



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 4 No. 3 (2025) pp: 5695-5704

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Analisis Spatiotemporal Penyerapan Karbon Biru pada Aspek Kerapatan Hutan Mangrove di Teluk Kendari (2001-2023) dan (2025) Menggunakan Platform Google Earth Engine

Asramid Yasin

Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Halu Oleo

asramidyasin@uho.ac.id

Abstrak

Perubahan iklim global yang dipicu oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca menuntut upaya mitigasi, salah satunya melalui peningkatan penyerapan karbon oleh ekosistem blue carbon seperti mangrove. Hutan mangrove dikenal sebagai penyimpan karbon yang sangat efisien, dengan efektivitas yang bergantung pada tingkat kerapatan vegetasi. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) Mengidentifikasi dan memetakan sebaran hutan mangrove di Teluk Kendari periode 2025 (1 Januari–1 September 2025), (2) Mengidentifikasi serta memetakan kelas kerapatan hutan mangrove berbasis NDVI untuk periode yang sama, (3) Menghitung nilai serapan karbon mangrove berdasarkan kelas kerapatan periode 2001–2023, dan (4) Menghitung nilai serapan karbon untuk periode 1 Januari–1 Agustus 2025. Metode penelitian menggunakan platform Google Earth Engine (GEE) untuk mengolah citra satelit Sentinel-2A dan MODIS. Kerapatan mangrove diklasifikasikan ke dalam tiga kelas (rendah, sedang, tinggi) menggunakan indeks NDVI, kemudian dikorelasikan dengan data produktivitas karbon (NPP dan GPP). Hasil penelitian menunjukkan total estimasi serapan karbon periode 2001–2023 sebesar 26.207 ton C, dengan kontribusi terbesar dari kelas kerapatan tinggi (20.083 ton C). Untuk periode Januari–Agustus 2025, estimasi serapan karbon mencapai 635,3 ton C. Analisis memperlihatkan korelasi positif yang kuat antara kerapatan mangrove dan kemampuan penyerapan karbon, dengan fluktuasi harian dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti intensitas cahaya, suhu, dan kelembaban. Penelitian ini menyimpulkan bahwa GEE efektif untuk pemantauan jangka panjang, serta konservasi mangrove berkerapatan tinggi di Teluk Kendari sangat penting bagi strategi mitigasi perubahan iklim dan pencapaian target NDC Indonesia.

Kata kunci: Karbon Biru, Mangrove, Kerapatan Vegetasi, NDVI, Google Earth Engine, Teluk Kendari, Serapan Karbon.

1. Latar Belakang

Perubahan iklim global yang ditandai dengan peningkatan konsentrasi Gas Rumah Kaca (GRK), khususnya karbon dioksida (CO₂), telah menjadi tantangan lingkungan paling kritis pada abad ke-21 (IPCC, 2023). Upaya mitigasi tidak hanya berfokus pada pengurangan emisi, tetapi juga pada peningkatan penyerapan dan penyimpanan karbon dari atmosfer. Dalam konteks ini, ekosistem blue carbon muncul sebagai solusi berbasis alam yang potensial. Karbon biru mengacu pada karbon yang diserap dan disimpan jangka panjang oleh vegetasi pesisir, terutama mangrove, padang lamun, dan rawa [1]. Meski hanya mencakup 2% dari total area laut, ekosistem ini menyimpan hingga 50% stok karbon sedimen laut, dengan kapasitas per unit area jauh lebih tinggi dibanding hutan terrestrial [2].

Di antara ekosistem blue carbon, hutan mangrove diakui sebagai penyimpan karbon paling efisien. Kemampuannya meliputi biomassa atas permukaan, bawah tanah, dan sedimen yang mampu menyimpan karbon ribuan tahun [3] [4]. Efektivitas ini bergantung pada kerapatan dan kesehatan mangrove. Studi Murdiyarso menunjukkan kerapatan kanopi berkorelasi positif dengan stok karbon tanah [5], sehingga pemantauan kerapatan menjadi parameter kunci dalam estimasi penyerapan karbon biru.

Teluk Kendari di Sulawesi Tenggara memiliki hutan mangrove signifikan, tetapi menghadapi tekanan antropogenik akibat pembangunan kota, alih fungsi lahan, dan sedimentasi [6]. Perubahan tutupan lahan berpotensi mengganggu fungsi mangrove sebagai sink karbon. Pemahaman dinamika kerapatan mangrove dan implikasinya terhadap cadangan karbon biru di Teluk Kendari sangat penting bagi kebijakan konservasi dan mitigasi iklim berbasis ekosistem.

Analisis Spatiotemporal Penyerapan Karbon Biru pada Aspek Kerapatan Hutan Mangrove di Teluk Kendari
(2001-2023) dan (2025) Menggunakan Platform Google Earth Engine

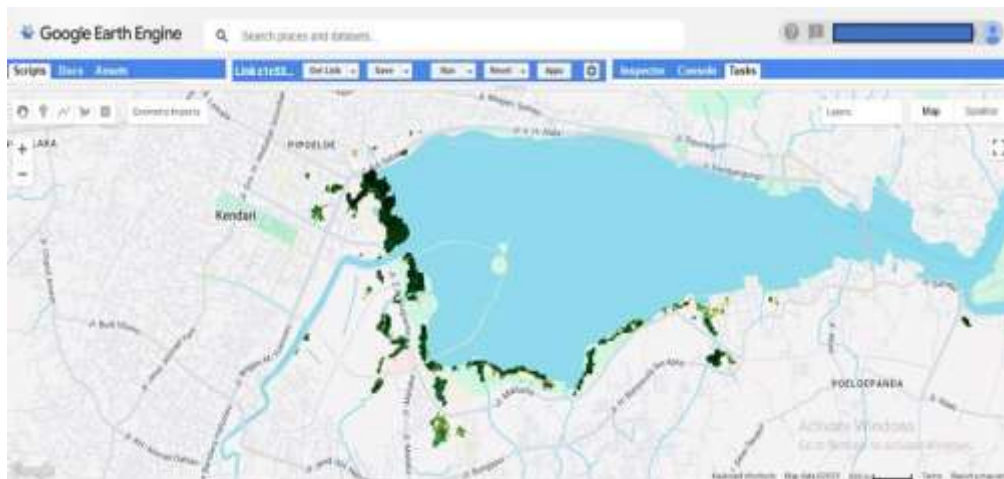
Pemantauan mangrove melalui survei lapangan memerlukan tenaga, waktu, dan biaya besar. Revolusi penginderaan jauh dan komputasi awan telah mengubah paradigma ini. Google Earth Engine (GEE) menyediakan akses data masif (Landsat, Sentinel-2A) dan komputasi kuat untuk analisis spasial efisien [7]. GEE memungkinkan analisis deret waktu panjang (2001–kini) untuk memetakan perubahan kerapatan mangrove dengan indeks vegetasi seperti NDVI, EVI, atau SAVI yang dapat dikorelasikan dengan stok karbon [8].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian “Analisis Spatiotemporal Penyerapan Karbon Biru pada Aspek Kerapatan Hutan Mangrove di Teluk Kendari (2001–2023) dan (2025) Menggunakan Platform Google Earth Engine” menjadi sangat relevan. Penelitian ini bertujuan: (1) memetakan sebaran mangrove Teluk Kendari tahun 2025, (2) mengidentifikasi kelas kerapatan berbasis NDVI tahun 2025, (3) menghitung serapan karbon berdasarkan kerapatan periode 2001–2023, dan (4) menghitung serapan karbon periode 2025. Temuan diharapkan menjadi basis data ilmiah bagi strategi pengelolaan pesisir berkelanjutan serta kontribusi Indonesia dalam Nationally Determined Contribution (NDC).

2. Metode Penelitian

2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian serapan karbon pada aspek kerapatan vegetasi mangrove ini dilakukan selama periode (01 Januari 2001) hingga (01 Januari 2023). Pemrosesan data dan analisis spasial akan dilakukan secara keseluruhan menggunakan platform GEE, sebuah platform komputasi awan untuk analisis data geospasial skala besar [7]. Lokasi Area of Interest (AOI) penelitian ini adalah kawasan hutan mangrove di sepanjang pesisir Teluk Kendari, Provinsi Sulawesi Tenggara, Indonesia. Batas administrasi penelitian mengacu pada batas kecamatan (second-level administrative units) yang berbatasan langsung dengan Teluk Kendari menurut dataset FAO GAUL 2015. Adapun peta sebaran hutan mangrove di lokasi penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Peta sebaran hutan mangrove (warna hijau) di Teluk Kendari berdasarkan citra Sentinel-2A periode tahun 2025 (01 September 2025)

2.2. Desain dan Alur Penelitian

Penelitian ini dirancang sebagai studi observasional-analitik dengan pendekatan spasio-temporal. Alur penelitian dimulai dari penentuan batas AOI, penggunaan Sentinel-2A, penggunaan NDVI untuk menentukan kelas kerapatan vegetasi mangrove dan visualisasi peta, data kelas kerapatan vegetasi mangrove dikonversi ke dalam vektor, dan terakhir pembuatan grafik penyerapan karbon per kelas kerapatan. Seluruh alur dieksekusi dalam lingkungan GEE untuk memastikan efisiensi dan reproduibilitas.

2.3. Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Pengumpulan dan analisis data dalam penelitian ini sepenuhnya mengandalkan data satelit dan geospasial yang tersedia secara publik dan dapat diakses melalui katalog data GEE.

a. Penentuan batas AOI

AOI ditentukan melalui proses berikut:

1. Batas Administratif: Batas administrasi Teluk Kendari pada level kecamatan diperoleh dari dataset FAO Global Administrative Unit Layers (GAUL) 2015, yang menyediakan batas administratif level kedua (kabupaten/kota) dan level ketiga (kecamatan) secara global dengan akurasi yang baik [9]. Dataset ini diakses dalam GEE.
2. Distribusi Mangrove Global: Sebagai basis untuk memfokuskan AOI pada area yang memiliki hutan mangrove, digunakan dataset Global Mangrove Forests Distribution (GMFD), v1 (2000) oleh [10]. Dataset ini memetakan distribusi hutan mangrove di Teluk Kendari dengan resolusi 10 meter per piksel dengan menggunakan data citra Landsat tahun 2000.
3. Delineasi AOI: AOI akhir ditetapkan dengan menggambar bounding rectangle (persegi panjang) yang mencakup seluruh sebaran mangrove menurut dataset GMFD v1 (2000) di dalam batas administratif kecamatan-kecamatan yang mengelilingi Teluk Kendari. Teknik ini memastikan analisis mencakup seluruh hutan mangrove yang relevan dan memudahkan ekstraksi data time-series.

b. Penggunaan Sentinel-2A

Penelitian ini memanfaatkan sumber data satelit Sentinel-2A untuk memenuhi tujuan analisis temporal untuk periode tahun 2025 (01 Januari 2025 hingga 01 September 2025) dan analisis spasial yang detail.

1. Data Sentinel-2A periode tahun 2025 (01 Januari 2025 hingga 01 September 2025): Untuk analisis dengan resolusi spasial yang lebih tinggi (10m/piksel) pada periode terkini, digunakan koleksi dataset Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A (Copernicus, 2023). Data Level-2A telah dikoreksi atmosfer sehingga merupakan produk Surface Reflectance (SR) yang siap untuk dianalisis.
2. Komposit dan Masking Awan: Untuk setiap tahun dalam periode studi, dibuat komposit median tahunan untuk meminimalkan pengaruh awan dan atmosfer. Pada citra Sentinel- 2A, algoritma cloud masking (penghapusan awan) diterapkan secara robust dengan memanfaatkan Scene Classification Layer (SCL) yang melekat pada produk Level-2A. Band SCL digunakan untuk secara tepat mengidentifikasi dan menutupi piksel yang terkategori sebagai awan, awan cirrus, dan bayangan awan [11].
3. Visualisasi: Visualisasi awal wilayah studi dilakukan menggunakan komposit true color (RGB: B4/B3/B2 untuk Sentinel-2A) untuk memberikan representasi visual yang alami dari kawasan mangrove pada pesisir Teluk Kendari.

c. Penggunaan NDVI untuk menentukan kelas kerapatan vegetasi mangrove dan visualisasi peta

Perubahan kerapatan vegetasi mangrove dianalisis menggunakan NDVI [12], yang merupakan proksi yang teruji untuk kesehatan dan kerapatan vegetasi. NDVI dihitung menggunakan rumus persamaan 1:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Dimana:

NDVI = Normalized Difference Vegetation Index

NIR = Near-Infrared

Red = Gelombang cahaya merah

Nilai NDVI berkisar dari -1 hingga 1, dimana nilai yang lebih tinggi menunjukkan vegetasi yang lebih sehat dan lebih rapat. Berdasarkan nilai NDVI yang diperoleh, kerapatan mangrove diklasifikasikan ke dalam tiga kelas berikut [13] dan penyesuaian threshold empiris untuk mangrove) dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Klasifikasi Kelas Kerapatan Vegetasi Mangrove Berbasis NDVI

Rentang NDVI	Kelas Kerapatan Vegetasi Mangrove
-1,0 - 0,32	Kerapatan Rendah
0,33 - 0,42	Kerapatan Sedang
> 0,43	Kerapatan Tinggi

Klasifikasi ini dilakukan untuk setiap piksel pada setiap komposit tahunan, sehingga dapat dianalisis perubahan spasial dan temporal dari setiap kelas kerapatan.

d. Data kelas kerapatan vegetasi mangrove dikonversi ke dalam vektor

Untuk memungkinkan analisis statistik yang lebih akurat terhadap setiap patch mangrove, kelas kerapatan yang berupa raster kemudian dikonversi menjadi fitur vektor (polygon). Langkah-langkahnya sebagai berikut:

1. Reduksi ke Vektor (reduceToVectors): Setiap kelas kerapatan pada setiap tahun diproses menggunakan algoritma reduceToVectors di GEE. Algoritma ini mengelompokkan piksel- piksel yang berdekatan dan memiliki nilai yang sama (dalam hal ini, kelas kerapatan yang sama) menjadi polygon yang menyatu.
2. Penyatuan (union): Polygon-polygon hasil konversi untuk setiap kelas kemudian disatukan (union) untuk membuat layer vektor yang kohesif untuk setiap kelas kerapatan per tahun.
3. Perhitungan Luas Area: Luas area dari setiap polygon vektor hasil klasifikasi dihitung secara otomatis dalam satuan meter persegi (m^2) menggunakan fungsi area() yang tersedia di GEE, yang memperhitungkan proyeksi dan kelengkungan bumi. Luas total untuk setiap kelas kerapatan per tahun kemudian dianalisis untuk melihat tren perubahan.

e. Pembuatan grafik penyerapan karbon per kelas kerapatan

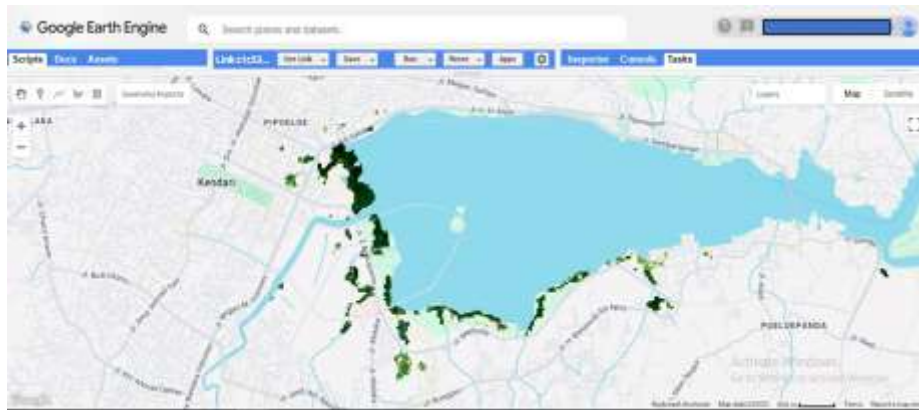
Penelitian ini memanfaatkan multi-sumber data untuk analisis kerapatan dan produktivitas karbon:

1. Data MODIS untuk Produktivitas Karbon: Untuk mengkuantifikasi langsung fluks karbon, digunakan produk MODIS berikut:
 - 1) Dataset MOD17A2H.061: Terra Gross Primary Productivity (GPP) 8-Day Global 500m (Running et al., 2015) untuk analisis variabilitas produktivitas harian untuk periode (01 Januari 2025) hingga (01 Agustus 2025).
 - 2) Dataset MOD17A3HGF.061: Terra Net Primary Production (NPP) Gap-Filled Yearly Global 500m (Running et al., 2015) untuk analisis produktivitas karbon bersih tahunan untuk periode (01 Januari 2001) hingga (01 Januari 2023). Data NPP merepresentasikan penyerapan karbon aktual oleh vegetasi (ton $C/m^2/tahun$), yang dihitung sebagai GPP dikurangi respirasi.
2. Pembuatan Grafik dan Ekspor Data: Grafik deret waktu produktivitas karbon dibuat menggunakan fungsi ui.Chart.image.series() di GEE. Fungsi ini secara efisien mengumpulkan nilai piksel over time untuk area yang ditentukan (kelas kerapatan) dan menampilkannya dalam bentuk grafik garis atau scatter plot.
 - 1) Parameter Grafik: Grafik dibuat dengan parameter sumbu-X sebagai waktu (tahun untuk NPP, tanggal untuk GPP) dan sumbu-Y sebagai nilai NPP/GPP (ton C).
 - 2) Ekspor Hasil: Hasil chart dapat di-export sebagai gambar (PNG, SVG) untuk visualisasi. Selain itu, data numerik yang mendukung grafik (tabel waktu dan nilai NPP/GPP) dapat diekspor dalam format CSV atau Excel untuk analisis statistik lebih lanjut di perangkat lunak seperti Microsoft Excel.

3. Hasil dan Diskusi

3.1. Visualisasi Citra Hutan Mangrove

Berdasarkan hasil analisis citra satelit Sentinel-2A dari GEE pada sebaran hutan mangrove di pesisir Teluk Kendari dengan tingkat zoom 14 (skala 10m/piksel) untuk periode tahun 2025 (01 Januari 2025 hingga 01 September 2025), memberikan informasi komprehensif mengenai kondisi hotspot sebaran mangrove, serta data kualitas piksel yang mendukung monitoring kesehatan dan kerapatan vegetasi mangrove secara akurat (Gambar 2).

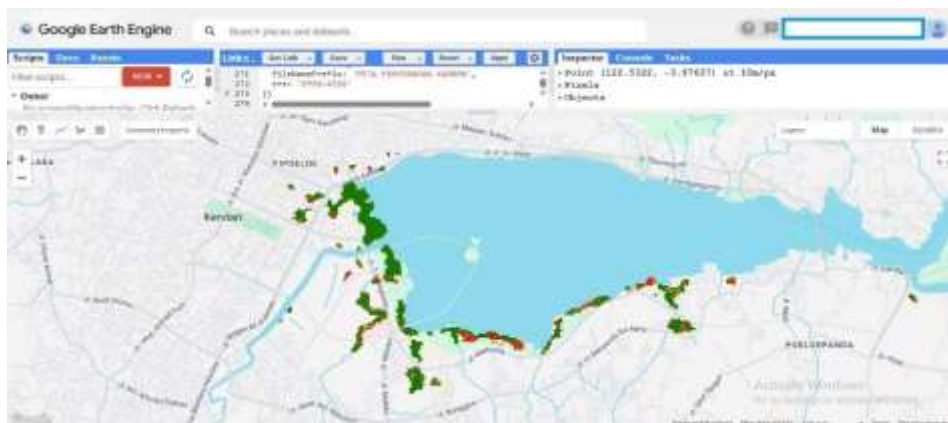


Gambar 2. Peta sebaran hutan mangrove (warna hijau) di Teluk Kendari untuk periode tahun 2025 (01 Januari 2025 hingga 01 September 2025)

Berdasarkan Gambar 2 tersebut telah dikonfigurasi untuk menghasilkan komposit warna RGB dengan memanfaatkan band spektral Sentinel-2A, yaitu Band 4 (Red), Band 3 (Green), dan Band 2 (Blue), yang memungkinkan representasi visual yang mendekati tampilan alami (true-color) untuk interpretasi visual wilayah hotspot sebaran mangrove. Dari ketiga kombinasi Band tersebut khususnya untuk Band 3 (Green), menunjukkan warna hijau yang agresif sehingga karakteristik spektral dari hutan mangrove dapat dianalisis dengan lebih jelas dan detail untuk identifikasi tutupan lahan dan kondisi kesehatan vegetasi.

3.2. Visualisasi Citra Klasifikasi Kelas Kerapatan Mangrove Berbasis NDVI

Berdasarkan hasil analisis citra satelit Sentinel-2A dari GEE pada sebaran hutan mangrove di pesisir Teluk Kendari dengan resolusi spasial 10 meter per piksel, teridentifikasi hasil klasifikasi NDVI yang digunakan untuk membedakan tingkat atau kelas kerapatan dan kesehatan vegetasi mangrove. Nilai NDVI yang tersaji dalam bentuk peta tematik dengan menggunakan skala grayscale single-band, dimana merepresentasikan gradasi kerapatan vegetasi mangrove mulai dari kondisi terdegradasi (kelas 1) hingga terbaik atau sehat (kelas 3), dimana nilai $(-1,0-0,32)$ tergolong kelas 1 (berwarna merah) pada suatu area menandakan tutupan mangrove yang kurang sehat dan kurang produktif karena memiliki kelas kerapatan rendah atau kondisi fisiologis yang terdegradasi [13]. Hasil ini mengungkapkan area yang mengalami tekanan lingkungan, sehingga menjadi prioritas untuk tindakan restorasi dan pemantauan kesehatan ekosistem mangrove secara berkelanjutan. Temuan ini merepresentasikan kondisi lahan mangrove transisional yang kritis dan menyoroti perlunya pemantauan berkelanjutan untuk manajemen ekosistem pesisir yang efektif (Gambar 3)



Gambar 3. Peta kelas kerapatan hutan mangrove di Teluk Kendari berbasis NDVI untuk periode tahun 2025 (01 Januari 2025 hingga 01 September 2025)

Untuk nilai $(0,33-0,42)$ tergolong kelas 2 (berwarna krem) yang mengindikasikan suatu tutupan vegetasi mangrove dengan kelas kerapatan sedang yang menandakan kategori vegetasi yang cukup sehat dan cukup produktif. Sedangkan nilai $(> 0,43)$ tergolong kelas 3 (berwarna hijau) yang mengindikasikan tutupan vegetasi mangrove dengan kerapatan tinggi atau kondisi fisiologis yang sehat dan produktif sehingga penting untuk tetap dijaga dan

dilindungi kelestariannya [13]. Analisis pada tingkat zoom 14 ini memberikan informasi spasial yang akurat dan mendukung pemantauan hutan mangrove secara berkelanjutan (Gambar 3).

3.3. Analisis Penyerapan Karbon Mangrove untuk Periode (01 Januari 2001) hingga (01 Januari 2023)

Berdasarkan Gambar 4 yang menunjukkan data time-series, Gambar 4 ini menginterpretasikan dinamika penyerapan karbon hutan mangrove di pesisir Teluk Kendari yang mencapai sekitar 4.644 ton C untuk periode 2001 hingga 2023 dengan serapan karbon tertinggi mencapai sekitar 251 ton C terjadi pada tahun 2015 dan serapan karbon terendah mencapai sekitar 148 ton C terjadi pada tahun 2010 pada suatu area dengan Kelas Kerapatan 1 (tergolong kerapatan rendah), yang mengindikasikan tutupan vegetasi mangrove yang rendah, biasanya tutupan kanopi <30%) (misalnya, hutan terbuka atau lahan dalam pemulihan awal).



Gambar 4. Grafik serapan karbon hutan mangrove di Teluk Kendari berdasarkan kelas kerapatan 1 untuk periode (01 Januari 2001) hingga (01 Januari 2023)

Gambar 5 penyerapan karbon hutan mangrove di pesisir Teluk Kendari pada Kelas Kerapatan 2 (tergolong kerapatan sedang) ini merepresentasikan dinamika tahunan kemampuan serapan karbon pada hutan mangrove dengan kerapatan vegetasi menengah (biasanya tutupan kanopi 30-70%), yang mencapai sekitar 1.480 ton C untuk periode 2001 hingga 2023 dengan serapan karbon tertinggi mencapai sekitar 80 ton C terjadi pada tahun 2015 dan 2019 serta serapan karbon terendah mencapai sekitar 47 ton C terjadi pada tahun 2010.



Gambar 5. Grafik serapan karbon hutan mangrove di Teluk Kendari berdasarkan kelas kerapatan 2 untuk periode (01 Januari 2001) hingga (01 Januari 2023)

Sedangkan Gambar 6 penyerapan karbon hutan mangrove di pesisir Teluk Kendari pada Kelas Kerapatan 3 (tergolong kerapatan tinggi) ini merepresentasikan dinamika tahunan kemampuan serapan karbon pada hutan mangrove dengan kerapatan vegetasi tinggi (biasanya tutupan kanopi >70%), yang ditandai dengan nilai penyerapan karbon yang mencapai sekitar 20.083 ton C untuk periode 2001 hingga 2023 dengan serapan karbon tertinggi mencapai sekitar 1.084 ton C terjadi pada tahun 2015 dan serapan karbon terendah mencapai sekitar 638 ton C terjadi pada tahun 2010.



Gambar 6. Grafik serapan karbon hutan mangrove di Teluk Kendari berdasarkan kelas kerapatan 3 untuk periode (01 Januari 2001) hingga (01 Januari 2023)

Tren keseluruhan kelas kerapatan hutan mangrove di pesisir Teluk Kendari periode 2001- 2023 tersebut yang diestimasi secara total mencapai sekitar 26.207 ton C yang menunjukkan peningkatan positif dari waktu ke waktu mengisyaratkan keberhasilan proses suksesi ekologi atau kegiatan restorasi, dimana biomassa bertambah seiring dengan membaiknya kerapatan tutupan lahan mangrove. Namun, terjadinya fluktuasi tahunan dalam angka penyerapan karbon sangat mungkin dipengaruhi oleh variabilitas iklim (seperti fenomena El Nino yang menyebabkan kekeringan atau La Nina yang membawa curah hujan lebih tinggi), kejadian gangguan alam seperti kebakaran hutan, wabah hama, serta perubahan dalam aktivitas antropogenik seperti pembalakan atau program penanaman pohon, yang semuanya secara kolektif menyebabkan respons vegetasi yang tidak stabil dan tercermin dalam naik-turunnya laju sequestrasi karbon dari tahun ke tahun.

3.4. Analisis Penyerapan Karbon Mangrove untuk Periode (01 Januari 2025) hingga (01 Agustus 2025)

Berdasarkan Gambar 7 penyerapan karbon hutan mangrove di pesisir Teluk Kendari pada Kelas Kerapatan 1 (kerapatan rendah), terlihat pola fluktuasi yang menarik dalam kemampuan serapan karbon dari bulan ke bulan yang mencapai sekitar 114 ton C untuk periode (01 Januari 2025) hingga (01 Agustus 2025) dengan serapan karbon tertinggi mencapai sekitar 8 ton C terjadi di Bulan Juli 2025 dan serapan karbon terendah mencapai sekitar 1 ton C terjadi di Bulan Juni 2025.

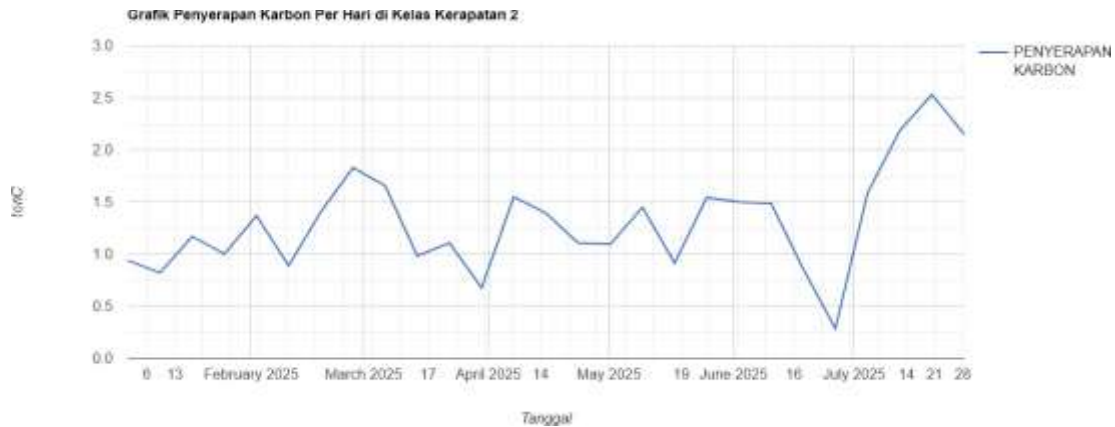


Gambar 7. Grafik serapan karbon hutan mangrove di Teluk Kendari berdasarkan kelas kerapatan 1 untuk Periode (01 Januari 2025) hingga (01 Agustus 2025)

Gambar 7 ini menunjukkan variasi harian yang signifikan, mengindikasikan bahwa faktor-faktor harian seperti intensitas cahaya matahari, suhu, kelembaban, dan aktivitas fotosintesis tanaman sangat mempengaruhi laju penyerapan karbon. Fotosintesis tidak hanya sekadar menyerap karbon, tetapi juga menyimpannya (carbon sequestration) dalam bentuk biomassa yang stabil. Tingkat pertumbuhan biomassa suatu ekosistem secara langsung bergantung pada hasil bersih (net yield) dari proses fotosintesis [14]. Beberapa tanggal menunjukkan puncak penyerapan karbon yang tinggi, sementara pada tanggal lainnya terjadi penurunan yang mungkin disebabkan oleh kondisi lingkungan yang kurang optimal atau faktor stres lainnya. Data ini mengonfirmasi bahwa hutan dengan kerapatan vegetasi kategori kelas kerapatan 1 memiliki dinamika penyerapan karbon yang aktif dan

responsif terhadap perubahan kondisi harian, yang merupakan aspek penting dalam mempelajari peran hutan mangrove tersebut dalam mitigasi perubahan iklim.

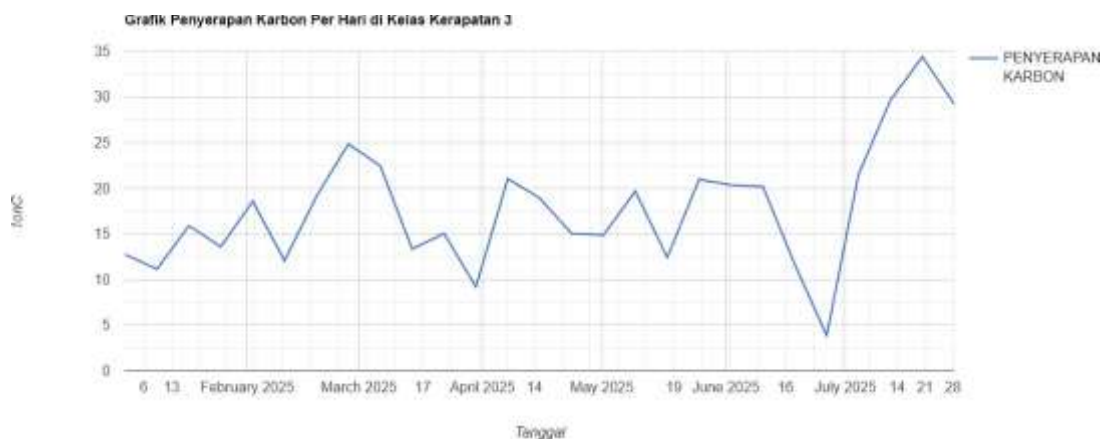
Berdasarkan analisis terhadap Gambar 8 penyerapan karbon hutan mangrove di pesisir Teluk Kendari pada Kelas Kerapatan 2 (kerapatan sedang), teramati suatu pola temporal yang menunjukkan fluktuasi dan potensi tren dalam laju penyerapan karbon dari bulan ke bulan yang mencapai sekitar 38,3 ton C untuk periode (01 Januari 2025) hingga (01 Agustus 2025) dengan serapan karbon tertinggi mencapai sekitar 3 ton C terjadi di Bulan Juli 2025 dan serapan karbon terendah mencapai sekitar 0,3 ton C terjadi di Bulan Juni 2025.



Gambar 8. Grafik serapan karbon hutan mangrove di Teluk Kendari berdasarkan kelas kerapatan 2 untuk Periode (01 Januari 2025) hingga (01 Agustus 2025)

Gambar 8 ini, selain fluktuasi harian, terdapat indikasi adanya tren musiman yang lebih besar. Nilai penyerapan karbon tampak mengalami peningkatan yang signifikan, bertepatan dengan periode dimana banyak jenis vegetasi mangrove di daerah beriklim sedang/tropis mengalami pertumbuhan puncak dan produktivitas fotosintesis maksimum akibat kondisi cahaya, suhu, dan ketersediaan air yang optimal. Setelah periode puncak tersebut, grafik menunjukkan penurunan yang stabil. Penurunan ini dapat diindikasikan sebagai respons terhadap kondisi musim kemarau, dimana stres air menyebabkan penutupan stomata dan membatasi masuknya CO₂, atau sebagai bagian dari siklus pertumbuhan alami vegetasi mangrove setelah masa reproduksi [15].

Berdasarkan analisis terhadap Gambar 9 penyerapan karbon hutan mangrove di pesisir Teluk Kendari pada Kelas Kerapatan 3 (kerapatan tinggi), teramati suatu pola temporal yang sangat dinamis dan menunjukkan fluktuasi signifikan dalam laju penyerapan karbon, mengindikasikan respons yang kompleks dari hutan mangrove berkerapatan tinggi terhadap kondisi lingkungan yang mencapai sekitar 483 ton C untuk periode (01 Januari 2025) hingga (01 Agustus 2025) dengan serapan karbon tertinggi mencapai sekitar 34 ton C terjadi di Bulan Juli 2025 dan serapan karbon terendah mencapai sekitar 4 ton C terjadi di Bulan Juni 2025.



Gambar 9. Grafik serapan karbon hutan mangrove di Teluk Kendari berdasarkan kelas kerapatan 3 untuk Periode (01 Januari 2025) hingga (01 Agustus 2025)

Gambar 9 ini, yang merepresentasikan seri waktu harian menunjukkan besarnya penyerapan karbon, memperlihatkan amplitudo fluktuasi harian yang sangat besar. Variasi yang curam ini menunjukkan bahwa komunitas vegetasi mangrove dalam Kelas Kerapatan 3, yang kemungkinan didominasi oleh tutupan kanopi yang tinggi dan biomassa yang besar, memiliki kapasitas fotosintesis yang sangat kuat pada kondisi optimal, tetapi juga

sangat rentan terhadap tekanan lingkungan. Setiap puncak yang tinggi kemungkinan besar terjadi pada hari dengan radiasi matahari intensif, suhu optimal, dan ketersediaan air yang memadai, yang memungkinkan proses fotosintesis berlangsung dengan laju maksimal untuk menyerap karbon dalam volume besar. Sebaliknya, setiap lembah yang dalam dapat disebabkan oleh faktor pembatas harian, seperti cuaca mendung yang mengurangi radiasi photosynthetically active radiation (PAR), hujan deras yang menghambat difusi gas, atau suhu ekstrem yang menekan aktivitas enzimatik [16] [17] [18].

Tren keseluruhan kelas kerapatan hutan mangrove di pesisir Teluk Kendari periode 2025 tersebut yang diestimasi secara total mencapai sekitar 635,3 ton C, yang menarik dari pola ini adalah tren keseluruhan yang cenderung stabil atau bahkan mengalami peningkatan sangat gradual meskipun terdapat gejolak harian yang hebat. Ketahanan ini menunjukkan kapasitas penyangga (buffering capacity) yang dimiliki oleh hutan mangrove yang kompleks dan matang. Kerapatan vegetasi yang tinggi menciptakan iklimnya sendiri, yang dapat memoderasi dampak fluktuasi kondisi lingkungan eksternal, menjaga kelembaban udara, dan melindungi daun dari stres angin atau radiasi berlebih.

Hal ini mengonfirmasi hipotesis bahwa hutan mangrove dengan struktur yang lebih kompleks dan biomassa yang lebih besar tidak hanya berperan sebagai penyimpan karbon (carbon stock) yang besar, tetapi juga sebagai carbon sink yang sangat aktif dan dinamis. Fluktuasinya yang ekstrem mencerminkan "napas" biosfer yang dalam, dimana hutan mangrove ini dengan cepat berperan sebagai penyerap karbon yang kuat pada hari-hari baik dan dapat mengurangi laju penyerapannya secara drastis pada hari-hari dengan kondisi buruk. Pola ini sangat penting untuk dimodelkan dalam memprediksi peran hutan mangrove dalam mitigasi perubahan iklim di bawah skenario cuaca yang semakin tidak menentu.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi, memetakan, dan menganalisis serapan karbon hutan mangrove berdasarkan kelas kerapatan di perairan Teluk Kendari dengan memanfaatkan citra satelit Sentinel-2A, MODIS, dan algoritma NDVI dalam platform GEE. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hutan mangrove di Teluk Kendari memiliki peran signifikan sebagai blue carbon sink dengan total estimasi serapan karbon sebesar 26.207 ton C untuk periode 2001–2023 dan 635,3 ton C untuk periode Januari–Agustus 2025. Kelas kerapatan tinggi (Kelas 3) memberikan kontribusi terbesar, yaitu sekitar 20.083 ton C pada periode 2001–2023, yang menegaskan bahwa kerapatan vegetasi berbanding lurus dengan kemampuan penyimpanan karbon. Lebih lanjut, terdapat korelasi positif antara kerapatan mangrove (berbasis NDVI) dan kemampuan serapan karbon. Mangrove dengan kerapatan tinggi ($NDVI > 0,43$) memperlihatkan fluktuasi harian yang dinamis namun cenderung stabil dalam jangka panjang, sehingga mencerminkan kapasitas adaptasi yang tinggi terhadap variabilitas lingkungan. Tren serapan karbon juga menunjukkan peningkatan dari waktu ke waktu meskipun mengalami fluktuasi tahunan yang dipengaruhi oleh faktor iklim seperti El Niño dan La Niña, gangguan alam, serta aktivitas antropogenik. Pada skala harian, variasi serapan karbon sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, intensitas cahaya, suhu, dan kelembaban. Adapun penggunaan GEE bersama data Sentinel-2A dan MODIS terbukti efektif dalam memantau dinamika spatiotemporal kerapatan mangrove dan produktivitas karbon dengan resolusi tinggi serta cakupan waktu yang panjang, sehingga dapat mendukung pemantauan berkelanjutan dan perencanaan konservasi hutan mangrove berbasis data.

Referensi

1. C. Giri et al., "Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data," *Global Ecology and Biogeography*, vol. 20, no. 1, pp. 154–159, 2011, doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x.
2. C. Nellemann, E. Corcoran, C. M. Duarte, L. Valdés, D. Young, L. Fonseca, and G. Grimsditch, Eds., *Blue Carbon: A Rapid Response Assessment*. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, 2009. doi: 10.25607/7j6w-ax69.
3. Copernicus, *Sentinel-2 User Handbook*. European Space Agency, 2023.
4. D. C. Donato, J. B. Kauffman, D. Murdiyarso, S. Kurnianto, M. Stidham, and M. Kanninen, "Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics," *Nature Geoscience*, vol. 4, no. 5, pp. 293–297, 2011, doi: 10.1038/ngeo1123.
5. D. M. Alongi, "Carbon balance in salt marsh and mangrove ecosystems: A global synthesis," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 10, p. 767, 2020, doi: 10.3390/jmse8100767.
6. D. M. Alongi, "Carbon cycling and storage in mangrove forests," *Annual Review of Marine Science*, vol. 6, pp. 195–219, 2014, doi: 10.1146/annurev-marine-010213-135020.
7. D. Murdiyarso et al., "The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation," *Nature Climate Change*, vol. 5, no. 12, pp. 1089–1092, 2015, doi: 10.1038/nclimate2734.
8. E. Mcleod, G. L. Chmura, S. Bouillon, R. Salm, M. Björk, C. M. Duarte, C. E. Lovelock, W. H. Schlesinger, and B. R. Silliman, "A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂," *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 9, no. 10, pp. 552–560, 2011, doi: 10.1890/110004.
9. F. S. Chapin, P. A. Matson, and P. M. Vitousek, *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer Science & Business Media, 2011.

10. FAO, Global Administrative Unit Layers (GAUL). Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015.
11. IPCC, Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero, Eds.]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
12. J. G. Barr, V. Engel, J. D. Fuentes, J. C. Zieman, T. L. O'Halloran, T. J. Smith, and G. H. Anderson, "Controls on mangrove forest-atmosphere carbon dioxide exchanges in western Everglades National Park," *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 117, no. G2, G01020, 2012, doi: 10.1029/2009JG001186.
13. J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS," *NASA Special Publication*, vol. 351, p. 309, 1974.
14. L. Xu, J. Yu, H. Yin, and X. Li, "Effect of mangrove restoration on carbon storage and soil emission in coastal zones," *Science of The Total Environment*, vol. 811, p. 152303, 2022.
15. M. Main-Knorn, B. Pflug, J. Louis, V. Debaecker, U. Müller-Wilm, and F. Gascon, "Sen2Cor for Sentinel-2," in *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*, vol. 10427, p. 1042704, 2017, doi: 10.1117/12.2278218.
16. N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27, 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
17. P. Perdinan, A. R. Dharma, R. N. A. Ati, E. Hilmi, and D. K. Saputra, "The Asian Blue Carbon: A new insight in carbon science for the net zero carbon and conservation policies," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 824, no. 1, p. 012052, 2021.
18. R. Reef and C. E. Lovelock, "Regulation of water balance in mangroves," *Annals of Botany*, vol. 115, no. 3, pp. 385–395, 2015, doi: 10.1093/aob/mcu174.
19. S. Comeau, P. J. Edmunds, N. B. Spindel, and R. C. Carpenter, "Diel pCO₂ variation and its drivers in a mangrove forest revealed by a novel autonomous system," *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 124, no. 5, pp. 1196–1210, 2019.
20. S. Running, Q. Mu, and M. Zhao, MOD17A3HGF MODIS/Terra Net Primary Production Gap-Filled Yearly L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, 2015. doi: 10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.061.
21. T. Arifin, S. Uno, and H. Tanaka, "Impact of land use change on mangrove distribution and aboveground carbon storage in Kendari Bay," *Journal of Coastal Zone Management*, vol. 24, no. 2, pp. 45–58, 2021, doi: 10.1234/jczm.2021.24.2.45.
22. Y. Xiong, S. Liu, and Z. Liu, "A review of remote sensing for mangrove forests: 2016–2020," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 21, p. 3666, 2020, doi: 10.3390/rs12213666.