

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Mangrove merupakan ekosistem pesisir yang unik dan berperan penting secara ekologis, ekonomi dan sosial. Vegetasi ini mampu menyediakan berbagai layanan ekosistem penting mulai dari penyediaan habitat bagi fauna dan flora pesisir, perlindungan garis pantai dari abrasi dan badai, penjernihan air, hingga penyimpanan karbon dalam jumlah besar (Akram et al., 2023). Kemampuan mangrove ini dikenal sebagai *blue carbon*, yaitu karbon yang diserap lingkungan pesisir melalui proses fotosintesis dan terakumulasi dalam biomassa di atas permukaan (seperti daun, batang dan ranting) serta di bawah permukaan tanah (akar, serasah dan kayu mati serta pada sedimen) dalam jangka waktu yang panjang (Choudhary et al., 2024).

Penyimpanan karbon di atas permukaan (*above ground biomass*) merupakan salah satu indikator utama dalam menilai kontribusi mangrove terhadap mitigasi perubahan iklim (Rizkiyani et al., 2024). Namun, cadangan karbon tersebut bersifat dinamis dan sensitif terhadap berbagai tekanan, seperti perubahan penggunaan lahan, konversi menjadi tambak, perubahan struktur tegakan, umur tegakan, komposisi spesies serta gangguan alami (Goldberg et al., 2020). Oleh karena itu, pemantauan jangka panjang berbasis data ilmiah menjadi sangat penting untuk mengidentifikasi perubahan stok karbon dan potensi ancaman terhadap keberlanjutan ekosistem mangrove (Rovai et al., 2021).

Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh semakin berkembang sebagai metode yang efektif dan efisien untuk memantau dinamika vegetasi dan biomassa mangrove. Penggunaan citra satelit Sentinel-2, dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi, memungkinkan analisis perubahan tutupan vegetasi dan estimasi biomassa secara periodik (Simarmata et al., 2024). Berbagai indeks vegetasi seperti NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) dan EVI (*Enhanced Vegetation Index*), telah terbukti memiliki korelasi kuat dengan biomassa dan membantu memetakan cadangan karbon di atas permukaan dengan akurasi yang baik (Legesse et al., 2024a). Studi terbaru Vincentius et al. (2024) bahkan mengintegrasikan penginderaan jauh dengan algoritma *machine learning* untuk meningkatkan ketepatan estimasi stok karbon (Zhang & Fan, 2025).

Dusun Kuri Caddi di Kabupaten Maros merupakan salah satu kawasan mangrove yang penting untuk dikaji mengingat perannya sebagai penyangga ekologis dan sumber penghidupan masyarakat pesisir. Wilayah ini termasuk kawasan pesisir yang mengalami tekanan akibat dari aktivitas manusia dan dinamika pesisir seperti konversi lahan dan sedimentasi. Penelitian Meilya et al. (2024) menunjukkan adanya indikasi degradasi vegetasi yang telah terlihat secara temporal melalui perubahan tutupan lahan dan penurunan kelas kerapatan vegetasi pada kawasan mangrove di Desa Nisombalia terutama di Dusun Kuri Caddi dari tahun 2010-2021. Perubahan tersebut berpotensi memengaruhi cadangan karbon yang

tersimpan sehingga diperlukan pemantauan berbasis data spasial dan temporal untuk mengukur dinamika stok karbon secara lebih akurat.

Penurunan cadangan karbon sebagai akibat dari degradasi mangrove tidak hanya melemahkan fungsi ekologi mangrove, tetapi juga mengurangi potensi nilai ekonomi yang dapat diperoleh dari jasa lingkungan, termasuk potensi pemanfaatan skema nilai karbon. Oleh karena itu, kajian mengenai dinamika cadangan karbon secara temporal di Kuri Caddi menjadi penting untuk memberikan dasar ilmiah dalam upaya mitigasi perubahan iklim, perencanaan strategi pengelolaan serta pengambilan kebijakan yang tepat terhadap pengelolaan hutan mangrove yang menjadi sumber daya penting di kawasan tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana dinamika cadangan karbon di atas permukaan mangrove di Kuri Caddi pada periode 2016-2025 berdasarkan analisis penginderaan jauh?
2. Bagaimana strategi pengelolaan kawasan mangrove yang berkelanjutan berdasarkan kondisi ekologi, sosial, dan ekonomi masyarakat Dusun Kuri Caddi?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis dinamika cadangan karbon di atas permukaan pada hutan mangrove di Kuri Caddi menggunakan metode penginderaan jauh periode 2016-2025.
2. Menganalisis strategi pengelolaan kawasan mangrove yang berkelanjutan berdasarkan keadaan ekologi, sosial, dan ekonomi masyarakat Dusun Kuri Caddi.

1.4. Manfaat Penelitian

1. memberikan informasi ilmiah mengenai dinamika cadangan karbon pada hutan mangrove di Kuri Caddi secara temporal.
2. Menjadi dasar rekomendasi untuk perencanaan dan pengambilan kebijakan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan di kawasan mangrove Kuri Caddi.
3. Menjadi referensi akademik serta bahan masukan untuk pengembangan penelitian lanjutan terkait pemantauan dan pengelolaan ekosistem mangrove.

BAB II

ESTIMASI CADANGAN KARBON

2.1. Pendahuluan Khusus

Estimasi cadangan karbon pada ekosistem mangrove merupakan aspek penting dalam kajian ekologi pesisir, mengingat perannya sebagai penyerap dan penyimpanan karbon jangka panjang (*blue carbon*) yang signifikan (Alongi et al., 2020). Salah satu komponen utama yang umum digunakan dalam penilaian tersebut adalah biomassa di atas permukaan (*above ground biomass*), yang dapat diestimasi melalui kombinasi pengukuran lapangan dan analisis data penginderaan jauh. Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai stok karbon, baik dari segi nilai aktual di lokasi penelitian maupun distribusinya secara spasial dan temporal (Tian et al., 2023).

Penginderaan jauh telah menjadi metode yang efektif untuk memantau ekosistem mangrove karena mampu menjangkau wilayah luas dan melakukan pemantauan secara berkala (Winarso, 2019). Penggunaan indeks vegetasi seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Enhanced Vegetation Index* (EVI) telah terbukti memiliki korelasi positif dengan biomassa termasuk mangrove (Nguyen et al., 2019; Waru et al., 2019; Forestriko & Hartono, 2016). Nilai indeks vegetasi tersebut memanfaatkan variasi reflektansi pada pita spektral merah (*red*), *near-infrared* (NIR), dan *red-edge* untuk mendeteksi kondisi fisiologis dan kerapatan kanopi, yang selanjutnya dapat dikaitkan dengan kandungan karbon pada vegetasi.

Untuk meningkatkan akurasi perhitungan biomassa, data lapangan diperlukan melalui pengukuran lapangan. Dalam praktiknya, data indeks vegetasi sering dikombinasikan dengan *Diameter at Breast Height* (DBH), yaitu diameter batang pohon pada ketinggian 1,3 meter dari permukaan tanah (Simard et al., 2019). Data DBH digunakan dalam persamaan alometrik untuk menghitung biomassa pohon individual, yang kemudian dikonversi menjadi cadangan karbon. Pendekatan ini memungkinkan validasi dan kalibrasi hasil estimasi berbasis citra satelit, sehingga hasil pemetaan cadangan karbon lebih representatif terhadap kondisi ekologi sebenarnya di lapangan.

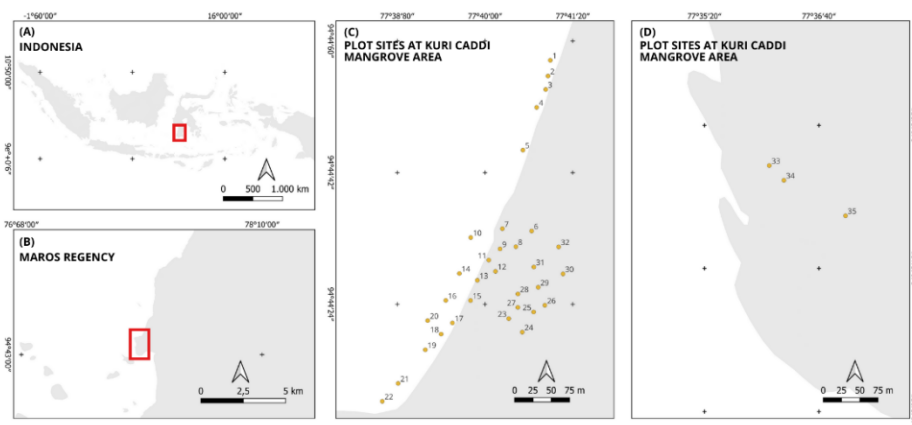
Kombinasi data indeks vegetasi dari citra satelit dan data alometrik dari pengukuran DBH di lapangan menghasilkan model estimasi biomassa yang lebih andal. Pendekatan ini menggunakan algoritma *machine learning* untuk meningkatkan ketepatan prediksi stok karbon. Integrasi kedua sumber data tidak hanya meningkatkan presisi estimasi, tetapi juga memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi pengelolaan hutan mangrove secara berkelanjutan.

2.2. Metode Penelitian

2.2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada Maret – Juli 2025 di Kawasan Mangrove Dusun Kuri Caddi, Kecamatan Marusu, Kabupaten Maros. Pengambilan data sampel biomassa di lapangan dilaksanakan pada tanggal 5 April 2025. Titik pengambilan

sampel biomassa tersebar pada seluruh zonasi mangrove di Kuri Caddi untuk mewakili variasi kerapatan vegetasi. Gambar 1 di bawah menunjukkan area yang menjadi lokasi penelitian.



Gambar 1. Lokasi Penelitian menunjukkan (A dan B) Dusun Kuri Caddi yang berada di kaki Pulau Sulawesi; (C-D) titik pengambilan sampel untuk pengukuran biomassa mangrove

2.2.2. Alat dan Bahan

2.2.2.1 Alat

Penelitian ini menggunakan beberapa alat yang digunakan dalam pengambilan data lapangan dan pengolahan citra satelit. Hal ini bertujuan untuk memudahkan dalam pengambilan sampel lapangan dengan kebutuhan penelitian serta pengolahan data hasil pengamatan. Rincian alat yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 1. Alat yang digunakan dalam penelitian beserta kegunaannya

No	Alat	Kegunaan
1	Global Positioning System (GPS)	Penentuan titik lokasi pengambilan sampel
2	Roll meter	Pengukuran panjang plot atau transek
3	Pita ukur	Pengukuran lingkar batang pohon mangrove
4	Alat tulis	Mencatat data lapangan
5	Tali	Pembatas area pengambilan sampel
6	Buku panduan identifikasi mangrove	Mengidentifikasi spesies mangrove
7	Kamera digital	Dokumentasi kegiatan lapangan
8	Software QGIS	Media pengolahan citra satelit
9	Microsoft Excel	Media pengolahan data lapangan

2.2.2.2. Bahan

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Citra Sentinel-2A yang berfungsi dalam menentukan distribusi spasial dan cadangan karbon mangrove. Data citra yang digunakan merupakan data perekaman tahun 2016, 2018, 2020, 2023 dan 2025 dengan resolusi spasial 10 meter. Sentinel-2A merupakan satelit penginderaan jauh pasif yang dibuat oleh *European Space Agency* (ESA) dan diluncurkan di Korou, Perancis pada tahun 2015. Satelit ini menawarkan resolusi spasial tinggi dengan resolusi temporal 10 hari untuk satu satelit. Perangkat utamanya, *Multispectral Instrument* (MSI) yang memiliki kemampuan merekam 13 kanal spektral termasuk band *red-edge* yang sensitif terhadap kandungan klorofil, sehingga sangat efektif untuk analisis vegetasi, termasuk mangrove (Tabel 2).

Tabel 2. Detail *spectral band* dari Citra Sentinel-2A yang digunakan

<i>Bands</i>	<i>Spatial Resolution</i>	<i>Wavelengths (µm)</i>
Band 1 – Coastal Aerosol	60 m	0.443
Band 2 – Blue	10 m	0.490
Band 3 - Green	10 m	0.560
Band 4 - Red	10 m	0.665
Band 5 – Vegetation Red Edge	20 m	0.705
Band 6 – Vegetation Red Edge	20 m	0.740
Band 7 – Vegetation Red Edge	20 m	0.783
Band 8 - NIR	10 m	0.842
Band 8A – Vegetation Red Edge	20 m	0.865
Band 9 – Water Vapour	60 m	0.945
Band 10 – SWIR Cirrus	60 m	1.375
Band 11 – SWIR	20 m	1.610
Band 12 - SWIR	20 m	2.190

Misi utama dari Sentinel-2A adalah untuk menyediakan data dalam mendukung berbagai kebutuhan, seperti perencanaan tata ruang, pemantauan lingkungan pertanian, kualitas dan ketersediaan air, pemantauan sumber daya alam, pemantauan perubahan tutupan lahan, penilaian risiko bencana kemanusiaan, pemantauan hutan dan vegetasi serta stok karbon lahan.

2.2.3. Jenis dan Sumber Data

Jenis data yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah data mangrove melalui pengukuran diameter batang pohon dan data keadaan umum lokasi penelitian yang berkaitan dengan tujuan penelitian. Spesifikasi jenis data yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3 dibawah.

Tabel 3. Spesifikasi jenis data citra Sentinel-2A

Perekaman	Periode Pasang Surut	Resolusi Spasial	Sumber
15 April 2016	Surut	10 meter	Planet Explorer Sentinel-2A
15 Mei 2018	Pasang	10 meter	
11 Oktober 2020	Surut	10 meter	
29 Mei 2023	Pasang	10 meter	
4 Maret 2025	Surut	10 meter	

Data citra satelit yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Planet Explorer melalui (<https://browser.dataspace.copernicus.eu>) dan diolah menggunakan Google Earth Engine Code. Jenis periode pasang surut pada setiap perekaman citra bersumber dari Website Pasang Laut (<https://pasanglaut.com/id>)

2.2.4. Metode Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini pengumpulan data dilakukan melalui dua tahapan yaitu pengolahan data citra satelit dan pengambilan serta pengamatan data mangrove di lapangan. Data mangrove yang dikumpulkan berupa pengukuran lingkaran batang pohon serta spesies pohon mangrove pada area penelitian. Pengumpulan data ini diperuntukkan untuk menghitung biomassa aktual atas permukaan (*aboveground biomass*) mangrove.

Penentuan lokasi pengambilan sampel dilakukan dengan metode *purposive sampling* berdasarkan klasifikasi nilai indeks vegetasi pada citra PlanetScope. Jumlah titik sampel yang digunakan sebanyak 35 titik dengan persebaran titik mengacu pada tingkat kemunculan klasifikasi kelas kerapatan vegetasi yaitu vegetasi jarang, sedang dan padat. Prosedur pengambilan data diterangkan secara lebih rinci dibawah ini.

2.2.4.1. Analisa Citra Satelit

Citra satelit yang digunakan pada penelitian ini adalah Sentinel-2A dengan resolusi spasial 10 meter. Citra yang dihasilkan telah melalui pengolahan secara geometris dan radiometrik untuk menghilangkan distorsi geometris dan koreksi atmosfer untuk menghasilkan nilai reflektansi permukaan yang akurat (Planet Labs PBC, 2023). *Pra*-pemrosesan yang digunakan pada citra terbagi atas beberapa tahap. Tahap pertama dilakukan pemotongan citra (*cropping*) sesuai dengan area penelitian sehingga memungkinkan analisis citra dilakukan secara lebih sistematis. Selanjutnya dilakukan klasifikasi citra yang memisahkan antara kelas vegetasi mangrove dengan kelas non-mangrove pada lokasi kajian.

Pengklasifikasian citra pada penelitian ini menggunakan metode *random forest*. *Random Forest* merupakan teknik *machine learning* berbasis *ensemble* yang membangun banyak pohon keputusan (*decision tree*) dan menggabungkan hasilnya melalui mekanisme *bagging*, sehingga menghasilkan model yang lebih stabil dan akurat. Metode ini efektif untuk klasifikasi penginderaan jauh karena mampu menangani variabel yang kompleks, bersifat tidak sensitif terhadap noise, serta mengurangi risiko *overfitting* yang sering terjadi pada model pohon tunggal (Gislason et al., 2006). Studi mengenai algoritma *Random Forest* menunjukkan bahwa penggunaan banyak pohon keputusan menjadikannya lebih unggul untuk data spasial dan citra karena dapat meningkatkan kemampuan generalisasi dan akurasi prediksi (Purwanto et al., 2023). Pemisahan kelas ini bertujuan untuk meminimalisir terjadinya *overestimated* data akibat masuknya piksel non-mangrove ke dalam kelas mangrove.

2.2.4.2. Transformasi Indeks Vegetasi

Indeks vegetasi merupakan parameter penting dalam penginderaan jauh yang digunakan untuk menilai kondisi vegetasi, kerapatan, kesehatan tanaman, serta estimasi biomassa dan cadangan karbon. Prinsip utama indeks vegetasi adalah memanfaatkan perbedaan reflektansi antara pita *Near-Infrared* (NIR) dan *Red*, karena vegetasi sehat memantulkan energi tinggi pada pita NIR dan menyerap kuat pada pita Red akibat kandungan klorofil. Dalam konteks mangrove, indeks vegetasi sangat relevan karena dapat digunakan untuk memperkirakan biomassa di atas permukaan, yang secara langsung berkaitan dengan cadangan karbon. Beberapa indeks vegetasi yang sering digunakan dalam penelitian mangrove adalah NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), dan EVI (*Enhanced Vegetation Index*). Hasil transformasi indeks vegetasi akan digunakan dalam penentuan titik pengambilan data mangrove dan analisis regresi.

A. *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI)

NDVI merupakan indeks vegetasi yang paling umum digunakan untuk memantau kondisi vegetasi berdasarkan perbedaan reflektansi antara pita NIR dan Red. Berikut merupakan persamaan yang digunakan pada NDVI :

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

Keterangan :

NIR = Band inframerah dekat (*Near infrared*)

RED = Band merah

Nilai NDVI berkisar antara -1 hingga +1, dimana nilai mendekati +1 menunjukkan vegetasi rapat, sedangkan nilai mendekati nol hingga negatif menunjukkan area tanpa vegetasi. Keunggulan NDVI terletak pada kesederhanaan rumusnya serta kemudahan implementasi. NDVI umumnya diterapkan dalam pemantauan dinamika vegetasi, klasifikasi permukaan lahan dan analisis perubahan penggunaan lahan, dan pemantauan respons vegetasi terhadap perubahan iklim (Zhao & Qu, 2024).

B. *Enhanced Vegetation Index* (EVI)

EVI merupakan indeks vegetasi yang dikembangkan untuk mengoptimalkan sinyal vegetasi dengan peningkatan sensitivitas dari algoritma NDVI. Rumus EVI sebagai berikut :

$$EVI = G * \frac{NIR - RED}{L + NIR + C_1 RED - C_2 BLUE}$$

Keterangan :

- G = Gain factor ($G = 2,5$)
- NIR = Band inframerah dekat (*Near infrared*)
- RED = Band merah
- BLUE = Band biru
- L = Faktor kalibrasi efek kanopi ($L=1$)
- C_1 = *Atmospheric aerosol resistance* ($C_1=6$)
- C_2 = *Atmospheric aerosol resistance* ($C_2=7,5$)

Keunggulan EVI adalah kemampuannya dalam mengurangi efek latar belakang tanah dan pengaruh atmosfer melalui penggunaan pita biru serta faktor koreksi tambahan. Oleh karena itu, EVI dapat lebih stabil dan akurat pada keadaan geografis yang terletak di daerah peralihan antara darat dan perairan, serta tidak mudah mengalami saturasi (Frananda et al., 2015).

2.2.5. Pengumpulan Data Lapangan

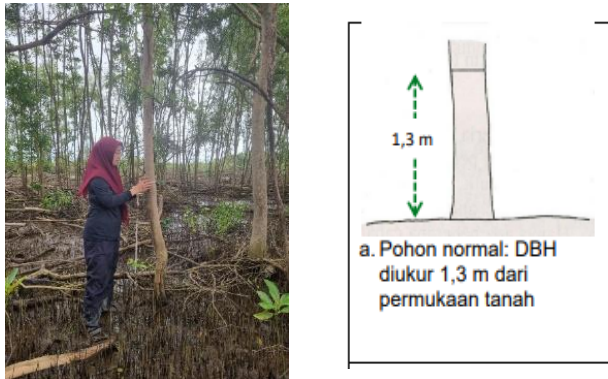
Pengambilan data lapangan dilakukan berdasarkan persebaran titik transformasi indeks vegetasi yang mengacu pada tingkat kemunculan kelas kerapatan vegetasi. Sebaran sampel diharapkan dapat mewakili tingkat kerapatan rendah, sedang, tinggi dengan tetap memperhatikan zonasi mangrove dari titik paling dekat dengan daratan hingga titik terluar. Jumlah plot yang menjadi sampel area penelitian sebanyak 35 plot dengan ukuran plot sebesar 10 x 10 meter. Ukuran plot tersebut disesuaikan dengan resolusi spasial citra Sentinel-2A yang memiliki resolusi 10 meter, sehingga data lapangan dapat terintegrasi secara optimal dengan data penginderaan jauh. Sebaran sampel mewakili tingkat kerapatan rendah, sedang dan tinggi dengan tetap memperhatikan zonasi mangrove dari titik paling dekat dengan daratan (zona terdalam) hingga titik terdekat dengan laut (zona terluar) yang tertampil pada Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi data lapangan berdasarkan zonasi, substrat, dan kerapatan

Lokasi	Zonasi	Substrat	Kerapatan
Titik 1	Zona Pertengahan	Lumpur Berpasir	Rendah
Titik 2	Zona Pertengahan	Lumpur Berpasir	Sedang
Titik 3	Zona Pertengahan	Lumpur Berpasir	Sedang
Titik 4	Zona Pertengahan	Lumpur Berpasir	Sedang
Titik 5	Zona Pertengahan	Lumpur Berpasir	Sedang
Titik 6	Zona Pertengahan	Lumpur Berpasir	Tinggi
Titik 7	Zona Terluar	Lumpur	Tinggi
Titik 8	Zona Pertengahan	Lumpur Berpasir	Sedang
Titik 9	Zona Terluar	Lumpur	Tinggi
Titik 10	Zona Terluar	Lumpur	Tinggi
Titik 11	Zona Terluar	Lumpur	Tinggi
Titik 12	Zona Pertengahan	Lumpur Berpasir	Tinggi
Titik 13	Zona Terluar	Lumpur	Tinggi
Titik 14	Zona Terluar	Lumpur	Sedang
Titik 15	Zona Terluar	Lumpur	Tinggi
Titik 16	Zona Terluar	Lumpur	Sedang
Titik 17	Zona Terluar	Lumpur	Tinggi
Titik 18	Zona Terluar	Lumpur	Rendah
Titik 19	Zona Terluar	Lumpur	Sedang
Titik 20	Zona Terluar	Lumpur	Sedang
Titik 21	Zona Terluar	Lumpur	Sedang
Titik 22	Zona Terluar	Lumpur	Rendah
Titik 23	Zona Terdalam	Pasir Berlumpur	Tinggi
Titik 24	Zona Terdalam	Pasir Berlumpur	Sedang
Titik 25	Zona Terdalam	Pasir Berlumpur	Tinggi
Titik 26	Zona Terdalam	Pasir Berlumpur	Sedang
Titik 27	Zona Terdalam	Pasir Berlumpur	Sedang
Titik 28	Zona Terdalam	Pasir Berlumpur	Sedang
Titik 29	Zona Terdalam	Pasir Berlumpur	Tinggi
Titik 30	Zona Terdalam	Pasir Berlumpur	Sedang
Titik 31	Zona Terdalam	Pasir Berlumpur	Rendah
Titik 32	Zona Terdalam	Pasir Berlumpur	Sedang
Titik 33	Zona Terluar	Lumpur	Rendah
Titik 34	Zona Terluar	Lumpur	Rendah
Titik 35	Zona Terluar	Lumpur	Tinggi

Pengambilan data biomassa aktual mangrove dilakukan melalui metode pengukuran lingkaran batang pohon dengan metode *Diameter at Breast Height* (DBH). Berdasarkan (Badan Standarisasi Nasional, 2019), pengukuran diameter pohon

dihitung pada ketinggian 1,3 meter di atas permukaan tanah. Teknik pengukuran diameter pohon di lapangan dapat dilihat pada Gambar 2 dibawah.



Gambar 2. Pengukuran diameter pohon pada ketinggian 1,3 meter di atas permukaan tanah

Pengukuran diameter pohon dilakukan menggunakan pita ukur dengan melingkarkannya pada batang pohon yang masuk ke dalam plot pengamatan. Nilai diameter pohon dapat diperoleh melalui konversi data keliling lingkaran pohon menjadi diameter dengan menggunakan rumus dibawah. Kemudian selanjutnya data tersebut dikonversi kembali menjadi nilai biomassa dari suatu pohon dengan memasukkan parameter hasil pengukuran diameter pohon. Untuk tipe ekosistem hutan mangrove diameter pohon yang digunakan umumnya adalah sebesar 1,1 - 67,1 cm (Krisnawati et al., 2012).

$$DBH = \frac{CBH}{\pi}$$

di mana :

DBH = Diameter at breast height
 CBH = Circumference at Breast Height
 π = 3,14

Selain dari data diameter pohon, identifikasi spesies mangrove juga penting dilakukan. Pengidentifikasi spesies dilakukan melalui pengamatan bentuk batang, daun, akar, bunga serta buah. Identifikasi spesies diperlukan karena setiap spesies memiliki karakter pertumbuhan berbeda yang berpengaruh terhadap total biomassa. Menurut Kauffman & Danoto (2012), identifikasi spesies merupakan hal yang penting karena akan menjadi pertimbangan dalam penggunaan persamaan alometrik khusus spesies. Setiap spesies mangrove memiliki nilai kepadatan yang berbeda sehingga akan memiliki nilai biomassa dan stok karbon yang berbeda pula.

2.2.6. Analisis Data

Perhitungan biomassa aktual mangrove dilakukan dengan memasukkan nilai hasil pengukuran diameter pohon ke dalam suatu persamaan alometrik khusus.

Pada penelitian ini, jenis persamaan alometrik yang digunakan merupakan persamaan alometrik khusus *aboveground biomass* (AGB) untuk vegetasi mangrove spesifik. Kauffman & Danoto (2012), mengemukakan bahwa persamaan alometrik khusus spesies cenderung menghasilkan akurasi yang lebih tinggi daripada persamaan umum (Tabel 5). Adapun persamaan alometrik khusus sebagai berikut :

Tabel 5. Persamaan alometrik vegetasi mangrove

Spesies	Persamaan Alometrik	Sumber
<i>Avicennia alba</i>	$W = 0,2901(\text{Dbh})^{2,2605}$	(Dharmawan & Siregar, 2008)
<i>Avicennia marina</i>	$W = 0,185 (\text{Dbh})^{2,3524}$	(Krisnawati et al., 2012)
<i>Rhizophora apiculata</i>	$W = 0,235 (\text{Dbh})^{2,42}$	(Komiyama et al., 2008)
<i>Rhizophora stylosa</i>	$W = 0,9789 (\text{Dbh})^{2,6848}$	(Komiyama et al., 2005)
<i>Sonneratia alba</i>	$W = 0,251 (0,475) (\text{dbh})^{2,46}$	(Komiyama et al., 2005)

keterangan :

W = Biomassa di atas permukaan tanah (kg/ind)

Dbh = Diameter pohon (cm)

Data biomassa mangrove dalam luasan tertentu kemudian dikonversi ke nilai karbon dengan mengikuti aturan potensi biomassa mangrove dimana nilai cadangan karbon atas permukaan sebesar 47 hingga 50% dari biomassa vegetasi (Kauffman & Danoto, 2012; Intergovernmental Panel On Climate Change, 2008)

$$\text{AGC} = 0,47 \times \text{AGB}$$

keterangan :

AGC = Cadangan karbon atas permukaan (kg/m²)

AGB = Biomassa di atas permukaan (kg)

0,47 = Fraksi karbon atas permukaan

2.2.7. Uji Regresi

Hubungan antara indeks vegetasi dan cadangan karbon *insitu* dapat dianalisis menggunakan uji regresi, dimana cadangan karbon yang diukur secara langsung di lapangan berfungsi sebagai variabel dependen, sedangkan nilai indeks vegetasi dari citra satelit menjadi variabel independen. Indeks vegetasi yang digunakan meliputi NDVI dan EVI, namun yang dilakukan analisis regresi lebih lanjut pada tahun 2025 untuk kedua analisis tersebut.

Melalui analisis regresi, besaran pengaruh perubahan nilai indeks vegetasi terhadap estimasi cadangan karbon dapat diidentifikasi. Dengan demikian, model regresi dibangun untuk mengukur seberapa besar pengaruh perubahan nilai indeks vegetasi terhadap fluktuasi cadangan karbon. Hasil regresi digunakan dalam membangun model estimasi cadangan karbon.

2.2.8. Uji Akurasi

Uji akurasi dilakukan untuk mengetahui tingkat ketelitian hasil estimasi AGC dalam menggambarkan kondisi di lapangan. Widiyanto (2022) mengemukakan bahwa hal ini diperlukan sebab data dan pendekatan penginderaan jauh hampir tidak mungkin mewakili area kajian secara sempurna. Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan nilai estimasi karbon dari data lapangan dengan nilai piksel hasil estimasi karbon pada model citra yang dibangun. Akurasi dianggap baik apabila nilai piksel mendekati nilai AGC hasil lapangan. Akurasi model dievaluasi menggunakan nilai koefisien determinasi (R^2) berdasarkan 10 titik sampel acak.

2.2.9. Analisis Temporal Karbon Mangrove

Hasil dari konversi nilai biomassa tegakan pohon menjadi cadangan karbon kemudian diestimasi melalui penginderaan jauh. Pengestimasian dalam luasan area tertentu dilakukan berdasarkan nilai piksel pada indeks vegetasi yang digunakan. Tren nilai piksel pada lokasi yang sama dengan waktu perekaman yang berbeda akan mengindikasikan adanya perubahan nilai pada cadangan karbon. Perubahan temporal yang terjadi dapat diketahui melalui *pixel differencing*, yaitu metode pengamatan perubahan antara citra melalui perbedaan nilai pada setiap pikselnya (Al Rawashdeh, 2011).

2.3. Hasil dan Pembahasan

2.3.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Dusun Kuri Caddi terletak di Desa Nisombalia, Kecamatan Marusu, Kabupaten Maros. Desa Nisombalia termasuk dalam kategori desa pesisir dengan luas wilayah sebesar 2.092 km² yang secara administratif memiliki empat dusun yaitu Dusun Mambue, Tala-Tala, Kuri Lompo dan Kuri Caddi. Masyarakat Kuri Caddi sebagian besar memiliki latar belakang mata pencaharian sebagai nelayan dan petambak karena berada pada daerah pesisir. Spesies mangrove yang tumbuh di kawasan hutan mangrove Kuri Caddi diantaranya yaitu *Rhizophora apiculata*, *Rhizophora stylosa*, *Avicennia marina*, *Avicennia alba*, *Sonneratia alba* (Gambar 3).



Gambar 3. Jenis mangrove yang terdapat di kawasan mangrove Dusun Kuri Caddi yang menunjukkan (A, B, C) zonasi dari yang terdalam hingga terluar)

Pada penelitian ini, proses klasifikasi tutupan lahan untuk setiap deret tahun dilakukan menggunakan metode *Random Forest*. Kombinasi band Red, NIR dan SWIR digunakan dalam proses interpretasi citra karena efektif dalam membedakan area vegetasi dan non vegetasi.

2.3.2 Indeks Vegetasi Kawasan Mangrove Kuri Caddi

Analisis terhadap indeks vegetasi di kawasan mangrove Kuri Caddi menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan antara hasil pengukuran menggunakan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Enhanced Vegetation Index* (EVI). Perbedaan ini teridentifikasi melalui pendekatan temporal yang memanfaatkan citra satelit Sentinel-2A, yang memiliki resolusi spasial dan spektral tinggi sehingga memungkinkan pemantauan vegetasi secara lebih akurat dan berkelanjutan.

a. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Berdasarkan hasil analisis spasial NDVI terhadap ekosistem mangrove dari tahun 2016 hingga 2025, terlihat adanya perubahan signifikan dalam distribusi dan kualitas vegetasi (jarang, sedang dan padat). Pada tahun 2020, ekosistem mangrove menunjukkan kondisi paling optimal dengan dominasi kategori vegetasi padat seluas 28,93 hektar. Namun, tren ini mengalami penurunan drastis pada tahun-tahun berikutnya, di mana kategori vegetasi padat tidak lagi terdeteksi pada tahun 2023 dan 2025. Sebaliknya, terjadi peningkatan luas kategori vegetasi jarang, yang mencapai 36,14 hektar pada tahun 2023 dan 24,73 hektar pada tahun 2025, menunjukkan penurunan kepadatan vegetasi secara menyeluruh. Kategori vegetasi sedang juga mengalami fluktuasi, dengan luas tertinggi pada tahun 2018 sebesar 11,91 hektar, namun menurun tajam menjadi hanya 0,7 hektar pada tahun 2025. Total luas kawasan yang dianalisis pun menunjukkan ketidak konsistensi, dengan luas tertinggi pada tahun 2023 (41,71 hektar) dan terendah pada tahun 2025 (25,43 ha), yang dapat mencerminkan perubahan batas kawasan atau kehilangan tutupan vegetasi. Data tersebut dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 6. Analisa indeks vegetasi NDVI temporal perubahan luasan ekosistem mangrove

Tahun	Kategori NDVI (ha)			Total (ha)
	Jarang	Sedang	Padat	
2025	24.73	0.7	-	25.6
2023	36.14	5.57	-	41.85
2020	1.2	3.5	28.93	32.32
2018	2.17	11.91	25.45	39.26
2016	1.62	8.28	19.3	28.45

Secara keseluruhan, data ini mengindikasikan bahwa ekosistem mangrove mengalami degradasi kualitas vegetasi dari tahun ke tahun, yang dapat disebabkan oleh tekanan antropogenik, perubahan lingkungan, atau kurangnya upaya konservasi yang efektif. Namun dari analisis keseluruhan tersebut terdapat

pengurangan dan penambahan area ekosistem mangrove, hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil analisis temporal kelas NDVI

Hasil analisis NDVI yang menunjukkan fluktuasi temporal dari tahun 2016 hingga 2025 mengindikasikan adanya dinamika signifikan pada kondisi ekosistem mangrove. Nilai maksimum NDVI sebesar 0,90 pada tahun 2020 menggarisbawahi periode puncak produktivitas vegetasi, yang sejalan dengan temuan serupa bahwa tutupan vegetasi lebat memiliki indeks vegetasi mendekati nilai maksimum (Razali et al., 2019). Penurunan indeks hingga 0,52 pada tahun 2025 mencerminkan degradasi ekosistem mangrove yang signifikan, yang diperkuat oleh hilangnya kategori vegetasi padat seluas 28,93 hektar sejak 2020 dan tidak lagi terdeteksi pada 2023 dan 2025, mengindikasikan dampak nyata dari tekanan antropogenik seperti penebangan, aktivitas perikanan intensif, serta alih fungsi lahan pesisir (Kaskoyo et al., 2023; Suhardi et al., 2024).

Perubahan luas kategori vegetasi jarang dan sedang memperlihatkan pola degradasi bertahap. Peningkatan luas vegetasi jarang hingga 36,14 hektar pada 2023 dan 24,73 hektar pada 2025 menandakan konversi dari vegetasi padat menjadi vegetasi jarang, yang mengurangi kapasitas ekosistem untuk menyimpan karbon dan melindungi garis pantai (Rahman et al., 2024). Penurunan drastis vegetasi

sedang dari puncaknya 11,91 hektar (2018) menjadi hanya 0,7 hektar (2025) mengindikasikan hilangnya zona transisi yang biasanya menjadi indikator regenerasi alami mangrove. Kondisi ini dapat merefleksikan ketidakseimbangan antara laju degradasi dan kemampuan regenerasi mangrove.

Ketidakkonsistensi total luas kawasan yang teridentifikasi, dengan nilai tertinggi 41,71 hektar (2023) dan terendah 25,43 hektar (2025), membuka dua kemungkinan interpretasi. Pertama, perubahan batas analisis spasial yang disebabkan oleh pasang surut atau keterbatasan citra satelit. Kedua, adanya kehilangan nyata vegetasi akibat deforestasi lokal (Hamilton & Casey, 2016). Kemungkinan kedua diperkuat oleh data dari Yayasan Hutan Biru yang telah melakukan program rehabilitasi di sisi barat Kuri Caddi pada tahun 2014 dan membuahkan hasil dengan pertumbuhan mangrove yang cukup signifikan dari tahun ke tahun. Di sisi lain, pada tahun 2020 telah dibangun jalan oleh pemerintah Kabupaten Maros di pesisir hutan mangrove melalui alih fungsi lahan untuk memudahkan akses menuju Dusun Kuri Caddi (Gunawan et al., 2021).

Secara keseluruhan, degradasi yang terdeteksi melalui analisis NDVI ini mencerminkan urgensi perlunya strategi konservasi berbasis ekosistem. Intervensi seperti rehabilitasi mangrove, perlindungan kawasan inti, dan integrasi dengan praktik pesisir berkelanjutan dapat memperlambat atau membalikkan tren negatif tersebut. Selain itu, pemantauan berbasis penginderaan jauh seperti NDVI terbukti efektif untuk mendeteksi perubahan spasial-temporal yang sering kali luput dari pemantauan lapangan (Kauffman et al., 2020).

b. Enhanced Vegetation Index (EVI)

Berdasarkan hasil analisis spasial dan temporal terhadap indeks vegetasi *Enhanced Vegetation Index* (EVI) pada ekosistem mangrove dari tahun 2016 hingga 2025, ditemukan adanya dinamika perubahan luasan vegetasi yang cukup signifikan antar kategori dan tahun pengamatan. Tahun 2023 menunjukkan kondisi vegetasi terbaik dengan total luas mencapai 41,85 hektar, didominasi oleh kategori vegetasi padat seluas 20,12 hektar. Hal ini mengindikasikan bahwa pada tahun tersebut, ekosistem mangrove berada dalam kondisi yang relatif sehat dan produktif. Sebaliknya, pada tahun 2025 terjadi penurunan luas total menjadi 25,6 hektar, meskipun proporsi vegetasi padat masih cukup tinggi yaitu 11,14 hektar.

Kategori vegetasi sedang menunjukkan kestabilan relatif selama periode pengamatan, dengan luasan berkisar antara 14,96 hingga 16,39 hektar, mencerminkan bahwa sebagian besar kawasan mangrove berada dalam kondisi vegetasi menengah yang berpotensi untuk ditingkatkan melalui intervensi restorasi. Sementara itu, kategori vegetasi jarang mengalami fluktuasi, dengan luasan tertinggi pada tahun 2020 sebesar 8,99 hektar dan terendah pada tahun 2025 sebesar 2,02 hektar. Hasil analisa data tersebut dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 7. Analisa indeks vegetasi EVI temporal perubahan luasan ekosistem mangrove

Tahun	Kategori EVI (ha)			Total (ha)
	Jarang	Sedang	Padat	
2025	2.02	12.44	11.14	25.6
2023	6.26	15.47	20.12	41.85
2020	8.99	16.39	6.94	32.32
2018	8.9	14.96	15.4	39.26
2016	5.68	15.6	7.17	28.45

Secara keseluruhan, hasil analisis EVI ini menunjukkan bahwa ekosistem mangrove mengalami perubahan struktur vegetasi yang kompleks, di mana peningkatan kualitas vegetasi pada tahun-tahun tertentu diikuti oleh penurunan luasan kawasan secara keseluruhan. Temuan ini menegaskan pentingnya pemantauan berkala dan pendekatan berbasis data dalam pengelolaan ekosistem mangrove, serta perlunya integrasi antara analisis spasial dan kebijakan konservasi untuk menjaga keberlanjutan fungsi ekologis kawasan pesisir. Hasil analisa temporal perubahan kawasan mangrove dapat dilihat pada Gambar 5.



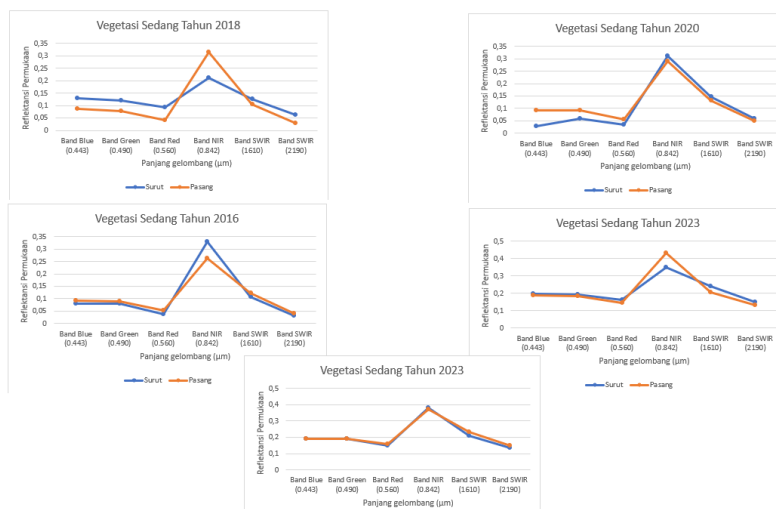
Gambar 5. Hasil analisis temporal indeks vegetasi EVI

Hasil analisis EVI menunjukkan adanya dinamika yang kompleks dalam perkembangan vegetasi mangrove. Tahun 2023 menjadi periode terbaik dengan total luas vegetasi 41,85 hektar, didominasi vegetasi padat seluas 20,12 hektar. Kondisi ini menunjukkan ekosistem berada dalam fase produktif dan relatif sehat. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian (Zhu et al., 2021) yang menekankan bahwa peningkatan nilai EVI pada ekosistem mangrove berhubungan erat dengan tingginya produktivitas primer dan kerapatan tajuk.

Namun, penurunan drastis pada tahun 2025, di mana luasan vegetasi menyusut menjadi 25,6 hektar, mengindikasikan adanya gangguan ekologis atau perubahan lingkungan yang berdampak pada struktur vegetasi. Meskipun proporsi vegetasi padat masih cukup tinggi (11,14 hektar), penurunan luas total menunjukkan bahwa kualitas vegetasi tidak selalu berbanding lurus dengan kuantitas tutupan lahan. Hal ini memperkuat pentingnya pendekatan indeks vegetasi yang mampu menangkap kompleksitas ekosistem secara menyeluruh. Selain itu EVI memiliki perbedaan luasan dan kategori dalam mendeskripsikan nilai indeks vegetasi dibandingkan dengan NDVI. Menurut Mandal et al. (2020) EVI memiliki kemampuan lebih baik dalam analisis temporal perubahan jika dibandingkan indeks vegetasi NDVI.

c. Pengaruh Pasang Surut terhadap Nilai Reflektansi Vegetasi

Ekosistem mangrove merupakan vegetasi pesisir yang secara alami dipengaruhi oleh dinamika pasang surut air laut. Variasi kondisi genangan tersebut berpengaruh langsung terhadap karakteristik reflektansi spektral vegetasi mangrove yang direkam oleh sensor penginderaan jauh. Perubahan kondisi pasang dan surut dapat memengaruhi respon spektral vegetasi melalui perubahan latar belakang substrat yang tertutup atau terbuka.



Gambar 6. Nilai reflektansi spektral mangrove vegetasi sedang (2016-2025)

Hasil perbandingan pada vegetasi mangrove kerapatan sedang, dalam kondisi pasang dan surut, menunjukkan pola spektral khas vegetasi, yaitu reflektansi rendah pada band (biru, hijau, merah) dan peningkatan signifikan pada band *Near Infrared* (NIR). Perbedaan antara kondisi pasang dan surut mencerminkan pengaruh genangan air dan dominansi tajuk terhadap respon sinyal spektral yang terekam sensor.

Secara biofisik, air memiliki koefisien absorpsi tinggi pada panjang gelombang NIR dan SWIR. Oleh karena itu, keberadaan genangan saat pasang cenderung menurunkan reflektansi pada band tersebut, terutama apabila substrat atau bagian bawah tajuk terekspos air. Namun pada vegetasi dengan kerapatan sedang, tajuk vegetasi masih cukup dominan sehingga efek genangan dapat tereduksi oleh struktur kanopi (You et al., 2023).

Pada tahun 2016, reflektansi NIR pada kondisi surut terlihat lebih tinggi dibandingkan pasang. Hal ini menunjukkan bahwa saat surut, tajuk vegetasi lebih dominan dalam memantulkan energi elektromagnetik. Pada kondisi pasang, sebagian permukaan substrat kemungkinan tergenang sehingga terjadi penurunan reflektansi akibat absorpsi oleh air. Fenomena ini sejalan dengan temuan Jia et al. (2019) yang menyatakan bahwa ketika mangrove terendam di bawah air, reflektansinya sangat berkurang dan nilai indeks vegetasi akan mendekati nol, yang berarti sulit mengamati antara pita merah dan NIR.

Pada tahun 2018, terlihat peningkatan reflektansi NIR pada kondisi pasang dibandingkan surut. Hal ini menunjukkan bahwa tajuk vegetasi cukup rapat sehingga pengaruh genangan air tidak mendominasi respon spektral. Menurut You et al. (2023) pada mangrove dengan kerapatan sedang hingga tinggi, struktur tajuk dapat mengurangi efek genangan terhadap reflektansi NIR karena air tertutup oleh kanopi vegetasi.

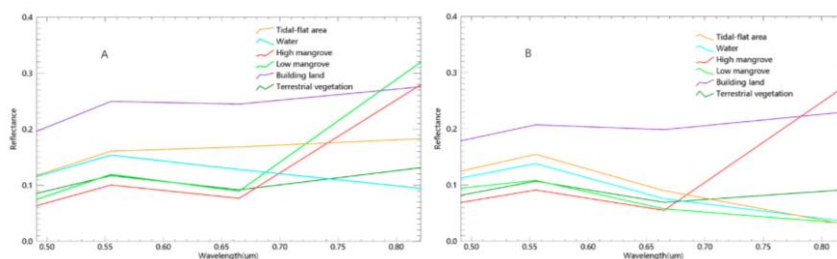
Grafik tahun 2020 menunjukkan pola reflektansi antara pasang dan surut yang relatif mirip, dengan perbedaan yang tidak terlalu signifikan. Reflektansi NIR pada kedua kondisi hampir sama, menunjukkan bahwa struktur vegetasi cukup stabil dan tidak terlalu berpengaruh oleh fluktuasi muka air. Kondisi ini mendukung penelitian Niu et al. (2022) yang menyatakan bahwa pasang surut terhadap reflektansi mangrove sangat dipengaruhi oleh kerapatan tajuk dan tingkat genangan aktual di lapangan.

Tahun 2023, menunjukkan peningkatan reflektansi yang cukup signifikan pada band NIR, khususnya pada kondisi pasang. Hal ini mengindikasikan bahwa vegetasi mengalami peningkatan kerapatan atau kondisi fisiologis yang lebih baik dibandingkan tahun sebelumnya. Reflektansi NIR yang tinggi dapat diasumsikan bahwa tajuk vegetasi cukup dominan dalam menentukan respon spektral. Menurut Huang et al. (2020) dan Niu et al. (2022) peningkatan reflektansi NIR pada mangrove sering dikaitkan dengan peningkatan Leaf Area Index (LAI) dan biomassa vegetasi.

Karena NIR berperan besar dalam perhitungan NDVI dan EVI, maka variasi reflektansi akibat pasang surut dapat mempengaruhi nilai indeks vegetasi. Pada kondisi pasang dengan genangan signifikan, nilai NDVI dapat menurun meskipun

biomassa vegetasi relatif sama. Hal ini sesuai dengan Zhou et al. (2025) yang menyatakan bahwa dinamika pasang surut dapat memperumit sinyal reflektansi sehingga mempengaruhi estimasi biomassa mangrove berbasis satelit, sehingga perlu memasukkan fitur tambahan struktural atau tekstural untuk hasil yang lebih baik.

Penjelasan diatas didukung oleh hasil penelitian You et al. (2023) yang menunjukkan nilai berbeda pada kurva reflektansi spektral dari berbagai jenis tutupan lahan tingkat pasang dan surut. Pada Gambar 7 terlihat bahwa terdapat kemiripan spektral yang nyata antara air, dataran serta hutan mangrove yang berada di posisi rentan terkena pasang surut. Perbedaan yang jelas dapat diamati pada karakteristik spektral hutan mangrove dalam rentang panjang gelombang inframerah dekat. Dibandingkan dengan pita 1-3, pita NIR menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap vegetasi dan kandungan air.



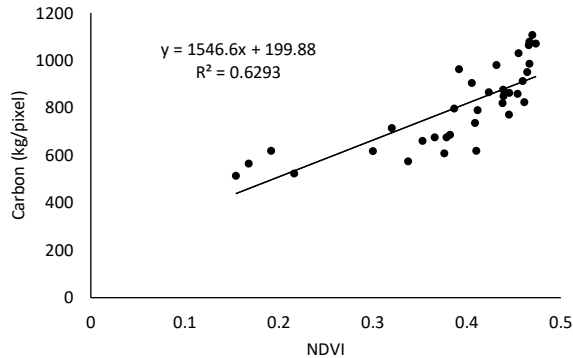
Gambar 7. Kurva reflektansi spektral dari berbagai jenis tutupan lahan pada berbagai tingkat pasang surut (a) kondisi surut (b) kondisi pasang.

Pada area mangrove yang terendam, air laut akan menyerap dan menyebarkan sebagian energi pita hijau, sehingga menghasilkan reflektansi spektral hijau yang lebih rendah pada mangrove yang terendam, sedangkan vegetasi yang tidak terendam memiliki reflektansi spektral hijau yang lebih tinggi. Karakteristik reflektansi spektral pita biru antara bakau yang terendam dan air serupa, tetapi masih ada beberapa perbedaan. Secara khusus, air memiliki reflektansi spektral yang lebih tinggi pada pita biru, sedangkan di daerah mangrove yang terendam, karena adanya air dan vegetasi yang berdampungan, reflektansi pada pita biru relatif lebih rendah.

2.3.3 Hubungan antara Indeks Vegetasi dengan Cadangan Karbon di Atas Permukaan

2.3.3.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

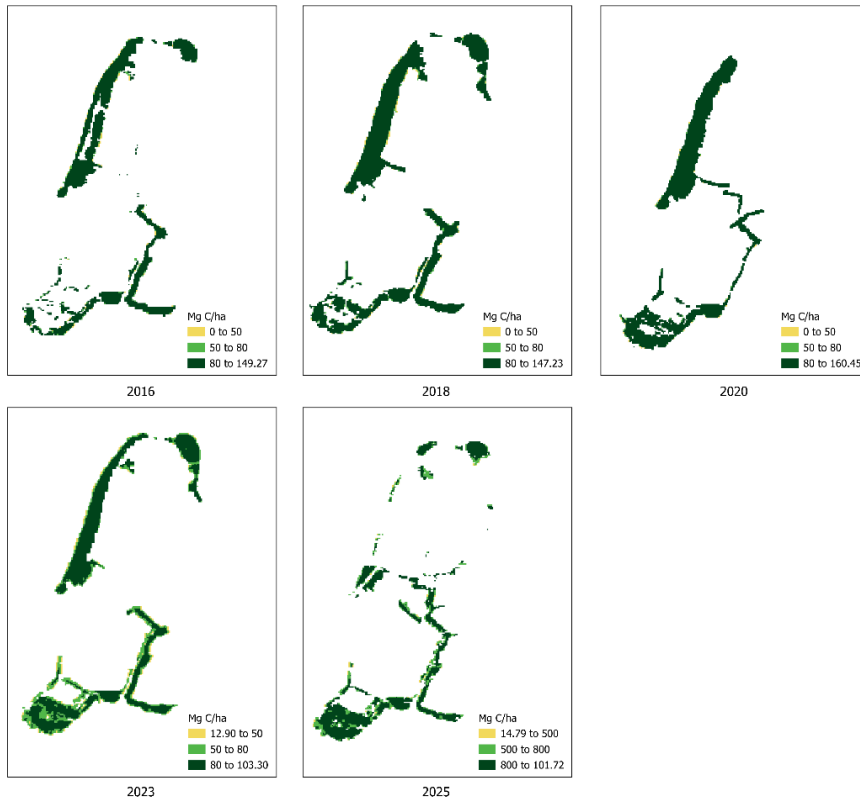
Berdasarkan hasil analisis regresi antara NDVI tahun 2025 dengan stok karbon aktual atas permukaan pada lokasi penelitian didapatkan model persamaan $Y = 1546.6x + 199.88$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yaitu sebesar 0.62 atau 62 % nilai karbon dapat dijelaskan oleh variabel NDVI, Nilai karbon total yang didapatkan dengan menggunakan NDVI ini sebesar 2530.67 ton, nilai karbon rata-rata untuk setiap piksel sebesar 98.85 ton/ha (Tabel 9). Analisis regresi tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Analisis regresi antara stok karbon atas dan NDVI tahun 2025

Hasil regresi yang menunjukkan NDVI memiliki kontribusi signifikan dalam menjelaskan variasi stok karbon. Temuan ini sejalan dengan Adni et al. (2024) yang menunjukkan bahwa indeks vegetasi satelit, terutama NDVI, mampu memprediksi biomassa karbon mangrove dengan akurasi sedang hingga tinggi. Demikian pula, Kanjin & Alam, (2024) menemukan bahwa variasi NDVI berhubungan erat dengan perbedaan densitas tegakan mangrove, yang selanjutnya mempengaruhi stok karbon di atas permukaan.

Analisis stok karbon pada setiap tahun menunjukkan perubahan persebaran dan stok karbon setiap tahun, menunjukkan tren peningkatan pada tahun 2016 hingga 2023, dan terjadi penurunan drastis pada tahun 2025. Hasil analisis menunjukkan bahwa stok karbon pada ekosistem mangrove mengalami variasi luasan yang cukup dinamis selama periode pengamatan. Pada tahun 2016, kelas stok karbon tertinggi (80–149.27 ton/ha) mendominasi dengan luas sebesar 30,9 hektar, sementara kelas menengah (50–80 ton/ha) dan rendah (0–50 ton/ha) masing-masing mencakup 1,61 dan 0,85 hektar. Tahun 2018 menunjukkan peningkatan signifikan pada kelas menengah yang mencapai 16,01 hektar, disertai penurunan pada kelas tinggi menjadi 24,23 hektar. Hasil tersebut menunjukkan mangrove memiliki kerentanan terhadap kegiatan antropogenik yang dilakukan oleh manusia sehingga dampak tersebut sangat signifikan dalam pengurangan area dan tempat penyimpanan karbon.



Gambar 9. Stok karbon atas permukaan (2016-2025) menggunakan indeks vegetasi NDVI

Pada tahun 2020, kelas tinggi kembali meningkat menjadi 33,15 hektar, menjadikannya tahun dengan luasan stok karbon tertinggi dalam kategori tersebut. Sementara itu, kelas rendah hanya mencakup 0,23 hektar, dan kelas menengah turun drastis menjadi 0,51 hektar. Tahun 2023 menunjukkan distribusi yang lebih merata, dengan kelas tinggi seluas 31,5 hektar, kelas menengah 12,08 hektar, dan kelas rendah 2,47 hektar. Pada tahun terakhir, 2025, terjadi penurunan pada semua kategori, dengan kelas tinggi seluas 22,27 hektar, kelas menengah 7,34 hektar, dan kelas rendah 0,63 hektar. Hasil analisis tersebut dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil analisis temporal stok karbon atas berdasarkan NDVI

NDVI									
2016		2018		2020		2023		2025	
Kelas (ton)	area (ha)	Kelas (ton)	area (ha)	Kelas (ton)	area (ha)	Kelas (ton)	area (ha)	Kelas (ton)	area (ha)
0 - 50	0.85	0 - 50	3.74	0 - 50	0.23	12.90 - 50	2.47	14.79 - 50	0.63
50 - 80	1.61	50 - 80	16.01	50 - 80	0.51	50 - 80	12.08	50 - 80	7.34
80 - 149.27	30.9	80 - 147.23	24.23	80 - 160.45	33.15	80 - 103.30	31.5	80 - 101.72	22.27

Hasil analisis spasial menggunakan NDVI terhadap stok karbon ekosistem mangrove menunjukkan adanya variasi yang signifikan dari tahun ke tahun. Pada

tahun 2016, total karbon tersimpan sebesar 4.092,29 ton dengan luas kawasan 28,45 hektar, menghasilkan rata-rata stok karbon sebesar 143,84 ton/ha. Tahun 2018 mengalami peningkatan total karbon menjadi 5.366,01 ton, seiring dengan perluasan area menjadi 39,26 hektar, meskipun rata-rata penyimpanan karbon sedikit menurun menjadi 136,68 ton/ha. Puncak efisiensi penyimpanan karbon terjadi pada tahun 2020, di mana total karbon mencapai 4.865,62 ton pada area seluas 32,32 hektar, menghasilkan rata-rata tertinggi sebesar 150,55 ton/ha. Namun, tren ini menurun pada tahun-tahun berikutnya. Tahun 2023 menunjukkan penurunan signifikan dalam efisiensi penyimpanan karbon, dengan rata-rata hanya 90,43 ton/ha meskipun luas kawasan mencapai 41,85 hektar. Penurunan berlanjut pada tahun 2025, dengan total karbon sebesar 2.530,67 ton dan rata-rata penyimpanan karbon sebesar 98,85 ton/ha. Secara keseluruhan, data ini mengindikasikan bahwa kapasitas penyimpanan karbon atas permukaan mangrove tidak hanya dipengaruhi oleh luas kawasan, tetapi juga oleh kualitas dan kepadatan vegetasi yang tercermin dalam nilai NDVI. Hasil tersebut dapat dilihat pada Gambar 9.

Tabel 9. Analisis temporal total stok karbon atas permukaan berdasarkan NDVI

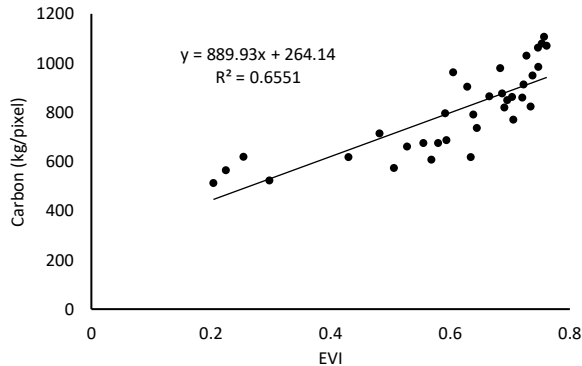
NDVI			
tahun	total karbon (ton)	area (ha)	karbon ton/ha
2016	4092.29	28.45	143.84
2018	5366.01	39.26	136.68
2020	4865.62	32.32	150.55
2023	3784.54	41.85	90.43
2025	2530.67	25.6	98.85

Meskipun luas area mangrove meningkat pada tahun 2023, namun rata-rata stok karbon menurun drastis 90.43 ton/ha. Berdasarkan hasil tersebut tidak sebanding dengan kapasitas penyimpanan karbon. Fenomena ini, juga ditemukan oleh Alongi, (2020) yang menunjukkan bahwa kualitas tegakan, kerapatan, dan produktivitas primer lebih menentukan kemampuan penyimpanan karbon dibandingkan hanya luas kawasan. Yang et al. (2017) menekankan pentingnya mempertimbangkan kualitas vegetasi ketika melakukan estimasi cadangan karbon berbasis NDVI. Penurunan drastis pada tahun 2025 (stok karbon rata-rata 98.85 ton/ha) dapat dijelaskan melalui dua faktor : degradasi vegetasi (NDVI menurun) dan perubahan struktural tegakan. Penurunan kesehatan vegetasi ditunjukkan dengan NDVI rendah yang menyebabkan penurunan stok karbon meskipun area mangrove relatif tetap, temuan ini memperkuat argumen bahwa NDVI dapat menjadi indikator dini penurunan stok karbon mangrove (Putri et al., 2025). Secara keseluruhan, fluktuasi luasan stok karbon pada masing-masing kelas mencerminkan dinamika vegetasi mangrove yang dipengaruhi oleh berbagai faktor ekologis dan spasial sepanjang periode analisis.

2.3.3.2 Enhanced Vegetation Index (EVI)

Hasil analisis regresi EVI tahun dengan stok karbon atas permukaan pada lokasi penelitian yaitu didapatkan model persamaan $y = 889.93x + 264.14$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yaitu sebesar 0.65 atau 65 % stok karbon atas permukaan dapat dijelaskan oleh variabel EVI. Nilai karbon total yang didapatkan dengan menggunakan EVI ini sebesar 2530.67 ton dengan luas 25.6 hektar,

sehingga menghasilkan rata-rata stok karbon 98.85 ton/ha (Tabel 10). Analisis regresi dapat dilihat tersebut dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Analisis regresi antara stok karbon atas dan EVI tahun 2025

Menurut Purnamasari et al. (2021) bahwa EVI lebih sensitif dalam menangkap dinamika kanopi mangrove yang kompleks. Selain itu pada penelitian yang dilakukan oleh Legesse et al. (2024) menunjukkan bahwa EVI memberikan estimasi stok karbon yang lebih luas dan akurat dibandingkan ARVI, dengan cadangan karbon tertinggi tercatat pada nilai EVI tertinggi, hal tersebut mendukung temuan bahwa EVI lebih sensitif terhadap variasi struktur kanopi dan biomassa dibandingkan NDVI, terutama pada vegetasi jarang dan padat.

Data stok karbon atas permukaan menggunakan data indeks vegetasi EVI, menunjukkan hasil bahwa stok karbon pada ekosistem mangrove mengalami variasi luasan yang dinamis sepanjang periode pengamatan. Pada tahun 2016, kelas stok karbon tertinggi (80–149.27 ton/ha) mendominasi dengan luas sebesar 30,9 hektar, sementara kelas menengah (50–80 ton/ha) dan rendah (0–50 ton/ha) masing-masing mencakup 1,61 dan 0,85 hektar. Tahun 2018 menunjukkan peningkatan signifikan pada kelas menengah yang mencapai 16,01 hektar, disertai penurunan pada kelas tinggi menjadi 24,23 hektar. Pada tahun 2020, kelas tinggi kembali meningkat menjadi 33,15 hektar, menjadikannya tahun dengan luasan stok karbon tertinggi dalam kategori tersebut, sementara kelas menengah dan rendah masing-masing turun menjadi 0,51 dan 0,23 hektar. Tahun 2023 menunjukkan distribusi yang lebih merata, dengan kelas tinggi seluas 31,5 hektar, kelas menengah 12,08 hektar, dan kelas rendah 2,47 hektar. Pada tahun terakhir, 2025, terjadi penurunan pada semua kategori, dengan kelas tinggi seluas 22,27 hektar, kelas menengah 7,34 hektar, dan kelas rendah 0,63 hektar. Secara keseluruhan, fluktuasi luasan stok karbon pada masing-masing kelas mencerminkan dinamika vegetasi mangrove yang dipengaruhi oleh perubahan struktur kanopi dan kondisi ekologis sepanjang periode analisis. Hasil analisa tersebut dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil analisis temporal stok karbon atas berdasarkan EVI

EVI									
2016		2018		2020		2023		2025	
kelas	area (ha)	kelas	area (ha)	kelas	area (ha)	kelas	area (ha)	kelas	area (ha)
16.58 - 50	2.81	17.70 - 50	3.74	8.46 - 50	0.42	21.38 - 50	2.57	17.80 - 50	0.73
50 - 80	13.74	50 - 80	16.01	50 - 80	2.18	50 - 80	12.97	50 - 80	8.32
80 - 109.41	16.3	80 - 106.11	24.23	80 - 107.23	31.37	80 - 107.96	30.66	80 - 106.11	21.29

Data menunjukkan fluktuasi stok karbon dari 2016 hingga 2025 dengan puncak efisiensi penyimpanan pada tahun 2020 (102,33 ton/ha). Tren ini mirip dengan hasil NDVI, tetapi EVI mampu menggambarkan variasi efisiensi per hektar secara lebih tajam. Menurut Situmorang et al. (2016), EVI efektif mendeteksi perubahan biomassa pada hutan pesisir, terutama ketika terjadi fluktuasi fenologi atau degradasi vegetasi. Analisis perubahan kawasan mangrove secara temporal dapat dilihat pada Gambar 11 yang menyajikan hasil identifikasi spasial dari tahun 2016 hingga 2025. Visualisasi tersebut memberikan gambaran mengenai dinamika perubahan luasan dan kondisi vegetasi mangrove selama periode pengamatan.

**Gambar 11.** Stok karbon atas permukaan (2016-2025) menggunakan indeks vegetasi EVI

Hasil analisis spasial menunjukkan bahwa penyimpanan karbon atas permukaan ekosistem mangrove mengalami fluktuasi dari tahun ke tahun, baik dalam total karbon tersimpan maupun dalam efisiensi penyimpanan per hektar. Pada tahun 2016, total karbon yang tersimpan sebesar 2.508,64 ton pada area seluas 28,45 hektar, menghasilkan rata-rata penyimpanan karbon sebesar 88,18 ton/ha. Tahun 2018 mengalami peningkatan total karbon menjadi 3.421,78 ton dengan

perluasan area menjadi 39,26 hektar, meskipun rata-rata karbon per hektar sedikit menurun menjadi 87,16 ton/ha.

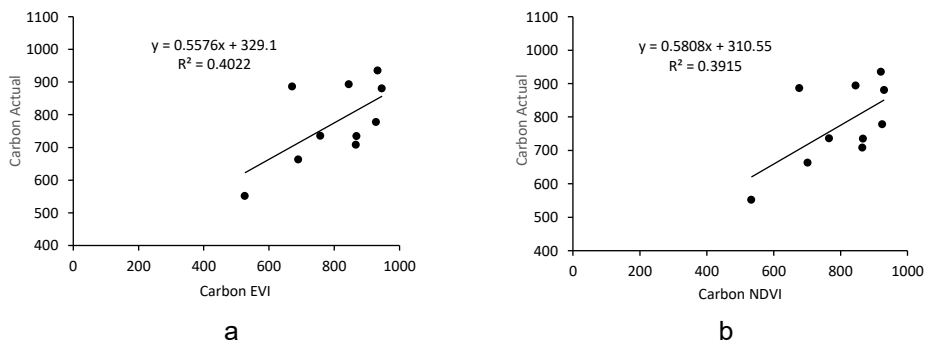
Tabel 11. Analisis temporal total stok karbon atas permukaan berdasarkan EVI

EVI			
tahun	total carbon (ton)	area (ha)	carbon (ton/ha)
2016	2508.64	28.45	88.18
2018	3421.78	39.26	87.16
2020	3307.36	32.32	102.33
2023	3813.37	41.85	91.12
2025	2522.80	25.6	98.55

Peningkatan efisiensi penyimpanan karbon terjadi pada tahun 2020, di mana total karbon sebesar 3.307,36 ton tersimpan dalam area seluas 32,32 hektar, menghasilkan rata-rata tertinggi selama periode pengamatan yaitu 102,33 ton/ha. Tahun 2023 menunjukkan peningkatan total karbon menjadi 3.813,37 ton, namun dengan luas kawasan yang lebih besar (41,85 hektar), rata-rata penyimpanan karbon menurun menjadi 91,12 ton/ha. Pada tahun 2025, total karbon kembali menurun menjadi 2.522,80 ton dengan luas kawasan 25,6 hektar, menghasilkan rata-rata penyimpanan karbon sebesar 98,55 ton/ha. Hasil analisa tersebut dapat dilihat pada Tabel 11.

2.3.4 Implikasi dan Perbedaan Stok Estimasi Karbon menggunakan NDVI dan EVI pada Ekosistem Mangrove

Uji akurasi dilakukan untuk menilai kemampuan model regresi dalam memprediksi stok karbon atas permukaan berdasarkan indeks vegetasi NDVI dan EVI. Data yang digunakan dalam pengujian ini merupakan data validasi yang tidak dimasukkan dalam proses pembentukan model, sehingga hasilnya mencerminkan performa aktual dari masing-masing indeks dalam estimasi stok karbon. Hasil analisis menunjukkan bahwa model regresi NDVI terhadap stok karbon aktual menghasilkan persamaan $y = 0.5808x + 310.55$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.39. Sementara itu, model regresi EVI menghasilkan persamaan $y = 0.5576x + 329.10$ dengan nilai R^2 sebesar 0.40. hasil tersebut dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. (a) Analisis uji akurasi EVI stok karbon, (b) Analisis uji akurasi NDVI stok karbon

Meskipun perbedaan nilai R^2 antara kedua model tergolong kecil dan tidak signifikan secara statistik, secara numerik EVI menunjukkan performa yang sedikit lebih tinggi dibandingkan NDVI dalam menjelaskan variasi stok karbon pada data uji. Nilai R^2 yang relatif rendah pada kedua model mengindikasikan bahwa indeks vegetasi belum sepenuhnya mampu menangkap kompleksitas ekosistem mangrove secara akurat, meskipun memiliki korelasi terhadap stok karbon. Faktor-faktor lain seperti heterogenitas struktur vegetasi, spesies mangrove, jumlah sampel, kondisi tanah, serta kualitas dan resolusi citra satelit turut memengaruhi akurasi estimasi. Temuan ini sejalan dengan studi sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Hidayatullah et al. (2023) dan Purnamasari et al. (2021) yang menunjukkan bahwa EVI memiliki sensitivitas lebih tinggi terhadap variasi biomassa dan struktur kanopi dibandingkan NDVI, terutama pada vegetasi yang padat seperti mangrove. Dengan demikian, meskipun perbedaan akurasi tidak signifikan, EVI dapat dipertimbangkan sebagai indeks yang lebih stabil dan representatif dalam estimasi stok karbon mangrove secara spasial dan temporal. Namun untuk kedua metode tersebut perlu dilakukan analisis lebih lanjut dengan menggunakan metode uji akurasi lainnya dalam menilai efektivitas kedua indeks vegetasi tersebut dalam mengidentifikasi stok karbon atas permukaan kawasan mangrove.

Perbandingan estimasi stok karbon menggunakan indeks vegetasi NDVI dan EVI menunjukkan perbedaan yang bermakna dalam hal sensitivitas dan kemampuan masing-masing indeks dalam menangkap dinamika vegetasi mangrove. Model regresi EVI menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.65, sedikit lebih tinggi dibandingkan NDVI yang memiliki R^2 sebesar 0.62. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa EVI memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menjelaskan variasi stok karbon atas permukaan, terutama karena EVI dirancang untuk mengurangi saturasi pada vegetasi lebat dan lebih sensitif terhadap perubahan struktur kanopi. Meskipun nilai total karbon pada tahun 2025 yang dihasilkan oleh kedua indeks sama, yaitu 2.530,67 ton dengan rata-rata 98,85 ton/ha, distribusi spasial dan efisiensi penyimpanan karbon menunjukkan pola yang berbeda sepanjang periode pengamatan.

Data temporal menunjukkan bahwa NDVI mencatat efisiensi penyimpanan karbon tertinggi pada tahun 2020 sebesar 150,55 ton/ha, sedangkan EVI mencatat efisiensi tertinggi pada tahun yang sama sebesar 102,33 ton/ha. Namun, NDVI mengalami penurunan tajam pada tahun 2023 menjadi 90,43 ton/ha, sementara EVI menunjukkan penurunan yang lebih moderat. Hal ini mengindikasikan bahwa NDVI lebih rentan terhadap fluktuasi nilai akibat perubahan vegetasi, sedangkan EVI memberikan estimasi yang lebih stabil. Selain itu, tren luasan kelas stok karbon menunjukkan bahwa EVI mampu menangkap distribusi yang lebih merata dan dinamis, terutama pada tahun-tahun dengan tekanan antropogenik tinggi. Penurunan kelas tinggi dan peningkatan kelas rendah pada tahun 2025, yang terdeteksi oleh kedua indeks, memperkuat indikasi bahwa ekosistem mangrove mengalami degradasi struktural yang signifikan.

Implikasi dari perbedaan ini sangat penting dalam konteks pemantauan dan pengelolaan ekosistem mangrove. Penggunaan EVI dapat memberikan informasi

yang lebih akurat dalam mendeteksi degradasi vegetasi dan perubahan stok karbon, terutama pada fase rehabilitasi atau tekanan antropogenik. Studi oleh Pratama et al. (2025) di Pulau Enggano menunjukkan bahwa EVI lebih unggul dibandingkan NDVI dan SAVI dalam pemetaan kerapatan mangrove menggunakan Google Earth Engine, terutama dalam menangkap distribusi vegetasi yang padat dan heterogen. Penelitian oleh Husna et al. (2019) di Tongke-Tongke, Sulawesi Selatan juga menegaskan bahwa penginderaan jauh berbasis EVI memberikan estimasi cadangan karbon yang lebih representatif dibandingkan NDVI, terutama pada tegakan mangrove dengan struktur kanopi kompleks. Sementara itu, Albasit et al. (2022) dalam studi pasca-rehabilitasi di Brebes menunjukkan bahwa NDVI memiliki keterbatasan dalam mendeteksi perubahan biomassa pada vegetasi muda dan heterogen. Menurut Purnamasari et al. (2021) bahwa EVI lebih sensitif dalam menangkap dinamika kanopi mangrove yang kompleks. Selain itu pada penelitian yang dilakukan oleh Legesse et al. (2024) menunjukkan bahwa EVI memberikan estimasi stok karbon yang lebih luas dan akurat dibandingkan ARVI, dengan cadangan karbon tertinggi tercatat pada nilai EVI tertinggi, hal tersebut mendukung temuan bahwa EVI lebih sensitif terhadap variasi struktur kanopi dan biomassa dibandingkan NDVI, terutama pada vegetasi jarang dan padat.

2.4. Kesimpulan

Kesimpulan estimasi stok karbon atas permukaan menggunakan indeks vegetasi NDVI dan EVI sebagai berikut :

1. Hasil analisis regresi menunjukkan adanya perbedaan nilai koefisien determinasi antara NDVI dan EVI terhadap karbon aktual lapangan. Koefisien determinasi NDVI tercatat sebesar 0,62, sedangkan EVI sedikit lebih tinggi yaitu 0,65. Sementara itu, hasil uji akurasi memperlihatkan perbedaan nilai yang tidak signifikan, dengan akurasi NDVI sebesar 0,40 dan EVI sebesar 0,39. Dengan demikian, meskipun EVI menunjukkan koefisien determinasi yang sedikit lebih tinggi dibandingkan NDVI, hasil uji akurasi keduanya relatif sama dan tidak berbeda secara signifikan.
2. Kedua indeks vegetasi menunjukkan perbedaan interpretasi spasial dalam hal persebaran dan estimasi stok karbon. NDVI cenderung menghasilkan estimasi stok karbon yang lebih tinggi dibandingkan EVI pada periode 2016 hingga 2020. Namun, pada tahun 2023 dan 2024, estimasi keduanya relatif serupa. Temuan ini menarik karena mengindikasikan adanya dinamika temporal dalam hubungan indeks vegetasi dengan stok karbon. Oleh karena itu, diperlukan kajian lanjutan untuk memahami faktor-faktor yang memengaruhi perbedaan hasil estimasi antara NDVI dan EVI, baik dari segi kondisi biofisik maupun metodologi analisis yang digunakan.