



Analisis Mangrove Sebagai Karbon Biru untuk Mitigasi Pemanasan Global dengan Menggunakan *Google Earth Engine* di Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti, Kota Ternate

(Analysis of Mangroves as Blue Carbon for Global Warming Mitigation Using Google Earth Engine in Tafaga Village, Moti District, Ternate City)

Rifan Marasaoly, Nurhalis Wahidin, Ardan Samman*, Mesrawaty Sabar, Rusmawati Labenua, Muhammad Nur Findra

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

Diterima: 25 Agustus 2025

Direvisi: 30 November 2025

Disetujui: 12 Desember 2025

ABSTRAK

Mangrove merupakan salah satu ekosistem pesisir yang berperan penting dalam mitigasi perubahan iklim melalui kemampuan menyerap dan menyimpan karbon biru. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi vegetasi mangrove, menghitung biomassa di atas permukaan (AGB) dan biomassa bawah permukaan (BGB), total biomassa (TAB), stok karbon (TSC), serta mengestimasi potensi sekuestrasi CO₂ di Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti, Kota Ternate. Penelitian dilaksanakan pada bulan Juni 2025. Data diperoleh melalui citra satelit Sentinel-2 yang diolah menggunakan platform Google Earth Engine (GEE). Nilai Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kerapatan vegetasi mangrove, yang kemudian menjadi dasar perhitungan biomassa dan karbon tersimpan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai NDVI berada pada kategori rapat (0,36–0,64) dengan luas tutupan 13,05 ha. Total biomassa tercatat sebesar 2.179,69 ton, terdiri dari 1.941,69 ton AGB dan 242,21 ton BGB. Stok karbon yang tersimpan (TSC) mencapai 1.024,46 ton, dengan potensi sekuestrasi CO₂ sebesar 3.119,65 ton. Sementara itu, kategori emisi sedang dan rendah masing-masing melepaskan –13,91 ton dan –69,90 ton CO₂. Hasil ini menegaskan peran signifikan ekosistem mangrove di Kelurahan Tafaga dalam penyimpanan karbon dan penyerapan CO₂, serta menunjukkan perlunya rehabilitasi pada area degradasi. Temuan ini dapat menjadi dasar pengambilan kebijakan konservasi dan strategi mitigasi perubahan iklim di wilayah pesisir.

Kata kunci: biomassa, mangrove, Google Earth Engine, NDVI, Tafaga

ABSTRACT

Mangroves are one of the most important coastal ecosystems in mitigating climate change due to their ability to absorb and store large amounts of blue carbon. This study aimed to analyze the condition of mangrove vegetation, calculate above-ground biomass (AGB) and below-ground biomass (BGB), total biomass (TAB), carbon stock (TSC), and estimate the potential for CO₂ sequestration in Tafaga Village, Moti District, Ternate City. The research was conducted in June 2025. Data were obtained from Sentinel-2 satellite imagery processed using the Google Earth Engine (GEE) platform. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used to identify mangrove vegetation density, which then served as the basis for calculating biomass and stored carbon. The results showed that NDVI values fell within the dense category (0.36–0.64) with a canopy cover area of 13.05 ha. The total biomass was recorded at 2,179.69 tons, consisting of 1,941.69 tons AGB and 242.21 tons BGB. The stored carbon stock (TSC) reached 1,024.46 tons, with a CO₂ sequestration potential of 3,119.65 tons. Meanwhile, the medium and low emission categories released –13.91 tons and –69.90 tons CO₂, respectively. These findings highlight the significant role of the Tafaga mangrove ecosystem in carbon storage and CO₂ absorption, as well as the need for rehabilitation in degraded areas. This study provides a scientific basis for conservation policy development and climate change mitigation strategies in coastal regions.

Keywords: biomass, Google Earth Engine, mangrove, NDVI, Tafaga

PENDAHULUAN

Pemanasan global, yang didefinisikan sebagai peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi yang disebabkan oleh gas rumah kaca (GRK), merupakan salah satu isu terkini yang dihadapi dunia (Sedjarawan *et al.*, 2014). Bozdogan (2009) mengklaim bahwa gas-gas ini menghentikan sinar matahari untuk kembali ke bumi setelah keluar dari atmosfer. Penyebab utama emisi CO₂ ke atmosfer adalah aktivitas manusia dalam melakukan pembakaran bahan bakar fosil yang merupakan sumber utama emisi CO₂, meliputi pembakaran batu bara, minyak, dan gas alam lainnya (Latuconsina, 2010). Salah satu strategi mitigasi yang digunakan untuk menurunkan konsentrasi CO₂ di atmosfer adalah konsep "karbon biru," yang mengidentifikasi tiga ekosistem utama yaitu ekosistem lamun, rawa asin, dan hutan mangrove yang berkontribusi terhadap penyimpanan dan penyerapan karbon dalam jaringan dan sedimen (Naspiranto *et al.*, 2016).

Salah satu ekosistem pesisir dengan kapasitas tertinggi untuk menyerap dan menyimpan karbon adalah ekosistem mangrove. Mangrove merupakan salah satu ekosistem yang terdapat di wilayah pesisir dengan substrat lumpur dan garam. Habitat mangrove berkontribusi terhadap pengurangan pemanasan global dengan menurunkan konsentrasi CO₂ yang tersimpan dalam stok karbon (Sondak, 2015). Rahmanto (2020) menegaskan bahwa ekosistem mangrove memiliki kapasitas empat hingga lima kali lipat dari hutan daratan untuk menyimpan karbon, dengan rata-rata 800 hingga 1200 C/ha. Selain itu, ekosistem mangrove dapat memangkas emisi tahunan yang diproyeksikan sebesar 10% hingga 31%. Mangrove jauh lebih mampu menyimpan karbon dibandingkan hutan daratan dan hutan hujan tropis (Rahman *et al.*, 2017).

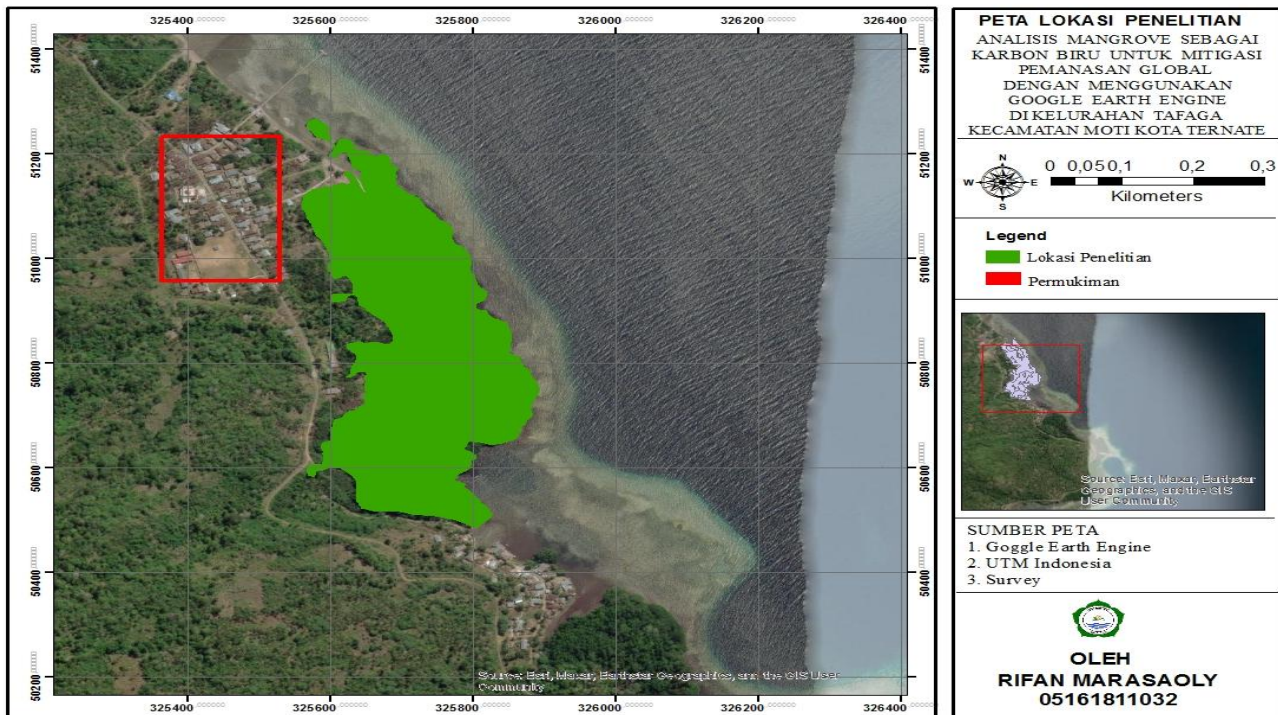
Sari *et al.* (2022) menegaskan bahwa ekosistem mangrove, yang menyimpan sekitar 1023 Mg karbon per hektar, paling banyak terdapat di wilayah tropis. Nilai penyimpanan karbon ekosistem mangrove terdapat pada tanah yang memiliki kandungan bahan organik tinggi (49–98 persen) antara 0,5 dan 3 meter di bawah permukaan tanah. Salah satu metode untuk menentukan nilai penyimpanan karbon mangrove adalah dengan menggunakan teknik penginderaan jauh (Inderaja) dan sistem informasi geografis (SIG) yang memanfaatkan temuan analisis citra satelit (Hidayah *et al.*, 2023). Karbon dan biomassa, dua unsur biomassa hutan, dapat tercermin oleh Inderaja (Simarmata *et al.*, 2019). Inderaja merupakan komponen utama dari berbagai inisiatif pemantauan karbon baik di dalam negeri maupun di luar negeri (Giri *et al.*, 2021). Citra Sentinel-2a termasuk di antara citra yang ditawarkan. Jumlah karbon yang tersimpan di hutan bakau dapat dipastikan menggunakan resolusi spasial citra Sentinel-2a (Adirama *et al.*, 2024).

Provinsi Maluku Utara memiliki luas lahan mangrove dan penyangga pantai sebesar ±55.322,61 hektare. Hutan mangrove di Maluku Utara memiliki luas sekitar ±46.259,41 hektare yang terbagi dalam kategori rapat sebesar ±29.848,83 hektare dan kurang rapat sebesar ±16.410,58 hektare. Sebagian besar hutan mangrove berada pada kawasan hutan produksi yang dapat dikonversi menjadi penggunaan lain sebesar ±25.594,35 hektare (55,33%). Sedangkan sisanya berada pada areal penggunaan lahan sebesar 13.790,01 hektare, hutan lindung sebesar 4.999,04 hektare, hutan produksi sebesar 1.324,07 hektare, dan hutan produksi terbatas sebesar 551,94 hektare (BPDAS Ake Malamo, 2010). Kelurahan Tafaga memiliki luas total mangrove pada tahun 2023 sebesar 12,38 hektare yang terbagi dalam kategori rapat seluas 8,80 hektare, kategori sedang seluas 2,63 hektare dan kategori jarang seluas 0,95 hektare. Namun saat ini belum diketahui besarnya cadangan karbon yang tersimpan di Kelurahan Tafaga karena belum adanya publikasi mengenai cadangan karbon biru pada ekosistem tersebut. Oleh karena itu, penelitian mengenai Analisis Mangrove Sebagai Karbon Biru Untuk Mitigasi Pemanasan Global Dengan Menggunakan *Google Earth Engine* di Kelurahan Tafaga perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa besar karbon biru yang tersimpan di kawasan tersebut.

METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juni, 2025 di Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti Kota Ternate, Provinsi Maluku Utara. 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 untuk mengolah seluruh data yang digunakan dalam penelitian selanjutnya *Google Earth Engine* sebagai sumber data NDVI dengan menggunakan Algoritma (*Script*) kemudian data Citra Satelit Sentinel-2a sebagai bahan untuk digitasi tutupan NDVI ekosistem mangrove selanjutnya *Software ArcGIS10.8* untuk pengolahan data citra NDVI serta *Excel* untuk mengolah data citra sentinel-2a.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode yang memanfaatkan teknologi citra satelit Sentinel-2A, dengan data NDVI mangrove tahun 2024 diperoleh melalui *Google Earth Engine* (GEE). Tahapan selanjutnya mencakup analisis lanjutan, termasuk proses reklasifikasi dan kueri NDVI, serta analisis biomassa yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcGIS.

Analisis Data

Analisis NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) 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 Suwadi (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 :

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

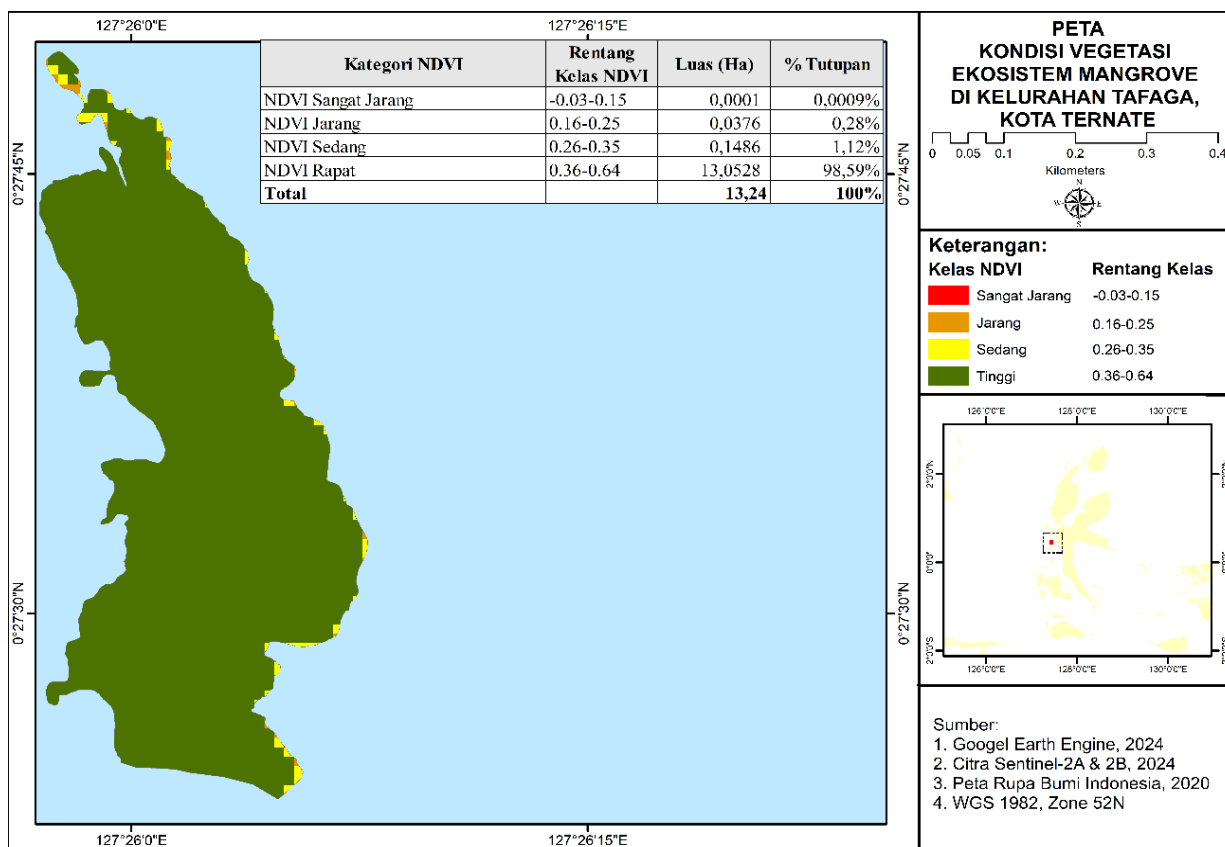
Dimana Stok karbon adalah jumlah karbon yang tersimpan dalam biomassa, biasanya dinyatakan dalam ton karbon per hektar (tC/ha) sedangkan 3,67 adalah konversi karbon.

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 s/d -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

Analisis Kondisi Vegetasi Mangrove

Hasil analisis kondisi vegetasi berdasarkan nilai NDVI di Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti, Kota Ternate menunjukkan bahwa kawasan ini didominasi oleh vegetasi lebat dan sehat. Sebagian besar wilayah, yaitu 98,59% dari total luas 13,24 hektar, berada dalam kategori NDVI Rapat (0,36–0,64) yang diklasifikasikan sebagai vegetasi lebat dan sehat. Hal ini mencerminkan bahwa ekosistem vegetasi di wilayah tersebut masih terjaga dengan baik dan menunjukkan tingkat kehijauan yang tinggi. Sementara itu, vegetasi Sedang (NDVI 0,26–0,35) hanya mencakup 1,12%, sedangkan vegetasi Jarang atau stres (NDVI di bawah 0,25) mencakup area yang sangat kecil, yaitu 0,28% untuk NDVI Sangat Jarang 0,0009%. Proporsi yang sangat kecil dari kategori vegetasi jarang atau stres ini mengindikasikan bahwa tekanan terhadap vegetasi baik dari faktor alam maupun aktivitas manusia masih tergolong rendah. Secara keseluruhan, kondisi vegetasi di Kelurahan Tafaga dapat dikatakan sangat baik, dengan dominasi tutupan lahan yang hijau, padat, dan sehat, sebagaimana disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta kondisi ekosistem mangrove Kelurahan Tafaga

Menurut Samman *et al.* (2025), pendekatan berbasis NDVI telah terbukti sebagai metode yang efisien, ekonomis, dan memiliki akurasi spasial-temporal tinggi dalam memantau kondisi ekosistem mangrove, melebihi efektivitas survei lapangan konvensional. Studi di kawasan mangrove selatan Desa Kawasi dan utara Desa Soligi menunjukkan keberhasilan pemetaan vegetasi, termasuk identifikasi area sehat seluas 5,37 hektar. Namun, yang paling penting, analisis ini juga mengungkap adanya kawasan mangrove dalam kondisi kritis, yakni dengan kerapatan jarang (3,75 hektar) dan sangat jarang (1,97 hektar), yang menandai perlunya tindakan rehabilitasi segera.

Metode klasifikasi NDVI terbukti efektif dalam mendeteksi degradasi ekosistem mangrove secara spasial dan temporal, sebagaimana ditunjukkan oleh I'zzuddiin *et al.* (2025) dalam studi mereka di Pantai Timur Suraba. Penelitian tersebut mengungkap penurunan kesehatan vegetasi mangrove dari nilai NDVI tertinggi 0,314 pada tahun 2021 menjadi 0,297 pada tahun 2023. Secara spasial, perubahan ini tampak signifikan, ditandai dengan penurunan kerapatan vegetasi dari kategori rapat menjadi sedang, jarang, bahkan hilang, dengan luas terdampak mencapai ratusan hektar. Temuan ini menegaskan terjadinya deforestasi dalam waktu singkat dan mendesak perlunya upaya restorasi segera, khususnya di wilayah yang mengalami kerusakan paling parah.

Estimasi Biomassa Ekosistem Mangrove

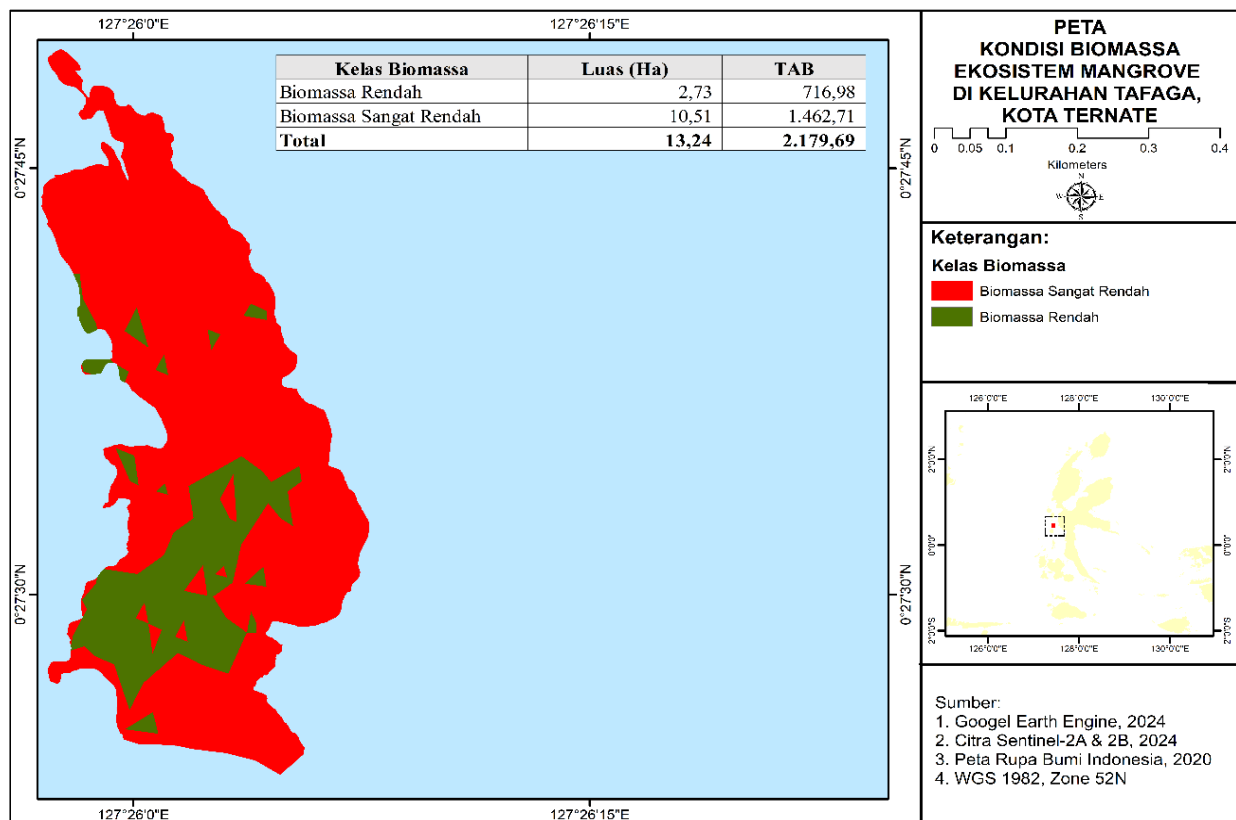
Analisis biomassa ekosistem mangrove di Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti, Kota Ternate menunjukkan kondisi yang sangat baik, dengan total biomassa (TAB) sebesar 2.179,69 ton yang didominasi oleh kawasan bervegetasi lebat (NDVI Rapat) seluas 13,05 hektar, menyumbang lebih dari 99% dari total biomassa, yakni 1.941,69 ton AGB dan 242,21 ton BGB. Kategori NDVI Sedang hanya menyumbang 44,38 ton, sementara kategori NDVI Jarang dan Sangat Jarang mencakup luasan sangat kecil dengan nilai biomassa yang rendah bahkan negatif, yang dapat mengindikasikan degradasi ekosistem mangrove. Hasil ini menegaskan bahwa ekosistem

mangrove di wilayah ini masih sangat sehat dan berperan penting dalam fungsi ekologis, khususnya sebagai penyimpan karbon alami dan pelindung pesisir. Secara keseluruhan hasil analisis biomassa ekosistem mangrove di Kelurahan Tafaga ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi biomassa ekosistem mangrove Kelurahan Tafaga

Kategori NDVI	Luas (Ha)	AGB	BGB	TAB
NDVI Sangat Jarang	0,0001	0,0001	8,0643	-8,0643
NDVI Jarang	0,0376	0,9368	41,4589	-40,5221
NDVI Sedang	0,1486	39,4333	4,9452	44,3785
NDVI Rapat	13,0528	1.941,6917	242,2085	2.183,9002
Total	13,24	1.982,06	197,63	2.179,69

Hasil klasifikasi kelas biomassa berdasarkan tabel diatas terdapat total area seluas 13,24 hektar pada ekosistem mangrove Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti, Kota Ternate terbagi ke dalam dua kategori utama, yaitu Biomassa Sangat Rendah dan Biomassa Rendah. Kategori Biomassa Sangat Rendah mendominasi dengan luas 10,51 hektar dan total biomassa sebesar 1.462,71 ton, sedangkan Biomassa Rendah mencakup 2,73 hektar dengan biomassa sebesar 716,98 ton. Secara keseluruhan, total biomassa mencapai 2.179,69 ton, yang menunjukkan bahwa meskipun tutupan vegetasi tergolong lebat berdasarkan NDVI, namun potensi stok biomassa di wilayah ini masih berada pada kelas rendah hingga sangat rendah, yang dapat disebabkan oleh jenis mangrove berstruktur pendek atau kondisi lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan biomassa. Hasil klasifikasi kelas biomassa ekosistem mangrove Kelurahan Tafaga ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Klasifikasi biomassa mangrove Kelurahan Tafaga

Temuan dalam kajian ini sejalan dengan berbagai penelitian di kawasan mangrove lain di Indonesia yang menunjukkan bahwa tingkat kerapatan vegetasi memiliki hubungan erat dengan jumlah biomassa, di mana area dengan kerapatan sangat tinggi cenderung menyimpan biomassa

lebih besar dibandingkan area dengan kerapatan jarang hingga sangat jarang (Seran et al., 2025). Hasil ini bahkan menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan studi di Desa Soligi yang mencakup 12,12 hektar dengan total biomassa sebesar 899,78 ton, di mana kategori NDVI tinggi seluas 5,37 hektar menyumbang 639,94 ton/ha (Samman et al., 2025). Selain itu, diameter batang mangrove juga berpengaruh signifikan terhadap akumulasi biomassa, di mana jenis dengan diameter lebih besar memberikan kontribusi biomassa yang jauh lebih tinggi dibandingkan jenis berdiameter kecil (Utami et al., 2025).

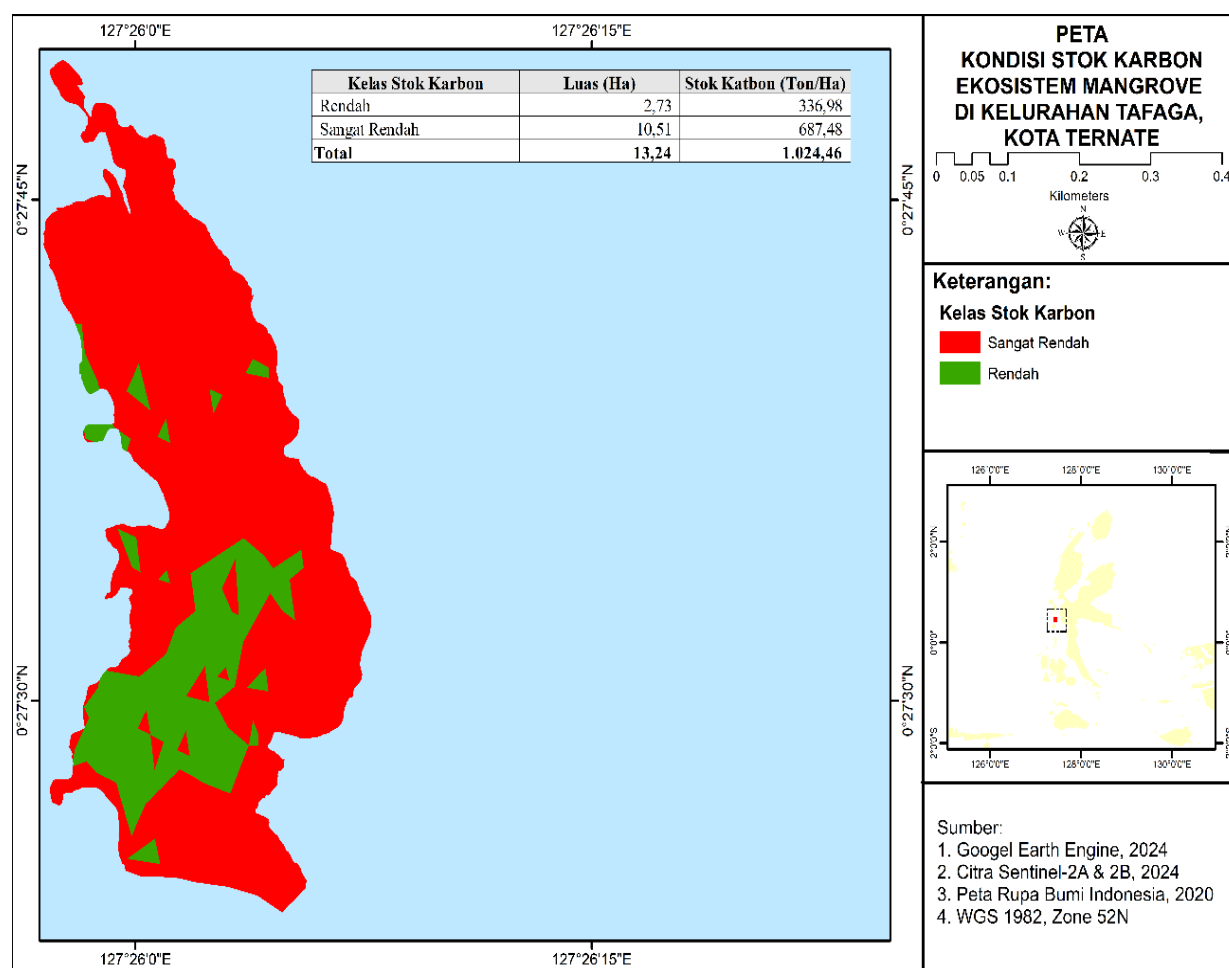
Estimasi Stok Karbon Ekosistem Mangrove

Analisis Total Stok Karbon ekosistem mangrove di Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti, Kota Ternate menunjukkan bahwa kawasan ini menyimpan karbon dalam jumlah yang cukup signifikan, dengan total sebesar 1.024,46 ton pada luas area 13,24 hektar. Sebagian besar karbon tersimpan di kawasan dengan kategori NDVI Rapat, yaitu 13,05 hektar, yang berkontribusi sebesar 1.026,43 ton karbon. Sementara itu, kategori NDVI Sedang menyumbang 20,86 ton, dan kategori NDVI Jarang serta Sangat Jarang justru menunjukkan nilai TSC negatif, masing-masing sebesar -19,05 ton dan -3,79 ton, yang dapat mengindikasikan degradasi vegetasi di area tersebut. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa kawasan mangrove dengan tutupan vegetasi lebat berperan dominan dalam menyimpan karbon, menjadikan wilayah ini penting untuk upaya mitigasi perubahan iklim melalui konservasi ekosistem pesisir. Secara keseluruhan stok karbon tersimpan pada ekosistem mangrove di Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Stok karbon ekosistem mangrove Kelurahan Tafaga

Kategori NDVI	Luas (Ha)	TSC
NDVI Sangat Jarang	0,0001	- 3,790
NDVI Jarang	0,0376	- 19,045
NDVI Sedang	0,1486	20,858
NDVI Rapat	13,0528	1.026,433
Total	13,24	1.024,46

Hasil klasifikasi kelas stok karbon berdasarkan tabel diatas terdapat total area seluas 13,24 hektar pada ekosistem mangrove Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti, Kota Ternate tergolong dalam kelas Stok Karbon Rendah dan Sangat Rendah. Kelas Stok Karbon Sangat Rendah mendominasi dengan luas 10,51 hektar, menyumbang sekitar 687,48 ton karbon, sedangkan kelas Rendah mencakup 2,73 hektar dengan total karbon sebesar 336,98 ton. Total keseluruhan stok karbon mencapai 1.024,46 ton, menunjukkan bahwa meskipun vegetasi di wilayah ini tergolong lebat berdasarkan analisis NDVI, kapasitas penyimpanan karbonnya masih berada pada kategori rendah. Hal ini dapat disebabkan oleh struktur mangrove yang pendek, usia tegakan yang masih muda, atau faktor lingkungan lain yang memengaruhi akumulasi karbon di atas dan di bawah permukaan tanah. Hasil klasifikasi Stok Karbon Ekosistem Mangrove di Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti, Kota Ternate dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Klasifikasi stok karbon mangrove Kelurahan Tafaga

Hasil ini sejalan dengan penelitian Rahman *et al.* (2023) di pesisir Bangladesh yang menemukan bahwa area mangrove dengan NDVI tinggi ($\geq 0,6$) menyimpan lebih dari 90% total stok karbon, dengan total mencapai 972,15 ton pada luasan 12,8 hektar. Penelitian tersebut menyatakan bahwa "area dengan vegetasi rapat yang dicerminkan oleh nilai NDVI tinggi menunjukkan korelasi yang signifikan terhadap peningkatan cadangan karbon, baik di biomassa atas maupun bawah tanah.

Penelitian lainnya oleh Wulandari *et al.* (2024) di kawasan pesisir Kalimantan Barat juga mencatat total cadangan karbon sebesar 1.108,72 ton pada luasan 14,5 hektar, dengan NDVI dominan di kisaran 0,68–0,83. Rata-rata TSC yang diperoleh dari kategori NDVI rapat dalam penelitian tersebut adalah 76,47 ton/ha, sangat dekat dengan nilai yang diperoleh di Tafaga, yaitu $\pm 78,67$ ton/ha pada kategori NDVI rapat. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi vegetasi yang padat memberikan kontribusi maksimal terhadap akumulasi karbon.

Adapun nilai negatif TSC pada kategori NDVI rendah (jarang dan sangat jarang) di wilayah penelitian kemungkinan besar disebabkan oleh degradasi ekosistem, seperti pembukaan lahan, penebangan, atau tekanan antropogenik lain yang menyebabkan hilangnya biomassa hidup. Nugroho *et al.* (2024) mencatat bahwa di wilayah pesisir Sulawesi Tenggara, nilai TSC negatif muncul di area yang sebelumnya merupakan vegetasi mangrove, namun telah dikonversi menjadi lahan terbuka atau tambak tidak aktif, sehingga karbon yang tersimpan di permukaan maupun tanah berkurang drastis. Penelitian tersebut menyatakan bahwa "nilai NDVI di bawah 0,2 menunjukkan zona degradasi berat, di mana biomassa telah hilang dan cadangan karbon turun hingga mencapai nilai negatif akibat dominasi substrat terbuka dan proses pelapukan organik

tanpa input vegetatif baru.

Dengan demikian, nilai TSC negatif dalam penelitian ini dapat dipahami sebagai indikator degradasi serius, dan menjadi sinyal penting untuk prioritas restorasi pada area mangrove yang rusak. Hal ini juga mempertegas pentingnya mempertahankan tutupan vegetasi yang tinggi untuk memaksimalkan fungsi penyimpanan karbon di ekosistem pesisir.

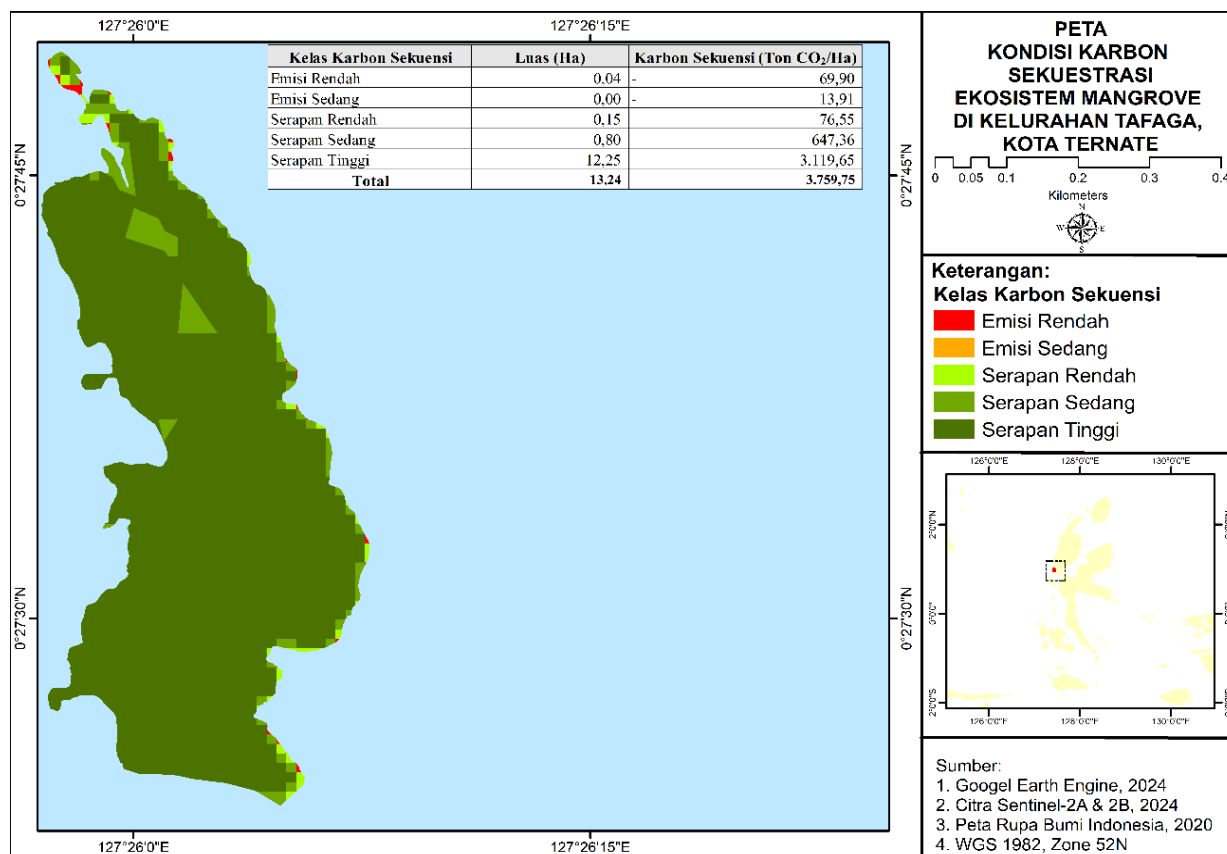
Karbon Sekuestrasi Ekosistem Mangrove

Analisis karbon sekuestrasi pada ekosistem mangrove di Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti, Kota Ternate menunjukkan bahwa kawasan ini memiliki kapasitas penyerapan karbon yang cukup besar, dengan total sekuestrasi mencapai 3.759,75 ton pada luas wilayah 13,24 hektar. Kontribusi terbesar berasal dari kategori NDVI Rapat seluas 13,05 hektar, yang menyerap karbon sebesar 3.767,01 ton, mencerminkan fungsi ekologis yang sangat penting dari vegetasi lebat dalam mitigasi perubahan iklim. Sementara itu, kategori NDVI Sedang menyumbang sekuestrasi positif sebesar 76,55 ton. Sebaliknya, pada kategori NDVI Jarang dan Sangat Jarang, karbon sekuestrasi menunjukkan nilai negatif masing-masing sebesar -69,90 ton dan -13,91 ton, yang dapat mengindikasikan degradasi atau proses emisi karbon di area tersebut. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan pentingnya perlindungan kawasan mangrove bervegetasi lebat sebagai penyerap karbon alami yang efektif. Secara keseluruhan hasil estimasi karbon sekuestrasi ekosistem mangrove di Desa Tafaga dapat di lihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Karbon sekuestrasi mangrove Kelurahan Tafaga

Kategori NDVI	Luas (Ha)	Karbon Sekuestrasi
NDVI Sangat Jarang	0,0001	-13,9100
NDVI Jarang	0,0376	-69,8965
NDVI Sedang	0,1486	76,5485
NDVI Rapat	13,0528	3.767,0095
Total	13,24	3.759,75

Hasil klasifikasi kondisi karbon sekuestrasi pada ekosistem mangrove di Kelurahan Tafaga, Kecamatan Moti, Kota Ternate berdasarkan tabel diatas didominasi oleh kelas Serapan Tinggi, yang mencakup 13,24 hektar dan berkontribusi sebesar 3.119,65 ton CO₂, atau sekitar 83% dari total sekuestrasi karbon sebesar 3.759,75 ton CO₂. Sementara itu, kelas Serapan Sedang dan Serapan Rendah masing-masing mencakup 0,80 hektar dan 0,15 hektar, dengan kemampuan menyerap karbon sebesar 647,36 ton CO₂ dan 76,55 ton CO₂. Di sisi lain, ditemukan area kecil dalam kelas Emisi Sedang dan Emisi Rendah dengan luas total 0,04 hektar, yang justru melepaskan karbon ke atmosfer sebesar -13,91 ton CO₂ dan -69,90 ton CO₂, menandakan kemungkinan adanya degradasi atau tekanan ekologis di area tersebut. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah mangrove di Kelurahan Tafaga memiliki fungsi ekosistem yang sangat baik sebagai penyerap karbon, sekaligus mengindikasikan pentingnya perlindungan dan rehabilitasi pada area yang berpotensi sebagai sumber emisi. Secara keseluruhan hasil analisis sekuestrasi ekosistem mangrove di Kelurahan Tafaga ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 6. Kondisi karbon sekuestrasi mangrove Kelurahan Tafaga

Ekosistem mangrove memiliki peran strategis dalam menyerap dan menyimpan karbon secara alami (carbon sequestration), yang menjadikannya sebagai salah satu solusi berbasis alam (nature-based solutions) untuk mitigasi perubahan iklim. Berbagai kegiatan yang tidak memperhatikan keberadaan mangrove dapat mengganggu fungsi ekologisnya, termasuk kapasitas penyerapan karbon yang signifikan. Oleh karena itu, perlindungan dan pelestarian mangrove menjadi aspek penting dalam perencanaan proyek konstruksi agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kehilangan potensi karbon biru yang tersimpan dalam biomassa dan sedimen mangrove (Kemmla & Althea, 2025).

Karbon sekuestrasi pada ekosistem mangrove dipandang sangat penting karena mangrove mampu menyerap dan menyimpan karbon dalam jumlah besar baik di atas permukaan (biomassa) maupun di dalam tanah (sedimen) dalam jangka waktu yang sangat panjang. Mangrove termasuk dalam ekosistem karbon biru yang paling efisien, dengan kapasitas menyimpan karbon 3–5 kali lebih besar per hektar dibandingkan hutan daratan tropis (Baharizki *et al.*, 2025). Selain itu, kemampuan mangrove dalam mengunci karbon di lapisan tanah selama ratusan hingga ribuan tahun menjadikannya kunci dalam strategi mitigasi perubahan iklim. Kehilangan atau kerusakan ekosistem ini tidak hanya menghilangkan fungsi penyimpanan karbon, tetapi juga dapat melepaskan kembali karbon dalam jumlah besar ke atmosfer, sehingga pelestarian mangrove menjadi prioritas dalam agenda konservasi global (Septria *et al.*, 2025).

KESIMPULAN

Kondisi vegetasi mangrove di Kelurahan Tafaga tergolong rapat dan sehat berdasarkan analisis *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), yang menunjukkan tutupan vegetasi yang optimal. Sedangkan Biomassa di atas permukaan (AGB) menunjukkan ketersediaan material

organik yang tinggi, mencerminkan produktivitas ekosistem yang baik sementara di Biomassa bawah permukaan (BGB) mengindikasikan perakaran mangrove yang kuat dan mampu menyimpan karbon secara efektif di bawah tanah. Untuk Total biomassa (TAB), hasil penjumlahan AGB dan BGB, memperlihatkan kapasitas penyimpanan bahan organik yang signifikan pada ekosistem mangrove. Dan Stok karbon (TSC) dalam ekosistem mangrove menunjukkan peran penting dalam penyimpanan karbon biru sebagai bagian dari mitigasi perubahan iklim. Serta Karbon Sekuestrasi yang dihasilkan mangrove mengindikasikan kemampuan ekosistem ini dalam menyerap CO₂ dari atmosfer secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adirama, AZ, Permana, RD, Alfajrin, ACA, Dwiputra, MA, Widiya, N., Dakhi, SVS, & Destina, WF. (2024). Analisis Kondisi Hutan Mangrove dan Potensi Serapan Karbon Menggunakan Data Sentinel-2 di Kabupaten Pesawaran. *Jurnal Hutan Tropis*, 12 (3), 354-369.
- Baharizki, F. A., Hendriyanto, V., Putra, P. F. M., Tumanggor, T., Sitanggang, D. T., & Putri, K. S. (2025). Pemanfaatan lahan basah buatan sebagai solusi rekayasa untuk penyerapan karbon. *Jurnal Himasapta*, 9(3), 157-162
- BPDAS Ake Malamo. (2010). Rencana Teknik Rehabilitasi Hutan dan Lahan DAS Ekosistem Mangrove dan Sempadan Pantai.
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111, 1-11.
- Giri, Chandra. (2021). Kemajuan Terkini Dalam Pemetaan dan Pemantauan Hutan Bakau di Dunia Menggunakan Data Satelit Observasi Bumi." *Penginderaan Jauh* 13.4: 563.
- Hidayah, Z., & Rachman, HA (2023). Pemetaan Kondisi Hutan Mangrove di Kawasan Pesisir Selat Madura Dengan Pendekatan Mangrove Health Index Memanfaatkan Citra Satelit Sentinel-2. (1), 84-9137, *Majalah Geografi Indonesia*
- IPCC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- I'zzuddiin, M., Alina, A. N., Mahardianti, M. A., Yahya, F., & Prabawa, S. E. (2025). Analisis Perubahan Indeks Kerapatan Vegetasi Mangrove Menggunakan Algoritma Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) di Pantai Timur Surabaya Berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). *Jurnal Geodesi Undip*, 14(1), 21-32.
- 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.
- Kauffman, J. B., & Donato, D. C. (2012). Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. CIFOR.
- Kemmala, D., & Althea, S. K. (2025). Buku Referensi Hukum Lingkungan Pada Proyek Konstruksi. In: PT Media Penerbit Indonesia.
- Latuconsina, H. (2010). Dampak Pemanasan Global Terhadap Ekosistem Pesisir dan Lautan. *Agrikan : Jurnal Ilmiah Agribisnis Perikanan*. Vol 3 : 30-37.
- Nasprianto, D.M. H. Mantiri, T. L. Kepel, R. N. A. Ati Dan A. Hutahaeen. (2016). Distribusi Karbon di Beberapa Perairan Sulawesi Utara (Carbon Distribution in North Sulawesi Waters), *J. Manusia Dan Lingkungan*, vol. 23, no. 1, pp 34-41.
- Nugroho, A., Fatmawati, N., & Harahap, D. (2024). Pemantauan Degradasi Mangrove Melalui Nilai NDVI dan Perubahan Stok Karbon di Kawasan Timur Indonesia. *Jurnal Penelitian Lingkungan dan Konservasi*, 10(2), 56-68.
- Rahman, Effendi, H., & Rusmana, I. (2017). Estimasi Stok dan Serapan Karbon Pada Mangrove di

- Sungai Tallo, Makassar. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 11(1), 19–28
- Rahman, S. A., Aziz, M. A., & Hasan, M. N. (2023). Assessment of Carbon Stock Based on Vegetation Indices in Coastal Mangroves. *Journal of Environmental Management*, 336, 117618. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117618>.
- Rahmanto, B. D. (2020). Peta Mangrove Nasional dan Status Ekosistem Mangrove di Indonesia. Webinar of Development for Mangrove Monitoring Tools in Indonesia.
- 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>.
- 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.
- Sari, DP, & Syaputra, M. (2022). Biomassa dan Serapan Karbon Hutan Mangrove Tanjung Batu, Desa Sekotong Tengah, Kabupaten Lombok Barat. *Jurnal Ilmu Hutan Avicennia*, 5 (2), 95-103.
- Septria, A., Alghifari, M. N., & Lawoliyo, J. (2025). Review of Evolution, Global Distribution, and Ecological Roles of Macroalgae in Tropical and Subtropical Marine Ecosystems. *Indonesian Journal of Tropical Biology*, 1(1), 9-18.
- 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.
- Sondak, A., & Calvyn, F. (2015). Estimasi Potensi Penyerapan Karbon Biru (Blue Carbon) Oleh Hutan Mangrove Sulawesi Utara" *Jurnal of Asean Studies on Maritime Issues*, vol. 1, no.1, pp 24-29.
- 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.
- Westlake, D. (1963). Comparisons of plant productivity. *Biological Reviews*, 38(3), 385-425.
- Yuan, H., Chen, B. Y., Li, Q., Shaw, S.-L., & Lam, W. H. (2018). Toward Space-Time Buffering for Spatiotemporal Proximity Analysis of Movement Data. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(6), 1211-1246.
- Wulandari, T., Arief, H., & Suryanto, R. (2024). Keterkaitan NDVI dan Cadangan Karbon Mangrove di Wilayah Pesisir Tropis Indonesia. *Jurnal Ekosistem Pesisir dan Laut*, 12(1), 34–45.