



Estimasi Stok Karbon Mangrove Berbasis NDVI di Desa Awanggoa, Kecamatan Bacan, Halmahera Selatan

(*NDVI-Based Mangrove Carbon Stock Estimation in Awanggoa Village, Bacan District, South Halmahera*)

Andili Hamidu, Ardan Samman*, Supyan, Nurhalis Wahidin, Disnawati, Raut Wahyuning Palufi, Muhammad Nur Findra

Program Studi Manajemen Sumber Daya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Khairun
*e-mail korespondensi : ardan@unkhair.ac.id

Diterima: 4 September 2025

Direvisi: 4 Juni 2026

Disetujui: 26 Juni 2006

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji kondisi ekosistem mangrove di Desa Awanggoa Kecamatan Bacan Kabupaten Halmahera Selatan dengan memanfaatkan citra Sentinel-2 melalui analisis indeks vegetasi NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Analisis dilakukan untuk mengestimasi biomassa (AGB dan BGB) total biomassa (TAB) stok karbon, serta sekuestrasi karbon mangrove secara spasial. Hasil klasifikasi NDVI menunjukkan 82,63% wilayah mangrove berada pada kategori vegetasi lebat 14,17% vegetasi sedang dan 3,21% vegetasi jarang. Total biomassa sebesar 11.425,93 ton sedangkan stok karbon mencapai 5.370,19 ton atau ekuivalen dengan 19.708,59 ton CO₂. Estimasi sekuestrasi karbon memperlihatkan sebagian besar kawasan memiliki kemampuan serapan tinggi meskipun terdapat area kecil yang menunjukkan emisi karbon akibat degradasi vegetasi. Temuan ini menegaskan bahwa mangrove di Desa Awanggoa berperan penting dalam mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan dan penyerapan karbon. Upaya konservasi rehabilitasi dan pengelolaan berkelanjutan sangat diperlukan dengan dukungan kebijakan berbasis data spasial, partisipasi masyarakat lokal, serta integrasi ke dalam program nasional seperti REDD.

Kata kunci: AGB, BGB, sekuestrasi, TAB, TSC

ABSTRACT

This study examines the condition of the mangrove ecosystem in Awanggoa Village, Bacan District, South Halmahera Regency, using Sentinel-2 imagery through NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) analysis. The analysis was conducted to estimate biomass (AGB and BGB), total biomass (TAB), carbon stock, and mangrove carbon sequestration spatially. The NDVI classification results show that 82.63% of the mangrove area is in the dense vegetation category, 14.17% in medium vegetation, and 3.21% in sparse vegetation. The total biomass is 11,425.93 tons, while the carbon stock reaches 5,370.19 tons or equivalent to 19,708.59 tons of CO₂. The carbon sequestration estimation results show that most areas have high absorption capacity, although there are a small number of areas that show carbon emissions due to vegetation degradation. These findings confirm that the mangrove ecosystem in Awanggoa Village plays an important role in mitigating climate change through carbon storage and sequestration. Therefore, conservation, rehabilitation, and sustainable management efforts are essential, supported by spatial data-based policies, local community participation, and integration into national programs such as REDD.

Keywords: AGB, BGB, Sequestration, TAB, TSC

PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove memiliki peran krusial dalam mitigasi perubahan iklim global karena kemampuannya dalam menyerap dan menyimpan karbon dalam jumlah besar sebuah proses yang dikenal sebagai sekuestrasi karbon karbon yang tersimpan dalam biomassa dan sedimen mangrove

ini dikenal sebagai karbon biru (Pendleton *et al.*, 2012; Sasmito *et al.*, 2020). Indonesia yang memiliki luasan mangrove terbesar di dunia ekosistem ini menghadapi ancaman serius seperti deforestasi dan degradasi akibat aktivitas manusia, kondisi ini tidak hanya mengurangi keanekaragaman hayati dan fungsi ekologisnya tetapi juga melepaskan karbon ke atmosfer sehingga mempercepat laju pemanasan global (Fitria & Dwiyanoto, 2021)

Dalam dua dekade terakhir, tekanan terhadap ekosistem mangrove semakin meningkat akibat konversi lahan menjadi permukiman maupun tambak (Hamilton & Casey, 2016; Richards & Friess, 2016). Dampak yang ditimbulkan tidak hanya berupa hilangnya fungsi mangrove sebagai benteng alami dari abrasi dan intrusi air laut (Cuenca-Ocay, 2024), tetapi juga berupa pelepasan stok karbon yang signifikan ke atmosfer (Donato *et al.*, 2011; Pendleton *et al.*, 2012; Sasmito *et al.*, 2020). Konsekuensi degradasi ini berimplikasi luas, baik ekologis maupun sosial-ekonomi, seperti menurunnya hasil tangkapan nelayan, meningkatnya risiko bencana pesisir, dan berkurangnya ketahanan masyarakat (Arifanti *et al.*, 2019; Cuenca-Ocay, 2024; Utami *et al.*, 2024)

Di tingkat lokal, degradasi mangrove dipicu oleh alih fungsi lahan menjadi permukiman serta penebangan kayu mangrove, terutama jenis *Rhizophora* dan *Bruguiera*, untuk kebutuhan bahan bakar rumah tangga (Cahyaningsih *et al.*, 2022; Maseta *et al.*, 2022; Numbere, 2019). Aktivitas ini mengakibatkan berkurangnya tutupan vegetasi, yang secara langsung menurunkan cadangan biomassa dan stok karbon yang tersimpan dalam ekosistem tersebut (Kauffman & Donato, 2012; Maseta *et al.*, 2022; Pendleton *et al.*, 2012).

Permasalahan semakin kompleks dengan rendahnya kesadaran masyarakat serta lemahnya regulasi perlindungan mangrove di tingkat lokal. Tanpa intervensi yang tepat, Desa Awanggoa berisiko kehilangan aset ekologis yang krusial dalam mitigasi perubahan iklim dan pengendalian bencana pesisir (Agusrinal *et al.*, 2015). Selain alih fungsi lahan, pemanfaatan kayu mangrove sebagai bahan bakar rumah tangga juga menjadi faktor penyumbang kerusakan, kebutuhan masyarakat terhadap sumber energi murah dan mudah diakses membuat pohon-pohon mangrove terutama dari jenis *Rhizophora* dan *Bruguiera* terus ditebang tanpa adanya upaya reboisasi yang seimbang praktik ini tidak hanya mengurangi stok biomassa dan karbon tetapi juga mengganggu fungsi ekologis mangrove sebagai habitat penting bagi biota pesisir seperti ikan kepiting dan burung air (Amaral *et al.*, 2025; Nyein *et al.*, 2025).

Dengan demikian, tantangan utama yang dihadapi Desa Awanggoa mencakup aspek ekologis, sosial, dan ekonomi. Degradasi mangrove secara langsung menurunkan kemampuan kawasan dalam menyerap karbon, meningkatkan risiko bencana pesisir, serta melemahkan kesejahteraan masyarakat lokal (Utami *et al.*, 2024). Melalui pemanfaatan citra Sentinel-2, kondisi NDVI, biomassa, stok karbon, dan sekuestrasi karbon dapat dipantau secara akurat dan efisien (Huda *et al.*, 2024).

Tantangan besar bagi keberlanjutan lingkungan di Desa Awanggoa dampaknya tidak hanya dirasakan secara ekologis tetapi juga secara sosial dan ekonomi hilangnya ekosistem mangrove menyebabkan berkurangnya hasil tangkapan nelayan meningkatnya risiko banjir rob dan berkurangnya kemampuan wilayah pesisir dalam menyerap karbon dioksida dari atmosfer dengan kata lain degradasi ekosistem mangrove berdampak langsung pada ketahanan lingkungan dan penghidupan masyarakat setempat. Langkah-langkah strategis seperti penguatan kelembagaan lokal penyusunan aturan perlindungan mangrove dan pengembangan energi ramah lingkungan perlu segera diimplementasikan untuk mengatasi permasalahan ini (Cono *et al.*, 2026; Gunawan *et al.*, 2025).

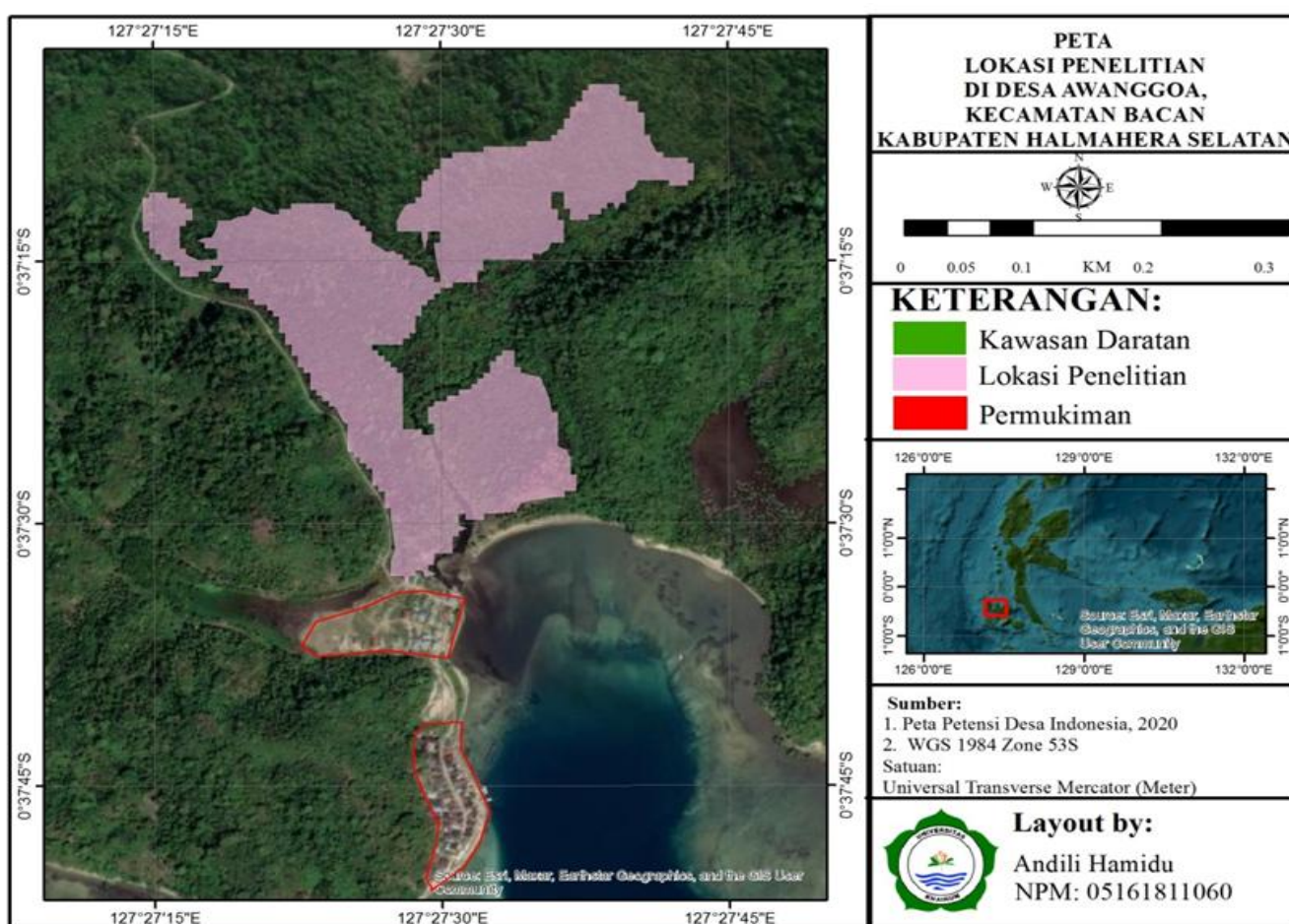
Pemanfaatan citra satelit Sentinel-2 akan memberikan estimasi yang akurat dan efisien mengenai kondisi NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Huda *et al.*, 2024) biomassa stok karbon dan laju sekuestrasi karbon data yang dihasilkan tidak hanya akan menambah khazanah

ilmu pengetahuan terkait aplikasi penginderaan jauh untuk ekosistem mangrove tetapi juga menjadi dasar yang kuat bagi pemerintah daerah dalam merumuskan kebijakan pengelolaan dan konservasi yang efektif. Lebih jauh lagi hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat lokal mengenai pentingnya ekosistem mangrove sebagai aset vital untuk mitigasi perubahan iklim dan penyedia jasa lingkungan lainnya yang pada akhirnya akan mendukung keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan di Desa Awanggoa.

METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

Pelaksanaan penelitian mencakup rentang bulan Januari hingga Desember 2024 di Desa Awanggoa, Kecamatan Bacan Halmahera Selatan dengan menggunakan citra sentinel 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup perangkat keras seperti Laptop HP intel inside untuk mengolah seluruh data yang digunakan dalam penelitian selanjutnya Google Earth Engine (GEE) sebagai sumber data citra Sentinel 2, penggunaan Algoritma (Script) data Citra Satelit Sentinel-2 sebagai bahan untuk digitasi tutupan NDVI ekosistem mangrove selanjutnya Software ArcGis10.8 untuk pengolahan data citra NDVI serta Excel untuk mengolah data hasil.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode yang memanfaatkan teknologi citra satelit Sentinel-2,

dengan data NDVI mangrove tahun 2024 diperoleh melalui *Google Earth Engine*. Tahapan selanjutnya mencakup analisis lanjutan, termasuk proses reklasifikasi dan kueri NDVI, serta analisis biomassa yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcGIS.

Analisis Data

Analisis NDVI dilakukan secara pasif menggunakan formulasi :

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Dimana nilai *Near-Infrared* (band 8) dan nilai *Red* (band 4) diperoleh dari band spektral di citra satelit Sentinel-2a. Formula ini digunakan untuk menghitung indeks vegetasi yang mencerminkan tingkat kehijauan dan kesehatan vegetasi mangrove di lokasi penelitian.

Rentang nilai NDVI diklasifikasikan berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan oleh Ramadhan dan Suwadji (2024) yaitu, kategori Sangat Jarang (NDVI -0,03-0,150 kategori Jarang (0,16-0,25), kategori Sedang (0,26-0,35), dan kategori Rapat (NDVI 0,36-1.).

Estimasi biomassa di atas permukaan tanah (AGB) dilakukan secara pasif dengan menggunakan pendekatan NDVI melalui persamaan korelasi yang dikembangkan oleh (Jha & Fararoda, 2015). Dalam penelitiannya ditemukan nilai korelasi sebesar 0,787 untuk AGB mangrove yang menunjukkan adanya hubungan yang cukup kuat antara NDVI dengan biomassa di atas permukaan tanah. Formulasi yang digunakan untuk mengestimasi AGB adalah :

$$AGB = 305 * NDVI^{4.864}$$

Dimana NDVI adalah nilai Indeks Vegetasi sedangkan AGB adalah nilai Biomassa di Atas Permukaan Tanah (ton/ha).

Estimasi biomassa di bawah permukaan tanah (BGB) dilakukan secara tidak langsung dan diperoleh dari hasil estimasi biomassa di atas permukaan tanah (AGB) yang telah dihitung sebelumnya. Nilai BGB ini kemudian diformulasikan menggunakan persamaan empiris yang telah disusun oleh (Cairns *et al.*, 1997) sebagai berikut :

$$BGB = \exp(-1.0587 + 0.886 * \ln(AGB))$$

Dimana AGB adalah nilai Biomassa di Atas Permukaan Tanah (ton/ha) sedangkan BGB adalah nilai Biomassa di Bawah Permukaan Tanah (ton/ha).

Estimasi total biomassa (*Total Above Biomass /TAB*) diterapkan dengan cara menjumlahkan biomassa di atas permukaan tanah (*Above Ground Biomass/AGB*) dan biomassa di bawah permukaan tanah (*Below Ground Biomass/BGB*). Pendekatan ini digunakan untuk memberikan estimasi menyeluruh terhadap total massa organik yang tersimpan dalam suatu ekosistem vegetasi mangrove. Dalam pelaksanaannya, nilai AGB diperoleh melalui estimasi berbasis indeks vegetasi NDVI, sedangkan nilai BGB dihitung secara tidak langsung menggunakan rasio konversi yang diturunkan dari AGB, berdasarkan persamaan empiris yang telah dirumuskan oleh (Cairns *et al.*, 1997). Total biomassa di estimasi berdasarkan rumus :

$$TAB = AGB + BGB$$

Dimana TAB adalah Total Biomassa (ton/ha) sedangkan AGB adalah Biomassa di Atas Permukaan Tanah dan BGB adalah Biomassa di Bawah Permukaan Tanah.

Klasifikasi biomassa dilakukan secara pasif dengan mengelompokkan nilai total biomassa (gabungan biomassa di atas permukaan tanah/AGB dan di bawah permukaan tanah/BGB) ke dalam kelas-kelas berdasarkan rentang nilai ton per hektar (ton/ha) yaitu, (BGB Sangat Rendah < 10 menunjukkan zona terdegradasi atau vegetasi tidak stabil), (BGB Rendah 11-25 menunjukkan biomassa akar rendah, pertumbuhan terbatas), (BGB Sedang 26-50 menunjukkan pertumbuhan

sedang, mangrove dalam kondisi membaik), (BGB Tinggi 51-75 menunjukkan vegetasi sehat, sistem akar berkembang baik) dan (BGB Sangat Tinggi >75 menunjukkan ekosistem mangrove primer atau tidak terganggu). Rentang nilai ini disusun berdasarkan referensi dari penelitian empiris dan metodologi pengukuran karbon hutan mangrove (Kauffman & Donato, 2012).

Estimasi Total Stok Karbon (TSC) pada ekosistem mangrove dilakukan secara pasif dengan mengalikan nilai total biomassa (*Total Above Biomass/TAB*) dengan faktor konversi karbon atau carbon fraction. Dalam penelitian ini, faktor 0,47 digunakan sebagai pendekatan standar untuk mengkonversi biomassa kering menjadi kandungan karbon, sebagaimana direkomendasikan oleh (Westlake, 1963). Rumus umum yang digunakan untuk menghitung stok karbon adalah :

$$TSC = TAB \times 0,47$$

Dimana TSC adalah Total Stok Karbon, TAB adalah Total Biomassa sedangkan 0,47 adalah konstanta.

Klasifikasi stok karbon dilakukan secara pasif dengan mengelompokkan nilai total stok karbon (TSC) ke dalam kategori berdasarkan rentang nilai ton karbon per hektar (ton C/ha) yaitu, (Stok Karbon Sangat Rendah <4.7 menunjukkan zona rusak atau akumulasi karbon rendah), (Stok Karbon Rendah 4.7-11.75 menunjukkan cadangan karbon terbatas), (Stok Karbon Sedang 12.22-23.5 cadangan karbon menengah), (Stok Karbon Tinggi 23.97-35.25 cadangan karbon sehat, ekosistem stabil) dan (Stok Karbon Sangat Tinggi >35.25 cadangan karbon sangat tinggi, ekosistem sangat sehat). Rentang nilai klasifikasi didasarkan pada pendekatan empirik yang disesuaikan dengan kondisi vegetasi mangrove (Kauffman & Donato, 2012).

Estimasi karbon sekuestrasi pada ekosistem mangrove dilakukan secara pasif dengan menghitung laju penyerapan karbon tahunan berdasarkan nilai total stok karbon (TSC) yang telah diestimasi sebelumnya dengan faktor 3,67. Nilai konversi ini didasarkan pada perbandingan massa molekul antara karbon (C = 12 g/mol) dan karbon dioksida (CO₂ = 44 g/mol), sehingga satu ton karbon setara dengan 3,67 ton CO₂. Metode ini digunakan untuk menggambarkan potensi penyerapan atau pelepasan karbon dalam satuan yang lebih relevan secara global terhadap pengendalian emisi gas rumah kaca yang direkomendasikan oleh (IPCC, 2006). Rumus dasar untuk konversi ini adalah :

$$\text{Sekuestrasi CO}_2 = \text{Stok Karbon} \times 3,67$$

Dimana Stok karbon adalah jumlah karbon yang tersimpan dalam biomassa, biasanya dinyatakan dalam ton karbon per hektar (tC/ha) sedangkan 3,67 adalah konversi karbon.

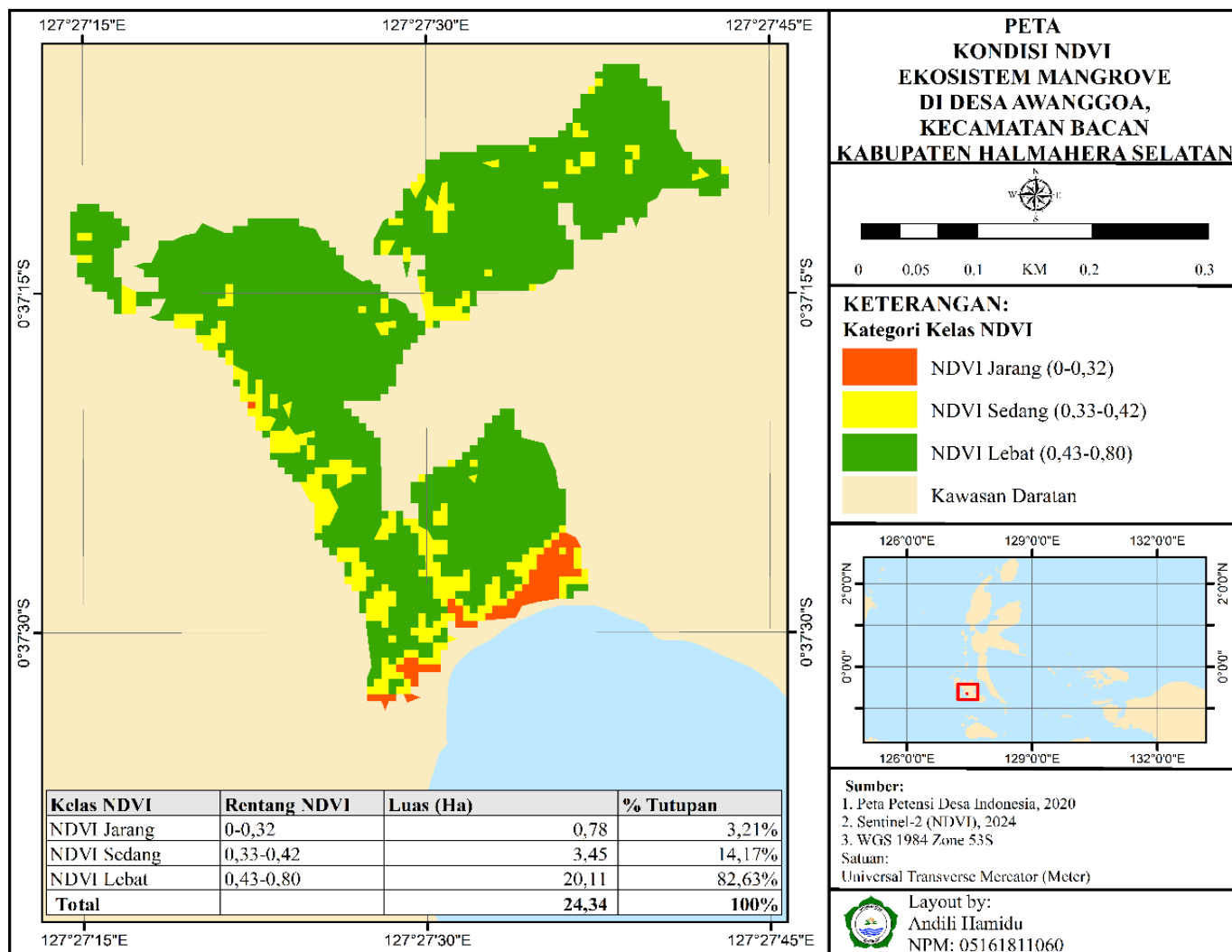
Klasifikasi sekuestrasi karbon dilakukan secara pasif dengan mengelompokkan hasil estimasi laju penyerapan karbon tahunan ke dalam kelas-kelas tertentu berdasarkan rentang nilai yang telah ditetapkan yaitu (Emisi Tinggi <-15 menandakan kehilangan karbon parah deforestasi besar / konversi lahan), (Emisi Sedang -14 sampai -5, degradasi vegetasi sedang), (Emisi Rendah -4 s/d 0, degradasi ringan atau stagnasi) dan (Netral/Stabil 0, tidak ada perubahan stok karbon) sedangkan (Serapan Rendah 0-5 menunjukkan rehabilitasi awal atau regenerasi lambat), (Serapan Sedang 5-15, pemulihan vegetasi sedang) dan (Serapan Tinggi >15, penyerapan karbon kuat restorasi berhasil/pertumbuhan cepat). Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi zona-zona prioritas dalam pengelolaan karbon berbasis ekosistem mangrove secara spasial dan terarah (Kauffman & Donato, 2012).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Vegetasi Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa

Hasil kondisi vegetasi ekosistem mangrove di Desa Awanggoa Kecamatan Bacan Kabupaten

Halmahera Selatan menunjukkan bahwa sebagian besar kawasan mangrove berada dalam kondisi sehat dengan kategori NDVI lebat (0,43-0,80) mencakup luas 20,11 hektar atau 82,63% dari total area 24,34 hektar. Sementara itu vegetasi dengan kerapatan sedang (NDVI 0,33-0,42) meliputi 3,45 hektar atau 14,17% dan hanya 0,78 hektar atau 3,21% yang tergolong dalam kategori jarang yaitu (NDVI 0-0,32). Temuan ini mengindikasikan bahwa ekosistem mangrove di wilayah tersebut secara umum berada dalam kondisi yang baik. Hasil selanjutnya dapat di lihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta Kondisi NDVI Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa Kecamatan Bacan Kabupaten Halmahera Selatan

Menurut Samman *et al.* (2025) dan Marasaoly *et al.* (2025), kategori NDVI lebat (0,35-1) mendominasi area mangrove seluas 5,37 hektar atau 44% dari total luas 12,12 hektar sementara kategori NDVI sangat rendah (0,03-0,15) hanya mencakup 1,97 hektar (16%) temuan ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi nilai NDVI semakin sehat kondisi vegetasi mangrove NDVI terbukti menjadi indikator yang efektif dalam mencerminkan tingkat kehijauan dan kerapatan vegetasi yang memiliki hubungan erat dengan jumlah biomassa sehingga sangat relevan digunakan untuk pemantauan dan pengelolaan ekosistem mangrove secara berkelanjutan. NDVI merupakan metode yang andal dalam menilai kerapatan dan kondisi ekosistem mangrove secara spasial (Kapitan *et al.*, 2025). NDVI terbukti menjadi alat yang efektif dalam mendeteksi penurunan kesehatan vegetasi mangrove sehingga berfungsi sebagai indikator kunci dalam pemantauan

ekologis penyusunan kebijakan konservasi dan pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan. Hasil klasifikasi menggunakan NDVI menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dengan nilai akurasi keseluruhan sebesar 94,37% temuan ini mengonfirmasi bahwa NDVI sangat andal untuk mengevaluasi kerapatan vegetasi mangrove secara spasial dan temporal serta relevan dijadikan dasar ilmiah (Fadillah, 2025).

Kondisi Biomassa Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa

Ekosistem mangrove di Desa Awanggoa pada pola distribusi biomassa tiap kelas kerapatan vegetasi diidentifikasi di mana kategori NDVI lebat mendominasi. Pada kategori ini dengan luas 20,11 hektar tercatat *above ground biomass* (AGB) sebesar 9.529,63 ton/ha dan *below ground biomass* (BGB) sebesar 1.236,04 ton/ha keduanya digabungkan. total *above* di tambah *below biomass* (TAB) mencapai 10.765,67 ton nilai ini menunjukkan bahwa ekosistem mangrove dengan NDVI tinggi berkontribusi besar terhadap penyimpanan biomassa dan potensi stok karbon.

Tingginya nilai AGB dan BGB pada kategori ini menunjukan kondisi vegetasi yang rapat dan sehat di mana pohon-pohon memiliki ukuran besar batang kokoh dan sistem perakaran yang kuat. Pada kategori NDVI sedang dengan luas 3,45 hektar AGB tercatat sebesar 559,58 ton/ha dan BGB sebesar 151,67 ton/ha sehingga total biomassa (TAB) mencapai 711,25 ton. Nilai biomassa yang jauh lebih rendah dibanding kategori lebat menunjukkan bahwa kerapatan vegetasi dan ukuran pohon di wilayah ini lebih kecil atau belum sepenuhnya berkembang faktor memengaruhi kondisi ini meliputi perbedaan umur tegakan regenerasi alami yang masih berlangsung atau gangguan lingkungan seperti sedimentasi dan pasang surut yang lebih intens.

Sementara itu kategori NDVI jarang dengan luas 0,78 hektar menunjukkan hasil yang menarik sekaligus mengkhawatirkan AGB hanya 4,43 ton/ha sedangkan BGB memiliki nilai negatif sebesar -55,41 ton/ha menghasilkan TAB negatif -50,98 ton nilai negatif pada BGB dan TAB dapat diinterpretasikan sebagai indikasi perhitungan model atau faktor input data yang menunjukkan degradasi berat atau kehilangan biomassa di bawah permukaan tanah kondisi ini sering terjadi akibat kerusakan sistem perakaran kematian pohon atau konversi lahan mangrove menjadi lahan terbuka.

Secara keseluruhan data memperkuat temuan sebelumnya bahwa mangrove dengan kerapatan tinggi (NDVI lebat) berperan sangat dominan dalam penyimpanan biomassa hal ini menegaskan pentingnya upaya pelestarian dan perlindungan kawasan dengan NDVI lebat sembari memprioritaskan rehabilitasi pada area dengan NDVI sedang dan jarang. Selain mendukung keanekaragaman hayati peningkatan kerapatan vegetasi mangrove juga akan berdampak langsung pada kapasitas penyerapan karbon yang berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim. Secara keseluruhan hasil analisis biomassa ekosistem mangrove dapat di lihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Distribusi Biomassa di Atas dan Bawah Permukaan Tanah Berdasarkan Kelas NDVI Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa

Kelas NDVI	Luas (Ha)	AGB (Ton/Ha)	BGB (Ton/Ha)	TAB (Ton)
NDVI Jarang	0,78	4,43	-55,41	-50,98
NDVI Sedang	3,45	559,58	151,67	711,25
NDVI Lebat	20,11	9.529,63	1.236,04	10.765,67
Total	24,34	10.093,64	1.332,29	11.425,93

Kondisi dan peran ekosistem mangrove di Desa Awanggoa dengan analisis biomassa menjadi salah satu indikator penting yang digunakan untuk mengevaluasi kesehatan serta potensi penyimpanan karbon dari vegetasi mangrove. Biomassa yang meliputi biomassa di atas permukaan

tanah (*above ground biomass* atau AGB) dan di bawah permukaan tanah (*below ground biomass* atau BGB). Memberikan gambaran tentang ukuran kerapatan dan kekuatan vegetasi mangrove di area tersebut. Pengukuran biomassa berdasarkan kategori kerapatan vegetasi menggunakan indeks vegetasi diferensial yang dinilai melalui NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

Biomassa mangrove merupakan elemen penting yang memengaruhi keberlanjutan ekosistem pesisir di masa depan. Namun laju erosi yang tinggi dapat mengurangi margin mangrove di sisi laut menyebabkan kekeringan dan degradasi ekosistem ini. Kondisi tersebut berdampak negatif pada fungsi ekologis pesisir secara keseluruhan (Samman *et al.*, 2025)

Pemetaan dan penilaian kondisi mangrove secara lebih rinci Kategori NDVI yang berbeda mencerminkan variasi kondisi ekologis mulai dari vegetasi yang jarang hingga sangat lebat. Temuan terkait distribusi biomassa pada masing-masing kategori NDVI di Desa Awanggoa serta implikasinya terhadap kondisi ekosistem mangrove dan fungsi ekologisnya termasuk kontribusinya terhadap penyerapan karbon dan mitigasi perubahan iklim.

Klasifikasi Biomas

Analisis klasifikasi biomassa ekosistem mangrove menunjukkan total luasan 24,34 ha dengan total akumulasi TAB sebesar 11.425,93 ton. Distribusi biomassa terbagi menjadi tiga kelas utama berdasarkan nilai satuan ton per hektar (ton/ha) yaitu biomassa sangat rendah (<10 ton/ha) biomassa rendah (11-25 ton/ha) dan biomassa sangat tinggi (>75 ton/ha).

Kelas biomassa sangat rendah mencakup 8,05 ha atau 16,14% dari total luas dengan total biomassa 1.844,06 ton. Kategori ini merepresentasikan area mangrove dengan kerapatan vegetasi rendah disebabkan oleh regenerasi alami pada area bekas gangguan antropogenik atau kondisi lingkungan yang kurang optimal bagi pertumbuhan.

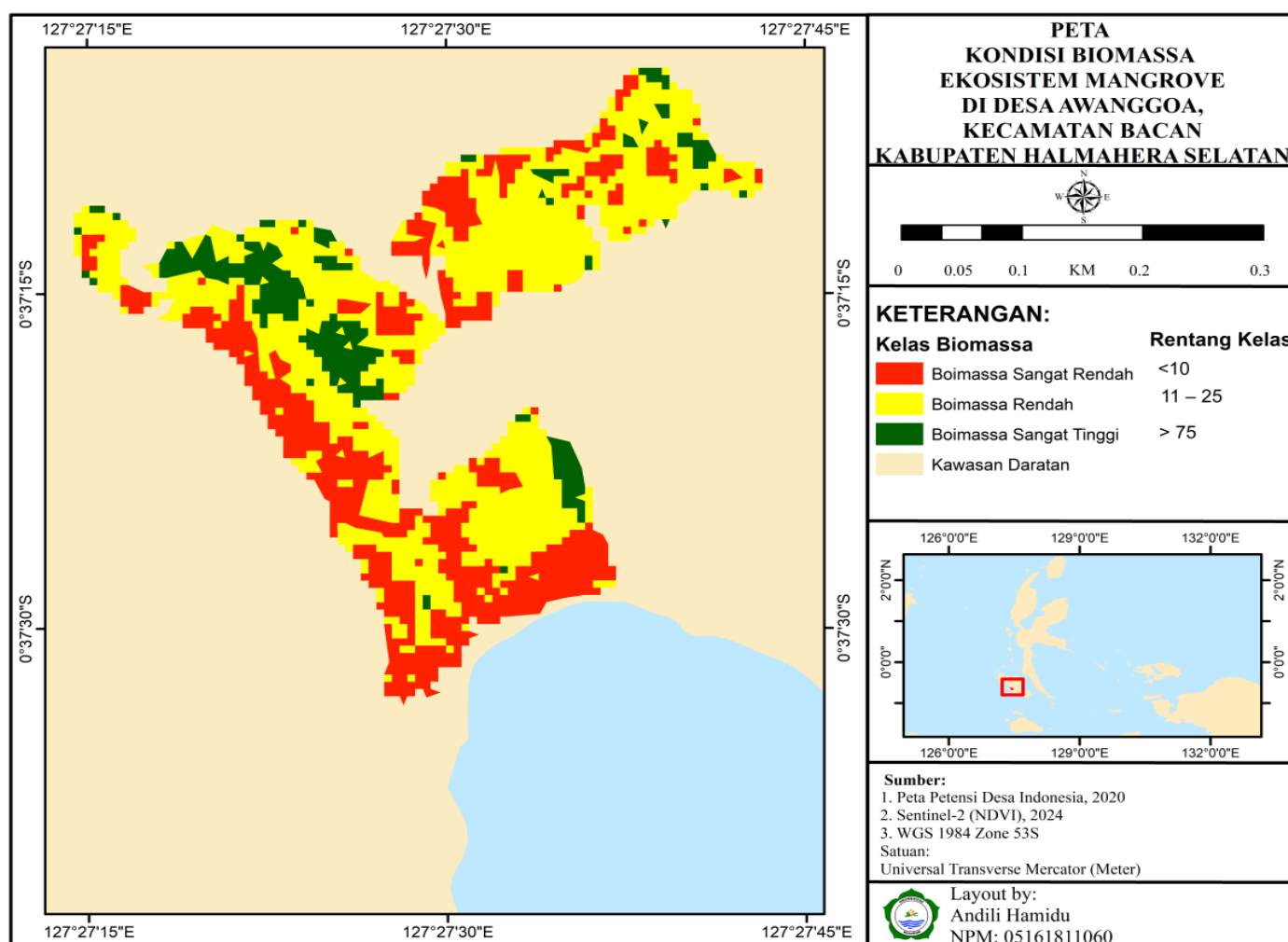
Kelas biomassa rendah mendominasi luasan kawasan yakni 13,60 ha atau (54,85%) dengan total biomassa 6.267,58 ton. Dominasi kelas ini mengindikasikan bahwa sebagian besar tegakan mangrove berada pada fase pertumbuhan menengah dengan diameter batang dan kerapatan tajuk yang belum mencapai kondisi maksimal faktor lingkungan seperti pasang surut salinitas dan suplai nutrisi menjadi penentu laju akumulasi biomassa pada kategori ini. Kelas biomassa sangat tinggi meskipun hanya mencakup 2,69 ha (29,01%). Memberikan kontribusi biomassa sebesar 3.314,28 ton.

Nilai biomassa yang tinggi pada luasan terbatas ini mencerminkan keberadaan tegakan mangrove dewasa dengan kerapatan tinggi dan diameter batang besar yang berperan signifikan dalam fungsi ekosistem seperti penyimpanan karbon, penahan abrasi dan habitat biodiversitas. Temuan ini mengindikasikan adanya penurunan kapasitas penyimpanan biomassa yang erat kaitannya dengan aktivitas degradasi dan deforestasi seperti konversi lahan mangrove menjadi permukiman serta penebangan pohon untuk kebutuhan bahan bakar sebagai pengganti minyak tanah. Tekanan ini menyebabkan terganggunya struktur dan fungsi ekosistem mangrove menurunkan kemampuan alami kawasan untuk menyimpan karbon dan menjaga keseimbangan lingkungan pesisir.

Klasifikasi biomassa pada ekosistem mangrove di Desa Awanggoa dilakukan berdasarkan rentang nilai biomassa per hektar. Klasifikasi ini bertujuan untuk menggambarkan distribusi biomassa dalam berbagai kategori mulai dari sangat rendah hingga sangat tinggi sehingga memudahkan pemahaman tentang tingkat kepadatan vegetasi dan potensi penyimpanan karbon di kawasan tersebut. Hasil klasifikasi dan peta klasifikasi dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 3.

Tabel 2. Klasifikasi Biomassa Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa Kecamatan Bacan Kabupaten Halmahera Selatan

Kelas Biomassa	Rentang Nilai (ton/ha)	Luas (Ha)	TAB(TON)	Persen Biomassa
Boimassa Sangat Rendah	< 10	8,05	1.844,06	16,14%
Boimassa Rendah	11 – 25	13,60	6.267,58	54,85%
Boimassa Sangat Tinggi	> 75	2,69	3.314,28	29,01%
Total		24,34	11.425,93	100%



Gambar 3. Peta klasifikasi Biomassa Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa Kecamatan Bacan Kabupaten Halmahera Selatan

Biomassa ekosistem mangrove ini memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan pesisir dan mendukung upaya mitigasi perubahan iklim (Utami *et al.*, 2025). Sebagai penyimpan karbon alami mangrove mampu menyerap dan menyimpan karbon dalam jumlah besar baik di atas permukaan tanah pada batang daun dan cabang maupun di bawah tanah pada akar dan sedimen sehingga membantu mengurangi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer (Seran *et al.*, 2025). Selain itu biomassa mangrove mencerminkan produktivitas dan kesehatan ekosistem secara keseluruhan yang juga berfungsi sebagai habitat penting bagi berbagai spesies laut dan darat penahan abrasi pantai (Cono *et al.*, 2026).

Stok Karbon Tersimpan Ekosistem Mangrove Di Desa Awanggoa

Total stok karbon ekosistem mangrove di Desa Awanggoa mencapai 5.370,19 ton C. Sebagian besar tersimpan pada kategori NDVI lebat dengan luas 20,11 ha dan cadangan karbon sebesar 5.059,86 ton C (94,22%), yang mencerminkan kondisi vegetasi rapat, sehat, dan berbiomassa tinggi. Kategori NDVI sedang seluas 3,45 ha menyimpan 334,29 ton C (6,22%), yang meskipun relatif kecil, tetap berperan dalam mendukung kapasitas serapan karbon serta memiliki potensi peningkatan melalui rehabilitasi. Sebaliknya, kategori NDVI jarang seluas 0,78 ha menunjukkan stok karbon negatif -23,96 ton C (-0,45%), mengindikasikan pelepasan karbon ke atmosfer akibat degradasi ekosistem. Temuan ini menegaskan bahwa kawasan mangrove dengan kerapatan tinggi berfungsi sebagai penyerap karbon utama, sementara area jarang memerlukan perhatian khusus untuk pemulihan guna mencegah kehilangan karbon lebih lanjut dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kondisi Stok Karbon Tersimpan pada Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa Kecamatan Bacan Kabupaten Halmahera Selatan

Kelas NDVI	Luas (Ha)	TSC (Ton C/Ha)	Pesen TSC/Luasan
NDVI Jarang	0,78	-23,96	-0,45%
NDVI Sedang	3,45	334,29	6,22%
NDVI Lebat	20,11	5.059,86	94,22%
Total	24.34	5.370,19	100%

Ekosistem mangrove merupakan salah satu penyimpan karbon penting di lingkungan pesisir yang turut berkontribusi dalam mitigasi perubahan iklim global. Karbon tersimpan dalam biomassa mangrove tidak hanya terdapat pada bagian tanaman di atas permukaan, seperti batang, ranting, dan daun, tetapi juga tersembunyi dalam jaringan akar dan sedimen bawah permukaan tanah. Besarnya stok karbon yang tersimpan menjadi indikator kesehatan dan fungsi ekologis mangrove dalam menjaga keseimbangan lingkungan.

Analisis ini tidak hanya penting bagi upaya konservasi lokal tetapi juga untuk memberikan gambaran kontribusi ekosistem mangrove dalam skala yang lebih luas terkait pengurangan emisi gas rumah kaca secara keseluruhan hasil analisis stok karbon tersimpan ekosistem mangrove di Desa Awanggoa. (Albasit *et al.*, 2022) dalam penelitiannya di Desa Kaliwlingi, brebes menemukan bahwa stok karbon mangrove pasca rehabilitasi menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh kondisi vegetasi dan umur tegakan kerusakan vegetasi dan degradasi dapat menyebabkan pelepasan karbon ke atmosfer, sehingga nilai stok karbon bisa rendah bahkan negatif secara estimasi model.

Penelitian di Teluk Maumere bagian barat juga menunjukkan korelasi kuat antara indeks NDVI dengan stok karbon permukaan mangrove namun, area dengan vegetasi yang jarang atau mengalami degradasi akan menunjukkan penurunan fungsi penyimpanan karbon yang signifikan, yang dapat menyebabkan pelepasan karbon ke atmosfer dan mempercepat perubahan iklim (Marzuki *et al.*, 2024).

Klasifikasi Karbon Tersimpan

Hasil analisis stok karbon mangrove di Desa Awanggoa Kecamatan Bacan Kabupaten Halmahera Selatan menunjukkan adanya variasi cadangan karbon pada setiap kelas. Pada kategori stok karbon sangat rendah (< 4,7 ton C/ha), luas area mangrove yang termasuk dalam kelas ini mencapai 8,05 ha dengan total cadangan karbon sebesar 866,71 ton atau sekitar 16,14% dari total keseluruhan. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian kawasan mangrove memiliki kemampuan penyimpanan karbon yang relatif kecil. Faktor yang memengaruhi rendahnya cadangan karbon pada kelas ini dapat disebabkan oleh kondisi vegetasi yang jarang, regenerasi yang masih muda, serta tekanan lingkungan seperti alih fungsi lahan maupun aktivitas masyarakat sekitar.

Kelas stok karbon rendah (4,7-11,75 ton C/ha) mendominasi kawasan penelitian dengan luasan 13,60 ha dan menyimpan karbon sebesar 2.945,76 ton atau sekitar 54,85% dari total stok karbon. Dominasi kelas ini menggambarkan bahwa sebagian besar mangrove di lokasi penelitian berada pada kategori cadangan karbon rendah. Hal ini berhubungan dengan kondisi struktur tegakan mangrove yang belum maksimal dalam menyerap dan menyimpan karbon, baik pada biomassa di atas permukaan (AGB) maupun bawah permukaan (BGB). Dengan demikian, kelas ini memiliki potensi yang besar untuk ditingkatkan melalui upaya rehabilitasi dan perlindungan mangrove agar fungsi penyimpanan karbonnya semakin optimal.

Sementara itu, pada kategori stok karbon sangat tinggi (> 35,25 ton C/ha), meskipun hanya mencakup luasan yang relatif kecil yaitu 2,69 ha, namun mampu menyimpan karbon sebesar 1.557,71 ton atau sekitar 29,01% dari total keseluruhan. Besarnya kontribusi pada kelas ini mengindikasikan bahwa terdapat area mangrove dengan kondisi vegetasi yang rapat, berdiameter besar, dan berumur tua sehingga memiliki kemampuan menyimpan karbon yang tinggi. Keberadaan kelas ini menjadi sangat penting karena meskipun luasannya kecil, perannya dalam mendukung cadangan karbon total kawasan cukup signifikan.

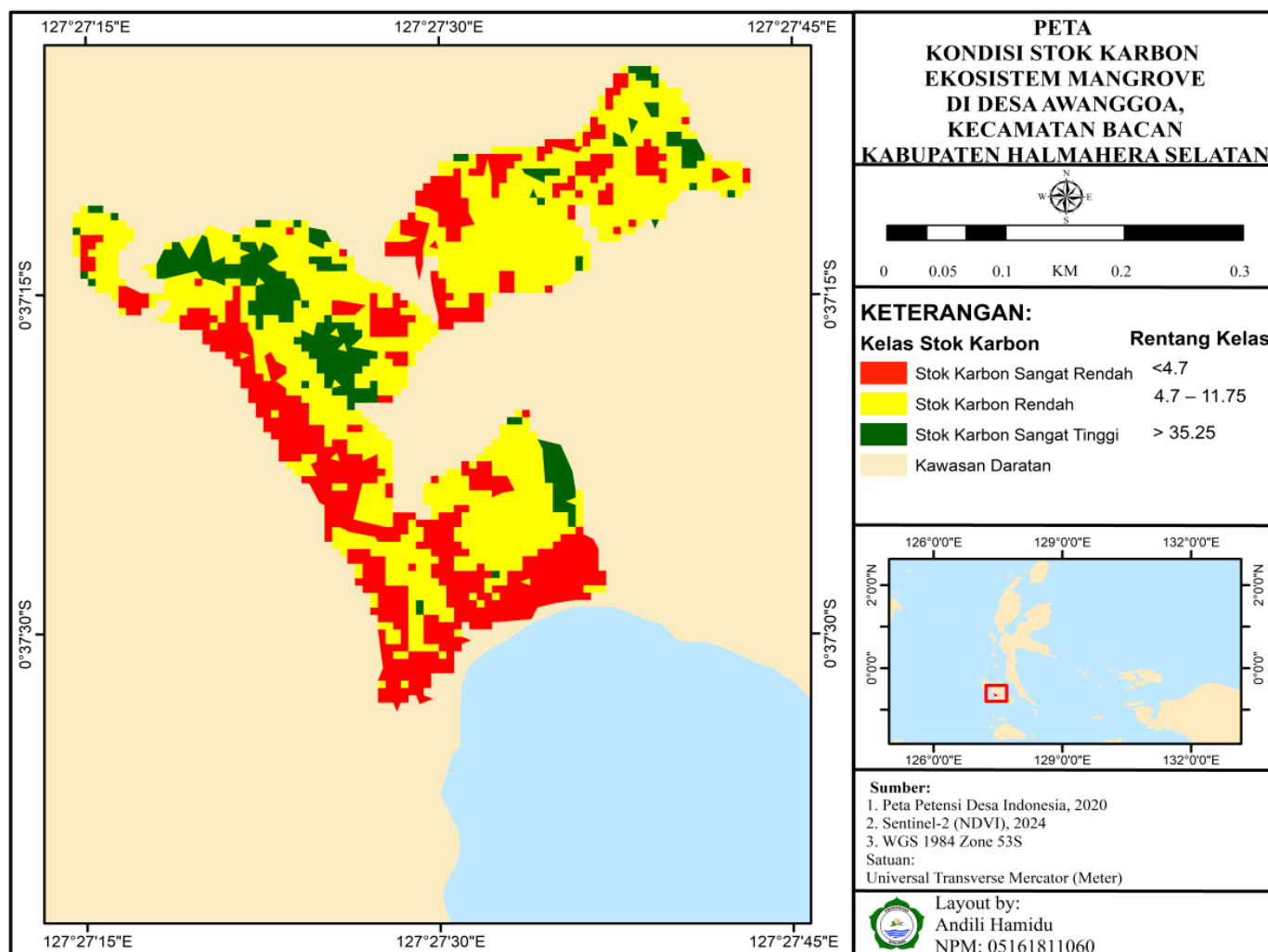
Secara keseluruhan, dari total luasan 24,34 ha, ekosistem mangrove di Desa Awanggoa mampu menyimpan stok karbon sebesar 5.370,19 ton. Distribusi stok karbon tersebut menunjukkan bahwa ekosistem mangrove memiliki peran penting dalam mitigasi perubahan iklim

Sementara itu, kelas biomassa sangat tinggi (> 75 ton/ha) hanya mencakup 2,69 ha, namun mampu menyimpan 3.314,28 ton (29,01%) dari total biomassa. Meskipun luasannya kecil, kontribusinya sangat besar karena terkait dengan tegakan mangrove dewasa yang rapat dan berdiameter besar, sehingga berfungsi sebagai cadangan karbon alami yang signifikan.

Dominasi kelas biomassa rendah hingga menengah menegaskan bahwa sebagian besar vegetasi mangrove di wilayah ini masih dalam fase regenerasi, dengan kerapatan dan ukuran pohon yang belum optimal. Kondisi ini mengindikasikan potensi peningkatan kapasitas penyimpanan karbon melalui rehabilitasi dan pemulihan ekosistem. Sebaliknya, keberadaan kelas biomassa sangat rendah menunjukkan adanya area dengan gangguan ekologis atau lahan yang baru mengalami regenerasi, sehingga memerlukan intervensi pengelolaan. Dengan demikian, strategi pengelolaan mangrove harus berfokus tidak hanya pada perlindungan kawasan berbiomassa tinggi, tetapi juga pada peningkatan kualitas vegetasi di kawasan berbiomassa rendah hingga menengah, guna memperkuat peran mangrove sebagai penyerap karbon sekaligus menjaga keberlanjutan fungsi ekologis pesisir. klasifikasi stok karbon tersimpan di ekosistem mangrove Desa Awanggoa berdasarkan rentang nilai karbon per hektar klasifikasi ini digunakan untuk menggambarkan distribusi stok karbon dalam berbagai kategori, mulai dari sangat rendah hingga sangat tinggi, sehingga memudahkan pemahaman mengenai kapasitas penyimpanan karbon di kawasan tersebut hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 4.

Tabel 4. Kondisi Klas Stok Karbon Tersimpan pada Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa. Kecamatan Bacan Kabupaten Halmahera Selatan

Kelas Stok Karbon	Rentang Nilai (ton C/ha)	Luas (Ha)	Stok Karbon (Ton)	Persen Stok Karbon
Stok Karbon Sangat rendah	< 4,7	8,05	866,71	16,14%
Stok Karbon Rendah	4,7 - 11,75	13,60	2.945,76	54,85%
Stok Karbon Sangat Tinggi	> 35,25	2,69	1.557,71	29,01%
Total		24,34	5.370,19	100%



Gambar 4. Peta Kondisi Stok karbon Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa Kacamatan Bacan Kabupaten Halmahera Selatan

Dominasi kelas rendah menunjukkan bahwa sebagian besar ekosistem mangrove di wilayah ini masih dalam fase pertumbuhan atau sedang mengalami tekanan lingkungan, seperti pasang surut, sedimentasi, maupun aktivitas manusia. Namun, keberadaan kelas sangat tinggi pada area tertentu mengindikasikan masih adanya tegakan mangrove yang relatif sehat dan memiliki kemampuan penyimpanan karbon yang besar. Hal ini menegaskan pentingnya pengelolaan dan pelestarian mangrove di Bacan sebagai bagian dari strategi mitigasi perubahan iklim.

Hasil ini sejalan dengan berbagai studi sebelumnya. Penelitian di wilayah pesisir Tanjungpiayu, Batam, menunjukkan adanya variasi stok karbon dari kategori rendah hingga tinggi (Zakia *et al.*, 2024). Demikian juga penelitian di Karawang, Jawa Barat, melaporkan perbedaan stok karbon antar jenis mangrove yang cukup signifikan, mulai dari kategori rendah hingga sangat tinggi (Nopiana, 2024). Dengan demikian, hasil penelitian di Bacan menguatkan bukti bahwa ekosistem mangrove memiliki peranan penting sebagai penyerap karbon, meskipun kondisinya sangat dipengaruhi oleh faktor ekologis dan tingkat gangguan. Hal ini menekankan urgensi pengelolaan mangrove secara berkelanjutan agar fungsi ekologisnya tetap terjaga.

Karbon Sekuestrasi Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa

Karbon sekuestrasi ekosistem mangrove di Desa Awanggoa mencapai 19.708,59 ton. Kontribusi tiap kelas kepadatan vegetasi menunjukkan pola yang konsisten dengan hasil NDVI, biomassa, dan stok karbon sebelumnya. Kategori NDVI lebat seluas 20,11 ha menjadi penyumbang

terbesar dengan 18.569,70 ton (94,22%), menegaskan bahwa kawasan dengan vegetasi rapat dan sehat memiliki kapasitas maksimal dalam menyerap dan menyimpan karbon dari atmosfer. Pada kategori NDVI sedang, luas 3,45 ha mampu menyekuestrasi 1.226,83 ton (6,22%), jauh lebih kecil dibanding kategori lebat. Hal ini memperlihatkan bahwa kapasitas sekuestrasi karbon meningkat seiring dengan kerapatan vegetasi, serta membuka peluang peningkatan melalui rehabilitasi dan pemulihan vegetasi. Sebaliknya, kategori NDVI jarang dengan luas 0,78 ha justru menunjukkan nilai sekuestrasi negatif sebesar -87,94 ton (-0,45%). Nilai ini mengindikasikan adanya emisi bersih karbon akibat degradasi vegetasi, kematian pohon, atau konversi lahan yang melepaskan karbon tersimpan ke atmosfer. Fenomena ini sejalan dengan temuan stok karbon negatif pada kategori yang sama, yang menunjukkan adanya kerusakan ekosistem serius.

Secara keseluruhan, hasil ini memperkuat hubungan antara NDVI, biomassa, stok karbon, dan sekuestrasi karbon. Kerapatan vegetasi tinggi (NDVI lebat) berasosiasi dengan biomassa besar, stok karbon tinggi, serta kapasitas sekuestrasi maksimal. Sebaliknya, penurunan kerapatan vegetasi menyebabkan berkurangnya biomassa, penurunan stok karbon, dan bahkan berbalik menjadi sumber dalam mitigasi perubahan iklim. Desa Awanggoa memiliki potensi besar sebagai penyerap karbon pesisir (*blue carbon*), dan keberlanjutan fungsi tersebut sangat bergantung pada upaya konservasi, rehabilitasi, dan pengelolaan ekosistem mangrove yang berkelanjutan. Secara keseluruhan, hasil analisis karbon sekuestrasi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Karbon Sekuestrasi Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa Kecamatan Bacan Kabupaten Halmahera Selatan

Kelas NDVI	Luas (Ha)	Penyerapan CO ₂ (Ton/Ha)	% CO ₂ /Luasan
NDVI Jarang	0,78	-87,94	-0,45%
NDVI Sedang	3,45	1226,83	6,22%
NDVI Lebat	20,11	18.569,70	94,22%
Total	24,34	19.708,59	100%

Ekosistem mangrove memiliki peranan penting dalam siklus karbon global sebagai penyimpan dan penyerap karbon dioksida (CO₂) dari atmosfer proses ini dikenal sebagai karbon sekuestrasi, di mana mangrove menyimpan karbon dalam biomassa di atas tanah seperti batang, cabang, dan daun, serta dalam biomassa bawah tanah berupa akar dan sedimen di sekitarnya keunikan ekosistem mangrove terletak pada kemampuannya menyimpan karbon dalam sedimen yang bersifat anaerobik, sehingga karbon tersebut dapat tersimpan dalam waktu yang sangat lama dan membantu mitigasi perubahan iklim.

Desa Awanggoa, kapasitas karbon sekuestrasi mangrove menjadi fokus utama untuk mengetahui sejauh mana potensi mitigasi yang dapat diberikan oleh ekosistem pesisir ini analisis karbon sekuestrasi yang dilakukan menunjukkan variasi stok karbon tersimpan antar area yang berbeda, tergantung pada kerapatan vegetasi dan kondisi biomassa kawasan dengan kerapatan vegetasi tinggi menyimpan stok karbon yang jauh lebih besar dibandingkan dengan area yang bervegetasi jarang atau sedang, menegaskan pentingnya pelestarian daerah dengan biomassa tinggi untuk menjaga dan meningkatkan fungsi penyimpanan karbon mangrove lebih jauh stok karbon yang tersimpan tidak hanya bermanfaat bagi keseimbangan karbon global tetapi juga berkontribusi dalam mempertahankan kestabilan ekosistem pesisir seperti mengurangi risiko pantai dan meningkatkan keanekaragaman hayati oleh karena itu mengelola stok karbon secara berkelanjutan dan melakukan rehabilitasi pada area yang memiliki potensi rendah sangat penting agar kontribusi ekosistem mangrove

Secara keseluruhan, hasil ini memperkuat hubungan antara NDVI, biomassa, stok karbon, dan

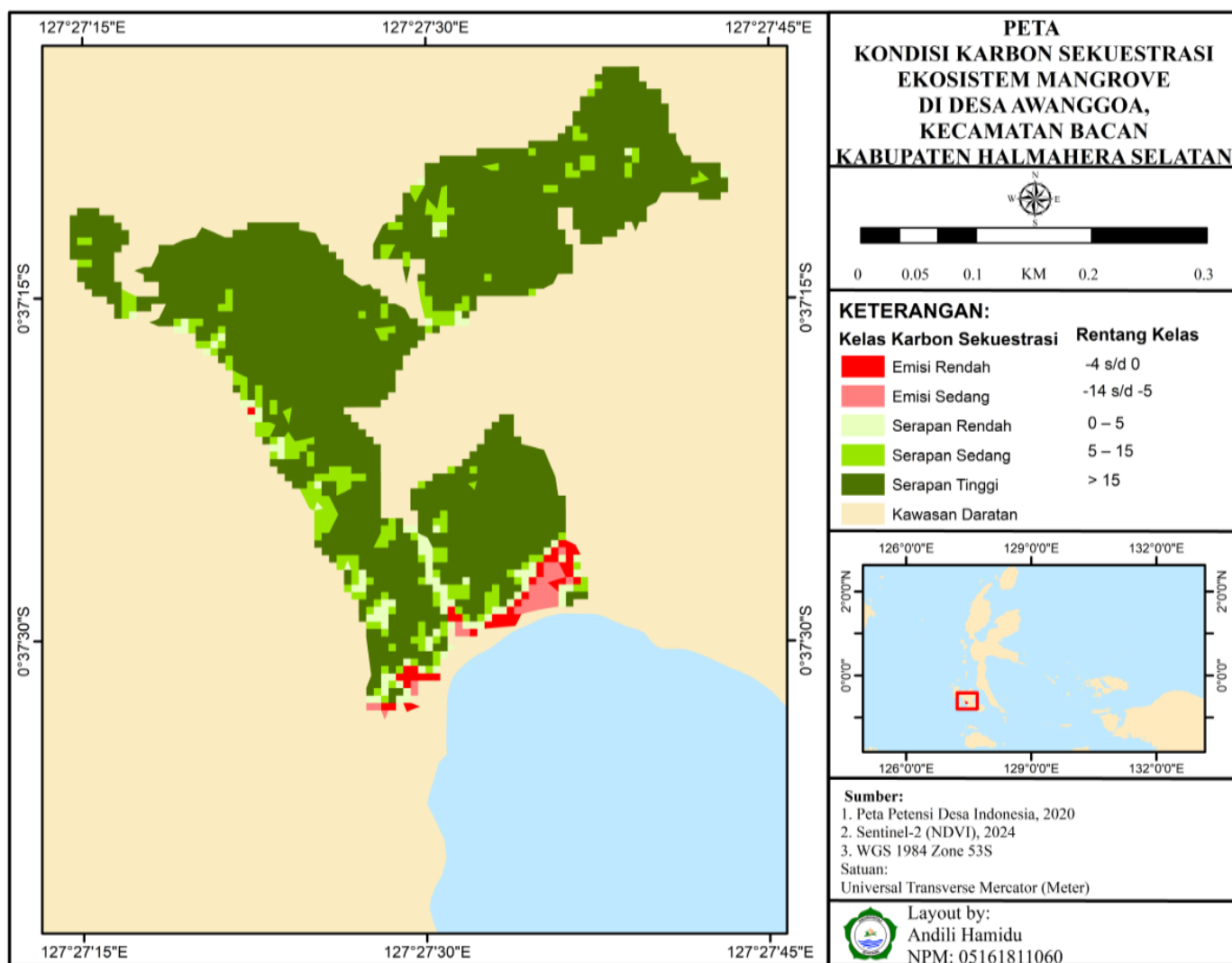
sekuestrasi karbon. Kerapatan vegetasi tinggi (NDVI lebat) berasosiasi dengan biomassa besar, stok karbon tinggi, serta kapasitas sekuestrasi maksimal. Sebaliknya, penurunan kerapatan vegetasi menyebabkan berkurangnya biomassa, penurunan stok karbon, dan bahkan berbalik menjadi sumber emisi. Oleh karena itu, menjaga dan meningkatkan kerapatan vegetasi terutama pada kawasan NDVI sedang dan jarang menjadi strategi penting untuk memaksimalkan peran mangrove dalam mitigasi perubahan iklim. Desa Awanggoa memiliki potensi besar sebagai penyerap karbon pesisir (*blue carbon*), dan keberlanjutan fungsi tersebut sangat bergantung pada upaya konservasi, rehabilitasi, dan pengelolaan ekosistem mangrove yang berkelanjutan.

Klasifikasi karbon sekuestrasi

Analisis menunjukkan bahwa kerapatan vegetasi mangrove yang direpresentasikan oleh nilai NDVI memiliki hubungan erat dengan kapasitas penyerapan karbon di Desa Awanggoa. Kategori NDVI lebat mendominasi luas tutupan (20,11 ha) dan berkontribusi pada penyerapan CO₂ sebesar 18.569,70 ton (94,22%), selaras dengan kelas karbon sekuestrasi >15 ton C/ha (serapan tinggi), yang menegaskan peran penting vegetasi sehat dalam menyerap emisi karbon secara signifikan. Pada kategori NDVI sedang seluas 3,45 ha, penyerapan CO₂ tercatat sebesar 1.226,83 ton (6,22%) dan sebagian besar berada pada kelas serapan sedang (5-15 ton C/ha). Meskipun kontribusinya lebih kecil, kawasan ini tetap mendukung mitigasi perubahan iklim dan berpotensi ditingkatkan kapasitasnya melalui rehabilitasi. Sebaliknya, kategori NDVI jarang (0,78 ha) menunjukkan nilai sekuestrasi negatif sebesar -87,94 ton CO₂ (-0,45%), mengindikasikan terjadinya emisi akibat degradasi vegetasi, kehilangan biomassa, atau konversi lahan. Kondisi ini konsisten dengan data stok karbon negatif dan menandakan perlunya restorasi ekosistem untuk memulihkan fungsi penyimpanan karbon. Klasifikasi karbon sekuestrasi pada ekosistem mangrove Desa Awanggoa berdasarkan rentang nilai karbon yang diserap atau dilepaskan per hektar. Klasifikasi ini menggambarkan distribusi fungsi serapan dan emisi karbon dalam beberapa kategori, sehingga memudahkan pemahaman tentang kapasitas dan peran ekosistem mangrove dalam siklus karbon hasil analisis dapat dilihat Tabel 6 dan Gambar 6..

Tabel 6. Kelas Karbon Sekuestrasi Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa Kecamatan Bacan Kabupaten Halmahera Selatan

Kelas Karbon Sekuestrasi	Rentang Nilai (ton C/ha)	Luas (Ha)	Karbon Sekuestrasi (Ton)	Persen Karbon Sekuestrasi (%)
Emisi Rendah	-4 s/d 0	0,45	- 18,89	-0,10%
Emisi Sedang	-14 s/d -5	0,33	- 69,05	-0,35%
Serapan Rendah	0 - 5	1,03	191,58	0,97%
Serapan Sedang	5 - 15	2,42	1.035,25	5,25%
Serapan Tinggi	> 15	20,11	18.569,70	94,22%
Total		24,34	19.708,59	100%



Gambar 6. Peta Kondisi Klas Karbon Sekuestrasi Ekosistem Mangrove di Desa Awanggoa Kecamatan Bacan, Kabupaten Halmahera Selatan

Tekanan antropogenik menjadi faktor utama yang menurunkan fungsi sekuestrasi mangrove. Penebangan pohon untuk kebutuhan bahan bakar dan alih fungsi lahan menjadi tambak, permukiman, serta infrastruktur pesisir menyebabkan hilangnya tutupan mangrove dan mempercepat pelepasan karbon ke atmosfer (Ali *et al.*, 2025).

Kemampuan mangrove dalam sekuestrasi karbon sangat penting karena proses penyimpanan tidak hanya terjadi pada biomassa atas (batang, daun, cabang) dan bawah (akar), tetapi juga pada sedimen anaerobik yang mampu mengurung karbon selama ribuan tahun. Hal ini menjadikan mangrove sebagai penyerap karbon biru paling efisien di ekosistem pesisir (Amin *et al.*, 2025). Dengan demikian, konservasi dan rehabilitasi mangrove merupakan kunci dalam menjaga kestabilan kapasitas sekuestrasi karbon sekaligus mendukung keberlanjutan fungsi ekologis dan sosial ekonomi masyarakat pesisir.

KESIMPULAN

Ekosistem mangrove di Desa Awanggoa secara umum berada dalam kondisi sehat dengan vegetasi yang lebat, yang menunjukkan tingkat produktivitas dan kesehatan ekosistem yang baik. Klasifikasi biomassa mangrove berdasarkan citra satelit dan indeks NDVI berhasil mengidentifikasi variasi tingkat biomassa di wilayah studi, yang mencerminkan perbedaan kondisi vegetasi dan

potensi penyimpanan karbon. Estimasi stok karbon mangrove menunjukkan bahwa ekosistem ini memiliki kapasitas signifikan dalam menyimpan karbon, terutama pada area dengan vegetasi yang sehat dan rapat. Mangrove di Desa Awanggoa berperan penting dalam sequestrasi karbon, sehingga memiliki potensi besar dalam mitigasi perubahan iklim melalui penyerapan dan penyimpanan gas rumah kaca.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kepada Pemerintah Desa Awanggoa, Kecamatan Bacan Kabupaten Halmahera Selatan atas izin dan bantuan selama proses pengumpulan data lapangan. Penulis tidak lupa mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan peneliti yang telah memberikan saran masukan serta motivasi sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Agusrinal, A. Santoso, N. & Prasetyo, L. B. (2015). Tingkat degradasi ekosistem mangrove di Pulau Kaledupa Taman Nasional Wakatobi. *Jurnal Silvikultur Tropika*. 6(3). 139-147.
- Al Amin, S. F. Pangestu, A. Y. Dharma, Y. Sari, N. A. Maulidia, O. Octaviani, E. A. ... & Salimah, W. (2025). Mangroves as carbon sequesterers: Diversity and carbon estimation study in Pantai Mekar Village, Muara Gembong District, Bekasi Regency. *Jurnal Biologi Tropis*. 25(1). 936-946.
- Ali, S. Dey, G. Nuonga, N. H. K. Rahman, A. Wang, L.-C. Sukul, U. Das, K. Sharma, R. K. Wang, S.-L. & Chen, C. Y. (2025). Carbon sequestration in mangrove ecosystems: Sources, transportation pathways, influencing factors, and its role in the carbon budget. *Earth-Science Reviews*. 105184.
- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*. 3(3). 313-322.
- Amaral, J. R. V., Alqueres, S., da Silva, S., de Oliveira Gomes, L. E., Oliveira, S. S. de, & Macrae, A. (2025). Current status of Brazilian mangroves: Their ecosystem services, conservation, restoration, microbial diversity and biotechnologies. *Science of The Total Environment*, 1001, 180517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180517>
- Arifanti, V. B., Kauffman, J. B., Hadriyanto, D., Murdiyarso, D., & Diana, R. (2019). Carbon dynamics and land use carbon footprints in mangrove-converted aquaculture: The case of the Mahakam Delta, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 432, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.047>
- Cahyaningsih, A. P., Deanova, A. K., Pristiawati, C. M., Ulumuddin, Y. I., Kusumawati, L., & Setyawan, A. D. (2022). Review: Causes and impacts of anthropogenic activities on mangrove deforestation and degradation in Indonesia. *International Journal of Bonorowo Wetlands*, 12(1). <https://doi.org/10.13057/bonorowo/w120102>
- Cairns, M. A. Brown, S. Helmer, E. H. & Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*. 111(1). 1-11.
- Cono, T. H. M., Panai, A. H., Rahim, S., & Hamidun, M. S. (2026). Ethics, Governance, and Adaptive Management of Mangrove Social-Ecological Systems: An Updated Integrative Review of Conservation, Restoration, Monitoring, and Coastal Livelihoods. *International Journal of Research and Review*, 583. <https://doi.org/10.52403/ijrr.20260461>
- Cuenca-Ocay, G. (2024). Mangrove ecosystems' role in climate change mitigation. *Davao Research Journal*, 12(2). <https://doi.org/10.59120/drj.v12i2.168>
- Donato, D. C. Kauffman, J. B. 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.
- Fadillah, S. N. (2025). Pemantauan Sebaran Mangrove di Desa Ujung Alang, Cilacap Menggunakan

Citra Satelit Sentinel-2A.

- Fitria, A. & Dwiyanoto, G. (2021). Ekosistem mangrove dan mitigasi pemanasan global. *Jurnal Ekologi, Masyarakat dan Sains*. 2(1). 29–34.
- Gunawan, H., Basyuni, M., Subarudi, Suharti, S., Kustanti, A., Wahyuni, T., Arifanti, V. B., Yeny, I., Affandi, O., Sugiarti, Zuhriana, D., Lastini, T., Herawati, T., Riswati, M. K., & Effendi, R. (2025). Empowering conservation: the transformative role of mangrove education in Indonesia's climate strategies. *Forest Science and Technology*, 21(4), 374–396. <https://doi.org/10.1080/21580103.2025.2519475>
- Hamilton, S. E., & Casey, D. (2016). Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC-21). *Global Ecology and Biogeography*, 25(6), 729–738. <https://doi.org/10.1111/geb.12449>
- Huda, J. S. Pratikto, I. & Riniatsih, I. (2024). Pemanfaatan citra Sentinel-2 untuk pemetaan sebaran padang lamun di Perairan Pulau Panjang, Jepara. *Journal of Marine Research*. 13(2). 374–380.
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama. Japan.
- Jha, C., & Fararoda, R. (2015). Spatial Distribution of Biomass in Indian Forests using Spectral Modelling (No. Technology Trends: Multi-Scale Remote Sensing Using Optical Sensorsno. 3, 138p). The International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Nepal.
- Kapitan, F. A. Rauf, A. & Asmidar, A. (2025). Pemantauan kesehatan mangrove melalui penerapan aplikasi NDVI dengan teknologi penginderaan jauh di Desa Bontolebang Kabupaten Kepulauan Selayar. *Jiwall*. 2(2). 202–211.
- Kauffman, J. B., & Donato, D. (2012). Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. <https://doi.org/10.17528/cifor/003749>
- Marasaoly, R., Wahidin, N., Samman, A., Sabar, M., Labenua, R., & Findra, M. N. (2025). Analisis mangrove sebagai karbon biru untuk mitigasi pemanasan global dengan menggunakan Google Earth Engine di Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti, Kota Ternate. *Moluccas Aquaticus*, 1(2), 111–123. <https://doi.org/10.33387/moluccasaquaticus.v1i2.421>
- Maseti, G. J., Mwansasu, S., & Njana, M. A. (2022). Carbon dynamics and sequestration by urban mangrove forests of Dar es Salaam, Tanzania. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 20(2), 11–23. <https://doi.org/10.4314/wiojms.v20i2.2>
- Nopiana, M. (2024). Estimasi Stok Karbon Mangrove di Pesisir Kabupaten Karawang, Indonesia. *Jurnal Laut Pulau*, 3(1), 19-27. <https://doi.org/10.30598/jlpvol3iss1pp19-27>
- Numbere, A. O. (2019). Mangrove Habitat Loss and the Need for the Establishment of Conservation and Protected Areas in the Niger Delta, Nigeria. In *Habitats of the World: Biodiversity and Threats [Working Title]*. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89623>
- Nyein, L. T., Karthe, D., Giessen, L., Babel, M. S., & Schusser, C. (2025). Reviewing Mangrove Degradation, Conservation, and Restoration: A Sustainability Nexus Assessment on Myanmar Using the DPSIR Framework. *Forest and Society*, 9(1), 164–185. <https://doi.org/10.24259/fs.v9i1.35303>
- Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Sifleet, S., Craft, C., Fourqurean, J. W., Kauffman, J. B., Marbà, N., Magonigal, P., Pidgeon, E., Herr, D., Gordon, D., & Baldera, A. (2012). Estimating Global “Blue Carbon” Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. *PLoS ONE*, 7(9), e43542. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>
- Ramadhan, A., & Suwadi, S. (2024). Model penduga biomassa hutan mangrove menggunakan citra satelit sentinel -2A di Kabupaten Rembang Jawa Tengah. *Jurnal Wana Tropika*, 13(2), 72–84.

<https://doi.org/10.55180/jwt.v13i2.1018>.

- Richards, D. R., & Friess, D. A. (2016). Rates and drivers of mangrove deforestation in Southeast Asia, 2000–2012. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(2), 344–349. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510272113>
- Samman, A., Supyan, S., & Findra, M. N. (2025). Estimasi Biomassa Mangrove Menggunakan NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) di Desa Soligi, Kabupaten Halmahera Selatan. *Moluccas Aquaticus*, 1(1), 1-10.
- Sasmito, S. D., Sillanpää, M., Hayes, M. A., Bachri, S., Saragi-Sasmito, M. F., Sidik, F., Hanggara, B. B., Mofu, W. Y., Rumbiak, V. I., Hendri, Taberima, S., Suhaemi, Nugroho, J. D., Pattiasina, T. F., Widagti, N., Barakalla, Rahajoe, J. S., Hartantri, H., Nikijuluw, V., ... Murdiyarso, D. (2020). Mangrove blue carbon stocks and dynamics are controlled by hydrogeomorphic settings and land-use change. *Global Change Biology*, 26(5), 3028–3039. <https://doi.org/10.1111/gcb.15056>
- Seran, M., Liufeto, F. C., & Refli, R. (2025). Analisis Struktur Komunitas, Biomassa Karbon Tersimpan dan Laju Sedimentasi Ekosistem Hutan Mangrove di Desa Oebelo. *Populer: Jurnal Penelitian Mahasiswa*, 4(1), 269-274.
- Utami, R. S., Ismail, M. R., & Sidik, F. (2025). Model Alometrik Penduga Biomassa Semai Mangrove (*Bruguiera gymnorrhiza*) Di Kawasan Restorasi Budeng, Bali: Allometric Model for Estimating Biomass of Mangrove Seedling (*Bruguiera gymnorrhiza*) in Budeng Restoration Area, Bali. *HUTAN TROPIKA*, 20(1), 7-14.
- Utami, W., Sugiyanto, C., & Rahardjo, N. (2024). Mangrove area degradation and management strategies in Indonesia: A review. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 11(3), 6037–6047. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.113.6037>
- Westlake, D. (1963). Comparisons of plant productivity. *Biological Reviews*, 38(3), 385-425.
- Zakia, R., Lestari, F., Apdillah, D., & Zulfikar, A. (2024). Strategi Pengelolaan Ekosistem Mangrove Sebagai Upaya Adaptasi Perubahan Iklim di Pesisir Tanjungpiayu Kota Batam. *Jurnal Akuatiklestari*, 8(1), 13-21. <https://doi.org/10.31629/akuatiklestari.v8i1.7180>