerapatan jenis pada transek *silvofishery* lebih tinggi, kerapatan pada tingkat kawasan lebih rendah karena vegetasi hanya berkembang di sepanjang tanggul tambak. Sebaliknya, pada hutan mangrove nilai kerapatan kawasan relatif mendekati kerapatan transek karena vegetasi menutupi hampir seluruh area. Kondisi ini sejalan dengan konsep *patch density* dan *landscape density* (Turner *et al.* 2001), yang menunjukkan bahwa kerapatan lokal tidak selalu menggambarkan tingkat tutupan vegetasi pada skala lanskap. Sementara itu, rerata diameter batang yang relatif serupa pada kedua ekosistem menunjukkan bahwa keduanya sama-sama mampu mendukung pertumbuhan mangrove, sedangkan dominasi diameter pada kelas tertentu mengindikasikan bahwa sebagian besar tegakan berasal dari periode rehabilitasi yang relatif bersamaan. Menurut Kusmana (1997), pola tersebut merupakan karakter umum tegakan rehabilitasi yang memiliki struktur umur lebih seragam dibandingkan hutan mangrove alami.

Secara keseluruhan, karakter komunitas mangrove di pesisir Kecamatan Brebes menunjukkan bahwa rehabilitasi telah berhasil membentuk tegakan yang stabil dan mampu mendukung fungsi ekologis kawasan. Keberhasilan tersebut tidak hanya tercermin dari terbentuknya tutupan vegetasi, tetapi juga dari berkembangnya fungsi mangrove sebagai penstabil sedimen, peredam energi gelombang, penyerap dan penyimpan karbon, serta penyedia habitat bagi berbagai biota pesisir. Meskipun demikian, dominasi dua spesies dan struktur umur yang relatif homogen menunjukkan bahwa proses suksesi masih berlangsung. Oleh karena itu, pengelolaan kawasan perlu diarahkan tidak hanya pada perluasan rehabilitasi, tetapi juga pada peningkatan regenerasi alami, keragaman jenis, dan konektivitas antara hutan mangrove, kawasan estuari, dan sistem *silvofishery* untuk memperkuat keberlanjutan fungsi ekologis kawasan.

3.1.4 Cadangan Karbon Mangrove

Cadangan karbon mangrove di kawasan pesisir Kecamatan Brebes dianalisis melalui dua kompartemen utama, yaitu karbon biomassa atas dan bawah permukaan, serta karbon sedimen pada zona *rhizosphere*. Pengukuran biomassa menggunakan pendekatan non-destruktif berbasis persamaan allometrik per spesies (Dharmawan 2008, 2013; Komiyama *et al.* 2005), sedangkan karbon sedimen diukur melalui pengambilan sampel pada tiga interval kedalaman mengikuti metode Howard *et al.* (2014).

a. Karbon Biomassa

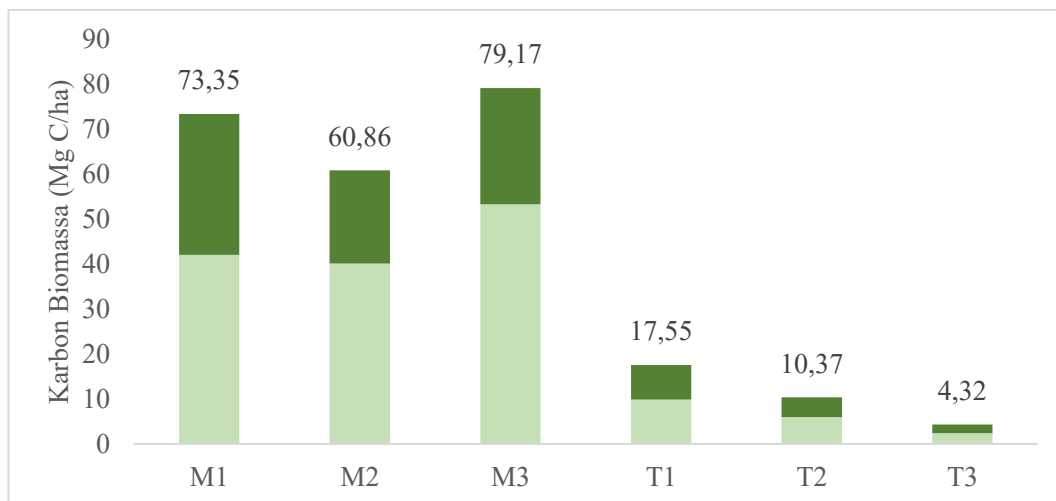
Struktur vegetasi yang berbeda antara hutan mangrove dan tambak *silvofishery*, sebagaimana telah diuraikan pada sub-bab sebelumnya, berpengaruh langsung terhadap variasi simpanan karbon biomassa pada kedua sistem. Hasil estimasi karbon biomassa atas permukaan (CAG) dan bawah permukaan (CGB) pada setiap stasiun disajikan pada Tabel 25. Hutan mangrove menunjukkan rata-rata simpanan karbon biomassa sebesar 71,13 Mg C/ha, jauh lebih tinggi dibandingkan sistem *silvofishery* yang hanya 10,75 Mg C/ha. Perbandingan visual kedua sistem disajikan pada Gambar 11.

Tabel 25 Simpanan karbon biomassa pada kawasan hutan mangrove dan tambak *silvofishery*

Stasiun	BAG (Ton/ha)	CAG (Mg C/ha)	BGB (Ton/ha)	CGB (Mg C/ha)	Total C (Mg C/ha)
M1	89,37	42,01 ± 3,78	80,36	31,34 ± 0,33	73,35
M2	85,31	40,10 ± 0,19	53,23	20,76 ± 0,51	60,86
M3	113,41	53,30 ± 10,23	66,34	25,87 ± 4,79	79,17
<i>Rata-rata hutan mangrove</i>	96,03	45,14 ± 7,14	66,65	25,99 ± 5,29	71,13
T1	20,98	9,86 ± 0,37	19,71	7,69 ± 0,33	17,55
T2	12,67	5,96 ± 1,47	11,31	4,41 ± 1,43	10,37
T3	5,07	2,38 ± 0,51	4,96	1,94 ± 0,38	4,32
<i>Rata-rata tambak silvofishery</i>	12,90	6,07 ± 3,74	11,99	4,68 ± 2,89	10,75

Keterangan: BAG = biomassa atas permukaan; CAG = karbon atas permukaan; BGB = biomassa bawah permukaan; CGB = karbon bawah permukaan; Total C = CAG + CGB. Sumber: Hasil analisis lapang (2025)

Nilai simpanan karbon biomassa pada hutan mangrove dalam penelitian ini lebih rendah dibandingkan hasil Ahmed *et al.* (2023), yang melaporkan simpanan karbon biomassa lebih tinggi pada kawasan rehabilitasi mangrove di pesisir Brebes. Sebaliknya, rata-rata simpanan karbon biomassa pada sistem *silvofishery* masih sebanding dengan hasil Harefa *et al.* (2022) di Kecamatan Deli Serdang, khususnya pada tambak dengan tutupan mangrove 14,21–15,29% yang memiliki simpanan karbon biomassa sebesar 8,74–11,06 Mg C/ha. Perbedaan dan kesamaan tersebut menunjukkan bahwa kapasitas penyimpanan karbon biomassa sangat dipengaruhi oleh struktur vegetasi, terutama tingkat perkembangan tegakan dan luas tutupan mangrove.



Gambar 11 Simpanan karbon biomassa (CAG dan CGB) pada setiap stasiun pengamatan

Hubungan tersebut berkaitan dengan karakteristik vegetasi pada lokasi penelitian. Hutan mangrove memiliki tutupan vegetasi yang hampir menyeluruh dengan kerapatan kawasan mencapai 3.883 ind/ha, sedangkan pada sistem *silvofishery* vegetasi hanya berkembang pada sekitar 15,5% area tambak sehingga kerapatan kawasannya hanya mencapai 966 ind/ha. Analisis korelasi (Lampiran 3) menunjukkan bahwa simpanan karbon biomassa berkorelasi positif dengan tutupan vegetasi ($p = 0,878$) dan kerapatan tegakan ($p = 0,829$), tetapi tidak menunjukkan hubungan yang nyata dengan diameter batang. Hasil ini konsisten dengan Harefa *et al.* (2022), yang melaporkan bahwa tutupan mangrove dan luas bidang dasar merupakan penjelas utama variasi simpanan karbon, dengan koefisien determinasi (R^2) masing-masing sebesar 0,88 dan 0,79. Temuan tersebut juga sejalan dengan Donato *et al.* (2011) dan Murdiyarso *et al.* (2015), yang menyatakan bahwa stok karbon biomassa mangrove terutama ditentukan oleh luas tutupan vegetasi, kerapatan tegakan, dan tingkat perkembangan hutan. Dengan demikian, rendahnya simpanan karbon biomassa pada sistem *silvofishery* lebih mencerminkan terbatasnya ruang tumbuh vegetasi yang membatasi pembentukan biomassa pada tingkat kawasan, dibandingkan rendahnya kemampuan individu mangrove dalam mengakumulasi biomassa.

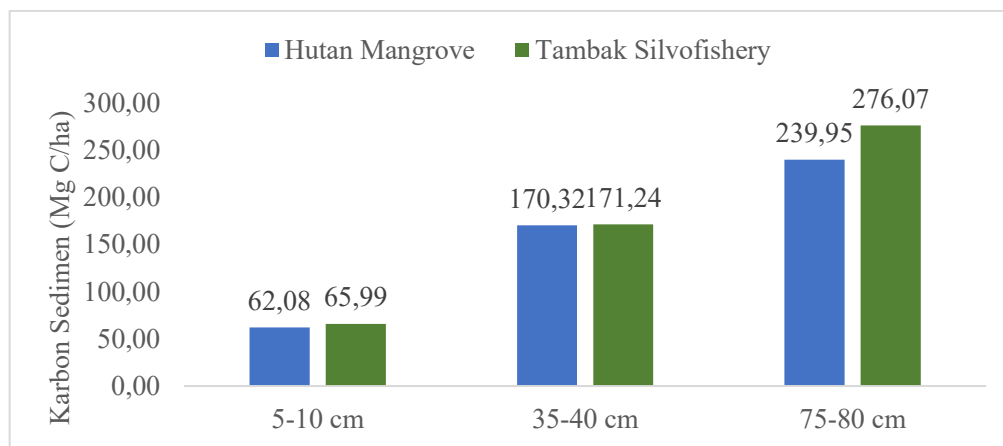
b. Karbon Sedimen dan Bulk Density

Berbeda dengan karbon biomassa, simpanan karbon sedimen menunjukkan nilai yang relatif tinggi pada kedua sistem dan tidak berbeda nyata. Simpanan karbon sedimen pada hutan mangrove dan tambak *silvofishery* pada tiga interval kedalaman disajikan pada Tabel 26. Rata-rata simpanan karbon sedimen pada sistem *silvofishery* mencapai 513,32 Mg C/ha, sedikit lebih tinggi dibandingkan hutan mangrove sebesar 472,35 Mg C/ha, namun perbedaannya tidak signifikan berdasarkan uji *t* (Asymp. Sig. = 0,513; Lampiran 4). Distribusi vertikal karbon sedimen pada kedua sistem (Gambar 12) menunjukkan pola yang serupa, yaitu simpanan karbon meningkat secara konsisten seiring bertambahnya kedalaman, dengan nilai terendah pada lapisan 5–10 cm dan tertinggi pada lapisan 75–80 cm.

Tabel 26 Simpanan karbon sedimen pada tiga interval kedalaman di setiap stasiun pengamatan

Kedalaman	Hutan mangrove (Mg C/ha)			Tambak <i>silvofishery</i> (Mg C/ha)		
	M1	M2	M3	T1	T2	T3
5 sampai 10 cm	55,85	68,76	61,64	63,18	68,73	66,06
35 sampai 40 cm	144,79	184,58	181,58	170,84	160,95	181,94
75 sampai 80 cm	209,02	261,71	249,13	310,70	250,96	266,56
Total	409,66	515,05	492,35	544,72	480,64	514,56

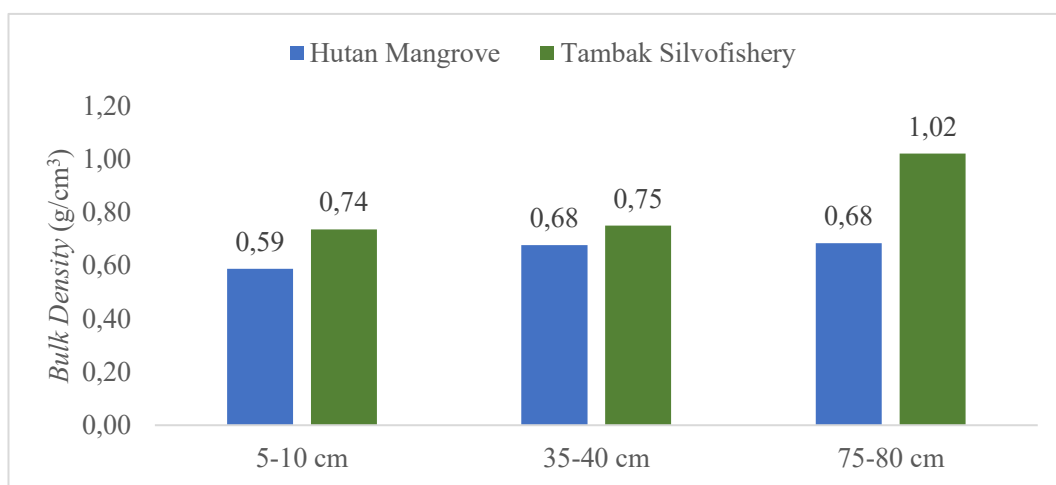
Keterangan: Nilai total merupakan penjumlahan karbon pada tiga interval kedalaman sampel sebagai representasi kolom sedimen 0–100 cm. Sumber: Hasil analisis laboratorium (2025)

Gambar 12 Distribusi vertikal simpanan karbon sedimen pada kawasan hutan mangrove dan tambak *silvofishery*

Nilai simpanan karbon sedimen tersebut masih berada dalam kisaran yang ditemukan pada kawasan mangrove pesisir Brebes. Nainggolan *et al.* (2022) melaporkan stok karbon sedimen sebesar 381,67–1.053,53 Mg C/ha, sedangkan Khasanah *et al.* (2025) memperoleh simpanan karbon sedimen hingga 274,52 Mg C/ha pada zona tengah mangrove. Tingginya karbon sedimen mencerminkan kemampuan ekosistem mangrove mengakumulasi karbon dalam jangka panjang melalui deposisi sedimen halus dan bahan organik pada kondisi anaerob yang memperlambat proses dekomposisi (Donato *et al.* 2011; Howard *et al.* 2014; Alongi 2014). Dominasi *R. mucronata* pada lokasi penelitian turut mendukung proses tersebut melalui sistem perakaran yang efektif menjebak sedimen dan bahan organik (Kathiresan dan Bingham 2001; Sasmito *et al.* 2016). Hal ini menjelaskan mengapa sistem *silvofishery* tetap mampu mempertahankan simpanan karbon sedimen yang tinggi meskipun tutupan vegetasinya lebih terbatas dibandingkan hutan mangrove.

Nilai *bulk density* sedimen pada kedua sistem (Gambar 13) menunjukkan pola yang sejalan dengan perbedaan simpanan karbon sedimen. Secara umum, *bulk*

density pada tambak *silvofishery* lebih tinggi dibandingkan hutan mangrove pada hampir seluruh interval kedalaman, dengan kisaran 0,71–0,76 g/cm³ pada lapisan permukaan dan mencapai 1,27 g/cm³ pada stasiun T1 pada kedalaman 75–80 cm. Analisis korelasi (Lampiran 5) menunjukkan hubungan positif antara *bulk density* dan simpanan karbon sedimen ($\rho = 0,714$), meskipun belum signifikan secara statistik ($p = 0,111$). Howard *et al.* (2014) menjelaskan bahwa *bulk density* merupakan salah satu komponen utama dalam estimasi stok karbon sedimen karena menentukan massa sedimen per satuan volume. Oleh karena itu, *bulk density* yang lebih tinggi pada sistem *silvofishery* diduga turut mendukung tingginya simpanan karbon sedimen, bersama faktor lain seperti kandungan karbon organik, laju sedimentasi, dan masukan bahan organik.



Gambar 13 Nilai *bulk density* sedimen pada kawasan hutan mangrove dan tambak *silvofishery*

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa biomassa dan sedimen memiliki mekanisme penyimpanan karbon yang berbeda namun saling melengkapi. Hutan mangrove lebih berperan dalam mengakumulasi karbon pada biomassa melalui tegakan yang rapat dan tutupan vegetasi yang luas, sedangkan sistem *silvofishery* mempertahankan kapasitas penyimpanan karbon terutama pada kompartemen sedimen yang relatif stabil. Pola tersebut sejalan dengan konsep *blue carbon*, yang menempatkan sedimen sebagai penyimpanan karbon utama pada ekosistem mangrove (McLeod *et al.* 2011; Alongi 2014). Dengan demikian, pengelolaan hutan mangrove dan pengembangan *silvofishery* perlu dipandang sebagai pendekatan yang saling melengkapi untuk mempertahankan kapasitas penyimpanan karbon sekaligus mendukung upaya mitigasi perubahan iklim di wilayah pesisir.

3.2 Kesesuaian Lahan Kawasan Pesisir Kecamatan Brebes

Analisis kesesuaian lahan dilakukan terhadap tiga peruntukan kawasan, yaitu tambak budidaya, rehabilitasi ekosistem mangrove, dan ekowisata mangrove. Total kawasan analisis mencakup 9.489,46 ha di pesisir Kecamatan Brebes. Hasil masing-masing peruntukan disajikan pada sub-subbab berikut.

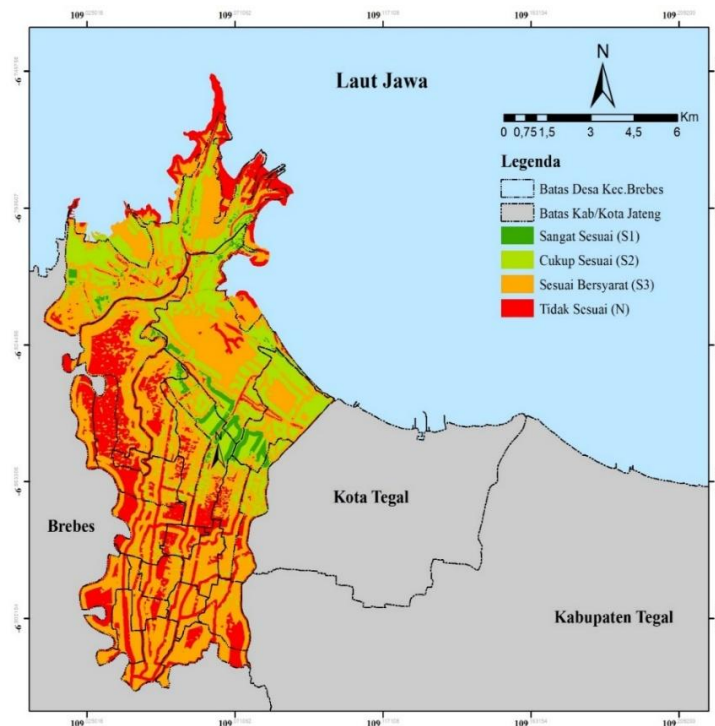
3.2.1 Kesesuaian Lahan untuk Tambak Budidaya

Analisis kesesuaian lahan menghasilkan empat kelas kesesuaian, yaitu Sangat Sesuai (S1), Cukup Sesuai (S2), Sesuai Bersyarat (S3), dan Tidak Sesuai (N). Rekapitulasi luas setiap kelas disajikan pada Tabel 27, sedangkan distribusi spasialnya ditunjukkan pada Gambar 14. Kelas S3 mendominasi kawasan penelitian dengan luas 4.925,99 ha (51,91%) dari total kawasan analisis seluas 9.489,46 ha, diikuti kelas N seluas 2.368,02 ha (24,95%), kelas S2 seluas 1.951,03 ha (20,56%), dan kelas S1 seluas 244,42 ha (2,57%). Secara spasial, kelas S1 dan S2 terkonsentrasi di Desa Kaliwlingi, Randusanga Kulon, dan Randusanga Wetan, sedangkan kelas N umumnya berada pada kawasan pesisir bagian utara yang didominasi ekosistem mangrove.

Tabel 27 Rekapitulasi luasan kelas kesesuaian lahan tambak budidaya

No.	Kelas Kesesuaian	Luas (ha)	Persentase (%)
1	Sangat Sesuai (S1)	244,42	2,57
2	Cukup Sesuai (S2)	1.951,03	20,56
3	Sesuai Bersyarat (S3)	4.925,99	51,91
4	Tidak Sesuai (N)	2.368,02	24,95
Total		9.489,46	100,00

Sumber: Hasil analisis (2025).



Gambar 14 Peta kesesuaian lahan untuk tambak budidaya di pesisir Kecamatan Brebes

Hasil tumpang susun antara peta kesesuaian lahan dan tambak eksisting menunjukkan bahwa dari total 3.433,88 ha tambak yang beroperasi, 237,80 ha (6,93%) berada pada kelas S1, 1.578,27 ha (45,96%) pada kelas S2, 1.562,80 ha (45,51%) pada kelas S3, dan hanya 55,02 ha (1,60%) pada kelas N. Dengan demikian, 98,40% tambak eksisting telah berkembang pada kawasan yang tergolong layak (S1–S3), sedangkan sebagian kecil masih berada pada kawasan tidak sesuai. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan ruang oleh masyarakat secara umum telah mengikuti karakteristik biofisik kawasan, meskipun sebagian besar tambak masih berada pada kelas sesuai bersyarat.

Dominasi kelas S3 pada penelitian ini konsisten dengan berbagai penelitian sebelumnya di pesisir Brebes. Suhaimi *et al.* (2013) melaporkan bahwa kelas S3 merupakan kelas kesesuaian yang paling luas pada tambak di Kabupaten Brebes, sedangkan Rachmansyah *et al.* (2012) memperoleh hasil serupa di Kecamatan Bulakamba. Pada sistem budidaya berbasis *Integrated Multi-Trophic Aquaculture* (IMTA), Arsandi *et al.* (2017) juga menunjukkan bahwa sebagian besar kawasan pesisir Brebes tergolong sesuai bersyarat. Kesamaan tersebut menunjukkan bahwa wilayah pesisir Brebes memiliki potensi yang baik untuk budidaya, tetapi masih dibatasi oleh karakteristik biofisik yang relatif seragam.

Dalam kerangka evaluasi kesesuaian lahan FAO (1976), kelas S3 menunjukkan lahan yang masih layak dimanfaatkan, tetapi memiliki faktor pembatas yang memerlukan pengelolaan agar produktivitas dapat ditingkatkan. Pada penelitian ini, faktor pembatas utama meliputi elevasi, jarak terhadap pantai, dan tipe penggunaan lahan. Elevasi yang rendah meningkatkan potensi genangan sehingga menghambat drainase tambak, sedangkan lokasi yang lebih jauh dari pantai memerlukan sistem distribusi air yang lebih kompleks. Selain itu, keberadaan kawasan mangrove membatasi pengembangan tambak baru karena fungsi ekologisnya harus dipertahankan. Temuan ini memperkuat hasil Suhaimi *et al.* (2013) dan Rachmansyah *et al.* (2012), yang menempatkan kondisi topografi, hidrologi, kualitas sumber air, dan karakteristik tanah sebagai faktor utama penentu kesesuaian tambak.

Meskipun luasannya relatif kecil, keberadaan tambak pada kelas N menunjukkan bahwa sebagian aktivitas budidaya masih berlangsung pada lahan yang memiliki keterbatasan biofisik sehingga berpotensi menurunkan produktivitas dan meningkatkan tekanan terhadap lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan tambak sebaiknya diprioritaskan pada kawasan yang telah tergolong layak (S2–S3) melalui peningkatan kualitas pengelolaan dan infrastruktur pendukung. Sebaliknya, kawasan tambak pada kelas N yang memiliki potensi rehabilitasi mangrove dapat diprioritaskan untuk pemulihan ekosistem pesisir sehingga fungsi ekologis kawasan tetap terjaga.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tantangan utama pengembangan tambak di Kecamatan Brebes bukan terletak pada keterbatasan potensi lahan, melainkan pada pengelolaan faktor-faktor pembatas biofisik dan penataan ruang yang berkelanjutan. Integrasi antara pengembangan tambak pada kawasan yang layak dan rehabilitasi mangrove pada kawasan yang tidak sesuai akan mendukung peningkatan produktivitas budidaya sekaligus mempertahankan fungsi ekologis pesisir sebagai dasar pengelolaan wilayah pesisir yang berkelanjutan.

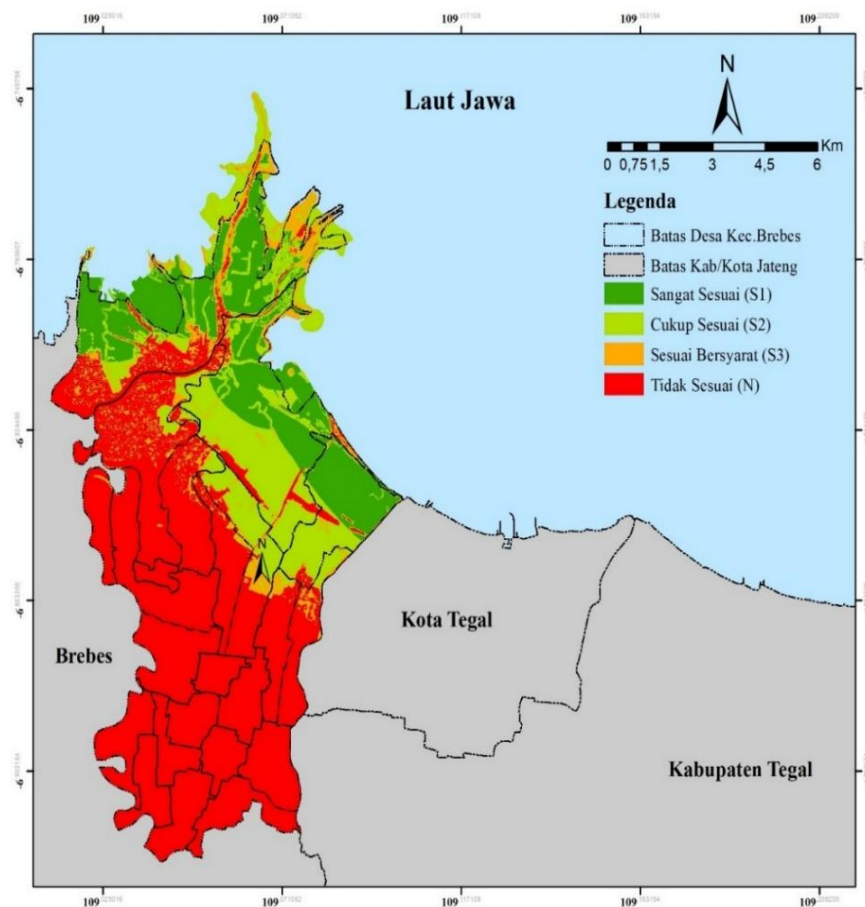
3.2.2 Kesesuaian Lahan untuk Rehabilitasi Ekosistem Mangrove

Rekapitulasi analisis kesesuaian lahan untuk rehabilitasi ekosistem mangrove menghasilkan empat kelas kesesuaian, yaitu Sangat Sesuai (S1), Cukup Sesuai (S2), Sesuai Bersyarat (S3), dan Tidak Sesuai (N). Rekapitulasi luas setiap kelas disajikan pada Tabel 28, sedangkan distribusi spasialnya ditunjukkan pada Gambar 15.

Tabel 28 Rekapitulasi luasan kelas kesesuaian lahan rehabilitasi ekosistem mangrove

No	Kelas Kesesuaian	Luas (ha)	Persentase (%)
1	Sangat Sesuai (S1)	1.703,48	17,95
2	Cukup Sesuai (S2)	1.934,67	20,39
3	Sesuai Bersyarat (S3)	725,43	7,64
4	Tidak Sesuai (N)	5.125,88	54,02
Total		9.489,46	100,00

Sumber: Hasil analisis (2025)



Gambar 15 Peta kesesuaian lahan untuk rehabilitasi ekosistem mangrove di pesisir Kecamatan Brebes

Berdasarkan Tabel 28, kelas Tidak Sesuai (N) mendominasi kawasan penelitian dengan luas 5.125,88 ha (54,02%) dari total kawasan analisis seluas 9.489,46 ha, diikuti kelas Cukup Sesuai (S2) seluas 1.934,67 ha (20,39%), Sangat Sesuai (S1) seluas 1.703,48 ha (17,95%), dan Sesuai Bersyarat (S3) seluas 725,43 ha (7,64%). Kawasan yang tergolong layak untuk rehabilitasi (S1 dan S2) mencapai 3.638,15 ha atau 38,34% dari total wilayah analisis. Sebaran spasial (Gambar 15) menunjukkan bahwa kelas S1 dan S2 terkonsentrasi pada koridor pesisir Desa Kaliwlingi dan Randusanga Kulon, terutama pada bekas tambak, lahan terbuka, dan kawasan yang masih terhubung dengan sistem pasang surut, sedangkan kelas N mendominasi bagian selatan yang didominasi permukiman, lahan pertanian, dan kawasan yang tidak lagi dipengaruhi pasang surut.

Sebaran tersebut menunjukkan bahwa potensi rehabilitasi mangrove di Kecamatan Brebes masih cukup besar, namun terbatas pada kawasan yang masih mempertahankan karakteristik ekologis yang mendukung perkembangan mangrove. Pola ini sejalan dengan Saru *et al.* (2018), yang menyatakan bahwa keberhasilan rehabilitasi dipengaruhi oleh kondisi biofisik, terutama kelerengan, kedekatan terhadap pantai, dan penggunaan lahan. Hasil tersebut juga konsisten dengan Prayudha *et al.* (2026), yang melalui pemodelan *Random Forest* menunjukkan bahwa elevasi, jarak dari garis pantai, dan frekuensi genangan merupakan prediktor utama keberhasilan rehabilitasi mangrove (AUC = 0,898). Kesamaan tersebut menunjukkan bahwa parameter yang digunakan dalam penelitian ini telah mewakili faktor-faktor biofisik utama yang menentukan kesesuaian rehabilitasi mangrove.

Secara ekologis, keberhasilan rehabilitasi lebih ditentukan oleh keberlangsungan proses hidrologi daripada kegiatan penanaman itu sendiri. Elevasi mengendalikan frekuensi genangan, sedangkan kedekatan dengan pantai dan saluran pasang surut mengatur suplai sedimen, salinitas, dan pertukaran air yang diperlukan bagi pertumbuhan mangrove. Sebaliknya, kawasan yang telah kehilangan konektivitas hidrologi, seperti permukiman, lahan pertanian, atau tambak yang terisolasi dari pasang surut, memiliki peluang rehabilitasi yang rendah. Temuan ini sejalan dengan konsep *Ecological Mangrove Restoration* (Lewis 2005), yang menempatkan pemulihan hidrologi sebagai prasyarat utama rehabilitasi mangrove, serta diperkuat oleh Prayudha *et al.* (2026) yang menunjukkan bahwa kegagalan rehabilitasi umumnya disebabkan oleh ketidaksesuaian hidrologi.

Implikasi dari hasil penelitian ini adalah bahwa rehabilitasi mangrove perlu diprioritaskan pada kawasan dengan tingkat kesesuaian tinggi (S1), sedangkan kawasan S2 dapat direhabilitasi secara bertahap melalui perbaikan konektivitas pasang surut, pengelolaan sedimen, dan stabilisasi substrat. Pada bekas tambak yang masih memiliki kesesuaian tinggi, penerapan sistem *silvofishery* dapat menjadi alternatif pengelolaan karena mampu mengintegrasikan rehabilitasi mangrove dengan kegiatan budidaya sehingga fungsi ekologis dan manfaat ekonomi dapat dipertahankan secara bersamaan (Primavera dan Esteban 2008; Bosma *et al.* 2017; FAO 2024).

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa keberhasilan rehabilitasi mangrove di pesisir Kecamatan Brebes lebih ditentukan oleh ketepatan pemilihan lokasi dan pemulihan proses hidrologi dibandingkan kegiatan penanaman semata. Oleh karena itu, analisis kesesuaian lahan dapat menjadi dasar dalam menentukan

prioritas rehabilitasi dan strategi pengelolaan yang sesuai, baik melalui rehabilitasi konvensional maupun pendekatan *silvofishery*, sehingga pemulihan ekosistem pesisir dapat berlangsung secara lebih efektif dan berkelanjutan.

3.2.3 Kesesuaian Lahan untuk Ekowisata Mangrove

Hasil analisis kesesuaian lahan untuk ekowisata mangrove disajikan pada Tabel 29 dan Gambar 16, dengan detail Kawasan pesisir Kecamatan Brebes didominasi oleh kelas Tidak Sesuai (N) seluas 8.983,44 ha (94,67%), diikuti kelas Cukup Sesuai (S2) seluas 394,85 ha (4,16%) dan Sesuai Bersyarat (S3) seluas 111,17 ha (1,17%). Tidak ditemukan kawasan yang termasuk dalam kelas Sangat Sesuai (S1).

Tabel 29 Rekapitulasi luasan kelas kesesuaian lahan ekowisata mangrove

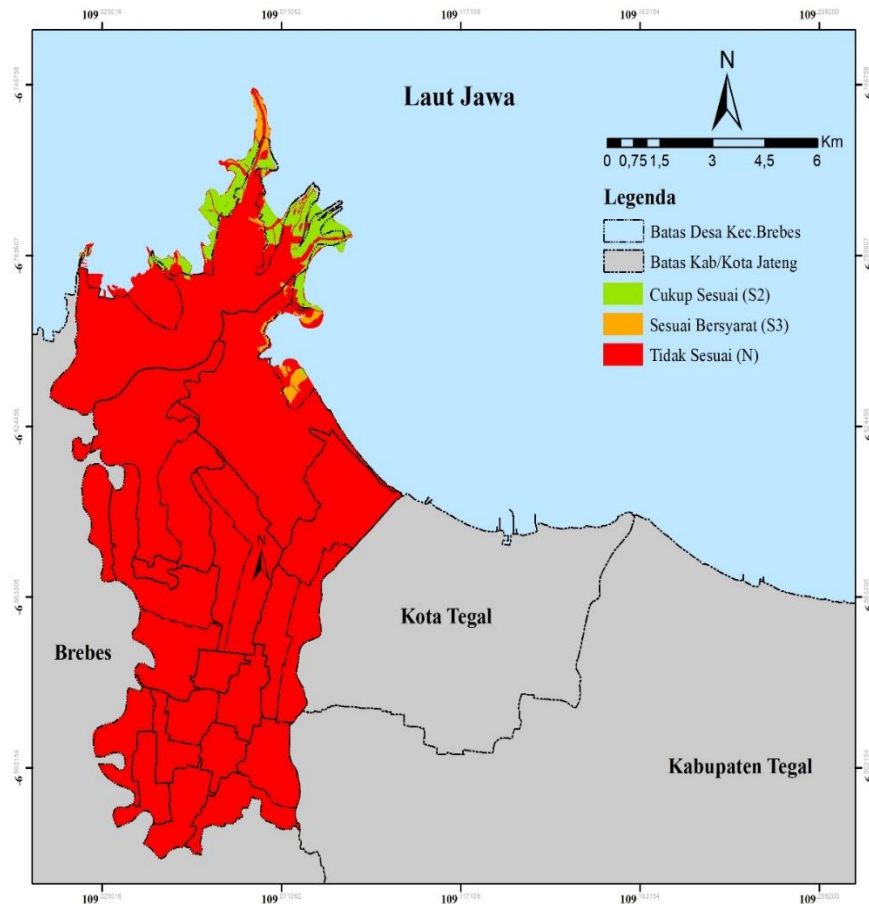
No	Kelas Kesesuaian	Luas (ha)	Persentase (%)
1	Cukup Sesuai (S2)	394,85	4,16
2	Sesuai Bersyarat (S3)	111,17	1,17
3	Tidak Sesuai (N)	8.983,44	94,67
Total		9.489,46	100,00

Sumber: Hasil analisis (2025)

Ketidakhadiran kelas S1 menunjukkan bahwa belum terdapat kawasan yang memenuhi seluruh parameter kesesuaian ekowisata mangrove secara optimal. Nilai indeks kesesuaian (IK) tertinggi hanya mencapai 75,2%, masih berada di bawah ambang batas kelas S1 (>80%). Sebagian kawasan telah memiliki ketebalan mangrove lebih dari 500 m, namun seluruh kawasan tersebut masih memiliki kerapatan tegakan pada kisaran 10–15 individu per 100 m², sehingga belum memenuhi persyaratan kerapatan tertinggi.

Sebaran kawasan S2 terkonsentrasi pada hutan mangrove Desa Kaliwlingi, termasuk kawasan Wisata Hutan Mangrove Pandansari yang telah beroperasi. Kawasan S2 memiliki ketebalan mangrove 200–500 m hingga lebih dari 500 m dengan kerapatan tegakan relatif seragam. Sementara itu, kawasan S3 tersebar pada area dengan ketebalan mangrove 50–500 m yang masih memerlukan peningkatan struktur vegetasi agar mencapai tingkat kesesuaian yang lebih tinggi.

Hasil tumpang susun antara peta kesesuaian dan lokasi wisata eksisting menunjukkan bahwa kawasan wisata yang telah dimanfaatkan saat ini hanya mencakup 15,73 ha, atau sekitar 3,98% dari total kawasan S2 yang tersedia. Dengan demikian, masih terdapat 379,12 ha kawasan yang berpotensi dikembangkan sebagai ekowisata mangrove sesuai tingkat kesesuaiannya.



Gambar 16 Peta kesesuaian lahan untuk ekowisata mangrove di pesisir Kecamatan Brebes

Hasil penelitian menunjukkan bahwa potensi pengembangan ekowisata mangrove di Kecamatan Brebes masih terbatas karena hanya 5,33% kawasan yang tergolong sesuai (S2 dan S3), sedangkan sebagian besar wilayah termasuk kelas tidak sesuai (N). Kondisi ini mengindikasikan bahwa pengembangan ekowisata hanya dapat dilakukan pada kawasan yang masih memiliki struktur vegetasi mangrove dan kualitas habitat yang memadai, sehingga pengembangan wisata perlu diarahkan pada peningkatan kualitas kawasan yang telah sesuai, bukan melalui perluasan ke wilayah yang tidak memenuhi persyaratan biofisik.

Temuan tersebut sejalan dengan konsep kesesuaian ekowisata mangrove yang dikemukakan Yulianda (2019), yang menempatkan ketebalan mangrove, kerapatan tegakan, jumlah jenis, pasang surut, dan keberadaan biota sebagai penentu utama kelayakan wisata. Pada penelitian ini, tidak ditemukannya kawasan kelas S1 menunjukkan bahwa kerapatan tegakan menjadi faktor pembatas utama, meskipun sebagian kawasan telah memiliki ketebalan mangrove yang memadai. Hasil ini berbeda dengan penelitian Azmi *et al.* (2025) di Pulau Cemara yang memperoleh nilai Indeks Kesesuaian Wisata sebesar 89,47% (S1) karena didukung oleh kerapatan vegetasi, keanekaragaman jenis, dan kelimpahan biota yang lebih tinggi.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kualitas ekowisata lebih ditentukan oleh perbaikan struktur vegetasi dibandingkan penambahan luas kawasan. Tegakan mangrove yang lebih rapat mampu mendukung keanekaragaman biota, meningkatkan kualitas lanskap, serta memperkaya pengalaman wisata

berbasis alam. Oleh karena itu, peningkatan kerapatan tegakan melalui rehabilitasi dan pengayaan vegetasi merupakan strategi yang lebih efektif untuk meningkatkan kelas kesesuaian ekowisata di Kecamatan Brebes.

Keterkaitan antara rehabilitasi mangrove dan pengembangan ekowisata juga terlihat dari pola spasial penelitian, di mana seluruh kawasan yang sesuai untuk ekowisata berada pada area yang juga sesuai untuk rehabilitasi mangrove. Kondisi ini menunjukkan bahwa rehabilitasi tidak hanya memulihkan fungsi ekologis pesisir, tetapi juga meningkatkan penyediaan jasa ekosistem berupa wisata alam. Temuan tersebut sejalan dengan Prayudha *et al.* (2026) yang menegaskan bahwa restorasi pada lokasi dengan kondisi hidrologi dan geomorfologi yang sesuai menghasilkan ekosistem mangrove yang lebih stabil dan mampu memberikan manfaat ekologis maupun sosial-ekonomi secara berkelanjutan.

Hasil penelitian menegaskan bahwa keberhasilan pengembangan ekowisata mangrove di Kecamatan Brebes lebih ditentukan oleh kualitas ekosistem daripada luas kawasan mangrove. Oleh karena itu, pengembangan ekowisata perlu diintegrasikan dengan program rehabilitasi mangrove melalui peningkatan kualitas habitat, penyediaan infrastruktur yang ramah lingkungan, dan pengelolaan berbasis konservasi sehingga manfaat ekologis dan ekonomi dapat dicapai secara seimbang.

3.2.4 Integrasi Kesesuaian Lahan dan *Trade-off* Pemanfaatan Ruang Pesisir

Hasil analisis kesesuaian lahan menunjukkan bahwa ketiga peruntukan memiliki hubungan spasial yang berbeda. Kawasan yang sesuai untuk tambak budidaya (S1 dan S2) mencapai 2.195,45 ha (23,14%), rehabilitasi mangrove (S1 dan S2) seluas 3.638,15 ha (38,34%), sedangkan ekowisata mangrove (S2 dan S3) hanya 506,02 ha (5,33%). Sebagian kawasan yang sesuai untuk tambak berimpit dengan kawasan rehabilitasi mangrove, sementara kawasan ekowisata seluruhnya berada pada area rehabilitasi yang masih memiliki kualitas ekosistem baik. Pola ini menunjukkan bahwa beberapa kawasan pesisir memiliki lebih dari satu alternatif pemanfaatan.

Tumpang tindih tersebut mencerminkan adanya *trade-off* dalam pemanfaatan ruang pesisir. Tambak memberikan manfaat ekonomi melalui produksi perikanan, rehabilitasi mangrove menghasilkan jasa ekosistem seperti perlindungan pantai, habitat biota, dan penyimpanan karbon, sedangkan ekowisata memanfaatkan kualitas ekosistem untuk menghasilkan manfaat ekonomi berbasis jasa lingkungan. Menurut White *et al.* (2012), kondisi ini merupakan karakteristik umum dalam *marine spatial planning*, di mana setiap pilihan penggunaan ruang menghasilkan manfaat dan konsekuensi yang berbeda. Oleh karena itu, keputusan yang hanya didasarkan pada kesesuaian biofisik berpotensi menimbulkan konflik pemanfaatan ruang maupun degradasi ekosistem apabila fungsi ekologis, manfaat ekonomi, dan daya dukung kawasan tidak dipertimbangkan secara terpadu (Arkema *et al.* 2006; Lester *et al.* 2013).

Analisis kesesuaian lahan belum cukup untuk menentukan alokasi ruang yang optimal. Kawasan yang sesuai untuk lebih dari satu peruntukan memerlukan pertimbangan manfaat ekonomi, manfaat ekologis, dan biaya peluang (*opportunity cost*) dari setiap alternatif pemanfaatan. Barbier (2012) menegaskan bahwa pengelolaan ekosistem pesisir yang berkelanjutan memerlukan integrasi informasi biofisik dan nilai ekonomi agar manfaat total ekosistem dapat dimaksimalkan.

Berdasarkan hasil tersebut, analisis kesesuaian lahan selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan model optimasi. Luas kawasan yang sesuai menjadi

kendala biofisik, sedangkan nilai ekonomi masing-masing peruntukan digunakan sebagai fungsi tujuan dalam model *linear programming* untuk menentukan alokasi ruang yang memberikan manfaat ekonomi dan ekologis secara optimal.

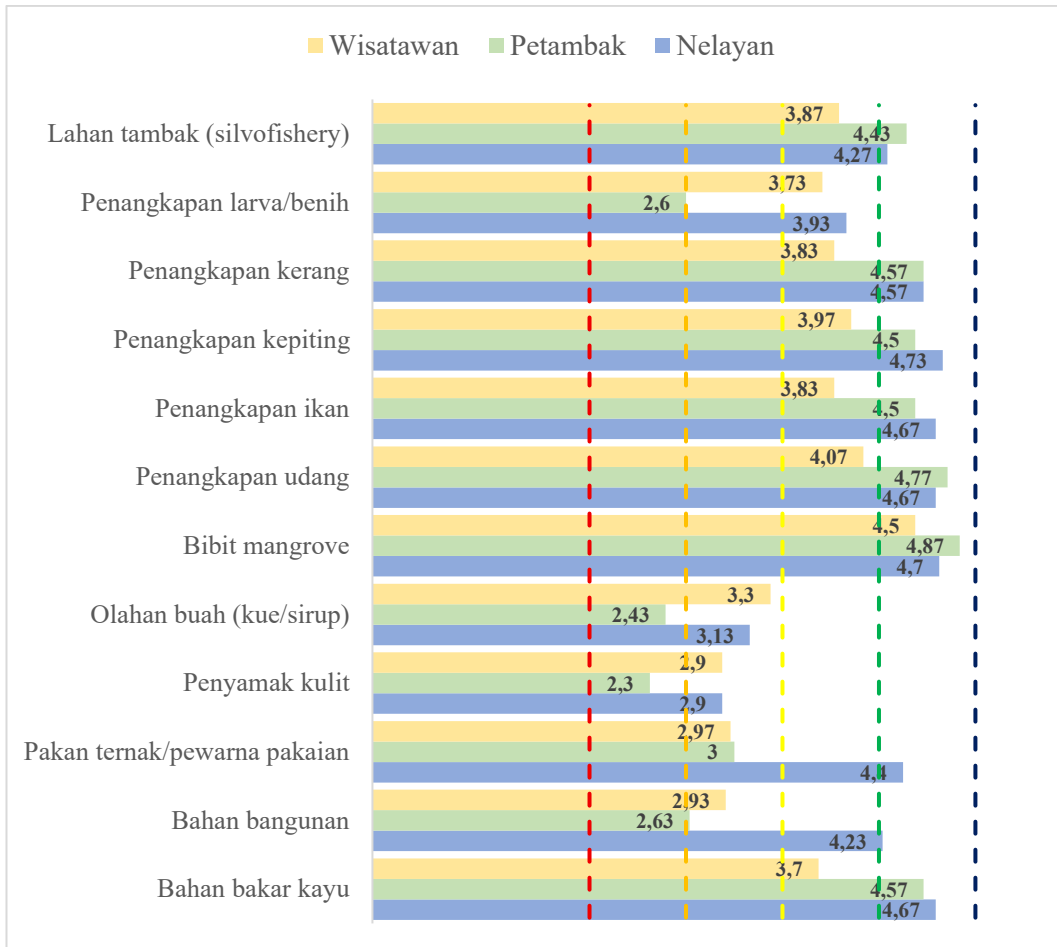
3.3 Jasa Ekosistem dan Nilai Ekonomi Total Ekosistem Mangrove

3.3.1 Persepsi Pemangku Kepentingan terhadap Jasa Ekosistem Mangrove

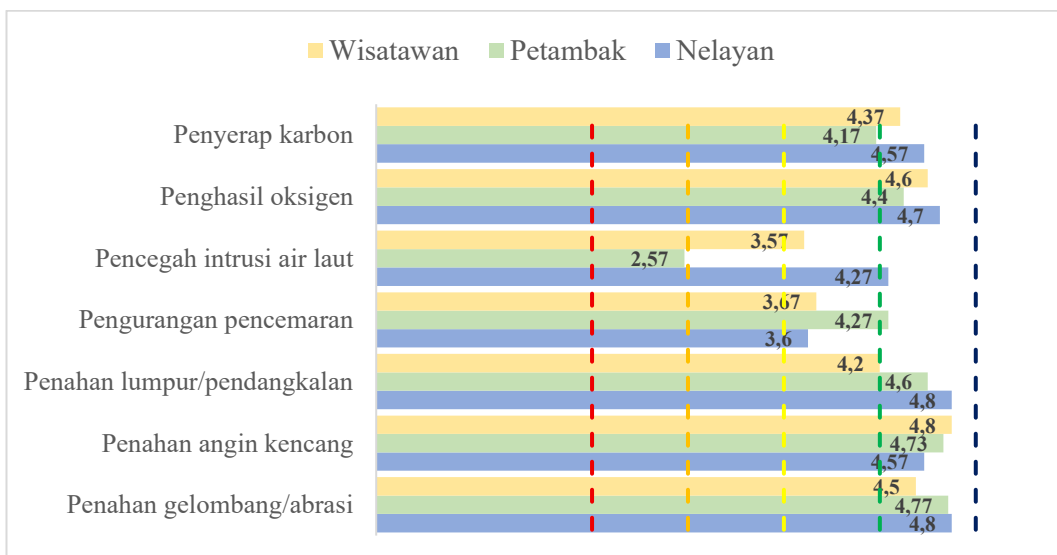
Ekosistem mangrove menyediakan berbagai jasa ekosistem yang dimanfaatkan secara langsung maupun tidak langsung oleh masyarakat pesisir. Persepsi pemangku kepentingan dianalisis berdasarkan empat kategori *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA), yaitu jasa penyediaan (*provisioning services*), jasa pengaturan (*regulating services*), jasa pendukung (*supporting services*), dan jasa kultural (*cultural services*). Penilaian dilakukan terhadap tiga kelompok pemangku kepentingan, yaitu nelayan, petambak, dan wisatawan. Hasil penilaian (Gambar 17–20) menunjukkan bahwa tingkat pemahaman pemangku kepentingan berada pada kategori tahu, dengan skor rata-rata 4,19. Nelayan memiliki skor tertinggi (4,45), diikuti petambak (4,13) dan wisatawan (3,99). Berdasarkan kategori jasa ekosistem, jasa kultural memperoleh skor tertinggi (4,69), diikuti jasa pendukung (4,53), jasa pengaturan (4,31), dan jasa penyediaan (3,88).

Perbedaan skor antar kelompok menunjukkan bahwa intensitas interaksi dengan ekosistem mangrove memengaruhi pembentukan persepsi. Nelayan memiliki tingkat pemahaman tertinggi karena berinteraksi secara rutin dengan kawasan mangrove melalui aktivitas penangkapan ikan sehingga lebih mudah mengenali perubahan kondisi ekosistem dan manfaat yang dihasilkannya. Sebaliknya, petambak lebih banyak beraktivitas di lingkungan tambak, sedangkan wisatawan hanya memanfaatkan kawasan mangrove secara temporal untuk kegiatan rekreasi. Temuan ini sejalan dengan Suyono *et al.* (2014), yang menunjukkan bahwa masyarakat pesisir Brebes memiliki persepsi yang baik terhadap pentingnya mangrove, meskipun tingkat partisipasi dalam kegiatan konservasi belum sepenuhnya sebanding dengan tingkat pemahamannya. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengalaman berinteraksi dengan ekosistem berperan penting dalam membentuk persepsi, tetapi belum selalu diikuti oleh tindakan konservasi.

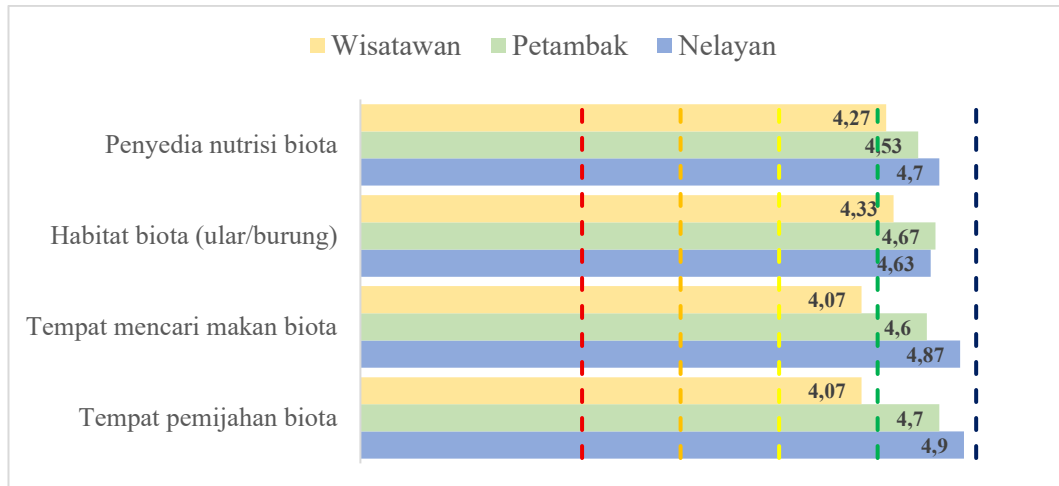
Jasa kultural memperoleh skor tertinggi karena manfaatnya, seperti wisata, pendidikan, dan penelitian, lebih mudah diamati dan dirasakan secara langsung oleh seluruh kelompok pemangku kepentingan. Sebaliknya, jasa penyediaan memperoleh skor terendah karena manfaatnya lebih bergantung pada jenis aktivitas ekonomi masing-masing kelompok. Hasil ini sejalan dengan Afonso *et al.* (2022), yang menunjukkan bahwa masyarakat pesisir cenderung lebih mudah mengenali jasa ekosistem yang dapat diamati secara langsung (*visible ecosystem services*) dibandingkan jasa yang manfaatnya diperoleh melalui proses ekologis yang lebih kompleks.



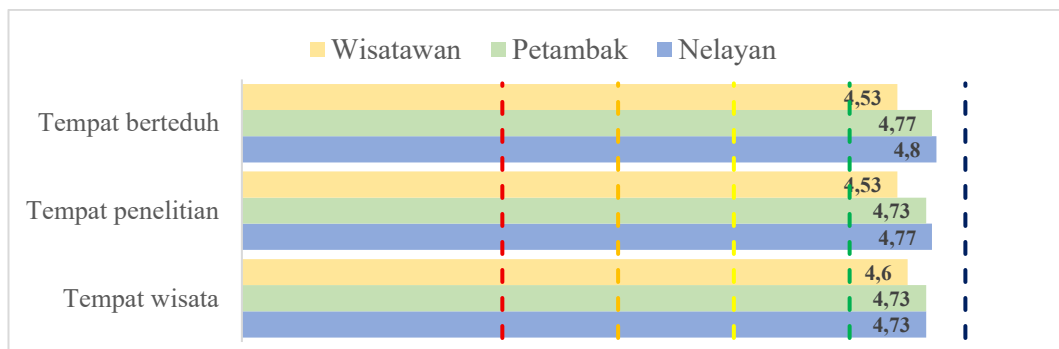
Gambar 17 hasil analisis persepsi jasa ekosistem mangrove kategori *provisioning services*



Gambar 18 Hasil analisis persepsi jasa ekosistem mangrove kategori *regulating services*



Gambar 19 Hasil analisis persepsi jasa ekosistem mangrove kategori *supporting services*



Gambar 20 Hasil analisis persepsi jasa ekosistem mangrove kategori *cultural services*

Pola persepsi tersebut juga konsisten dengan berbagai penelitian pengelolaan mangrove di Indonesia. Huwae *et al.* (2026) menunjukkan bahwa masyarakat lebih mengenali manfaat langsung dibandingkan jasa ekosistem tidak langsung, sedangkan Savitri *et al.* melaporkan bahwa tingginya pemahaman masyarakat menjadi faktor penting dalam keberlanjutan pengelolaan mangrove di Kaliwlingi. Muntalif *et al.* (2013) dan Amrial *et al.* (2015) juga menegaskan bahwa keberhasilan pengelolaan mangrove sangat dipengaruhi oleh kemampuan masyarakat memahami keterkaitan antara fungsi ekologis dan manfaat ekonomi ekosistem. Dengan demikian, persepsi yang baik merupakan modal sosial penting bagi pengelolaan mangrove, tetapi tetap memerlukan dukungan kelembagaan dan insentif ekonomi agar dapat mendorong partisipasi masyarakat dalam konservasi.

Temuan penelitian ini juga sejalan dengan konsep *ecosystem services cascade*, yang menjelaskan bahwa manfaat ekosistem akan lebih mudah dipahami apabila menghasilkan manfaat yang dapat dirasakan secara langsung oleh manusia. Sebaliknya, jasa pengaturan dan jasa pendukung umumnya lebih sulit dikenali karena manfaatnya bersifat tidak langsung dan dirasakan dalam jangka panjang. Meskipun demikian, skor kedua kategori tersebut tetap tinggi, yang menunjukkan bahwa pengalaman masyarakat menghadapi abrasi pantai, perubahan hasil tangkapan, serta keterlibatan dalam kegiatan rehabilitasi telah meningkatkan

pemahaman terhadap fungsi ekologis mangrove. Kondisi ini mengindikasikan bahwa masyarakat pesisir Kecamatan Brebes tidak lagi memandang mangrove hanya sebagai sumber pemanfaatan ekonomi, tetapi juga sebagai ekosistem yang mendukung ketahanan wilayah pesisir.

Meskipun persepsi pemangku kepentingan terhadap jasa ekosistem mangrove tergolong tinggi, penentuan komponen valuasi ekonomi dalam penelitian ini tidak didasarkan pada skor persepsi, melainkan pada aliran manfaat yang benar-benar dimanfaatkan oleh masyarakat. Nilai ekonomi setiap komponen dihitung menggunakan data primer, harga pasar, atau metode valuasi yang sesuai (Barbier 2007; Boyd dan Banzhaf 2007; Fisher *et al.* 2009). Oleh karena itu, analisis persepsi pada subbab ini berfungsi sebagai triangulasi kualitatif yang memperkuat interpretasi terhadap komponen TEV yang dihitung pada subbab berikutnya.

3.3.2 Total Economic Value Ekosistem Mangrove Alami

Ekosistem mangrove alami di pesisir Kecamatan Brebes seluas 645,29 ha (KLHK 2021) menghasilkan enam komponen jasa ekosistem yang terdiri atas dua manfaat langsung, tiga manfaat tidak langsung, dan satu nilai keberadaan. Komponen *Total Economic Value* (TEV) meliputi perikanan tangkap (ML₁) dan ekowisata (ML₂) sebagai manfaat langsung, penahan abrasi (MTL₁), penyedia unsur hara (MTL₂), dan penyimpanan karbon (MTL₃) sebagai manfaat tidak langsung, serta biodiversitas (MP) sebagai nilai keberadaan. Ringkasan hasil valuasi ekonomi setiap komponen disajikan pada Tabel 30, sedangkan rincian perhitungannya terdapat pada Lampiran 6.

Tabel 30 Rekapitulasi *total economic value* ekosistem mangrove alami

Kode	Komponen	Kategori	Nilai/Ha/Tahun (Rp)	Persentase TEV (%)
ML ₁	Perikanan tangkap	DUV	85.376.820	44,43
ML ₂	Ekowisata	DUV	15.130.381	7,87
MTL ₁	Penahan abrasi	IUV	2.268.606	1,18
MTL ₂	Unsur hara	IUV	622.709	0,32
MTL ₃	Karbon	IUV	59.783.343	31,11
MP	Biodiversitas	EV	28.997.700	15,09
Total TEV		-	192.179.559	100
(-) Biaya rehabilitasi		Biaya	2.386.524	-
Net Benefit		-	189.793.035	-

Sumber: Kompilasi Hasil analisis (2025)

Keterangan: DUV = *Direct Use Value*; IUV = *Indirect Use Value*; EV = *Existence Value*

Berdasarkan Tabel 30, nilai TEV ekosistem mangrove alami mencapai Rp192.179.559/ha/tahun dengan *net benefit* sebesar Rp189.793.035/ha/tahun setelah dikurangi biaya rehabilitasi sebesar Rp2.386.524/ha/tahun. Struktur TEV didominasi oleh perikanan tangkap sebesar Rp85.376.820/ha/tahun (44,43%), diikuti penyimpanan karbon sebesar Rp59.783.343/ha/tahun (31,11%),

biodiversitas Rp28.997.700/ha/tahun (15,09%), ekowisata Rp15.130.381/ha/tahun (7,87%), penahan abrasi Rp2.268.606/ha/tahun (1,18%), dan penyedia unsur hara Rp622.709/ha/tahun (0,32%). Komposisi tersebut menunjukkan bahwa manfaat langsung memberikan kontribusi terbesar terhadap TEV, namun jasa ekosistem non-pasar berupa penyimpanan karbon, biodiversitas, serta jasa pengaturan dan pendukung secara kumulatif menyumbang hampir setengah dari total nilai ekonomi ekosistem mangrove.

Nilai TEV pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan penelitian Christy *et al.* (2019) di kawasan mangrove Kaliwlingi, Kabupaten Brebes, yang melaporkan nilai sekitar Rp109 juta/ha/tahun. Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh penggunaan data primer yang lebih baru, cakupan komponen valuasi yang lebih lengkap, terutama dengan memasukkan jasa penyimpanan karbon dan biodiversitas, serta pembaruan harga karbon dan pendekatan valuasi yang digunakan. Di sisi lain, Muntalif *et al.* (2023) menunjukkan bahwa skenario konservasi mangrove menghasilkan manfaat ekonomi bersih yang lebih tinggi dibandingkan konversi menjadi tambak dengan *Benefit Cost Ratio* (BCR) sebesar 4,84. Temuan tersebut menunjukkan bahwa besarnya TEV tidak hanya ditentukan oleh kondisi biofisik ekosistem, tetapi juga oleh kelengkapan komponen jasa ekosistem yang dinilai dan metode valuasi yang digunakan. Dengan demikian, struktur TEV pada penelitian ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai manfaat ekonomi yang dihasilkan ekosistem mangrove.

Struktur TEV menunjukkan bahwa manfaat langsung masih menjadi penyumbang terbesar, terutama melalui perikanan tangkap yang memberikan kontribusi sebesar 44,43% terhadap total nilai ekonomi. Perikanan tangkap menghasilkan *net benefit* rata-rata sebesar Rp77.052.878/tahun ($R/C = 2,30$), sedangkan ekowisata memberikan manfaat sebesar Rp15.130.381/ha/tahun berdasarkan rata-rata kunjungan aktual sebanyak 15.874 pengunjung/tahun. Dominasi manfaat langsung tersebut mencerminkan tingginya ketergantungan masyarakat pesisir terhadap jasa penyediaan yang dihasilkan mangrove. Kondisi ini tidak terlepas dari fungsi ekologis mangrove sebagai *spawning ground*, *nursery ground*, dan *feeding ground* bagi berbagai jenis ikan, udang, dan kepiting yang menjadi komoditas utama nelayan (Nagelkerken *et al.* 2008). Selain itu, dekomposisi serasah mangrove menghasilkan detritus yang menjadi sumber energi utama dalam jaring makanan estuaria sehingga mendukung produktivitas perikanan pesisir (Alongi 2014). Sementara itu, nilai ekonomi ekowisata menunjukkan bahwa kondisi ekosistem mangrove juga telah memberikan manfaat melalui jasa rekreasi, meskipun kontribusinya masih lebih kecil dibandingkan sektor perikanan. Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa tingginya manfaat langsung mencerminkan masih berfungsinya proses ekologis mangrove dalam mendukung produktivitas sumber daya pesisir.

Komponen terbesar kedua dalam struktur TEV adalah jasa penyimpanan karbon dengan nilai Rp59.783.343/ha/tahun atau 31,11% dari total nilai ekonomi. Besarnya kontribusi tersebut menunjukkan bahwa mangrove di pesisir Kecamatan Brebes tidak hanya memberikan manfaat bagi masyarakat lokal, tetapi juga berperan dalam mitigasi perubahan iklim pada skala global. Hasil ini sejalan dengan Huwae *et al.* (2026), yang menempatkan karbon biru sebagai salah satu jasa ekosistem paling prospektif dalam pengelolaan mangrove di Indonesia. Donato *et al.* (2011) dan Kauffman *et al.* (2020) menjelaskan bahwa sebagian besar cadangan

karbon mangrove tersimpan pada sedimen sehingga pelestarian mangrove berperan penting dalam mencegah pelepasan emisi karbon ke atmosfer. Nilai karbon yang lebih tinggi dibandingkan ekowisata tidak menunjukkan bahwa jasa tersebut lebih penting bagi masyarakat, melainkan menggambarkan perbedaan pendekatan valuasi yang digunakan. Nilai karbon dihitung berdasarkan kapasitas penyimpanan karbon yang dikonversi menggunakan harga karbon, sehingga merepresentasikan manfaat global, sedangkan nilai ekowisata dihitung berdasarkan pengeluaran aktual pengunjung (*actual expenditure*) yang mencerminkan manfaat ekonomi yang diterima masyarakat lokal. Dengan demikian, kedua komponen merepresentasikan manfaat pada skala dan penerima manfaat (*beneficiaries*) yang berbeda, namun sama-sama berkontribusi terhadap nilai ekonomi total ekosistem mangrove.

Nilai keberadaan (*existence value*) melalui biodiversitas mencapai Rp28.997.700/ha/tahun atau 15,09% dari TEV, menjadikannya komponen terbesar ketiga dalam struktur nilai ekonomi. Nilai tersebut menunjukkan bahwa manfaat mangrove tidak hanya berasal dari pemanfaatan langsung, tetapi juga dari keberadaan keanekaragaman hayati yang menjaga stabilitas dan keberlanjutan fungsi ekosistem. Estimasi dilakukan menggunakan pendekatan *benefit transfer* yang mengacu pada nilai biodiversitas mangrove tropis yang dikembangkan oleh Ruitenbeek (1992). Costanza *et al.* (2014) menjelaskan bahwa biodiversitas berperan penting dalam meningkatkan stabilitas ekologi, resiliensi terhadap gangguan, serta keberlanjutan penyediaan jasa ekosistem lainnya. Oleh karena itu, tingginya nilai biodiversitas pada penelitian ini tidak hanya merepresentasikan keberadaan spesies, tetapi juga mencerminkan kapasitas ekosistem mangrove dalam mempertahankan berbagai manfaat ekonomi dan ekologis secara berkelanjutan. Bersama dengan jasa penyimpanan karbon, komponen ini menunjukkan bahwa hampir setengah nilai ekonomi mangrove di Kecamatan Brebes berasal dari jasa ekosistem non-pasar yang selama ini belum sepenuhnya dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan pengelolaan kawasan.

Meskipun hanya memberikan kontribusi sebesar 1,50% terhadap TEV, jasa penahan abrasi dan penyedia unsur hara memiliki peran penting dalam mempertahankan fungsi ekologis ekosistem mangrove. Nilai ekonomi penahan abrasi sebesar Rp2.268.606/ha/tahun dan penyedia unsur hara sebesar Rp622.709/ha/tahun relatif kecil karena dihitung menggunakan pendekatan *replacement cost*, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan manfaat ekologis yang dihasilkan. Mangrove berfungsi meredam energi gelombang, menahan sedimen, dan menjaga stabilitas garis pantai (Narayan *et al.* 2016), sekaligus menghasilkan serasah yang menjadi sumber bahan organik dan nutrisi bagi produktivitas primer kawasan estuaria (Kristensen *et al.* 2008; Alongi 2014). Oleh karena itu, rendahnya nilai moneter kedua jasa tersebut lebih mencerminkan keterbatasan pendekatan valuasi dibandingkan rendahnya kontribusi ekologis terhadap keberlanjutan ekosistem.

Secara keseluruhan, struktur TEV menunjukkan bahwa nilai ekonomi ekosistem mangrove di Kecamatan Brebes dibentuk oleh keterkaitan antara manfaat langsung yang dinikmati masyarakat dan jasa ekosistem non-pasar yang menopang keberlanjutan fungsi ekologisnya. Temuan ini memperkuat konsep *interdependent ecosystem services* yang dikemukakan Barbier *et al.* (2011), bahwa setiap jasa ekosistem saling bergantung sehingga penurunan satu fungsi ekologis akan memengaruhi jasa lainnya. Implikasinya, pengelolaan mangrove tidak dapat

diarahkan hanya pada optimalisasi komponen yang memberikan manfaat ekonomi terbesar, tetapi harus mempertahankan seluruh fungsi ekosistem secara terpadu. Struktur TEV yang diperoleh dalam penelitian ini selanjutnya menjadi dasar penyusunan model optimasi, di mana setiap alternatif pemanfaatan ruang dievaluasi berdasarkan manfaat langsung, jasa pengaturan, jasa pendukung, dan nilai keberadaan untuk memperoleh alokasi ruang yang memberikan manfaat ekonomi dan ekologis secara optimal.

3.3.3 Total Economic Value Tambak *Silvofishery*

Total Economic Value (TEV) tambak *silvofishery* di Kecamatan Brebes dihitung berdasarkan komponen nilai penggunaan langsung (*direct use value*) berupa manfaat produksi tambak dan nilai penggunaan tidak langsung (*indirect use value*) yang meliputi jasa penahan erosi tanggul, penyediaan unsur hara, dan penyimpanan karbon. Analisis dilakukan pada kawasan tambak *silvofishery* seluas 2.709,12 ha dengan data primer yang diperoleh dari 30 responden petambak. dan kinerja ekonomi tambak *silvofishery* disajikan pada Tabel 31, sedangkan rekapitulasi nilai ekonomi setiap komponen penyusun TEV disajikan pada Tabel 32 dengan detail perhitungan pada masing masing jasa ekosistem pada lampiran 7.

Tabel 31 Komposisi penerimaan petambak *silvofishery* per komoditas

Komoditas	Total TR 30 Responden (Rp/tahun)	Rata-rata per Petambak (Rp/tahun)	Persentase (%)
Ikan bandeng	441.700.000	14.723.333	39,9
Kepiting	195.470.000	6.515.667	17,7
Udang	47.500.000	1.583.333	4,3
Kerang	10.000.000	333.333	0,9
Rumput laut	411.464.000	13.715.467	37,2
Total TR	1.106.134.000	36.871.133	100

Sumber: Data primer kuesioner (2025)

Tabel 32 Rekapitulasi *total economic value* tambak *silvofishery*

Kode	Komponen	Kategori	Nilai/Ha/Tahun (Rp)	Persentase TEV (%)
ML ₁ _S	Produksi tambak	DUV	7.925.203	43,5
MTL ₁ _S	Penahan erosi tanggul	IUV	278.261	1,5
MTL ₂ _S	Unsur hara	IUV	69.594	0,4
MTL ₃ _S	Karbon	IUV	9.934.775	54,6
Total TEV = Net Benefit			18.207.833	100

Sumber: Kompilasi hasil analisis (2025)

Keterangan: DUV = *Direct Use Value*; IUV = *Indirect Use Value*

Berdasarkan Tabel 31, usaha tambak *silvofishery* menghasilkan total penerimaan sebesar Rp1.106.134.000/tahun dengan *net benefit* Rp546.839.000/tahun atau setara Rp7.925.203/ha/tahun. Nilai rata-rata *R/C Ratio* sebesar 2,25 menunjukkan bahwa usaha tambak layak secara ekonomi, dengan 93,3% responden memiliki *R/C Ratio* lebih dari satu. Sementara itu, nilai TEV tambak *silvofishery* mencapai Rp18.207.833/ha/tahun atau sekitar Rp49,37 miliar/tahun pada luas kawasan 2.709,12 ha. Struktur TEV didominasi oleh jasa penyimpanan karbon sebesar Rp9.934.775/ha/tahun (54,6%), diikuti nilai produksi tambak sebesar Rp7.925.203/ha/tahun (43,5%), sedangkan jasa penahan erosi tanggul dan penyediaan unsur hara masing-masing berkontribusi sebesar 1,5% dan 0,4%. Seluruh biaya operasional dan investasi telah diperhitungkan dalam komponen nilai produksi sehingga TEV merepresentasikan manfaat ekonomi bersih sistem tambak *silvofishery*. Komposisi tersebut menunjukkan bahwa nilai ekonomi *silvofishery* tidak hanya berasal dari kegiatan budidaya, tetapi juga ditopang oleh jasa ekosistem mangrove, terutama penyimpanan karbon.

Sistem *silvofishery* mampu menghasilkan keuntungan ekonomi tanpa menghilangkan fungsi ekologis kawasan pesisir. Nilai *R/C Ratio* sebesar 2,25 menunjukkan bahwa integrasi mangrove ke dalam sistem budidaya tetap layak secara finansial. Hasil ini konsisten dengan Amrial (2015), Damara *et al.* (2023), Adni *et al.* (2024), dan Chalik (2025), yang melaporkan bahwa *silvofishery* memberikan kinerja ekonomi yang baik karena mengombinasikan manfaat produksi dengan jasa ekosistem mangrove. Keberhasilan tersebut didukung oleh peran ekologis mangrove dalam menyediakan bahan organik, berfungsi sebagai *nursery ground*, menjaga kualitas perairan, serta melindungi tanggul dari erosi sehingga mampu mengurangi kebutuhan input eksternal, menekan biaya pemeliharaan, dan meningkatkan efisiensi produksi. Primavera (1997) menjelaskan bahwa keberhasilan *silvofishery* bergantung pada sinergi antara fungsi ekologis mangrove dan aktivitas budidaya, sedangkan Bosma *et al.* (2016) menunjukkan bahwa integrasi mangrove meningkatkan ketahanan sistem budidaya melalui perbaikan kualitas lingkungan dan pengurangan kerentanan terhadap gangguan. Diversifikasi komoditas, seperti ikan bandeng, kepiting, udang, kerang, dan rumput laut, turut memperkuat stabilitas pendapatan petambak sebagai strategi adaptasi terhadap fluktuasi harga dan risiko kegagalan produksi. Dengan demikian, keuntungan ekonomi sistem *silvofishery* merupakan hasil dari keterpaduan fungsi produksi dan fungsi ekologis mangrove.

Struktur TEV memperlihatkan bahwa nilai ekonomi tambak *silvofishery* tidak hanya dibentuk oleh hasil produksi, tetapi juga oleh jasa ekosistem yang menopang keberlanjutan budidaya. Jasa penahan erosi tanggul (1,5%) dan penyedia unsur hara (0,4%) memang memberikan kontribusi ekonomi yang relatif kecil, namun keduanya berperan penting dalam menjaga stabilitas sistem budidaya. Mangrove mampu meredam energi gelombang, menahan sedimen, dan mengurangi erosi tanggul sehingga menekan biaya pemeliharaan (Verhagen 2019; Bosma *et al.* 2020; Gijón *et al.* 2024). Selain itu, serasah mangrove yang terdekomposisi menyediakan nitrogen dan fosfor yang mendukung produktivitas fitoplankton dan organisme benthik sebagai dasar rantai makanan di tambak, sehingga mengurangi kebutuhan pupuk anorganik dan meningkatkan efisiensi budidaya (Budihastuti *et al.* 2012; Hastuti dan Budihastuti 2016; Amrial 2015). Oleh karena itu, rendahnya kontribusi

moneter kedua jasa tersebut lebih mencerminkan keterbatasan pendekatan valuasi daripada rendahnya fungsi ekologis yang diberikan.

Jasa penyimpanan karbon menjadi komponen terbesar TEV dengan nilai Rp9.934.775/ha/tahun atau 54,6% dari total nilai ekonomi. Dominasi tersebut menunjukkan bahwa manfaat *silvofishery* tidak hanya dihasilkan melalui produksi budidaya, tetapi juga melalui jasa pengaturan yang diberikan oleh mangrove. Sebagian besar karbon tersimpan pada sedimen yang jenuh air dan miskin oksigen sehingga proses dekomposisi berlangsung lambat dan karbon dapat terakumulasi dalam jangka panjang (Howard *et al.* 2014; Kauffman *et al.* 2020). Walaupun biomassa mangrove pada sistem *silvofishery* lebih rendah dibandingkan mangrove alami karena vegetasi hanya tumbuh di sepanjang tanggul tambak, simpanan karbon sedimen tetap menjadi penyumbang utama nilai ekonomi kawasan. Temuan ini sejalan dengan Murdiyarso *et al.* (2015), Damara *et al.* (2023), dan Adni *et al.* (2024), yang menunjukkan bahwa sedimen merupakan kompartemen utama penyimpanan karbon pada ekosistem mangrove. Besarnya kontribusi karbon dibandingkan nilai produksi tambak juga mencerminkan perbedaan karakter manfaat yang dihasilkan, di mana nilai produksi merepresentasikan manfaat ekonomi yang diterima langsung oleh petambak, sedangkan nilai karbon merepresentasikan manfaat publik (*public goods*) berupa mitigasi perubahan iklim pada skala regional hingga global.

Dibandingkan dengan ekosistem mangrove alami, TEV tambak *silvofishery* hanya mencapai sekitar 9,5% dari nilai TEV mangrove alami. Perbedaan tersebut terutama dipengaruhi oleh terbatasnya tutupan vegetasi mangrove sehingga kapasitas penyediaan jasa ekosistem, khususnya jasa penyediaan dan jasa pengaturan, menjadi lebih rendah. Meskipun demikian, dominasi jasa penyimpanan karbon menunjukkan bahwa keberadaan mangrove pada tanggul tambak tetap mampu mempertahankan fungsi ekologis yang bernilai tinggi. Dengan demikian, sistem *silvofishery* tidak menggantikan fungsi mangrove alami, tetapi menjadi bentuk pemanfaatan ruang yang mampu mempertahankan sebagian jasa ekosistem sekaligus menghasilkan manfaat ekonomi melalui kegiatan budidaya.

Secara keseluruhan, hasil valuasi menunjukkan bahwa nilai ekonomi tambak *silvofishery* dibentuk oleh keterpaduan antara fungsi produksi dan jasa ekosistem mangrove. Keberhasilan ekonomi sistem ini tidak hanya ditentukan oleh hasil budidaya, tetapi juga oleh kemampuan mempertahankan fungsi ekologis yang mendukung keberlanjutan produksi. Dibandingkan mangrove alami, *silvofishery* menunjukkan adanya *trade-off* antara peningkatan manfaat produksi dan penurunan sebagian jasa ekosistem, sehingga pengelolaan kawasan perlu menyeimbangkan kedua tujuan tersebut. Oleh karena itu, struktur TEV yang diperoleh menjadi dasar penyusunan model optimasi, di mana setiap alternatif pemanfaatan ruang dievaluasi berdasarkan manfaat ekonomi langsung dan jasa ekosistem untuk memperoleh alokasi ruang yang memberikan manfaat total secara optimal sekaligus mempertahankan keberlanjutan ekosistem pesisir.

3.4 Optimasi Alokasi Lahan Kawasan Pesisir Kecamatan Brebes

Optimasi alokasi lahan kawasan pesisir Kecamatan Brebes dilakukan menggunakan pendekatan *linear programming* untuk memperoleh kombinasi pemanfaatan lahan yang memaksimalkan nilai ekonomi kawasan dengan tetap memenuhi seluruh kendala pengelolaan. Model diformulasikan sebagai fungsi

tujuan Maks $Z = 136.002.382X_1 + 427.608.992X_2$, dengan X_1 sebagai luas tambak *silvofishery* yang dipertahankan dan X_2 sebagai luas rehabilitasi mangrove. Optimasi dilakukan pada tiga skenario kebijakan berdasarkan proporsi minimum retensi tambak (α), yaitu S1 ($\alpha = 1,00$), S2 ($\alpha = 0,75$), dan S3 ($\alpha = 0,50$). Hasil optimasi beserta analisis sensitivitas disajikan pada Tabel 33 dan detail untuk hasil model dari aplikasi LINDO disajikan pada Lampiran 8.

Skenario S1 menghasilkan solusi optimum berupa 2.709,12 ha tambak *silvofishery* tanpa rehabilitasi mangrove, dengan nilai fungsi tujuan sebesar Rp368,45 miliar dan *net benefit* ekuilibrium sebesar Rp171,98 miliar per tahun. Penurunan proporsi retensi tambak menjadi 75% pada Skenario S2 mengubah solusi optimum menjadi 2.031,84 ha tambak dan 677,28 ha rehabilitasi mangrove, sehingga nilai fungsi tujuan meningkat menjadi Rp565,95 miliar dengan *net benefit* Rp288,34 miliar per tahun atau 67,7% lebih tinggi dibandingkan S1. Pada Skenario S3, ketika proporsi retensi tambak diturunkan menjadi 50%, model menghasilkan alokasi optimum sebesar 1.354,56 ha tambak dan 1.354,56 ha rehabilitasi mangrove dengan nilai fungsi tujuan Rp763,45 miliar serta *net benefit* Rp404,69 miliar per tahun, meningkat 135,3% dibandingkan kondisi dasar.

Tabel 33 Ringkasan hasil optimasi *linear programming* kawasan pesisir Kecamatan Brebes

Indikator	S1 Baseline	S2 Moderat	S3 Maksimal	Sensitivitas ($\phi=0,81$)
Alpha (α)	1,00	0,75	0,50	0,75
X1* — Luas tambak dipertahankan (ha)	2.709,12	2.031,84	1.354,56	2.031,84
X2* — Luas rehabilitasi mangrove (ha)	0	677,28	1.354,56	677,28
Z* — Nilai fungsi tujuan (Rp miliar)	368,45	565,95	763,45	1.007,20
Total luas mangrove akhir (ha)	645,29	1.322,57	1.999,85	1.322,57
NB equilibrium (Rp miliar/tahun)	171,98	288,34	404,69	288,34
Peningkatan NB vs S1 (Rp miliar/tahun)	—	+116,35	+232,71	+116,35
Peningkatan NB vs S1 (%)	—	+67,7%	+135,3%	+67,7%

Sumber: Hasil analisis LINDO 6.1 (2024) Keterangan: X1* = luas tambak *silvofishery* optimal yang dipertahankan; X2* = luas rehabilitasi mangrove tambahan; Z* = nilai fungsi tujuan (total PV kawasan); NB equilibrium = total net benefit kawasan pada kondisi ekuilibrium setelah 20 tahun; α = proporsi minimum tambak yang dipertahankan; ϕ = proporsi pemulihan ekosistem mangrove rehabilitasi.

Perubahan solusi pada ketiga skenario menunjukkan bahwa model secara sistematis mengalokasikan tambahan luas rehabilitasi mangrove seiring berkurangnya batas minimum retensi tambak. Secara matematis, perubahan nilai

kendala menggeser daerah layak (*feasible region*), sehingga solusi optimum berpindah ke titik sudut baru yang memberikan nilai fungsi tujuan tertinggi. Karakteristik tersebut merupakan sifat fundamental *linear programming*, di mana solusi optimum selalu ditentukan oleh kombinasi kendala aktif (*binding constraints*) dan koefisien fungsi tujuan (Hillier dan Lieberman 2021; Taha 2017). Temuan ini juga sejalan dengan penerapan *optimization-based decision support* pada pengelolaan sumber daya alam, yang menunjukkan bahwa perubahan batasan kebijakan akan mengarahkan model pada konfigurasi alokasi sumber daya yang baru selama fungsi tujuan tetap dipertahankan.

Analisis kendala (Tabel 34) memperlihatkan bahwa K3 (keseimbangan total luas kawasan) dan K4 (batas minimum retensi tambak) merupakan kendala aktif pada seluruh skenario dengan nilai *slack* sama dengan nol, sedangkan K2 (ketersediaan lahan rehabilitasi) tidak pernah menjadi kendala aktif karena masih memiliki sisa kapasitas antara 2.283,59–3.638,15 ha. Pada Skenario S2 dan S3, K1 berubah menjadi kendala tidak aktif karena luas tambak optimum telah berada di bawah batas maksimum yang tersedia. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa solusi optimum lebih dipengaruhi oleh pembatas kebijakan retensi tambak dibandingkan oleh ketersediaan lahan rehabilitasi. Dalam teori optimasi, hanya kendala aktif yang membentuk posisi solusi optimum, sedangkan kendala yang masih memiliki *slack* positif tidak memengaruhi solusi hingga batas tersebut tercapai (Bazaraa *et al.* 2010; Hillier dan Lieberman, 2021).

Tabel 34 Status kendala (*binding analysis*) hasil optimasi *linear programming*

Kendala	S1 Baseline	S2 Moderat	S3 Maksimal	Sensitivitas
K1: $X_1 \leq 2.709,12$ ha	MENGIKAT (slack=0)	Tidak mengikat (sisa 677,28 ha)	Tidak mengikat (sisa 1.354,56 ha)	Tidak mengikat (sisa 677,28 ha)
K2: $X_2 \leq 3.638,15$ ha	Tidak mengikat (sisa 3.638,15 ha)	Tidak mengikat (sisa 2.960,87 ha)	Tidak mengikat (sisa 2.283,59 ha)	Tidak mengikat (sisa 2.960,87 ha)
K3: $X_1+X_2 \leq 2.709,12$ ha	MENGIKAT (slack=0)	MENGIKAT (slack=0)	MENGIKAT (slack=0)	MENGIKAT (slack=0)
K4: $X_1 \geq \alpha \times 2.709,12$ ha	MENGIKAT (slack=0)	MENGIKAT (slack=0)	MENGIKAT (slack=0)	MENGIKAT (slack=0)

Hasil *ranging analysis* (tabel 35) menunjukkan bahwa koefisien fungsi tujuan masih dapat berubah dalam rentang *allowable increase* dan *allowable decrease* tanpa mengubah struktur solusi optimum. Koefisien manfaat rehabilitasi mangrove (X_2) dapat menurun hingga Rp291.606.592 per hektar, sedangkan koefisien manfaat *silvofishery* (X_1) masih dapat meningkat sebesar Rp291.606.592 per hektar sebelum terjadi perubahan basis solusi. Nilai bayangan (*shadow price*) sebesar Rp427.608.992 per hektar pada kendala K3 menunjukkan bahwa setiap tambahan satu hektar kapasitas kawasan berpotensi meningkatkan nilai fungsi tujuan selama perubahan masih berada pada rentang *allowable right-hand side*. Hasil tersebut

menunjukkan bahwa solusi yang diperoleh berada pada *optimal basis* yang stabil sehingga perubahan parameter dalam rentang yang diizinkan tidak mengubah konfigurasi keputusan. Interpretasi ini sejalan dengan konsep *post-optimality analysis*, yang memanfaatkan *allowable range* dan *shadow price* untuk mengevaluasi ketahanan solusi terhadap perubahan parameter dan mendukung pengambilan keputusan berbasis optimasi (Hillier dan Lieberman 2021; Taha 2017).

Tabel 35 *Ranging analysis* koefisien fungsi tujuan hasil optimasi *linear programming*

Skenario	Variabel	Koefisien Ini (Rp/ha)	Saat	Allowable Increase (Rp/ha)	Allowable Decrease (Rp/ha)
S1, S2, S3	X1 (PV_silvo)	136.002.382		291.606.592	Tidak terbatas (turun)
S1, S2, S3	X2 (NPV_rehab)	427.608.992		Tidak terbatas (naik)	291.606.592
Sensitivitas	X1 (PV_silvo)	136.002.382		943.121.088	Tidak terbatas (turun)
Sensitivitas	X2 (NPV_rehab $\phi=0,81$)	1.079.123.439		Tidak terbatas (naik)	943.121.088

Uji *robustness* melalui perubahan asumsi pemulihan ekosistem dari fungsi linear menjadi nilai empiris $\phi = 0,81$ tidak mengubah alokasi optimum lahan, yaitu 2.031,84 ha tambak *silvofishery* dan 677,28 ha rehabilitasi mangrove, meskipun nilai fungsi tujuan meningkat menjadi Rp1.007,20 miliar. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan asumsi hanya memengaruhi besaran manfaat ekonomi yang dihitung, sedangkan struktur keputusan tetap konsisten. Dalam kerangka analisis optimasi, kondisi tersebut mengindikasikan bahwa model memiliki kestabilan yang baik terhadap variasi parameter selama urutan preferensi koefisien fungsi tujuan tidak berubah, sehingga rekomendasi alokasi lahan tetap dapat dipertahankan pada berbagai asumsi yang masih berada dalam rentang analisis (Winston 2004; Hillier dan Lieberman 2021).

Hasil optimasi menunjukkan bahwa model *linear programming* mampu menghasilkan solusi alokasi lahan yang konsisten pada berbagai skenario kebijakan serta mempertahankan kestabilan solusi terhadap perubahan parameter ekonomi dan asumsi pemulihan ekosistem. Kombinasi antara analisis kendala aktif, *ranging analysis*, nilai bayangan, dan uji *robustness* memberikan dasar metodologis bahwa solusi yang dihasilkan tidak hanya optimal secara matematis, tetapi juga memiliki tingkat reliabilitas yang memadai sebagai perangkat pendukung pengambilan keputusan dalam perencanaan alokasi lahan kawasan pesisir. Temuan ini menjadi landasan untuk membahas implikasi ekonomi, ekologis, dan kebijakan dari setiap skenario optimasi pada subbab berikutnya.

3.4.1 Trade-off Pemanfaatan Lahan dan Optimalisasi Nilai Ekonomi Kawasan

Hasil optimasi menunjukkan bahwa peningkatan proporsi rehabilitasi mangrove secara konsisten meningkatkan nilai fungsi tujuan (*objective function*) dan *net benefit* kawasan pada seluruh skenario optimasi (Tabel 33). Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa perubahan komposisi pemanfaatan lahan tidak hanya mengubah konfigurasi ruang, tetapi juga meningkatkan nilai ekonomi kawasan melalui kombinasi fungsi produksi dan jasa ekosistem yang lebih efisien. Dengan demikian, solusi optimum tidak diperoleh dengan memaksimalkan keuntungan dari satu jenis penggunaan lahan, melainkan melalui alokasi ruang yang memberikan manfaat total kawasan tertinggi.

Solusi optimum dalam *linear programming* dicapai ketika setiap aktivitas memberikan kontribusi marginal terbesar terhadap fungsi tujuan dengan tetap memenuhi seluruh kendala (Hillier dan Lieberman 2021; Taha 2017). Pada penelitian ini, rehabilitasi mangrove memperoleh proporsi yang semakin besar karena tambahan manfaat jasa ekosistem yang dihasilkannya lebih tinggi dibandingkan kehilangan manfaat akibat berkurangnya sebagian luas tambak. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *trade-off* antara konservasi dan produksi hanya muncul apabila manfaat ekonomi dinilai berdasarkan satu jenis penggunaan lahan. Ketika seluruh komponen jasa ekosistem diintegrasikan ke dalam fungsi tujuan, rehabilitasi mangrove justru meningkatkan nilai ekonomi kawasan sehingga hubungan antara konservasi dan produksi menjadi saling melengkapi.

Interpretasi tersebut sejalan dengan pendekatan *Integrated Functional Coefficients* (IFC) yang dikembangkan Aguero *et al.* (1996) dan konsep TEV (Barbier *et al.* 2011). Kedua pendekatan tersebut memandang kawasan pesisir sebagai sistem yang tersusun atas berbagai aktivitas ekonomi dan ekologi yang saling memengaruhi melalui aliran manfaat dan eksternalitas. Perubahan penggunaan lahan tidak hanya memengaruhi sektor yang mengalami perubahan, tetapi juga mengubah nilai ekonomi aktivitas lain melalui perubahan fungsi ekosistem. Oleh karena itu, peningkatan proporsi rehabilitasi mangrove mampu meningkatkan nilai ekonomi kawasan karena memperbesar kontribusi jasa ekosistem, seperti perlindungan pantai, penyimpanan karbon (*blue carbon*), pemeliharaan kualitas perairan, dan fungsi habitat yang menopang produktivitas kawasan secara keseluruhan.

Hasil penelitian ini memperkuat temuan Araneda *et al.* (1996), yang menunjukkan bahwa manfaat ekonomi kawasan pesisir meningkat ketika sektor perikanan, kehutanan, dan pengelolaan lingkungan dianalisis secara terintegrasi dibandingkan secara terpisah. Hasil *robustness test* juga menunjukkan bahwa perubahan asumsi tingkat pemulihan ekosistem menjadi $\phi = 0,81$ tidak mengubah konfigurasi alokasi lahan optimum, meskipun meningkatkan nilai fungsi tujuan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keunggulan rehabilitasi mangrove bukan merupakan konsekuensi dari satu asumsi tertentu, melainkan mencerminkan kontribusinya yang konsisten terhadap peningkatan nilai ekonomi kawasan. Temuan ini sejalan dengan meta-analisis Su *et al.* (2021), yang melaporkan bahwa rehabilitasi mangrove mampu memulihkan sekitar 81% fungsi ekosistem alami sehingga manfaat ekonomi dan ekologinya tetap tinggi meskipun proses pemulihan berlangsung secara bertahap.

Meskipun demikian, model optimasi tidak merekomendasikan konversi seluruh kawasan menjadi hutan mangrove. Sebagian kawasan tambak tetap dipertahankan karena budidaya merupakan sumber penghidupan utama masyarakat pesisir sekaligus memberikan manfaat ekonomi langsung yang tidak dapat sepenuhnya digantikan oleh jasa ekosistem. Sebaliknya, rehabilitasi mangrove berperan mempertahankan fungsi ekologis yang mendukung produktivitas budidaya dalam jangka panjang. Hasil ini mendukung konsep *ecosystem-based management*, di mana konservasi dan produksi dipandang sebagai dua komponen yang saling melengkapi dalam satu sistem pengelolaan pesisir. Temuan Harefa *et al.* (2022), Santoso *et al.* (2025), serta Suyono dan Fithor (2025) juga menunjukkan bahwa peningkatan tutupan mangrove mampu mendukung produktivitas budidaya sekaligus meningkatkan keberlanjutan sumber daya pesisir.

Secara keseluruhan, hasil optimasi menunjukkan bahwa peningkatan proporsi rehabilitasi mangrove merupakan strategi yang mampu memaksimalkan nilai ekonomi kawasan melalui integrasi fungsi produksi dan jasa ekosistem. Temuan ini menegaskan bahwa optimalisasi pemanfaatan ruang pesisir tidak hanya ditentukan oleh keuntungan finansial setiap aktivitas, tetapi juga oleh kemampuan mempertahankan fungsi ekologis yang menopang manfaat ekonomi dalam jangka panjang. Oleh karena itu, keseimbangan antara rehabilitasi mangrove dan budidaya *silvofishery* menjadi prasyarat utama dalam mewujudkan pengelolaan kawasan pesisir yang berkelanjutan sekaligus memberikan dasar ilmiah bagi penyusunan kebijakan alokasi ruang yang mengintegrasikan tujuan ekonomi dan konservasi.

3.4.2 Implikasi Ekologis Integrasi Mangrove dan *Silvofishery*

Konfigurasi optimum yang dihasilkan model membentuk lanskap pesisir dengan konektivitas ekologis (*ecological connectivity*) yang lebih baik melalui peningkatan luas rehabilitasi mangrove tanpa menghilangkan seluruh kawasan budidaya. Pada Skenario 2, rehabilitasi mangrove seluas 677,28 ha meningkatkan tutupan mangrove dari 645,29 ha menjadi 1.322,57 ha, sementara sebagian tambak tetap dipertahankan sebagai sistem *silvofishery*. Konfigurasi tersebut memperkuat keterhubungan antara habitat mangrove, tambak, dan perairan pesisir sehingga mendukung perpindahan organisme, aliran bahan organik, serta siklus nutrisi yang menjadi dasar keberlanjutan ekosistem pesisir.

Peningkatan konektivitas tersebut mempercepat pemulihan fungsi habitat dan produktivitas ekosistem. Mangrove menyediakan tempat pemijahan (*spawning ground*), daerah asuhan (*nursery ground*), tempat mencari makan (*feeding ground*), serta habitat bagi berbagai organisme bentik dan nekton. Selain itu, serasah mangrove yang terdekomposisi menghasilkan detritus sebagai sumber bahan organik bagi mikroorganisme dan organisme akuatik, sehingga meningkatkan ketersediaan nutrisi yang menopang produktivitas perairan. Barbier *et al.* (2011) menjelaskan bahwa fungsi habitat dan siklus nutrisi merupakan mekanisme utama yang menjaga produktivitas ekosistem pesisir. Temuan ini diperkuat oleh Suyono dan Fithor (2025), yang menunjukkan bahwa rehabilitasi mangrove di Kaliwlingi mampu meningkatkan kompleksitas habitat serta kelimpahan gastropoda dan kepiting bakau sebagai indikator pulihnya fungsi ekologis kawasan.

Integrasi mangrove dalam sistem *silvofishery* juga memperbaiki kondisi biofisik kawasan budidaya. Vegetasi mangrove membantu menyaring sedimen, menyerap sebagian nutrisi berlebih, serta menstabilkan dinamika hidrologi yang memengaruhi kualitas air tambak. Kondisi tersebut mendukung lingkungan

budidaya yang lebih stabil melalui penyediaan habitat alami, sumber pakan, dan perbaikan kualitas perairan (Harefa *et al.* 2022). Namun, manfaat tersebut bergantung pada keseimbangan antara tutupan mangrove dan ruang budidaya. Santoso *et al.* (2025) melaporkan bahwa kerapatan mangrove yang terlalu tinggi dapat meningkatkan peneduhan (*shading*), menurunkan intensitas fotosintesis, dan mengurangi konsentrasi oksigen terlarut. Oleh karena itu, keberhasilan *silvofishery* memerlukan pengaturan kerapatan vegetasi, konektivitas hidrologi, dan pengelolaan tambak yang adaptif agar fungsi ekologis dan fungsi budidaya tetap berjalan secara seimbang.

Selain memulihkan fungsi habitat, rehabilitasi mangrove meningkatkan ketahanan ekosistem (*ecological resilience*) terhadap berbagai tekanan lingkungan. Vegetasi mangrove berperan meredam energi gelombang, mengurangi abrasi, menstabilkan sedimen, serta menekan kerentanan terhadap banjir rob dan kenaikan muka air laut. Mangrove juga merupakan salah satu ekosistem dengan kapasitas penyimpanan karbon (*blue carbon*) tertinggi pada biomassa dan sedimen. Meskipun model optimasi tidak mengestimasi perubahan stok karbon akibat skenario rehabilitasi secara langsung, peningkatan tutupan mangrove mengindikasikan meningkatnya kapasitas penyimpanan karbon dan jasa regulasi iklim. Temuan ini sejalan dengan Artasya (2026), yang menunjukkan bahwa penyimpanan karbon, pemurnian air, dan fungsi *nursery ground* merupakan jasa ekosistem utama yang mendukung keberlanjutan sistem *silvofishery*.

Secara keseluruhan, konfigurasi optimum menunjukkan bahwa rehabilitasi mangrove tidak hanya meningkatkan luas tutupan vegetasi, tetapi juga memulihkan proses-proses ekologis yang menopang keberlanjutan ekosistem pesisir. Peningkatan konektivitas habitat, siklus nutrien, kualitas perairan, kapasitas penyimpanan karbon, dan ketahanan terhadap gangguan lingkungan memperlihatkan bahwa integrasi rehabilitasi mangrove dan *silvofishery* mampu mempertahankan integritas ekologi (*ecological integrity*) pada tingkat lanskap. Dengan demikian, strategi ini tidak hanya mendukung keberlanjutan fungsi ekosistem, tetapi juga menyediakan dasar ekologis yang kuat bagi pengelolaan dan penataan ruang pesisir yang adaptif dan berkelanjutan.

3.4.3 Implikasi terhadap Pengelolaan Kawasan Pesisir dan Tata Ruang Berkelanjutan

Konfigurasi hasil optimasi memberikan dasar kuantitatif bagi penyusunan pengelolaan dan penataan ruang kawasan pesisir yang mempertimbangkan manfaat ekonomi sekaligus fungsi ekosistem. Berbeda dengan pendekatan yang hanya didasarkan pada kondisi penggunaan lahan eksisting, model yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan proporsi pemanfaatan ruang yang mampu menghasilkan manfaat kawasan secara optimal. Dengan demikian, hasil optimasi dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan prioritas rehabilitasi mangrove, mempertahankan kawasan budidaya yang masih produktif, serta mengarahkan pemanfaatan ruang sesuai kapasitas ekologis kawasan.

Implikasi tersebut sejalan dengan kerangka pengelolaan wilayah pesisir di Indonesia sebagaimana diatur dalam Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2007 sebagaimana telah diubah dengan Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2014, yang menekankan pengelolaan sumber daya pesisir secara terpadu, berkelanjutan, dan berbasis karakteristik ekosistem. Dalam konteks tersebut, hasil optimasi dapat

mendukung penyusunan maupun evaluasi rencana tata ruang dan dokumen pengelolaan wilayah pesisir dengan menyediakan dasar ilmiah dalam menentukan alokasi rehabilitasi mangrove dan kawasan budidaya berdasarkan kesesuaian biofisik, nilai ekonomi, dan jasa ekosistem. Pendekatan ini memungkinkan proses penataan ruang tidak hanya berorientasi pada distribusi spasial penggunaan lahan, tetapi juga pada keberlanjutan fungsi kawasan dalam jangka panjang.

Penerapan hasil optimasi perlu dilakukan melalui pendekatan pengelolaan yang adaptif karena kondisi kawasan pesisir terus berubah akibat abrasi, sedimentasi, dinamika garis pantai, maupun perubahan sosial ekonomi masyarakat. Hasil analisis sensitivitas dan *robustness* menunjukkan bahwa konfigurasi optimum tetap konsisten terhadap perubahan parameter yang diuji, sehingga memberikan tingkat kepercayaan yang memadai sebagai dasar pengambilan keputusan. Meskipun demikian, model tetap perlu diperbarui secara berkala menggunakan informasi terbaru mengenai perubahan tutupan mangrove, produktivitas tambak, nilai jasa ekosistem, dan kondisi biofisik kawasan. Pendekatan tersebut sejalan dengan konsep *adaptive management*, yang menempatkan pemantauan, evaluasi, dan pembelajaran sebagai bagian dari proses pengelolaan pesisir (Savitri *et al.* 2025).

Dalam implementasinya, model optimasi dapat berfungsi sebagai *decision support system* yang membantu pemerintah mengevaluasi berbagai alternatif pemanfaatan ruang sebelum kebijakan diterapkan. Integrasi data biofisik, spasial, dan ekonomi memungkinkan simulasi berbagai skenario pengelolaan sehingga keputusan yang diambil menjadi lebih transparan, adaptif, dan berbasis bukti ilmiah (*evidence-based policy*). Di sisi lain, keberhasilan implementasi tetap bergantung pada kapasitas kelembagaan dan partisipasi masyarakat, terutama dalam pengelolaan sistem *silvofishery* yang menempatkan masyarakat sebagai pelaku utama pemeliharaan mangrove sekaligus pengguna sumber daya pesisir. Harefa *et al.* (2022) menunjukkan bahwa keberhasilan *silvofishery* sangat dipengaruhi oleh kemampuan masyarakat mempertahankan tutupan mangrove tanpa mengurangi keberlanjutan usaha budidaya. Oleh karena itu, implementasi hasil optimasi perlu didukung oleh penguatan kelembagaan, penyuluhan, insentif, serta kolaborasi antarpemangku kepentingan.

Kontribusi utama penelitian ini adalah mengintegrasikan analisis kesesuaian lahan, valuasi jasa ekosistem, dan optimasi *linear programming* ke dalam satu kerangka pengambilan keputusan spasial. Pendekatan tersebut tidak hanya menghasilkan rekomendasi alokasi lahan yang optimal, tetapi juga menjelaskan dasar ekonomi dan ekologis dari setiap keputusan pemanfaatan ruang. Kerangka ini dapat direplikasi pada wilayah pesisir lain dengan karakteristik yang serupa melalui penyesuaian parameter biofisik, ekonomi, dan sosial sesuai kondisi setempat. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa optimasi spasial berbasis jasa ekosistem dapat menjadi landasan ilmiah dalam mendukung pengelolaan kawasan pesisir yang adaptif dan berkelanjutan. Model yang dikembangkan tidak hanya menghasilkan konfigurasi alokasi lahan yang optimal, tetapi juga menyediakan kerangka pengambilan keputusan yang dapat diperbarui mengikuti dinamika biofisik, ekonomi, dan sosial. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi praktis bagi perencanaan ruang pesisir yang mampu menyeimbangkan tujuan konservasi, pembangunan ekonomi, dan keberlanjutan ekosistem dalam jangka panjang.

IV SIMPULAN DAN SARAN

4.1 Simpulan

1. Kondisi biofisik kawasan tambak dan ekosistem mangrove pesisir Kecamatan Brebes berbeda nyata antara mangrove alami dan tambak *silvofishery*. Mangrove alami unggul pada seluruh indikator vegetasi dan karbon biomassa, dengan kerapatan (3.883 ind/ha berbanding 966 ind/ha) dan karbon biomassa (71,13 Mg C/ha berbanding 10,75 Mg C/ha) jauh lebih tinggi daripada *silvofishery*, sementara karbon sedimen relatif setara pada kedua sistem. Parameter hidrooseanografi (gelombang, pasang surut, arus) berkategori Sangat Sesuai (S1) di seluruh kawasan, meskipun kualitas air pada sebagian stasiun melampaui baku mutu KepMenLH No. 51 Tahun 2004.
2. Kesesuaian pemanfaatan lahan menunjukkan kawasan sesuai (S1 dan S2) untuk tambak budidaya seluas 2.195,45 ha (23,14 persen), untuk rehabilitasi mangrove seluas 3.638,15 ha (38,34 persen), dan untuk ekowisata mangrove hanya 506,02 ha (5,33 persen) tanpa satu pun kelas Sangat Sesuai. Tumpang tindih spasial antara kawasan sesuai tambak dan sesuai rehabilitasi menunjukkan persaingan pemanfaatan ruang yang memerlukan optimasi alokasi lahan.
3. Nilai jasa ekosistem mangrove alami mencapai net benefit Rp189.793.035 per hektare per tahun, didominasi komponen perikanan tangkap dan karbon, sedangkan tambak *silvofishery* menghasilkan net benefit Rp18.207.833 per hektare per tahun, didominasi komponen karbon dan produksi tambak. Net benefit mangrove alami tercatat sekitar 10,4 kali lebih tinggi daripada tambak *silvofishery*.
4. Model pemanfaatan optimal dirumuskan melalui *linear programming* dengan fungsi tujuan Maks $Z = 136.002.382 X_1 + 427.608.992 X_2$, dengan Skenario S2 (proporsi minimum retensi tambak $\alpha = 0,75$) sebagai model terpilih: mempertahankan 2.031,84 ha tambak *silvofishery* (X_1^*) dan menambahkan 677,28 ha rehabilitasi mangrove (X_2^*), sehingga luas mangrove kawasan meningkat dari 645,29 ha menjadi 1.322,57 ha. Skenario ini menghasilkan Z^* sebesar Rp565,95 miliar dan net benefit ekuilibrium Rp288,34 miliar per tahun, meningkat 67,7 persen dari baseline. Kendala total luas kawasan (K3) dan retensi minimum tambak (K4) mengikat pada seluruh skenario, sedangkan kendala ketersediaan lahan rehabilitasi (K2) tidak pernah mengikat, menunjukkan bahwa faktor pembatas utama adalah kebijakan perlindungan mata pencaharian petambak, bukan ketersediaan lahan ekologis.

4.2 Saran

Penelitian lanjutan disarankan mengembangkan model *goal programming* atau *multi objective programming* yang bersifat multi periode dengan menambahkan ekowisata mangrove sebagai variabel keputusan ketiga, mengingat kesesuaian ekowisata seluas 506,02 ha belum ikut bersaing dalam model saat ini, serta memberi bobot eksplisit pada tujuan ekologi, ekonomi, dan sosial agar *trade off* pada kendala kebijakan retensi minimum tambak (K4) dapat dikuantifikasi, mengingat nilai bayangannya tidak terdefinisi pada output LINDO 6.1. Dari sisi kebijakan, karena kendala ketersediaan lahan ekologis (K2) tidak pernah mengikat

sementara K4 mengikat pada seluruh skenario, konversi 677,28 ha lahan menuju rehabilitasi perlu disertai skema kompensasi atau diversifikasi mata pencaharian bagi petambak terdampak, prioritas spasial pada kawasan kelas Sangat Sesuai seluas 1.703,48 ha, serta mekanisme insentif fiskal seperti pembayaran jasa lingkungan atau perdagangan karbon untuk merealisasikan net benefit yang saat ini masih bersifat teoretis, disertai evaluasi dan pemutakhiran koefisien model setiap 5 tahun agar rekomendasi alokasi lahan tidak diperlakukan sebagai keputusan final untuk 20 tahun ke depan.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR PUSTAKA

- Adame MF, Lovelock CE. 2011. Carbon and nutrient exchange of mangrove forests with the coastal ocean. *Hydrobiologia*. 663(1). doi:10.1007/s10750-010-0554-7.
- Adni SF, Fatimah G, Saputri HR, Rahmadhani K, Hartoyo APP. 2024. Potensi *silvofishery* sebagai *blue carbon reservoir* dan sumber pendapatan masyarakat di Desa Sawah Luhur, Banten dalam mitigasi perubahan iklim. *Jurnal Silva Tropika*. 8(1):1–13. doi:10.22437/jurnalsilvatropika.v8i1.33017.
- Ahmed Y, Kurniawan CA, Efendi GR, Pribadi R, Nainggolan FA, Samudra MBGS. 2023. Estimasi cadangan karbon mangrove berdasarkan perbedaan tahun tanam rehabilitasi mangrove (2005, 2008, 2011, 2014, dan 2017) di kawasan ekowisata mangrove Pandansari, Kabupaten Brebes. *Buletin Oseanografi Marina*. 12(1):9–19. doi:10.14710/buloma.v12i1.40871.
- Afonso F, Felix PM, Chainho P, Longarito L, Ribeiro R, Carvalho S, Costa JL. 2022. Community perceptions about mangrove ecosystem services and threats. *Regional Studies in Marine Science*. 49:102114. doi:10.1016/j.rsma.2021.102114.
- Agüero MA, Cruz-Trinidad A, Gonzalez E, Bell F. 1996. The integrated functional coefficients method for coastal resources valuation. Di dalam: Cruz-Trinidad A, editor. *Valuation of Tropical Coastal Resources: Theory and Application of linear programming*. ICLARM Studies and Reviews No. 25. Manila (PH): ICLARM dan ECLAC. hlm 1–8.
- Arkema KK, Abramson SC, Dewsbury BM. 2006. Marine ecosystem-based management: From characterization to implementation. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 4(10):525–532. doi:10.1890/1540-9295(2006)4[525:MEMFCT]2.0.CO;2.
- Alongi DM. 2013. Cycling and global fluxes of nitrogen in mangroves. *Global Environmental Research*. 17:173–182.
- Alongi DM. 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*. 6(1):195–219. doi:10.1146/annurev-marine-010213-135020.
- [APHA] American Public Health Association. 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Ed ke-23. Washington DC (US): APHA Press.
- Amrial Y, Effendi H, Damar A. 2015. Pengelolaan ekosistem mangrove berbasis *silvofishery* di Kecamatan Cibuaya, Kabupaten Karawang. *Jurnal Kebijakan Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan*. 5(1):59–70. doi:10.15578/jksekp.v5i1.1032
- Apriadi, Budastra I, Sjah T. 2025. Valuasi potensi ekonomi jasa lingkungan mangrove pada kawasan ekowisata Bagek Kembar, Lombok Barat. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa AGROKOMPLEK*. 4(3):982–991. doi:10.29303/y3kmzg30.
- Araneda E, Cruz-Trinidad A, Morales F, Arellano A. 1996. Optimization of economic benefits from fishery and forestry in Bío-Bío, Chile. Hlm. 32–62. Dalam: Cruz-Trinidad A, editor. *Valuation of Tropical Coastal Resources: Theory and Application of linear programming*. ICLARM Studies and

- Reviews No. 25. Makati City (PH): International Center for Living Aquatic Resources Management (ICLARM).
- Arsandi D, Rejeki S, Aryati RW. 2017. Analisa kesesuaian lahan untuk penerapan *Integrated Multi Trophic Aquaculture* (IMTA) melalui pendekatan SIG di pesisir Kabupaten Brebes Jawa Tengah. *Journal of Aquaculture Management and Technology*. 6(3):68–77.
- Artasya B. 2026. *Integrasi ekosistem mangrove-perikanan, untuk kesejahteraan: Dapatkah silvofishery menjadi strategi tambak berkelanjutan?* [tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Aryanto AEP, Herbowo ACF, Mukarromah AN, Aulia AD, Zulfikar AB, Pitoyo A, Setyawan AD. 2025. Ecophysiological effects of mangrove canopy density on surface thermal conditions in a tropical lagoon ecosystem of Segara Anakan, Indonesia. *Cell Biology and Development*. 9(1):12–25. doi:10.13057/cellbioldev.v090102.
- A'yun Q, Takarina ND. 2026. Produktivitas serasah *Avicennia* sp. pada tambak *silvofishery* di Blanakan, Subang. *Jurnal Akuakultur Indonesia*. 5(2):188–202. doi:10.46576/jai.v5i2.8641.
- Azmi YU, Zuhry N, Mulyani S. 2025. Analisis kesesuaian wisata mangrove dan strategi pengelolaan ekowisata di Pulau Cemara Sawojajar Kabupaten Brebes. *Jurnal Perikanan Pantura*. 8(2):857–869. doi:10.30587/jpp.v8i2.10381.
- Azzahra FS, Suryanti S, Febrianto S. 2020. Estimasi serapan karbon pada hutan mangrove Desa Bedono, Demak, Jawa Tengah. *Journal of Fisheries and Marine Research*. 4(2):308–315. doi:10.21776/ub.jfmr.2020.004.02.15.
- [BIG] Badan Informasi Geospasial. 2025. *Data Pasang Surut Perairan Kecamatan Brebes Tahun 2025*. Cibinong (ID): Badan Informasi Geospasial. [diakses 2025 Mar–Apr]. Tersedia dari: <https://www.big.go.id>.
- [BPS] Badan Pusat Statistik Kabupaten Brebes. 2022. *Kabupaten Brebes dalam Angka 2022*. Brebes (ID): Badan Pusat Statistik Kabupaten Brebes.
- [BPS] Badan Pusat Statistik Kabupaten Brebes. 2024. *Kabupaten Brebes dalam Angka 2024*. Brebes (ID): Badan Pusat Statistik Kabupaten Brebes.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2024. *Indeks Harga Perdagangan Besar Indonesia 2024*. Jakarta (ID): Badan Pusat Statistik.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2005. *SNI 02-3769-2005: Pupuk Fosfat Alam (SP-36)*. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2010. *SNI 2801:2010: Pupuk Urea*. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional.
- Bandira PNA, Mahamud MA, Samat N, Tan ML, Chan NW. 2021. GIS-based multi-criteria evaluation for potential inland aquaculture site selection in the George Town Conurbation, Malaysia. *Land*. 10(11):1174. doi:10.3390/land10111174.
- Bank Indonesia. 2024. *Kurs Transaksi Bank Indonesia*. Jakarta (ID): Bank Indonesia.
- Barbier EB. 2007. Valuing ecosystem services as productive inputs. *Economic Policy*. 22(49):177–229. doi:10.1111/j.1468-0327.2007.00174.x.
- Barbier EB. 2012. A spatial model of coastal ecosystem services. *Ecological Economics*. 78:70–79. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.03.015.

- Barbier EB, Hacker SD, Kennedy C, Koch EW, Stier AC, Silliman BR. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*. 81(2):169–193. doi:10.1890/10-1510.1.
- Bazaraa MS, Jarvis JJ, Sherali HD. 2010. *linear programming and Network Flows*. Ed ke-4. Hoboken (US): John Wiley dan Sons.
- Bengen DG. 2001. *Sinopsis Ekosistem dan Sumberdaya Alam Pesisir*. Bogor (ID): Pusat Kajian Sumberdaya Pesisir dan Lautan, Institut Pertanian Bogor.
- Bengen DG. 2004. *Pedoman Teknis Pengenalan dan Pengelolaan Ekosistem Mangrove*. Bogor (ID): Pusat Kajian Sumberdaya Pesisir dan Lautan, Institut Pertanian Bogor.
- Bosire JO, Dahdouh-Guebas F, Walton M, Crona BI, Lewis RR III, Field CD, Kairo JG, Koedam N. 2008. Functionality of restored mangroves: A review. *Aquatic Botany*. 89(2):251–259. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2008.03.010>.
- Bosma RH, Debrot D, Rejeki S, Tonneijck F, Yuniati A, Sihombing W. 2020. *Associated Mangrove Aquaculture Farms: Building with Nature to Restore Eroding Tropical Muddy Coasts*. Ecoshape Technical Report. Dordrecht (NL): Wetlands International.
- Bosma RH, Nguyen TH, Siahainenia AJ, Tran HTP, Tran HN. 2016. Shrimp-based livelihoods in mangrove silvo-aquaculture farming systems. *Reviews in Aquaculture*. 8(1):43–60. doi:10.1111/raq.12072.
- Bosma RH, Sidik AS, van Zwieten PAM, Aditya A, Visser L. 2012. Challenges of a transition to a sustainably managed shrimp culture agro-ecosystem in the Mahakam Delta, East Kalimantan, Indonesia. *Wetlands Ecology and Management*. 20(2):89–99. doi:10.1007/s11273-011-9244-0.
- Boyd CE. 2015. *Water Quality: An Introduction*. Ed ke-2. Cham (CH): Springer.
- Boyd J, Banzhaf S. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*. 63(2–3):616–626. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.01.002.
- Budiastuti R, Anggoro S, Saputra SW. 2012. The application of *silvofishery* on tilapia (*Oreochromis niloticus*) and milkfish (*Chanos chanos*) fattening within mangrove ecosystem of the northern coastal area of Semarang City. *Journal of Coastal Development*. 16(1):89–93.
- Burke M, Hsiang SM, Miguel E. 2015. Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*. 527:235–239. doi:10.1038/nature15725.
- Cahyaningsih AP, Deanova AK, Pristiawati CM. 2022. Review: Causes and impacts of anthropogenic activities on mangrove deforestation and degradation in Indonesia. *Bonorowo Wetlands*. 12(1):12–22. doi:10.13057/bonorowo/w120102.
- Chalik A, Indra SB, Rozalina. 2025. Analisis finansial usaha tambak sistem wanamina (*silvofishery*) di Kecamatan Seruway Kabupaten Aceh Tamiang. *Jurnal Pertanian dan Peternakan*. 3(1):29–37. doi:10.62017/gabbah.
- Christy YA, Setyati WA, Pribadi R. 2019. Kajian valuasi ekonomi ekosistem hutan mangrove di Desa Kaliwlingi dan Desa Sawojajar, Kabupaten Brebes, Jawa Tengah. *Jurnal Marine Research*. 8(1):94–106. doi:10.14710/jmr.v8i1.24334.
- Copernicus Marine Service. 2026. *Copernicus Marine Data Store*. Mercator Ocean International. doi:10.48670/marine-data-store. [diakses 2026 Jan 20].

- Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson SJ, Kubiszewski I, Farber S, Turner RK. 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*. 26:152–158. doi:10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002.
- Cruz-Trinidad A, Alojado Z, Cargamento AGC. 1996. Options for land use management in Lingayen Gulf, Philippines. Di dalam: Cruz-Trinidad A, editor. *Valuation of Tropical Coastal Resources: Theory and Application of linear programming*. ICLARM Studies and Reviews No. 25. Manila (PH): ICLARM dan ECLAC. hlm 64–77.
- Damai AA. 2012. *Sistem Perencanaan Tata Ruang Wilayah Pesisir: Studi Kasus Teluk Lampung* [disertasi]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Damara R, Junaidi T, Hilmi E, Fauzi I. 2023. Valuasi ekonomi berbasis *cashflows* dan *payback periods* dari aktivitas *silvofishery* di Segara Anakan Timur Cilacap. *Jurnal Maiyah*. 2(4):298–309. doi:10.20884/1.maiyah.2023.2.4.10144.
- Dasgupta S, Islam MS, Huq M, Khan ZH, Hasib MR. 2019. Quantifying the protective capacity of mangroves from storm surges in coastal Bangladesh. *PLoS ONE*. 14(3):e0214079. doi:10.1371/journal.pone.0214079.
- Deng FY, Hou LJ, Liu M, Zheng YL, Yin GY, Li XF, Lin XB, Chen F, Gao J, Jiang XF. 2015. Dissimilatory nitrate reduction processes and associated contribution to nitrogen removal in sediments of the Yangtze Estuary. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 120:1521–1531. doi:10.1002/2015JG003007.
- Dharmawan IWS, Siregar CA. 2008. Karbon tanah dan pendugaan karbon tegakan *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. di Ciasem, Purwakarta. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*. 5(4):317–328. doi:10.20886/jphka.2008.5.4.317-328.
- Dharmawan IWS. 2013. Persamaan allometrik pohon mangrove *Avicennia marina*. *Buletin Penelitian Kehutanan*. 11(1):1–12.
- Donato DC, Kauffman JB, Murdiyarso D, Kurnianto S, Stidham M, Kanninen M. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*. 4(5):293–297. doi:10.1038/ngeo1123.
- Dyer KR. 1997. *Estuaries: A Physical Introduction*. Ed ke-2. Chichester (GB): John Wiley dan Sons.
- English S, Wilkinson C, Baker V. 1997. *Survey Manual for Tropical Marine Resources*. Ed ke-2. Townsville (AU): Australian Institute of Marine Science.
- FAO. 1999. *Guidelines for the Routine Collection of Capture Fishery Data*. FAO Fisheries Technical Paper No. 382. Rome (IT): Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fattah M, Intyas CA, Sofiati D. 2023. Individual travel cost method sebagai barometer nilai manfaat ekowisata Bee Jay Bakau Resort Probolinggo. *Jurnal Altasia*. 5(1). doi:10.37253/altasia.v5i1.6902.
- Fauzi A. 2014. *Valuasi Ekonomi dan Penilaian Kerusakan Sumber Daya Alam dan Lingkungan*. Bogor (ID): IPB Press.
- Fauzi A, Anna S. 2005. *Pemodelan Sumberdaya Perikanan dan Kelautan untuk Analisis Kebijakan*. Jakarta (ID): PT Gramedia Pustaka Utama.

- Fisher B, Turner RK, Morling P. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*. 68(3):643–653. doi:10.1016/j.ecolecon.2008.09.014.
- Foale S, Adhuri D, Alino P, Allison EH, Andrew N, Cohen P, Evans L, Fabinyi M, Fidelman P, Gregory C, *et al.* 2013. Food security and the Coral Triangle Initiative. *Marine Policy*. 38:174–183. doi:10.1016/j.marpol.2012.05.033.
- Freeman AM III, Herriges JA, Kling CL. 2014. *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*. Ed ke-3. Washington DC (US): Resources for the Future Press.
- Gemilang WA, Wissha UJ, Rahmawan GA, Dhiauddin R. 2018. Karakteristik sebaran sedimen Pantai Utara Jawa: Studi kasus Kecamatan Brebes, Jawa Tengah. *Jurnal Kelautan Nasional*. 13(2):65–74.
- Gemilang WA, Kusumah G. 2017. Status indeks pencemaran perairan kawasan mangrove berdasarkan penilaian fisika-kimia di pesisir Kecamatan Brebes, Jawa Tengah. *EnviroScienteeae*. 13(2):171–180.
- Gemilang WA, Kusumah G, Wissha UJ, Arman A. 2017. Laju sedimentasi di perairan Brebes, Jawa Tengah menggunakan metode isotop ²¹⁰Pb. *Jurnal Geologi Kelautan*. 15(1):11–22.
- Gijón Mancheño A, Vuik V, van Wesenbeeck BK, Jonkman SN, van Hespén R, Moll JR, Kazi S, Urrutia I, van Ledden M. 2024. Integrating mangrove growth and failure in coastal flood protection designs. *Scientific Reports*. 14:7951. doi:10.1038/s41598-024-58705-4.
- Gittinger JP. 1986. *Analisis Ekonomi Proyek-Proyek Pertanian*. Ed ke-2. Mangiri K, penerjemah. Jakarta (ID): UI Press. Terjemahan dari: *Economic Analysis of Agricultural Projects*.
- Hanim L, Noorman MS. 2017. Utilization of Indonesia marine resources in an effort to realize Indonesia towards the shaft of the maritime world. Di dalam: *The 2nd Proceeding "Indonesia Clean of Corruption in 2020"*. Semarang (ID); 2016 Des 9. Semarang (ID): Unisula Press. hlm 319–324.
- Harefa MS, Nasution Z, Mulya MB, Maksum A. 2022. *Silvofishery* : In what mangrove coverage condition can this system provide benefits for the community?. *Universal Journal of Agricultural Research*. 10(3):249–265. doi:10.13189/ujar.2022.100307.
- Hartati R, Widianingsih, Broto RTDW, Puspa MB, Supriyo E. 2022. Analisa air tambak Desa Kaliwlingi sebagai bahan baku produksi garam konsumsi. *Journal of Marine Research*. 11(4):657–666.
- Hastuti ED, Budihastuti R. 2016. Variasi kandungan nutrisi dalam tambak wanamina dengan komposisi jenis dan jumlah tegakan mangrove yang berbeda di pesisir Kota Semarang. *Buletin Anatomi dan Fisiologi*. 1(1):36–42. doi:10.14710/baf.1.1.2016.36-42.
- Hillier FS, Lieberman GJ. 2021. *Introduction to Operations Research*. Ed ke-11. New York (US): McGraw-Hill Education.
- Howard J, Hoyt S, Isensee K, Pidgeon E, Telszewski M, editor. 2014. *Coastal Blue Carbon: Methods for Assessing Carbon Stocks and Emissions Factors in Mangroves, Tidal Salt Marshes, and Seagrass Meadows*. Arlington (US): Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, dan International Union for Conservation of Nature.

- Hussain SA, Badola R. 2008. Valuing mangrove ecosystem services: Linking nutrient retention function of mangrove forests to enhanced agroecosystem production. *Wetlands Ecology and Management*. 16(6):441–450. doi:10.1007/s11273-008-9080-z.
- Huwaie KE, Yulianto G, Damar A, Ismail. 2026. Penilaian jasa ekosistem hutan mangrove Kota Sorong: Ketidakseimbangan pasokan-permintaan dan implikasi pengelolaan. *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*. 32(1):1–15. doi:10.15578/jppi.32.1.2026.1-15.
- Imadoeddin I, Syaiful S, Aristin R, Anam S, Oktasari AF. 2022. Pemberdayaan masyarakat pesisir melalui pengembangan sumber daya laut dalam meningkatkan perekonomian masyarakat Desa Branta Pesisir Kecamatan Tlanakan Kabupaten Pamekasan. *COVIT (Community Service of Tambusai Health)*. 2(2):247–257. doi:10.31004/covit.v2i2.10515.
- Kadariah. 2001. *Evaluasi Proyek: Analisis Ekonomi*. Jakarta (ID): Lembaga Penerbit Fakultas Ekonomi Universitas Indonesia.
- Kaim A, Cord AF, Volk M. 2018. A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation. *Environmental Modelling dan Software*. 105:79–93. doi:10.1016/j.envsoft.2018.03.031.
- Kathiresan K. 2018. Mangrove forests of India. *Current Science*. 114(5):976–981.
- Kathiresan K, Bingham BL. 2001. Biology of mangroves and mangrove ecosystems. *Advances in Marine Biology*. 40:81–251. doi:10.1016/S0065-2881(01)40003-4.
- Kauffman JB, Adame MF, Arifanti VB, Schile-Beers LM, Bernardino AF, Bhomia RK, Donato DC, Feller IC, Ferreria TO, Jesus Garcia MCL, *et al.* 2020. Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecological Monographs*. 90(2):e01405. doi:10.1002/ecm.1405.
- Kauffman JB, Donato DC. 2012. *Protocols for the Measurement, Monitoring and Reporting of Structure, Biomass and Carbon Stocks in Mangrove Forests*. CIFOR Working Paper No. 86. Bogor (ID): Center for International Forestry Research.
- Khasanah A, Zuhry N, Alamsyah HK. 2025. Analisis stok karbon pada sedimen mangrove di Muara Randusanga Kulon, Kabupaten Brebes. *Jurnal Perikanan Pantura*. 8(2):776–785. doi:10.30587/jpp.v8i2.10398.
- [KLHK] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2021. *Peta Mangrove Nasional Tahun 2021*. Jakarta (ID): Direktorat Jenderal Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Rehabilitasi Hutan, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- [Kemen PUPR] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2015. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 07/PRT/M/2015 tentang Pengamanan Pantai*. Jakarta (ID): Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- [Kementan] Kementerian Pertanian. 2025. *Keputusan Menteri Pertanian Nomor 1117/Kpts./SR.310/M/10/2025 tentang Perubahan atas Keputusan Menteri Pertanian Nomor 800/Kpts./SR.310/M/09/2025 tentang Jenis, Harga Eceran Tertinggi, dan Alokasi Pupuk Bersubsidi Sektor Pertanian Tahun Anggaran 2025*. Jakarta (ID): Kementerian Pertanian.

- [KepMenLH] Kementerian Negara Lingkungan Hidup. 2004. *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut*. Jakarta (ID): Kementerian Negara Lingkungan Hidup.
- Komiyama A, Pongpan S, Kato S. 2005. Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of Tropical Ecology*. 21(4):471–477. doi:10.1017/S0266467405002476.
- Kristensen E, Bouillon S, Dittmar T, Marchand C. 2008. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic Botany*. 89(2):201–219. doi:10.1016/j.aquabot.2007.12.005.
- Kusmana C. 1997. *Metode Survei Vegetasi*. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor Press.
- Lester SE, Costello C, Halpern BS, Gaines SD, White C, Barth JA. 2013. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning. *Marine Policy*. 38:80–89. doi:10.1016/j.marpol.2012.05.022
- Leksono SSB, Soenardjo N, Pramesti R. 2014. Produktivitas dan dekomposisi serasah daun mangrove di kawasan vegetasi mangrove Pasar Banggi, Rembang, Jawa Tengah. *Jurnal Marine Research*. 3(4):549–553. doi:10.14710/jmr.v3i4.11414.
- Lewis RR. 2005. Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests. *Ecological Engineering*. 24(4):403–418. doi:10.1016/j.ecoleng.2004.10.003.
- Lubis K, Imran Z, Taryono, Damar A. 2025. Estimasi serapan dan nilai ekonomi karbon *Rhizophora apiculata* di Kawasan Konservasi Perairan Nias Utara. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*. 17(1):63–72. doi:10.29244/jitkt.v17i1.57948.
- Malczewski J. 1999. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York (US): John Wiley dan Sons.
- Mankelkelot TK, Ayele NA, Jothimani M, Tenzer R. 2026. Integrating GIS and AHP for sustainable ecotourism site suitability analysis: A case study of Bahir Dar, Ethiopia. *Scientific Reports*. 16:10261. doi:10.1038/s41598-026-41548-6.
- McLeod E, Chmura GL, Bouillon S, Salm R, Björk M, Duarte CM, Lovelock CE, Schlesinger WH, Silliman BR. 2011. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 9(10):552–560. doi:10.1890/110004.
- [MEA] Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington DC (US): Island Press.
- Mishan EJ, Quah E. 2020. *Cost-Benefit Analysis*. Ed ke-6. London (GB): Routledge.
- Mualimah N, Firdaus AM. 2025. Kerapatan mangrove di kawasan rehabilitasi mangrove Desa Kaliwlingi, Kabupaten Brebes. *Jurnal Maiyah*. 4(3):179–188. doi:10.20884/1.maiyah.2025.4.3.16798.
- Muntalif BS, Hasian O, Sembiring E. 2013. Valuasi ekonomi dan upaya pengelolaan hutan mangrove di Kecamatan Muara Gembong Kabupaten Bekasi. *Jurnal Teknik Lingkungan*. 19(1):82–90. doi:10.5614/jtl.2013.19.1.9.
- Murdiyarso D, Purbopuspito J, Kauffman JB, Warren MW, Sasmito SD, Donato DC, Manuri S, Krisnawati H, Taberima S, Kurnianto S. 2015. The potential

of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*. 5(12):1089–1092. doi:10.1038/nclimate2734.

Nagelkerken I, Blaber SJM, Bouillon S, Green P, Haywood M, Kirton LG, Meynecke JO, Pawlik J, Penrose HM, Sasekumar A, Somerfield PJ. 2008. The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. *Aquatic Botany*. 89:155–185.

Nainggolan FA, Pribadi R, Trianto A. 2022. Struktur komposisi dan simpanan karbon di sedimen hutan mangrove Pandansari, Kaliwlingi, Brebes. *Journal of Marine Research*. 11(3):529–538. doi:10.14710/jmr.v11i3.33393.

Narayan S, Beck MW, Reguero BG, Losada IJ, van Wesenbeeck B, Pontee N, Sanchirico JN, Ingram JC, Lange GM, Burks-Copes KA. 2016. The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PLoS ONE*. 11(5):e0154735. doi:10.1371/journal.pone.0154735.

Nayak AK, Pant D, Kumar P, Mahanta P, Pandey N. 2014. GIS-based aquaculture site suitability study using multi-criteria evaluation approach. *Indian Journal of Fisheries*. 61(1):108–112.

Newton AC, Hodder KH, Cantarello E, Perrella L, Birch JC, Robins J, Douglas S, Moody C, Cordingley J. 2012. Cost-benefit analysis of ecological networks assessed through spatial analysis of ecosystem services. *Journal of Applied Ecology*. 49(3):571–580.

Nisa MR, Amalia HP, Paramitha LK, Sanjayasari D. 2025. Karakteristik fisika kimia perairan di Randusanga Kulon, Brebes untuk kelayakan kultur kerang hijau (*Perna viridis*). *Jurnal Sains dan Teknologi Perikanan*. 5(2):87–99.

Nontji A. 2005. *Laut Nusantara*. Ed revisi. Jakarta (ID): Djambatan.

Noor YR, Khazali M, Suryadiputra INN. 2006. *Panduan Pengenalan Mangrove di Indonesia*. Bogor (ID): PHKA dan Wetlands International–Indonesia Programme.

Novida R, Setia TM, Santoso N, Widigdo B. 2025. The impact of mangrove on water quality and milkfish productivity in the silvofishery ponds in Sawojajar Village, Brebes Regency. *Coast Ocean Journal*. 9(1):70–86. doi:10.29244/coj.v9i1.62550.

Novizantara A, Mulyadi A, Tang UM, Putra RM. 2022. Calculating economic valuation of mangrove forest in Bengkalis Regency, Indonesia. *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 17(5):1629–1634. doi:10.18280/ijstdp.170528.

Nugraha FW, Pribadi R, Wirasatriya A. 2020. Kajian perubahan luasan untuk prediksi simpanan karbon ekosistem mangrove di Desa Kaliwlingi, Kabupaten Brebes. *Buletin Oseanografi Marina*. 9(2):104–116. doi:10.14710/buloma.v9i2.30039.

OECD. 2018. *Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use*. Paris (FR): OECD Publishing.

Opa ET. 2011. Perubahan garis pantai Desa Bentenan Kecamatan Pusomaen, Minahasa Tenggara. *Jurnal Perikanan dan Kelautan Tropis*. 7(3):109–114. doi:10.35800/jpdk.7.3.2011.187.

Pariakan A, Yusuf S, Saru A, Amri K, Zainuddin EN. 2024. Suitability analysis of milkfish pond culture using geographic information system in Bone Bay,

- South Sulawesi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1338(1):012031. doi:10.1088/1755-1315/1338/1/012031.
- [PerMen LHK] Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. 2021. *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.23/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2021 tentang Pelaksanaan Rehabilitasi Hutan dan Lahan*. Jakarta (ID): Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- [PP] Peraturan Pemerintah Republik Indonesia. 2025. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2025 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Mangrove*. Jakarta (ID): Sekretariat Negara.
- Pond S, Pickard GL. 2013. *Introductory Dynamical Oceanography*. Ed ke-2. Oxford (GB): Butterworth-Heinemann.
- Prayudha B, Ulumuddin YI, Suyadi, Suyarso, Adjie AS, Hernawan UE, Ramadhani MR. 2026. A practical framework for mangrove rehabilitation sites selection using scalable biophysical indicators. *International Journal of Environmental Research*. 20:85. doi:10.1007/s41742-025-01039-4.
- Primavera JH. 1997. Socio-economic impacts of shrimp culture. *Aquaculture Research*. 28(10):815–827. doi:10.1046/j.1365-2109.1997.00946.x.
- Primyastanto M. 2011. *Feasibility Study Usaha Perikanan: Sebagai Aplikasi dari Teori Studi Kelayakan Usaha Perikanan*. Malang (ID): Universitas Brawijaya Press.
- Purnobasuki H, Amaliyah S, Kobayashi K. 2023. Production and decomposition of mangrove species *Rhizophora apiculata* Blume in Surabaya East Coast, Indonesia. *Borneo Journal of Resource Science and Technology*. 13(2):53–66. doi:10.33736/bjrst.5557.2023.
- Putra RS, Ernawita, Iswahyudi. 2025. Prospects for mangrove reforestation using the silvofishery method in aquaculture areas in Bireuen Regency, Aceh. *Jurnal Akuakultur Indonesia*. 24(2):244–257. doi:10.19027/jai.24.2.244-257.
- Rachmansyah, Asaad AIJ, Mustafa A. 2012. Karakteristik, kesesuaian, dan pengelolaan lahan tambak di Kecamatan Bulakamba Kabupaten Brebes Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Riset Akuakultur*. 7(2):321–335. doi:10.15578/jra.7.2.2012.321-335
- Radiarta IN, Saitoh SI, Miyazono A. 2008. GIS-based multi-criteria evaluation models for identifying suitable sites for Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) aquaculture in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan. *Aquaculture*. 284(1–4):127–135. doi:10.1016/j.aquaculture.2008.07.048.
- Riasasi W. 2019. Identifikasi garis pantai kawasan pesisir Kabupaten Brebes berbasis penginderaan jauh dan sistem informasi geografis. *Geomedia*. 17(1):47–53.
- Rifqi M, Widigdo B, Mashar A, Nazar F, Wardiatno Y. 2020. Strategy to gain the target of shrimp production in Karawang District coastal area. *AACL Bioflux*. 13(5):2757–2769.
- Rudiarto I, Handayani W, Sih Setyono J. 2018. A regional perspective on urbanization and climate-related disasters in the northern coastal region of Central Java, Indonesia. *Land*. 7(1):34. doi:10.3390/land7010034.
- Safitri DP, Hakim A, Muluk MRK, Putra F, Afriyanti R. 2022. Stakeholder analysis of coastal management policy in Indonesia. Di dalam: *Proceedings of*

SHIMBA 2022. Tanjungpinang (ID); 2022 Sep 18–20. doi:10.4108/eai.18-9-2022.2326037.

Sakti TS, Fauzi RMQ. 2020. Valuasi ekonomi ekowisata mangrove Banyuurip: Aplikasi *travel cost method* dan tinjauannya dalam perspektif Islam. *Jurnal Ekonomi Syariah Teori dan Terapan*. 7(7):1287–1302. doi:10.20473/vol7iss20207pp1287-1302.

Santoso N, Novida R, Madonsa C, Widigdo B, Kusmana C, Krisanti M. 2025. Silvofishery as an ecosystem-based solution for coastal rehabilitation and sustainable aquaculture: Lessons learn from Brebes, Indonesia. *Aquacultura Indonesiana*. 26(2). doi:10.21534/ai.v26i2.202.

Saru A, Fitrah MN, Faizal A. 2018. Analisis kesesuaian lahan rehabilitasi mangrove di Kecamatan Bontoa Kabupaten Maros Provinsi Sulawesi Selatan. *Torani: Journal of Fisheries and Marine Science*. 1(3):100–108.

Sasmito SD, Murdiyarso D, Friess DA, Kurnianto S. 2016. Can mangroves keep pace with contemporary sea level rise? A global data review. *Wetlands Ecology and Management*. 24(2):263–278. doi:10.1007/s11273-015-9466-7.

Savitri ME, Tumuyu SS, Patria MP. 2025. Penentuan konsep keberlanjutan pengelolaan ekosistem mangrove di Desa Kaliwlingi Kabupaten Brebes menggunakan Rappfish dan AHP. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 23(4):958–968. doi:10.14710/jil.23.4.958-968.

Setyawan WB, Pamungkas A. 2017. Perbandingan karakteristik oseanografi pesisir utara dan selatan Pulau Jawa: Pasang surut, arus, dan gelombang. Di dalam: *Prosiding Seminar Nasional Kelautan dan Perikanan III 2017*. Madura (ID); 2017 Sep 7. Madura (ID): Universitas Trunojoyo Madura.

[SNI] Badan Standardisasi Nasional. 2011. *SNI 7724:2011 Pengukuran dan Penghitungan Cadangan Karbon: Pengukuran Lapangan untuk Penaksiran Cadangan Karbon Hutan*. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional.

Suhaimi RA, Hasnawi, Ratnawati E. 2013. Kesesuaian lahan untuk budidaya udang windu (*Penaeus monodon*) di tambak Kabupaten Brebes, Jawa Tengah. *Jurnal Riset Akuakultur*. 8(3):465–477. doi:10.15578/jra.8.3.2013.465-477.

Su J, Friess DA, Gasparatos A. 2021. A meta-analysis of the ecological and economic outcomes of mangrove restoration. *Nature Communications*. 12:5050. doi:10.1038/s41467-021-25349-1.

Suyono, Fithor A. 2025. Innovative silvofishery model in restored mangrove forests: A 10-year assessment. *Heliyon*. 11(2):e42043. doi:10.1016/j.heliyon.2025.e42043.

Suyono, Gunistiyo, Zuhry N. 2013. Model korelasi persepsi dan partisipasi masyarakat dengan degradasi mangrove di wilayah pantai Kabupaten Brebes. Dalam: *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan dan Pemanfaatan IPTEKS untuk Kedaulatan Pangan*. Yogyakarta (ID): Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada.

Solihuddin T, Jayawiguna MH, Triyono, editor. 2020. *Penilaian Hasil (Outcome Assessment) Rehabilitasi Pantura Jawa*. Jakarta (ID): AMAFRAD Press–BRSDMKP, Kementerian Kelautan dan Perikanan.

Sousa WP, Kennedy PG, Mitchell BJ, Ordóñez L BM. 2007. Supply-side ecology in mangroves: Do propagule dispersal and seedling establishment explain forest structure? *Ecological Monographs*. 77(1):53–76. doi:10.1890/05-1935.

- Suhardi, Purnomo A, Kurniawan A. 2020. Analisis perubahan garis pantai Kabupaten Brebes. *Jurnal Kelautan Tropis*. 23(1):1–12.
- Syahid LN, Sakti AD, Virtriana R, Wikantika K, Windupranata W, Tsuyuki S, Caraka RE, Pribadi R. 2020. Determining optimal location for mangrove planting using remote sensing and climate model projection in Southeast Asia. *Remote Sensing*. 12(22):3734. doi:10.3390/rs12223734.
- Taha HA. 2017. *Operations Research: An Introduction*. Ed ke-10. Harlow (GB): Pearson.
- [TEEB] The Economics of Ecosystems and Biodiversity. 2010. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. Kumar P, editor. London (GB): Earthscan.
- [UU HPP] Undang-Undang Republik Indonesia. 2021. *Undang-Undang Nomor 7 Tahun 2021 tentang Harmonisasi Peraturan Perpajakan*. Jakarta (ID): Sekretariat Negara.
- Utama D, Widigdo B, Kamal MM, Taryono. 2022. Evaluasi kesesuaian tambak budidaya udang vaname dengan tingkat teknologi berbeda di pesisir Kabupaten Lampung Timur, Indonesia. *Jurnal Riset Akuakultur*. 17(4):235–248. doi:10.15578/jra.17.4.2022.235-248.
- Verhagen HJ. 2019. Financial benefits of mangroves for surge prone high-value areas. *Water*. 11(11):2374. doi:10.3390/w11112374.
- Verisandria R, Schadu W, Sondak C, Ompi M, Rumengan A, Rangan J. 2018. Estimasi potensi karbon pada sedimen ekosistem mangrove di pesisir Taman Nasional Bunaken bagian utara. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*. 6(1):81–97. doi:10.35800/jpl.6.1.2018.20567.
- Wahyuni T, Susiyanti F, Kusumaningrum L. 2026. Mangrove management studies in Brebes Regency, Central Java, Indonesia. *Gorontalo Journal of Forestry Research*. 9(1):23–37.
- White C, Halpern BS, Kappel CV. 2012. Ecosystem service tradeoff analysis reveals the value of marine spatial planning for multiple ocean uses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 109(12):4696–4701. doi:10.1073/pnas.1114215109.
- Wijaya PK, Sugianto DN, Muslim, Ismanto A, Atmodjo W, Widiarati R, Hariyadi. 2019. Analisis genangan akibat pasang air laut di Kabupaten Brebes. *Indonesian Journal of Oceanography*. 1(1):6–12. doi:10.14710/ijoce.v1i1.6252.
- Winston WL. 2004. *Operations Research: Applications and Algorithms*. Ed ke-4. Belmont (US): Thomson Brooks/Cole.
- Yoni NNN, Heriyanti AP. 2025. Valuasi ekonomi manfaat ekosistem mangrove di Desa Tireman, Kabupaten Rembang, Jawa Tengah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 23(3):658–670. doi:10.14710/jil.23.3.658-670.
- Yulianda F. 2019. *Ekowisata Perairan: Suatu Konsep Kesesuaian dan Daya Dukung Wisata Bahari dan Wisata Air Tawar*. Bogor (ID): IPB Press.
- Yulianto G, Soewardi K, Adrianto L, Machfud. 2016. The role of mangrove in support of coastal fisheries in Indramayu Regency, West Java, Indonesia. *AACL Bioflux*. 9(5):1020–1029.
- Zanne AE, Lopez-Gonzalez G, Coomes DA, Ilic J, Jansen S, Lewis SL, Miller RB, Swenson NG, Wiemann MC, Chave J. 2009. Data from: Towards a worldwide

wood economics spectrum [dataset]. *Dryad Digital Repository*. doi:10.5061/dryad.234.

Zulpikar F, Prasetyo DE, Shelvatis TV, Komara KK, Pramudawardhani M. 2017. Valuasi ekonomi objek wisata berbasis jasa lingkungan menggunakan metode biaya perjalanan di Pantai Batu Karas Kabupaten Pangandaran. *Journal of Regional and Rural Development Planning*. 1(1):53–63. doi:10.29244/jp2wd.2017.1.1.53-63.

