

Estimasi Stok Biomassa Karbon Mangrove Menggunakan Citra Satelit Sentinel-2A di Teluk Maumere Bagian Barat

Angelinus Vincentius*, Guido Roberto Jerun Parera, Marianus Raymond Roky Woda

Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Teknologi Pangan Pertanian dan Perikanan, Universitas Nusa Nipa, Jln. Kesehatan No. 3 Maumere, Kabupaten Sikka, Nusa Tenggara Timur 86111, Indonesia

*e-mail korespondensi: angelinusvincentiustonda@gmail.com

INFORMASI ARTIKEL

Diterima : 11 November 2024
Disetujui : 20 November 2024
Terbit Online : 26 November 2024

Kata Kunci:

Karbon,
Mangrove,
Satelit,
Teluk Maumere.

ABSTRAK

Ekosistem mangrove di wilayah pesisir memiliki kemampuan menyimpan karbon dalam jumlah besar pada biomassa tegakan. Teluk Maumere bagian barat di Kabupaten Sikka Provinsi NTT memiliki 2 lokasi sentra mangrove yaitu Magepanda dan Kampung Garam. Ekosistem mangrove perlu dijaga dan dipertahankan karena bernilai ekonomis dan ekologis. Namun cadangan karbon yang saat ini tersimpan pada mangrove tersebut belum diketahui jumlahnya karena tidak adanya data inventarisasi mengenai hal tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi cadangan karbon di atas permukaan pada hutan mangrove di Teluk Maumere bagian barat dengan menggunakan citra Sentinel-2A. Penelitian dimulai bulan Juni 2024 sampai September 2024. Nilai cadangan karbon diperoleh dari persamaan regresi berdasarkan data indeks vegetasi NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) dan cadangan karbon aktual berdasarkan persamaan alometrik (*above ground biomass*). Penentuan titik sampel menggunakan teknik *stratified sampling*. Jumlah titik sampel sebanyak 16 titik, berupa plot berukuran 10x10 m². Analisis data pada penelitian ini menggunakan analisis regresi linear, polinomial, eksponensial, dan uji akurasi. Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa persamaan regresi polinomial menghasilkan nilai koefisien determinasi (R²) yang paling tinggi yaitu sebesar 0,8574 sehingga dipilih sebagai model penduga atau estimasi stok karbon permukaan. Persamaan regresi polinomial $y = -255,61x^2 + 494,84x - 154,45$ dimana y adalah karbon dan x adalah nilai NDVI. Indeks vegetasi NDVI mempunyai korelasi yang erat dengan cadangan karbon sebesar 85,74% (R² = 0,8574). Luas hamparan mangrove sebesar 100,82 ha. Total cadangan karbon di atas permukaan pada tegakan mangrove di Teluk Maumere bagian barat mencapai 5.860,59 ton C dengan nilai rata-rata sebesar 58,13 ton C/ha.

PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan fenomena alam yang berkaitan dengan pemanasan global dan gas rumah kaca, terutama karena jumlah karbon dioksida (CO₂) yang terus meningkat di udara. Hal tersebut menjadi pemicu meningkatnya kebutuhan informasi tentang karbon pada saat ini. Peningkatan jumlah karbon dioksida (CO₂) di atmosfer sebagai akibat dari aktivitas manusia, baik itu secara langsung maupun tidak langsung ([Marzuki et al., 2023](#)).

Pengurangan pemanasan global dan efek rumah kaca terjadi melalui pengurangan gas rumah kaca di atmosfer seperti CO₂, melalui penyerapan CO₂ oleh tumbuhan pada proses fotosintesis, dilanjutkan dengan proses sekuestrasi karbon (penyimpanan C) dalam organ tumbuhan ([Hasibuan et al., 2020](#)). Hutan mangrove berperan sangat

penting dalam menyerap dan menyimpan karbon, sehingga bisa menjadi solusi dalam mengatasi pemanasan global. Kemampuan mangrove dalam menyimpan karbon lebih besar dari semua hutan daratan pada umumnya. Hutan mangrove tiap satu hektarnya dapat menyimpan sampai lima kali lipat lebih banyak karbon dibandingkan hutan hujan tropis di seluruh dunia ([Nellemann et al., 2009](#); [Fitrah, 2019](#)). Mangrove berperan menjadi pengikat karbon akibat dari proses fotosintesis yang berlangsung dan menyimpannya dalam biomassa tegakan pohon ([Waru et al., 2022](#)).

Pengelolaan ekosistem mangrove secara terintegrasi lintas sektoral dan berkelanjutan memerlukan dukungan inventaris data peran penting mangrove secara ekologis, ekonomi, maupun dalam mitigasi pemanasan global dan pengurangan efek rumah kaca. Salah satu data yang

penting yaitu cadangan biomassa karbon pada mangrove.

Teluk Maumere terletak di pesisir utara Kabupaten Sikka, Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT) yang membentang dari barat di Magepanda, Kampung Garam, hingga bagian timur serta pulau-pulau kecil, dengan area yang ditumbuhi hutan mangrove seluas 564,32 Ha (Vincentius et al., 2018). Keberadaan mangrove di Teluk Maumere perlu dijaga dan dipertahankan karena memiliki potensi sebagai penyimpan karbon yang baik, serta bernilai ekologis dan ekonomis. Namun cadangan karbon yang saat ini tersimpan pada mangrove tersebut belum diketahui jumlahnya karena tidak adanya data inventaris mengenai hal tersebut. Pengelolaan ekosistem mangrove dapat mendukung penguatan ekonomi hijau (*green economy*) guna meningkatkan kesejahteraan masyarakat dan mengurangi risiko kerusakan lingkungan.

Informasi besarnya cadangan karbon pada mangrove di suatu wilayah bisa didapatkan berdasarkan konversi dari nilai biomassa. Informasi ini dapat diperoleh melalui pengukuran biomassa lapangan (metode terestris) yang mampu memberikan hasil dengan akurasi tinggi, namun di sisi lain membutuhkan banyak tenaga, waktu serta biaya yang tinggi untuk skala analisis yang luas. Teknologi penginderaan jauh dapat mengatasi keterbatasan tersebut, mengingat kemajuan teknologi penginderaan jauh yang berkembang pesat Citra Satelit Sentinel-2A dilengkapi dengan sensor multispectral instrument dengan 13 *band*

sehingga dapat memberikan informasi mengenai vegetasi secara lengkap (Waru et al., 2022).

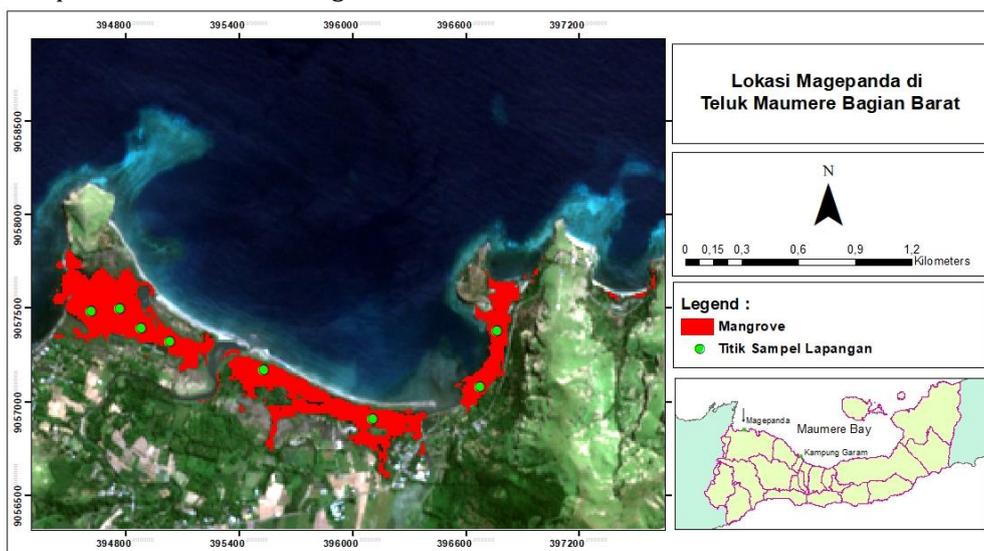
Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh data cadangan biomassa karbon berupa banyaknya Ton C per hektar hutan mangrove di Teluk Maumere bagian barat, khususnya pada dua lokasi sentra mangrove yaitu Magepanda dan Kampung Garam. Inventaris data cadangan biomassa karbon diperlukan untuk pengelolaan ekosistem mangrove lebih lanjut maupun kebijakan pembangunan lainnya.

BAHAN DAN METODE

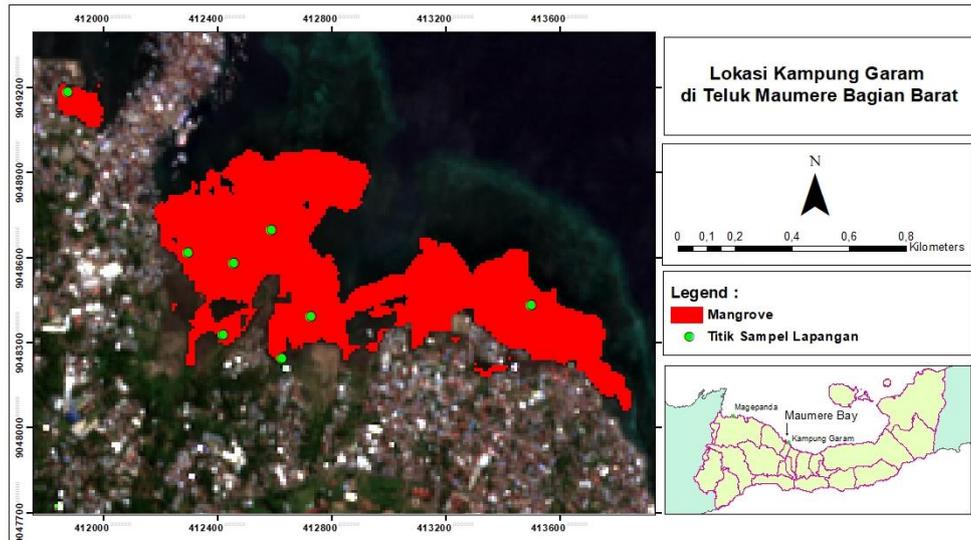
Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Teluk Maumere bagian barat, Kabupaten Sikka, Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT), pada dua lokasi sentra mangrove yaitu Magepanda dan Kampung Garam. Penelitian dimulai bulan Juni 2024 sampai September 2024 yang meliputi studi literatur, pengolahan citra satelit, pengambilan data lapangan, pengolahan data hasil penelitian, dan penyusunan hasil penelitian.

Titik sampel ditentukan sebelum melakukan kerja lapangan, yang didasarkan pada kelas-kelas satuan lahan yang diperoleh. Penentuan titik sampel menggunakan teknik stratified sampling, dimana sampel diambil dari setiap pembagian yang diperoleh dari pendekatan indeks vegetasi NDVI. Jumlah titik sampel sebanyak 16 titik, dimana setiap titik sampel berupa plot berukuran 10x10 m², letak plot dapat dilihat pada Gambar 1.



a. Magepanda



b. Kampung Garam

Gambar 1. Lokasi penelitian (a dan b) di Teluk Maumere bagian barat, Kabupaten Sikka, NTT (16 plot)

Metode penelitian

Alat dan bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: pita ukur, patok dan tali, kamera *fisheye*, *global positioning system* (GPS), alat transportasi perahu. Perangkat lunak yang digunakan dalam pengolahan data terdiri dari software ENVI 5.2, ArcGIS 10.8, ImageJ dan Microsoft Excel.

Pengolahan citra

Citra Sentinel-2A diolah menggunakan *software* ENVI 5.2, kemudian hasilnya ditampilkan menggunakan *software* ArcGIS 10.8. Citra Sentinel-2A terlebih dahulu dilakukan koreksi radiometrik dan koreksi geometrik. Selanjutnya dilakukan komposit *band*, pemotongan citra dan interpretasi citra baik secara visual maupun secara digital. Proses identifikasi sebaran mangrove pada Citra Sentinel-2A menggunakan metode klasifikasi terbimbing dengan memanfaatkan algoritma *Maximum Likelihood Classification*. Citra Sentinel-2A yang telah diklasifikasi, selanjutnya ditransformasikan menggunakan algoritma NDVI [Huete et al.1999].

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

Keterangan:

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*

NIR = Nilai reflektansi spektral pada *band* infra merah dekat

R = Nilai reflektansi spektral pada *band* merah (*Red*).

Hasil reklasifikasi nantinya akan dilakukan proses *masking* yang membatasi hanya wilayah vegetasi mangrovenya saja. Sehingga perhitungan stok karbon dibatasi pada wilayah vegetasi mangrove saja.

Stok karbon

Pengumpulan data lapangan berupa lingkaran batang pohon setinggi dada pada ketinggian ± 130 cm untuk dihitung diameter, pengamatan jenis-jenis mangrove dan menghitung jumlah pohon di setiap jenis mangrove yang ditemukan. Plot yang digunakan berukuran 10 m x 10 m (luas 100 m²) yang menjadi perwakilan setiap 1 *pixel* pada Citra Sentinel-2A, sebanyak 16 titik sedangkan jumlah plot yang digunakan untuk uji akurasi sebanyak 10 titik plot.

Perhitungan biomassa dilakukan setelah memperoleh hasil reklasifikasi citra. Penentuan biomassa mangrove menggunakan data diameter pohon, kemudian dimasukkan ke dalam persamaan alometrik untuk masing-masing jenis sehingga diperoleh biomassa plot. Data analisis vegetasi kemudian dikuantifikasi menggunakan persamaan alometrik dengan pendekatan jenis (Tabel 1). Pada beberapa persamaan alometrik yang digunakan memerlukan nilai berat jenis (ρ) mangrove seperti tersaji pada Tabel 2.

Tabel 1. Persamaan alometrik beberapa jenis mangrove

No.	Jenis Mangrove	Persamaan Alometrik
1	<i>Avicennia alba</i>	$B = 0,079211 (D)^{2,470895}$ (Tue et al. 2014)
2	<i>Avicennia marina</i>	$B = 0,1848 (D)^{2,3624}$ (Dharmawan & Siregar 2008)
3	<i>Rhizophora apiculata</i>	$B = 0,043 (D)^{2,63}$ (Amira 2008)
4	<i>Rhizophora mucronata</i>	$B = 0,1466 (D)^{2,3136}$ (Dharmawan 2010)
5	<i>Sonneratia alba</i>	$B = 0,3841(D)^{2,101} \rho$ (Kauffman & Cole 2010)
6	<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	$B = 0.0754 (D)^{2,505}$ (Kauffman & Donato 2012)
7	<i>Ceriops tagal</i>	$B = 0,251 \rho (D)^{2,46}$ (Komiya et al., 2005)
8	<i>Bruguiera parviflora</i>	$B = 0.7749 (D)^{2,4167}$ (Clough & K. Scott, 1989)

Sumber : [Marzuki et al. \(2023\)](#); [Mayuftia et al. \(2013\)](#).

Keterangan:

B = Biomassa (kg/m²)

ρ = berat jenis tumbuhan (g/cm³)

D = diameter setinggi dada (cm)

Tabel 2. Beberapa berat jenis kayu mangrove

No.	Jenis Mangrove	Berat Jenis Kayu (gr / cm ³)
1	<i>Avicennia officinalis</i>	0,670
2	<i>Avicennia marina</i>	0,661
3	<i>Rhizophora apiculata</i>	1,050
4	<i>Rhizophora mucronata</i>	0,867
5	<i>Sonneratia alba</i>	0,780
6	<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	0.741
7	<i>Ceriops tagal</i>	0,803
8	<i>Bruguiera parviflora</i>	0.825

Sumber : [Simpson \(1996\)](#).

Nilai cadangan karbon mangrove didapatkan dari nilai biomassa aktual mangrove kemudian dimasukkan dalam persamaan alometrik mangrove khusus *above-ground biomass* untuk vegetasi mangrove spesifik. Menurut [Rahmattin & Hidayah \(2020\)](#); [Mutmainna et al. \(2024\)](#), bahwa 50% dari biomassa vegetasi mengandung karbon.

$$C = 0,5 \times B$$

Keterangan:

C = Kandungan karbon (kg/m²)

B = Biomassa (kg).

Stok karbon dikonversi ke dalam satuan ton sesuai dengan [Badan Standardisasi Nasional \(2011\)](#). Perhitungan stok karbon dengan satuan ton per-hektar untuk biomassa tumbuhan menggunakan rumus:

$$C_n = (C_x / 1000) \times (10.000 / L_{plot})$$

Keterangan:

C_n = Stok karbon per hektar (ton/ha)

C_x = Stok karbon pada setiap plot (kg)

L_{plot} = Luas plot (m²).

Persentase tutupan kanopi

Penentuan persentase tutupan kanopi menggunakan metode *hemispherical photography*. Pengambilan foto tutupan kanopinya menggunakan kamera *fisheye*, kamera diposisikan setinggi dada dan menghadapkan kamera ke arah langit pada setiap plot sampel mangrove berukuran 10 m x 10 m² yang telah terbagi menjadi 4-9 subplot sehingga dapat mempresentasikan kondisi vegetasi mangrove pada lokasi. Analisis persentase tutupan kanopi mangrove menggunakan *software ImageJ* dan Microsoft Excel ([Dharmawan & Pramudji, 2017](#)).

Konsep dari persentase tutupan kanopi adalah pemisahan dari warna *pixel* langit (warna putih) dan warna *pixel* vegetasi mangrove (warna hitam). Analisis tutupan kanopi dengan menghitung persentase jumlah *pixel* tutupan vegetasi mangrove yang dapat dihitung dalam analisis gambar *binner* ([Chianucci & Cutini, 2012](#); [Kassagi et al., 2024](#)):

$$\% \text{ Tutupan (cover) mangrove} = (P255 / \Sigma P) \times 100\%$$

Keterangan:

P255 = Jumlah *pixel* yang bernilai 255 sebagai interpretasi tutupan kanopi mangrove

ΣP = Jumlah seluruh *pixel*.

Analisis regresi

Analisis korelasi dilakukan sebelum menggunakan persamaan regresi. Analisis korelasi digunakan untuk mengukur keeratan hubungan antar variabel. Analisis korelasi menggunakan metode Pearson. Analisis regresi digunakan untuk mengukur seberapa besar variabel bebas mampu menjelaskan variabel terikat, dimana pada penelitian ini terdapat tiga perlakuan untuk analisis regresi linear sederhana yang dilakukan yaitu hubungan antara stok karbon dengan nilai indeks vegetasi NDVI; hubungan antara stok karbon dengan persentase tutupan kanopi; dan hubungan antara persentase tutupan kanopi dengan nilai indeks vegetasi NDVI.

Model untuk mengestimasi stok karbon menggunakan persamaan regresi. Persamaan regresi yang digunakan sebagai dasar model estimasi stok karbon permukaan yaitu persamaan regresi linier, regresi polinomial, dan regresi eksponensial. Dalam hal ini, hasil dari regresi linear sederhana digunakan sebagai dasar membangun model estimasi stok karbon dengan menggunakan persamaan regresi polinomial dan regresi eksponensial. Dari kedua jenis regresi tersebut, persamaan regresi yang menghasilkan nilai koefisien determinasi yang paling tinggi dijadikan sebagai model penduga atau estimasi stok karbon.

Uji akurasi

Uji akurasi dilakukan pada pengolahan citra yang telah dilakukan sebelumnya dengan kondisi di lapangan. Uji akurasi dilakukan dengan menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE). Sebanyak 10 titik plot uji akurasi yang digunakan berbeda dengan 16 titik plot untuk membangun model estimasi stok karbon. Uji akurasi metode RMSE digunakan untuk mengetahui seberapa besar kesalahan yang terjadi pada hasil perhitungan model jika dibandingkan dengan nilai aktual, semakin kecil nilai RMSE, maka semakin kecil pula kesalahan yang terjadi pada penggunaan model [Xu et al., 2024]. Nilai RMSE dihitung dengan rumus:

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

Keterangan :

RMSE = nilai *Root Mean Square Error*

y_i = nilai pengukuran

y_i' = nilai dugaan

n = jumlah sampel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan citra Sentinel-2A

Citra Sentinel-2A diakuisisi perekaman pada tanggal 19 Juni 2024 untuk area Magepanda dan Kampung Garam. Pemilihan citra dengan kualitas gambar yang baik dan jelas, pada saat cuaca cerah tanpa awan tebal dan mendung, kondisi atmosfer stabil, sehingga mengurangi distorsi yang disebabkan oleh polusi atau kelembapan yang tinggi. Waktu pengambilan citra di pagi hari memberikan hasil yang lebih baik karena sudut cahaya yang lebih baik.

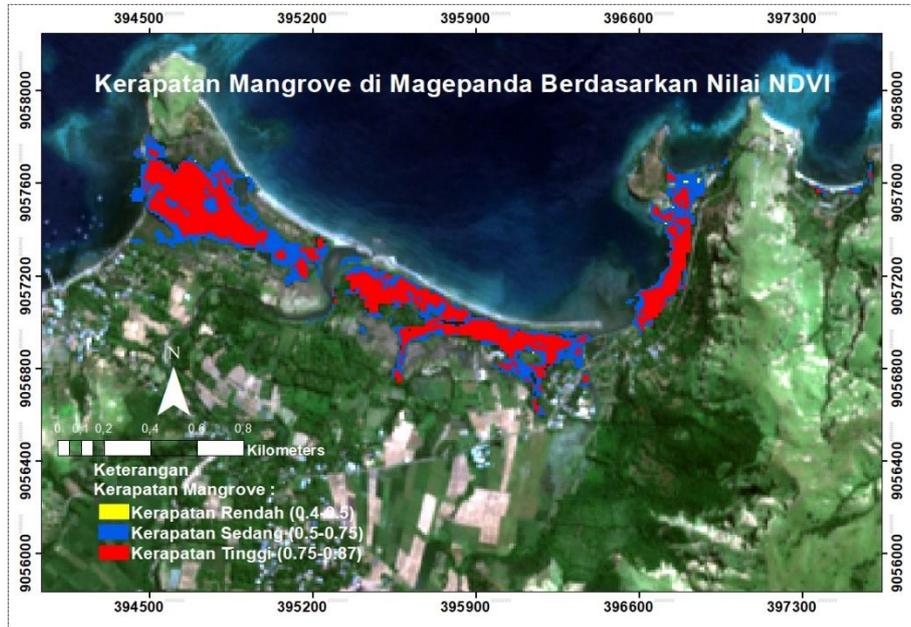
Citra Sentinel-2A dilakukan *pra-processing*, yaitu koreksi geometrik, koreksi radiometrik, selanjutnya dilakukan proses komposit *band* dan *cropping*. Koreksi geometrik untuk memperbaiki koordinat pada citra satelit agar sesuai dengan koordinat geografis. Koreksi radiometrik diperlukan untuk menyamakan kondisi atmosfer pada setiap citra, dengan menghilangkan *noise* pada citra yang disebabkan oleh distorsi akibat posisi cahaya matahari. *Cropping*, yaitu pemotongan citra pada koordinat tertentu untuk mendapatkan bagian tertentu dari gambar.

Komposit *band* bertujuan untuk menampilkan mangrove secara visual pada citra dan mempermudah dalam membedakan antara mangrove dengan tumbuhan darat. Hasil komposit *band* dengan metode *false color* memunculkan kombinasi warna yang berbeda pada vegetasi mangrove, sehingga untuk mengidentifikasi mangrove dan non mangrove dapat lebih mudah dilakukan. Berdasarkan pengamatan dan pertimbangan visual warna pada citra komposit, mangrove primer ditunjukkan oleh warna merah gelap, mangrove sekunder warna merah terang, vegetasi darat ditunjukkan dengan warna orange, warna biru gelap sampai hitam adalah perairan, pemukiman ditunjukkan dengan warna hijau [Risti et al., 2013]. Komposit *band* yaitu pada *band 2*, *band 3*, *band 4* *band 8*, dan *band 11*.

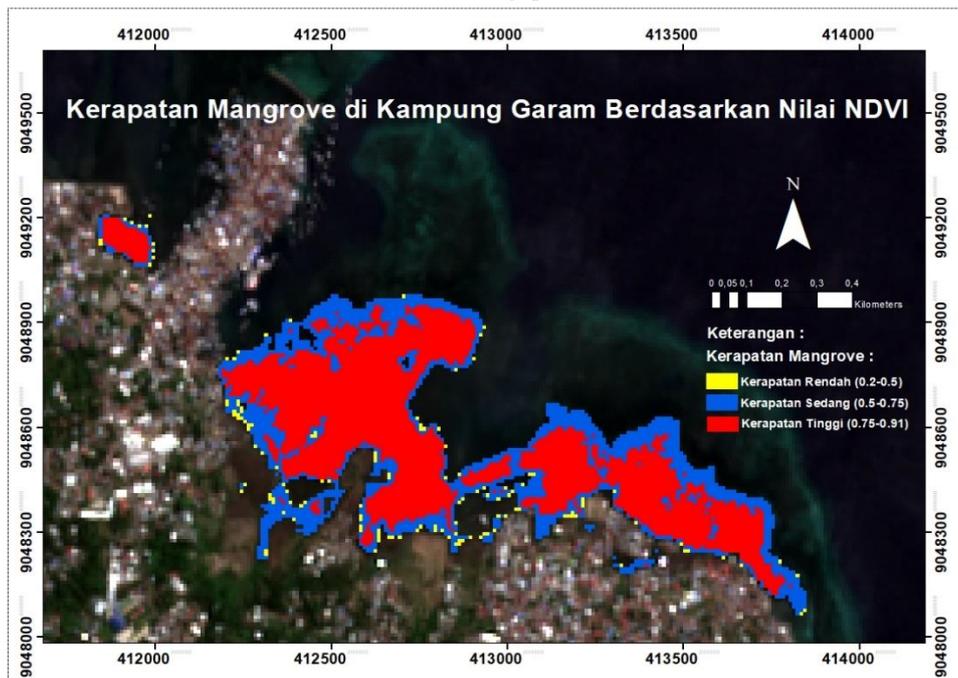
Proses identifikasi sebaran mangrove menggunakan klasifikasi terbimbing (*maximum likelihood classification*), bertujuan untuk mengubah data citra multi-spektral kelas-kelas unsur spasial mangrove. Klasifikasi ini menghasilkan peta satuan lahan yang selanjutnya digunakan untuk membedakan daerah sebaran

mangrove. Kelas mangrove tersebut selanjutnya ditransformasikan ke persamaan indeks vegetasi NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

Transformasi indeks vegetasi NDVI dilakukan untuk merepresentasikan tingkat kerapatan vegetasi, yang disajikan pada Gambar 2 (a dan b).



a. Magepanda



b. Kampung Garam

Gambar 2. Peta kerapatan mangrove (a dan b) berdasarkan nilai NDVI

Rentang nilai NDVI pada daerah vegetasi mangrove berkisar pada 0.28754 – 0.858639. Tabel 3 merupakan data hasil survey pada titik plot, nilai NDVI berkisar pada 0.436059 - 0.843721. Rentang data yang diperoleh berada dalam kisaran 0 sampai +1. Hasil transformasi NDVI menunjukkan bahwa semakin berwarna merah mengindikasikan

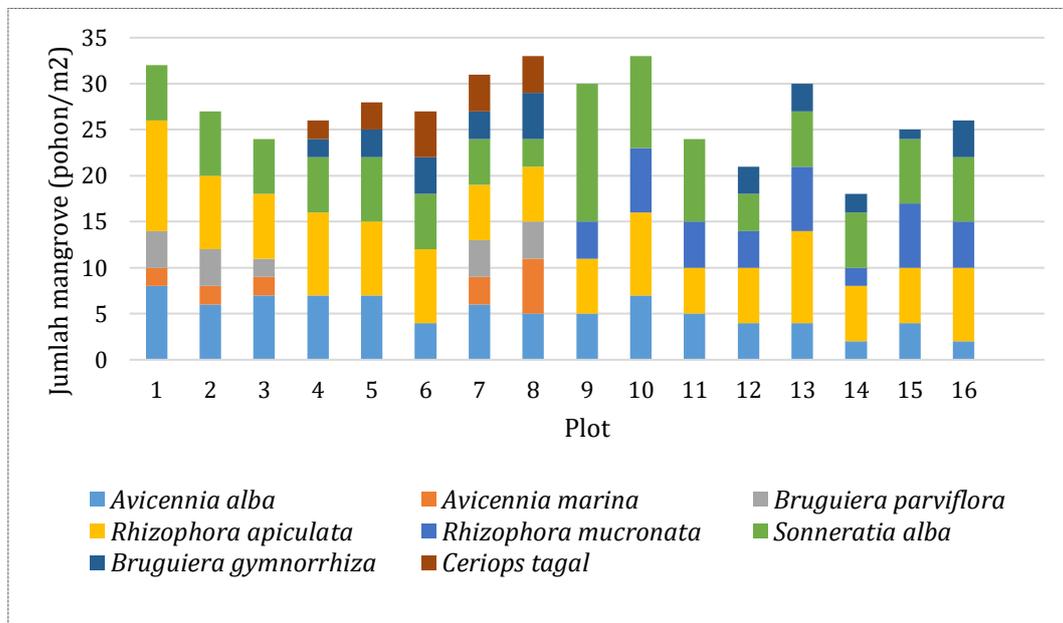
rendahnya nilai NDVI dan semakin berwarna hijau mengindikasikan tingginya nilai NDVI.

Komposisi jenis mangrove

Jenis-jenis mangrove yang teridentifikasi berjumlah 8 jenis (Gambar 3), didominasi oleh *Rhizophora apiculata*. Substrat di lokasi penelitian umumnya pasir berlumpur. Komposisi jenis

vegetasi mangrove secara khas memperlihatkan adanya pola zonasi. Menurut Noor *et al.* (2006) pola zonasi vegetasi mangrove berkaitan erat dengan

tipe tanah (lumpur, pasir atau gambut), keterbukaan (terhadap hempasan gelombang), salinitas serta pengaruh pasang surut.



Gambar 3. Komposisi jenis mangrove

Analisis survei lapangan

Hasil survei lapangan dan pengolahan citra yang telah dilakukan diperoleh nilai biomassa, nilai karbon, persentase tutupan kanopi, jenis substrat, dan ekstraksi nilai NDVI pada setiap plotnya. Persentase tutupan kanopi berkisar antara 38,28 – 90,5%. Berdasarkan kriteria penutupan oleh KepMen LH no. 201 tahun 2004, kondisi tutupan kanopi tergolong dalam kategori jarang sampai padat. Tutupan kanopi terendah (38,28%) ditemukan pada plot 6. Jumlah pohon pada plot tersebut sebanyak 27 pohon/m² yang terdiri dari *Avicennia alba* 4 pohon, *Rhizophora apiculata* 8 pohon, *Sonneratia alba* 6 pohon, *Bruguiera*

gymnorrhiza 4 pohon, dan *Ceriops tagal* 5 pohon. Tipe tumbuhan dalam bentuk pohon bervariasi namun ukurannya relatif kecil sehingga tutupan kanopinya rendah.

Pada plot lainnya diperoleh persentase tutupan kanopi >50%. Perbedaan nilai persentase tutupan kanopi dipengaruhi oleh perbedaan dominansi jenis mangrove dan kerapatan pohon yang menyusun pada plot penelitian. Menurut Pretzsch *et al.* (2015), umumnya semakin besar luas permukaan daun, maka semakin rapat tutupan kanopi. Luas permukaan daun berbeda setiap jenisnya dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik morfologi.

Tabel 3. Hasil survei lapangan

Lokasi	Plot	Biomassa (ton/ha)	Karbon (ton/ha)	Kanopi (%)	NDVI	Substrat
Magepanda	1	150,58	75,29	85,58	0,834493	pasir berlumpur
	2	155,62	77,81	83,09	0,843721	pasir berlumpur
	3	130,38	65,19	70,35	0,743472	pasir berlumpur
	4	85,94	42,97	55,22	0,576742	pasir berlumpur
	5	125,62	62,81	73,61	0,61559	pasir berlumpur
	6	36,305	18,15	38,28	0,436059	pasir berlumpur

	7	150,25	75,125	65,45	0,810498	pasir berlumpur
	8	38,85	19,425	40,57	0,497921	pasir berlumpur
Kampung	9	180,34	90,17	85,25	0,82465	pasir berlumpur
Garam	10	190,5	95,25	90,5	0,759902	pasir berlumpur
	11	90,64	45,32	50,86	0,577851	pasir berlumpur
	12	128,68	64,34	75,68	0,660427	pasir berlumpur
	13	153,45	76,725	85,45	0,811961	pasir berlumpur
	14	127,34	63,67	76,23	0,758682	pasir berlumpur
	15	160,56	80,28	90,46	0,803473	pasir berlumpur
	16	118,5	59,25	69,25	0,703407	pasir berlumpur

Sumber : hasil analisis data survey lapangan.

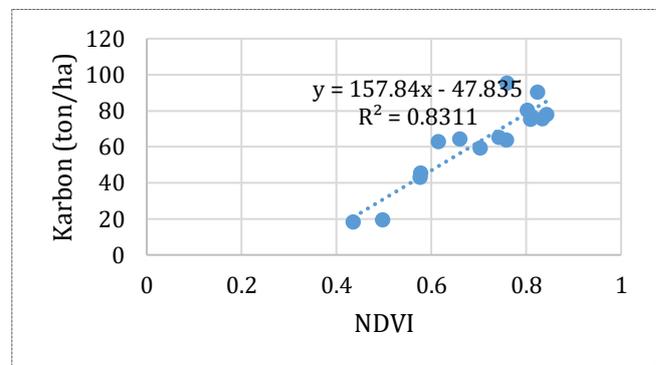
Umumnya *Rhizophora* mempunyai morfologi daun yang lebar, ukuran daun bisa mencapai 11-23 cm x 5-13 cm (Noor et al., 2006). Proses perkembangbiakan jenis *Rhizophora* yang buahnya sudah berkecambah sewaktu masih di pohon induknya (vivipar). Saat lepas dari induknya, propagul yang dilengkapi dengan hipokotil yang runcing akan jatuh dan menancap pada substrat dekat dari induknya. Jenis *Rhizophora* juga memiliki struktur perakaran yang rapat (Noor et al., 2006). Hal tersebut yang menyebabkan pada area komunitas *Rhizophora* memiliki kerapatan yang tinggi sehingga banyak ditemukan persentase tutupan kanopi yang tinggi. Berbeda dengan jenis *Avicennia* dan *Sonneratia*, morfologi daunnya memiliki ukuran yang cenderung lebih kecil dan kerapatannya juga lebih rendah dibandingkan dengan jenis *Rhizophora*, sehingga tutupan kanopi yang dihasilkan oleh jenis ini juga cenderung lebih kecil (Marzuki et al., 2023).

Analisis regresi

Hubungan nilai NDVI dengan karbon

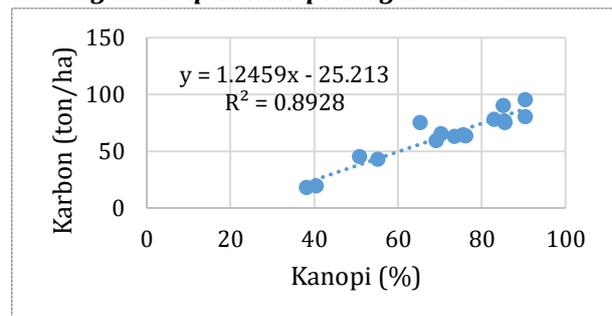
Hubungan antara nilai NDVI dengan karbon disajikan pada Gambar 4. Besarnya koefisien determinasi menunjukkan bahwa pengaruh variabel bebas (NDVI) terhadap nilai karbon sebesar 83,11%. Nilai tersebut tergolong cukup tinggi yang berarti hubungan antara NDVI (yang menggambarkan tingkat kehijauan vegetasi) dan nilai karbon (kandungan karbon dalam tegakan pohon) cukup kuat. Artinya, semakin tinggi nilai NDVI, semakin tinggi pula kandungan karbon dalam tegakan pohon. Ini bisa menunjukkan bahwa vegetasi yang lebih sehat dan lebih lebat cenderung memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi. Namun, ada sekitar 16,89% variansi yang tidak dapat dijelaskan oleh model, yang mungkin disebabkan oleh faktor lain yang mempengaruhi

nilai karbon, yang tidak dimasukkan dalam penelitian ini, seperti jenis pohon, usia pohon, atau faktor lingkungan lainnya.



Gambar 4. Regresi linear antara nilai NDVI dengan karbon dari citra Sentinel-2A

Hubungan tutupan kanopi dengan karbon



Gambar 5. Regresi linear antara tutupan kanopi dengan karbon dari citra Sentinel-2A

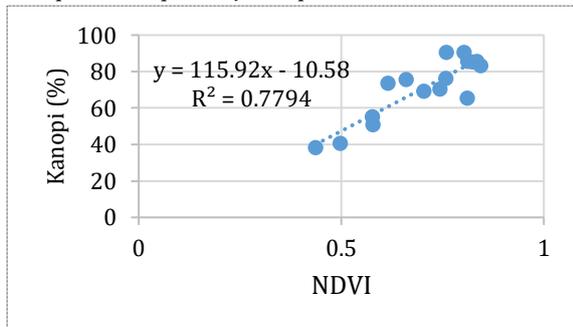
Gambar 5 menyajikan hubungan antara persentase tutupan kanopi dengan karbon. Koefisien determinasi menunjukkan bahwa pengaruh variabel bebas (persentase kanopi) terhadap nilai karbon sebesar 89,28% sedangkan sisanya sebesar 10,72% dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan dalam penelitian ini. Nilai karbon yang diperoleh dari perhitungan nilai

biomassa menggunakan persamaan alometrik setiap jenisnya. Dimana dengan persamaan alometrik yang digunakan pada penelitian ini hanya menerapkan diameter batang mangrove dan berat jenis mangrove sebagai nilai penduga.

Tinggi rendahnya nilai biomassa yang dihasilkan suatu ekosistem mangrove disebabkan oleh tingkat kesuburan tanah dan kerapatan mangrove yang terdapat di kawasan tersebut ([Dharmawan & Siregar, 2008](#)). Karena nilai persentase tutupan kanopi tergantung pada luas permukaan daun dan kerapatan pohon, maka tinggi rendahnya nilai karbon dipengaruhi oleh nilai persentase tutupan kanopi pada suatu kawasan.

Hubungan NDVI dengan tutupan kanopi

Hubungan antara nilai NDVI dengan persentase tutupan kanopi disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Regresi linear antara nilai NDVI dengan tutupan kanopi dari citra Sentinel-2A

Besarnya koefisien determinasi menunjukkan bahwa pengaruh variabel bebas (nilai NDVI)

Tabel 4. Persamaan masing-masing regresi

Persamaan Regresi	R ²
Linear: $y = 157.84x - 47.835$	R ² = 0.8311
Polinomial (polinomial 2 orde yang membentuk ekspresi kuadratik): $y = -255.61x^2 + 494.84x - 154.45$	R ² = 0.8574
Ekspensial: $y = 5.1735e^{3.4318x}$	R ² = 0.8144

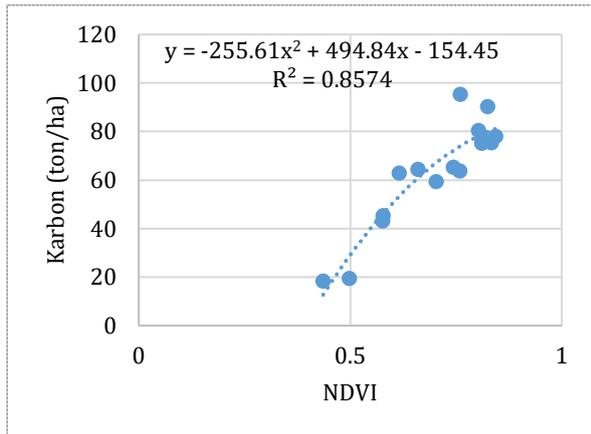
Tabel 4 menunjukkan bahwa persamaan regresi polinomial menghasilkan nilai koefisien determinasi (R²) yang paling tinggi, sebesar 0,8574; sehingga persamaan regresi polinomial dipilih sebagai model estimasi stok karbon permukaan, $y = -255.61x^2 + 494.84x - 154.45$ dengan y adalah karbon dan x adalah nilai ekstraksi NDVI. Grafik hubungan antara nilai karbon piksel dengan nilai

terhadap persentase tutupan kanopi sebesar 77,94% sedangkan sisanya sebesar 22,06% dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan dalam penelitian ini. Nilai NDVI diperoleh dari nilai reflektan objek yang diterima oleh citra satelit, semakin lebat tutupan kanopi semakin tinggi nilai NDVI. Nilai NDVI akan semakin tinggi di saat umur suatu pohon bertambah yang diiringi oleh penambahan luas kanopi dan bertambahnya diameter pohon. Bertambahnya luas kanopi akan mengakibatkan kandungan khlorofil di area tersebut menjadi meningkat. Khlorofil yang semakin tinggi akan menyebabkan meningkatnya reflektan spektrum hijau. Peningkatan reflektan spektrum hijau menyebabkan nilai NDVI di area tersebut juga semakin tinggi. Gelombang elektromagnetik yang tidak dapat menembus kanopi sehingga langsung dipantulkan dan diterima oleh sensor satelit ([Marzuki et al., 2023](#)).

Model estimasi stok karbon

Model estimasi stok karbon diperoleh dari persamaan regresi antara variabel terikat (nilai karbon piksel) dengan variabel bebas (nilai NDVI). Nilai karbon piksel diperoleh dari perhitungan nilai biomassa dan karbon lapangan yang hanya mencakup area plot 100 m². Model penduga atau estimasi stok karbon mangrove yang dibangun menggunakan persamaan regresi linear, polinomial, dan eksponensial seperti disajikan pada Tabel 4.

NDVI pada model regresi polinomial disajikan pada Gambar 7.



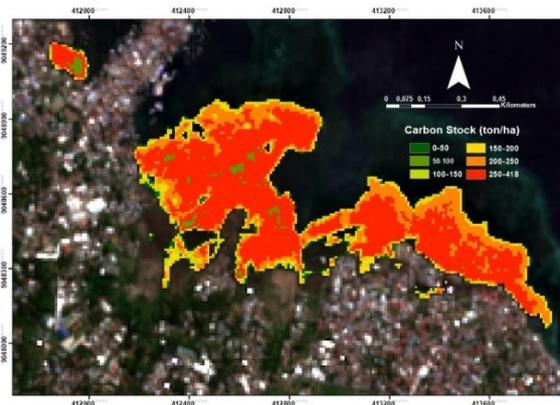
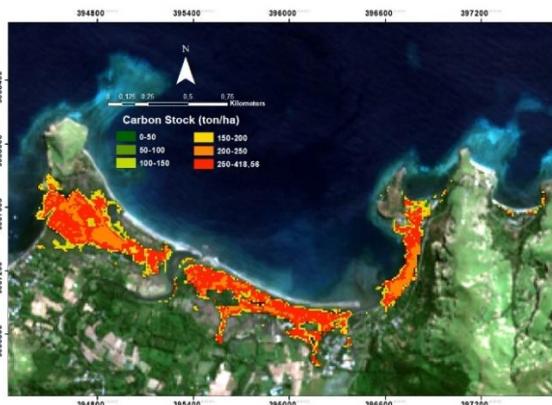
Gambar 7. Hubungan nilai NDVI dengan nilai karbon piksel

Hasil penelitian juga mendapatkan luas wilayah mangrove di lokasi Teluk Maumere bagian barat sebesar 100,82 ha.

Uji akurasi dilakukan dengan menggunakan titik independen sebanyak 10 titik. Nilai akurasi yang

diperoleh yaitu 14,02 yang mengindikasikan bahwa terdapat nilai bias yang tidak terlalu besar pada model estimasi stok karbon yang dibangun. Hal tersebut disebabkan karena nilai stok karbon diperoleh dari perhitungan persamaan alometrik setiap jenis mangrove yang menggunakan diameter batang pohon sebagai nilai penduga. Nilai akurasi tersebut dapat dikatakan mendekati akurat, karena lebih mendekati nol jika dibandingkan dengan hasil penelitian oleh [Marzuki et al. \(2023\)](#) di Pulau Nunukan Kalimantan Utara, yang mendapatkan nilai akurasi dari model estimasi stok karbon seluruh jenis yaitu 45,25 dan nilai akurasi dari model estimasi stok karbon jenis dominan yaitu 31,82.

Penelitian ini dapat memperkuat pernyataan bahwa penggunaan indeks vegetasi NDVI merupakan acuan untuk mengestimasi stok karbon mangrove. Peta distribusi nilai karbon permukaan pada Teluk Maumere bagian barat disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Peta estimasi stok karbon di Teluk Maumere bagian barat

Stok karbon mangrove di Teluk Maumere bagian barat

Cadangan biomassa karbon pada tegakan mangrove di atas permukaan tanah di wilayah Teluk Maumere bagian barat, meliputi Magepanda, dan Kampung Garam seluas 100,82 ha adalah sebesar 5.860,59 ton C, atau dengan nilai rata-rata sebesar 58,13 ton C/Ha.

Nilai stok karbon mangrove di Teluk Maumere bagian barat jika dibandingkan dengan penelitian lainnya, diperoleh lebih kecil dari stok karbon permukaan dari hutan mangrove di hutan mangrove di Pulau Bauluang, Sulawesi Selatan ([Fitrah, 2019](#)) dengan stok karbon permukaan sebesar 66.911,73 ton C pada luasan mangrove 252,90 Ha. Cadangan karbon di Teluk Maumere

yang lebih rendah tersebut dapat disebabkan antara lain degradasi mangrove. Menurut [Gumilang et al. \(2013\)](#), kawasan mangrove di Teluk Maumere menurun signifikan akibat tsunami tahun 1992 berdasarkan pantauan Citra Satelit Landsat. Faktor kedua yang mempengaruhi penurunan tutupan mangrove adalah faktor lingkungan alam ([Vincentius et al., 2018](#)), bahwa kondisi habitat mangrove di Teluk Maumere menurun signifikan akibat amblesnya gempa bumi luas wilayah kerusakan mencapai 20 m ke arah daratan ([Gumilang dkk., 2013](#)).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Estimasi cadangan biomassa karbon di atas permukaan tanah pada tegakan mangrove di Teluk Maumere bagian barat meliputi Magepanda, dan Kampung Garam dilakukan dengan menggunakan citra satelit Sentinel-2A. Nilai cadangan karbon diperoleh dari persamaan regresi berdasarkan data indeks vegetasi NDVI dan cadangan karbon aktual. Metode yang digunakan dalam memperoleh nilai cadangan karbon aktual yaitu persamaan alometrik (*above ground biomass*). Penentuan titik sampel menggunakan teknik *stratified sampling*. Analisis data menggunakan analisis regresi linear, polinomial, eksponensial, dan uji akurasi. Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa persamaan regresi polinomial menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang paling tinggi yaitu sebesar 0.8574, sehingga persamaan regresi polinomial dipilih sebagai model penduga atau estimasi stok karbon permukaan, dengan y adalah karbon dan x adalah nilai ekstraksi NDVI. Indeks vegetasi NDVI mempunyai korelasi yang erat dengan cadangan karbon sebesar 85.74% ($R^2 = 0.8574$). Pengestimasian cadangan karbon total menggunakan hasil persamaan regresi polinomial $y = -255.61x^2 + 494.84x - 154.45$. Luas hamparan mangrove sebesar 100,82 ha. Total cadangan karbon di atas permukaan pada tegakan mangrove di Teluk Maumere bagian barat mencapai 5.860,59 ton C dengan nilai rata-rata sebesar 58,13 ton C/Ha.

Saran

Saran dan rekomendasi bagi masyarakat Magepanda dan Kampung Garam sebagai lokasi penelitian adalah meningkatkan pemanfaatan hutan mangrove sebagai bahan pangan, pelindung pantai, dan penunjang sektor rekreasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih sebesar-besarnya kami sampaikan kepada Direktur Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRTPM) bersama jajaran, pada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset dan Teknologi (Ditjen Diktiristek), Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi (Kemendikbudristek) yang telah membiayai penelitian ini dalam Tahun Anggaran 2024.

DAFTAR PUSTAKA

- BSN (Badan Standardisasi Nasional). 2011. Pengukuran dan Penghitungan Cadangan Karbon – Pengukuran Lapangan Untuk Penaksiran Cadangan Karbon Hutan (*Ground based forest carbon accounting*) (SNI 7724:2011). Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Chianucci, F. & Cutini, A. 2012. Digital Hemispherical Photography for Estimating Forest Canopy Properties: Current Controversies and Opportunities. *I-Forest*, vol. 5:290-295.
- Dharmawan, I. W. E. & Pramudji. 2017. Panduan Pemantauan Komunitas Mangrove. Edisi 2. *CRITC Coremap CTI LIPI*. Jakarta. 54 hlm.
- Dharmawan, I. W. S. & Siregar, C. A. 2008. Karbon Tanah dan Pendugaan Karbon Tegakan *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. di Ciasem, Purwakarta. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 5(4), 317- 328. DOI: <https://doi.org/10.20886/jphka.2008.5.4.317-328>.
- Fitrah, M. N. 2019. Dinamika Perubahan Stok Karbon Biomassa pada Ekosistem Mangrove Menggunakan Data Satelit dan Pengukuran Karbon Permukaan di Pulau Bauluang. *Tesis (Tidak diterbitkan)*. Pengelolaan Lingkungan Hidup. Sekolah Pascasarjana. Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Gumilang, R. S., Rahadian, A., Priyanto, E. B., Kuswantoro. 2013. Peran Ekosistem Mangrove Sebagai Pelindung Bencana Pesisir di Kawasan Pesisir Teluk Maumere, Kabupaten Sikka. *Wetlands International Indonesia Programme*. Bogor: Partners for Resilience.
- Hasibuan, R. R., Kardhinata, E. H., Riyanto, R. 2020. Analisis Kandungan Karbon pada Daun Mangrove *Rhizophora apiculata* di Kampung Nipah Kecamatan Perbaungan Kabupaten Serdang Bedagai Sumatera Utara. *Jurnal Ilmiah Biologi UMA (JIBIOMA)*, 2 (2) November 2020: 78-82. <https://jurnalmahasiswa.uma.ac.id/index.php/jibioma/article/view/260/pdf>. DOI: 10.31289/jibioma.v2i2.260.
- Huete, A. R., Didan, K. & Van Leeuwen W. 1999. Modis Vegetation Index. *Vegetation Index and Phenology Lab, The University of Arizona* 3(1), 129.

- Kassagi, M. F. A., Ario R., Soenardjo, N. 2024. Kajian Persentase Tutupan Kanopi Mangrove Menggunakan Metode Hemispherical Photography di Desa Sambiroto dan Desa Keboromo, Kabupaten Pati, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research* Vol 13, No. 1 Februari 2024, pp. 51-59. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jmr/article/view/35424> DOI: 10.14710/jmr.v13i1.35424.
- KLH (Kementerian Lingkungan Hidup). 2004. Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 201 Tahun 2004 tentang Kriteria Baku dan Pedoman Penentuan Kerusakan Mangrove. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Marzuki, Nurdin, N., Yasir, I., Mashoreng, S., Selamat, M. B. 2023. Estimasi Stok Karbon Biomassa pada Ekosistem Mangrove Menggunakan Data Satelit di Pulau Nunukan Kabupaten Nunukan Kalimantan Utara. *Majalah Ilmiah Globë* Volume 25 No.1 April 2023: 63-76 <https://big.go.id/uploads/content/produk/Globe/Vol25.1/7.1461.pdf>
- Mayuftia, R., Hartoko, A., Hendrarto, B. 2013. Tingkat Kerusakan dan Karbon Mangrove dengan Pendekatan Data Satelit NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) di Desa Sidodadi Kabupaten Pesawaran Provinsi Lampung. *Diponegoro Journal Of Maquares* Volume 2, Nomor 4, Tahun 2013, hal. 146-154.
- Mutmainna, N., Umar, M. R., Salim, M. A. 2024. Estimasi Simpanan Karbon Tegakan *Rhizophora Spp.*, dan Sedimen Ekosistem Mangrove di Kecamatan Belopa, Kabupaten Luwu. *BIOMA: Jurnal Biologi Makassar*. Volume 9 Nomor 1 Januari – Juni 2024. 145–159. <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jkt/article/view/18326>
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L. & Grimsditch, G. (Eds). 2009. Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. *United Nations Environment Programme, GRID-Arendal*. www.grida.no. ix, 73p
- Noor, Y. R., Khazali, M. & Suryadiputra, I N. N. 2006. Pengenalan Mangrove di Indonesia. Cetakan Kedua. Ditjen PHPA-Wetlands International, Indonesia Programme (PHPA-WI-IP). Bogor. viii, 219 hlm
- Pretzsch, H., Biber, P., Uhl E., Dahlhausen, J., Rötzer, T., Caldentey, J., Koike, T., van Con, T., Chavanne, A., Seifert, T., du Toit, B., Farnden, C. & Pauleit, S. 2015. Crown Size and Growing Space Requirement of Common Tree Species in Urban Centres, Parks, and Forests. *Urban Forestry and Urban Greening*, 14(3), 466-479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006>.
- Rahmattin, N. A. F. E. dan Hidayah, Z. 2020. Analisis ketersediaan stok karbon pada mangrove di Pesisir Surabaya, Jawa Timur, *Juvenil*, 1(1): 58-65. DOI: <https://doi.org/10.21107/juvenil.v1i1.6812>
- Risti, O., Arhatin, E., Prihatin, D. & Wahyuningrum, I. 2013. Algoritma Indeks Vegetasi Mangrove Menggunakan Satelit Landsat ETM+. *Jurnal : Buletin PSP*, 21(2), 215-228. ISSN: 0251-286X.
- Simpson, W. T. 1996. Method To Estimate Dry-Kiln Schedules and Species Groupings: Tropical and Temperate Hardwoods. Res. Pap. FPL–RP–548. Madison. Forest Products Laboratory, Forest Service. U.S. Department of Agriculture. Washington, DC. USA. 57 p
- Vincentius, A., Nessa, M. N., Jompa, J., Saru, A., Nurdin, N., Rani, C. 2018. Influential Factors Analysis Towards Mangrove Cover and Production of Demersal Fish in Maumere Bay, Indonesia. *AAFL Bioflux*, 2018, Volume 11, Issue 3. p 810-822. <http://www.bioflux.com.ro/home/volume-11-3-2018/>
- Waru, A. T., Rukminasari, N., Inaku, D. F., Yanuarita, D., Supriadi. 2022. Estimasi Cadangan Karbon di Atas Permukaan pada Hutan Mangrove Kuri Caddi Menggunakan Citra Sentinel-2A. *Jurnal Pengelolaan Perairan, JPP*. Volume 4 (1): 13-24. Juni 2022. <https://journal.unhas.ac.id/index.php/jpp/article/view/13582> e-ISSN: 2620-6552.
- Xu M., Guo, B., Zhang, R. 2024. A Novel Approach To Detecting The Salinization of The Yellow River Delta Using A Kernel Normalized Difference Vegetation Index and A Feature Space Model. *Sustainability* 2024, 16, 2560. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/6/2560>.