

**Article Info:**

Received 12 August 2024

Revised 27 October 2024

Accepted 20 March 2025

Corresponding Author:

Khairul Mukmin Lubis
Study Program of Coastal and
Marine Resources Management,
Faculty of Fisheries and Marine
Sciences, IPB University
E-mail: kmukmin852@gmail.com

© 2025 Author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license, allowing unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided proper credit is given to the original authors.



Carbon Sequestration Estimation and Economic Valuation of *Rhizophora apiculata* in the North Nias Marine Conservation Area

Khairul Mukmin Lubis¹, Zulhamsyah Imran^{1,2}, Taryono¹, Ario Damar¹

^a Study Program of Coastal and Marine Resources Management, Faculty of Fisheries and Marine Sciences, IPB University, Indonesia

^b SEAMEO BIOTROP, Bogor, Indonesia

Abstract

Mangrove ecosystems are categorized as blue carbon due to their ability to store atmospheric carbon. *Rhizophora apiculata*, the dominant mangrove species in the Sawo-Lahewa conservation area, North Nias Regency, plays a key role in carbon sequestration and is widely used in ecosystem rehabilitation. This study aims to estimate the carbon stock and its economic value under different compensation scenarios. A non-destructive method was applied to estimate biomass using allometric equations, followed by calculations of carbon stock and CO₂ absorption. The economic value was assessed using three approaches: Forest Carbon Partnership Facility (FCPF), the U.S. government's Social Cost of Carbon (SCC), and Indonesia's domestic market under the HPP Law. The estimated carbon stock of *R. apiculata* is 3,687.78 tons/ha, equivalent to 13,534.15 tons of CO₂ absorbed. In 2023, its economic value is approximately IDR 989.35 million (FCPF), IDR 8.31 billion (SCC), and IDR 406.02 million (domestic market). Projected values in 2043 increase to IDR 2.17 billion, IDR 18.21 billion, and IDR 889.65 million, respectively. These results highlight the ecological and economic importance of *R. apiculata* in supporting climate regulation services. Strategic conservation and sustainable management of mangroves can enhance their carbon offset potential, contributing to both environmental and economic benefits.

Keywords: CO₂, carbon stock, FCPF, mangrove, North Nias

Estimasi Serapan dan Nilai Ekonomi Karbon *Rhizophora apiculata* di Kawasan Konservasi Perairan Nias Utara

Abstrak

Ekosistem mangrove termasuk dalam kategori karbon biru karena kemampuannya menyerap dan menyimpan karbon atmosfer. *Rhizophora apiculata* merupakan spesies dominan di kawasan konservasi perairan Sawo-Lahewa, Kabupaten Nias Utara, dan banyak dimanfaatkan dalam kegiatan mitigasi serta rehabilitasi ekosistem mangrove. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi cadangan karbon dan nilai ekonominya berdasarkan skenario kompensasi jasa pengaturan, khususnya penyerapan karbon. Metode yang digunakan adalah metode non-destruktif dengan pendekatan persamaan alometrik untuk menghitung biomassa, cadangan karbon, dan serapan CO₂. Nilai ekonomi karbon dihitung menggunakan tiga pendekatan: *Forest Carbon Partnership Facility* (FCPF), *Social Cost of Carbon* (SCC) dari pemerintah Amerika Serikat, serta skenario pasar domestik sesuai Undang Undang Harmonisasi Per Pajak. Hasil menunjukkan cadangan karbon sebesar 3.687,78 ton/ha dengan potensi penyerapan CO₂ sebesar 13.534,15 ton ekuivalen. Pada tahun 2023, nilai ekonomi karbon mencapai sekitar Rp989,35 juta (FCPF), Rp8,31 miliar (SCC), dan Rp406,02 juta (pasar domestik). Proyeksi tahun 2043 menunjukkan peningkatan nilai menjadi Rp2,17 miliar, Rp18,21 miliar, dan Rp889,65 juta secara berturut-turut. Temuan ini menegaskan pentingnya konservasi dan pengelolaan mangrove secara berkelanjutan dalam mendukung jasa pengaturan iklim serta memberikan manfaat ekonomi melalui perdagangan karbon.

Kata kunci: CO₂, FCPF, mangrove, Nias Utara, stok karbon

1. Pendahuluan

Ekosistem mangrove merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki kemampuan tinggi dalam menyerap dan menyimpan karbon, menjadikannya penting dalam strategi mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim global (Wang dan Gu, 2021). Kawasan tropis, termasuk Indonesia, memiliki posisi strategis dalam mendukung upaya ini. Sebagai negara dengan luasan hutan mangrove terbesar di dunia, Indonesia memiliki potensi besar dalam kontribusi terhadap pengurangan emisi global melalui ekosistem pesisir serta peluang ekonomi melalui perdagangan karbon (Ketaren, 2023).

Mangrove tergolong sebagai ekosistem karbon biru, yakni ekosistem pesisir yang dapat menyimpan karbon dalam jangka panjang, terutama dalam sedimen atau substratnya (Quevedo et al., 2021; Mudiyarso dan Ambo-Rappe, 2022). Potensi penyerapan karbon yang tinggi membuat mangrove menjadi pionir dalam memberikan manfaat ekologis dan sosial bagi manusia dan lingkungannya (Choudhary et al., 2024). Beberapa kajian bahkan menyebutkan bahwa kemampuan penyerapan karbon oleh mangrove di Indonesia dapat mencapai sekitar 52,85 ton CO₂ per hektar, tergantung pada jenis dan kondisi vegetasi.

Saat ini, kajian mengenai stok karbon pada ekosistem mangrove hasil rehabilitasi telah banyak dilakukan, termasuk di Pulau Harapan dan Pulau Kelapa Besar, yang menunjukkan nilai stok karbon sebesar 634,54 ton C/ha. Di lokasi lain, yaitu di Banda Aceh, ekosistem mangrove sekunder yang didominasi oleh *Rhizophora apiculata* tercatat mampu menyerap karbon sebesar 4.033,33 g CO₂ per pohon (Dewiyanti et al., 2019). Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa ekosistem mangrove, baik yang direhabilitasi maupun yang tumbuh secara alami, memiliki potensi besar dalam mendukung upaya mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon.

Di Kawasan Konservasi Perairan (KKP) Sawo-Lahewa, Kabupaten Nias Utara, kondisi ekosistem mangrove mengalami degradasi pasca gempa bumi tahun 2005, yang disebabkan oleh gangguan sirkulasi air laut akibat pengangkatan daratan. Namun demikian, berdasarkan citra satelit Landsat tahun 2015, diketahui telah terjadi proses rehabilitasi alami yang ditandai dengan tumbuhnya kembali vegetasi mangrove dan asosiasinya, termasuk dari genus Rhizophoraceae (Suyarso et al., 2018). Meskipun demikian, hingga kini belum tersedia data yang memadai mengenai potensi penyerapan karbon pada ekosistem mangrove di wilayah tersebut. Oleh karena itu, penting dilakukan penelitian yang fokus pada estimasi penyerapan karbon oleh *R. apiculata* di KKP Sawo-Lahewa, sebagai upaya untuk memahami manfaat ekologisnya dan kontribusinya dalam konservasi serta mitigasi perubahan iklim (Adame et al., 2017). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kerapatan vegetasi *R. apiculata*, menghitung potensi serapan karbonnya, serta mengestimasi nilai ekonomi karbon yang tersimpan, sebagai dasar ilmiah dalam pengelolaan dan perlindungan ekosistem mangrove di wilayah tersebut.

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Oktober – November 2023 dan berlokasi di Kawasan Konservasi Perairan Sawo-Lahewa, Kabupaten Nias Utara (**Gambar 1**). Pengambilan sampel dilakukan pada 3 lokasi yang merepresentasikan klasifikasi kerapatan mangrove yaitu jarang 2 plot, sedang 8 plot dan lebat 8 plot.

2.2. Pengumpulan Data

2.2.1. Biofisik Ekosistem Mangrove

Plot pengamatan diterapkan pada luasan berukuran (10 x 10) m² untuk pohon, (5x5) m² untuk anakan (Kaunang dan Kimbal 2009). Jumlah plot dari seluruh lokasi pengamatan yakni 18 plot berdasarkan rumus yang dikembangkan. Pengambilan data pada plot ukuran 10x10 m² untuk data vegetasi yang masuk kategori pohon dengan diameter batang pohon >4 cm atau keliling lingkaran batang > 16 cm (Ginoga dan Djaenudin, 2022).

Penentuan plot dilakukan secara *purposive sampling* dan pengambilan data mangrove di area penelitian merupakan jenis yang tumbuh secara alami pasca gempa Nias tahun 2005. Diameter batang pada ketinggian lebih dari 1,3 m atau pengukuran setinggi dada (*Diameter Breast Height*) (Kauffman et al., 2016).

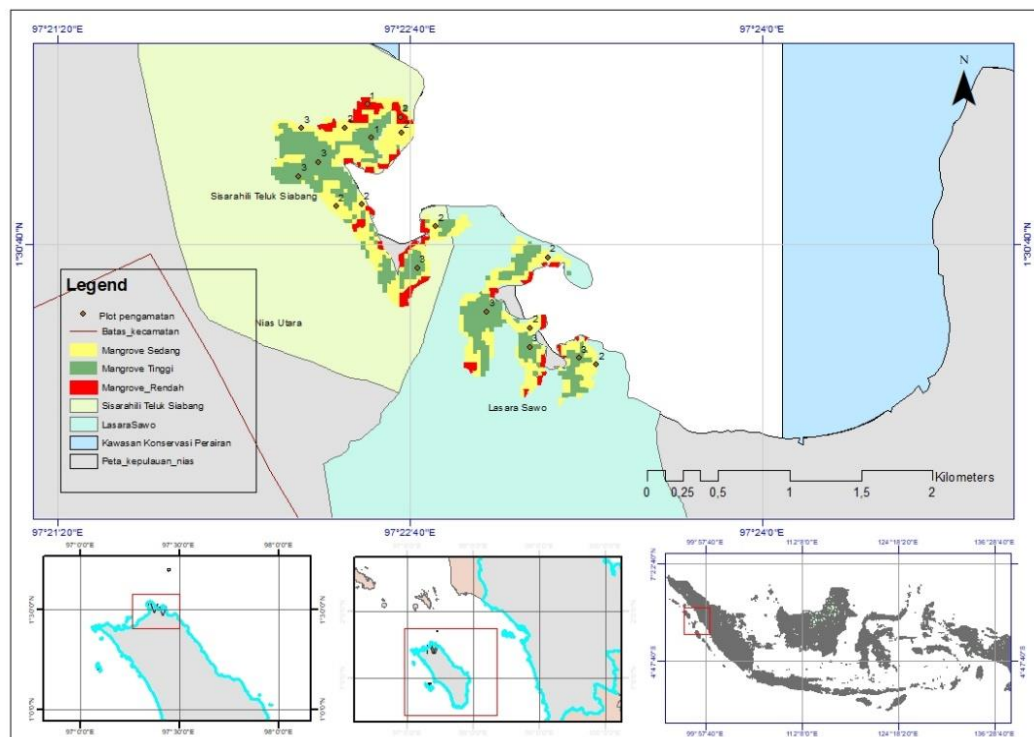


Figure 1. Map of mangrove distribution based on density levels in the Sawo-Lahewa marine protected area, North Nias Regency.

Gambar 1. Peta sebaran mangrove berdasarkan tingkat kerapatan di kawasan konservasi perairan Sawo-Lahewa, Kabupaten Nias Utara.

2.3. Analisis Biomassa *Aboveground* dan *Belowground*

Model non destruktif digunakan dalam analisis perhitungan stok karbon bagian atas tegakan (*Above ground biomass*, ABS) dan bawah permukaan (*Bellow ground biomass*, BGB). Persamaan alometrik pada biomassa mangrove dihitung dengan mengaitkan kayu dengan diameter pohon yang terlihat pada persamaan 1 (Komiya et al., 2005). Di sisi lain, perhitungan biomassa BGB dihitung menggunakan persamaan alometrik antara berat akar dan diameter pohon terlihat pada persamaan

$$W_{top} = 0,251_p D^{2,46} \quad (1)$$

$$W_R = 0,199_p^{0,899} D^{2,22}$$

Keterangan : W_{top} : Biomassa tegakan (kg); W_R : Biomassa akar (kg); D : Diameter pohon (cm); p : Densitas kayu (g/cm^3).

2.4. Analisis Cadangan Stok Karbon

Simpanan stok karbon dihitung dari nilai biomassa tegakan dan bawah permukaan. Berdasarkan teori dari Kauffman et al. (2016), sebesar 46 hingga 50% dari nilai biomassa merupakan cadangan stok karbon. Persamaan 2 merupakan formula dalam menghitung cadangan karbon bagian atas dan bagian bawah.

$$C = 0,47 \times B \quad (2)$$

Keterangan : C : Simpanan karbon (kg); B : Biomassa (kg); $0,47$: Fraksi karbon.

2.5. Analisis Serapan Karbondioksida

Perhitungan serapan karbondioksida dilakukan dengan membandingkan berat molekul relative senyawa karbondioksida dengan molekul relative atom karbon yang dikalikan dengan total cadangan karbon ABG atau BGB (Kauffman et al., 2016). Perhitungan serapan karbondioksida dapat dilihat pada persamaan 3.

$$CO_2 = \left(\frac{M_r CO_2}{A_r C} \right) \times C_n \quad (3)$$

Keterangan : CO_2 : Sekuestrasi Karbon (ton/ha); $MrCO_2$: Berat molekul relative senyawa atom CO_2 (44); $Ar.C$: Berat molekul realtif atom C (12); C_n : Simpanan karbon (ton/ha).

2.6. Nilai Ekonomi Karbon

Nilai Ekonomi karbon yang diperoleh dari penyerapan karbon ekosistem mangrove dihitung menggunakan harga karbon karena nilai karbon dapat diperdagangkan di pasar karbon domestik hingga internasional. Calon pembeli instrumen berbasis pasar karbon sangat beragam, baik secara internasional maupun dalam negeri (Desty Vambia dan Kuncoro 2024). Selama ini pembeli karbon Indonesia berasal dari pihak asing, namun karena lemahnya permintaan, Indonesia lebih fokus mengembangkan pasar karbon dalam negeri sebagai alat kebijakan untuk mencapai target Kontribusi Nasional yang tidak mandatory. Pertama, berdasarkan karbon yang digunakan dalam *Program Forest Carbon Partnership Facility (FCPF) -World Bank Carbon Fund* di Provinsi Kalimantan Timur adalah USD5/tCO₂e atau senilai Rp73.100/tCO₂e. Kedua, berdasarkan nilai *Social Cost* atau biaya sosial yang ditetapkan negara-negara maju atas emisi karbon yang dikeluarkan dari sektor industri, salah satunya pemerintah Amerika yang menetapkan USD42/tCO₂e atau Rp614.040/tCO₂e (Rose et al. 2017; Siagian et al. 2024) . Ketiga, harga karbon dalam negeri berdasarkan Undang-Undang Indonesia (UU Nomor 7 Tahun 2021 tentang Harmonisasi Peraturan Perpajakan/UU HPP) menetapkan harga pajak karbon terendah sebesar Rp30.000/tCO₂e. Pajak ini ditetapkan bagi sektor usaha yang tidak mencapai target penurunan emisi, yang dapat digunakan untuk meningkatkan penyerapan karbon melalui kegiatan rehabilitasi hutan, seperti agroforestri. Kemudian digunakan metode transfer manfaat untuk menentukan nilai pendapatan serapan karbon pada tahun 2043 sesuai periode mitigasi perubahan iklim 20 tahun (Nahib, 2011; Yana et al., 2021). Rumus menghitung nilai ekonomi karbon dapat dilihat pada persamaan 4 sebagai berikut :

$$V = (1 + I)^t \cdot P \quad (4)$$

Keterangan: V : Pendapatan karbon pada tahun 2043 (dalam Rupiah/IDR); i : Rata-rata tingkat inflasi (%); P : Pendapatan karbon pada tahun 2023 (dalam Rupiah/IDR); t : Periode mitigasi iklim, yaitu selama 20 tahun dari 2023 hingga 2043.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kerapatan *Rhizophora apiculata*

Penelitian ini membagi dua kategori yakni pohon dan pancang. Berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 21 Tahun 2004 kriteria baku mutu kerapatan mangrove

dibagi menjadi tiga, yaitu padat > 1.500 individu/ha, sedang 1.000-1.500 individu/ha, dan jarang < 1.000 individu/ha. Kerapatan mangrove *R. apiculata* dapat dilihat pada **Tabel 1** berikut :

Tabel 1. Jumlah dan Kerapatan Individu Pohon dan Pancang *R. apiculata* per Lokasi.

Table 1. Tree and Sapling Abundance and Density of R. apiculata by Location.

Location	Number of Individuals		Density (Ind/ha)	
	Tree	Saplings	Tree (Ind/ha)	Saplings (Ind/ha)
1	15	49	750	9800
2	76	234	950	11700
3	113	231	1412.5	11550

Berdasarkan Tabel 1 untuk kategori pohon pada lokasi penelitian mangrove *R. apiculata* yang lokasi vegetasi lebat memiliki nilai kerapatan pohon 1.412,5 ind/ha dan pancang 11.550 ind/ha. Lokasi tersebut berdasarkan KEPMEN LH Nomor 21 Tahun 2004 masuk ke dalam kriteria lebat , sedangkan lokasi pengamatan lokasi 1 dan lokasi 2 berturut-turut berkerapatan 75 ind/ha dan 950 ind/ha yang dikategorikan ke dalam kriteria jarang. Sementara untuk kategori pancang pada lokasi pengamatan lebat, sedang dan jarang memiliki nilai kerapatan 11.550 ind/ha, 11.700 ind ha dan 9.800 ind/ha berdasarkan kriteria KEPMEN LH Nomor 21 Tahun 2004 dari semua lokasi masuk kategori lebat. Hal ini dikarenakan mangrove yang berada di Kawasan Konservasi Perairan Sawo-Lahewa merupakan mangrove sekunder, berdasarkan hasil penginderaan jarak jauh pada tahun 2015 terlihat di bagian depan zonasi mangrove terdekat dengan garis pantai adanya pertumbuhan mangrove dengan lebar 60 meter hingga 200 meter (Suyarso et al., 2018). *R. apiculata* banyak ditemukan di lokasi terdepan, kondisi ini memungkinkan wilayah sangat mendukung pertumbuhan karena substrat lumpur berpasir dan merupakan mangrove sejati dan terbatas secara eksklusif pada habitat intertidal tropis serta tidak meluas ke komunitas tumbuhan daratan serta secara morfologis, fisiologis, dan reproduktif telah beradaptasi dengan kondisi salin dan tergenang air (Dewiyanti et al., 2019; Muhtadi et al., 2020).

3.2. Biomassa Mangrove *Rhizophora apiculata*

Biomassa mangrove sangat ditentukan oleh DBH (*Diameter Breast Height*), di mana jika diameter pohon mangrove tinggi maka akan memengaruhi biomassa dari pohon tersebut. DBH mangrove *R. apiculata* dapat dilihat pada **Gambar 3** berikut:

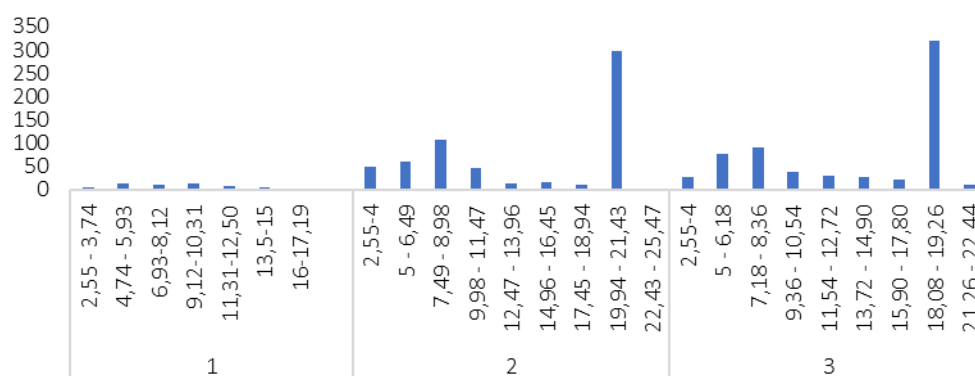


Figure 3. Diameter class distribution of *R. apiculata* trees at three observation sites.

Gambar 3. Distribusi diameter kelas pohon *R. apiculata* pada tiga lokasi pengamatan.

Gambar 3 menunjukkan diameter mangrove *Rhizophora apiculata* yang diteliti di Kawasan Konservasi Perairan Sawo-Lahewa dan sekitarnya Kabupaten Nias Utara berkisar 2,55 hingga 25,47 cm. Pada lokasi mangrove lebat diameter paling besar adalah 17,19 cm, lokasi sedang diameter paling besar yakni 25,47 cm dan lokasi jarang diameter paling besar yakni

22,33 cm. Diameter *R. apiculata* di lokasi penelitian ini masih masuk kategori regenerasi yang terjadi di ekosistem tersebut masih dalam keadaan normal, hal ini sejalan dengan penelitian di Banda Aceh bahwa diameter yang ditemukan di lokasi penelitian tersebut berkisar 20-30 cm hingga > 30 cm (Ledheng et al., 2022).

Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai biomassa bagian atas (AGB) 54.870,23 kg/m² lebih besar dari biomassa bagian bawah (BGB) 23.593,13 kg/m². Nilai biomassa AGB dan BGB tertinggi berada di lokasi pengamatan 3 di mana berturut-turut 30.214,28 kg/m² dan 12.815,57 kg/m². Tingginya nilai tersebut dapat dipengaruhi dari nilai kerapatan, di mana kerapatan di lokasi yang lebat lebih tinggi dari pada lokasi lainnya, dan besar kecilnya nilai biomassa juga dipengaruhi oleh besar kecilnya ukuran diameter pohon (Haryati et al., 2024). Tegakan *R. apiculata* pada lokasi 3 memiliki nilai diameter dengan rentang 18,08 – 19,26 cm sebanyak 320 tegakan *R. apiculata*. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah pohon, kerapatan, dan diameter pohon memengaruhi nilai biomassa, semakin besar diameter semakin besar pula biomassa yang disimpan. Selain itu pertumbuhan dan peningkatan diameter dipengaruhi oleh salinitas (Basyuni et al., 2018). Hal ini sangat berkaitan erat dengan proses fotosintesis dimana tumbuhannya menyerap CO₂ dan merubahnya menjadi senyawa organik. Hasil fotosintesis disimpan pada bagian-bagian pohon serta digunakan untuk melakukan pertumbuhan diameter dan tinggi.

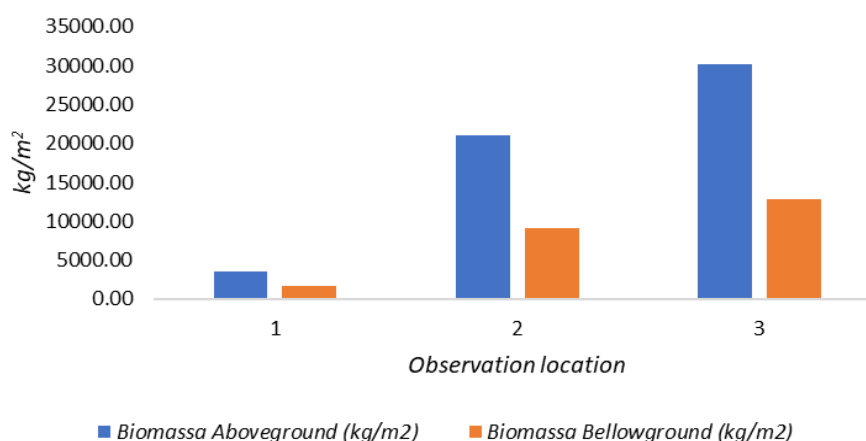


Figure 4. Comparison of aboveground and belowground biomass of *R. apiculata* at three observation sites.

Gambar 4. Perbandingan biomassa atas permukaan dan bawah permukaan *R. apiculata* di tiga lokasi pengamatan.

3.3. Stok Karbon Above ground dan Bellow ground Mangrove *Rhizophora apiculata*

Dari hasil perhitungan stok karbon pada bagian atas (*Above ground*) dan bagian bawah (*Bellow ground*) mangrove *Rhizophora apiculata* pada ketiga lokasi penelitian dapat dilihat pada **Gambar 5**. Dapat dilihat bahwa stok karbon bagian atas (*Above ground*) lebih tinggi dari pada (*Bellow ground*). Pada lokasi penelitian dengan kategori lebat diperoleh mangrove *R. apiculata* nilai karbon bagian atas sebesar 1.420,07 ton C/ha dan karbon bagian bawah sebesar 602,33 ton C/ha. Paling rendah pada lokasi penelitian dengan kategori jarang diperoleh nilai karbon bagian atas sebesar 169,13 ton C/ha dan karbon bagian bawah sebesar 75,86 ton C/ha. Total stok karbon mangrove *R. apiculata* dari nilai stok karbon bagian atas dan bagian bawah sebesar 3.687,78 ton/ha. Nilai kandungan karbon suatu bahan organik adalah 47% dari total biomasanya (Isnaini dan Amin, 2020). Nilai simpanan karbon *R. apiculata* di Kawasan Konservasi Perairan Sawo-Lahewa lebih tinggi dibandingkan di Pulau Cawan Kabupaten Indragiri Hilir dengan nilai stok karbon 1.053,53 ton C/ha (Syafuruddin et al., 2018). Perbedaan stok karbon ini dapat dilihat dari nilai biomassa pohon seperti umur tegakan, riwayat perkembangan vegetasi, komposisi tegakan, dan struktur vegetasi memengaruhi biomassa tegakan (Amelia et al., 2023).

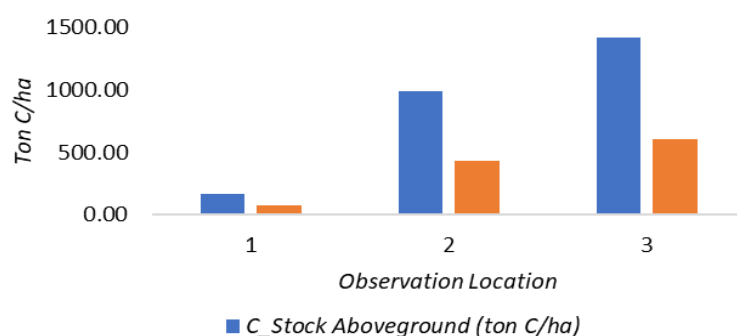


Figure 5 Comparison of aboveground and belowground carbon stock at three observation locations.

Gambar 5. Perbandingan cadangan karbon atas permukaan dan bawah permukaan di tiga lokasi pengamatan.

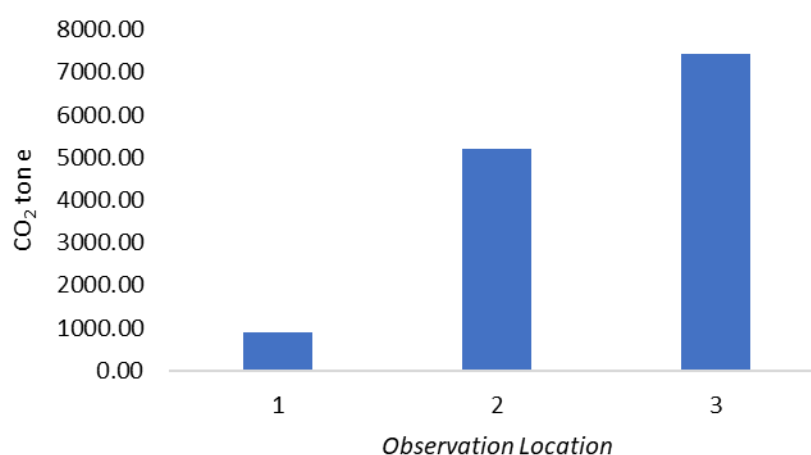


Figure 6. CO₂ Absorption (tons CO₂ e) by *Rhizophora apiculata*.

Gambar 6. Serapan CO₂ ton e *Rhizophora apiculata*.

3.4. Nilai Ekonomi Karbon *Rhizophora apiculata*

Nilai ekonomi karbon dari penyerapan karbon ekosistem mangrove eksisting di KKP Sawo-Lahewa dan perairan sekitarnya Kabupaten Nias Utara dengan nilai penyerapan 3687,78 ton CO₂ e dapat dilihat pada **Tabel 2**. Pendapatan pada tahun 2023 berdasarkan dari skenario program FCPF berkisar Rp 989.346.005,46 (**Tabel 2**). Jika pembayaran berbasis kinerja dengan skenario tarif biaya sosial pemerintah AS, maka nilai ekonomi karbon berkisar Rp 8.310.506.445,88, jika di perdagangan dilakukan di pasar dalam negeri dengan menggunakan harga berdasarkan UU HPP maka nilai ekonomi karbon yang diperoleh Rp 406.024.352,45. Metode transfer manfaat digunakan untuk mengukur nilai jasa karbon pada tahun 2043 berdasarkan nilai karbon tahun 2023. Tingkat inflasi didasarkan dalam 5 tahun dengan interval 3 sampai 5%, faktanya realisasi inflasi pada tahun 2016 hingga Juli 2023 (tidak termasuk tahun 2020 – 2021 untuk data pandemi akibat Covid-19) berkisar antara 2,06 hingga 5,95%. Jadi tingkat inflasi yang digunakan adalah 4% maka nilai ekonomi karbon pada tahun 2043 nanti memiliki proyeksi dari dari skenario program FCPF berkisar Rp 2.167.778.929,04. Jika pembayaran berbasis kinerja dengan skenario tarif biaya sosial pemerintah AS, maka nilai ekonomi karbon berkisar Rp 18.209.343.003,90. Sedangkan jika diperdagangkan dilakukan di pasar dalam negeri dengan menggunakan harga berdasarkan UU HPP maka nilai ekonomi karbon yang diperoleh Rp 889.649.355,28. Pendapatan nilai ekonomi karbon dipengaruhi oleh serapan karbon dalam suatu area (Siagian et al., 2024).

Tabel 2. Skenario nilai ekonomi karbon dari *R. apiculata*

Table 2. Carbon Economic Value Scenarios.

Scenario	Year 2023	Year 2043
FCPF	IDR 989,346,005.46	IDR 2,167,778,929.04
Social Return	IDR 8,310,506,445.88	IDR 18,209,343,003.90
Domestic Price	IDR 406,024,352.45	IDR 889,649,355.28

Peranan nilai ekonomi karbon ini dapat menjadi framework dalam pengelolaan pembayaran jasa ekosistem, pembayaran jasa ekosistem banyak telah diterapkan di beberapa negara yakni pada Taman Nasional Morocco dan Guatemala dengan inisiatif Program de Incentives Forestales (PINFOR) dan Program de Incentivos Forestales (PINPEP) yang berjalan untuk pengelolaan hutan 20 tahun ke depan (Ismaili Alaoui et al., 2022; Patrick et al., 2023). Indonesia sendiri telah memiliki pilot project dalam Forest Carbon Partnership Facility (FCPF) yang bekerja sama dengan Bank Dunia. FCPF adalah inisiatif yang dirancang untuk membantu negara-negara berkembang dalam mengurangi emisi berasal dari deforestasi dan degradasi hutan. FCPF menyediakan dukungan keuangan melalui Carbon Fund yakni dukungan pendanaan berbasis kinerja yang dimaksudkan sebagai pembayaran untuk pengurangan emisi dari lanskap hutan dengan pendekatan berbasis hasil (Walid Siagian et al., 2023).

4. Kesimpulan

Stok karbon pada mangrove *Rhizophora apiculata* dari nilai stok karbon bagian atas dan bagian bawah sebesar 3.687,78 ton/ha sehingga mampu menyerap CO₂ 13.534,15 ton CO₂ e. Nilai ekonomi dari karbon diperoleh pada tahun 2023 dari skenario program FCPF berkisar Rp989.346.005,46. Jika pembayaran berbasis kinerja dengan skenario tarif biaya sosial pemerintah AS, maka nilai ekonomi karbon berkisar Rp8.310.506.445,88. Sedangkan jika diperdagangkan dilakukan di pasar dalam negeri dengan menggunakan harga berdasarkan UU HPP maka nilai ekonomi karbon yang diperoleh Rp406.024.352,45. Apabila pengelola Kawasan Konservasi Perairan Sawo-Lahewa dan sekitar Kabupaten Nias Utara dapat menjaga hutan mangrove dan terkhusus *Rhizophora apiculata* pada tahun 2043 nanti memiliki proyeksi dari skenario program FCPF berkisar Rp2.167.778.929,04. Jika pembayaran berbasis kinerja dengan skenario tarif biaya sosial pemerintah AS, maka nilai ekonomi karbon berkisar Rp18.209.343.003,90. Sedangkan jika diperdagangkan dilakukan di pasar dalam negeri dengan menggunakan harga berdasarkan UU HPP maka nilai ekonomi karbon yang diperoleh Rp889.649.355,28.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian ini.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, selama proses penelitian dan penulisan artikel ini.

Daftar Pustaka

Adame, M. F., Cherian, S., Reef, R., & Stewart-Koster, B. (2017). Mangrove root biomass and the uncertainty of belowground carbon estimations. *Forest Ecology and Management*, 403, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.016>

- Adame, M. F., Connolly, R. M., Turschwell, M. P., Lovelock, C. E., Fatoyinbo, T., Lagomasino, D., Goldberg, L. A., Holdorf, J., Friess, D. A., Sasmito, S. D., et al. (2021). Future carbon emissions from global mangrove forest loss. *Global Change Biology*, 27(12), 2856–2866. <https://doi.org/10.1111/gcb.15571>
- Amelia, R., Basyuni, M., Alfinsyahri, A., Sulistiyono, N., Slamet, B., Bimantara, Y., Harahap, S. S. H., Harahap, M., Harahap, I. M., Al Mustaniroh, S. S., et al. (2023). Evaluation of plant growth and potential of carbon storage in the restored mangrove of an abandoned pond in Lubuk Kertang, North Sumatra, Indonesia. *Forests*, 14(1), Article 158. <https://doi.org/10.3390/f14010158>
- Basyuni, M., Harahap, F. K., Wati, R., & Putri, L. A. P. (2018). Effect of mangrove rehabilitation on socio-cultural of Pulau Sembilan society, North Sumatera, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 126, Article 012075). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/126/1/012075>
- Choudhary, B., Dhar, V., & Pawase, A. S. (2024). Blue carbon and the role of mangroves in carbon sequestration: Its mechanisms, estimation, human impacts and conservation strategies for economic incentives. *Journal of Sea Research*, 199, 102504. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102504>
- Desty Vambia, A., & Kuncoro, R. P. (2024). Urgensi penerapan pajak karbon di Indonesia dan perbandingannya dengan negara-negara di ASEAN. *Inovasi dan Kreativitas dalam Ekonomi*, 7(3), 40–52.
- Dewiyanti, I., Martunis, M., & Agustina, S. (2019). Estimation of mangrove biomass and carbon absorption of *Rhizophora apiculata* and *Rhizophora mucronata* in Banda Aceh, Aceh Province. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 348, Article 012097). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/348/1/012097>
- Easteria, G., Imran, Z., & Yulianto, G. (2022). Estimasi stok karbon mangrove rehabilitasi di Pulau Harapan dan Kelapa, Taman Nasional Kepulauan Seribu, Jakarta. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 14(2), 191–204.
- Ginoga, K., & Djaenudin, D. (2022). Peran standar instrumen ketahanan bencana dan perubahan iklim di era Net Sink Folu 2030 paska Undang-Undang Cipta Kerja. *STANDAR: Better...* (in press).
- Haryati, A., Fikriyya, N., & Prihatiningsih, I. (2024). Estimasi simpanan karbon organik pada ekosistem mangrove di Desa Mojo, Kecamatan Ulujami, Pemalang. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 16(1), 75–88. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v16i1.51920>
- Ismaili Alaoui, H., El Asri, B., Ghazi, S., Brhadda, N., & Ziri, R. (2022). A framework payment for ecosystem services to reconstitute forest areas closed to grazing in the Ifrane National Park (Morocco). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1090, Article 012002). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1090/1/012002>
- Isnaini, S., & Amin, B. (2020). Comparison of carbon reserves in mangrove *Sonneratia alba* and *Nypa fruticans* in Pangkalan Jambi Village, Bengkalis District Riau Province. *[Journal name not available]*, 1.
- Kauffman, J. B., Arifanti, V. B., Basuki, I., Kurnianto, S., Novita, N., Murdiyarso, D., Donato, D. C., & Warren, M. W. (2016). *Protocols for the measurement, monitoring, and reporting of structure, biomass, carbon stocks and greenhouse gas emissions in tropical peat swamp forests*. Center for International Forestry Research.
- Kaunang, T. D., & Kimbal, J. D. (2009). Komposisi dan struktur vegetasi hutan mangrove di Taman Nasional Bunaken Sulawesi Utara. *Jurnal Agritek*, 17(6), 139–148.
- Ketaren, D. G. K. (2023). Peranan kawasan mangrove dalam penurunan emisi gas rumah kaca di Indonesia. *Jurnal Kelautan dan Perikanan Terapan*, 1, 73–79.
- Komiyama, A., Pongparn, S., & Kato, S. (2005). Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4), 471–477.
- Ledheng, L., Naisumu, Y. G., & Binsasi, R. (2022). The estimation of biomass in *Rhizophora apiculata* and *Rhizophora mucronata* in Tuamese Village, North Central Timor Regency, East Nusa Tenggara Province. *Jurnal Sylva Lestari*, 10(1), 39–48. <https://doi.org/10.23960/jsl.v10i1.555>

- Lembang, R. K., Huliselan, S., & Adji, F. (2019). Pendugaan biomassa dan karbon tersimpan mangrove *Rhizophora apiculata* dan *Sonneratia alba* di Desa Simau. *Jurnal Hutan Pulau-Pulau Kecil*, 3(1), 68–72. <https://doi.org/10.30598/jhppk.2019.3.1.68>
- Mendrofa, S., Kurnia, R., & Pratiwi, N. T. M. (2018). Perubahan lahan dan strategi pengelolaan mangrove di Kecamatan Sawo, Kabupaten Nias Utara, Provinsi Sumatera Utara. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 9(2), 499–506. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v9i2.19286>
- Murdiyarso, D., & Ambo-Rappe, R. (2022). Rehabilitasi kawasan pesisir untuk mitigasi perubahan iklim: Peranan mangrove dan penurunan emisi tingkat sub-nasional. (*in press*).
- Muhtadi, A., Harahap, Z. A., Pulungan, A., Nurmatias, N., Lubis, P., Siregar, Z., Ompusunggu, R. Y., & Aulia, F. (2020). Status dan sebaran mangrove di kawasan konservasi Taman Pulau Kecil, Kabupaten Tapanuli Tengah, Provinsi Sumatera Utara. *Depik*, 9(2), 200–209.
- Nahib, I. (2011). Pemetaan valuasi ekonomi hutan mangrove berdasarkan GIS dan metode benefit transfer. *Majalah Ilmiah Globe*, 13(1), [pages missing].
- Patrick, E., Butsic, V., & Potts, M. D. (2023). Using payment for ecosystem services to meet national reforestation commitments: Impacts of 20+ years of forestry incentives in Guatemala. *Environmental Research Letters*, 18(10), Article 104027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acf602>
- Pearson, T., Walker, S., & Brown, S. (2013). *Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects*. World Bank.
- Quevedo, J. M. D., Uchiyama, Y., & Kohsaka, R. (2021). A blue carbon ecosystems qualitative assessment applying the DPSIR framework: Local perspective of global benefits and contributions. *Marine Policy*, 128, 104462. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104462>
- Rose, S. K., Diaz, D. B., & Blanford, G. J. (2017). Understanding the social cost of carbon: A model diagnostic and inter-comparison study. *Climate Change Economics*, 8(2), 1750009.
- Setiawan, H., & Mursidin, M. (2018). Ecological characteristic and health of mangrove forest at Tanakeke Island South Sulawesi. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 7(1), 47–58. <https://doi.org/10.18330/jwallacea.2018.vol7iss1pp47-58>
- Siagian, K., Karuniasa, M., & Mizuno, K. (2024). The estimation of economic valuation on carbon sequestration of agroforestry land system. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 14(2), 231–241.
- Suyarso, S., Prayudha, B., & Iswari, M. Y. (2018). Mangroves adaptation to changes of environment: Case study on Nias earthquake, North Sumatera, March 2005. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 3(2), 155–170. <https://doi.org/10.14203/oldi.2018.v3i2.136>
- Syafruddin, Y. S., Mahdi, & Yuerlita. (2018). Pendugaan cadangan karbon biru pada tingkat pohon di Desa Pulau Cawan dan Desa Bekawan Kecamatan Mandah Provinsi Riau. *Jurnal Spasial*, 5(2), 54–62.
- Walid Siagian, A., Syofiarti, & Rosari, A. (2023). Regulation on the utilization of carbon service as a forest protection effort in Indonesia. *The Journal of Indonesia Sustainable Development Planning*, 4(3), 299–317. <https://doi.org/10.46456/jisdep.v4i3.388>
- Wang, Y.-S., & Gu, J.-D. (2021). Ecological responses, adaptation and mechanisms of mangrove wetland ecosystem to global climate change and anthropogenic activities. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 162, 105248.
- Yana, A., Zulkarnaini, Z., & Warningsih, T. (2021). Nilai ekonomi potensi jasa lingkungan menyerap karbon di Taman Wisata Alam Buluh Cina Kabupaten Kampar Provinsi Riau. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 15(1), 32–44.