

Pemetaan Cadangan Karbon Di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat menggunakan Citra Sentinel-2a

(Carbon Stock Mapping in the Area of West Oesapa Mangrove Forest Ecotourism using Sentinel-2a Imaginery)

Maria Edelin¹, Yofris Puay¹, Aah Ahmad Almulqu^{1*}, Dimaz Danang Al-Reza², Khozanah Syifa¹, Dwi Wahyuni², Anasufi Banawi³

¹Program Studi Pengelolaan Hutan, Jurusan Kehutanan, Politeknik Pertanian Negeri Kupang, Kupang, Indonesia.

²Program Studi Manajemen Sumber Daya Hutan, Jurusan Kehutanan, Politeknik Pertanian Negeri Kupang, Kupang, Indonesia.

³Program Studi Pendidikan Guru Madrasah Ibtidaiyah, Universitas Islam Negeri Abdul Muthalib Sangadji Ambon.

*E-mail: ahmadalmulqu@yahoo.com

Abstrak: Penelitian ini dilatarbelakangi oleh adanya isu pemanasan global yaitu meningkatnya suhu rata-rata atmosfer bumi yang menyebabkan terjadinya perubahan iklim. Dalam upaya mitigasi perubahan iklim, hutan mangrove berperan penting dalam menyimpan dan menyerap karbon dalam jumlah yang besar dan menyimpannya dalam bentuk biomassa. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi potensi cadangan karbon yang tersimpan di kawasan Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat, mengestimasi serapan CO₂ dan mengetahui hubungan antara indeks vegetasi NDVI dengan stok/kandungan karbon. Penelitian ini dilaksanakan selama dua bulan yaitu pada bulan November sampai Desember 2023 di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat. Tahapan penelitian terdiri dari pra pengolahan citra, pengolahan citra, survei lapangan, dan analisis data. Rumus allometrik spesies digunakan untuk menghitung biomassa mangrove yang kemudian dikonversi menjadi nilai stok karbon di hutan mangrove. Citra Sentinel-2A ditransformasi dengan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), selanjutnya dilakukan analisis regresi antara nilai NDVI dan stok karbon untuk mendapatkan model pendugaan stok karbon menggunakan citra. Terdapat lima spesies mangrove yang ditemukan, yaitu *Sonneratia alba*, *Avicenia alba*, *Rhizophora stylosa*, *Rhizophora mucronata* dan *Burquiera*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa estimasi cadangan karbon yang tersimpan di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat sebesar 3.852,36 ton/ha. Estimasi serapan CO₂ di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat adalah sebesar 14,125.32 ton/ha. Hasil analisis korelasi person dengan koefisien korelasi sebesar 0.608 artinya variabel NDVI dengan cadangan karbon berkorelasi atau memiliki hubungan.

Kata Kunci: Biomassa, Karbon Mangrove, Perhitungan Alometrik, Citra Sentinel 2A, dan NDVI.

Abstract: This research is motivated by the prevailing issue of global warming, characterized by the increase in the average temperature of the Earth's atmosphere, leading to climate change. In climate change mitigation efforts, mangrove forests play an important role by effectively storing and absorbing substantial quantities of carbon, subsequently sequestering it in the form of biomass. This study aims to estimate the

potential of carbon stocks stored in the area of West Oesapa Mangrove Forest Ecotourism, estimate CO₂ uptake, and determine the correlation between NDVI vegetation index and carbon stock/storage. This research was conducted for two months, started from November to December 2023 at the West Oesapa Mangrove Forest Ecotourism. The research stages consisted of pre-image processing, image processing, field survey, and data analysis. The species allometric formula was utilized to calculate mangrove biomass, which was then converted into carbon stock values in mangrove forests. Sentinel-2A images were transformed with Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), then regression analysis was conducted between NDVI and carbon stock values to obtain a carbon stock estimation model using satellite imagery. There are five mangrove species found, namely *Sonneratia alba*, *Avicenia alba*, *Rhizophora stylosa*, *Rhizophora mucronate*, and *Burquiera*. The results indicated that the estimated carbon stock stored in the West Oesapa Mangrove Forest Ecotourism was 3,852.36 tons/ha. Meanwhile, the estimated CO₂ uptake in the West Oesapa Mangrove Forest Ecotourism is 14,125.32 tons/ha. The results of the person correlation analysis with a correlation coefficient of 0.608 means that the NDVI variable and carbon stocks are correlated or have a relationship.

Keywords: Biomass, Mangrove Carbon, Allometric Calculation, Sentinel 2A Imagery, NDVI

PENDAHULUAN

Pemanasan global merupakan meningkatnya suhu rata-rata atmosfer bumi dari tahun ke tahun sehingga menyebabkan terjadinya perubahan iklim. Peningkatan suhu atmosfer disebabkan oleh peningkatan gas rumah kaca yang dihasilkan dari aktivitas manusia seperti penggunaan bahan bakar fosil pada kendaraan bermotor/transportasi, deforestasi, dan degradasi hutan. Beberapa gas rumah kaca berkontribusi signifikan terhadap pemanasan global, salah satunya adalah karbon dioksida (CO₂). Deforestasi hutan mangrove di Indonesia melepaskan kurang lebih 190 juta ton karbon dioksida ekuivalen pertahun, yang setara dengan 42% dari total emisi akibat deforestasi nasional (Herlon *et al.*, 2025).

Salah satu langkah mitigasi yang dapat diterapkan untuk menekan peningkatan konsentrasi karbon dioksida adalah pemanfaatan konsep *blue carbon* yang memiliki kemampuan untuk menyimpan karbon organik dalam sedimen dengan jumlah yang besar dan jangka waktu yang lama (Sindri *et al.*, 2025). *Blue carbon* merupakan karbon yang terserap dan tersimpan di ekosistem pesisir dan laut, mencakup berbagai bentuk simpanan seperti biomassa dan sedimen dari hutan mangrove, rawa pasang surut, dan padang lamun (Anand *et al.*, 2020). Terdapat tiga ekosistem utama dalam konsep *blue carbon*, salah satu ekosistemnya yaitu ekosistem mangrove (Azzahra *et al.*, 2020). Ekosistem mangrove memiliki stok karbon yang sangat besar karena sebagian besar karbon tersimpan di sedimen, di mana sedimen mangrove menyimpan sekitar 70% dari total karbon ekosistem, sehingga menjadikan mangrove sebagai salah satu ekosistem dengan kapasitas penyimpanan karbon tertinggi dibandingkan ekosistem daratan lainnya (Zhang *et al.*, 2024). Hutan mangrove mampu menyerap karbon dioksida tiga kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan hutan daratan dan hutan hujan tropis (Suardana *et al.*, 2023). Melihat fungsi hutan mangrove sebagai penyerap karbon, informasi mengenai jumlah

karbon dalam suatu kawasan hutan mangrove menjadi sangat penting. Oleh karena itu, pengembangan metode estimasi stok karbon dan pemantauan perubahannya perlu dilakukan untuk memperoleh gambaran yang lebih akurat, khususnya pada biomassa mangrove di atas permukaan tanah (Yohana *et al.*, 2025).

Pengukuran cadangan karbon pada suatu wilayah dapat dilakukan estimasi menggunakan teknologi penginderaan jauh. Penggunaan teknologi penginderaan jauh mendukung perhitungan potensi karbon suatu kawasan secara efektif, karena mampu mencakup wilayah yang luas dalam waktu yang singkat dengan kebutuhan biaya yang lebih efisien. Penginderaan jauh dapat dimanfaatkan sebagai alternatif dalam menghitung cadangan karbon pada vegetasi mangrove, melalui penggunaan citra satelit yang memiliki sensor yang sensitif terhadap tanaman hijau, sehingga mampu menghasilkan perkiraan cadangan karbon di hutan mangrove (Emelia, 2021). Salah satu jenis citra yang digunakan adalah citra dari satelit Sentinel-2A. Citra Sentinel-2A memiliki resolusi yang cukup tinggi, yaitu mencapai 10 m, sehingga citra Sentinel-2A sangat cocok digunakan untuk pemetaan stok karbon mangrove baik secara spasial maupun temporal (Albasit *et al.*, 2022). Selain itu, Citra Sentinel-2A memiliki resolusi temporal yang tinggi, sehingga mendukung untuk pengukuran, pemantauan, dan pengelolaan ekosistem hutan dan cadangan karbon secara berkala (Mngadi *et al.*, 2021).

Parameter Citra Sentinel-2A yang digunakan dalam proses estimasi biomassa dengan menggunakan indeks vegetasi *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), yaitu indeks yang didapatkan melalui operasi matematis seperti penjumlahan, pengurangan, dan perbandingan antara band near infrared dengan band red pada citra satelit Sentinel-2A (Situmorang *et al.*, 2016). Indeks vegetasi NDVI mampu mempresentasikan sebaran distribusi dan tingkat kerapatan vegetasi mangrove di wilayah pesisir dan pulau-pulau (Singgalen *et al.*, 2021).

Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat terletak di Kelurahan Oesapa Barat Kecamatan Kelapa Lima Kota Kupang Provinsi Nusa Tenggara Timur. Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat merupakan satu-satunya destinasi ekowisata mangrove di Kota Kupang yang dikelola oleh Pemerintah Kota Kupang, yang memiliki keunggulan pemandangan alam dengan struktur vegetasi yang rapat, serta memiliki keanekaragaman biota dan fauna yang berasosiasi dengan vegetasi mangrove yang dapat diobservasi secara langsung melalui jalur yang telah disediakan pengelola berupa jembatan mangrove (Boikh *et al.*, 2023). Wilayah ini memiliki ekosistem mangrove yang berfungsi penting dalam melindungi garis pantai, mendukung biodiversitas lokal dan vegetasi yang bervariasi baik dalam tingkat kerapatan vegetasi maupun komposisi spesies mangrove (Peny *et al.*, 2025). Selain itu, kawasan ini merupakan wilayah perkotaan yang berbatasan langsung dengan pemukiman penduduk. Kawasan perkotaan merupakan sumber emisi karbon yang signifikan akibat intensitas aktivitas penduduk dan penggunaan energi yang tinggi (Luqman *et al.*, 2023). Semakin tingginya aktivitas penduduk di suatu wilayah, maka jumlah emisi karbon yang dihasilkan akan meningkat (Sodikin *et al.*, 2024). Oleh karena itu, keberadaan hutan mangrove Oesapa Barat sangat penting sebagai penyerap dan menurunkan emisi CO₂ yang dihasilkan dari aktifitas masyarakat di wilayah perkotaan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengestimasi potensi cadangan karbon di atas permukaan tanah yang tersimpan di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat, mengestimasi serapan CO₂ dan mengetahui hubungan antara indeks vegetasi NDVI dengan stok/kandungan karbon.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November sampai Desember 2025 bertempat di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat. Secara administrasi, Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa terletak di Kelurahan Oesapa Barat Kecamatan Kelapa Lima Kota Kupang Provinsi Nusa Tenggara Timur, dengan luasan kawasan ± 12 ha.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kombinasi antara penginderaan jauh dan metode terestrial, termasuk verifikasi lapangan dan pengukuran vegetasi mangrove. Teknik pengambilan sampel yang digunakan adalah Stratified Random Sampling, yang dilakukan pada setiap kelas kerapatan vegetasi dalam bentuk plot sampe. Pengambilan data biomassa dan karbon pada mangrove mengacu pada panduan pengukuran dan perhitungan cadangan karbon berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 7724 : 2011) tahun 2011. Pengambilan data di lapangan dilakukan secara *non-destruktif*, yaitu cara pengambilan sampel dengan melakukan pengukuran tanpa pemanenan pada bagian-bagian tumbuhan. Parameter yang diukur adalah diameter, dan spesies/jenis pohon. Diameter atau dbh (*diameter at breast height*) digunakan sebagai parameter penduga biomassa diatas permukaan tanah. Jenis data yang dikumpulkan dalam penelitian ini terdiri dari:

1. Data Primer

Data primer merupakan data yang diperoleh dari hasil pengamatan dan pengukuran langsung di lapangan. Data primer yang dikumpulkan meliputi jenis/spesies pohon, diameter pohon (*dbh*), tinggi semai, titik koordinat plot sampel, *shapefile* Hutan Mangrove Oesapa Barat, dan citra Sentinel-2A.

Citra Sentinel-2 memiliki keunggulan berupa 13 saluran multispektral, resolusi temporal 5 hari, dan terdiri atas tiga resolusi spasial yaitu resolusi spasial 10 m, 20 m, dan 60 m (Rahmadi *et al.*, 2022). Pengolahan data citra Sentinel-2 dalam penelitian ini terdiri dari dua tahap yaitu pra-pengolahan citra dan pengolahan citra.

a. Tahap Pra-Pengolahan Citra

Tahapan pra-pengolahan citra meliputi koreksi atmosferik, *cropping*, dan *resampling*. Pada penelitian ini koreksi radiometrik dan geometrik tidak dilakukan karena citra Sentinel-2 telah terkoreksi radiometrik maupun geometrik dan dalam keadaan BOA (*Bottom Of Reflectance*) sehingga menampilkan hasil pantulan aktual dari permukaan bumi (Wolters *et al.*, 2025). Tahapan pra-pengolahan citra adalah sebagai berikut:

- 1) Koreksi atmosferik bertujuan untuk menghilangkan efek atmosfer yang direkam sehingga dapat menghasilkan data dengan peningkatan akurasi dari reflektan. Metode yang digunakan dalam koreksi atmosferik adalah metode *Dark Object Subtraction* (DOS), bertujuan untuk mengurangi gangguan dari atmosfer dan memperjelas dalam mengenali objek saat diinterpretasikan.
- 2) *Cropping* atau pemotongan citra dilakukan untuk memotong area yang diperlukan untuk penelitian sehingga analisis dapat lebih difokuskan pada wilayah tertentu. Selain itu, pemotongan citra bertujuan untuk memperkecil ukuran file dari citra agar mempercepat proses pengolahan citra.
- 3) *Resampling* bertujuan untuk menyamakan resolusi setiap band pada citra Sentinel-2 karena terdapat beberapa band yang memiliki resolusi spasial berbeda (10 m, 20 m, 60 m), sehingga resolusi seluruh band disamakan menjadi 10 m (Pratama *et al.*, 2019).

- b. Tahap Pengolahan Citra
- 1) Penyusunan citra komposit: Interpretasi vegetasi mangrove pada citra Sentinel-2A dilakukan dengan kombinasi band 4-3-2 (*Natural Color*) dengan menggunakan band 4 (Red: 665 nm) pada kanal merah, band 3 (Green: 560 nm) pada kanal hijau, dan band 2 (Blue: 490 nm) pada kanal biru (Adinegoro et al., 2023).
 - 2) Masking citra: Masking citra bertujuan untuk memisahkan wilayah mangrove dengan wilayah bukan mangrove. Nilai pixel wilayah daratan diubah menjadi nol dan diperhalus dengan *shapefile* agar proses klasifikasi tidak dipengaruhi oleh nilai daratan.
 - 3) Transformasi indeks vegetasi: Indeks vegetasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), yang biasanya digunakan untuk mengetahui tingkat kehijauan vegetasi pada citra. Nilai NDVI mempunyai rentang antara -1 (minus) hingga 1 (positif). Dalam proses transformasi indeks vegetasi NDVI membutuhkan band 4 sebagai band merah dan band 8 sebagai band inframerah dekat. Kategori kerapatan mangrove berdasarkan nilai NDVI dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kategori Kerapatan Mangrove Berdasarkan Nilai NDVI

Kelas	Kategori mangrove	Kerapatan (ind/ha)	Nilai NDVI
1	Jarang	< 1000	-1 – 0.33
2	Sedang	1000 - < 1500	0.33 – 0.42
3	Rapat	≥1500	0.42 - 1

2. Data Sekunder

Data sekunder merupakan data-data yang diperoleh dari studi pustaka atau studi literatur berupa gambaran umum kawasan, peta RBI, persamaan alometrik untuk menghitung biomassa, serta data pendukung lain yang dibutuhkan.

Teknik pengambilan sampel dalam penelitian ini menggunakan metode *Stratified random sampling*. Menurut IPCC (2006), metode *Stratified sampling* sangat disarankan untuk digunakan dalam pengukuran jumlah karbon di Indonesia karena memiliki variasi kandungan karbon yang sangat tinggi. Dalam penelitian ini plot yang digunakan berbentuk persegi dengan ukuran 10 m x 10 m menyesuaikan ukuran pixel pada citra Sentinel-2A. Untuk mengetahui jumlah plot yang dibutuhkan, terlebih dahulu dilakukan *pre assessment* (pendugaan awal) kandungan karbon dengan cara membagi lima plot pada masing-masing strata/kelas. Pendugaan awal cadangan karbon dari biomassa di atas permukaan tanah hanya dilakukan pengukuran pada tingkat pohon. Cadangan karbon yang diperoleh dari hasil *pre assessment* dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Kandungan Karbon pada Tahap *Pre Assessment*

No Plot	Kandungan karbon tingkat pohon (ton/ha)		
	Rapat	Sedang	Jarang
1	26.12	4.15	2.27
2	36.55	16.15	1.94
3	29.28	46.79	14.84

4	24.45	14.06	2.68
5	44.05	34.15	11.01
Rata-rata	32.09	23.06	6.55
Luas (Ha)	4.39	1.02	1.62
Varians	66.21	293.18	35.75

Luas kawasan Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat yang akan dilakukan pendugaan cadangan karbon seluas ± 7.03 ha. Luas masing-masing strata yaitu 4.39 ha pada vegetasi kerapatan tinggi, 1.02 ha pada vegetasi kerapatan sedang, dan 1.62 ha pada vegetasi kerapatan rendah. Standar eror yang digunakan sebesar 10% dengan tingkat kepercayaan 90%. Adapun rumus penentuan total jumlah plot dengan alokasi setiap strata adalah sebagai berikut (Kauffman *et al.*, 2020):

1. Total jumlah plot

$$n = \frac{N \cdot \sum N_h \cdot S^2_{yst}}{N^2 \left[\frac{SE \cdot \bar{y}_{st}}{t} \right]^2 + \sum N_h \cdot S^2_{yst}}$$

2. Jumlah plot setiap strata/kelas

$$n_h = \frac{N_h}{N} \cdot n$$

Keterangan:

N : Ukuran populasi (dinyatakan dalam luas areal atau banyaknya plot)

N : Total jumlah plot yang dibutuhkan

n_h : Jumlah plot setiap strata

N_h : Ukuran setiap strata (dinyatakan dalam luas areal atau banyaknya plot)

SE: Standar eror

T : Tingkat kepercayaan

y_{st} : Rata-rata dari nilai peubah yang diukur (cadangan karbon) setiap strata

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh jumlah total plot yang dibutuhkan sebanyak 46 plot. Dengan sebaran jumlah plot pada setiap strata yaitu 29 plot untuk vegetasi kerapatan tinggi, 6 plot untuk vegetasi kerapatan sedang dan 11 plot untuk vegetasi kerapatan rendah.

Klasifikasi NDVI menggunakan perangkat lunak ArcGIS 10.8 dibagi menjadi tiga kelas kerapatan vegetasi. Adapun rumus perhitungan klasifikasi NDVI pada citra Sentinel-2A adalah sebagai berikut (Trigunasih *et al.*, 2022).

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

Keterangan : NIR = band 8, RED = band 4

Persamaan alometrik dari beberapa spesies/jenis mangrove disajikan pada Tabel

3. Sedangkan berat jenis pada beberapa spesies mangrove dapat dilihat pada Tabel 4

Tabel 3. Persamaan Alometrik dari Beberapa Jenis/Spesies Mangrove

No	Spesies mangrove	Persamaan	Sumber
1.	<i>Avicennia alba</i>	$B = 0.079211 (DBH)^{2.470895}$	(Sutaryo, 2009)
2.	<i>Rhizophora stylosa</i>	$B = 0.251 * p (DBH)^{2.46}$	(Komiyama, 2008)
3.	<i>Sonetaria alba</i>	$B = 0.3841 * p (DBH)^{2.101}$	(Kauffman & Cole, 2010)
4.	<i>Burguiera</i>	$B = 0.0754 * p (DBH)^{2.505}$	(Darmawan & Siregar, 2008)
5.	<i>Rhizophora mucronata</i>	$B = 0.1466 (DBH)^{2.3136}$	(Darmawan & Siregar, 2008)

Keterangan: B = biomassa diatas permukaan tanah (kg), DBH = diameter setinggi dada (cm).

Tabel 4. Berat Jenis Kayu untuk Spesies Mangrove

No	Spesies mangrove	Berat jenis (g/cm ³)
1.	<i>Rhizophora stylosa</i>	1.05
2.	<i>Sonetaria alba</i>	0.078
3.	<i>Burguiera</i>	0.741

Dalam SNI 7724: 2011, cadangan karbon dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$C_b = B \times \% C \text{ organik}$$

Keterangan :

C_b = kandungan karbon dari biomassa (kg)

B = total biomassa (kg)

%C-organik = nilai presentase kandungan karbon sebesar 47%

Data kandungan karbon digunakan untuk mengetahui serapan CO₂. Kandungan karbon dikonversi ke dalam CO₂ menggunakan persamaan (Dhamawan dan Siregar, 2008) berikut:

$$CO_2 = \frac{Bm. CO_2}{Ba. C} \times C$$

Keterangan:

CO₂ = serapan karbondioksida (ton/ha)

Bm. CO₂ = berat molekul relatif senyawa CO₂

Ba. C = berat relatif atom C

C = kandungan karbon (ton/ha)

Setelah perhitungan cadangan karbon dan serapan CO₂, selanjutnya dilakukan analisis hubungan antara indeks vegetasi dengan kandungan karbon. Indeks vegetasi digunakan untuk menggambarkan kondisi dan kerapatan vegetasi yang diduga berkaitan dengan kandungan karbon.

Uji normalitas diperlukan untuk melakukan pengujian-pengujian variabel lainnya dengan mengasumsi bahwa nilai residual mengikuti distribusi normal (Kurniawati, 2020). Uji normalitas yang digunakan adalah uji *Kolmogorov-Smirnov* menggunakan *Software* SPSS 26. Hipotesis yang digunakan adalah:

1. H_0 : indeks vegetasi berdistribusi normal
2. H_1 : indeks vegetasi tidak berdistribusi normal

Kriteria pengambilan keputusan:

1. Nilai signifikan < 0.05, data tidak berdistribusi normal (H_0 ditolak).
2. Nilai signifikan > 0.05 maka data berdistribusi normal (H_0 diterima) dan data layak digunakan untuk dianalisis.

Uji koefisien korelasi (r) bertujuan untuk mengetahui kekuatan hubungan antara nilai indeks vegetasi dengan nilai cadangan karbon dari perhitungan di lapangan. Dasar pengambilan Keputusan adalah sebagai berikut:

1. Jika nilai signifikan < 0.05 maka kedua variabel berkorelasi
2. Jika nilai signifikan > 0.05 maka kedua variabel tidak berkorelasi
3. Jika nilai signifikan tepat 0.05 maka dapat membandingkan uji korelasi pearson dengan r tabel dengan ketentuan jika uji korelasi pearson $> r$ tabel maka berhubungan. Sedangkan jika uji korelasi pearson $< r$ tabel maka tidak berhubungan (Jabnabillah & Margina, 2022).

Analisis regresi bertujuan untuk mengetahui pengaruh suatu variabel terhadap variabel lain. Analisis ini menggunakan dua variabel yaitu data penginderaan jauh sebagai variabel bebas dan data karbon lapangan sebagai variabel terikat (Permatasari *et al.*, 2025). Model regresi yang digunakan adalah polinomial dengan persamaan sebagai berikut :

$$Y = a + bX + cX^2 + dX^3$$

Keterangan:

Y = Nilai stok karbon mangrove

X = Nilai NDVI

a,b,c,d = Koefisien

HASIL DAN PEMBAHASAN

Klasifikasi NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) merupakan suatu nilai hasil pengolahan indeks vegetasi dari citra satelit kanal infra merah dan kanal merah yang menunjukkan tingkat konsentrasi klorofil daun yang berkorelasi dengan kerapatan vegetasi berdasarkan nilai spektral pada setiap pixel. Nilai NDVI mempunyai rentang antara -1 hingga $+1$ (Lestari & Rahadian, 2017). Klasifikasi nilai NDVI menggunakan software Arcgis 10.8 yang dibagi menjadi 3 kelas kerapatan vegetasi. Kelas 1 merupakan vegetasi kerapatan rendah, kelas 2 merupakan vegetasi dengan kerapatan sedang, dan kelas 3 merupakan vegetasi dengan kerapatan tinggi. Adapun luas masing-masing kelas vegetasi (strata) dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Klasifikasi Nilai NDVI

Kelas	Kerapatan Vegetasi	Nilai NDVI	Luas (ha)	Persentase (%)
1	Vegetasi kerapatan rendah	$-1 < NDVI < 0.33$	1.62	23.04
2	Vegetasi kerapatan sedang	$0.33 < NDVI < 0.42$	1.02	14.51
3	Vegetasi kerapatan tinggi	$0.42 < NDVI < 1$	4.39	62.45
Total			7.03	100

Biomassa dan Cadangan Karbon

Biomassa adalah berat bahan organik per satuan unit area pada waktu tertentu. Pendugaan cadangan karbon yang tersimpan di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa dilakukan dengan menghitung biomassa diatas permukaan tanah (*above ground biomass*) berupa tegakan vegetasi. Pendugaan biomassa diawali dengan membuat plot pengamatan berukuran $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ pada tiga kelas kerapatan vegetasi. Pengambilan data di lapangan dilakukan secara non-destruktif dengan parameter yang diukur adalah diameter pohon

(tingkat pancang dan pohon) setinggi dada. Berdasarkan hasil pengukuran di lapangan, ditemukan sebanyak lima jenis mangrove diantaranya *Sonneratia alba*, *Avicenia alba*, *Rhizophora stylosa*, *Rhizophora mucronata* dan *Burquiera*.

Nilai biomassa yang telah diperoleh kemudian digunakan untuk menduga cadangan karbon yang tersimpan di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat. Cadangan karbon yang dihitung melalui pendekatan biomassa, dimana 47% dari biomassa merupakan simpanan/cadangan karbon yang mengacu pada panduan Standar Nasional Indonesia (SNI 7724:2011). Cadangan karbon pada setiap plot sampel dapat dilihat pada Tabel 6.

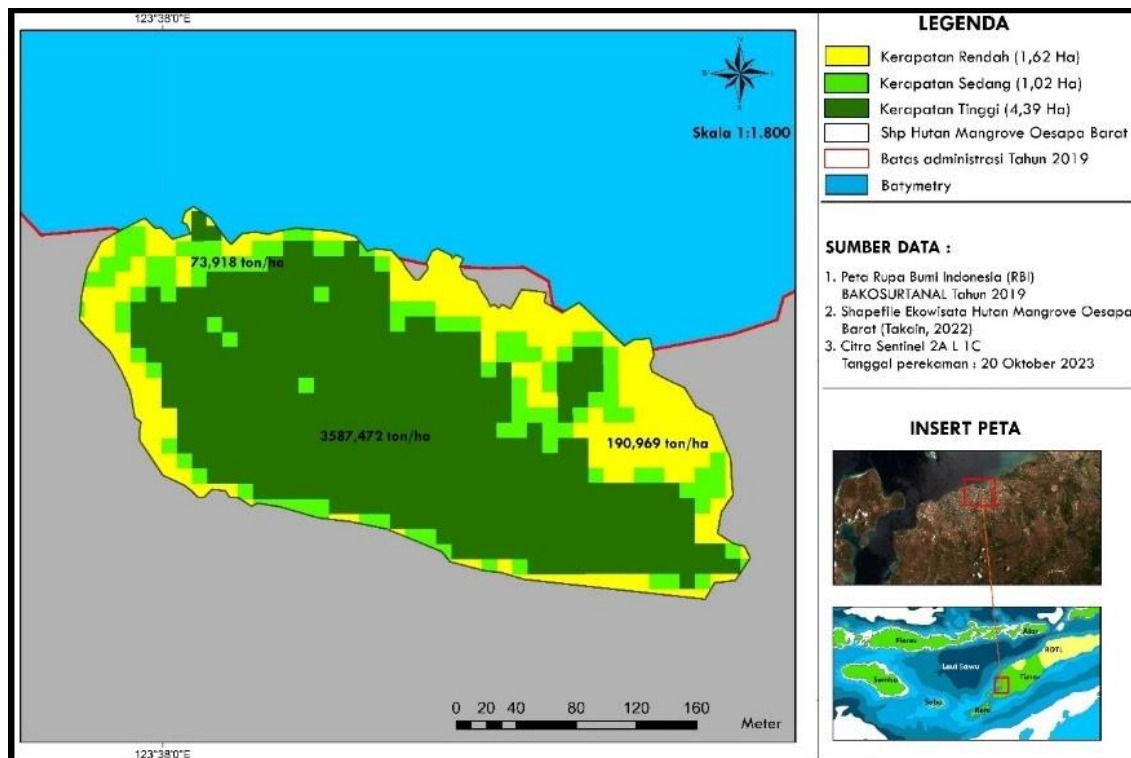
Tabel 6. Jumlah Cadangan Karbon Setiap Plot

No Plot	Nilai NDVI	Koordinat		Cadangan karbon (ton/ha)
		Latitude	Longitude	
1	0.35739	10° 8' 44,824" S	123° 38' 10,851" E	40.5054
2	0.57672	10° 8' 44,230" S	123° 38' 10,835" E	35.8716
3	0.42942	10° 8' 43,152" S	123° 38' 11,358" E	2.7109
4	0.52885	10° 8' 42,464" S	123° 38' 7,955" E	23.2828
5	0.23447	10° 8' 42,119" S	123° 38' 10,955" E	14.8389
6	0.35155	10° 8' 42,499" S	123° 38' 10,452" E	17.2214
7	0.5721	10° 8' 43,043" S	123° 38' 9,359" E	34.9342
8	0.6299	10° 8' 44,035" S	123° 38' 8,568" E	20.0308
9	0.565008	10° 8' 43,288" S	123° 38' 6,953" E	19.423
10	0.63082	10° 8' 42,753" S	123° 38' 5,459" E	43.8467
11	0.61303	10° 8' 41,379" S	123° 38' 4,445" E	34.929
12	0.49586	10° 8' 39,789" S	123° 38' 5,522" E	26.1119
13	0.52311	10° 8' 39,040" S	123° 38' 3,960" E	12.5219
14	0.41995	10° 8' 38,366" S	123° 38' 3,535" E	46.7954
15	0.44669	10° 8' 38,206" S	123° 38' 2,211" E	36.716
16	0.47582	10° 8' 39,043" S	123° 38' 2,358" E	16.914
17	0.58816	10° 8' 40,184" S	123° 38' 2,166" E	44.0539
18	0.32154	10° 8' 38,083" S	123° 38' 0,282" E	11.2455
19	0.24947	10° 8' 41,815" S	123° 38' 9,570" E	14.295
20	0.25337	10° 8' 38,405" S	123° 37' 58,874" E	19.308
21	0.54781	10° 8' 39,714" S	123° 38' 0,887" E	21.773
22	0.46474	10° 8' 39,333" S	123° 37' 59,456" E	2.624
23	0.2555	10° 8' 41,413" S	123° 38' 10,336" E	2.2732
24	0.29346	10° 8' 40,593" S	123° 37' 59,758" E	4.5282
25	0.19242	10° 8' 39,489" S	123° 38' 8,455" E	1.946
26	0.20912	10° 8' 41,829" S	123° 37' 59,839" E	23.3035
27	0.28363	10° 8' 42,298" S	123° 38' 0,236" E	14.3882
28	0.25786	10° 8' 40,734" S	123° 38' 10,704" E	12.8763
29	0.4026	10° 8' 39,931" S	123° 38' 9,508" E	6.8377
30	0.44068	10° 8' 40,341" S	123° 38' 8,938" E	9.613
31	0.39259	10° 8' 41,507" S	123° 38' 8,503" E	5.394

No Plot	Nilai NDVI	Koordinat		Cadangan karbon (ton/ha)
		Latitude	Longitude	
32	0.45013	10° 8' 40,098" S	123° 38' 7,496" E	15.152
33	0.64467	10° 8' 41,347" S	123° 38' 6,636" E	13.7993
34	0.65705	10° 8' 42,255" S	123° 38' 6,331" E	75.911
35	0.6107	10° 8' 42,780" S	123° 38' 4,175" E	9.574
36	0.60866	10° 8' 42,049" S	123° 38' 2,993" E	55.788
37	0.6584	10° 8' 42,077" S	123° 38' 1,507" E	66.589
38	0.62288	10° 8' 40,802" S	123° 38' 0,766" E	72.4426
39	0.63055	10° 8' 40,872" S	123° 38' 1,864" E	49.2666
40	0.45773	10° 8' 40,392" S	123° 38' 2,816" E	18.409
41	0.53101	10° 8' 40,255" S	123° 38' 4,415" E	46.1232
42	0.408	10° 8' 39,221" S	123° 38' 4,907" E	16.369
43	0.42634	10° 8' 37,067" S	123° 38' 0,609" E	13.2669
44	0.2542	10° 8' 38,223" S	123° 38' 5,859" E	11.006
45	0.19956	10° 8' 38,903" S	123° 38' 6,605" E	0.0489
46	0.52707	10° 8' 39,647" S	123° 38' 6,553" E	17.3901

Kandungan karbon di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat diklasifikasikan ke dalam tiga kelas kerapatan vegetasi, yaitu kerapatan rendah, sedang, dan tinggi. Pengelompokan kelas biomassa ini bertujuan untuk mempermudah interpretasi spasial informasi cadangan karbon yang ditampilkan dalam peta. Berdasarkan Peta Cadangan Karbon pada Gambar 1, terlihat bahwa distribusi karbon tidak merata pada setiap kelas kerapatan vegetasi. Kelas kerapatan vegetasi rendah memiliki estimasi cadangan karbon sebesar 190.97 ton/ha, sedangkan kelas kerapatan vegetasi sedang menunjukkan nilai yang lebih rendah, yaitu 73.92 ton/ha. Sebaliknya, kelas kerapatan vegetasi tinggi menyimpan cadangan karbon paling besar, yakni sebesar 3,587.47 ton/ha.

Dominasi cadangan karbon pada kelas kerapatan tinggi mengindikasikan bahwa semakin rapat dan berkembang struktur vegetasi mangrove, semakin besar pula kemampuan ekosistem dalam menyimpan karbon. Secara keseluruhan, estimasi cadangan karbon yang tersimpan di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat berdasarkan analisis citra Sentinel-2A mencapai 3,852.36 ton/ha, yang menegaskan peran penting kawasan mangrove ini sebagai penyerap dan penyimpan karbon dalam mitigasi perubahan iklim.



Gambar 1. Peta Cadangan Karbon di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat

Serapan CO₂ pada Vegetasi Mangrove di Kawasan Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat

Karbondioksida (CO₂) merupakan salah satu komponen utama yang diserap oleh vegetasi dalam proses fotosintesis untuk membentuk karbohidrat, yang selanjutnya disimpan dalam bentuk biomassa tanaman (Uthbah *et al.*, 2017). Oleh karena itu, besarnya biomassa vegetasi menjadi indikator penting dalam menentukan jumlah cadangan karbon sekaligus kemampuan serapan CO₂ suatu ekosistem. Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 7, terlihat adanya perbedaan kemampuan serapan CO₂ pada setiap kelas kerapatan vegetasi di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat. Kelas kerapatan vegetasi rendah memiliki estimasi serapan CO₂ sebesar 700.22 ton/ha, sedangkan pada kelas kerapatan vegetasi sedang nilai serapan CO₂ lebih rendah, yaitu sebesar 271.03 ton/ha. Sebaliknya, kelas kerapatan vegetasi tinggi menunjukkan kemampuan serapan CO₂ yang sangat dominan, yakni mencapai 13,154.06 ton/ha. Tingginya nilai serapan CO₂ pada kelas kerapatan vegetasi tinggi mengindikasikan bahwa struktur vegetasi mangrove yang rapat dan berkembang optimal berperan signifikan dalam menyerap karbondioksida dari atmosfer. Secara keseluruhan, total estimasi serapan CO₂ di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat mencapai 14,125.32 ton/ha, yang menegaskan pentingnya kawasan mangrove ini sebagai penyerap karbon alami.

Tabel 7. Serapan CO₂ di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa

Kelas	Luas (ha)	Stok Karbon (ton/ha)	Serapan CO ₂ (ton/ha)
1	1.62	190.97	700.22
2	1.02	73.92	271.03
3	4.39	3,587.47	13,154.06
	Total	3,852.36	14,125.32

Hubungan Antara Indeks Vegetasi dengan Kandungan Karbon

Dalam kajian ini, telah dilakukan uji normalitas data yang bertujuan untuk mengetahui apakah variabel bebas yang digunakan terdistribusi secara normal terhadap variabel terikat atau tidak. Berdasarkan hasil uji normalitas tersebut, diperoleh nilai signifikan sebesar 0.20 artinya > 0.05 maka data tersebut berdistribusi normal dan layak digunakan untuk analisis regresi dan korelasi.

Kemudian dilakukan analisis regresi yang akan menghasilkan persamaan untuk membandingkan data karbon lapangan dengan hasil pada transformasi indeks vegetasi (Frananda *et al.*, 2015). Analisis regresi digunakan untuk mengestimasi nilai dari suatu variabel berdasarkan nilai variabel lainnya, yaitu variabel terikat (*dependent variabel*) dan variabel bebas (*independent variabel*). Persamaan regresi yang telah didapatkan kemudian diaplikasikan pada citra Sentinel-2A sehingga dapat mengestimasi cadangan karbon mangrove di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat secara keseluruhan. Analisis regresi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan regresi non-linear yaitu regresi polinomial (kubik). Persamaan regresi yang digunakan yaitu $Y = -37.736 + 444.26 X - 1321 X^2 + 1307 X^3$ dengan nilai R^2 sebesar 0.549. Persamaan yang didapat melalui analisis regresi dari transformasi indeks vegetasi NDVI kemudian digunakan untuk mengetahui besar cadangan karbon pada kawasan Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat.

Model dikatakan baik apabila memiliki nilai $R^2 > 0.5$ dan cenderung mendekati angka 1 (Muhsoni, 2021). Dengan demikian, semakin besar nilai R^2 menunjukkan bahwa korelasi antara indeks vegetasi dengan cadangan karbon semakin baik. Nilai R^2 yang didapatkan dalam penelitian ini lebih rendah dibandingkan penelitian (Muhsoni *et al.*, 2018), di Pamekasan, yakni sebesar 0.869 dari analisis regresi non-linier antara NDVI dan stok karbon menggunakan citra Sentinel-2. Sementara itu, dalam penelitian (Karmila *et al.*, 2020) yang berjudul “*Estimasi Cadangan Karbon Menggunakan Analisis NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) di KHDTK Universitas Lambung Mangkurat*” mendapatkan nilai R^2 yang lebih tinggi yaitu sebesar 0.909 menggunakan analisis regresi non-linear.

Berdasarkan hasil analisis korelasi, nilai signifikan pada variabel NDVI dan kandungan karbon yaitu sebesar 0.001, artinya $0.001 < 0.05$. Dengan demikian maka variabel NDVI dan kandungan karbon memiliki hubungan atau berkorelasi. Diketahui nilai R tabel dengan jumlah sampel 46 dan taraf signifikan sebesar 5% adalah 0.29. Jika nilai R hitung $> R$ tabel maka terdapat korelasi atau hubungan antara kedua variabel. Nilai R hitung (*Pearson correlation*) pada kandungan karbon sebesar 0.608 artinya > 0.29 . Maka dapat disimpulkan bahwa nilai NDVI berkorelasi dengan cadangan karbon. Nilai R hitung bernilai positif, maka bentuk hubungan antara variabel NDVI dan cadangan karbon adalah positif atau searah, artinya semakin tinggi nilai NDVI maka semakin tinggi

pula kandungan karbon pada suatu kawasan. Sebaliknya semakin rendah nilai NDVI maka semakin rendah cadangan karbon pada suatu kawasan.

Nilai *Pearson Correlation* pada variabel NDVI dan kandungan karbon sebesar 0.608 sehingga dapat disimpulkan bahwa tingkat hubungan nilai Korelasi Pearson berada pada interval 0.60 - 0.799 artinya memiliki tingkat hubungan atau korelasi yang kuat. Sebesar 60.8 % nilai NDVI berkorelasi dengan cadangan/kandungan karbon di lapangan. Sedangkan 39.2 % lainnya berhubungan dengan faktor lain yang tidak diuji. Umumnya, total kandungan karbon sangat dipengaruhi oleh jenis pohon, diameter pohon dan kerapatan kayu (berat jenis) namun faktor kerapatan tidak memberikan total karbon apabila diameter pohonnya kecil. Hal ini sesuai dengan penelitian (Putri & Wulandari, 2015), besarnya biomassa dan cadangan karbon dipengaruhi oleh diameter batang. Dengan demikian, faktor lain yang mempengaruhi besarnya stok/cadangan karbon dipengaruhi oleh spesies/jenis, diameter pohon, dan kerapatan kayu (berat jenis).

KESIMPULAN

Estimasi cadangan karbon yang tersimpan di Ekowisata Hutan Mangrove Oesapa Barat adalah 3,852.36 ton/ha. Cadangan karbon tersebut bervariasi pada setiap kelas kerapatan vegetasi, di mana pada kelas kerapatan rendah tercatat sebesar 190.97 ton/ha, kelas kerapatan sedang sebesar 73.92 ton/ha, dan didominasi oleh kelas kerapatan tinggi dengan estimasi mencapai 3,587.47 ton/ha. Sejalan dengan besarnya cadangan karbon, estimasi serapan CO₂ di kawasan ini mencapai 14,125.32 ton/ha, dengan kontribusi serapan CO₂ pada kelas kerapatan vegetasi rendah sebesar 700.22 ton/ha, kelas kerapatan sedang sebesar 271.03 ton/ha, dan kelas kerapatan tinggi sebagai penyumbang terbesar yaitu 13,154,06 ton/ha. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa nilai NDVI memiliki korelasi positif yang kuat terhadap kandungan karbon dengan koefisien korelasi sebesar 0,608, yang mengindikasikan bahwa semakin tinggi nilai NDVI suatu kawasan, maka semakin besar pula cadangan karbon yang tersimpan, dan sebaliknya nilai NDVI yang rendah mencerminkan cadangan karbon yang lebih kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Adinegoro, R. D. S., Putra, I. D. N. N., & Putra, I. N. G. (2023). Pemetaan Perubahan Luasan Mangrove Menggunakan Citra Sentinel-2A Pasca Kematian Massal Mangrove di Denpasar-Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 8(1): 66. DOI:10.24843/jmas.2022.v08.i01.p08
- Albasit, L. Z., Pribadi, R., & Pramesti, R. (2022). Estimasi Stok Karbon Mangrove Pasca Rehabilitasi di Desa Kaliwlingi, Brebes Menggunakan Citra Sentinel-2. 11(4): 620–640.
- Anand, A., Pandey, P.C., Petropoulos, G.P., Pavlides, A., Srivastava, P.K., Sharma, J.K., Malhi, R.K.M. (2020). Use of hyperion for mangrove forest carbon stock assessment in bhitaranika forest reserve: A contribution towards blue carbon initiative. *Remote Sens*. 12(4): 1-25. DOI:10.3390/rs12040597
- Azzahra, F. S., Suryanti, S., & Febrianto, S. (2020). Estimasi serapan karbon pada hutan mangrove Desa Bedono, Demak, Jawa Tengah. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 4(2): 308–315.

- Boikh, L.I., Djonu, A., Kiak, N.T., Bria, J.O. (2023). Pengembangan Kegiatan Ekowisata Mangrove Di Oesapa Barat Melalui Digital Marketing Produk Otak-Otak. *Prosiding Seminar*, 148–157.
- Emelia, D.V. (2021). Estimation of Mangrove Carbon Stock Using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Probolinggo, East Java. *Geogr. Sci. Educ. J.* 3(2): 92-98. DOI:10.31327/gsej.v3i2.1689
- Frananda, H., Hartono, & Jatmiko, H. (2015). Komparasi Indeks Vegetasi untuk Estimasi Stok Karbon Hutan Mangrove Kawasan Segoro Anak pada Kawasan Taman Nasional Alas Purwo Banyuwangi, Jawa Timur. *Majalah Ilmiah Globe*, 17(2): 113–123.
- Herlon, M., Ridho, Z., Mustaqim, M., Andrina, H., Metananda, A.A., Masruri, N.W., ... (2025). Analysis of factors influencing coastal community behavior in mangrove forest management in Riau Province, Indonesia. *AAFL Bioflux*, 18(4): 1719–1730.
- Jabnabillah, F., & Margina, N. (2022). Analisis korelasi pearson dalam menentukan hubungan antara motivasi belajar dengan kemandirian belajar pada pembelajaran daring. *Jurnal Sintak*, 1(1): 14-18.
- Karmila, D., Jauhari, A., Kanti, R. (2020). Estimasi Cadangan Karbon Menggunakan Analisis NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) di KHDTK Universitas Lambung Mangkurat. *Jurnal Sylva Scientiae*, 3(3): 451-459. DOI:10.20527/jss.v3i3.2178
- Kauffman, B. J., Adame, F. M., Arifanti, B. V., Schile-Beers, L. M., Bernardino, A. F., Bhomia, R. K., ... (2020). Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecological Monographs*, 1–18. DOI:10.1002/ecm.1405
- Kurniawati, S. (2020). Pengaruh profitabilitas, ukuran perusahaan dan keputusan investasi terhadap nilai perusahaan. *J. Ilmu Dan Riset Akutansi*, 1(1): 1–18.
- Lestari, T. A., & Rahadian, A. (2017). *Metode Kuantifikasi Pendugaan Cadangan Karbon Ekosistem Mangrove*. Mangroves for the Future (MFF) Indonesia, Bogor.
- Luqman, M., Rayner, P. J., & Gurney, K. R. (2023). On the impact of urbanisation on CO² emissions. *Urban Sustainability*, 1–8. DOI:10.1038/s42949-023-00084-2
- Mngadi, M., Odindi, J., Mutanga, O. (2021). The utility of sentinel-2 spectral data in quantifying above-ground carbon stock in an urban reforested landscape. *Remote Sens.* 13(4281): 1-15. DOI:10.3390/rs13214281
- Muhsoni, F. (2021). *Karbon Mangrove*. UTM Press. Malaysia.
- Muhsoni, F., Sambah, A., Mahmudi, M., & Wiadnya, D. (2018). Comparison of different vegetation indices for assessing mangrove density using sentinel-2 imagery. *International Journal of Geomate*, 14(45): 42–51. DOI:10.21660/2018.45.7177
- Peny, M.N., Rehata, B.M., Merryanto, Y., Tisera, W.L., Anakotta, A.R.F. (2025). Pengaruh Kerapatan Mangrove Terhadap Laju Transpor Sedimen di Kawasan Ekowisata Mangrove Oesapa Barat, Kota Kupang. *J. Mar. Res.* Vol. 14, 105–116. DOI:10.14710/jmr.v14i1.46781
- Permatasari, A., Hartoyo, P., & Fitriansyah, M. R. (2025). Taman Nasional Gunung Halimun Salak Correlation of Carbon Reserves to Vegetation Density Based on

- NDVI in the Rehabilitation Zone Mount Halimun Salak National Park. *Journal of Tropical Silviculture*, 16(1): 1–8.
- Putri, A., & Wulandari, C. (2015). Potensi Penyerapan Karbon Pada Tegakan Damar Mata Kucing (*Shorea Javanica*) Di Pekon Gunung Kemala Krui Lampung Barat. *Jurnal Sylva Lestari*, 3(2): 13–20. DOI:10.23960/jsl2313-20
- Sindri, V., Rudiyaniti, S., & Febrianto, S. (2025). Estimasi Biomassa Dan Serapan CO₂ Mangrove di Desa Timbulsloko, Demak, Jawa Tengah. *Journal of Maquares*, 13(2): 77–85.
- Singgalen, Y.A., Candra, G., Sri, Y.J.P., Charitas, F. (2021). Mangrove Monitoring Using Normalized Difference Vegetation. *Ilmu dan Teknol. Kelaut. Trop.*, 13(1): 219–239.
- Situmorang, P.J., Sugianto, S., . D. (2016). Estimation of Carbon Stock Stands using EVI and NDVI Vegetation Index in Production Forest of Lembah Seulawah Sub-District, Aceh Indonesia. *Aceh Int. J. Sci. Technol.* 5: 126–139. DOI:10.13170/aijst.5.3.5836.
- Sodikin, S., Hidayat, R., Wulandari, F. R., & Fahmi, F. (2024). Estimasi Ketersediaan dan Serapan Karbon pada Mangrove di Muara Sungai Cipunegara Desa Patimban, Kecamatan Pusaka. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(4): 1100–1107. DOI:10.14710/jil.22.4.1100-1107
- Suardana, A.A.M.A.P., Anggraini, N., Nandika, M.R., Aziz, K., As-Syakur, A.R., Ulfa, A. (2023). Estimation and Mapping Above-Ground Mangrove Carbon Stock Using Sentinel-2 Data Derived Vegetation Indices in Benoa Bay of Bali Province, Indonesia. *For. Soc*, 7: 116–134. DOI:10.24259/fs.v7i1.22062
- Trigunasih, N. M., Saifulloh, M., Pertanian, F., & Earth, G. (2022). Correlation Between Soil Nitrogen Content and NDVI Derived from Sentinel-2A Satellite Imagery. *Jurnal Lahan Suboptimal : Journal of Suboptimal Lands*, 11(2): 112–119. DOI:10.36706/JLSO.11.2.2022.574
- Uthbah, Z., Sudiana, E., & Yani, E. (2017). Analisis Biomasa dan Cadangan Karbon pada Berbagai Umur Tegakan Damar (*Agathis dammara* (Lamb.) Rich.) di Kph Banyumas Timur. *Scripta Biologica*, 4(2): 119. DOI:10.20884/1.sb.2017.4.2.404
- Wolters, T., Detenbeck, N. E., Rego, S., & Freeman, M. (2025). Evaluation of Atmospheric Preprocessing Methods and Chlorophyll Algorithms for Sentinel-2 Imagery in Coastal Waters. *Remote Sensing*, 17(20): 3503. DOI:10.3390/rs17203503
- Yohana, N., Bakhtiar, D., Anggoro, A. (2025). Pemetaan estimasi stok karbon tegakan mangrove (Aboveground) menggunakan data citra landsat 8 OLI di Desa Kahyapu Kecamatan Enggano. *Jurnal Ilmu Kelautan Kepulauan*, 1(1): 1205–1215. DOI:10.33387/jikk.v8i1.10417
- Zhang, J., Gan, S., Yang, P., Zhou, J., Huang, X., Chen, H., ... (2024). A global assessment of mangrove soil organic carbon sources and implications for blue carbon credit. *Nature Communications*, 1–7. DOI:10.1038/s41467-024-53413-z