Aplikasi Platform Google Earth Engine untuk Estimasi Stok Karbon Mangrove di Barat Laut Pulau Enggano, Sumatra

Ayub Sugara[1]*, Ari Anggoro[2], Ana Ariasari[2], Gunggung Senoaji[3], Hefri Oktoyoki[3], Wahyunda Pratama[1], Sigit Widianto Firsta[1], Adi Eko Prayitno[1], Feri Nugroho[4]

[1]Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu
[2]Program Studi Sains Perikanan, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu
[3]Program Studi Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu
Jl. W.R Supratman, Kandang Limun,Bengkulu 38122 Indonesia
[4]Program Studi Bisnis Digital, Fakultas Bisnis dan Ekonomi, Universitas Global Jakarta
Jl. Boulevard Grand Depok City No.2, Tirtajaya, Depok, Jawa Barat 16412 Indonesia
Email: ayubsugara@unib.ac.id

Abstract

Application of Google Earth Engine for Estimating Mangrove Blue Carbon Stocks in Northwestern Enggano Island, Sumatra

The increasing concentration of greenhouse gases, particularly carbon dioxide (CO_2), in the atmosphere is a major driver of global climate warming. One of the most effective strategies to mitigate this impact is enhancing the role of forests as carbon sinks through sustainable forest management, including mangrove ecosystems. Similar to other forest ecosystems, mangroves play a crucial role in absorbing atmospheric CO_2. Northwestern Enggano Island hosts an extensive mangrove ecosystem, part of which is located within the Tanjung Laksaha Nature Reserve. Quantifying the amount of carbon stored in mangrove biomass provides a clear indication of the volume of atmospheric CO_2 sequestered by these ecosystems. Conversely, degraded mangrove forests can become sources of greenhouse gas emissions, as their capacity to absorb and store carbon is significantly reduced. To date, comprehensive data and information on mangrove carbon stocks in Northwestern Enggano Island, have been lacking. This study demonstrates that a remote sensing approach based on Google Earth Engine (GEE), integrated with field data and an NDVI–AGB regression model, can effectively and reliably estimate mangrove carbon stocks in the study area. The mangrove ecosystem in Northwestern of Enggano island, was identified to cover an area of 199.72 ha, with estimated average carbon stocks of 496.91 ton/ha in above-ground biomass (AGB) and 188.82 ton/ha in below-ground biomass (BGB). The classification results showed excellent performance, with an Overall Accuracy of 95.45%. The total potential carbon stock was estimated at 64,368.95 tons, predominantly contributed by dense mangrove stands as the primary carbon reservoir. These findings underscore the strategic role of mangrove ecosystems in climate change mitigation and provide a strong scientific basis for sustainable management planning, conservation initiatives, and the development of blue carbon schemes. Furthermore, this cloud-computing-based approach represents a significant advancement in blue carbon mapping, as it enables large-scale data processing without reliance on local hardware and allows for continuous temporal updates.

***Keywords**: Bengkulu, Cloud Computing, , Remote Sensing, Google Earth Engine*

Abstrak

Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca terutama karbon dioksida (CO2), di atmosfer merupakan faktor penyebab timbulnya pemanasan iklim secara global. Salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk meminimalisir dampak tersebut adalah meningkatkan peran hutan sebagai penyerap CO2 melalui pengelolaan hutan, salah satunya adalah hutan mangrove. Ekosistem mangrove, sebagaimana ekosistem hutan lainnya, berperan sebagai penyerap CO2 dari atmosfer. Area Barat Laut Pulau Enggano memiliki ekosistem mangrove yang sebagian berada di dalam Kawasan Cagar Alam Tanjung Laksaha. Diketahui, bahwa mengukur jumlah karbon yang disimpan dalam tubuh mangrove pada suatu lahan dapat menggambarkan banyaknya CO2 di atmosfer yang diserap oleh mangrove. Hutan mangrove menjadi sumber emisi gas rumah kaca apabila kondisi hutan mangrove rusak, sehingga kemampuan menyerap karbonnya berkurang. Sampai saat ini belum terdapat data dan informasi terkait kandungan karbon mangrove di barat Laut Pulau Enggano. Pendekatan penginderaan jauh berbasis Google Earth Engine (GEE) yang dikombinasikan dengan data lapangan dan model regresi NDVI–AGB mampu mengestimasi stok karbon mangrove di barat Laut Pulau Enggano secara efektif dan andal. Ekosistem mangrove di Barat Laut, Pulau Enggano, teridentifikasi seluas 199,72 ha. Estimasi rata-rata stok karbon pada bagian atas vegetasi (AGB) sebesar 496,91 ton/ha dan pada bagian bawah vegetasi (BGB) sebesar 188,82 ton/ha, dengan tingkat akurasi klasifikasi sebesar 95,45%. Total potensi simpanan karbon mencapai 64.368,95 ton, yang didominasi oleh mangrove berkerapatan tinggi sebagai penyumbang utama stok karbon. Temuan ini menegaskan peran strategis mangrove dalam mitigasi perubahan iklim serta menyediakan dasar ilmiah yang kuat untuk perencanaan pengelolaan, konservasi, dan pengembangan skema karbon biru yang berkelanjutan. Selain itu, Pendekatan berbasis cloud computing ini menjadi

*) Corresponding author
www.ejournal2.undip.ac.id/index.php/jkt
Diterima/Received : 23-01-2026, Disetujui/Accepted : 09-10-2026
DOI: https://doi.org/10.14710/jkt.v29i3.30571

terobosan penting dalam pemetaan karbon biru, karena mampu memproses data dalam skala besar tanpa bergantung pada perangkat keras lokal dan dapat diperbarui secara temporal.

Kata kunci: Bengkulu, Cloud Computing, Google Earth Engin, Penginderaan Jauh

PENDAHULUAN

Mangrove merupakan ekosistem dengan karakteristik lingkungan yang unik. Karena pengaruh laut dan darat, kawasan mangrove memiliki interaksi sifat fisik dan biologis yang kompleks. Keberadaan mangrove di pesisir Tangkolak merupakan potensi yang menguntungkan bagi masyarakat sekitar. Mangrove memiliki beberapa manfaat ekologis yang signifikan. Akar mangrove membantu menjaga stabilitas tanah di daerah pesisir, mengurangi erosi pantai, dan melindungi pesisir dari dampak gelombang dan badai (Pratama *et al*., 2025). Selain itu, hutan mangrove juga berfungsi sebagai tempat berkembang biak bagi berbagai jenis ikan, udang, dan hewan laut lainnya (Sugara *et al*., 2023). Daun-daun mangrove yang gugur juga menjadi sumber nutrisi bagi ekosistem laut di sekitarnya. Kerusakan ekosistem mangrove secara umum disebabkan oleh aktivitas manusia dalam penyalahgunaan sumber daya alam di wilayah pesisir tanpa memperhatikan kelestariannya, seperti penggundulan hutan, penebangan kayu yang berlebihan untuk kayu bakar, tambak, pemukiman manusia, industri dan pertambangan (Peraturan Menteri Kehutanan, 2004). Degradasi mangrove secara global mencapai 25%, dari tahun 1980-2000 (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2007). Data tahun 2009 memperkirakan luas mangrove di Indonesia sebesar 3,2 juta hektar dan sekitar 6,4% berada pada wilayah administrasi Provinsi Riau (Hartini *et al*. 2010). Kecenderungan luas tersebut menurun setiap tahunnya. Selama 25 tahun (1980-2005) Indonesia telah kehilangan 30,1% atau 1,3 juta hektar mangrove (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2007).

Kebutuhan data spasial semakin meningkat untuk mendukung pengelolaan sumber daya mangrove secara optimal. Seiring berkembangnya teknologi, penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) juga dapat digunakan untuk memperoleh informasi spasial tentang potensi sumber daya pesisir (Apostolopoulos & Nikolakopoulos, 2021). Dalam mencegah dan mengendalikan kerusakan mangrove, perlu dilakukan pemetaan dan tata letak mangrove. Pemetaan ini membantu dalam pengelolaan dan pengembangan kebijakan mengenai ekosistem mangrove dan kawasan pesisir. Pemetaan merupakan langkah awal dalam penelitian yang dapat digunakan untuk mengamati keadaan mangrove, sehingga dapat memberikan gambaran sebaran kawasan mangrove yang lebih efektif (Budiarsa & Ritonga, 2016). Pemetaan luasan hutan mangrove dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh dapat memberikan gambaran peta sebaran luasan hutan mangrove pada suatu daerah (Shalihati, 2014). Sumber data penginderaan jauh dapat bersumber pada wahana satelit yang dapat melakukan inventarisasi dan monitoring sumberdaya alam secara spasial. Citra satelit Sentinel merupakan salah satu cita yang memiliki kemampuan dalam menganalisa data mangrove. Beberapa penelitian sebelumnya juga telah menggunakan citra resolusi menegah. Selain itu, Sentinel-2 telah dirancang untuk mendukung lahan *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) (Drusch *et al*., 2012). Sebagai konsekuensi dari pembangunan dan pengembangan wilayah di Pulau Enggano, maka perubahan yang terjadi pada lingkungan dan ekosistem mangrove sulit dihindarkan. Kawasan mangrove umumnya sebagian telah beralih fungsi menjadi lahan konversi pemukiman serta upaya peningkatan mutu di sektor perikanan, sehingga mengakibatkan kawasan pesisir semakin kecil dan terjadi perubahan kondisi tempat tumbuh mangrove.

Pulau Enggano Kabupaten Bengkulu Utara merupakan salah satu pulau kecil terdepan yang memiliki potensi eksosistem hutan mangrove. Karena perkembangan dan pengembangan wilayah di Pulau Enggano. Pulau Enggano sebagai salah satu pulau terdepan Indonesia memiliki karakteristik ekosistem pesisir yang berbeda dibandingkan pulau-pulau besar karena relatif masih menghadapi tekanan antropogenik yang lebih rendah, memiliki tingkat konektivitas yang terbatas dengan daratan utama, serta dipengaruhi secara langsung oleh dinamika oseanografi Samudra Hindia.

Karakteristik tersebut berpotensi menghasilkan kapasitas penyimpanan dan dinamika karbon biru yang khas, namun hingga saat ini masih belum banyak dieksplorasi secara ilmiah (Alongi, 2014; Macreadie *et al*., 2019). Sebagian besar penelitian karbon biru di Indonesia masih berfokus pada ekosistem pesisir di pulau-pulau besar, sementara informasi mengenai stok karbon, distribusi spasial, dan faktor-faktor pengendalinya pada pulau-pulau terdepan dan terluar masih sangat terbatas (Mcleod *et al*., 2011; Howard *et al*., 2017). Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan kebaruan (*novelty*) dengan mengkaji karakteristik karbon biru pada ekosistem pesisir Pulau Enggano sebagai representasi pulau terdepan Indonesia.. Studi terbaru mengenai ekosistem mangrove di Desa Banjarsari menunjukkan bahwa Pulau Enggano memiliki potensi penyimpanan karbon yang signifikan, dengan estimasi stok karbon atas mangrove sebesar 44.276,78 ton C pada area sekitar 193,25 ha (Firsta *et al*., 2025).

Sebagai upaya mengatasi tantangan komputasi dalam analisis mangrove di Barat Laut Pulau Enggano, penelitian ini akan memanfaatkan *platform cloud computing Google Earth Engine* (GEE). GEE merupakan platform untuk analisis citra satelit dalam skala yang besar dan telah digunakan secara luas dalam penelitian pemetaan vegetasi seperti penelitian yang telah dilakukan di Cina, Filipina dan Indonesia (Chen *et al*., 2017; Tamondong *et al*., 2021; Husnayaen *et al*., 2023). GEE adalah *platform cloud computing* yang dikembangkan oleh Google untuk analisis dan visualisasi data geospasial (Waleed & Sajjad, 2023). GEE memungkinkan pengguna untuk menjalankan analisis spasial dan pemodelan menggunakan dataset yang luas dari citra satelit dan data geospasial lainnya. Platform ini menawarkan akses cepat dan efisien terhadap sumber daya komputasi di cloud, memungkinkan analisis skala besar dan pemetaan dinamis untuk berbagai aplikasi, termasuk pemantauan lingkungan, perubahan lahan, dan penelitian ilmiah lainnya (Latue & Rakuasa, 2023).

Meningkatnya aktivitas manusia pada sektor industri, transportasi, pembangkit listrik, dan lainnya berdampak pada meningkatnya kadar karbon dioksida (CO2) yang terlepas ke udara dan mengakibatkan pemanasan iklim secara global (Triana, 2008). Salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk meminimalisir dampak tersebut adalah meningkatkan peran hutan sebagai penyerap CO2 melalui pengelolaan hutan, salah satunya yaitu hutan mangrove (Forestriko, 2016). Kemampuan mangrove dalam menyimpan karbon lebih banyak jika dibandingkan hutan jenis lainnya (Donato *et al*., 2012). Penginderaan jauh merupakan salah satu metode yang efektif untuk melakukan monitoring dan mengestimasi jumlah karbon mangrove yang masuk dalam sektor Blue Cabon Database (Albasit *et al*., 2022). Beberapa institusi dunia bahkan menyediakan citra satelit resolusi tinggi dan gratis yang dapat diunduh seperti Ikonos, Quickbird, dan Worldview (Farahdita *et al*., 2021). Penelitian ini memiliki objektifitas untuk mengetahui seberapa besar kawasan ekosistem mangrove di Barat Laut Pulau Enggano mampu menyerap karbon dari udara dengan integrasi citra satelit resolusi menegah. Mengingat penggunaan citra satelit untuk penentuan estimasi stok karbon masih jarang dilakukan, sehingga wahana satelit dengan resolusi menengah menjadi pilihan yang tepat untuk dipergunakan dalam pemetaan estimasi stok karbon dengan hasil yang cepat didapatkan dan real time. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung estimasi stok karbon mangrove dan melakukan pemetaan distribusi spasial stok karbon di Barat Laut Pulau Enggano Kabupaten Bengkulu Utara.

MATERI DAN METODE

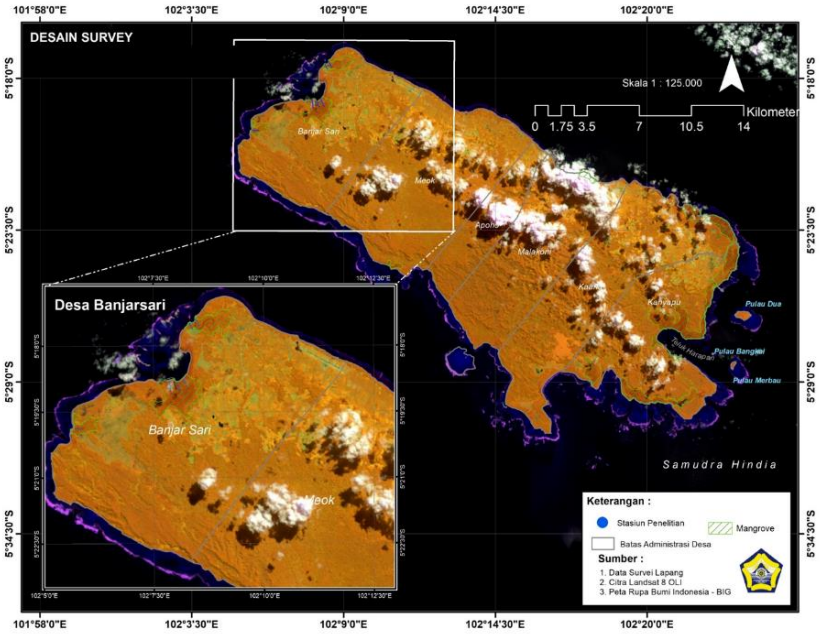
Penelitian ini dilakukan di ekosistem mangrove Desa Banjarsari, di bagian Barat Laut Pulau Enggano, Kabupaten Bengkulu Utara, Provinsi Bengkulu, Sumatra, Indonesia. Lokasi ini dipilih karena merupakan ekosistem mangrove terluar yang representatif dan belum banyak diteliti potensi karbonnya. Pengambilan data primer melalui survei lapangan dilaksanakan pada tanggal 22 – 27 Februari 2025. Pengambilan sampel dilakukan pada 15 plot ukuran 10x10 meter yang tersebar di 3 stasiun penelitian. Penentuan titik plot dilakukan menggunakan metode *purposive random sampling* berdasarkan analisis awal citra satelit. Peta detail lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Data primer yang dikumpulkan adalah data biomassa mangrove. Pada setiap plot berukuran 10x10 m, dilakukan pengukuran diameter setinggi dada (DBH) untuk semua pohon mangrove dengan diameter > 5 cm. Data DBH tersebut kemudian digunakan untuk menghitung biomassa atas permukaan (AGB) per pohon. Perhitungan biomassa atas permukaan (AGB) untuk setiap jenis mangrove dilakukan menggunakan persamaan alometrik spesifik-jenis. Pemilihan persamaan ini didasarkan pada ulasan komprehensif mengenai alometri mangrove yang disajikan oleh Komiyama *et al*. (2008), yang membandingkan berbagai model untuk spesies yang berbeda. Total AGB per plot (*wtop*) dihitung dengan menjumlahkan biomassa seluruh pohon dalam satu plot.

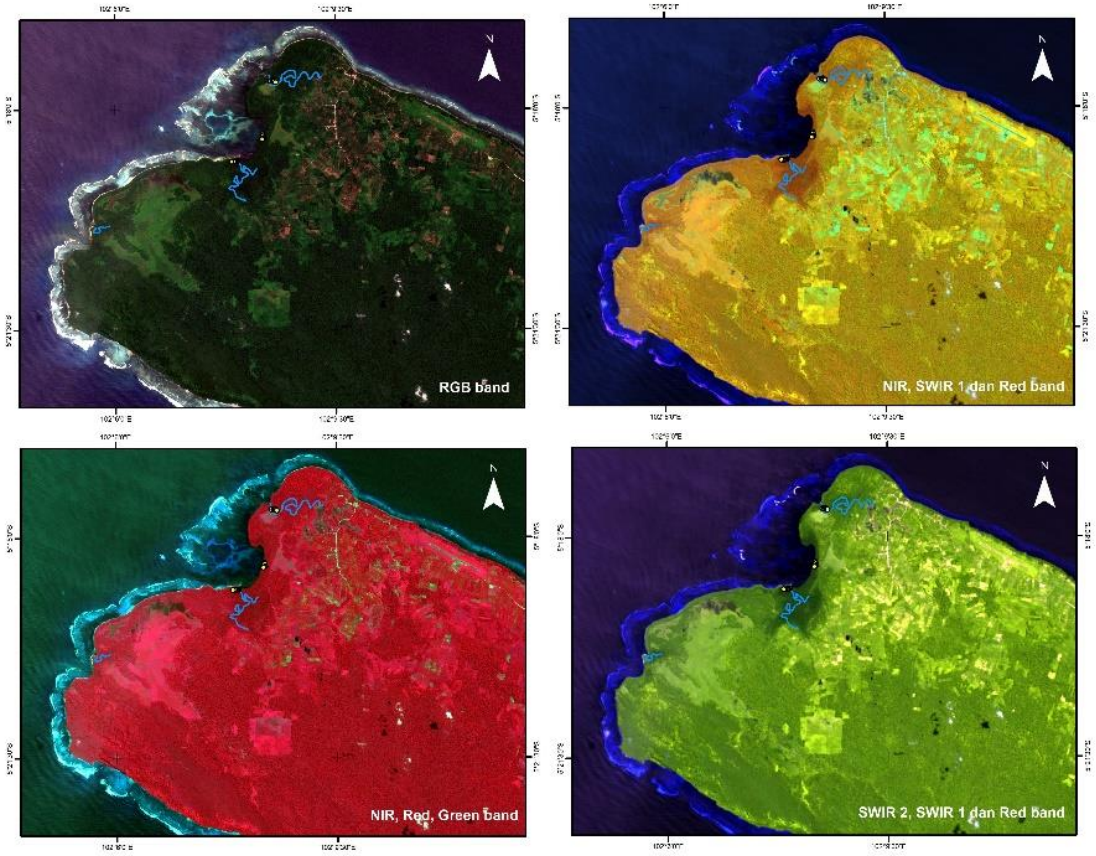
Data sekunder yang digunakan adalah citra satelit Sentinel-2A dengan tanggal akuisisi 20 November 2024. Citra ini diakses dan diolah menggunakan platform *Google Earth Engine*. Kemudian, digunakan kombinasi *false color band* dan *true coler band* untuk melihat secara visual area sebaran ekosistem mangrove sebelumobservasi langsung di lapangan (Gambar 2). Alur penelitian terdiri dari klasifikasi luasan mangrove, pemodelan biomassa dan karbon, serta analisis statistik, yang dilakukan di dalam platform GEE dan perangkat lunak *spreadsheet* (Ms. Excel).

Luasan mangrove dipisahkan dari objek lain (non-mangrove dan badan air) menggunakan klasifikasi terbimbing dengan algoritma *random forest*. Algoritma *random forest* terus mengalami kemajuan dan telah dimanfaatkan secara luas dalam proses klasifikasi tutupan lahan, khususnya pada kawasan hutan mangrove (Purwanto *et al*., 2023). GEE menyediakan berbagai metode klasifikasi data, baik yang bersifat *supervised* maupun *unsupervised*. Di antara metode-metode tersebut, *random forest* merupakan salah satu yang paling banyak digunakan dalam penelitian mengenai klasifikasi penggunaan dan tutupan lahan. Popularitasnya tercermin dari jumlah publikasi ilmiah yang mencapai hampir 15.000 artikel dalam lima tahun terakhir yang menerapkan metode ini. Konsep cara kerja algoritma *random forest* untuk klasifikasi mangrove dan non mangrove dapat dilihat pada Gambar 3.

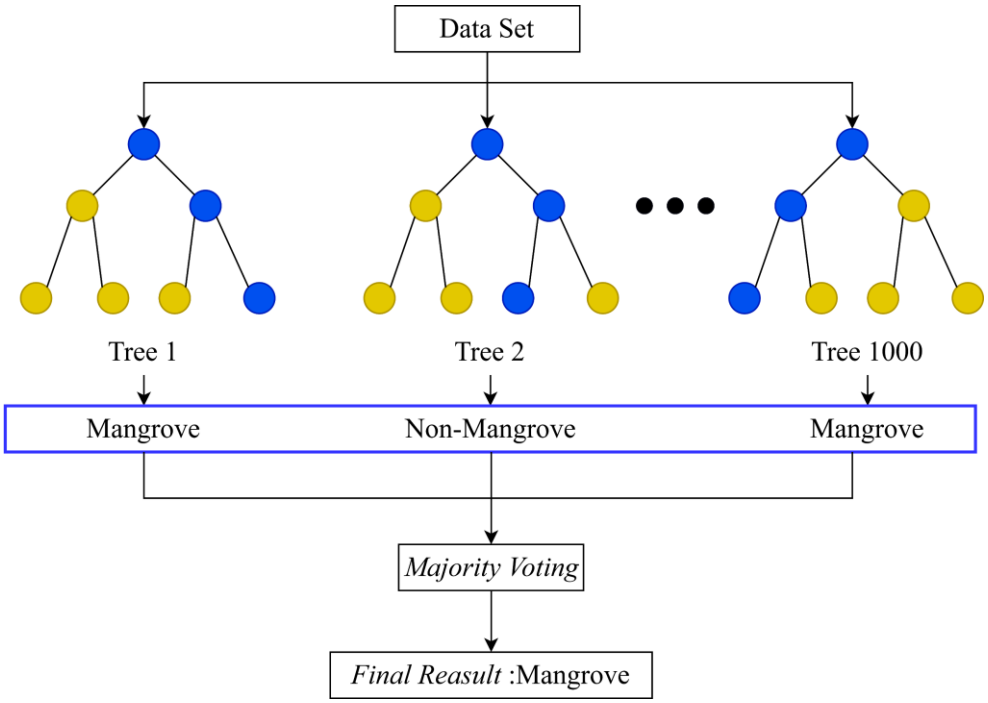
Sebagai prediktor, digunakan 6 band spektral Sentinel-2A (B2, B3, B4, B8, B11, B12) yang digabungkan dengan data elevasi dan lereng dari SRTM. Data latih dan validasi (70:30) diambil dari titik-titik yang telah diidentifikasi secara visual. Uji akurasi hasil klasifikasi dilakukan menggunakan metode *confusion matrix* dengan 101 titik sampel (32 Mangrove, 36 Non-Mangrove, 33 Perairan) untuk menghitung *Overall Accuracy* (OA). Skema klasifikasi kelas dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian di Pulau Enggano, Sumatra



Gambar 2. Kombinasi *false* dan *true color band* Sentinel-2A



Gambar 3. Algoritma *random forest*

Tabel 1. Kelas klasifikasi Terbimbing

Kelas	Nilai	Keterangan
Mangrove	0	Vegetasi yang diduga sebagai mangrove
Non-Mangrove	1	Daratan termasuk lahan terbangun, lahan terbuka, vegetasi non-mangrove
Perairan	2	Perairan termasuk Sungai, danau dan laut

Dari area yang telah terklasifikasi sebagai mangrove, dihitung *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) menggunakan formula sebagai berikut (Nugroho *et al*., 2023):

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

dimana NIR adalah band 8 dan Red adalah band 4 dari citra Sentinel-2A.

Selanjutnya, dibangun sebuah model regresi non-linear eksponensial untuk menghubungkan nilai AGB lapangan (wtop) dalam satuan kg/100m² yang dihitung dari data survei lapangan menggunakan persamaan alometrik dengan nilai piksel NDVI yang bersesuaian. Berdasarkan analisis regresi, diperoleh persamaan berikut:

$$AGB\ lapangan\ (kg/100m^2) = a*e^{\wedge(NDVI*b)}$$

dimana AGB lapangan adalah Estimasi biomassa atas tanah (kg/100m2); NDVI adalah Nilai indeks vegetasi dari pixel citra; a dan b adalah Konstanta yang diperoleh dari hasil analisis regresi

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

Area mangrove diklasifikasikan menjadi tiga kelas kerapatan berdasarkan ambang batas NDVI sesuai pedoman Departemen Kehutanan (2005) dengan nilai NDVI: Jarang (NDVI ≤ 0.32), Sedang (0.32 < NDVI ≤ 0.42), dan Rapat (NDVI > 0.42). Luas area dan total stok karbon untuk setiap kelas kerapatan dihitung untuk mengetahui kontribusi masing-masing kelas terhadap total simpanan karbon di lokasi studi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil survei lapangan, ditemukan empat spesies mangrove utama yang tersebar secara bervariasi di tiga stasiun penelitian. Kehadiran setiap spesies pada masing-masing stasiun disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan hasil inventarisasi pohon pada 15 plot penelitian, ekosistem mangrove di Barat Laut Pulau Enggano didominasi oleh spesies dari famili Rhizophoraceae. Spesies yang paling umum ditemukan dan memiliki sebaran paling luas adalah *Rhizophora apiculata* dan *Bruguiera gymnorrhiza*. Kedua spesies ini secara konsisten hadir di sebagian besar plot penelitian di ketiga stasiun, menandakan perannya sebagai spesies penyusun utama dan paling adaptif di lokasi studi. Selain kedua spesies dominan tersebut, ditemukan juga *Rhizophora mucronata* yang umumnya hadir bersamaan dengan *R. apiculata* di stasiun 2 dan 3. Kehadiran *Xylocarpus granatum* yang hanya tercatat di stasiun 1 menunjukkan adanya kemungkinan variasi kondisi substrat atau salinitas di zona tersebut dibandingkan dengan stasiun lainnya.

Tabel 2. Sebaran Jenis Mangrove di Lokasi Penelitian

No	Species	Stasiun		
		1	2	3
1	*Rhizophora apiculata*	+	+	+
2	*Rhizophora mucronata*		+	+
3	*Bruguiera gymnorrhiza*	+	+	+
4	*Xylocarpus granatum*	+		

"+" berarti spesies mangrove ditemukan pada stasiun penelitian

Tabel 3. Jenis, biomassa dan stok karbon mangrove

Nama	Jumlah pohon	AGB (Wtop x 0,47)	BGB (Wr x 0,39)	AGB + BGB	Total Stok Karbon / 0,15	Total Stok Karbon / 1000 (ton C/ha)
Rhizophora apiculata	166	29571.35	8136.90	37708.24	251388.29	251.39
Bruguiera gymnorrhiza	46	10283.23	4758.59	15041.82	100278.83	100.28
Xylocarpus granatum	8	4072.74	1537.81	5610.55	37403.67	37.40
Rhizophora mucronata	21	1467.28	422.50	1889.78	12598.51	12.60
Total	241	45394.60	14855.79	60250.39551	401669.3034	401.67

Komposisi jenis ini memberikan gambaran mengenai struktur tegakan. Dominasi oleh genus *Rhizophora* dan *Bruguiera*, yang dikenal memiliki kayu padat dan sistem perakaran yang ekstensif, mengindikasikan potensi simpanan biomassa dan karbon yang tinggi. Kerapatan individu dari spesies-spesies ini di dalam setiap plot menjadi dasar utama dalam perhitungan biomassa total, di mana plot dengan banyak pohon berdiameter besar akan menyumbang nilai biomassa yang paling signifikan (Sugara *et al*., 2022).

Berdasarkan hasil perhitungan, komunitas mangrove di Barat Laut Pulau Enggano terdiri atas empat jenis, yaitu *Rhizophora apiculata, Bruguiera gymnorrhiza, Xylocarpus granatum, dan Rhizophora mucronata*, dengan total sebanyak 241 pohon. Secara keseluruhan, biomassa atas permukaan (AGB) yang dihasilkan mencapai 45.394,60 kg, sedangkan biomassa bawah permukaan (BGB) sebesar 14.855,79 kg. Dengan demikian, total biomassa mangrove, yang merupakan penjumlahan AGB dan BGB, mencapai sekitar 60.250,40 kg. Jenis *Rhizophora apiculata* merupakan jenis yang paling dominan, baik dari jumlah individu maupun kontribusinya terhadap biomassa dan stok karbon. Jenis ini ditemukan sebanyak 166 pohon atau sekitar 68,9% dari total pohon. *Rhizophora apiculata* menghasilkan AGB sebesar 29.571,35 kg dan BGB sebesar 8.136,90 kg, sehingga total biomassanya mencapai 37.708,24 kg. Berdasarkan perhitungan stok karbon, jenis ini menyumbang sekitar 251,39 ton C/ha, yang merupakan kontribusi terbesar dibandingkan jenis lainnya.

Jenis kedua yang memberikan kontribusi cukup besar adalah *Bruguiera gymnorrhiza*, dengan jumlah 46 pohon. Jenis ini memiliki AGB sebesar 10.283,23 kg dan BGB sebesar 4.758,59 kg, sehingga total biomassanya mencapai 15.041,82 kg. Stok karbon yang dihasilkan sebesar 100,28 ton C/ha. Meskipun jumlah individunya jauh lebih sedikit dibandingkan R. apiculata, kontribusi biomassanya relatif tinggi karena ukuran dan struktur pohonnya. Selanjutnya, *Xylocarpus granatum* ditemukan sebanyak 8 pohon, tetapi menghasilkan biomassa yang relatif besar, yaitu 5.610,55 kg, yang terdiri atas 4.072,74 kg AGB dan 1.537,81 kg BGB. Jenis ini menghasilkan stok karbon sebesar 37,40 ton C/ha. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa jumlah individu tidak selalu berbanding lurus dengan kontribusi biomassa, karena ukuran dan diameter pohon juga berpengaruh terhadap besarnya biomassa

yang tersimpan. Sementara itu, *Rhizophora mucronata* merupakan jenis dengan jumlah individu paling sedikit kedua, yaitu 21 pohon, dengan total biomassa sebesar 1.889,78 kg. Jenis ini menghasilkan stok karbon sebesar 12,60 ton C/ha, sehingga menjadi jenis dengan kontribusi stok karbon paling rendah dalam lokasi penelitian.

Secara keseluruhan, total stok karbon yang diperoleh dari keempat jenis mangrove adalah sekitar 401,67 ton C/ha. Kontribusi terbesar berasal dari *Rhizophora apiculata* sebesar 251,39 ton C/ha, diikuti *Bruguiera gymnorrhiza* sebesar 100,28 ton C/ha, *Xylocarpus granatum* sebesar 37,40 ton C/ha, dan *Rhizophora mucronata* sebesar 12,60 ton C/ha.

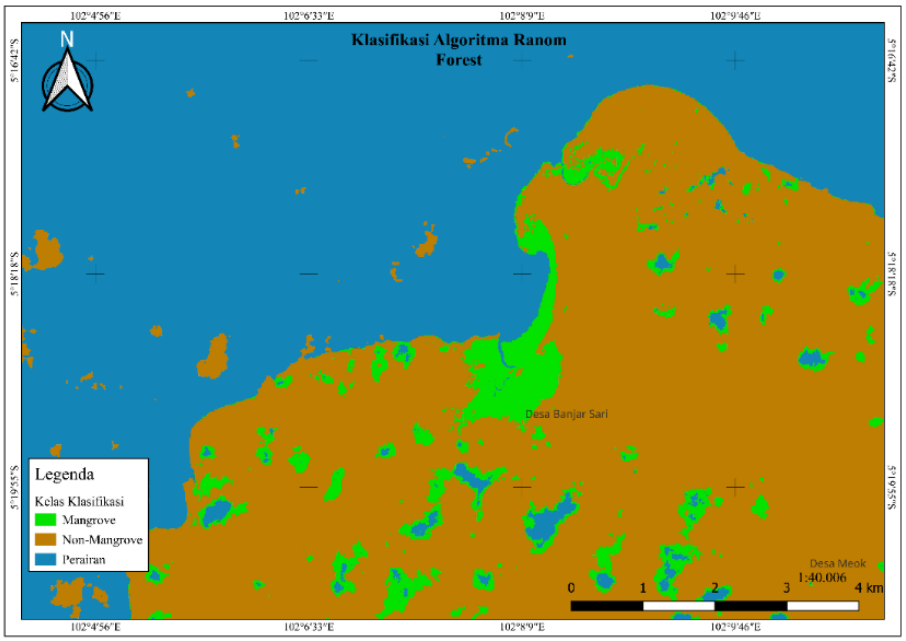
Klasifikasi Tutupan Lahan dan Akurasi Model

Berdasarkan hasil klasifikasi Random Forest pada citra Sentinel-2A, total luas ekosistem mangrove di Barat Laut, Pulau Enggano, adalah 199,72 ha. Uji akurasi menunjukkan performa klasifikasi yang sangat baik dengan nilai *Overall Accuracy* sebesar *95,45%* yang mengindikasikan bahwa peta sebaran mangrove yang dihasilkan dapat merepresentasikan kondisi lapangan dengan baik. Tabel hasil uji akurasi *confusion matrix* dapat dilihat pada tabel 3. Sebaran mangrove terkonsentrasi di sepanjang garis pantai dan muara sungai, sesuai dengan karakteristik habitat mangrove pada umumnya.

Tabel 3. Hasil Uji Akurasi *Confusion Matrix*

Kelas		Producer			Total	UA%
		M	NM	A		
User	M	8	0	0	8	100
	NM	1	8	0	9	88,89
	A	0	0	5	5	100
Total		9	8	5	21	
PA%		88,89	100	100		
OA%		95,45				

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



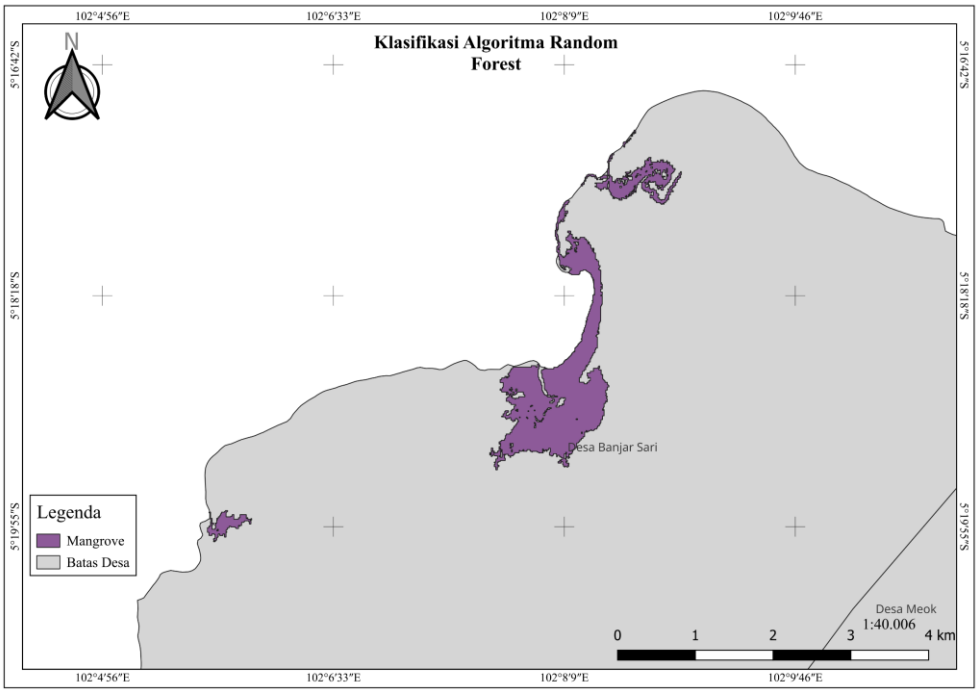
Gambar 4. Hasil Klasifikasi Algoritma Random Forest

Peta ini menampilkan hasil klasifikasi tutupan lahan dengan tiga kelas utama dipetakan dengan jelas melalui pewarnaan tematik, yaitu mangrove (hijau), non-mangrove (cokelat), dan perairan (biru). Di sepanjang garis pantai, terutama di teluk dan muara kecil, terlihat zona mangrove yang cukup menonjol dalam warna hijau. Pola ini menunjukkan bahwa ekosistem mangrove berkembang pada area yang tergenang secara periodik atau berada di dekat aliran air, sesuai dengan karakteristik ekologisnya. Persebarannya yang dominan menunjukkan bahwa ekosistem mangrove hanya menempati area tertentu di sekitar pesisir. Berdasarkan visualisasi peta (Gambar 5) terlihat bahwa ekosistem mangrove terkonsentrasi di sepanjang teluk dan pesisir cekungan yang ada di sisi utara hingga selatan Desa Banjarsari. Pola sebaran mangrove tampak mengelompok pada area yang berbentuk lekukan pantai dan alur-alur pesisir yang cenderung tertutup, menunjukkan bahwa vegetasi mangrove tumbuh dominan pada zona dengan kondisi perairan yang tenang, berlumpur, dan memiliki suplai sedimen yang stabil.

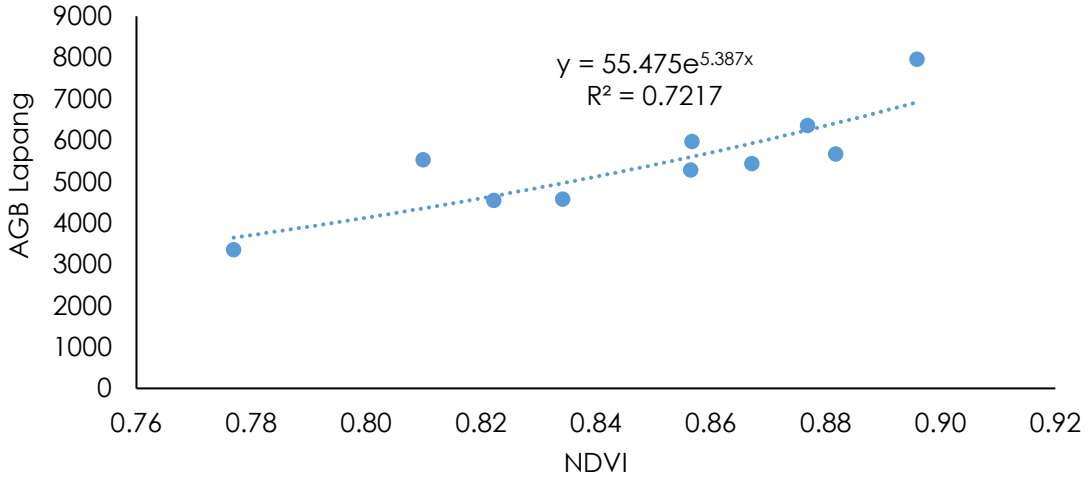
Pada bagian utara, mangrove menyebar mengikuti garis pantai yang berbelok membentuk teluk sempit, sedangkan pada bagian selatan terlihat hamparan mangrove yang lebih luas, kemungkinan menjadi kawasan dengan tingkat konservasi dan regenerasi yang baik. Peta juga menyajikan skala, arah utara *(north arrow)*, serta koordinat geografis yang memperkuat akurasi spasial dalam interpretasi peta. Secara keseluruhan, peta ini memberikan gambaran jelas mengenai luasan dan distribusi vegetasi mangrove di Barat Laut Pulau Enggano, yang sangat bermanfaat untuk perencanaan pengelolaan pesisir, konservasi ekosistem mangrove, serta evaluasi potensi jasa ekosistem bagi masyarakat lokal di Pulau Enggano

Estimasi stok karbon mangrove di Desa Banjar Sari dilakukan dengan pendekatan spasial berbasis citra Sentinel-2A menggunakan indeks vegetasi NDVI yang dikalibrasi dengan data biomassa lapangan.

Gambar 6 menunjukkan hasil dari analisis regresi non-linier eksponensial antara dua variabel, yaitu NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) di sumbu x, dan AGB Lapang (*Above Ground Biomass*) di sumbu y. Gambar 6 tampak hubungan yang positif antara NDVI dan AGB Lapang, yang



Gambar 5. Hasil Klasifikasi Supervised Algoritma Random Forest Kelas Mangrove



Gambar 6. Hasil regresi non linier eksponensial

ditunjukkan oleh garis regresi yang naik. Garis regresi ini mengikuti bentuk eksponensial dengan persamaan matematika $y = 55.475e^{5.387x}$, yang menunjukkan bahwa AGB Lapang meningkat seiring dengan meningkatnya nilai NDVI. Nilai $R^2 = 0.7434$ menunjukkan bahwa sekitar 74% dari variabilitas AGB Lapang dapat dijelaskan oleh perubahan pada NDVI, yang berarti model ini memiliki kekuatan prediksi yang cukup baik, meskipun masih ada faktor lain yang tidak tercakup dalam analisis ini. Secara keseluruhan, grafik ini mengilustrasikan bahwa terdapat hubungan yang cukup kuat antara NDVI dan AGB Lapang dalam data yang dianalisis. Hubungan antara NDVI dan biomassa atas permukaan (AGB) dimodelkan dengan regresi non-linier seperti pada Gambar 6, menghasilkan persamaan: $AGB = 55{,}475e^{\wedge NDVI*5{,}387}$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai AGB meningkat secara eksponensial seiring dengan bertambahnya nilai NDVI. Konstanta 55,475 berfungsi sebagai nilai dasar (*initial value*) ketika NDVI sangat kecil, sedangkan faktor 5,387 pada pangkat eksponen menentukan seberapa cepat AGB bertambah ketika NDVI meningkat. Artinya, setiap peningkatan kecil pada NDVI akan menghasilkan peningkatan AGB yang semakin besar, karena sifat fungsi eksponensial yang pertumbuhannya semakin cepat. Dengan demikian, model ini menggambarkan bahwa kondisi vegetasi yang lebih hijau dan sehat (ditunjukkan oleh NDVI yang lebih tinggi) berasosiasi dengan biomassa di atas permukaan tanah yang lebih besar. Persamaan tersebut diterapkan pada peta NDVI untuk memperoleh peta distribusi AGB dalam satuan kg/100 m². Nilai AGB kemudian dikonversi menjadi ton/ha, dan biomassa bawah permukaan (BGB) dihitung menggunakan koefisien 0,38 (Bindu *et al*, 2020). Total biomassa diperoleh dari penjumlahan AGB dan BGB, sedangkan stok karbon dihitung dengan mengalikan total biomassa dengan faktor konversi karbon 0,47.

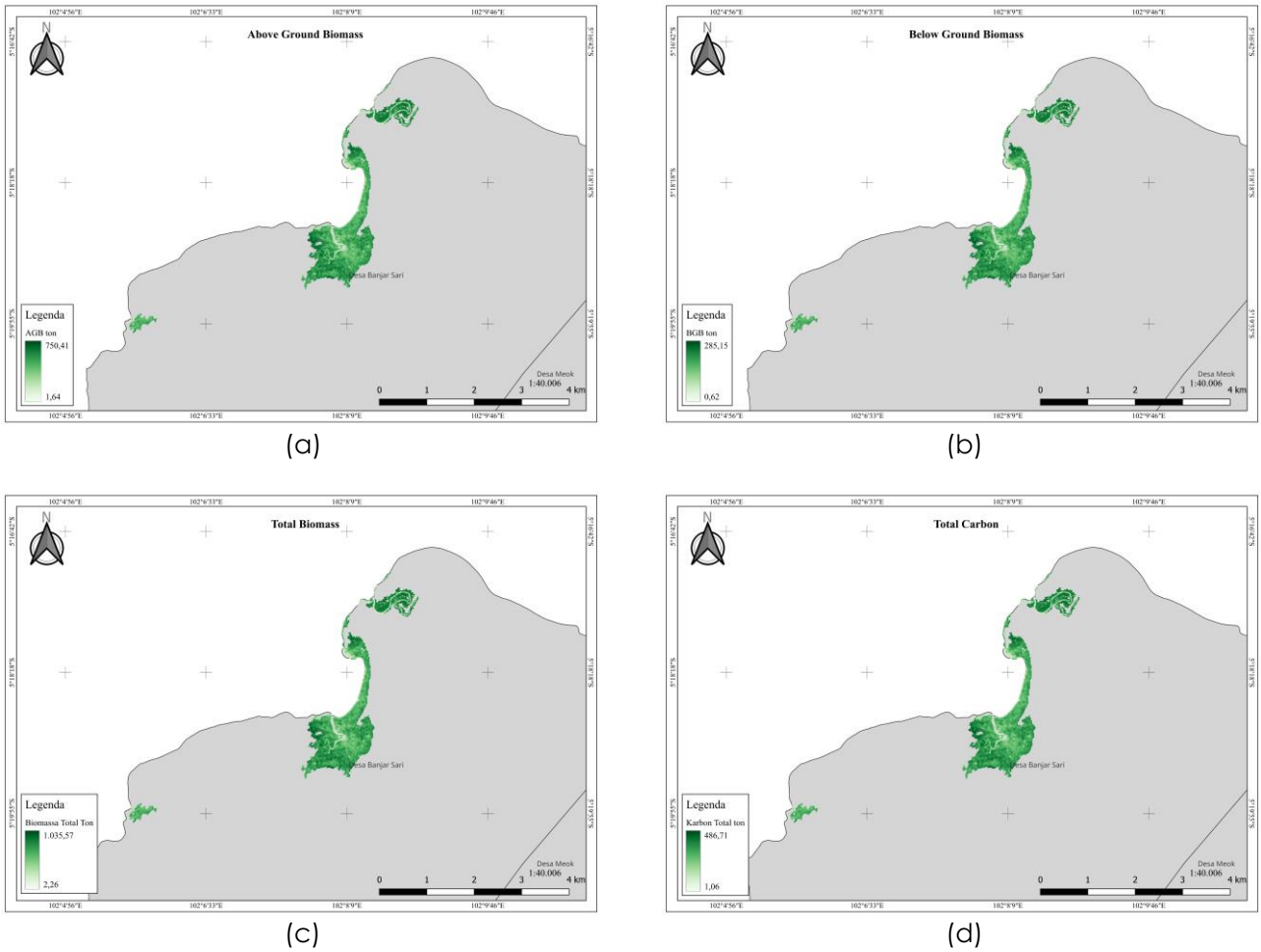
Berdasarkan hasil analisis spasial, diperoleh estimasi rata-rata stok karbon pada bagian atas vegetasi (*above-ground biomass*/AGB) sebesar 496,91 ton/ha dan bagian bawah vegetasi (*below-ground biomass*/BGB) sebesar 188,82 ton/ha. Secara keseluruhan, total simpanan karbon pada ekosistem mangrove di Barat Laut Pulau Enggano mencapai 64.368,95 ton. Sebaran stok karbon tersebut tidak merata dan sangat dipengaruhi oleh tingkat kerapatan vegetasi mangrove sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Dari tabel di atas, terlihat jelas bahwa kelas kerapatan Rapat mendominasi baik dari segi luasan (198,67 ha atau 99,5% dari total area) maupun dari simpanan karbon. Kelas ini menyimpan 64.350,52 ton karbon, atau lebih dari 99% dari total stok karbon di lokasi penelitian. Tingginya simpanan karbon per hektar pada kelas rapat (323,91 ton C/ha) mengindikasikan struktur komunitas mangrove yang sehat, dewasa, dan memiliki kerapatan pohon yang tinggi. Sebaliknya, kelas

Jarang dan Sedang memiliki luas yang sangat kecil dan kontribusinya terhadap total stok karbon tidak signifikan. Area dengan kerapatan jarang kemungkinan merupakan zona suksesi awal atau area yang mengalami tekanan lingkungan atau antropogenik. Nilai simpanan karbon yang ditemukan dalam penelitian ini menunjukkan potensi yang sangat besar dari mangrove Pulau Enggano. Jika dibandingkan, studi oleh Bindu *et al*. (2020) di Kerala, India, mengestimasi total karbon 12,67 ton pada area seluas 12 ha. Kerapatan karbon di lokasi penelitian ini, dengan rata-rata sebesar 322,29 ton C/ha, menunjukkan nilai yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa studi sebelumnya. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh variasi dalam struktur spesies, usia tegakan, kondisi lingkungan, serta model alometrik yang digunakan (Eka *et al*., 2021). Temuan ini menegaskan pentingnya konservasi ekosistem mangrove di Pulau Enggano sebagai hotspot penyimpanan karbon biru.

Tabel 4. AGB, BGB, Biomassa Total, Karbon Total per kelas kerapatan

Kelas Kerapatan	Luas (ha)	Total AGB (ton/ha)	BGB (ton/ha)	Biomassa Total (ton/ha)	Karbon (ton C/ha)	Karbon Total (ton)
Jarang	0,62	16,36	6,22	22,57	10,61	6,61
Sedang	0,43	42,56	16,17	58,73	27,60	11,84
Rapat	198,67	499,40	189,77	689,17	323,91	64.350,50
Total	199,72	496,91	188,82	685,73	322,29	64.368,95



(a) (b)

(c) (d)

Gambar 7. Peta Sebaran a: AGB; b: BGB; c: Biomassa Total; d: Karbon Total

Penelitian ini menunjukkan bahwa ekosistem mangrove di Barat Laut, Pulau Enggano, memiliki potensi simpanan karbon yang signifikan dengan estimasi total sebesar 64.368,95 ton pada area seluas 199,72 hektar, dengan rata-rata 323,91 ton C/ha. Dominasi spesies *Rhizophora apiculata* dan *Bruguiera gymnorrhiza* yang memiliki biomassa besar menunjukkan kondisi vegetasi yang stabil dan produktif secara ekologis. Nilai rata-rata tersebut lebih rendah dibandingkan estimasi rata-rata stok karbon ekosistem mangrove Asia Tenggara menurut Alongi (2020), yaitu sekitar 860,9 ton C/ha, namun perbedaan ini dapat dijelaskan oleh karakteristik lokal Pulau Enggano yang memiliki substrat mineral dangkal, kedalaman gambut terbatas, dan tegakan mangrove yang relatif muda. Dengan demikian, hasil penelitian ini menggambarkan kondisi produktivitas menengah yang realistis bagi ekosistem mangrove pada pulau kecil terluar yang masih berkembang secara alami.

Perbandingan ini memberikan konteks penting bagi penilaian kapasitas simpanan karbon mangrove Indonesia. Rata-rata stok karbon sebesar 323,91 ton C/ha yang diperoleh di Enggano mendekati beberapa studi stok karbon di Indonesia, seperti di Kabupaten Belitung, Kepulauan Bangka Belitung (Karyati *et al*., 2021) sebesar 389,75 ton C/ha, dan di pesisir pantai Lombok Barat (Santoso, 2022) sebesar 342 ton C/ha. Hal ini menunjukkan konsistensi antara hasil penelitian ini dan tren nasional, sekaligus memperkuat keandalan model estimasi yang digunakan. Secara ekologis, hasil ini menegaskan bahwa tingkat kerapatan vegetasi merupakan faktor utama yang menentukan besarnya stok karbon ekosistem mangrove. Kelas kerapatan tinggi (NDVI > 0,42) menyumbang lebih dari 99% total stok karbon, menunjukkan peran dominan area vegetasi padat sebagai carbon sink alami. Sebaliknya, area berkerapatan rendah cenderung berfungsi sebagai *carbon source* potensial apabila mengalami degradasi atau konversi lahan. Hilangnya vegetasi pada area ini dapat melepaskan kembali ribuan ton CO_2 ke atmosfer, mempercepat efek rumah kaca, dan menurunkan kapasitas mitigasi iklim regional. Oleh karena itu, konservasi dan restorasi pada zona berkerapatan rendah menjadi langkah strategis untuk menjaga keberlanjutan fungsi ekosistem.

Berdasarkan sisi metodologis, penggunaan *Google Earth Engine* (GEE) yang mengintegrasikan citra Sentinel-2A dengan data lapangan terbukti efektif untuk menghasilkan estimasi spasial yang akurat dan efisien. Model regresi NDVI – AGB dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,72 menunjukkan hubungan kuat antara nilai indeks vegetasi dan biomassa aktual di lapangan. Selain itu, akurasi klasifikasi sebesar 95,45% menegaskan keandalan algoritma *random forest* dalam membedakan kelas tutupan lahan mangrove, non-mangrove, dan perairan. Pendekatan berbasis *cloud computing* ini menjadi terobosan penting dalam pemetaan karbon biru, karena mampu memproses data dalam skala besar tanpa bergantung pada perangkat keras lokal dan dapat diperbarui secara temporal. Implikasi dari hasil ini bersifat strategis dalam konteks kebijakan nasional dan global. Data spasial stok karbon yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar ilmiah dalam penyusunan zonasi konservasi dan restorasi mangrove, serta sebagai input dalam inventarisasi karbon biru nasional. Estimasi stok karbon sebesar 64.368,95 ton ini setara dengan sekitar 236.000 ton CO_2 ekuivalen, menegaskan kontribusi penting Pulau Enggano terhadap mitigasi emisi karbon Indonesia. Nilai tersebut memperlihatkan bahwa meskipun luasannya terbatas, mangrove di pulau kecil terluar memiliki peran strategis dalam pencapaian target *Enhanced Nationally Determined Contribution* (NDC) 2020 - 2030 yang menekankan sektor kehutanan dan kelautan sebagai tulang punggung penurunan emisi gas rumah kaca nasional (NDC, 2022).

Selain itu, penelitian ini menyoroti tantangan struktural dalam sistem pemantauan karbon di Indonesia, khususnya ketidakterpaduan data spasial dan biofisik antar lembaga, keterbatasan tenaga teknis daerah, serta minimnya pemanfaatan teknologi digital berbasis *cloud*. Model berbasis GEE yang dikembangkan dalam penelitian ini menawarkan solusi dengan menghasilkan sistem pemantauan yang efisien, terukur, dan mudah direplikasi. Pendekatan ini dapat memperkuat upaya pemerintah dalam membangun Sistem Registri Nasional (SRN) yang kredibel, transparan, dan selaras dengan mekanisme pasar karbon internasional (Sihotang, 2025). Dari perspektif ilmiah, hasil ini memperkuat posisi penelitian penginderaan jauh sebagai alat utama dalam pemantauan karbon biru jangka panjang. Penggunaan citra Sentinel-2A yang memiliki resolusi menengah terbukti cukup

sensitif untuk menangkap variasi vegetasi mangrove, sehingga efektif digunakan dalam skala regional tanpa kehilangan presisi signifikan. Model NDVI – AGB yang digunakan juga menunjukkan kestabilan prediktif yang dapat dikembangkan lebih lanjut melalui pendekatan machine learning adaptif untuk menganalisis dinamika temporal stok karbon.

Arah penelitian ke depan perlu difokuskan pada penggabungan data multi-sensor dan multi-temporal, termasuk Sentinel-1, PlanetScope, dan LiDAR, guna meningkatkan ketelitian spasial dan vertikal dalam estimasi biomassa. Selain itu, pengukuran karbon bawah permukaan (*soil carbon*) perlu dimasukkan untuk memberikan estimasi total karbon yang lebih komprehensif, mengingat komponen ini dapat mencapai lebih dari 50% dari total cadangan karbon ekosistem mangrove (Alongi, 2020). Integrasi data tersebut juga dapat dikombinasikan dengan model ekohidrologi dan bio-optik untuk memahami dinamika fluks karbon antar musim dan antar zona geomorfik. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memperkaya data empiris tentang stok karbon mangrove di Pulau Enggano, tetapi juga memberikan kontribusi konseptual dan metodologis bagi pengembangan sistem pemantauan karbon biru berbasis ilmiah di Indonesia. Pendekatan yang dikembangkan menegaskan bahwa kolaborasi antara penginderaan jauh, *cloud computing*, dan kebijakan berbasis bukti, merupakan fondasi penting dalam mewujudkan pengelolaan ekosistem pesisir yang adaptif, berkelanjutan, dan berdaya saing dalam menghadapi tantangan perubahan iklim global.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan penginderaan jauh berbasis *Google Earth Engine* (GEE) yang dikombinasikan dengan data lapangan dan model regresi NDVI–AGB mampu mengestimasi stok karbon mangrove di Barat Laut Pulau Enggano secara efektif dan andal. Ekosistem mangrove di Barat Laut, Pulau Enggano, teridentifikasi seluas 199,72 ha diperoleh estimasi rata-rata stok karbon pada bagian atas vegetasi (AGB) sebesar 496,91 ton/ha dan bagian bawah vegetasi (BGB) sebesar 188,82 ton/ha dengan tingkat akurasi klasifikasi dengan nilai *Overall Accuracy* sebesar *95,45%*.. Total potensi simpanan karbon mencapai 64.368,95 ton, yang didominasi oleh mangrove berkerapatan rapat sebagai penyumbang utama stok karbon. Temuan ini menegaskan peran strategis mangrove dalam mitigasi perubahan iklim serta menyediakan dasar ilmiah yang kuat bagi perencanaan pengelolaan, konservasi, dan pengembangan skema karbon biru yang berkelanjutan. Selain itu, Pendekatan berbasis *cloud computing* ini menjadi terobosan penting dalam pemetaan karbon biru, karena mampu memproses data dalam skala besar tanpa bergantung pada perangkat keras lokal dan dapat diperbarui secara temporal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Bengkulu atas dukungan pendanaan melalui Skema Penelitian Fundamental dengan nomor kontrak 1812/UN30.15/PT2025. Dukungan hibah penelitian ini berperan penting dalam kelancaran pelaksanaan dan penyelesaian penelitian. Selain itu penulis juga mengucapkan terima kasih atas dukungan pendampingan lapangan dari Kesatuan Pengelolaan Hutan Konservasi (KPHK) Pulau Enggano dan Balai Konservasi Sumber Daya Alam (BKSDA) Bengkulu.

DAFTAR PUSTAKA

Albasit, L. Z., Pribadi, R., & Pramesti, R. (2022). Estimasi stok karbon mangrove pasca rehabilitasi di Desa Kaliwlingi, Brebes menggunakan citra Sentinel-2. *Journal of Marine Research*, *11*(4), 620–640. doi: 10.14710/jmr.v11i4.31734

Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, *6*, 195–219. doi: 10.1146/annurev-marine-010213-135020

Alongi, D. M. (2020). Global significance of mangrove blue carbon in climate change mitigation. *Sci*,

1, 1–15. doi: 10.3390/sci2030067

Apostolopoulos, D., & Nikolakopoulos, K. (2021). A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. *European Journal of Remote Sensing*, *54*(1), 240–265. doi: 10.1080/22797254.2021.1904293

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.

Budiarsa, A. A., & Ritonga, I. R. (2016). Pemetaan sebaran mangrove menggunakan Citra Landsat 8/ETM+ di Teluk Pangempang Kecamatan Muara Badak Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Ilmu Perikanan Tropis*, *22*(1), 1–9.

Chen, B., Xiao, X., Li, X., Pan, L., Doughty, R., Ma, J., Dong, J., Qin, Y., Zhao, B., & Wu, Z. (2017). A mangrove forest map of China in 2015: Analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *131*, 104–120.

Departemen Kehutanan. (2005). *Pedoman inventarisasi dan identifikasi lahan kritis mangrove*. Departemen Kehutanan Direktorat Jenderal Rehabilitasi Lahan dan Perhutanan Sosial.

Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2012). Mangrove adalah salah satu hutan terkaya karbon di kawasan tropis. *Cifor Brief*, *13*(12), 12.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., & Martimort, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, *120*, 25–36.

Eka, A. A., Astawa Karang, I. W. G., Putra, I. N. G., & Dharmawan, I. W. E. (2021). Hubungan antar parameter struktur tegakan mangrove dalam estimasi simpanan karbon aboveground pada skala komunitas. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, *13*(3), 485–498. doi: 10.29244/jitkt.v13i3.36363

Farahdita, W. L., Soenardjo, N., & Suryono, C. A. (2021). Teknologi drone untuk estimasi stok karbon di area mangrove Pulau Kemujan, Karimunjawa. *Journal of Marine Research*, *10*(2), 281–290.

Firsta, S. W., Sugara, A., & Anggoro, A. (2025). Estimasi cadangan karbon mangrove menggunakan citra Sentinel-2A di Desa Banjarsari Pulau Enggano. *Jurnal Kelautan Tropis*, *28*(3), 539–552. doi: 10.14710/jkt.v28i3.29800

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2007). *The world's mangroves*.

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).

Hartini, S., Saputro, G. B., Yulianto, M., & Suprajaka. (2010). Assessing the used of remotely sensed data for mapping mangroves Indonesia. In *Selected topics in power systems and remote sensing* (pp. 210–215). WSEAS Press.

Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E., Mcleod, E., Pidgeon, E., & Simpson, S. (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *15*(1), 42–50.

Husnayaen, H., Amela, P., Arini, D. P., & Putra, I. K. A. (2023). Pemetaan sebaran dan kerapatan hutan mangrove menggunakan machine learning pada Google Earth Engine dan sistem informasi geografi di Pulau Bali. *Jurnal Perikanan Unram*, *13*(1), 266–277.

Karyati, I. D., Zeny, A., Zulkifli, D., & Irawan, H. (2021). Estimasi karbon pada mangrove di Kabupaten Belitung Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. *Buletin Jalanidhitah Sarva Jivitam*, *3*(1), 43–51.

Komiyama, A., Ong, J. E., & Poungparn, S. (2008). Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, *89*(2), 128–137. doi: 10.1016/j.aquabot.2007.12.006

Latue, P. C., & Rakuasa, H. (2023). Analisis perubahan suhu permukaan daratan di Kecamatan Ternate Tengah menggunakan Google Earth Engine berbasis cloud computing. *E-JOINT (Electronica and Electrical Journal Of Innovation Technology)*, *4*(1), 16–20.

Macreadie, P. I., Anton, A., Raven, J. A., Beaumont, N., Connolly, R. M., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Kuwae, T., Lavery, P. S., Lovelock, C. E., Smale, D. A., Apostolaki, E. T., Atwood, T. B., Baldock, J., Bianchi, T. S., Chmura, G. L., Eyre, B. D., Fourqurean, J. W., ... Duarte, C. M. (2019). The future of blue carbon science. *Nature Communications*, *10*, 3998. doi: 10.1038/s41467-019-11693-w

Mcleod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., & Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *9*(10), 552–560.

NDC. (2022). *Enhanced nationally determined contribution Republic of Indonesia*.

Nugroho, F., Sugara, A., Priana, A., & Suci, A. N. N. (2023). Monitoring the impact of land cover change on urban heat island with remote sensing & GIS. *Geosfera Indonesia*, *8*(3), 301. doi: 10.19184/geosi.v8i3.27796

Peraturan Menteri Kehutanan. (2004). *Pembuatan tanaman rehabilitasi hutan mangrove gerakan rehabilitasi hutan dan lahan* (P. 03/MENHUT-V/2004).

Pratama, B. B., Pratama, W., Rudiastuti, A. W., Sugara, A., & Nugroho, F. (2025). Optimizing mangrove classification with data fusion: Machine learning approaches for Enggano Island, Indonesia. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, *9*(5), 1910–1921. doi: 10.62527/joiv.9.5.3360

Purwanto, A. D., Wikantika, K., Deliar, A., & Darmawan, S. (2023). Decision tree and random forest classification algorithms for mangrove forest mapping in Sembilang National Park, Indonesia. *Remote Sensing*, *15*(1). doi: 10.3390/rs15010016

Santoso, D. (2022). Potential carbon content in the coastal mangrove forests area of West Lombok District, West Nusa Tenggara Province. *Jurnal Biologi Tropis*, *22*(3), 698–704. doi: 10.29303/jbt.v22i3.3647

Shalihati, S. F. (2014). Pemanfaatan penginderaan jauh dan sistem informasi geografi dalam pembangunan sektor kelautan serta pengembangan sistem pertahanan negara maritim. *Geo Edukasi*, *3*(2), 115–126.

Sihotang, F. M. P. (2025). Kontribusi aktor nonnegara terhadap lingkungan global dalam perdagangan karbon melalui penerapan Sistem Registri Nasional-Pengendalian Perubahan Iklim di Indonesia (SRN-PPI). *Padjadjaran Journal of International Relations*, *7*(2), 137–153.

Sugara, A., Anggoro, A., Lukman, A. H., Ariasari, A., Suci, N. N., Agustini, N. T., Nugroho, F., Muhammad, A., Hanami, C. C., & Zulhendri, R. (2023). Mapping the potential of mangrove planting in the rehabilitation of coastal ecosystems using drone technology. *Journal of Sylva Indonesiana*, *6*(2), 164–177. doi: 10.32734/jsi.v6i02.10515

Sugara, A., Lukman, A. H., Rudiastuti, A. W., Anggoro, A., Hidayat, M. F., Nugroho, F., Muslih, A. M., Suci, A. N. N., Zulhendri, R., & 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. doi: 10.19184/geosi.v7i3.30294

Tamondong, A., Nakamura, T., Quiros, T. E. A., & Nadaoka, K. (2021). Time series analysis for monitoring seagrass habitat and environment in Busuanga, Philippines using Google Earth Engine. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *43*, 109–116.

Triana, V. (2008). Pemanasan global. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Andalas*, *2*(2), 159–163.

Waleed, M., & Sajjad, M. (2023). On the emergence of geospatial cloud-based platforms for disaster risk management: A global scientometric review of Google Earth Engine applications. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *97*, 104056. doi: 10.1016/j.ijdrr.2023.104056