

Estimasi Cadangan Karbon Mangrove Menggunakan Citra Sentinel-2A di Desa Banjarsari Pulau Enggano

Sigit Widiyanto Firsta*, Ayub Sugara, Ari Anggoro

Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu
Jl. WR Supratman, Kandang Limun, Bengkulu 38227, Indonesia
Email: sigitfirsta19@gmail.com

Abstract

Estimation of Mangrove Carbon Stock Using Sentinel-2A Imagery in Banjarsari, Enggano Island

Global climate change remains one of the major challenges of the 21st century, and mangrove ecosystems play a crucial role as blue carbon sinks, helping mitigate greenhouse gas emissions. However, data on mangrove carbon stocks in Indonesia's outermost islands, such as Enggano Island, are still limited. This study aims to estimate the aboveground carbon stock of mangrove forests in Banjarsari Village, Enggano District, by integrating field measurements and Sentinel-2A imagery. Biomass was calculated using an allometric approach, while spatial carbon estimation was derived from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The results show that the mangrove area covers approximately 193,25 ha, dominated by dense vegetation (98%) with NDVI values ranging from -0.5 to 0.94. The dominant species were *Rhizophora apiculata*. The total above-ground carbon stock was estimated at 44,276.78 tons C. The regression between NDVI and carbon stock produced the equation $y = 2.1402x - 185.36$, with a coefficient of determination (R^2) of 0.48 and an RMSE of 161.14 tons/ha. These findings demonstrate the significant carbon storage capacity of Enggano's mangrove ecosystem and highlight its crucial role in supporting climate change mitigation and low-carbon development in Indonesia's remote coastal regions.

Keywords: Mangrove; Carbon; Sentinel 2A

Abstrak

Perubahan iklim global menjadi tantangan utama abad ini, dan ekosistem mangrove berperan penting sebagai penyerap karbon biru (blue carbon) yang efektif dalam menekan emisi gas rumah kaca. Namun, informasi mengenai stok karbon mangrove di wilayah kepulauan terluar Indonesia, seperti Pulau Enggano, masih sangat terbatas. Penelitian ini bertujuan mengestimasi cadangan karbon mangrove bagian atas di Desa Banjarsari, Kecamatan Enggano, melalui integrasi data lapangan dan citra Sentinel-2A. Biomassa dihitung menggunakan pendekatan alometrik, sedangkan estimasi spasial karbon diperoleh melalui analisis indeks vegetasi NDVI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa luas ekosistem mangrove mencapai 193,25 ha dengan dominasi kerapatan rapat (98%) dan nilai NDVI berkisar antara -0,5 hingga 0,94. Spesies dominan yang ditemukan adalah *Rhizophora apiculata*. Total cadangan karbon diperkirakan mencapai 44.276,78 ton C. Hubungan antara NDVI dan stok karbon menunjukkan persamaan regresi $y = 2,1402x - 185,36$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,48 dan RMSE 161,14 ton/ha. Hasil ini menegaskan bahwa ekosistem mangrove Enggano memiliki potensi besar sebagai penyerap karbon, sekaligus berkontribusi terhadap upaya mitigasi perubahan iklim dan kebijakan pembangunan rendah karbon di wilayah pesisir terpencil Indonesia.

Kata kunci : Mangrove; karbon; Sentinel 2A

PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan isu global yang berdampak luas terhadap lingkungan, sosial, dan ekonomi. Salah satu penyebab utamanya adalah peningkatan konsentrasi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO_2), akibat aktivitas manusia (Bindu *et al.*, 2020). Akumulasi gas-gas ini di atmosfer menyebabkan terperangkapnya panas matahari yang terpantul dari permukaan bumi, sehingga memicu pemanasan global. Upaya mitigasi perubahan iklim dapat dilakukan dengan menekan laju emisi gas rumah kaca melalui peningkatan penyerapan karbon oleh vegetasi (Candra dan Wicaksono, 2016). Tidak hanya hutan daratan, ekosistem pesisir seperti mangrove juga memiliki peran penting dalam menyerap dan menyimpan karbon melalui proses fotosintesis. Lingkungan mangrove yang bersifat anoksik memungkinkan terjadinya akumulasi karbon dalam biomassa dan sedimen yang dikenal sebagai karbon biru (*blue carbon*) (Shiau dan Chiu, 2020). Berbagai studi menunjukkan bahwa ekosistem mangrove termasuk salah satu habitat dengan kandungan karbon tertinggi di dunia. Selain itu, mangrove berfungsi sebagai penyangga alami

yang mampu meredam dampak badai dan tsunami, melindungi wilayah daratan, serta menyediakan berbagai jasa ekosistem dan manfaat ekonomi bagi masyarakat pesisir dalam jangka panjang. Berdasarkan Peta Mangrove Nasional 2024 yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) melalui Keputusan Menteri Kehutanan Nomor 594 Tahun 2025, luas hutan mangrove Indonesia mencapai 3,44 juta hektar, sedangkan secara global sekitar 14,71 juta hektar (FAO, 2023). Meskipun memiliki potensi besar dalam mitigasi perubahan iklim, luasan mangrove di Asia Tenggara terus menurun akibat tekanan antropogenik, padahal ekosistem ini mampu menyimpan karbon lebih besar dibandingkan hutan daratan (Murdiyarso *et al.*, 2015).

Teknologi penginderaan jauh menjadi metode yang efisien untuk mengestimasi stok karbon pada area yang luas dan sulit diakses. Citra Sentinel-2A memiliki keunggulan berupa resolusi spasial 10 m, cakupan spektral yang luas, serta waktu perekaman yang cepat, sehingga mampu memberikan informasi kondisi mangrove secara spasial maupun temporal. Melalui analisis indeks vegetasi seperti NDVI, reflektansi kanopi mangrove dapat dimanfaatkan untuk membangun model estimasi biomassa atas dan stok karbon. Penelitian mengenai estimasi stok karbon mangrove umumnya memanfaatkan berbagai indeks vegetasi, dengan NDVI sebagai indeks yang paling banyak digunakan. NDVI kerap diterapkan karena mampu menggambarkan tingkat kerapatan vegetasi yang berkaitan langsung dengan besarnya biomassa (Bindu *et al.*, 2020; Sugara *et al.*, 2022; Perry *et al.*, 2022; Pham *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2020; Thuy *et al.*, 2020). ARVI dan EVI (Siddiq *et al.*, 2020), DVI (Purnamasari *et al.*, 2021; Suardana *et al.*, 2023).

Desa Banjarsari yang berada di Kecamatan Enggano merupakan bagian dari Pulau Enggano, salah satu pulau terluar Indonesia yang terletak di perairan barat Sumatra. Kondisinya yang terpencil dan aksesibilitas yang terbatas menyebabkan kawasan ini masih minim pendokumentasian ilmiah, terutama terkait ekosistem pesisir seperti mangrove. Padahal, pulau-pulau terluar memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan ekosistem pesisir sekaligus menyimpan cadangan karbon dalam jumlah yang potensial. Meskipun peran *blue carbon* mangrove Indonesia telah diakui secara global, informasi mengenai stok karbon di wilayah kepulauan terluar seperti Enggano masih jarang dikaji secara ilmiah. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi cadangan karbon biomassa atas mangrove serta memetakan distribusinya di Desa Banjarsari, Pulau Enggano, menggunakan citra Sentinel-2A

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan di ekosistem mangrove Desa Banjarsari, Pulau Enggano, Kabupaten Bengkulu Utara, Provinsi Bengkulu. Pengambilan data primer dilakukan melalui survei lapangan pada tanggal 22–27 Februari 2025. Sampel diambil pada 15 plot berukuran 10 × 10 meter yang tersebar di tiga stasiun pengamatan. Penentuan titik plot dilakukan menggunakan metode *purposive random sampling* Peta lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1.

Data primer yang dikumpulkan berupa biomassa mangrove. Pada setiap plot berukuran 10 × 10 m, dilakukan pengukuran diameter batang setinggi dada (DBH) untuk seluruh pohon mangrove dengan diameter > 5 cm. Nilai DBH tersebut digunakan untuk menghitung biomassa atas permukaan (*Above Ground Biomass*, AGB) per individu pohon. Perhitungan AGB dilakukan menggunakan persamaan alometrik spesifik jenis yang mengacu pada model Komiyama *et al.* (2005), yang telah banyak digunakan dalam estimasi biomassa mangrove di kawasan tropis. Total AGB per plot diperoleh dari penjumlahan biomassa seluruh pohon dalam plot tersebut (Tabel 1). Data sekunder yang digunakan berupa citra satelit Sentinel-2A dengan tanggal akuisisi 30 Juni 2025.

Analisis data dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai hubungan antara parameter vegetasi hasil penginderaan jauh dengan data lapangan guna menduga cadangan karbon mangrove. Tahapan analisis meliputi Klasifikasi kelas Mangrove perhitungan indeks vegetasi (NDVI),

estimasi biomassa dan cadangan karbon, serta uji akurasi hasil estimasi terhadap data pengamatan lapangan.

Klasifikasi merupakan proses pengelompokan piksel citra berdasarkan kemiripan nilai spektralnya. Penelitian ini menggunakan metode klasifikasi terbimbing (*supervised classification*) dengan pendekatan *Maximum Likelihood*, yang mengelompokkan piksel berdasarkan probabilitas tertinggi untuk masuk ke suatu kelas tertentu (Putra *et al.*, 2022). Area contoh (*training area*) ditentukan dari hasil survei lapangan sebagai acuan dalam proses klasifikasi. Tahap reklasifikasi dilakukan dengan mengacu pada data lapangan dan peta referensi untuk meningkatkan akurasi hasil dan memperkuat interpretasi spasial kondisi ekosistem mangrove (Kristianingsih *et al.*, 2016).

Analisis *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) digunakan untuk mengukur tingkat kerapatan vegetasi berdasarkan citra. NDVI dihitung menggunakan kombinasi band merah (band 4) dan inframerah dekat (band 8) dengan rumus:

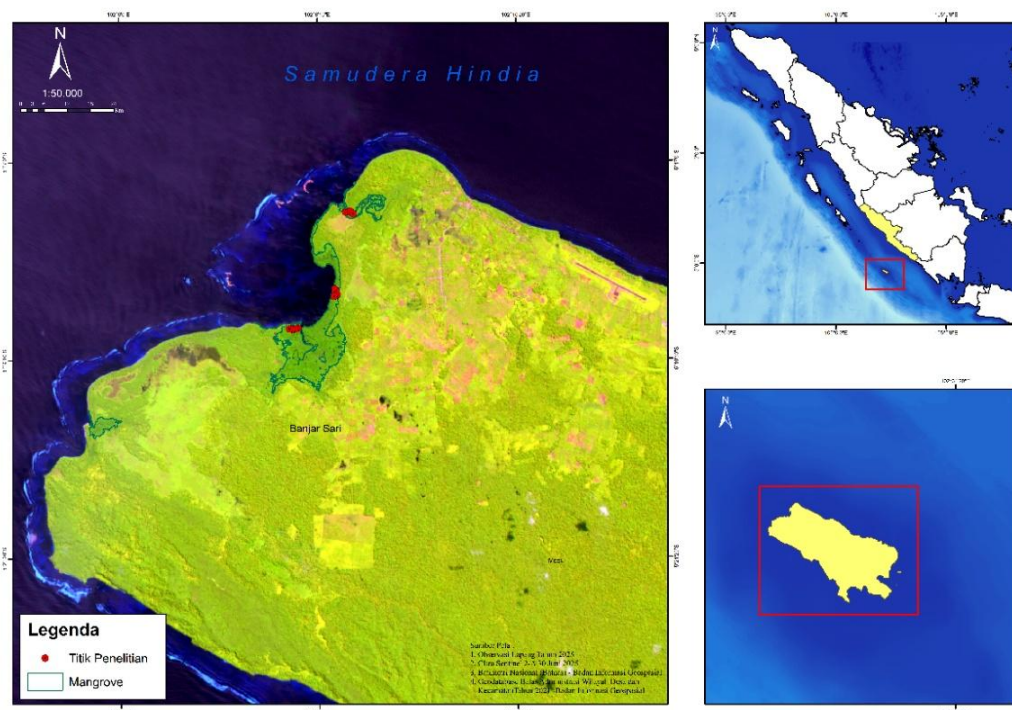
$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

di mana NIR adalah nilai reflektansi pada band inframerah dekat dan RED adalah nilai reflektansi pada band merah. Nilai NDVI yang dihasilkan berkisar antara -1 hingga +1, di mana nilai mendekati +1 menunjukkan vegetasi yang rapat dan sehat. Berdasarkan klasifikasi nilai NDVI untuk mangrove.

Tabel 1. Persamaan Alometrik Biomassa Mangrove (W_{top} dan W_R) per Jenis

Jenis Mangrove	(W_{top}) kg	(W_R) kg
<i>Rhizophora apiculata</i>	$W_{top} = 0.235DBH^{2.42}$	$W_R = 0,199 * (p^{0,899}) * (D30^{2,22})$
<i>Rhizophora mucronata</i>	$W_{top} = 0.128DBH^{2.60}$	$W_R = 0,199 * (p^{0,899}) * (D30^{2,22})$
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	$W_{top} = 0.186DBH^{2.31}$	$W_R = 0,199 * (p^{0,899}) * (D30^{2,22})$
<i>Xylocarpus granatum</i>	$W_{top} = 0.0823DBH^{2.59}$	$W_R = 0,199 * (p^{0,899}) * (D30^{2,22})$

Keterangan: p : *Rhizophora apiculata* (0,77), *Rhizophora mucronate* (0,7), *Bruguiera gymnorrhiza* (0,7), *Xylocarpus granatum* (0,53), DBH: Diameter at breast height (cm)



Gambar 1. Lokasi Peneliti

Pemodelan Biomassa dan Stok Karbon

Selanjutnya, nilai NDVI yang diperoleh dari citra Sentinel-2A digunakan untuk menduga biomassa di atas permukaan tanah (*Above Ground Biomass*, AGB) dengan menggunakan persamaan regresi non-linear menurut Myeong *et al.* (2006):

$$AGB = a \times e^{(b \times NDVI)}$$

di mana a dan b merupakan konstanta yang diperoleh dari hasil analisis regresi non-linear antara nilai NDVI dan AGB hasil pengukuran lapangan.

Hubungan antara NDVI pada titik plot pengamatan dan nilai AGB lapangan diidentifikasi untuk mendapatkan model empiris terbaik dalam menduga biomassa mangrove. Persamaan regresi non-linear yang dihasilkan digunakan untuk memperkirakan nilai AGB di seluruh area studi berdasarkan distribusi spasial nilai NDVI.

Berdasarkan SNI 7724:2011, sekitar 47% dari total biomassa dianggap sebagai kandungan karbon organik. Oleh karena itu, estimasi stok karbon (C) dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$C = Biomassa \times 0,47$$

Selain biomassa atas permukaan (AGB), perhitungan juga mencakup biomassa bawah permukaan (*Below Ground Biomass*, BGB) yang terdiri dari akar. Estimasi BGB dihitung menggunakan persamaan alometrik dari Komiyama *et al.* (2005):

$$BGB_{Lapangan} = \frac{(\text{Total WR stasiun})}{1000} \div 0,05$$

Nilai BGB tiap stasiun kemudian dirata-ratakan dan dikalikan dengan faktor koreksi 0,39. Nilai BGB selanjutnya dijumlahkan dengan AGB untuk memperoleh total biomassa, yang kemudian dikonversi menjadi stok karbon menggunakan faktor 0,47 (SNI 7724:2011):

$$C = 0,47 \times (AGB + BGB_{Lapangan})$$

Model ini kemudian diterapkan pada seluruh piksel kawasan mangrove untuk menghasilkan peta sebaran AGB. Estimasi biomassa bawah permukaan (BGB), biomassa total, dan stok karbon total dihitung dengan mengacu pada metode yang digunakan oleh Bindu *et al.* (2020) dan dikonversi ke satuan ton/ha.

Uji Akurasi

Uji akurasi dilakukan untuk mengetahui tingkat ketepatan hasil estimasi cadangan karbon dari citra terhadap hasil pengukuran lapangan. Pengujian dilakukan menggunakan *Root Mean Square Error*. RMSE menggambarkan sejauh mana hasil estimasi mendekati kondisi sebenarnya di lapangan. Nilai RMSE yang kecil menunjukkan tingkat ketepatan model yang tinggi dengan persamaan:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y' - y)^2}{n}}$$

di mana y' merupakan nilai hasil pengamatan di lapangan y adalah nilai hasil estimasi dari citra, dan n adalah jumlah total data pengamatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Klasifikasi tutupan lahan dilakukan menggunakan metode *Maximum Likelihood*, yang mempertimbangkan peluang tiap piksel masuk ke kelas tertentu berdasarkan nilai spektralnya. Hasil klasifikasi citra Sentinel-2A menghasilkan tiga kelas utama, yaitu mangrove, non-mangrove, dan perairan

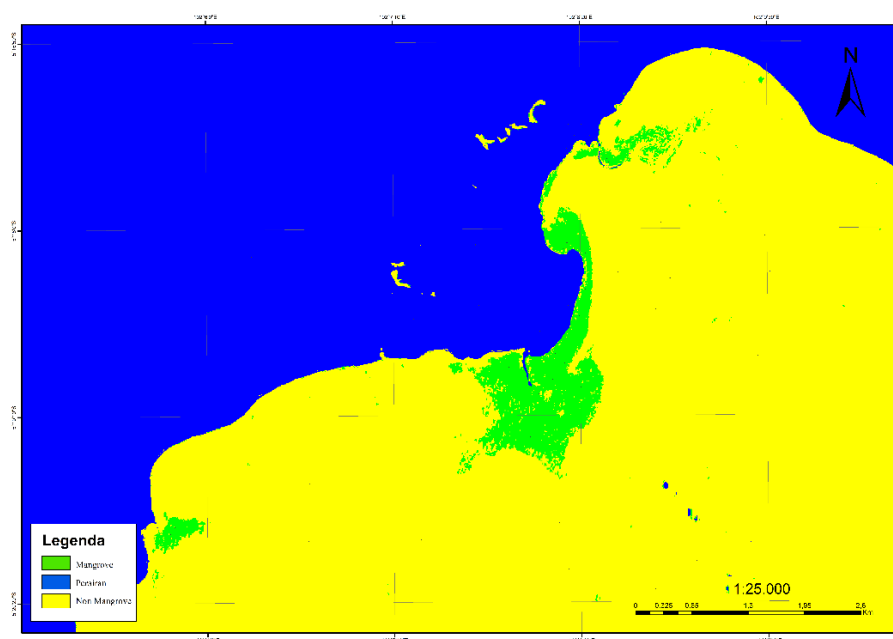
Hasil uji akurasi menggunakan confusion matrix menunjukkan nilai *Overall Accuracy* sebesar 90% dan Koefisien *Kappa* sebesar 0,85, yang menandakan tingkat ketelitian tinggi dan kesesuaian kuat antara hasil klasifikasi dengan data lapangan. Nilai ini juga memenuhi standar akurasi minimal 85% (USGS). Luas total ekosistem mangrove yang teridentifikasi di Desa Banjarsari mencapai 193,25 ha.

Meskipun hasil klasifikasi menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, pengamatan visual menunjukkan adanya beberapa area yang mengalami kesalahan klasifikasi. Oleh karena itu, dilakukan koreksi manual untuk meningkatkan ketelitian spasial, terutama pada wilayah dengan karakteristik spektral yang tumpang tindih atau tertutup bayangan awan.

Tabel 2. Hasil Uji Akurasi (Confusion Matrix) Klasifikasi Penutupan Lahan Mangrove Menggunakan Citra Sentinel-2A di Desa Banjarsari, Pulau Enggano

Kelas		Producer			Total	UA%
		M	NM	A		
User	M	10	0	0	10	100
	NM	1	9	0	10	90
	A	1	1	8	10	80
Total		13	10	8	30	
PA%		83.33	90	100		
OA%		90				

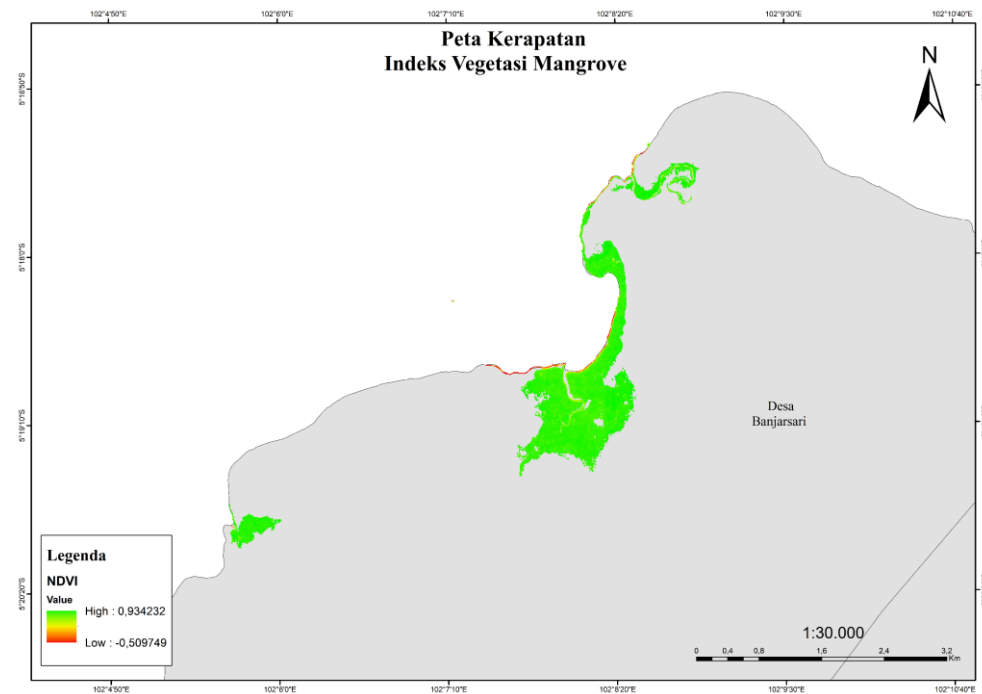
M = Mangrove; NM = Non mangrove; A = Perairan



Gambar 2. Hasil Klasifikasi 3 kelas

Tabel 3. Kerapatan Mangrove Berdasarkan Kelas NDVI di Desa Banjarsari

No	Kelas	NDVI	Luas (ha)	Persentase (%)
1	Jarang	0,1 - 0,32	3,56	2%
2	Sedang	0,33 - 0,42	0,35	0%
3	Rapat	0,43 – 1,0	189,34	98%

**Gambar 3.** Peta NDVI Mangrove di Desa Banjarsari Berdasarkan Citra Sentinel-2A

Pendekatan pemetaan vegetasi menggunakan data satelit sangat efektif untuk menilai kondisi lingkungan dan kerapatan vegetasi (Samsuri *et al.*, 2021). Salah satu indeks yang paling umum digunakan adalah *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) yang memanfaatkan kombinasi band merah (Red, 665 nm) dan inframerah dekat (NIR, 842 nm) dari citra Sentinel-2A. Kombinasi kedua band ini sensitif terhadap aktivitas fotosintesis dan struktur tajuk daun, sehingga efektif untuk membedakan vegetasi sehat, lahan terbuka, dan perairan (Small & Sousa, 2021).

Hasil pengolahan citra Sentinel-2A Tahun 2025 di Desa Banjarsari menunjukkan nilai NDVI berkisar antara -0,5 hingga 0,91 (Gambar 3) Nilai negatif mengindikasikan badan air, nilai mendekati nol menandakan permukaan terbuka seperti pasir atau batu, sedangkan nilai positif menunjukkan vegetasi (Huang *et al.*, 2021).

Analisis menunjukkan bahwa kelas kerapatan rapat mendominasi dengan luas 189,34 ha (98%), diikuti kelas jarang seluas 3,56 ha (2%), dan kelas sedang hanya 0,35 ha (<1%). Nilai NDVI tinggi pada sebagian besar wilayah menunjukkan vegetasi mangrove yang sehat, dengan kanopi rapat dan kandungan klorofil tinggi (Huang *et al.*, 2021). Berdasarkan hasil analisis regresi sederhana antara NDVI dan kanopi diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,81, Temuan ini sejalan dengan penelitian Pratama *et al.* (2025) di Desa Kaana dan Kahyapu, Pulau Enggano, yang memperoleh nilai $R^2 = 0,79$, serta Vincentius *et al.* (2024) di Teluk Maumere dengan nilai $R^2 = 0,77$. Kondisi ini menandakan bahwa ekosistem mangrove di Desa Banjarsari masih terjaga dengan baik dan tekanan lingkungan terhadapnya relatif rendah.

Tabel 4. Biomassa dan Stok Karbon Mangrove Berdasarkan Jenis di Desa Banjarsari, Pulau Enggano

No	Jenis Mangrove	Jumlah Pohon	Rata rata Diameter (cm)	Biomassa (ton/ha)	Stok Karbon (ton/ha)
1	<i>Rhizophora apiculata</i>	166	12,36	508,07	271,29
2	<i>Rhizophora mucronata</i>	21	10,74	25,03	12,21
3	<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	46	22,76	207,03	100,28
4	<i>Xylocarpus granatum</i>	8	13,27	82,02	39,45
Total		237		822,166	423,22

Pengukuran biomassa dilakukan di tiga stasiun dengan total 15 plot pengamatan. Empat jenis mangrove utama ditemukan di lokasi penelitian, yaitu *Rhizophora apiculata*, *Rhizophora mucronata*, *Bruguiera gymnorhiza*, dan *Xylocarpus granatum* (Tabel 4). selain itu di luar plot ditemukan adanya beberapa jenis tambahan seperti *Sonneratia alba*, *Avicennia marina*.

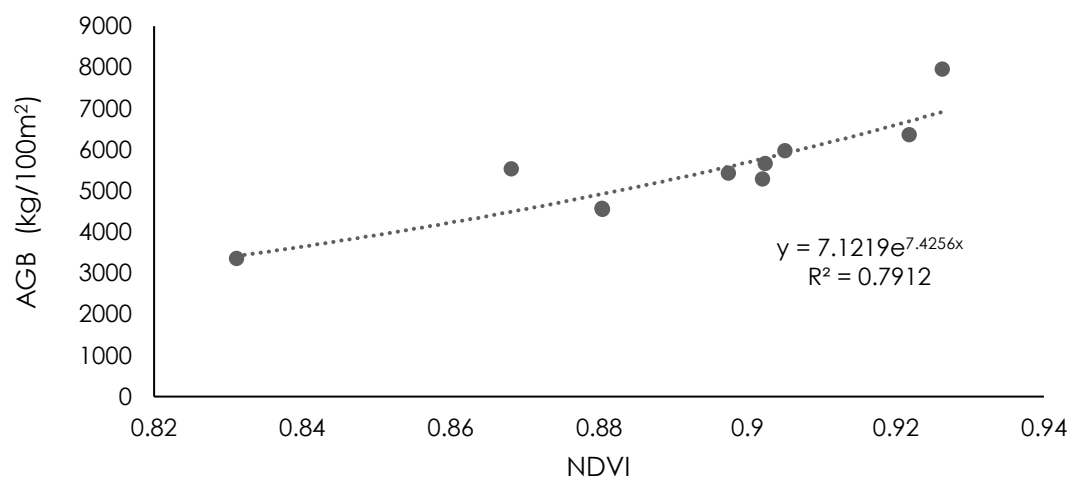
Nilai biomassa tertinggi ditunjukkan oleh *R. apiculata* sebesar 508,07 ton/ha dengan stok karbon 271,29 ton/ha. Spesies ini mendominasi ekosistem dengan jumlah individu terbanyak (166 pohon), diameter rata-rata 12,36 cm, dan kontribusi terbesar terhadap total biomassa. Sebaliknya, *R. mucronata* memiliki biomassa terendah (25,03 ton/ha) karena jumlah individu sedikit (21 pohon) dan diameter relatif kecil. *B. gymnorhiza* memiliki diameter rata-rata terbesar (22,76 cm) dan menyumbang biomassa 207,03 ton/ha, sedangkan *X. granatum* menghasilkan 82,02 ton/ha. Total biomassa mangrove di Desa Banjarsari mencapai 822,16 ton/ha dengan cadangan karbon sebesar 423,22 ton/ha. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian Rozy (2018) di Perancak, Bali (187,21 ton/ha; 86,12 ton C/ha) maupun Alviana *et al.* (2023) di Kabupaten Bintan (498,77 ton/ha).

Tingginya nilai karbon di Desa Banjarsari dipengaruhi oleh dominasi *R. apiculata* yang memiliki kerapatan tinggi dan pertumbuhan cepat, serta kondisi substrat dan elevasi yang mendukung penumpukan biomassa. Peningkatan diameter batang dan jumlah individu berbanding lurus dengan tingginya cadangan karbon. Selain itu, kerapatan tegakan juga berpengaruh terhadap efisiensi fotosintesis dan penyerapan CO₂ (Forestriko, 2016). Faktor lain seperti *wood density*, keanekaragaman jenis, serta kondisi hidrologi juga memengaruhi variasi biomassa dan stok karbon.

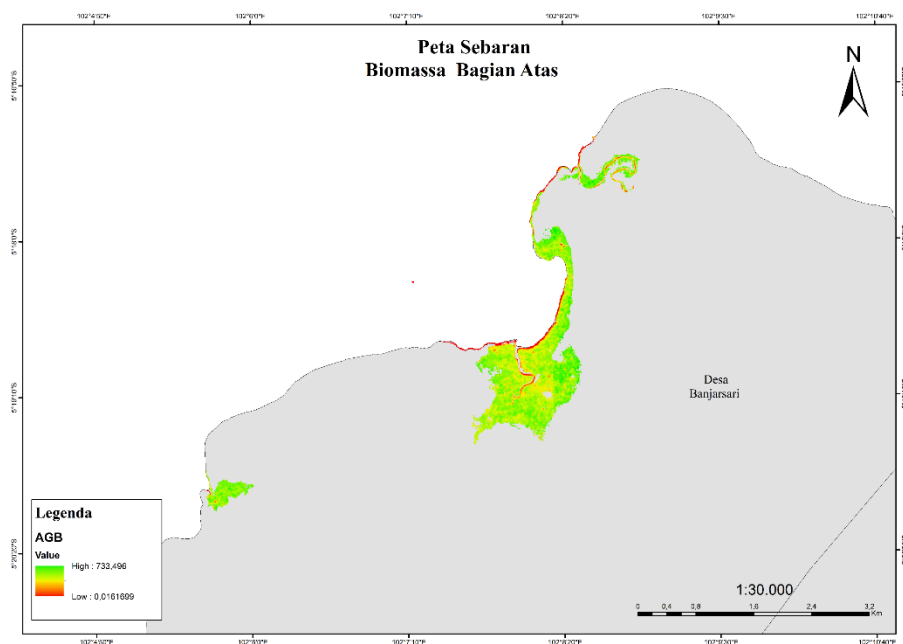
Pemodelan stok karbon dilakukan dengan mengaitkan nilai NDVI dari citra Sentinel-2A dengan data biomassa hasil pengukuran lapangan. Nilai AGB setiap plot dikonversi sesuai ukuran piksel Sentinel-2A (10×10 m) untuk menghasilkan peta distribusi stok karbon spasial (Bindu *et al.*, 2020). Gambar 4 menunjukkan hubungan antara nilai AGB dan NDVI hasil pengukuran lapangan yang digunakan dalam pemodelan.

Hasil regresi antara NDVI dan AGB menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,79. Nilai tersebut mengindikasikan adanya hubungan positif yang kuat antara NDVI dan AGB, di mana peningkatan nilai NDVI berbanding lurus dengan meningkatnya estimasi biomassa mangrove. Jika dibandingkan dengan penelitian serupa, Sugara *et al.* (2022) di Kota Bengkulu memperoleh R^2 sebesar 0,57, Purnamasari *et al.* (2021) di Bedul, Banyuwangi sebesar 0,51, dan Krisnanda *et al.* (2025) di Nusa Lembongan sebesar 0,79. Nilai R^2 pada penelitian ini tergolong sebanding dengan hasil penelitian lain di berbagai wilayah Indonesia.

Persamaan tersebut digunakan untuk mengestimasi biomassa bagian atas (AGB) dari citra Sentinel-2A, dengan nilai AGB yang diperoleh berkisar antara 0,016–733,496 ton/ha (Gambar 5).



Gambar 4. Model Hubungan NDVI terhadap Biomassa Bagian Atas (AGB) Mangrove



Gambar 5. Peta Sebaran Biomassa Bagian Atas di desa Banjarsari

Setelah nilai biomassa mangrove diperoleh, tahap berikutnya adalah melakukan estimasi stok karbon menggunakan citra Sentinel-2A. Perhitungan cadangan karbon dilakukan dengan menerapkan faktor konversi. Gambar 5 dan 6 menunjukkan hasil analisis estimasi karbon mangrove di Desa Banjarsari, nilai biomassa atas permukaan (AGB) dan stok karbon (C) menunjukkan variasi yang jelas sesuai dengan tingkat kepadatan vegetasi. Kelas kepadatan rapat merupakan yang paling dominan dengan luas area 189,34 ha, memiliki total AGB sebesar 475,69 ton/ha serta kandungan karbon 223,57 ton C/ha, sehingga menghasilkan total stok karbon mencapai 43.205,56 ton C. Kelas ini mendominasi wilayah pesisir yang tampak berwarna hijau tua pada peta, menandakan kondisi mangrove yang lebat dan sehat. Kelas kepadatan sedang menempati area yang jauh lebih kecil, yaitu 0,35 ha, dengan total AGB sebesar 11,28 ton/ha dan stok karbon 5,30 ton C/ha, sehingga menghasilkan total karbon sebesar 1,86 ton C. Sementara itu, kelas kepadatan jarang mencakup luas 3,56 ha dengan AGB 0,99 ton/ha dan stok karbon 0,77 ton C/ha,

menghasilkan total karbon sekitar 1,65 ton C. Secara keseluruhan, total luasan mangrove yang terpetakan adalah 193 ha, dengan total biomassa AGB mencapai 475,69 ton/ha dan total stok karbon sebesar 43.205,56 ton C. Temuan ini menunjukkan bahwa ekosistem mangrove di Desa Banjarsari memiliki potensi penyimpanan karbon yang sangat besar, terutama pada area dengan tingkat kerapatan tinggi.

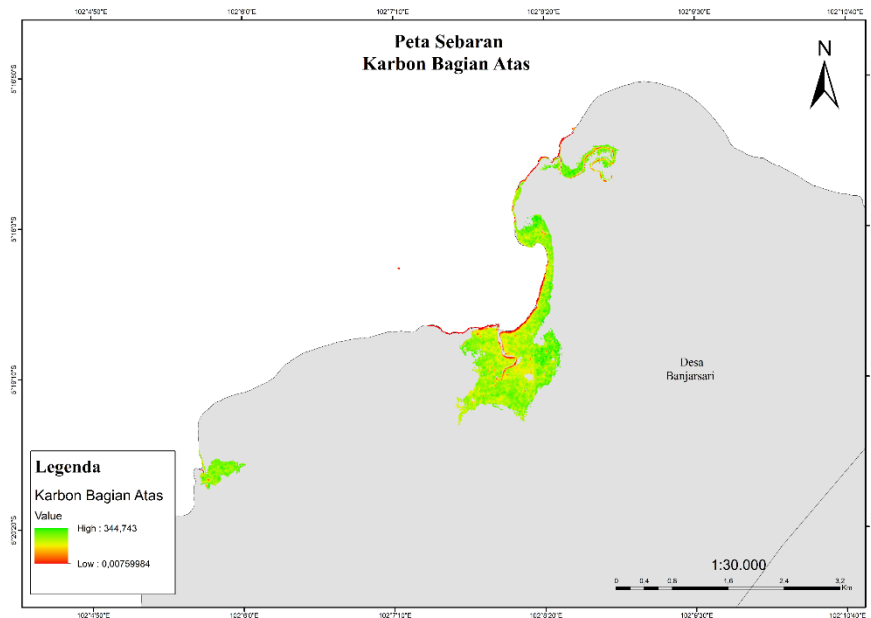
Biomassa bawah permukaan (BGB), yang terdiri dari komponen akar, juga digunakan dalam perhitungan analisis ini. Perhitungan BGB dilakukan menggunakan persamaan alometrik untuk biomassa akar (WR) berdasarkan Komiyama et al. (2005). Nilai WR dihitung pada setiap plot di ketiga stasiun pengamatan. Total WR dari setiap plot dijumlahkan per stasiun, Hasil BGB dari ketiga stasiun kemudian dirata-ratakan dan dikalikan dengan faktor 0,39. Dari proses ini diperoleh nilai rata-rata BGB sebesar 117,943 ton/ha, yang merepresentasikan estimasi biomassa bawah permukaan di lapangan. Nilai BGB tersebut selanjutnya ditambahkan ke nilai biomassa atas permukaan (AGB) untuk memperoleh biomassa total. Biomassa total kemudian dikalikan dengan faktor konversi 0,47 guna menghasilkan peta stok karbon total (ton C/ha). Nilai hasil perhitungan tersebut kemudian diambil berdasarkan tiap kelas kerapatan untuk analisis selanjutnya.

Gambar 7 menunjukkan hasil pengolahan biomassa atas permukaan (AGB) dari citra Sentinel-2A yang dikombinasikan dengan data biomassa bawah permukaan (BGB) hasil pengukuran lapangan, diperoleh peta sebaran stok karbon total mangrove yang berada pada nilai 5,5-350,28 ton c/ha.. Secara keseluruhan, total luas mangrove yang terpetakan sebesar 193,25 ha dengan total cadangan karbon mencapai 44.276,78 ton C. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar area mangrove di Desa Banjarsari masih dalam kondisi lebat dan sehat, yang ditunjukkan oleh rona hijau tua pada hasil klasifikasi citra.

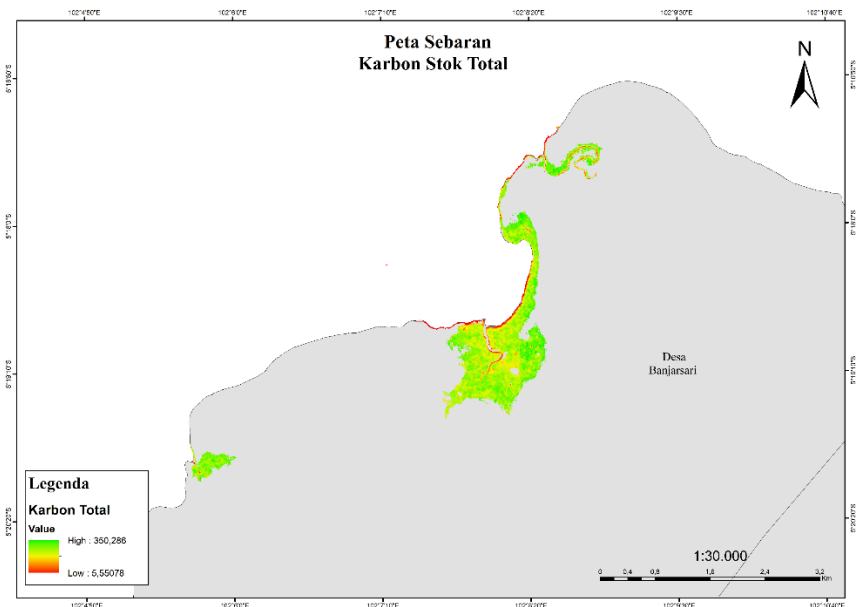
Sebaran nilai tertinggi ditemukan pada area dengan tingkat kerapatan vegetasi tinggi, menunjukkan kemampuan penyimpanan karbon yang besar pada tegakan mangrove yang rapat. Hal ini memperlihatkan bahwa tutupan vegetasi mangrove berpengaruh langsung terhadap akumulasi biomassa dan karbon yang tersimpan. Jika dibandingkan dengan penelitian lain, nilai stok karbon di Banjarsari tergolong tinggi. Penelitian Fitrah (2019) di Pulau Bauluang, Sulawesi Selatan mencatat cadangan karbon sebesar 66.911,73 ton C pada luas 252,90 ha, Perbedaan nilai stok karbon antara berbagai penelitian umumnya dipengaruhi oleh variasi persamaan alometrik yang digunakan (Kauffman et al., 2012), perbedaan ukuran diameter batang, serta perubahan struktur tegakan dari waktu ke waktu. Pertambahan diameter dan perkembangan vegetasi mangrove akan meningkatkan kapasitas penyimpanan karbon pada ekosistem tersebut. Selain itu, tingkat kesuburan tanah dan kerapatan tegakan juga berperan besar dalam menentukan besarnya biomassa mangrove di suatu lokasi. Faktor ekologis lain seperti ketersediaan nutrisi dan umur tegakan juga dapat memengaruhi besarnya cadangan karbon.

Tabel 5. Karbon Total Mangrove Berdasarkan Kerapatan

Kelas Kerapatan	Luas (ha)	Karbon Stock Total (tonC/ha)	Karbon Stok Total (ton)
Jarang	3,56	2,64	21,38
Sedang	0,35	1,94	3,79
Rapat	189,34	230,81	44251,59
Total	193,25	281,12	44.276,78

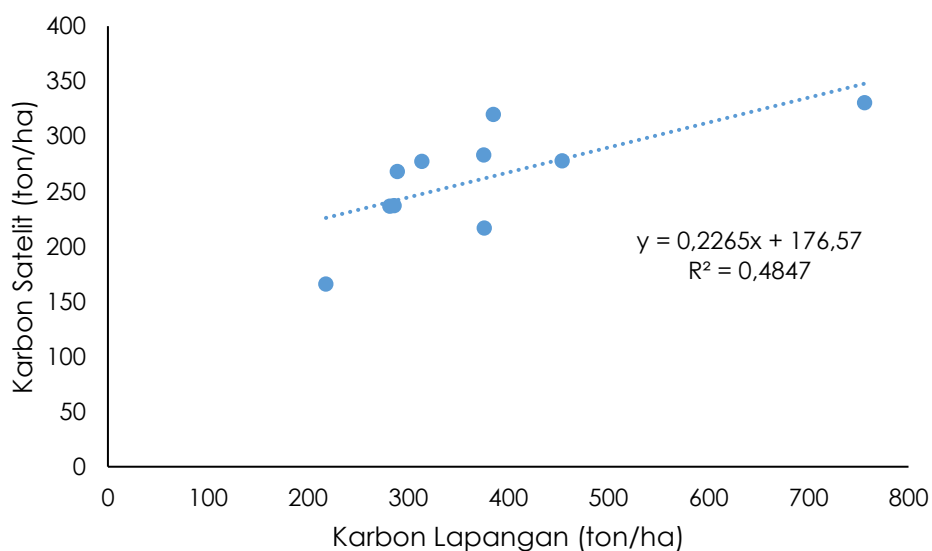


Gambar 6. Peta Sebaran Karbon Bagian Atas di Desa Banjarsari



Gambar 7. Peta Sebaran Cadangan Karbon Total Mangrove di Desa Banjarsari

Uji akurasi dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana estimasi stok karbon mangrove berbasis citra Sentinel-2A merefleksikan kondisi nyata di lapangan di Desa Banjarsari. Analisis regresi linier sederhana menghasilkan persamaan $y = 20,2265x + 176,57$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,4847$. Nilai RMSE = 161,14 ton/ha. Nilai akurasi yang diperoleh mengindikasikan bahwa terdapat nilai bias yang besar pada model estimasi stok karbon yang dibangun. Hal ini disebabkan oleh perbedaan sifat antara data lapangan dan data citra, di mana stok karbon dihitung berdasarkan persamaan alometrik yang menggunakan diameter batang sebagai penduga biomassa, sedangkan NDVI hanya merepresentasikan tingkat kehijauan atau kerapatan tajuk vegetasi (Huang *et al.*, 2021).



Gambar 8. regresi antara karbon perhitungan Lapangan dan yang diprediksi dari citra

NDVI tidak mampu menangkap dimensi vertikal seperti tinggi pohon dan volume tegakan yang sangat berpengaruh terhadap akumulasi karbon, sehingga sering menghasilkan kesalahan serius dalam estimasi biomassa (Winarso *et al.*, 2015). Selain itu, NDVI memiliki keterbatasan karena fenomena saturasi pada vegetasi yang lebat serta pengaruh faktor eksternal seperti kondisi atmosfer, sudut perekaman, dan perbedaan sensor (Huang *et al.*, 2021; Tran *et al.*, 2022). Tran *et al.* (2022) menegaskan bahwa meskipun NDVI merupakan indeks yang paling banyak digunakan dalam kajian mangrove (82% dari total indeks), efektivitasnya tetap bergantung pada kondisi lokal, sedimen, serta kerapatan vegetasi. Oleh karena itu, NDVI perlu dikombinasikan dengan parameter struktural seperti tinggi pohon yang terbukti meningkatkan akurasi model. Nilai RMSE yang tinggi pada penelitian ini juga dapat disebabkan oleh penggunaan sampel jenis dominan saja (*Rhizophora*) sebagai nilai penduga, yang menyebabkan pengurangan variasi data dan ketidakterwakilan jenis lain dalam plot. Hal ini sejalan dengan pernyataan Winarso *et al.* (2015) bahwa NDVI hanya mampu merepresentasikan stok karbon dengan baik pada vegetasi yang bersifat homogen. Nilai akurasi dan koefisien determinasi model yang hanya menggunakan jenis dominan lebih tinggi dibandingkan dengan model yang menggunakan seluruh jenis. Nilai RMSE semakin rendah maka nilai hasil pendugaan semakin akurat. Selain faktor tersebut, perbedaan antara hasil estimasi citra dan data lapangan juga dapat dipengaruhi oleh fenomena saturasi spektral NDVI, di mana peningkatan biomassa pada kerapatan tinggi tidak selalu diikuti oleh peningkatan nilai NDVI (Lu *et al.*, 2016; Simard *et al.*, 2019). Perbedaan skala pengukuran juga berperan, karena satu piksel citra Sentinel-2A (10 × 10 m) mencakup berbagai elemen seperti tajuk, celah kanopi, bayangan, dan substrat, sehingga nilai reflektansi merupakan rata-rata dari kondisi di dalam piksel (Yu *et al.*, 2022). Faktor lain seperti variasi musiman, kondisi atmosfer, sudut pencahayaan matahari, dan pantulan permukaan tanah juga dapat memengaruhi hasil estimasi (Li *et al.*, 2020; Peng *et al.*, 2025). Adanya piksel campuran (mixed pixel) menyebabkan model cenderung merata, sehingga area dengan stok karbon tinggi terlihat lebih rendah pada hasil estimasi.

Nilai RMSE sebesar 161,14 ton/ha yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan adanya tingkat penyimpangan yang relatif tinggi dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya. Misalnya, Mngadi *et al.* (2021) di Afrika Selatan melaporkan nilai RMSE antara 0,378–0,466 ton/ha dengan akurasi sedang, Marzuki *et al.* (2023) di Kalimantan Utara memperoleh nilai 31,82 ton/ha, sedangkan Suardana *et al.* (2023) di Teluk Benoa, Bali, mencatat RMSE sebesar 14,72 ton/ha. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh variasi kondisi ekologi mangrove, tingkat heterogenitas tajuk, perbedaan metode kalibrasi lapangan, serta resolusi spasial citra yang digunakan. (Peng *et al.*, 2025) Dengan demikian, penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa citra Sentinel-2A dapat

digunakan secara efektif untuk menduga stok karbon mangrove pada skala bentang wilayah, bahkan di daerah yang sulit dijangkau seperti Pulau Enggano.

KESIMPULAN

Desa Banjarsari, Pulau Enggano memiliki keanekaragaman jenis mangrove yang tinggi namun jenis mangrove yang mendominasi pada pulau tersebut yaitu *Rhizophora apiculata*. Hasil analisis transformasi NDVI pada citra Sentinel-2A menunjukkan bahwa ekosistem mangrove di wilayah ini didominasi oleh kategori kerapatan rapat seluas 189,34 ha (98%) dari total luasan 193,25 ha. Total cadangan karbon mangrove di Desa Banjarsari mencapai total 44.276,78 ton C.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Bengkulu yang telah memberikan dukungan penelitian melalui hibah Penelitian Fundamental Tahun 2025 dengan nomor kontrak 1812/UN30.15/PT/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Alviana, D., Anggraini, R., Hidayati, J. R., Karlina, I., Lestari, F., Apdillah, D., ... & Sihite, D. (2023). Estimasi Cadangan Karbon Pada Ekosistem Mangrove Di Desa Pengudang Kecamatan Teluk Sebung Kabupaten Bintan. *Jurnal Kelautan Tropis*, 26(3), 464-472.
- Bindu, G., Rajan, P., Jishnu, E. S., & Joseph, K. A. (2020). Carbon stock assessment of mangroves using remote sensing and geographic information system. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(1), 1-9.
- Candra, E. D., Hartono, & Wicaksono, P. (2016). Above ground carbon stock estimates of mangrove forest using Worldview-2 imagery in Teluk Benoa, Bali. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 47(1): 012014.
- FAO. (2023). *Global Mangrove Forests Status Report*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Forestriko, H. F. (2016). Pemanfaatan citra Landsat 8 untuk estimasi stok karbon hutan mangrove di kawasan Segara Anakan Cilacap Jawa Tengah. *Jurnal Bumi Indonesia*, 5(1): 1-10.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1): 1-6.
- Kauffman, J. B., Heider, C., Cole, T. G., Dwire, K. A., & Donato, D. C. (2011). Ecosystem carbon stocks of Micronesian mangrove forests. *Wetlands*, 31(2), 343-352.
- Komiyama, A., Pongparn, S., & Kato, S. (2005). Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4): 471-477.
- Kristianingsih, L., Wijaya, A. P., & Sukmono, A. (2016). Analisis pengaruh koreksi atmosfer terhadap estimasi kandungan klorofil-a menggunakan citra Landsat 8. *Jurnal Geodesi Undip*, 5(4): 56-64.
- Li, H., Zhang, G., Zhong, Q., Xing, L., and Du, H. 2023. Prediction of urban forest aboveground carbon using machine learning based on landsat 8 and Sentinel-2: a case study of Shanghai, China. *Remote Sensing*, 15(1), 284.
- Marzuki, M., Nurdin, N., Yasir, I., Mashoreng, S., & Selamat, M. B. (2023). Estimasi stok karbon biomassa pada ekosistem mangrove menggunakan data satelit di Pulau Nunukan Kabupaten Nunukan Kalimantan Utara. *Majalah Ilmiah Globë*, 25(1): 63-76.
- 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 Sensing*, 13(21).
- Muhsoni, F. F., Sambah, A. B., Mahmudi, M., & Wiadnya, D. G. R. (2018). Estimation of mangrove carbon stock with hybrid method using image Sentinel-2. *GEOMATE Journal*, 15(49), 185-192.
- Murdiyarso, D., Purbopuspito, J., Kauffman, J. B., Warren, M. W., Sasmito, S. D., Donato, D. C., ... & Kurnianto, S. (2015). The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 5(12), 1089-1092.

- Myeong, S., Nowak, D. J., & Duggin, M. J. (2006). A temporal analysis of urban forest carbon storage using remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 101(2): 277–282.
- Peng, C., Song, Y., Huang, Q., Niu, Z., Zeng, G., Kang, H., & Ying, M. (2025). Estimating coastal mangrove aboveground biomass of Zhejiang Province based on Sentinel-2 images and multiple machine learning algorithms. *Frontiers in Forests and Global Change*, 8: 1662546.
- Perry, E., Sheffield, K., Crawford, D., Akpa, S., Clancy, A., & Clark, R. (2022). Spatial and temporal biomass and growth for grain crops using NDVI Time Series. *Remote Sensing*, 14(13), 3071.
- Pham, T. D., Le, N. N., Ha, N. T., Nguyen, L. V., Xia, J., Yokoya, N., ... Takeuchi, W. (2020). Estimating mangrove above-ground biomass using extreme gradient boosting decision trees algorithm with fused Sentinel-2 and ALOS-2 PALSAR-2 data in Can Gio Biosphere Reserve, Vietnam. *Remote Sensing*, 12(777).
- Pratama, W., Sugara, A., Rudiastuti, A. W., & Anggoro, A. (2025). Pemetaan Kerapatan Mangrove Dengan Perbandingan Indeks Vegetasi Menggunakan Platform Google Earth Engine Di Pulau Enggano. *Majalah Ilmiah Globe*, 27(1), 11-22.
- Purnamasari, E., Kamal, M., & Wicaksono, P. (2021). Comparison of vegetation indices for estimating above-ground mangrove carbon stocks using PlanetScope image. *Regional Studies in Marine Science*, 44: 101730.
- Putra, R. D., Napitupulu, H. S., Nugraha, A. H., Suhana, M. P., Ritonga, A. R., & Sari, T. E. Y. (2022). Pemetaan luasan hutan mangrove dengan menggunakan citra satelit di Pulau Mapur, Provinsi Kepulauan Riau. *Jurnal Kelautan Tropis*, 25(1): 20–30.
- Rijal, S. S., Pham, T. D., Noer'Aulia, S., Putera, M. I., & Saintilan, N. (2023). Mapping mangrove above-ground carbon using multi-source remote sensing data and machine learning approach in Loh Buaya, Komodo National Park, Indonesia. *Forests*, 14(1), 94.
- Rozy, E. F., Soenardjo, N., Wibowo, E., & Ario, R. (2018). Estimasi kandungan biomassa dan karbon di hutan mangrove Perancak Kabupaten Jembrana, Provinsi Bali. *Buletin Oseanografi Marina*, 7, 1–8.
- Samsuri, S., Zaitunah, A., Meliani, S., Syahputra, O. K., Budiharta, S., Susilowati, A., & Azhar, I. (2021). Mapping of mangrove forest tree density using Sentinel-2A satellite image in remained natural mangrove forest of Sumatra eastern coastal. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 912(1): 012001.
- Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, G., Solvik, K., Adame, M. F., Benson, L., ... & Landis, E. (2018). A global map of mangrove forest soil carbon at 30 m spatial resolution. *Environmental Research Letters*, 13(5), 055002.
- Sharma, S., Mohd, F. A., & Selamat, S. N. (2020). Assessment of the mangrove forest changes along the pahang coast using remote sensing and gis technology. *Journal of Sustainability Science and Management*, 15(5), 43–58.
- Shiau, Y. J., & Chiu, C. Y. (2020). Biogeochemical processes of C and N in the soil of mangrove forest ecosystems. *Forests*, 11(5): 492.
- Siddiq, A., Dimiyati, M., & Damayanti, A. (2020). Analysis of carbon stock distribution of mangrove forests in the Coastal City of Benoa, Bali with combination vegetation index, and statistics approach. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(6), 2386–2393.
- Simard, M., Fatoyinbo, L., Smetanka, C., Rivera-Monroy, V. H., Castañeda-Moya, E., Thomas, N., & Van der Stocken, T. (2019). Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency. *Nature Geoscience*, 12(1), 40-45..
- Small, C., & Sousa, D. (2022). The Sentinel 2 MSI spectral mixing space. *Remote Sensing*, 14(22), 5748.
- Suardana, A. A., Anggraini, N., Nandika, M. R., Aziz, K., As-syakur, A., Ulfa, A., ... & Dewanti, R. (2023). Estimation and mapping above-ground mangrove carbon stock using sentinel-2 data derived vegetation indices in Benoa Bay of Bali Province, Indonesia. *Forest and Society*, 7(1), 116-134..
- Sugara, A., Lukman, A. H., Rudiastuti, A. W., Anggoro, A., Hidayat, M. F., Nugroho, F., ... & Rahmania, M. (2022). Utilization of Sentinel-2 Imagery in Mapping the Distribution and Estimation of Mangroves' Carbon Stocks in Bengkulu City. *Geosfera Indonesia*, 7(3), 219-235.
- Thuy, H. L. T., Tan, M. T., Van, T. T. T., Bien, L. B., Ha, N. M., & Nhung, N. T. (2020). Using sentinel image data and plot survey for the assessment of biomass and carbon stock in Coastal Forests of Thai Binh Province, Vietnam. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(6), 7499–7514.

- Tran, T. V., Reef, R., & Zhu, X. (2022). A review of spectral indices for mangrove remote sensing. *Remote Sensing*, 14(19), 4868.
- Winarso, G., Vetrta, Y., Purwanto, A. D., & Darmawan, S. (2015). Mangrove above ground biomass estimation using combination of Landsat 8 and ALOS PALSAR data. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 12(2), 85-96..
- Yu, Y., Pan, Y., Yang, X., & Fan, W. (2022). Spatial scale effect and correction of forest aboveground biomass estimation using remote sensing. *Remote Sensing*, 14(12), 2828.