© 2025 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 1 (2026) : 109-118 *ISSN 1829-8907*

Studi Pendahuluan Pemetaan Potensi Karbon Sequester Sebagai Upaya Mitigasi dan Adaptasi Perubahan Iklim di Kepulauan Kei, Maluku Tenggara

Djati Mardiatno[1,2*], Ahsan Nurhadi[1], Galih Dwi Jayanto[1], Retno Suryandari[1], dan Rahula Hangga Nurhendro[1]

[1]Pusat Studi Lingkungan Hidup Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Indonesia; e-mail: djati.mardiatno@ugm.ac.id
[2]Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Indonesia

ABSTRAK

Kabupaten Maluku Tenggara merupakan daerah kepulauan dengan jumlah pulau sebanyak 83 pulau yang masyarakatnya sangat bergantung pada kondisi laut serta rentan terhadap dampak perubahan iklim. Strategi yang dikenal efektif untuk mitigasi dan adaptasi perubahan iklim salah satunya adalah Solusi Berbasis Alam (Nature based Solution/ NbS). Salah satu NbS yang paling efektif yaitu hutan mangrove sehingga diperlukan pemetaan hutan mangrove beserta Above Ground Biomass (AGB). Tujuan penelitian ini adalah memetakan potensi carbon sequester pada ekosistem mangrove. Penelitian ini menggunakan citra sentinel-2 MSI level-2A yang diolah menggunakan platform Google Earth Engine (GEE) dan diklasifikasikan menggunakan parameter Normalized Difference Moisture Index (NDMI) dengan range spectral -0,22 sampai 0,55 dan Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) dengan range -0,6 sampai 0,55. Setelah diperoleh luas area hutan mangrove, digunakan data Sentinel-2 dan Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) untuk melatih model penghitungan biomassa dan dilanjutkan dengan penghitungan biomassa dipadukan dengan algoritma random forest sehingga dihasilkan nilai luas area mangrove dan nilai AGB hutan mangrove. Berdasarkan hasil analisis, hutan mangrove di Pulau Kei Kecil terluas terletak di Kecamatan Kei Kecil Barat hingga Hoat Sorbay dengan distribusi AGB yang didominasi warna merah (0-90 Ton/ha) dan kuning (90-130 Ton/ha) dan sebagian kecil zona hijau (>300 Ton/ha). Analisis korelasi Pearson menunjukkan bahwa nilai AGB hutan mangrove di Pulau Kei Kecil memiliki korelasi positif (0.985) yang kuat dengan luas area hutan mangrove. Dengan mengetahui AGB dari ekosistem mangrove di Pulau Kei Kecil maka dapat dirumuskan strategi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim berbasis alam (Nature based Solution) untuk Kabupaten Maluku Tenggara.

Kata kunci**:** *Above Ground Biomass, Google Earth Engine, GEDI, Sentinel-2,* Perubahan iklim

ABSTRACT

The Southeast Maluku Regency is an archipelagic region comprising 83 islands, where local communities are highly dependent on marine conditions and notably vulnerable to the impacts of climate change. Nature-based Solutions (NbS) have been recognized as an effective strategy for climate change mitigation and adaptation. Among the most effective NbS frameworks are mangrove forests, necessitating the precise mapping of these ecosystems alongside their Above-Ground Biomass (AGB). This study aims to map the carbon sequestration potential of mangrove ecosystems. Sentinel-2 MSI Level-2A imagery was utilized in this research, processed using the Google Earth Engine (GEE) platform, and classified using the Normalized Difference Moisture Index (NDMI) with a spectral range of -0.22 to 0.55, as well as the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) with a range of -0.6 to 0.55. Once the mangrove area is determined, Sentinel-2 and Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) data are used to train a biomass calculation model. Subsequently, a random forest algorithm estimates biomass, yielding values for mangrove area extent and AGB. Analysis reveals that Kei Kecil Island's largest mangrove forests span West Kei Kecil to Hoat Sorbay, with AGB distribution dominated by red (0–90 tons/ha) and yellow (90–130 tons/ha) zones, and fewer green zones (>300 tons/ha). Pearson correlation analysis showed a strong positive correlation (0.985) between AGB values and mangrove extent. By determining the AGB of the mangrove ecosystems on Kei Kecil Island, NbS for climate change mitigation and adaptation strategies can be formulated for Southeast Maluku Regency.

Keywords**:** *Above Ground Biomass, Google Earth Engine, GEDI, Sentinel-2, Climate Change*

Citation: Mardiatno, D., Nurhadi, A., Dwijayanto, G. D., Suryandari, R., dan Nurhendro, R. H. (2026). Studi Pendahuluan Pemetaan Potensi Karbon Sequester Sebagai Upaya Mitigasi dan Adaptasi Perubahan Iklim di Kepulauan Kei, Maluku Tenggara. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(1), 109-118, doi:10.14710/jil.24.1.109-118

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim menimbulkan risiko yang semakin parah bagi ekosistem pesisir dan pulau-pulau kecil serta komunitas pesisir di seluruh dunia (Costanza dkk., 2021; Jouffray dkk., 2020). Dibandingkan dengan daratan yang lebih luas, banyak dampak dan risiko akibat perubahan iklim yang lebih besar terjadi di pulau-pulau kecil. Hal ini sebagian besar disebabkan oleh keterbatasan pulau-pulau tersebut (dikelilingi oleh lautan), wilayah daratan yang relatif kecil, dan seringkali keterpencilan dari wilayah-wilayah yang lebih padat penduduknya di dunia, sehingga membatasi konektivitas global antar pulau. Hal ini berlaku di semua jenis pulau (Mycoo, 2022). Ancaman dari perubahan iklim yang paling sering dirasakan di ekosistem pesisir dan pulau-pulau kecil yaitu kenaikan permukaan laut (SLR), badai yang lebih sering dan hebat, perubahan pola curah hujan, dan suhu permukaan laut yang lebih tinggi (Cooley dkk., 2022).

Kabupaten Maluku Tenggara adalah daerah berciri kepulauan dengan jumlah pulau sebanyak 83 pulau. Sebagai daerah kepulauan, Maluku Tenggara memiliki garis pantai dengan panjang mencapai 632,15 km. Dengan kondisi wilayah yang demikian, kehidupan masyarakat Kepulauan Kei bergantung pada kondisi laut. Berdasarkan penelitian Far & Tuhumury (2022) tentang persepsi nelayan terhadap dampak-dampak yang terjadi akibat adanya Perubahan iklim. Adapun dampak Perubahan iklim yang paling dirasakan oleh nelayan yaitu gelombang tinggi dan angin kencang. Selain itu kenaikan muka air laut, kenaikan suhu permukaan air laut, terjadinya Perubahan pola cuaca, erosi pantai, intrusi air laut, hingga rusaknya infrastruktur wilayah pesisir juga dirasakan oleh masyarakat nelayan. Berdasarkan data yang tercantum pada dokumen Maluku Tenggara dalam Angka terdapat beberapa bencana hidrometeorologi yang terjadi selama tahun 2019 – 2021 yaitu banjir sebanyak 3 kali, tanah longsor 5 kali, puting beliung 7 kali.

Terdapat beberapa strategi untuk mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Salah satu yang dikenal efektif untuk mengurangi risiko bencana dan adaptasi Perubahan iklim adalah Solusi Berbasis Alam (*Nature based Solution*/ NbS). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Vicarelli et al. (2024) menunjukkan bahwa 71% studi menunjukkan bahwa NbS secara konsisten terbukti menjadi pendekatan yang hemat biaya untuk mengurangi bahaya akibat bencana maupun Perubahan iklim. Intervensi NbS yang paling sering ditemukan efektif yaitu hutan mangrove (80%), hutan terrestrial (77%), dan ekosistem pesisir (73%). Ekosistem mangrove telah digunakan dalam NbS terutama terkait perannya dalam melindungi kawasan pesisir dan mitigasi perubahan iklim (penyimpanan karbon di tanah dan vegetasi yang biasa dikenal dengan istilah Karbon Biru). Hal tersebut dikarenakan mangrove memiliki banyak jasa ekosistem yang sangat menguntungkan terhadap perikanan, biodiversitas, perbaikan kualitas air sehingga mendukung kehidupan dan kesejahteraan masyarakat (Catherine et al., 2024).

Penelitian terdahulu mengenai ekosistem mangrove di Kepulauan Kei masih berfokus pada aspek degradasi ekosistem mangrove (Ruban et al., 2024), pengembangan ekowisata berkelanjutan berbasis mangrove (Utama, 2022), dan mengenai struktur, zonasi vegetasi, dan tingkat kesehatan ekosistem mangrove (Dharmawan et al., 2022). Penelitian-penelitian tersebut belum ada yang secara eksplisit melakukan pemetaan spasial potensi karbon dan perhitungan estimasi kuantitatif stok karbon mangrove yang merupakan bagian dari upaya mitigasi dan adaptasi perubahan iklim.

Tujuan dari penelitian ini yaitu memetakan potensi karbon sequester pada ekosistem mangrove untuk mengetahui potensi karbon biru yang dapat digunakan oleh masyarakat Kepulauan Kei dalam melakukan adaptasi dan mitigasi perubahan iklim berbasis *Nature based Solution*.

2. METODE PENELITIAN

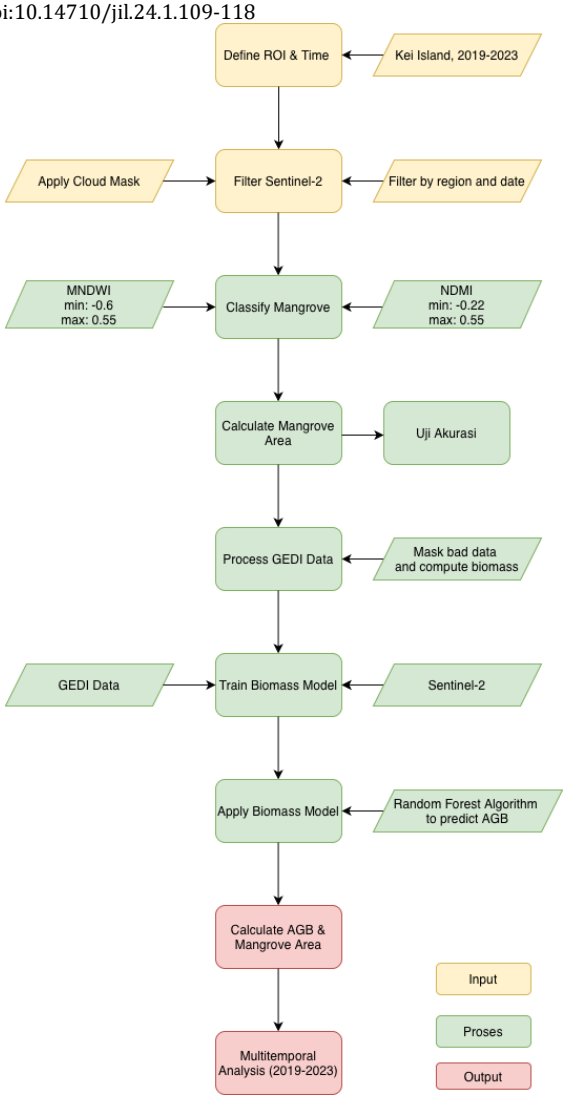
2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak di Kabupaten Maluku Tenggara, Provinsi Maluku. Secara Astronomis, Kabupaten Maluku Tenggara terletak pada posisi kordinat 131°-133° 5’ Bujur Timur dan 5° – 6.5° Lintang Selatan. Luas Wilayah Kabupaten Maluku Tenggara sesuai Data BPS yang dirincikan menurut kecamatan tahun 2022 sebesar 1.098,22 km^2.

2.2. Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan citra penginderaan jauh yang berasal dari sentinel-2 MSI level-2A. Citra satelit sentinel-2 MSI Level-2A diperoleh dari *European Space Agency* (ESA) yang mencakup data multispectral yang sudah melalui proses pembersihan awan (*cloud masking*). Citra yang digunakan berupa citra satelit Level 2A yang dimasukkan ke dalam proyeksi UTM/WGS84.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.3. Pengolahan Data dan Klasifikasi Citra Satelit

Klasifikasi ekosistem mangrove dan non-mangrove dilakukan dengan menggunakan *platform Google Earth Engine* (GEE). Untuk memperoleh gambar yang jelas dilakukan *cloud masking* dengan memanfaatkan *Quality Assurance (QA) band* dan fungsi *median reducer* yang terdapat pada GEE. Penggunaan QA *band* menghilangkan kontaminasi awan pada setiap gambar, sedangkan fungsi *median reducer* digunakan untuk memilih nilai rata-rata piksel dari seluruh tumpukan gambar piksel yang digunakan. Langkah tersebut menghasilkan gambar yang tidak terlalu terang dan tidak terlalu gelap. Selanjutnya dilakukan seleksi spesifik *area of interest (AOI)* ekosistem mangrove dengan melakukan masking menggunakan tiga parameter.

Parameter tersebut antara lain *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) dengan range spectral -0,22 sampai 0,55 dan *Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)* dengan range -0,6 sampai 0,55. NDMI diperoleh dari rasio antara saluran *near-infrared* (NIR) dan *short-wave infrared* (SWIR), sehingga sensitif terhadap kadar air vegetasi, yang merupakan karakteristik penting dari hutan mangrove (Purwanto et al, 2023; Purwanto et al,2023). Penggunaan NDMI bersama dengan metrik spektral lainnya, seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan Shortwave Infrared Absorption Depth (SIAD), meningkatkan keterpisahan mangrove dari vegetasi darat lainnya, sehingga menghasilkan akurasi identifikasi yang lebih tinggi (Shi et al,2016).

Sementara itu, *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) efektif dalam membedakan badan air dari tipe tutupan lahan lainnya, sehingga sangat penting untuk mengidentifikasi kawasan mangrove yang sering diselingi atau berada di wilayah perairan (Hereher and Al-Awadhi, 2019; Chen et al,2017; Hickey and Radford,2022)

2.4. Perhitungan Indeks Vegetasi

Penghitungan indeks vegetasi dalam penelitian ini memadukan dua indeks *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) dengan range spectral -0,22 sampai 0,55 (Dutta et al., 2022) dan *Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)* dengan range -0,6 sampai 0,55 (Kausarian et al., 2026), mangrove diklasifikasikan jika nilai NDMI > 0,5 dan nilai MNDWI < 0.

Tabel 1. Indeks Vegetasi yang Digunakan

Indeks Vegetasi	Persamaan
Normalized Difference Moisture Index (NDMI)	$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$
Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)	$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR1}{GREEN + SWIR1}$

2.5. Uji Akurasi *(Accuracy Assesment)*

Uji akurasi hasil klasifikasi luasan ekosistem mangrove dilakukan menggunakan pendekatan *confusion matrix. Confusion matrix* membandingkan hasil klasifikasi prediksi dengan data aktual di lapangan, dalam hal ini menggunakan data hasil interpretasi luasan mangrove dari Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Maluku Tenggara. Dalam matriks konfusi, data referensi lapangan (ground truth) direpresentasikan pada bagian kolom, sementara hasil klasifikasi citra disajikan pada bagian baris. Tingkat akurasi klasifikasi ditunjukkan oleh nilai pada garis diagonal, yang merepresentasikan jumlah piksel dengan kategorisasi yang tepat (Rwanga dan Ndambuki, 2017). Gambar berikut merupakan ilustrasi metode uji akurasi *confusion matrix* (Foody, 2020).

Reference →

Map ↓ Class	+	-	∑
+	a	b	n_+
-	c	d	n_-
∑	n_+	n_-	n

Gambar 1. Ilustrasi Confusion Matrix

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Melalui perbandingan piksel citra pada lokasi yang sama, matriks ini menghasilkan parameter akurasi keseluruhan (*overall accuracy*), dengan formula sebagai berikut (Hasmadi et al, 2009):

$$Overall\ Accuracy = \frac{Total\ number\ of\ correct\ samples}{Total\ number\ of\ samples}\ x\ 100$$

2.6. Perhitungan Estimasi *Above Ground Biomass* (AGB)

Penghitungan *Above Ground Biomass* (AGB) menggunakan GEE berdasarkan hasil interpertasi Sentinel-2 dan GEDI (*Global Ecosystem Dynamics Investigation*). GEDI merupakan misi yang diluncurkan untuk menyediakan peta biomassa yang akurat pada resolusi 1 km dengan memanfaatkan data LIDAR dan data pengamatan penginderaan jauh dari sensor lain (Qi et al, 2019). GEDI menggunakan sistem lidar dengan gelombang *multibeam* dengan tiga pemancar laser *solid-state* yang memancarkan lebih dari 3,4 juta *pulse laser* per jam untuk menangkap detail struktur vegetasi vertikal (Coyle et al, 2019)

Tabel 2. Langkah-Langkah Estimasi AGB

No	Langkah-langkah
	Pengolahan Data GEDI untuk Estimasi Biomassa
1	Data GEDI yang sudah difilter (menggunakan fungsi *gediMask*) hanya mempertahankan data yang memiliki kualitas tinggi (data bebas dari noise/erorr) Data GEDI memberikan estimasi AGB (biomassa di atas permukaan tanah dalam ton karbon per hektar) pada titik tertentu di area yang tercakup oleh GEDI
	Sampling untuk Proses *Machine Learning (Pembelajaran Mesin)* GEE
2	Data GEDI dan Sentinel-2 digabungkan pada GEE untuk menjalankan proses *data training* model *machine learning* menggunakan *Random Forest.* AGB dari GEDI digunakan sebagai label atau target dalam model. Sampling dilakukan pada area mangrove menggunakan data Sentinel-2 yang telah di-*mask* menggunakan peta tutupan mangrove. Hasilnya adalah dataset yang memadukan informasi spektral dari Sentinel-2 dan estimasi AGB dari GEDI.
	Modelling *Machine Learning* menggunakan algoritma *Random Forest*
3	Model *Random Forest* dilatih menggunakan dataset yang terdiri dari sampel data Sentinel-2 dan GEDI. Model ini digunakan untuk memprediksi AGB di area mangrove yang tidak memiliki data GEDI Band-band Sentinel-2 digunakan dalam model ini untuk memprediksi AGB, dan hasil pelatihan model memberikan kontribusi terhadap estimasi AGB
	Prediksi dan Estimasi AGB
4	Setelah model terlatih, model ini diterapkan pada citra Sentinel-2 untuk setiap tahun (2019-2023) untuk memprediksi AGB berdasarkan hasil klasifikasi mangrove AGB per tahun dihitung dengan mengklasifikasikan citra Sentinel-2 menggunakan model yang sudah dilatih dan mengalikan hasil prediksi AGB dengan area piksel untuk mendapatkan total AGB di wilayah yang ditutup oleh mangrove
	Perhitungan Total AGB
5	Total AGB dihitung dengan menjumlahkan AGB dari setiap piksel yang terdeteksi sebagai mangrove. Estimasi AGB per tahun diberikan dalam satuan Ton/Ha

Peta tutupan lahan mangrove yang dihasilkan kemudian dilatih dan dimodelkan oleh *Machine Learning* pada GEE menggunakan algoritma *Random Forest*. Algoritma Random Forest (RF) adalah metode pembelajaran (machine learning) yang banyak digunakan untuk tugas klasifikasi dan regresi. Algoritma ini beroperasi dengan membangun beberapa pohon keputusan selama proses pelatihan (train) dan menghasilkan kelas (klasifikasi) atau prediksi rata-rata (regresi) (Sun, 2024)

Pengklasifikasian menggunakan algoritma *Random Forest* telah menunjukkan akurasi yang tinggi dalam mengklasifikasikan hutan bakau. Seperti yang pernah dilakukan di Teluk Benoa, akurasi keseluruhan sebesar 97% dan koefisien kappa sebesar 0,94 menggunakan RF pada GEE (Sugiana et al, 2022). Klasifikasi berbasis *Random Forest* terbukti efektif dalam mendelineasi objek mangrove, dengan akurasi tinggi dalam memetakan spesies mangrove di wilayah studi tertentu (Aji et al,2023; Nagarajan et al,2022).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Estimasi Above Ground Biomass Memanfaatkan Data Sentinel-2 dan GEDI

Klasifikasi ekosistem mangrove menggunakan NDMI dan MNDWI pada GEE menunjukkan bahwa letak hutan mangrove di Pulau Kei Kecil tersebar di hampir seluruh Kecamatan. Hasil klasifikasi ekosistem mangrove kemudian diuji menggunakan *confusion matrix*. Berdasarkan hasil uji akurasi tersebut, diperoleh akurasi total atau *overall accuracy* sebsar 84,17%. Tabel 3 berikut menunjukkan hasil perhitungan *overall accuracy*.

Tabel 3. Hasil Perhitungan *Overall Accuracy*

	Referensi Mangrove	Referensi Non-Mangrove	Total
Prediksi Mangrove	101	1	102
Prediksi Non-Mangrove	17	1	18
Total	**118**	**2**	**120**

$$Overall\ Accuracy = \frac{101}{120}\ x\ 100 = 84{,}17\ \%$$

Proses uji akurasi tersebut dilakukan diluar sistem pada GEE. Hasil uji akurasi tidak dijadikan pertimbangan dalam prediksi AGB karena semua proses yang dilakukan menggunakan cloud computing pada GEE. Penulis belum menemukan *script* yang cocok untuk melakukan uji akurasi pada hasil luasan mangrove menggunakan data lapangan/hasil interpretasi lapangan. Hasil uji akurasi klasifiikasi ekosistem mangrove hanya menjadi referensi umum dalam analisis.

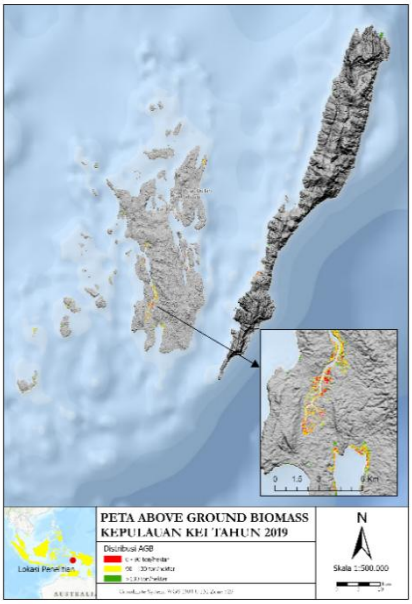
Hasil klasifikasi hutan mangrove menggunakan NDMI dan MNDWI pada GEE memiliki distribusi yang beragam. Hutan mangrove yang paling luas dan mendominasi terletak di antara Kecamtana Kei Kecil Barat hingga Hoat Sorbay. Hutan mangrove inilah

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

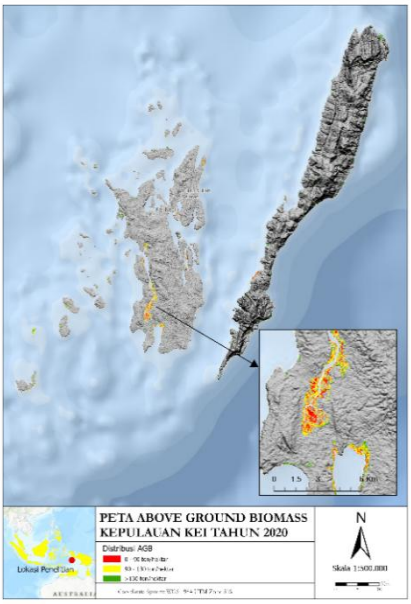
yang menjadi titik sampling pada penelitian ini yang merupakan hutan mangrove yang terletak di kawasan estuari. Relevan dengan penelitian (Dharmawan et al., 2022b) bahwa ekosistem hutan mangrove di Kepualauan Kei terletak di dua habitat utama yaitu mangrove di Kawasan estuari yang terletak di Pulau Kei Kecil dan mangrove di Kawasan laut yang terletak di Pulau Kei Besar. Mangrove estuari merupakan mangrove yang terletak di ekosistem estuari, yang merupakan pertemuan antara muara Sungai dan laut. Ekosistem estuari memiliki kemampuan yang unik terkait adaptasinya dengan faktor salinitas, genangan air, dan dapat tumbuh subur di zona intertidal muara (Das, 2022; Jørgensen & Fath, 2008; Sivaperuman et al., 2018).

Hasil klasifikasi yang diperoleh kemudian dihitung nilai *Above Ground Biomass* (AGB) menggunakan data hasil interpretasi dari Sentinel-2 dan GEDI. Data Sentinel-2 memiliki beberapa kelebihan sehingga dipilih untuk digunakan dalam penelitian ini karena memiliki resolusi spasial yang tinggi (Ghorbanian et al., 2021; Xia et al., 2023), memiliki kemampuan multispectral termasuk adanya band red, red-edge, dan near-infrared (Castillo et al., 2017; Manna & Raychaudhuri, 2020; Simarmata et al., 2024). Spesifikasi tersebut membantu mempermudah identifikasi mangrove dan penghitungan biomassa. Selain itu Sentinel-2 sangat efektif untuk diintegrasikan dengan data lain. Integrasi antara Sentinel-2 dan *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI) untuk estimasi biomassa hutan mangrove merupakan langkah efektif. Hal tersebut dikarenakan GEDI memiliki teknologi LiDAR yang mampu menyediakan data tinggi kanopi secara akurat yang merupakan faktor penting dalam penghitungan nilai AGB. Oleh sebab itu integrasi keduanya dapat menghasilkan nilai estimasi EGB menjadi lebih akurat (Padalia et al., 2023). Gambar 2 berikut merupakan peta distribusi AGB hutan mangrove hasil pengolahan data Sentinel-2 dan GEDI tahun 2019-2023.

Berdasarkan peta pada Gambar 2, dapat diketahui sebaran nilai AGB di area hutan mangrove Pulau Keci Kecil disertai dengan indikator warna yang menunjukkan nilai AGB tutupan hutan mangrove di suatu titik. Warna merah menunjukkan bahwa titik tersebut memiliki nilai AGB 0-90 Ton/ha, warna kuning 90-130 Ton/ha, dan warna hijau >130 Ton/ha. Nilai kisaran AGB tersebut sesuai dengan kisaran AGB pada hutan mangrove di wilayah Pulau Kemujan – Karimun Jawa yaitu berkisar 8 Mg/ha hingga 328 Mg/ha (Wirasatriya et al., 2022). Berdasarkan Gambar 2 tersebut dapat diketahui bahwa distribusi nilai AGB di hutan mangrove pulau Kei Kecil secara visual didominasi oleh warna merah dan kuning yang artinya lebih bnayak nilai AGB 0-90 Ton/ha dan 90-130 Ton/ha dibandingkan tutupan lahan hutan mangrove yang memiliki nilai AGB lebih dari 130 Ton/ha.

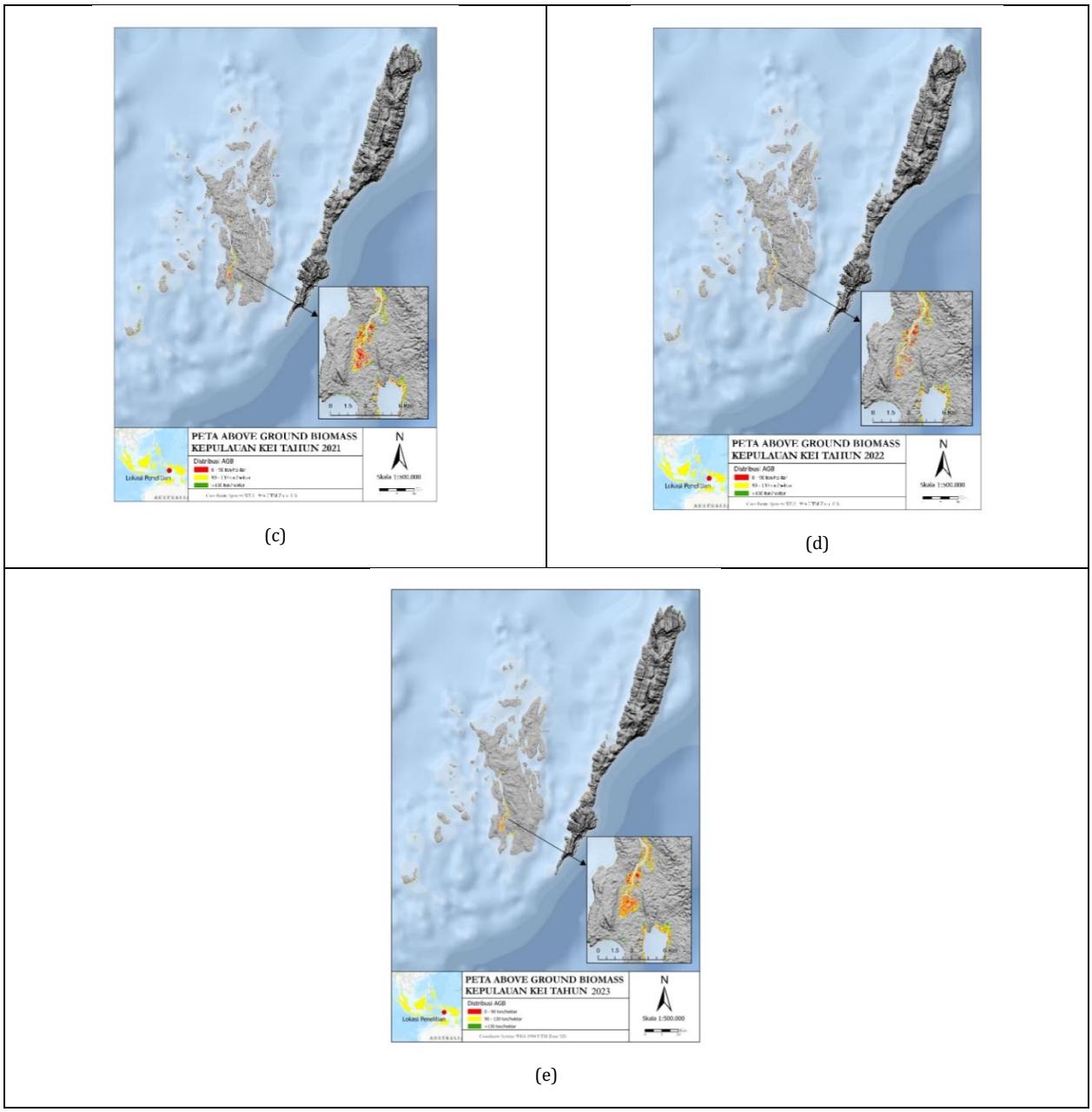


(a)



(b)

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 2. Peta Above Ground Biomass (AGB) Pulau Kei Kecil: (a) 2019; (b) 2020; (c) 2021; (d) 2022; (e) 2023

3.2. Korelasi Luas Tutupan Lahan Hutan Mangrove dan Nilai Above Ground Biomass (AGB) Mangrove Selama 5 Tahun

Luas tutupan dan nilai AGB hutan mangrove yang terletak di Pulau Kei Kecil berdasarkan klasifikasi menggunakan GEE dengan NDMI dan MNDWI terdapat pada Gambar 3.

Luasan hutan mangrove dan estimasi AGB mengalami fluktuasi sejak tahun 2019 sampai 2023. Luasan hutan mangrove dan estimasi AGB meningkat pada tahun 2020 dan 2022. Berdasarkan referensi, fluktuasi penambahan dan pengurangan luasan hutan mangrove dan estimasi AGB terjadi karena banyak faktor. Penambahan luasan hutan mangrove karena faktor aktivitas manusia seperti reforestasi, aforestasi, dan keterlibatan masyarakat (Masrokah et al., 2026; Duong PT., 2023; Pungpa & Chumkiew., 2025). Selain faktor aktivitas manusia, penambahan luasan hutan mangrove terjadi karena faktor alami seperti sedimentasi alami (Sukojo et al., 2022) dan kondisi iklim yang optimal untuk pertumbuhan mangrove (Alharbi, 2025). Sementara faktor pengurangan luasan mangrove dan estimasi AGB diantaranya adalah ekspansi praktik *aquaculture* (tambak) (Frananda et al., 2026), konversi lahan (Chiang, S.H., 2015; Liao et al.,2019), dan penebangan hutan mangrove secara ilegal (Marpaung et al., 2025). Selain itu hutan mangrove bisa berkurang disebabkan oleh faktor alami seperti menurunnya kualitas air (Sukojo & Savitri, 2020), peningkatan polutan/pencemar (Lassalle & Dubucq, 2021) serta dampak perubahan iklim yaitu kenaikan muka air laut (Chiang, S.H, 2015) dan abrasi pesisir (Masrokah et al., 2026).

Berdasarkan hasil analisis korelasi Pearson antara luas tutupan lahan dan nilai AGB hutan mangrove

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

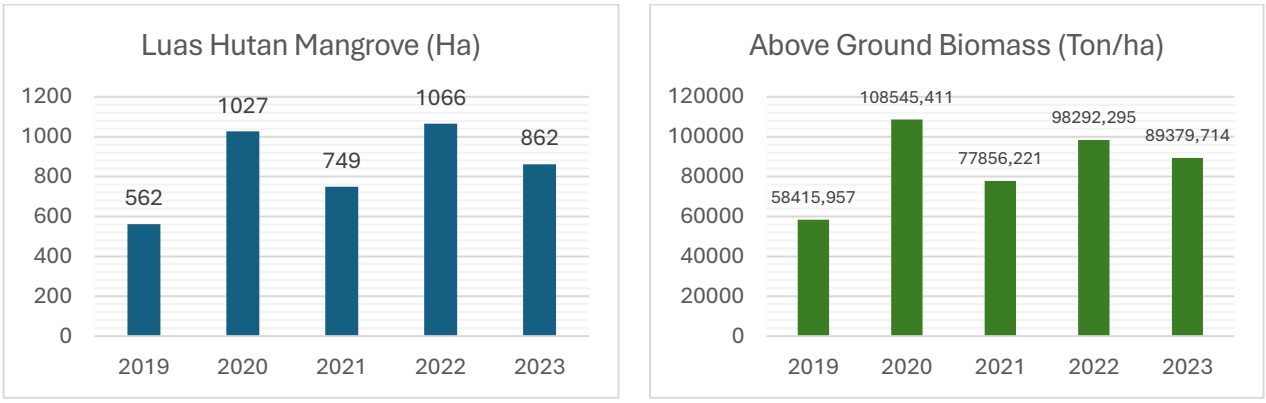
menggunakan Phyton diperoleh angka korelasi sebesar 0.965 sehingga dapat dikatakan bahwa luas tutupan lahan hutan mangrove memiliki korelasi positif yang sangat kuat terhadap nilai AGB.

Jadi semakin luas tutupan lahan hutan mangrove, maka semakin tinggi juga nilai AGB hutan mangrove di Pulau Kei Kecil. Namun meskipun berkorelasi positif kuat, pada dasarnya nilai AGB hutan mangrove yang melibatkan gabungan data dari Sentinel-2 dan GEDI ini tidak sekedar dipengaruhi oleh luas area. Band red-edge pada Sentinel-2 yang sensitif terhadap kandungan klorofil juga dapat memperkirakan kesehatan dan pertumbuhan vegetasi (Jiang et al., 2022; Pham et al., 2020). Dipadukan dengan GEDI yang memiliki data LiDAR yang memiliki kemampuan sekaligus untuk mengukur ketinggian kanopi (Wang et al., 2024) sehingga pada peta Gambar 2 terdapat perbedaan warna pada sebaran distribusi nilai AGB di Hutan Mangrove Pulau Kei Kecil.

Meskipun telah memadukan data dari Sentinel-2 dan GEDI yang diasumsikan memiliki tingkat keakuratan tinggi dalam melakukan estimasi terhadap nilai AGB, berdasarkan hasil validasi model Gambar 5 diketahui memiliki nilai koefisien determinasi (r^2) 0.496 yang menunjukkan bahwa sekitar 49.6% dari variasi dalam predicted AGB dapat dijelaskan oleh data Reference AGB. Hal ini mengindikasikan bahwa model ini memiliki nilai akurasi sedang dan titik-titik yang terletak jauh di garis merah menunjukkan bahwa model prediksi menghasilkan nilai yang lebih rendah dibandingkan nilai referensi.

3.3. Hutan Mangrove Sebagai Carbon Sequester untuk Mitigasi dan Adaptasi Perubahan Iklim

Above Ground Biomass (AGB) merupakan salah satu Carbon Pool penting dalam upaya pengurangan Gas Rumah Kaca (GRK) di atmosfer. Semua biomassa dari tumbuhan hidup, baik yang berkayu maupun herba dan terletak di atas permukaan tanah, seperti batang, cabang, kulit kayu, biji, dan dedaunan merupakan bagian dari Above Ground Biomass. AGB menjadi salah satu Carbon Pool penting dalam inventarisasi karbon dan di sebagian proyek mitigasi serta merupakan bagian penting dalam Aforestasi dan reforestasi dalam *Clean Development Management* (CDM) project di bawah Protokol Kyoto (Ravindranath & Ostwald, 2008).

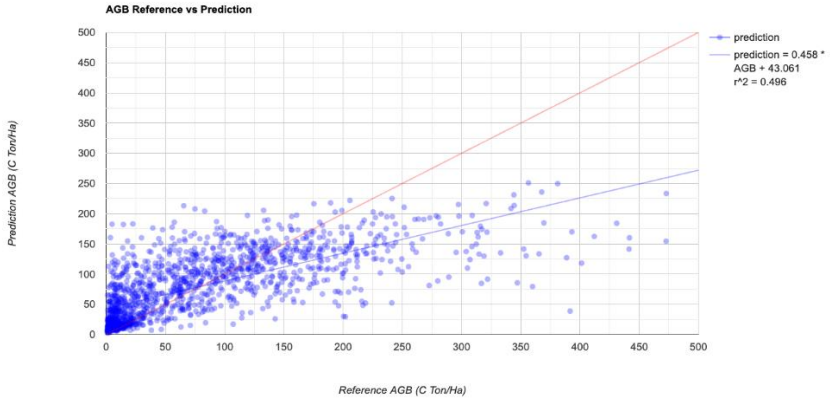


(a) (b)

Gambar 3. (a) Luas Tutupan Hutan Mangrove; (b) Nilai AGB Hutan Mangrove

Variables	Pearson Correlation (r)	P-Value (Significance)	N
Mangrove Area vs. Above Ground Biomass	0.965	0.008	5

Gambar 4. Hasil Analisis Korelasi Pearson Menggunakan Phyton



Gambar 5. Grafik Validasi Model

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Hutan mangrove memiliki peran penting yang sangat efektif untuk menyerap karbondioksida. Karbondioksida yang diserap oleh mangrove akan digunakan untuk berfotosintesis hingga dihasilkan materi organik yang disimpan dalam bentuk biomassa, termasuk batang, cabang, ranting, daun, hingga akar. Selain disimpan dalam bentuk biomassa, materi organik hasil fotosistensisnya juga disimpan di dalam tanah (Najamuddin et al., 2023; Oktaviani et al., 2024; Sumarsih et al., 2023). Melalui mekanisme penyerapan dan penyimpanan karbon tersebut selain dapat mengurangi emisi GRK juga dapat menjadi sumber pendapatan dalam skema pasar karbon.

Tidak hanya penting dalam upaya mitigasi, hutan mangrove juga memiliki peran besar dalam adaptasi Perubahan iklim. Hutan mangrove membantu menjaga ketinggian garis pantai terhadap kenaikan muka air laut akibat perubahan iklim serta melindungi infrastruktur pesisir dari kerusakan akibat badai, serta mengurangi dampak kenaikan muka air laut dengan mendorong penumpukan pasir (Alongi, 2008; Chow, 2018; Soper et al., 2019). Oleh karena itu, penting untuk mengetahui nilai Above Ground Biomass (AGB) dari ekosistem mangrove di Pulau Kei Kecil, yang merupakan bagian dari wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil, sebagai salah satu kawasan yang rentan terhadap dampak perubahan iklim. Data tersebut dapat menjadi acuan untuk merumuskan strategi adaptasi berbasis ekosistem (Ecosystem-based Adaptation) yang melibatkan hutan mangrove untuk membantu masyarakat pesisir beradaptasi dengan dampak Perubahan iklim (Ellison, 2014; Nyangoko et al., 2022).

4. KESIMPULAN

Integrasi data *Sentinel*-2 dan *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI) dapat menghasilkan peta distribusi *Above Ground Biomass* (AGB) dengan indikator warna yang menunjukkan nilai AGB di setiap titik, yaitu warna merah 0-90 Ton/ha, warna kuning 90-130 Ton/ha, warna hijau >130 Ton/ha.

Hasil analisis korelasi menunjukkan bahwa nilai AGB memiliki korelasi yang positif yang kuat dengan luas tutupan lahan hutan mangrove di Pulau Kei Kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin luas area mangrove, maka semakin tinggi potensi penyimpanan *Above Ground Biomass* (AGB). Hal tersebut menegaskan bahwa hutan mangrove memiliki peran penting dalam penyerapan karbon di atmosfer untuk dikonversi menjadi materi organik melalui fotosintesis. Hasil fotosintesis kemudian diubah menjadi materi organik yang tersimpan dalam *Above Ground Biomass* maupun *Below Ground Biomass*. Dengan demikian, ekosistem mangrove di Kepulauan Kei memiliki potensi yang signifikan sebagai carbon sink yang mendukung upaya mitigasi dan adaptasi perubahan iklim.

Secara ilmiah, hasil penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan integratif antara penginderaan jauh Sentinel-2 dan data lidar (GEDI) mampu memberikan estimasi spasial potensi karbon biru sehingga dapat berimplikasi pada pengembangan metodologi pemetaan karbon berbasis ekosistem mangrove. Namun, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan salah satunya yaitu estimasi biomassa yang digunakan belum mencakup Below Ground Biomass (BGB) sehingga nilai total karbon ekosistem mangrove tersebut belum terwakili. Oleh sebab itu, dibutuhkan penelitian lanjutan untuk mengintegrasikan data multi sensor tersebut dengan data lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *76*(1), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024

Castillo, J. A. A., Apan, A. A., Maraseni, T. N., & Salmo, S. G. (2017). Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *134*, 70–85. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.016

Chiang, S. H. (2015). Monitoring and predicting the change of mangrove forests in Irrawaddy Delta, South Myanmar. *ACRS 2015*. 36th Asian Conference on Remote Sensing: Fostering Resilient Growth in Asia.

Chow, J. (2018). Mangrove management for climate change adaptation and sustainable development in coastal zones. *Journal of Sustainable Forestry*, *37*(2), 139–156. https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1339615

Das, S. C. (with Pullaiah, & Ashton, E. C.). (2022). *Mangroves: Biodiversity, Livelihoods and Conservation* (1st ed). Springer.

Dharmawan, I. W. E., Renyaan, J., & Nurdiansah, D. (2022a). Mangrove zonation, community structure and healthiness in Kei Islands, Maluku, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, *23*(9). https://doi.org/10.13057/biodiv/d230962

Dharmawan, I. W. E., Renyaan, J., & Nurdiansah, D. (2022b). Mangrove zonation, community structure and healthiness in Kei Islands, Maluku, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, *23*(9). https://doi.org/10.13057/biodiv/d230962

Duong, P., Nhung, P., Sanh, H., Ngoc-Tu, N., Hau, N., & Tuan, P. (2024). THE STATE OF MANGROVE FOREST IN SOC TRANG PROVINCE, VIETNAM BASED ON SATELLITE IMAGERY BETWEEN 2000–2020. *JOURNAL OF TROPICAL FOREST SCIENCE*, *36*(2), 224–236. https://doi.org/10.26525/jtfs2024.36.2.224

Dutta, D., Kumar, T., Jayaram, C., & Jain, P. (2022). Mangrove Health Analysis Using Multi-Temporal Sentinel-2 Multi-Spectral Instrument (MSI) Data. In S. C. Das, Pullaiah, & E. C. Ashton (Eds.), *Mangroves: Biodiversity, Livelihoods and Conservation* (pp. 71–106). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0519-3_4

Ellison, J. C. (2014). Climate Change Adaptation: Management Options for Mangrove Areas. In I. Faridah-Hanum, A. Latiff, K. R. Hakeem, & M. Ozturk (Eds.), *Mangrove Ecosystems of Asia* (pp. 391–413).

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8582-7_18

Foody, G. M. (2020). Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote Sensing of Environment*, *239*, 111630. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630

Frananda, H., Iskarni, P., Sari, F. M., Ismail, M., Purnamasari, E., & Khairi, A. I. (2026). Multi-temporal assessment of mangrove degradation in Padang Pariaman Regency using remote sensing and machine learning approaches. *AACL Bioflux*, *19*(1), 216–226. Scopus.

Ghorbanian, A., Zaghian, S., Asiyabi, R. M., Amani, M., Mohammadzadeh, A., & Jamali, S. (2021). Mangrove Ecosystem Mapping Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Satellite Images and Random Forest Algorithm in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, *13*(13), 2565. https://doi.org/10.3390/rs13132565

Hasmadi, M. I., Pakhriazad, H. Z., & Shahrin, M. F. (2009). Evaluating supervised and unsupervised techniques for land cover mapping using remote sensing data. *GEOGRAFIA OnlineTM Malaysian Journal of Society and Space*, *5*(1), 1–10.

Jiang, F., Deng, M., Tang, J., Fu, L., & Sun, H. (2022). Integrating spaceborne LiDAR and Sentinel-2 images to estimate forest aboveground biomass in Northern China. *Carbon Balance and Management*, *17*(1), 12. https://doi.org/10.1186/s13021-022-00212-y

Jørgensen, S. E., & Fath, B. D. (2008). *Encyclopedia of ecology*. Elsevier.

Kausarian, H., Sumantyo, J. T. S., Batara, B., Lubis, M. Z., Anurogo, W., Razi, P., & Mairizki, F. (2026). Assessing Wetland and Dryland Transitions in Northwestern Riau Using Sentinel-2 Imagery. In J. T. S. Sumantyo & P. Razi (Eds.), *Advances in Geoscience and Remote Sensing Technology* (pp. 10–20). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-95-3075-5_2

Lassalle, G., & Dubucq, D. (2021). Preliminary Assessment of Probable Impacts Caused by the Largest Oil Spill in Brazil History on Selected Mangrove Stands Using Satellite Imaging. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 681–684. https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553256

Liao, J., Zhen, J., Zhang, L., & Metternicht, G. (2019). Understanding Dynamics of Mangrove Forest on Protected Areas of Hainan Island, China: 30 Years of Evidence from Remote Sensing. *Sustainability*, *11*(19), 5356. https://doi.org/10.3390/su11195356

Manna, S., & Raychaudhuri, B. (2020). Retrieval of Leaf area index and stress conditions for Sundarban mangroves using Sentinel-2 data. *International Journal of Remote Sensing*, *41*(3), 1019–1039. https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1655174

Marpaung, R. B., Sulistiyono, N., & Patana, P. (2025). Identification of land cover in disturbed mangrove forests using Sentinel 2A satellite imagery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1573*(1), 012017. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1573/1/012017

Masrokah, S., Rosidik, N. N. A., Asrit, Oktavia, M., & Utomo, B. (2025). Analysis of the impact of mangrove forest land use on coastline changes using Landsat 8 satellite imagery on the coast of Ogan Komering Ilir Regency, South Sumatra province. *EQA - International Journal of Environmental Quality*, *71*, 83–94. https://doi.org/10.60923/issn.2281-4485/22124

Najamuddin, Tahir, I., Pujiati, M. I., & Harahap, Z. A. (2023). Estimation of carbon storage of tropical mangroves in the North Maluku Islands region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1289*(1), 012008. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1289/1/012008

Nyangoko, B. P., Berg, H., Mangora, M. M., Shalli, M. S., & Gullström, M. (2022). Community perceptions of climate change and ecosystem-based adaptation in the mangrove ecosystem of the Rufiji Delta, Tanzania. *Climate and Development*, *14*(10), 896–908. https://doi.org/10.1080/17565529.2021.2022449

Oktaviani, D., Sunardi, & Sumiarsa, D. (2024). Carbon stock of mangrove ecosystem and role blue economy in Pangandaran West Java. *E3S Web of Conferences*, *495*, 02002. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449502002

Padalia, H., Prakash, A., & Watham, T. (2023). Modelling aboveground biomass of a multistage managed forest through synergistic use of Landsat-OLI, ALOS-2 L-band SAR and GEDI metrics. *Ecological Informatics*, *77*, 102234. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102234

Pham, T. D., Yokoya, N., Xia, J., Ha, N. T., Le, N. N., Nguyen, T. T. T., Dao, T. H., Vu, T. T. P., Pham, T. D., & Takeuchi, W. (2020). Comparison of Machine Learning Methods for Estimating Mangrove Above-Ground Biomass Using Multiple Source Remote Sensing Data in the Red River Delta Biosphere Reserve, Vietnam. *Remote Sensing*, *12*(8), 1334. https://doi.org/10.3390/rs12081334

Pungpa, S., & Chumkiew, S. (2025). Increasing Area of Banlaem Mangrove Forest at Nakhon Si Thammarat in Southern Thailand: Land Cover Changes and Predictive Models. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, *7*(5), 453–468. https://doi.org/10.30564/jees.v7i5.8264

Ravindranath, N. H., & Ostwald, M. (2008). *Carbon inventory methods: Handbook for greenhouse gas inventory, carbon mitigation and roundwood production projects*. Springer.

Ruban, E., Sumilat, G. D., Lobja, X. E., & Rifani, I. (2024). *Kajian Kerusakan Ekosistem Hutan Mangrove di Kecamatan Kei Besar Kabupaten Maluku Tenggara*. *12*(2), 119–131. https://doi.org/DOI:%252010.53682/jss.v12i2.9902

Rwanga, S. S., & Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS. *Int J Geosci*, *8*(4), 611–622.

Simarmata, N., Wikantika, K., Darmawan, S., Harto, A. B., Sakti, A. D., & Santo, A. A. (2024). Mangrove ecosystem species mapping from integrated Sentinel-2 imagery and field spectral data using random forest algorithm. *Journal of Applied Remote Sensing*, *18*(01). https://doi.org/10.1117/1.JRS.18.014509

Sivaperuman, C., Velmurugan, A., Singh, A. K., & Jaisankar, I. (Eds.). (2018). *Biodiversity and climate change adaptation in tropical islands*. Academic Press, an imprint of Elsevier.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Soper, F. M., MacKenzie, R. A., Sharma, S., Cole, T. G., Litton, C. M., & Sparks, J. P. (2019). Non-native mangroves support carbon storage, sediment carbon burial, and accretion of coastal ecosystems. *Global Change Biology*, *25*(12), 4315–4326. https://doi.org/10.1111/gcb.14813

Sukojo, B. M., Nurwatik, & Annisa, N. N. (2022). Analysis of Sedimentation towards the Changes of Mangrove Area Using Multitemporal Remote Sensing Technology (A Case Study in Gresik Regency, East Java, Indonesia). *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, *12*(1), 209–217. https://doi.org/10.18517/ijaseit.12.1.12286

Sukojo, B. M., & Savitri, D. N. (2020). Analysis of Changes in Density of Mangrove Using Normalized Difference Vegetation Index Algorithm on Sentinel 2A Level 1C (Case Study: Gresik Regency). *2020 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS)*, 78–87. https://doi.org/10.1109/AGERS51788.2020.9452764

Sumarsih, N., Saptarini, D., Hidayati, D., Ashuri, N. M., Oktafitria, D., Tawakkal, R. I., Cahya, S., Mulyadi, Y., & Armono, H. D. (2023). Assessment of Blue Carbon Stock of Mangrove Ecosystem in Telok Bangko Bontang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1250*(1), 012014. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1250/1/012014

Utama, A. P. (2022). Optimalisasi Kawasan Ekosistem Mangrove Teluk Danar Kecamatan Kei Kecil Timur, Maluku Tenggara untuk Pengembangan Kawasan Ekowisata. *Academia*.

Wang, C., Zhang, W., Ji, Y., Marino, A., Li, C., Wang, L., Zhao, H., & Wang, M. (2024). Estimation of Aboveground Biomass for Different Forest Types Using Data from Sentinel-1, Sentinel-2, ALOS PALSAR-2, and GEDI. *Forests*, *15*(1), 215. https://doi.org/10.3390/f15010215

Wirasatriya, A., Pribadi, R., Iryanthony, S. B., Maslukah, L., Sugianto, D. N., Helmi, M., Ananta, R. R., Adi, N. S., Kepel, T. L., Ati, R. N. A., Kusumaningtyas, M. A., Suwa, R., Ray, R., Nakamura, T., & Nadaoka, K. (2022). Mangrove Above-Ground Biomass and Carbon Stock in the Karimunjawa-Kemujan Islands Estimated from Unmanned Aerial Vehicle-Imagery. *Sustainability*, *14*(2), 706. https://doi.org/10.3390/su14020706

Xia, Q., Li, J., Dai, S., Zhang, H., Xing, X., 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114 School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China, & 云南农业大学 水利学院, 昆明 650201 School of Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China. (2023). Mapping high-resolution mangrove forests in China using GF-2 imagery under the tide. *National Remote Sensing Bulletin*, *27*(6), 1320–1333. https://doi.org/10.11834/jrs.20221848

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP