



DESAIN OPTIMASI PERLINDUNGAN DAN RESTORASI EKOSISTEM MANGROVE BERBASIS JASA LINGKUNGAN KARBON

ASWIN RAHADIAN



ILMU PENGELOLAAN SUMBERDAYA ALAM DAN LINGKUNGAN
SEKOLAH PASCASARJANA
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 DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Desain Optimasi Perlindungan dan Restorasi Ekosistem Mangrove Berbasis Jasa Lingkungan Karbon” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi 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 disertasi ini.

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

Bogor, Mei 2026

Aswin Rahadian
P0602202029

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.



@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.

RINGKASAN

ASWIN RAHADIAN. Desain Optimasi Perlindungan dan Restorasi Ekosistem Mangrove Berbasis Jasa Lingkungan Karbon. Dibimbing oleh LILIK BUDI PRASETYO, YUDI SETIAWAN, CECEP KUSMANA.

Perubahan iklim global telah mendorong upaya mitigasi komprehensif melalui pengurangan emisi gas rumah kaca, peningkatan kapasitas penyerapan karbon, dan penguatan kebijakan adaptif di berbagai sektor pembangunan. Salah satu jalur yang dapat berkontribusi dalam upaya tersebut adalah perlindungan dan restorasi ekosistem. Ekosistem mangrove sebagai salah satu ekosistem lahan basah, memainkan peranan penting sebagai solusi iklim alami (*Nature Climate Solutions*) yang mampu menyerap dan menyimpan karbon biru secara efektif.

Ditinjau dari perspektif kewilayahan, Region Jawa merupakan region dengan tingkat kehilangan hutan mangrove tertinggi di Indonesia, terutama zona pesisir pantai utara. Deforestasi dan degradasi hutan mangrove masih menjadi ancaman di region ini. Berbagai konsep perlindungan dan restorasi ekosistem mangrove telah banyak diuji melalui studi ilmiah maupun pengalaman pembelajaran (*lesson learned*) dengan beragam skala dan entitas. Namun, hasilnya cenderung memberikan dampak parsial terhadap aspek multidimensi keberlanjutan. Hal tersebut menjadi tantangan besar untuk mengisi kesenjangan dampak, khususnya dampak sosial dan ekonomi.

Terbukanya pasar karbon global dan dukungan regulasi di level nasional, memberikan peluang upaya perlindungan dan restorasi untuk dapat memaksimalkan peran dan manfaat ekosistem mangrove agar berdampak menyeluruh pada dimensi ekologi, sosial, dan ekonomi berkelanjutan. Oleh karena itu, desain perlindungan dan restorasi ekosistem mangrove berbasis jasa lingkungan karbon menjadi salah satu alternatif dan penting untuk diuji secara empiris terkait optimasi dampak intervensinya terhadap keseimbangan multidimensi keberlanjutan.

Tujuan utama penelitian ini adalah membangun desain perlindungan dan restorasi ekosistem mangrove berbasis jasa lingkungan karbon yang optimal sebagai upaya mitigasi perubahan iklim untuk dapat memberikan alternatif manfaat nilai tambah pada aspek mitigasi perubahan iklim, kesejahteraan masyarakat, dan keberlanjutan keanekaragaman hayati. Tujuan utama dilalui dengan dicapainya tujuan antara, yaitu: (1) Menganalisis karakterisasi dinamika ekosistem mangrove serta responnya terhadap proksi perubahan zona intertidal dan laju deforestasi tidak terencana, (2) Membangun model alometrik tegakan mangrove muda dan jejak karbon daratan akresi berasosiasi tambak sebagai pengkayaan referensi faktor emisi dalam mengkuantifikasi potensi reduksi emisi, (3) Membangun skema prioritas pendekatan restorasi ekosistem mangrove berdasarkan tipologi lanskap pesisir, (4) Menganalisis potensi pengurangan emisi gas rumah kaca ekosistem mangrove pada skenario multi-intervensi, dalam kerangka desain optimasi berbasis jasa lingkungan karbon. Keempat analisis dalam penelitian ini saling terhubung dan membentuk kerangka konseptual yang holistik dalam pencapaian tujuan.

Secara garis besar kebaruan (*novelty*) penelitian tentang desain optimasi perlindungan dan restorasi ekosistem mangrove berbasis jasa lingkungan karbon



terletak pada pengembangan pendekatan integratif yang tidak hanya menempatkan mangrove sebagai objek konservasi ekologis, tetapi juga sebagai sistem penyedia jasa lingkungan karbon yang dapat dioptimalkan secara spasial, ekonomi, dan kelembagaan dalam mendukung mitigasi perubahan iklim. Selama ini, sebagian besar penelitian mangrove masih berfokus pada aspek parsial, seperti estimasi stok karbon, pendekatan perlindungan dan restorasi, atau valuasi ekonomi secara terpisah. Penelitian ini menawarkan pendekatan baru dengan mengintegrasikan dinamika ekosistem, potensi serapan dan emisi karbon, prioritas pendekatan, serta skenario restorasi ke dalam satu kerangka desain optimasi berbasis jasa lingkungan karbon. Secara konseptual, penelitian ini memperkenalkan paradigma baru bahwa perlindungan dan restorasi mangrove tidak hanya dipandang sebagai kegiatan perbaikan ekosistem saja, akan tetapi mampu menghasilkan manfaat ekologis, sosial-ekonomi, dan iklim secara simultan.

Penelitian ini mengungkap bahwa karakter dinamika ekosistem mangrove di Pantura Jawa menunjukkan dinamika perubahan ekosistem yang kompleks di seluruh kategori trasi perubahan, baik perluasan dan kehilangan zona intertidal sebagai habitat mangrove, maupun tingkat deforestasi dan reforestasi. Tipologi delta menunjukkan laju penambahan daratan yang tinggi. Sebaliknya, tipologi pantai terbuka menunjukkan tingginya laju kehilangan daratan. Dinamika tersebut secara kuantitatif berimplikasi pada keberagaman proksi perubahan, baik berdasarkan berdasarkan perbedaan zona dan tipologi. Luas intertidal terus meningkat kontribusi dari pada wilayah delta. Rata-rata laju akresi 916 ha/tahun (*gross accretion rates*), sementara oleh laju erosi 705 ha/tahun (*gross erosion rates*), maka relatif terjadi neraca positif terhadap keseimbangan sedimen (*sediment balance*) mencapai 211 ha/tahun. Pada level tutupan mangrove laju deforestasi terkuantifikasi sebesar 514 ha/tahun (*gross deforestation rates*) dan diikuti dengan laju reforestasi sebesar 486 ha/tahun (*gross reforestation rates*), maka laju deforestasi bersih di Pantura Jawa mencapai 28 ha/tahun.

Penelitian juga menunjukkan potensi besar ekosistem mangrove sebagai penyimpan karbon jangka panjang (*long-term carbon sink*), dimana kontribusi terbesar berasal dari simpanan pada lapisan tanah (*soil organic carbon*), yang menyumbang lebih dari 75% total stok pada ekosistem. Tingginya stok karbon pada lapisan tanah memberikan bukti bahwa mangrove mampu menyimpan karbon dalam jangka panjang, tidak hanya di permukaan tetapi juga jauh di bawah permukaan tanah. Perlindungan dan restorasi ekosistem mangrove menjadi sangat penting dalam strategi mitigasi perubahan iklim, terutama karena gangguan di permukaan dapat menyebabkan emisi karbon dari lapisan dalam. Dinamika dan potensi besar simpanan karbon memberi sinyal terhadap bagaimana prioritas pendekatan perlindungan dan restorasi ekosistem mangrove harus di implementasikan pada berbagai tipologi lanskap mangrove. Hasil analisis prioritas menunjukkan bahwa pada tipologi delta dan estuari, perlindungan melalui regenerasi alami dianggap lebih prioritas, mengingat penambahan lahan dan kolonisasi mangrove alami cenderung terjadi secara bertahap di lingkungan dinamis ini. Sementara tipologi laguna diprioritaskan untuk ekowisata mangrove. Pada zona interior penanaman intensif menjadi aktivitas yang diprioritaskan, dan pantai terbuka, memprioritaskan pembangunan struktur pantai alami atau integrasi pendekatan rekayasa struktur pada tahap awal atau sebelum penanaman, khususnya di daerah yang rawan erosi pantai.

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.

Berdasarkan respon dari analisis dinamika, simpanan karbon sebagai faktor emisi, dan analisis prioritas pendekatan perlindungan dan restorasi, penelitian ini kemudian mensimulasikan skenario multi-intervensi, dengan mengintegrasikan perlindungan hutan mangrove, perbaikan sistem hidrologi dengan penanaman intensif, dan rekayasa ekologi dalam rangka mendorong penciptaan habitat dengan regenerasi alami. Rekayasa ekologi dengan regenerasi alami menjanjikan kinerja lima kali lebih baik daripada restorasi dengan penanaman. Temuan ini menyoroti pentingnya desain restorasi regenerasi alami di untuk memaksimalkan manfaat karbon biru.

Skenario multi-intervensi menawarkan potensi reduksi emisi yang jauh lebih besar dibandingkan dengan intervensi tunggal, hasilnya potensi reduksi emisi dari optimasi skenario multi-intervensi mencapai 260 juta tCO₂e pada tahun ke-30 dengan rata-rata 8,7 juta tCO₂e/tahun. Kinerja tersebut menghasilkan nilai ekonomi pada harga pasar maksimum mencapai USD 6,3 milyar pada tahun ke-30 atau USD 210 juta per tahun. Hasil ini secara kelayakan ekonomi menghasilkan potensi reduksi emisi dengan fisibilitas tinggi dalam rangka menerapkan skema kredit karbon sukarela, yang akan memberikan serangkaian kontribusi dalam menjaga keberlangsungan ekologis, sosial ekonomi masyarakat, keanekaragaman hayati, serta kontribusi terhadap pembangunan negara. Di sisi lain, dalam konteks kebijakan nasional, berdasarkan simulasi pada tahun ke-5 (2030) potensi reduksi emisi pada penelitian ini mencapai 3,5 juta tCO₂e atau 2,5% dari target *zero net emission* sebesar 140 juta tCO₂e. Hal tersebut merupakan capaian yang sangat tinggi mengingat kontribusi sebesar itu hanya berasal dari ekosistem mangrove saja. Jika skenario tersebut secara optimal diimplementasikan pada skala nasional, berpotensi mereduksi emisi sebesar 765 juta tCO₂e atau melampaui target *net zero emission* pada tahun 2030.

Berdasarkan penilaian dampak sosial-ekonomi, perlindungan dan restorasi ekosistem berbasis jasa lingkungan karbon berpotensi besar memberikan dampak terhadap perubahan sosial ekonomi masyarakat pesisir secara bertahap, dimana pada fase pertama berpotensi menyediakan kebutuhan dasar dan membangun mata pencaharian alternatif, fase kedua mengembangkan mata pencaharian menjadi usaha berkelanjutan yang dikelola kelompok masyarakat, dan fase ketiga kelompok masyarakat memiliki pendapatan yang andal dan berkelanjutan.

Tantangan utama dalam implementasi adalah keterbatasan insentif ekonomi untuk mendorong perubahan penggunaan lahan pada kawasan pesisir yang telah berkembang menjadi sentra budidaya perikanan. Meskipun hasil analisis biaya-manfaat menunjukkan bahwa perlindungan dan restorasi ekosistem mangrove secara ekonomi layak untuk diusahakan, namun jika dibandingkan dengan nilai ekspor udang skema karbon belum cukup kompetitif untuk menjadi instrumen utama dalam mendorong penghentian atau konversi kegiatan budidaya yang telah memberikan manfaat ekonomi langsung bagi masyarakat dan pelaku usaha. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan pendekatan teknis restorasi ekosistem mangrove yang tidak berimplikasi pada penurunan produksi dalam praktik budidaya perikanan, supaya budidaya dan pengelolaan ekosistem mangrove berkelanjutan selaras memberikan benefit dan co-benefit secara bersamaan.

Kata Kunci: *Blue carbon mangrove*, dinamika ekosistem, jasa lingkungan karbon, nilai ekonomi karbon, simulasi multi-intervensi.





SUMMARY

ASWIN RAHADIAN. Design Optimization for Mangrove Ecosystem Protection and Restoration through Carbon-Based Ecosystem Services. Supervised by LILIK BUDI PRASETYO, YUDI SETIAWAN, CECEP KUSMANA.

Global climate change has driven comprehensive mitigation efforts through the reduction of greenhouse gas emissions, enhancement of carbon sequestration capacity, and strengthening of adaptive policies across various development sectors. One pathway that can significantly contribute to these efforts is ecosystem protection and restoration. Mangrove ecosystems, as one of the most important coastal wetland ecosystems, play a crucial role as a Nature-based Climate Solution by effectively capturing and storing blue carbon.

From a regional perspective, Java is the region experiencing the highest rate of mangrove forest loss in Indonesia, particularly along the northern coastal zone. Deforestation and degradation of mangrove forests continue to pose major threats throughout this region. Various concepts and approaches to mangrove protection and restoration have been tested through scientific studies and practical lessons learned at different scales and institutional settings. However, their outcomes have generally produced only partial impacts on the multidimensional aspects of sustainability. This condition presents a major challenge in addressing impact gaps, particularly regarding social and economic dimensions.

The emergence of the global carbon market, combined with supportive national regulations, provides an opportunity to maximize the role and benefits of mangrove ecosystems through protection and restoration initiatives that generate comprehensive ecological, social, and economic outcomes. Therefore, the design of mangrove protection and restoration based on carbon ecosystem services represents an important alternative that warrants empirical examination regarding the optimization of intervention impacts across multiple dimensions of sustainability.

The primary objective of this research is to develop an optimal carbon ecosystem service-based design for mangrove protection and restoration as a climate change mitigation strategy capable of generating additional benefits in terms of climate mitigation, community welfare, and biodiversity conservation. This objective is pursued through the achievement of four intermediate objectives: (1) analyzing the dynamics of mangrove ecosystems and their responses to changes in intertidal zones and unplanned deforestation rates; (2) developing allometric models for young mangrove stands and assessing the carbon footprint of accretion-associated aquaculture lands to enrich emission factor references used in quantifying emission reduction potential; (3) establishing a priority framework for mangrove restoration approaches based on coastal landscape typologies; and (4) analyzing the greenhouse gas emission reduction potential of mangrove ecosystems under multi-intervention scenarios within a carbon ecosystem service-based optimization framework. These four analyses are interconnected and collectively form a holistic conceptual framework for achieving the research objectives.

The novelty of this research on the optimization design of mangrove protection and restoration based on carbon ecosystem services lies in the development of an integrative approach that positions mangroves not only as

objects of ecological conservation but also as carbon ecosystem service providers that can be spatially, economically, and institutionally optimized to support climate change mitigation. Previous mangrove studies have largely focused on isolated aspects such as carbon stock estimation, restoration approaches, or economic valuation. In contrast, this research introduces a novel framework that integrates ecosystem dynamics, carbon sequestration and emission potentials, restoration prioritization, and restoration scenarios into a single optimization design based on carbon ecosystem services. Conceptually, this study proposes a new paradigm in which mangrove protection and restoration are viewed not merely as ecosystem rehabilitation activities but as integrated interventions capable of simultaneously generating ecological, socio-economic, and climate benefits.

The findings reveal that mangrove ecosystem dynamics along the northern coast of Java exhibit complex patterns across all categories of ecosystem transition, including both expansion and loss of intertidal habitats as well as varying rates of deforestation and reforestation. Deltaic landscapes demonstrate high rates of land accretion, whereas open-coast typologies experience substantial land loss due to erosion. These dynamics have significant quantitative implications for the diversity of change proxies across different zones and landscape typologies. Intertidal areas continue to expand, primarily driven by deltaic regions. The average gross accretion rate reaches 916 ha/year, while the gross erosion rate is approximately 705 ha/year, resulting in a positive sediment balance of 211 ha/year. At the mangrove cover level, gross deforestation is estimated at 514 ha/year, accompanied by gross reforestation of 486 ha/year, yielding a net deforestation rate of 28 ha/year across the northern coast of Java.

The study also demonstrates the substantial potential of mangrove ecosystems as long-term carbon sinks, with the largest contribution originating from soil organic carbon, which accounts for more than 75% of total ecosystem carbon stocks. The high carbon storage capacity within deep soil layers provides strong evidence that mangroves can retain carbon over extended periods, not only aboveground but also deep beneath the soil surface. Consequently, mangrove protection and restoration are critically important within climate change mitigation strategies, as disturbances to surface ecosystems may trigger carbon emissions from deeper soil layers. The observed ecosystem dynamics and substantial carbon storage potential provide important guidance regarding the prioritization of protection and restoration approaches across different mangrove landscape typologies.

Priority analysis indicates that within deltaic and estuarine environments, protection through natural regeneration should be prioritized, given that land accretion and natural mangrove colonization commonly occur in these dynamic environments. Meanwhile, lagoon typologies are considered highly suitable for mangrove ecotourism development. Intensive planting is prioritized within interior zones, whereas open-coast environments require the implementation of nature-based coastal protection structures or integrated engineering interventions during the initial stages, particularly in areas highly vulnerable to coastal erosion.

Based on the results of ecosystem dynamics analysis, carbon stock assessments as emission factors, and restoration priority evaluations, this study subsequently simulated multi-intervention scenarios integrating mangrove forest protection, hydrological restoration combined with intensive planting, and





@Hacp@ipb.ac.id

IPB University

ecological engineering designed to facilitate habitat creation and natural regeneration. Ecological engineering coupled with natural regeneration demonstrates performance that is five times greater than conventional planting-based restoration. This finding highlights the importance of restoration designs centered on natural regeneration to maximize blue carbon benefits.

The multi-intervention scenario offers substantially greater emission reduction potential compared with single-intervention approaches. The optimized scenario generates an estimated emission reduction of 260 million tCO_{2e} by Year 30, with an average annual reduction of 8.7 million tCO_{2e}. At maximum market prices, this performance translates into an economic value of approximately USD 6.3 billion by Year 30, or USD 210 million annually. These results indicate a high level of economic feasibility for implementing voluntary carbon credit schemes, which would contribute significantly to ecological sustainability, community livelihoods, biodiversity conservation, and national development objectives.

From the perspective of national policy, simulations for Year 5 (2030) indicate that the proposed interventions could achieve emission reductions of approximately 3.5 million tCO_{2e}, equivalent to 2.5% of the national net-zero emission target of 140 million tCO_{2e}. This represents a remarkable contribution considering that such reductions originate solely from mangrove ecosystems. If optimally implemented at the national scale, the proposed scenario could potentially reduce emissions by approximately 765 million tCO_{2e}, exceeding Indonesia's net-zero emission target for 2030.

Based on socio-economic impact assessments, carbon ecosystem service-based mangrove protection and restoration have considerable potential to gradually improve the socio-economic conditions of coastal communities. During the first phase, interventions are expected to support basic needs and establish alternative livelihood opportunities. The second phase focuses on transforming these livelihoods into sustainable community-managed enterprises. In the third phase, community groups are projected to achieve reliable and sustainable sources of income.

The primary challenge for implementation lies in the limited economic incentives available to encourage land-use transitions in coastal areas that have already developed into major aquaculture production centers. Although cost-benefit analyses indicate that mangrove protection and restoration are economically feasible, carbon finance remains insufficiently competitive when compared with the economic value generated by shrimp exports. Consequently, carbon schemes alone are unlikely to serve as the primary instrument for promoting the cessation or conversion of aquaculture activities that currently provide substantial direct economic benefits to local communities and private sector actors. Therefore, there is a pressing need to develop technical approaches to mangrove restoration that do not compromise aquaculture productivity. Such approaches would enable sustainable aquaculture practices and mangrove ecosystem management to coexist, ensuring that both direct benefits and broader co-benefits can be generated simultaneously.

Keywords: Blue carbon mangrove, ecosystem dynamics, carbon environmental services, carbon economic value, multi-intervention simulation.

- 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.



- 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.



@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.



DESAIN OPTIMASI PERLINDUNGAN DAN RESTORASI EKOSISTEM MANGROVE BERBASIS JASA LINGKUNGAN KARBON

ASWIN RAHADIAN

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan

**ILMU PENGELOLAAN SUMBERDAYA ALAM DAN LINGKUNGAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUR PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

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.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Ir. Nyoto Santoso, MS
- 2 Suyadi, S.Si, M.Sc., Ph.D

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Ir. Nyoto Santoso, MS
- 2 Suyadi, S.Si, M.Sc., Ph.D



Judul : Desain Optimasi Perlindungan dan Restorasi Ekosistem Mangrove Berbasis Jasa Lingkungan Karbon
Nama : Aswin Rahadian
NIM : P0602202029

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Lilik Budi Prasetyo, M.Sc _____

Pembimbing 2:
Dr. Yudi Setiawan, S.P., M.Env.Sc _____

Pembimbing 3:
Prof. Dr. Ir. Cecep Kusmana, MS _____

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Lina Karlinasari, S.Hut. MSc.F.Trop. _____
NIP 197311261998022001

Dekan Sekolah Pascasarjana:
Prof. Dr. Ir. Yusli Wardiatno, M.Sc _____
NIP 196607281991031002

Tanggal Ujian: 11 Mei 2026

Tanggal Lulus:



@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.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Keselamatan semoga tercurahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW yang telah memberikan penerangan untuk umat manusia dari kebodohan. Penelitian disertasi yang berjudul “Desain Optimasi Perlindungan dan Restorasi Ekosistem Mangrove Berbasis Jasa Lingkungan Karbon” dapat diselesaikan dengan baik. Terima kasih penulis ucapkan kepada komisi pembimbing, Bapak Prof. Dr. Ir. Lilik Budi Prasetyo, MSc, Dr. Yudi Setiawan, SP M.Env.Sc, dan Prof. Dr. Ir. Cecep Kusmana, MS yang telah membimbing, memberikan dukungan, saran masukan, serta motivasi kepada penulis dalam penelitian ini.

Ucapan terima kasih juga penulis disampaikan kepada Dr. Ir. Teddy Rusolono, Dr. Syamsul Bahri Agus, S.Pi, M.Si, sebagai penguji ujian kualifikasi doktor. Moderator seminar penelitian Dr. Ir. Nora Herdiana Pandjaitan, DEA, penguji luar komisi pembimbing Dr. Ir. Nyoto Santoso, MS dan Suyadi, S.Si, M.Sc., Ph.D, kaprodi PSL Prof. Dr. Lina Karlinasari, S.Hut., MSc.F.Trop., Wakil Dekan Bidang Akademik, Kemahasiswaan dan Alumni Prof. Dr. Ir. Y. Aris Purwanto, M.Sc atas masukan yang berharga kepada penulis dalam penelitian ini.

Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada bapak Ir. Nyoman Suryadiputra (Direktur Wetlands International) yang telah memberi dukungan pendanaan penelitian. Kang Udin sebagai kelompok tani pesisir di Kelurahan Sawah Luhur yang telah membantu selama pengumpulan data. Staf Laboratorium Analisis Lingkungan dan Geospasial Modelling Arif Kurnia Wijayanto, ST, MSc, Ph.D, Dr. Aryo Adhi Condro, S.Si, M.Si., Sahid Agustian Hudjimartu ST, M.Kom, Rimbawan Pencinta Alam, PT. Rinjani Parahita Nusantara, Yayasan Patera Nusantara Lestari, PT. Bhumi Pasa Hijau, dan PT. Global Eco Rescue Lestari yang telah memberikan ruang diskusi seluas-luasnya dalam penyelesaian disertasi, serta seluruh pihak yang telah banyak memberikan dukungan dan bantuan dan tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penghargaan setinggi-tingginya penulis berikan kepada kedua orang tua penulis Bapak Asep Rahmat, Ibu Wawat Suparti, adik penulis Alya Ditasari yang telah memberikan dukungan moril dan kesempatan kepada penulis untuk melanjutkan studinya ke jenjang yang lebih tinggi. Ungkapan terima kasih juga disampaikan istri Tyas Ayu Lestari S.Si, M.Si, anak Ashagiselva Tasmira Rahadian, Ashanavigia Tamima Rahadian, Ashametrica Tangia Rahadian, serta bapak dan ibu mertua yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Mei 2026

Aswin Rahadian



DAFTAR ISI

PRAKATA	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	x
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Ruang Lingkup	3
1.5 Manfaat	4
1.6 Kerangka Pikir	4
1.7 Kebaruan (<i>Novelty</i>)	6
II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Ekosistem Mangrove Urban	9
2.2 Perlindungan dan Konservasi	9
2.3 Rehabilitasi dan Restorasi Mangrove	10
2.4 Dinamika Pesisir dan Ekosistem Mangrove	11
2.5 Relasi Dinamika, Restorasi, dan Biodiversitas Mangrove	12
2.6 Tampungannya Karbon (<i>Carbon Pools</i>)	13
2.7 Biomassa dan Karbon	13
2.8 Model Alometrik	14
2.9 <i>Soil Organic Carbon</i>	14
2.10 <i>Reducing Emission from Deforestation and Degradation</i>	15
2.11 <i>Avoiding Unplanned Deforestation and Degradation</i>	15
2.12 <i>Avoiding Planned Deforestation and Degradation</i>	16
2.13 <i>Afforestation Reforestation and Revegetation</i>	16
2.14 <i>Wetland Restoration and Conservation</i>	17
2.15 <i>Nature Climate Solutions</i>	18
2.16 Nilai Ekonomi Karbon	18
III METODE UMUM PENELITIAN	19
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	19
3.2 Alat dan Bahan	20
3.3 Jenis dan Sumber Data	21
3.4 Rancangan Penelitian	21
3.5 Metode Analisis	21
IV KARAKTERISASI DINAMIKA EKOSISTEM MANGROVE SEBAGAI VARIABILITAS REFERENSI PERUBAHAN JASA LINGKUNGAN KARBON	25
4.1 Pendahuluan	25
4.2 Metode Penelitian	26
4.3 Hasil	40

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 mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

4.4	Pembahasan	78
4.5	Kesimpulan	82
V	MODEL ALOMETRIK TEGAKAN MANGROVE MUDA DAN JEJAK KARBON DARATAN AKRESI BERASOSIASI TAMBAK	83
5.1	Pendahuluan	83
5.2	Metode	84
5.3	Hasil	92
5.4	Pembahasan	110
5.5	Kesimpulan	112
VI	PRIORITAS PENDEKATAN PERLINDUNGAN DAN RESTORASI EKOSISTEM MANGROVE BERDASARKAN TIPOLOGI LANSKAP	113
6.1	Pendahuluan	113
6.2	Metode	114
6.3	Hasil	123
6.4	Pembahasan	152
6.5	Kesimpulan	156
VII	POTENSI PENGURANGAN EMISI GAS RUMAH KACA EKOSISTEM MANGROVE PADA SKENARIO MULTI-INTERVENSI	157
7.1	Pendahuluan	157
7.2	Metode	158
7.3	Hasil	171
7.4	Pembahasan	197
7.5	Kesimpulan	200
VIII	PEMBAHASAN UMUM	201
IX	SIMPULAN DAN SARAN	203
9.1	Simpulan	203
9.2	Saran	204
	DAFTAR PUSTAKA	205
	LAMPIRAN	229
	RIWAYAT HIDUP	259

DAFTAR TABEL

1	Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian	20
2	Alat lapangan yang digunakan dalam penelitian	20
3	Alat dan bahan untuk uji laboratorium	21
4	Rangkuman hubungan tujuan, data dan keluaran penelitian	22
5	Jenis dan sumber data penelitian tujuan 1	27
6	Kelas ekosistem	34
7	Matriks transisi perubahan lanskap ekosistem pesisir	35
8	Kelas transisi perubahan ekosistem	35
9	Kelas penutupan dan penggunaan lahan	36
10	Matriks transisi perubahan ekosistem dan tutupan mangrove	36
11	Kelas transisi perubahan tutupan mangrove	36
12	Statistik laju perubahan garis pantai dengan pendekatan EPR dan LRR	42
13	Statistik pergeseran garis pantai dengan pendekatan NSM dan SCE	44
14	Statistik laju akresi dan erosi berdasarkan kategori <i>landform</i>	45
15	Statistik perubahan pesisir pada tipologi lanskap ekosistem mangrove	47
16	Luas perubahan <i>intact mangrove forest</i> menjadi penutupan lahan lain	51
17	Luas ekosistem per zona	54
18	Perubahan luas lanskap ekosistem pesisir per zona	57
19	Laju perubahan luas lanskap ekosistem pesisir per zona	59
20	Perubahan luas lanskap ekosistem pesisir per tipologi	60
21	Laju perubahan luas lanskap ekosistem pesisir per tipologi	62
22	Perubahan luas lanskap pesisir sepanjang Pantura	62
23	Laju perubahan lanskap pesisir sepanjang Pantura	63
24	Perubahan luas tutupan mangrove per zona	67
25	Laju perubahan tutupan mangrove per zona	69
26	Perubahan luas tutupan mangrove per tipologi lanskap	70
27	Laju perubahan mangrove per tipologi lanskap	71
28	Perubahan luas tutupan mangrove di seluruh pesisir Pantura	72
29	Laju perubahan luas tutupan mangrove di seluruh pesisir Pantura	73
30	Proksi perubahan ekosistem mangrove dan tutupan mangrove	77
31	Ringkasan data statistik dari sampel <i>Avicennia marina</i>	93
32	Proporsi biomassa <i>Avicennia marina</i> berdasarkan kelas diameter	94
33	Proporsi biomassa <i>Avicennia marina</i> berdasarkan kelas tinggi total	94
34	Ringkasan data statistik dari sampel <i>Rhizophora stylosa</i>	96
35	Proporsi biomassa <i>Rhizophora stylosa</i> berdasarkan kelas diameter	97
36	Proporsi biomassa <i>Rhizophora stylosa</i> berdasarkan kelas tinggi total	97
37	Model penduga biomassa total (W) <i>Avicennia marina</i>	99
38	Model penduga AGB <i>Avicennia marina</i>	100
39	Model penduga BGB <i>Avicennia marina</i>	101
40	Model penduga biomassa total (W) <i>Rhizophora stylosa</i>	102
41	Model penduga AGB <i>Rhizophora stylosa</i>	103
42	Model penduga BGB <i>Rhizophora stylosa</i>	105
43	Total biomassa <i>Avicennia marina</i> pada daratan akresi	106
44	Total biomassa <i>Rhizophora stylosa</i> pada tambak <i>silvofishery</i>	106

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.

45	Berat jenis tanah, konsentrasi C, kerapatan C dan stok C tanah akresi dengan tegakan mangrove <i>Avicennia marina</i> sebagai species pioner.	107
46	Berat jenis tanah, konsentrasi C, kerapatan C dan stok C tanah tambak <i>silvofishery</i>	109
47	Tipologi lanskap mangrove	116
48	Definisi evaluasi kriteria	117
49	Kriteria dan penilaian pada skenario perbedaan tipologi lanskap mangrove	119
50	Ringkasan pendekatan restorasi mangrove, inovasi utama, dan implementasi inti.	132
51	Prioritas pendekatan restorasi mangrove serta aktivitas perlakuannya	140
52	Sumber data penelitian	159
53	Faktor emisi ekosistem mangrove	160
54	Intervensi dan kategori AFOLU	165
55	Perubahan luas dan laju perubahan ekosistem mangrove di 4 Kabupaten Bekasi, Karawang, Subang, dan Indramayu	173
56	Luas penggunaan lahan di Delta Cimanuk yang merupakan bagian dari lanskap intertidal Indramayu	175
57	Potential reduksi emisi pada skala region (tCO ₂ e/tahun)	176
58	Potential reduksi emisi pada skala lanskap (tCO ₂ e/tahun)	178
59	Perbandingan potensi ER rata-rata berdasarkan kategori multi-intervensi pada skala region dan lanskap	180
60	Nilai ekonomi karbon skala region berdasarkan alternatif harga pasar	181
61	Nilai ekonomi karbon skala lanskap berdasarkan alternatif harga pasar	182
62	Analisis biaya manfaat kegiatan perlindungan dan restorasi mangrove pada skala region	184
63	matriks interaksi dampak positif bersih kelompok masyarakat yang terpinggirkan dan/atau rentan	185
64	Dampak positif bersih terhadap kesejahteraan perempuan	187
65	Peraturan perundang-undangan yang mendukung jasa lingkungan karbon	189
66	Perbandingan Perpres 98/2021 dan Perpres 110/2025	191
67	Analisis strategis perubahan arah kebijakan dan dampaknya	194

DAFTAR GAMBAR

1	Kerangka pikir penelitian	5
2	Diagram konseptual rehabilitasi, restorasi, dan remediasi (Park dan Lee 2019)	10
3	Hipotesis tentang konsep restorasi mangrove; dipengaruhi oleh ekologi, masyarakat dan ekonomi yang dicontohkan dalam tiga situasi (Biswas <i>et al.</i> 2009)	11
4	Peta distribusi lokasi penelitian secara umum dan lokasi khusus pengambilan data contoh	19
5	Diagram alur pencapaian tujuan penelitian	24
6	Peta lokasi penelitian tujuan 1	27
7	Ilustrasi proses <i>image interpolation</i> dan matriks transisi dari analisis <i>spatio-temporal coastal dynamic pattern</i>	31
8	Contoh <i>The topographic map of the U.S. Army Map Service (AMS), Java & Madura 1:50,000 Series T722, 1942</i> , Lembar Djoewana	33
9	Contoh peta sejarah yang digunakan sebagai referensi penentuan IMF (a) <i>Aerial photographs relating to the Japanese occupation of Surabaya, Java, Indonesia, 1943</i> (The National Library of Australia), (b, c, dan d) <i>Kaart van de Noordkust van Java, van Ondjong Java tot en met de Straat van Madure 1700 decade EKR Inventaris van de kaarten en tekeningen behorend tot het archief van de Eerste Kamer der Staten-Generaal 1819</i>	33
10	Landsat MSS akusisi tahun 1972 yang digunakan sebagai basis referensi data spasial untuk penggambaran data digital <i>intact mangrove forest</i> (IMF)	34
11	Alur Analisa karakterisasi morfodinamika dan pola temporal indeks vegetasi	39
12	Visualisasi perubahan garis pantai tahun 1970, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, dan 2020 di beberapa sampel lokasi Pantura Jawa	40
13	Visualisasi pertumbuhan dan kehilangan daratan periode 1970-1990, 1990-1995, 1995-2000, 2000-2005, 2005-2010, 2010-2015, dan 2015-2020 di beberapa sampel lokasi Pantura Jawa	41
14	Grafik laju perubahan garis pantai pendekatan (a) EPR dan (b) LRR	43
15	Grafik laju pergeseran garis pantai pendekatan (a) SCE dan (b) NSM	44
16	Kategori bentuk lahan pesisir Pantai Utara Jawa	45
17	Tipologi lanskap pesisir Pantai Utara Jawa	47
18	Distribusi sampel analisis <i>Coastal Dynamic Pattern</i> pada tipologi delta	48
19	Pola perubahan <i>multitemporal vegetation index</i> pada tipologi delta (Sumbu x = NDVI 1990; y = NDVI 2020)	48
20	Distribusi sampel analisis <i>Coastal Dynamic Pattern</i> pada tipologi pantai terbuka dan pantai terlindung	49
21	Pola perubahan <i>multitemporal vegetation index</i> pada pantai terbuka (Sumbu x = NDVI 1990; y = NDVI 2020)	50
22	Distribusi <i>intact mangrove forest</i> Pantura Jawa pada tahun 1800	51
23	Sankey diagram perubahan luas <i>intact mangrove forest</i> menjadi penggunaan lahan lain pada fase awal periode tahun 1800-1970	52

24	Peta distribusi ekosistem pada tahun 1970	54
25	Peta distribusi ekosistem pada tahun 2020	54
26	Grafik perubahan luas ekosistem intertidal di Zona 1, Zona 2, Zona 3 dan seluruh pantura	55
27	Dinamika perubahan ekosistem pesisir periode 1970-2020	56
28	Histogram luas perubahan ekosistem pesisir per zona (a) Zona 1, (b) Zona 2, (c) Zona 3, (d) seluruh pantura	58
29	Histogram luas perubahan intertidal per tipologi (a) <i>Delta</i> (b) <i>Open Coast</i> (c) <i>Backward</i> (d) Seluruh Pantura	61
30	Histogram perubahan luas tutupan mangrove di seluruh Pantura secara multitemporal dari tahu 1970 sampai 2020	65
31	Dinamika perubahan tutupan mangrove 1970-2020	66
32	Histogram dinamika tutupan mangrove berdasarkan pembagian zona (a) Zona 1, (b) Zona 2, (c) Zona 3, (d) seluruh pantura	68
33	Histogram dinamika mangrove per tipologi (a) <i>Delta</i> , (b) <i>Open Coast</i> , (c) <i>Backward</i> , (d) seluruh tipologi	71
34	Hubungan antara dinamika ekosistem dan (a) peningkatan tutupan mangrove (b) penurunan tutupan mangrove pada tipologi delta	74
35	Hubungan antara dinamika ekosistem dan (a) peningkatan tutupan mangrove (b) penurunan tutupan mangrove pada tipologi pantai terbuka	75
36	Hubungan antara dinamika ekosistem dan (a) peningkatan tutupan mangrove (b) penurunan tutupan mangrove pada tipologi <i>backward</i>	76
37	Visualisasi citra satelit Landsat yang menunjukkan perluasan lahan terbangun zona intertidal pada tahun 2020 dan 2025; a) Tangerang, Provinsi Banten, b) Kendal, Jawa Tengah, c) Demak, Jawa Tengah	79
38	Proyeksi perubahan ekosistem mangrove dan tutupan mangrove dari tahun dasar 1800an-2020 serta proyeksi pesimistis dan optimistis di masa depan	80
39	Peta lokasi penelitian tujuan 3; lokasi sampel vegetasi dan tanah di tambak <i>silvofishery</i> dan distribusi titik pengambilan sampel daratan akresi	84
40	Ilustrasi kategori lokasi pengambilan sampel tanah dan Ketentuan kedalaman tanah yang diambil sebagai contoh	86
41	Diagram alur model alometrik tegakan mangrove muda dan jejak karbon daratan akresi berasosiasi tambak <i>silvofishery</i>	91
42	Grafik biomassa setiap bagian pohon pada setiap (a) kelas diameter (b) kelas tinggi untuk species <i>Avicennia marina</i>	94
43	Grafik biomassa setiap bagian pohon pada setiap (a) kelas diameter (b) kelas tinggi untuk species <i>Rhizophora stylosa</i>	97
44	Grafik (a) berat jenis tanah, (b) konsentrasi C, (c) kerapatan C, dan (d) stok C tanah akresi berdasarkan perubahan profil kedalaman tanah	108
45	Grafik (a) berat jenis tanah, (b) konsentrasi C, (c) kerapatan C, dan (d) stok C tanah pada lahan tambak <i>silvofishery</i> berdasarkan perubahan profil kedalaman tanah	109
46	Stok karbon ekosistem mangrove terbagi menjadi kelompok daratan akresi dan tambak <i>silvofishery</i> dengan tegakan <i>Avicennia marina</i> dan <i>Rhizophora stylosa</i> muda dari di Pantura Jawa	111

47	Model yang diusulkan untuk metode PROMETHEE	118
48	Diagram alur analisis prioritas pendekatan restorasi mangrove berdasarkan tipologi lanskap pesisir	122
49	Skematik konsep <i>Silvofishery</i> ; model tambak (a) Empang parit (b) Komplangan (c) Empang terbuka (d) Kao-kao	124
50	Skematik konsep <i>ecological mangrove restoration</i> (Kredit: Triana, Yayasan Lahan Basah)	125
51	Skematik <i>Ecological Engineering</i> (Sumber: Wetlands International)	127
52	Skematik <i>associated mangrove aquaculture</i> (Kredit: Triana, Yayasan Lahan Basah)	128
53	Skematik <i>shrimp-carbon aquaculture</i> (Sumber: Yayasan Konservasi Alam Nusantara)	129
54	Distribusi kawasan lindung dan konservasi di Indonesia yang memiliki komponen ekosistem mangrove; berikut keterangan kondisinya; hijau: baik, kuning: moderat, dan merah: relatif rusak	131
55	Distribusi implementasi pendekatan restorasi mangrove di Indonesia	131
56	a) <i>Partial complete rangking</i> prioritas pendekatan restorasi pada skenario berbasis tipologi lanskap delta dan estuari; Analisis sensitivitas b) kemampuan untuk menangani erosi, c) aksesibilitas, d) kemampuan komunitas, e) penerapan teknologi, f) peluang untuk regenerasi alami, g) biaya implementasi, h) rekayasa hidrologi	134
57	a) <i>Partial complete rangking</i> prioritas pendekatan restorasi pada skenario berbasis tipologi lanskap laguna; Analisis sensitivitas b) kemampuan untuk menangani erosi, c) aksesibilitas, d) kemampuan komunitas, e) penerapan teknologi, f) peluang untuk regenerasi alami, g) biaya implementasi, h) rekayasa hidrologi	136
58	a) <i>Partial complete rangking</i> prioritas pendekatan restorasi pada skenario berbasis tipologi lanskap <i>backward</i> ; Analisis sensitivitas b) kemampuan untuk menangani erosi, c) aksesibilitas, d) kemampuan komunitas, e) penerapan teknologi, f) peluang untuk regenerasi alami, g) biaya implementasi, h) rekayasa hidrologi	137
59	a) <i>Partial complete rangking</i> prioritas pendekatan restorasi pada skenario berbasis tipologi lanskap <i>open coast</i> ; Analisis sensitivitas b) kemampuan untuk menangani erosi, c) aksesibilitas, d) kemampuan komunitas, e) penerapan teknologi, f) peluang untuk regenerasi alami, g) biaya implementasi, h) rekayasa hidrologi	139
60	Distribusi tutupan mangrove dengan variasi kerapatannya	141
61	Distribusi tipologi lanskap mangrove	143
62	Spasial eksplisit distribusi prioritas pertama (1)	144
63	Spasial eksplisit distribusi prioritas kedua (2)	145
64	Spasial eksplisit distribusi prioritas ketiga (3)	146
65	a) Peta integrasi dan penyesuaian prioritas restorasi mangrove secara spasial eksplisit; b) Luas wilayah mangrove berdasarkan strategi pengelolaan mangrove terpadu menurut provinsi di Indonesia	148
66	Penerapan pendekatan restorasi ekosistem mangrove secara spasial eksplisit prioritas satu (1) pada skala regional	150
67	Penerapan pendekatan restorasi ekosistem mangrove secara spasial eksplisit prioritas dua (2) pada skala regional	151

68	Penerapan pendekatan restorasi ekosistem mangrove secara spasial eksplisit prioritas tiga (3) pada skala regional	151
69	Distribusi lokasi implementasi pendekatan <i>ecological engineering</i> di Pantura Jawa	151
70	Distribusi lokasi implementasi pendekatan <i>silvofishery</i> di Pantura Jawa	152
71	Distribusi kawasan ekowisata mangrove di Pantura Jawa	152
72	Peta lokasi penelitian tujuan 4	159
73	Skematik <i>baseline</i> , <i>scenario</i> dan <i>gap impact</i> dari upaya perlindungan dan restorasi ekosistem	163
74	Matriks dan ilustrasi potensi intervensi pada ekosistem mangrove	164
75	Diagram alur potensi pengurangan emisi gas rumah kaca ekosistem mangrove pada skenario multi-intervensi restorasi	168
76	Diagram alur valuasi potensi nilai ekonomi karbon dan analisis biaya manfaat kredit karbon	170
77	Distribusi tutupan mangrove dan tambak pasang surut pada tahun 2025	171
78	Peta fungsi kawasan hutan di pantai utara Jawa yang berpotensi untuk pengelolaan jasa lingkungan karbon	172
79	Potensi <i>investible area</i>	173
80	Peta penggunaan lahan di Hutan Lindung Delta Cimanuk (<i>project area</i>) tahun 2025	174
81	Grafik nilai kumulatif pengurangan emisi bersih dari (a) CIW+REDD, (b) RWE+ARR _{planting} , (c) RWE+ARR _{natreg} , (d) Kumulatif ER pada skala region	177
82	Grafik nilai kumulatif pengurangan emisi bersih dari (a) CIW+REDD, (b) RWE+ARR _{planting} , (c) RWE+ARR _{natreg} , (d) Kumulatif ER pada skala lanskap	179



DAFTAR LAMPIRAN

1	Lampiran 1 Visualisasi evolusi lanskap delta di zona barat (Delta Pemali) hasil interpolasi	230
2	Lampiran 2 Visualisasi evolusi lanskap delta di zona tengah (Delta Wulan) hasil interpolasi	231
3	Lampiran 3 Visualisasi evolusi lanskap delta zona timur (Delta Porong) hasil interpolasi	232
4	Lampiran 4 Hasil uji akurasi pemetaan ekosistem	233
5	Lampiran 5 Hasil uji akurasi pemetaan penggunaan lahan	234
6	Lampiran 6 Peta distribusi ekosistem pada tahun 1970	235
7	Lampiran 7 Peta distribusi ekosistem pada tahun 1990	235
8	Lampiran 8 Peta distribusi ekosistem pada tahun 1995	236
9	Lampiran 9 Peta distribusi ekosistem pada tahun 2000	236
10	Lampiran 10 Peta distribusi ekosistem pada tahun 2005	237
11	Lampiran 11 Peta distribusi ekosistem pada tahun 2010	237
12	Lampiran 12 Peta distribusi ekosistem pada tahun 2015	238
13	Lampiran 13 Peta distribusi ekosistem pada tahun 2020	238
14	Lampiran 14 Perubahan luas penutupan-penggunaan lahan per tahun pengamatan	239
15	Lampiran 15 Dimensi dan biomassa dari sampel <i>Avinennia marina</i>	241
16	Lampiran 16 Dimensi dan biomassa dari sampel <i>Rhizophora stylosa</i>	242
17	Lampiran 17 Data sampel tanah di daratan akresi	243
18	Lampiran 18 Data sampel tanah di tambak <i>silvofishery</i>	245
19	Lampiran 19 Parameter pertumbuhan tanaman mangrove	249
20	Lampiran 20 Parameter pertumbuhan regenerasi alami	250
21	Lampiran 21 Parameter <i>autochthonous carbon</i> dari vegetasi	251
22	Lampiran 22 Parameter <i>allochthonous carbon</i> dari vegetasi	252
23	Lampiran 23 PROMETHEE skenario tipologi pantai terbuka	253
24	Lampiran 24 PROMETHEE skenario tipologi delta	253
25	Lampiran 25 PROMETHEE skenario tipologi estuari	254
26	Lampiran 26 PROMETHEE skenario tipologi <i>backward</i>	254
27	Lampiran 27 PROMETHEE skenario tipologi laguna	255
28	Lampiran 28 Biaya investasi usaha pengelolaan jasa lingkungan karbon	255
29	Lampiran 29 Biaya operasional usaha pengelolaan jasa lingkungan karbon	256
30	Lampiran 30 Laba-rugi usaha pengelolaan jasa lingkungan karbon	257
31	Lampiran 31 Arus kas usaha pengelolaan jasa lingkungan karbon	258