ANALISIS KONDISI HUTAN MANGROVE DAN POTENSI SERAPAN KARBON MENGGUNAKAN DATA SENTINEL-2 DI KABUPATEN PESAWARAN

Analysis of Mangrove Forest Condition and Carbon Absorption Potential Using Sentinel-2 Data in Pesawaran Regency

Alfian Zamzami Adirama[1], Rizki Dimas Permana[2], Achmad Chalid Afif Alfajrin[1] Mohammad Ashari Dwiputra[2], Nanda Widiya[1], Sakti Vincensius Sozanolo Dakhi[1], dan Weni Fira Destina[1]

[1] Program Studi Rekayasa Kehutanan Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sumatera
[2] Program Studi Sains Lingkungan Kelautan Fakultas Sains
Institut Teknologi Sumatera

ABSTRACT. *Climate change and global warming continue to occur up to the present. One of the gases significantly influencing climate change is carbon dioxide (CO2). The increase in CO2 can be mitigated by capturing carbon from the atmosphere and storing it in biomass in a process known as carbon sequestration. Forests play a crucial role as a mitigator in reducing global warming and climate change, acting as both a carbon sink and absorber. Mangrove forests, in particular have a high capacity for carbon storage, approximately three times more than terrestrial forests. This research aims to (1) assess the health condition of the mangrove forests in Pesawaran Regency and (2) estimate the CO2 absorption produced by Pesawaran Regency. The study utilizes Sentinel-2 satellite imagery and field data collection. Sentinel-2 images undergo Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) transformation. The research results indicate that the mangrove forests in Pesawaran Regency in 2023 are predominantly in good condition, covering an area of 562,31 hectares (99%), while 6,12 hectares (1%) are in a degraded condition. The CO2 absorption by the mangrove forests pesawaran regency is estimated to be 336.367,47 tons CO_2 and 591,75 tons CO_2/ha.*

Keywords: *Carbon stocks; Climate change; Pesawaran regency; Biomass potential; CO_2 absorption.*

ABSTRAK. Perubahan iklim dan pemanasan global terus terjadi hingga saat ini. Salah satu gas yang sangat berpengaruh terhadap perubahan iklim adalah karbondioksida (CO_2). Peningkatan gas CO_2 dapat diturunkan dengan menangkap karbon di atmosfer dan disimpan dalam bentuk biomassa yang disebut penyerapan karbon. Peran adanya hutan yaitu sebagai penekan untuk menurunkan pemanasan global dan perubahan iklim karena dapat sebagai penyimpan dan penyerap karbon. Hutan mangrove memiliki kemampuan yang tinggi dalam menyimpan karbon sebesar 3 kali lipat dibandingkan dengan hutan daratan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi kesehatan hutan mangrove Kabupaten Pesawaran dan menduga serapan CO_2 yang dihasilkan oleh Kabupaten Pesawaran. Penelitian ini menggunakan citra satelit Sentinel-2 dan pengambilan data di lapangan. Citra Sentinel-2 dilakukan proses transformasi *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi hutan mangrove Kabupaten Pesawaran tahun 2023 dominan dalam kondisi baik dengan luas 562,31 ha (99%) sementara 6,12 ha (1%) dalam kondisi rusak. Potensi serapan CO_2 yang dapat diserap oleh hutan mangrove Kabupaten Pesawaran ialah sebesar 336.367,47 ton CO_2 dan 591,75 ton CO_2/ha

Kata kunci: *Cadangan karbon; Kabupaten pesawaran; Perubahan iklim; Potensi biomassa; Serapan CO_2.*

Penulis untuk korespondensi, surel: rizki.permana@sll.itera.ac.id

PENDAHULUAN

Perubahan iklim dan pemanasan global terus terjadi hingga saat ini. Sebagian besar disebabkan karena meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer [1]. Gas utama yang dihasilkan dari GRK yaitu karbondioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitro oksida (N_2O) [2]. Menurut KLHK, emisi GRK di Indonesia pada tahun 2016 – 2019 terjadi kenaikan tetapi pada tahun 2020 terjadi penurunan emisi yang cukup besar [3]. Salah

satu GRK yang sangat berpengaruh terhadap perubahan iklim adalah CO_2 [4]. Menurut IPCC, CO_2 menyumbang 75% dari keseluruhan emisi GRK [5]. Peningkatan CO_2 dapat diturunkan dengan menangkap karbon di atmosfer dan disimpan dalam bentuk biomassa yang biasa disebut penyerapan karbon [6].

Dalam upaya mengurangi pemanasan global dan perubahan iklim, hutan memiliki peran penting yang mampu berfungsi sebagai penyimpan dan penyerap karbon [7]. Hutan sebagai penampung karbon memiliki kemampuan untuk menyerap emisi GRK berupa CO_2 dari atmosfer dan menyimpan karbon dalam tumbuhan [8]. Tumbuhan melakukan fotosintesis yang dapat menyerap CO_2 dari udara dan mengubahnya menjadi karbon organik yang disimpan dalam biomassa pohon [9]. Menurut Ramadhanti, menjelaskan bahwa sekitar 76 – 78% dari total karbon organik dalam bentuk biomassa dihasilkan melalui proses fotosintesis yang mampu menyerap CO_2 oleh vegetasi dalam hutan [10]. Kemampuan hutan dalam menyerap dan menyimpan karbon memiliki kapasitas yang berbeda – beda [11]

Hutan mangrove mampu menampung karbon tiga kali lebih banyak daripada hutan daratan [12]. Hutan mangrove merupakan salah satu penyerap karbon yang mempunyai peran besar dalam siklus karbon dunia [13]. Jumlah cadangan karbon yang tersimpan perlu diukur untuk mengetahui besaran cadangan karbon sehingga mendapatkan hasil serapan cadangan karbon dan dapat dilakukan sebagai dasar dalam jual beli cadangan karbon [14]. Pada tahun 2000 diperkirakan luas hutan mangrove dunia sebesar 13,7 juta Ha sedangkan pada tahun 2011 terdapat beberapa luasan antara 11 juta hingga 24 juta Ha akan tetapi belum ada data terbaru hingga sekarang [15] [16]. Menurut KLHK, pada tahun 2013 – 2019 luas hutan mangrove di Indonesia sebesar 3.364.080 ha sedangkan pada tahun 2021 berdasarkan peta mangrove nasional (PMN) luasan hutan mangrove di Indonesia sebesar 3.331.245 ha [17]. Dari data tersebut, terdapat pengurangan luasan hutan mangrove yang signifikan sebesar 32.835 ha. Menurut Donato, dalam setengah abad terakhir luas hutan mangrove menurun disebabkan oleh pembuatan tambak, penebangan berlebih, serta pembangunan daerah pesisir [12]. Terjadinya kerusakan hutan mangrove akan mengakibatkan peningkatan 20% CO_2 [18]. Mengingat hal tersebut, maka ketersediaan data dan informasi mengenai kondisi mangrove serta serapan CO_2 dari berbagai wilayah sangat dibutuhkan untuk monitoring dan pengelolaan mangrove yang berkelanjutan.

Pendugaan besaran cadangan karbon dapat dilakukan secara inventarisasi di lapangan dengan menghasilkan data yang akurat tetapi membutuhkan waktu dan biaya yang besar [19]. Metode alternatif dalam memetakan hutan mangrove yaitu dengan menggunakan teknik penginderaan jauh (inderaja) dan sistem informasi geografis (SIG) yang memanfaatkan hasil analisis citra satelit [16]. Inderaja dapat dimanfaatkan untuk pendugaan biomassa dan karbon melalui analisis regresi yang dikorelasikan dengan biomassa hutan [20]. Inderaja memiliki peranan penting dalam upaya monitoring karbon pada skala global, nasional, maupun regional [21]. Salah satu citra yang dapat digunakan yaitu citra Sentinel-2. Citra sentinel-2 memiliki resolusi spasial yang cukup baik dan dapat diakses dengan mudah [22].

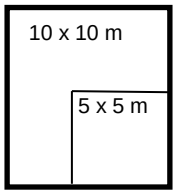
Luas hutan mangrove di Provinsi Lampung berdasarkan PMN sebesar 9.810 Ha. Hutan mangrove di Lampung membentang sepanjang 896 km dari keseluruhan panjang pantai 1.105 km [23]. Menurut Pemkab Pesawaran pada tahun 2015, Kabupaten Pesawaran memiliki luas hutan mangrove sebesar 1.200 Ha namun kerusakan hutan mangrove terjadi di beberapa lokasi yang berasal dari perubahan lahan menjadi tambak udang dan eksploitasi hutan [24][25][26]. Oleh karena itu, penelitian tentang kondisi hutan mangrove dan pengukuran serapan CO_2 perlu dilakukan untuk mengetahui potensi serapan CO_2 pada suatu wilayah dan dapat dijadikan dalam perencanaan mitigasi perubahan iklim. Tujuan dari penelitian ini adalah: (1) mengetahui kondisi kesehatan mangrove Kabupaten Pesawaran dan (2) menduga serapan CO_2 Kabupaten Pesawaran.

METODE PENELITIAN

Peneilitan mengenai kondisi hutan mangrove dan serapan CO_2 di Kabupaten Pesawaran untuk pengambilan data selama 5 (lima) bulan dari bulan Mei 2023 sampai dengan September 2023. Mulai persiapan alat dan bahan, pengambilan data lapangan, analisis dan pengolahan data serta

pembuatan hasil laporan penelitian. Alat yang digunakan adalah pita ukur, GPS garmin 68s, meteran roll, kompas, tali tambang, *tally sheet.*

Pengumpulan data yang digunakan meliputi data primer dan sekunder. Data primer didapatkan di lapangan dengan cara mengobservasi maupun mengukur. Data primer diperoleh dari studi literatur maupun citra satelit. Pengumpulan data di lapangan dengan membuat plot penelitian. Pembuatan plot penelitian dilakukan untuk mengetahui biomassa dan karbon di lapangan serta kondisi struktur komunitas hutan mangrove. Pengambilan data dilakukan di 3 stasiun dengan ukuran masing – masing 10 x 10 m. Plot penelitian dilakukan secara *purposive sampling* yang dibuat tegak lurus garis pantai kearah darat. Pengambilan sampel dilakukan dengan metode *non-destructive sampling.* Sampel vegetasi yang diukur hanya diameter setinggi dada (dbh).



Gambar 1. Petak Contoh Analisis Vegetasi

Keterangan:

- Ukuran 10 x 10 m dilakukan pengukuran tingkat pohon (dbh ≥10 cm dan tinggi >1,5 m)
- Ukuran 5 x 5 m dilakukan pengukuran tingkat pancang (<10 dbh dan tinggi >1,5 m)

Pengolahan citra satelit dilakukan dengan klasifikasi citra yang bertujuan mengelompokkan tapak berdasarkan tutupan lahan yang dilakukan berdasarkan hasil yang diperoleh dari interpretasi citra satelit. Klasifikasi Citra Sentinel-2 menggunakan *supervised classification* (klasifikasi terbimbing) dengan *maximum likelihood*. Klasifikasi yang dibuat yaitu hutan mangrove dan non mangrove.

Indeks Nilai Penting (INP)

INP didapatkan dari penjumlahan Kerapatan Relatif (KR), Frekuensi Relatif (FR), dan Dominansi Relatif (DR) untuk tingkat pohon sedangkan untuk tingkat pancang hanya KR dan FR. Untuk mendapatkan nilai KR, FR, dan DR digunakan rumus berikut :

$$\text{Kerapatan (K)} = \frac{jumlah\ individu\ jenis}{luas\ plot} \quad \ldots\ldots\ (1)$$

$$\text{Kerapatan Relatif (KR)} = \frac{kerapatan\ suatu\ jenis}{kerapatan\ seluruh\ jenis} \times 100\% \quad \ldots\ldots\ldots\ (2)$$

$$\text{Frekuensi (F)} = \frac{jumlah\ plot\ ditemukan\ suatu\ jenis}{jumlah\ seluruh\ plot} \quad \ldots\ldots\ldots\ (3)$$

$$\text{Frekuensi Relatif (FR)} = \frac{frekuensi\ suatu\ jenis}{frekuensi\ seluruh\ jenis} \times 100\% \quad \ldots\ldots\ \ldots\ (4)$$

$$\text{Dominansi (D)} = \frac{jumlah\ luas\ bidang\ dasar\ suatu\ jenis}{luas\ plot} \quad \ldots\ldots\ (5)$$

$$\text{Dominansi Relatif (DR)} = \frac{dominansi\ suatu\ jenis}{dominansi\ seluruh\ jenis} \times 100\% \quad \ldots\ldots\ldots\ (6)$$

Analisis NDVI

Indeks NDVI merupakan indeks yang menggambarkan tingkat kehijauan suatu tanaman. Nilai indeks ini memiliki nilai minimum -1 dan maksimum 1 dengan rumus perhitungan:

$$NDVI = \frac{\rho\ NIR - \rho\ Red}{\rho\ NIR + \rho\ Red} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (7)$$

Keterangan:
NIR = Band inframerah dekat (band 8)
Red = Band merah (band 4)

Tabel 1. Klasifikasi NDVI

Nilai NDVI	Kerapatan (pohon/ha)	Tingkat Kerapatan Tajuk
0,43 ≤NDVI ≤1,00	< 1000	Kerapatan tajuk lebat
0,33 ≤NDVI ≤0,42	1000 – 1500	Kerapatan tajuk sedang
-1,0 ≤NDVI ≤0,32	> 1500	Kerapatan tajuk jarang

Uji Akurasi

Penilaian akurasi dilakukan pada kelas hutan mangrove dan non mangrove. Hasil klasifikasi dievaluasi menggunakan matriks kesalahan *(Confusion Matrix)* yang merupakan salah satu metode untuk mengukur kinerja suatu metode klasifikasi [29]. Uji akurasi yang digunakan beserta persamaan yang digunakan yaitu:

Producers Accuracy (PA)

= (XiiXi+) x 100 ……. (8)

Users Accuracy (UA)
= (XiiX+i) x 100% …… (9)

Overall Accuracy (OA)
= (i=1rXiiN) x 100% ……. (10)

Kappa Accuracy (KA)
= (Ni=1rXii- i=1rXi+X+iN²Xi+X+1) x 100% ……. (11)

Keterangan:
N = Banyaknya nilai pixel dalam contoh
X_{ii} = Nilai diagonal dari matrik kontingensi baris ke-1 dan kolom ke-i
X_{i+} = Jumlah piksel dalam baris ke-i
X_{+I} = Jumlah piksel dalam kolom ke-i

Penghitungan Biomassa Atas Permukaan

Untuk menentukan biomassa atas permukaan dilakukan menggunakan persamaan

alometrik. Model persamaan alometrik yang digunakan tersaji pada tabel dibawah.

Tabel 2. Model Persamaan Alometrik

Jenis	Persamaan Alometrik	Sumber
Rhizopora apiculata	BAP = 0,23 $(D)^{2,38}$	[30]
Rhizopora mucronata	BAP = 0,128$(D)^{2,60}$	[30]
Rhizopora Stylosa	BAP = 0,178$(D)^{2,59}$	[30]
Avicennia alba	BAP = 0,2901$(D)^{2,2605}$	[31]

Keterangan:
BAP = Biomassa atas permukaan (ton)
D = Diameter (cm)

Penghitungan Karbon dari Biomassa

Penghitungan nilai karbon menggunakan rumus [32]

C = BAP x % C organic …… (12)

Keterangan:

C= Kandungan karbon dari biomassa (ton)
% C organik = 0,47

Penghitungan Serapan CO_2

Serapan CO_2 didapatkan dari mengalikan nilai cadangan karbon 3,667. Nilai tersebut berasal dari rumus berikut:

Serapan CO_2 = $\frac{Mr\ CO2}{Ar\ C}$ x C ……(13)

Keterangan
Mr CO_2 : Massa molekul relatif CO_2 (44 gr/mol)
Ar C : Massa atom relatif C (12 gr/mol)

Korelasi

Menurut Sarwono, tingkat korelasi dapat dilihat pada dibawah [33].

Tabel 3. Tingkat Korelasi

No	Persentase Korelasi	Kategori Korelasi
1	0	Tidak Ada
2	0 – 0,25	Sangat Lemah
3	0,25 – 0,50	Cukup
4	0,50 – 0,75	Kuat
5	0,75 - 1	Sangat Kuat
6	1	Sempurna

Nilai Estimasi Biomassa, Cadangan Karbon, dan Serapan CO_2

Model yang dihasilkan dari analisis regresi antara nilai NDVI dengan nilai cadangan karbon lapangan digunakan untuk menghitung nilai estimasi cadangan karbon. Nilai estimasi serapan CO_2 dihasilkan menggunakan persamaan (13) dan nilai estimasi biomassa didapat dari mengubah persamaan (12) menjadi:

$$BAP = \frac{Cadangan\ karbon}{\%C\ organik} \quad \text{..... (14)}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi Jenis Mangrove

. Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan ditemukan 4 spesies mangrove yang dikelompokkan menjadi 2 famili. Vegetasi mangrove yang ditemukan merupakan kategori mangrove mayor (mangrove sejati). Mangrove mayor tumbuh di wilayah pasang surut yang memiliki kemampuan menyerap garam dan memiliki sistem adaptasi untuk mengeluarkan kelebihan garam melalui batang dan daunnya [34]. Jenis mangrove yang teridentifikasi pada area penelitian disajikan pada tabel dibawah

Tabel 4. Jenis Mangrove pada Lokasi Penelitian

Spesies	Famili	Stasiun I	Stasiun II	Stasiun III	Jumlah Individu
Rhizophora stylosa	Rhizophoraceae	+	-	+	396
Rhizophora apiculata	Rhizophoraceae	-	+	-	97
Rhizophora mucronata	Rhizophoraceae	-	-	+	5
Avicennia alba	Avicenniaceae	-	-	+	4

Keterangan: Stasiun I = Mangrove Cukunyinyi, Stasiun II = Mangrove Petengoran, Stasiun III = Desa Sanggi, + = ada, - = tidak ada

Perbedaan spesies dapat diakibatkan oleh variasi lokasi pengambilan data dan kompleksitas spesies yang tersebar di kawasan hutan mangrove karena cakupan hutan mangrove Kabupaten Pesawaran cukup luas. *R. stylosa* merupakan spesies yang paling sering ditemukan pada 2 stasiun dari total 3 stasiun. Hal ini disebabkan karena *R. stylosa* terletak di bagian terdepan dan berbatasan langsung dengan lautan yang berperan menjadi pelindung komunitas mangrove di belakangnya [35].

Struktur Vegetasi

Hasil analisis vegetasi mangrove menunjukkan bahwa di lokasi penelitian memiliki struktur tegakan meliputi 2 jenis pancang dan 4 jenis pohon.

Tabel 5. INP pada Tingkat Pohon

Stasiun	Nama Jenis	Jumlah	Diameter Rataan	K	KR (%)	F	FR (%)	D	DR (%)	INP (%)
1	*R.stylosa*	207	14,78	828	100	1	100	4	100	300
	Total	**207**	**14,78**	**828**	**100**	**1**	**100**	**4**	**100**	**300**
2	*R.apiculata*	85	14,92	850	100	1	100	10	100	300
	Total	**85**	**14,92**	**850**	**100**	**1**	**100**	**12,5**	**100**	**100**
3	*A.alba*	4	13,38	10,81	2,53	0,03	2,5	0,07	2,5	7,53
	R.mucronata	5	14,14	13,51	3,16	0,05	5	0,15	5	13,16
	R.stylosa	149	24,45	402,70	94,30	1	92,5	2,70	92,5	279,30
	Total	**158**	**51,97**	**427,03**	**100**	**1,08**	**100**	**2,92**	**100**	**300**

Tabel 6. INP pada Tingkat Pancang

Stasiun	Nama Jenis	Jumlah	Diameter Rataan	K	KR (%)	F	FR (%)	INP (%)
1	*R.stylosa*	31	7,84	496	100	0,64	100	200
Total		**31**	**7,84**	**496**	**100**	**1**	**100**	**200**
2	*R.apiculata*	12	8,05	480	100	0,7	100	200
Total		**12**	**8,05**	**480**	**100**	**0,7**	**100**	**200**
3	*R.stylosa*	9	6,15	97,30	100	0,11	100	200
Total		**9**	**6,15**	**97,30**	**100**	**0,11**	**100**	**200**

Dari hasil pengamatan, nilai INP paling tinggi terdapat pada spesies *R. stylosa*. INP suatu jenis mencerminkan kontribusinya terhadap ekosistem. Menurut Indriyanto, menyatakan bahwa spesies yang mendominasi dalam komunitas tumbuhan akan memiliki nilai INP yang tinggi [34]. Jenis tumbuhan dengan nilai INP tinggi memiliki tingkat penguasaan dan dominasi habitat yang lebih besar [37].

Famili Rhizophoraceae akan terus mendominasi lokasi penelitian di masa depan karena memiliki nilai INP yang tinggi, selama tidak ada gangguan manusia. Nilai INP yang tinggi pada suatu spesies atau famili mengindikasikan bahwa spesies atau famili tersebut dapat bertahan dan tumbuh dengan baik [38].

Identifikasi Tutupan Lahan

Komposit band 8a, band 11, dan band 4 pada Sentinel-2 merupakan komposit RGB terbaik untuk mengidentifikasi hutan mangrove [39]. Komposit band digunakan untuk mempermudah klasifikasi daerah mangrove dan non mangrove. Pemilihan *training sample* sangat diperlukan dalam proses mengidentifikasi jenis tutupan lahan. Pengambilan *training sample* dilakukan dengan cara membuat poligon di setiap *sample area* yang memenuhi kriteria suatu jenis tutupan lahan. Hasil identifikasi jenis tutupan lahan dari proses *training sample* dapat dilihat dalam tabel dibawah ini.

Tabel 7. Hasil Identifikasi Jenis Tutupan Lahan

Tutupan Lahan	Contoh *Training Sample Area* (Komposit band 8a, 11, 4)	Deskripsi Interpretasi
Mangrove		Berwarna merah
Non Mangrove		Berwarna oren tua dan hijau

Klasifikasi Terbimbing *(Supervised Classification)*

Proses klasifikasi terbimbing tutupan lahan dilakukan menggunakan *maximum likelihood*. Klasifikasi *maximum likelihood* merupakan klasifikasi multispektral yang paling matang dan umum digunakan dalam berbagai penelitian yang memanfaatkan data inderaja, terutama dalam proses klasifikasi terbimbing tutupan lahan [40]. Pada dasarnya, *maximum likelihood* memetakan piksel – piksel dengan probabilitas tertinggi ke dalam kelas yang menggambarkan jenis tutupan lahan tertentu [41]. Tutupan lahan di wilayah penelitian diklasifikasikan ke dalam 2 jenis yaitu mangrove dan non mangrove. Gambar dibawah menampilkan peta jenis tutupan lahan secara keseluruhan.

Gambar 2. Peta Tutupan Lahan

Berdasarkan hasil klasifikasi menunjukkan 2 jenis tutupan lahan yaitu mangrove dan non mangrove. Luasan mangrove sebesar 568,43 ha sedangkan non mangrove sebesar 104.214,6 ha.

Uji Akurasi

Pengujian hasil klasifikasi citra harus dilakukan untuk mengevaluasi akurasi sampel uji pada semua kelas. Uji akurasi menggunakan perbandingan hasil klasifikasi dengan kondisi asli di lapangan. Hasil akurasi klasifikasi citra dibandingkan dengan data lapangan dengan memakai 110 titik referensi. Dalam proses ini, dilakukan perhitungan *user accuracy* (UA), *producer accuracy* (PA), *overall accuracy* (OA), dan *Kappa accuracy* yang disatukan dalam satu matriks biasa disebut sebagai *confussion matrix* [42]. Perhitungan hasil uji akurasi dapat dilihat pada table di bawah

Tabel 8. Matriks Hasil Uji Akurasi

Kelas	Non Mangrove	Mangrove	Total (Users)	*User Accuracy (%)*
Non Mangrove	49	0	49	100
Mangrove	7	44	51	86
Total (producers)	56	44	*Overall Accuracy (%)*	93
Producer Accuracy (%)	88	100	Indeks Kappa (%)	86

Nilai PA berkisar 88% - 100% yang menunjukkan tingkat kesesuaian kelas pada peta hasil klasifikasi dengan hasil survei lapangan berdasarkan nilai akurasi [43]. Nilai ini diperoleh dari perbandingan antara jumlah kelas yang teridentifikasi dengan benar terhadap total keseluruh kelas yang teridentifikasi. Nilai OA mendapatkan 93% dan nilai indeks kappa mendapatkan 86%. Hasil ini menunjukkan nilai uji akurasi klasifikasi citra dapat diterima. Hal tersebut sesuai dengan peraturan yang dikeluarkan oleh BIG yang menyatakan bahwa tingkat ketelitian klasifikasi atau interpretasi minimum menggunakan inderaja memiliki nilai >85 % [44].

Indeks NDVI dan Kesehatan Mangrove

Pemanfaatan metode NDVI dengan sentinel 2B untuk mengidentifikasi kerapatan vegetasi mangrove melibatkan penggunaan band 4 dan band 8. Hasil analisis NDVI menggambarkan sebaran kerapatan mangrove yang dapat dilihat pada gambar dibawah.

Gambar 3. Peta Hasil NDVI dan Kesehatan Mangrove

Peta kerapatan vegetasi mangrove pada gambar diatas merupakan hasil dari analisis NDVI menggunakan sentinel 2B. Rentang kelas klasifikasi NDVI yang diperoleh melalui penyerapan radiasi matahari selalu terletak antara -1 hingga +1 [40]. Hasil penelitian memiliki nilai NDVI terendah sebesar -0,10 dan nilai NDVI tertinggi sebesar 0,64. Berdasarkan analisis dan melakukan pengecekan di lapangan nilai NDVI dari -1 hingga 0 mengindikasikan keberadaan perairan, pemukiman, dan lahan terbuka sedangkan nilai >0 hingga 1 menunjukkan adanya vegetasi. Nilai NDVI yang lebih besar menggambarkan tingkat kerapatan vegetasi semakin tinggi [45]. Dalam menganalisis NDVI, kerapatan dikelompokkan menjadi 3 kelas yaitu jarang, sedang, dan lebat [27]. Berdasarkan hasil kelas kerapatan dari NDVI, luas vegetasi mangrove di Kabupaten Pesawaran dapat diperoleh yang dapat dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 9. Luas Mangrove berdasarkan Tingkat Kerapatan Vegetasi

Tingkat Kerapatan	Nilai NDVI	Luas (ha)	Persentase (%)
Mangrove Jarang	0 – 0,32	6,12	1%
Mangrove Sedang	0,32 – 0,42	17,06	3%
Mangrove Rapat	0,42 – 0,64	545,25	96%
Total		**568,43**	**100%**

Tabel 10. Tingkat Kerapatan Antar Kecamatan

Kecamatan	Kerapatan	Luas (ha)	Persentase (%)
Teluk Pandan	Jarang	1,68	0%
	Sedang	4,25	1%
	Rapat	111,56	20%
Padang Cermin	Jarang	1,84	0%
	Sedang	4,3	1%
	Rapat	203,43	36%
Marga Punduh	Jarang	1,62	0%
	Sedang	4,95	1%
	Rapat	154,32	27%
Punduh Pidada	Jarang	0,98	0%
	Sedang	3,56	1%
	Rapat	75,94	13%
Total		**568,43**	**100%**

Berdasarkan tabel diatas pada tahun 2023 luas hutan mangrove di Kabupaten Pesawaran ditemukan sebesar 568,43 ha. Menurut Pemkab Pesawaran pada tahun 2015 luasan hutan mangrove di Kabupaten Pesawaran seluas 1.200 ha [24]. Terjadi

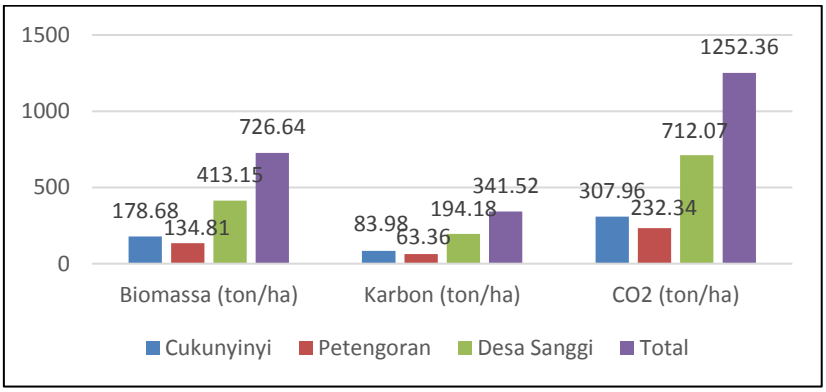
penurunan luas hutan mangrove sekitar 631,57 di Kabupaten Pesawaran jika dibandingkan dengan data tahun 2015. Perubahan luas hutan mangrove disebabkan oleh perubahan lahan dan eksploitasi hutan mangrove [25][26].

Kerapatan mangrove di Kabupaten Pesawaran bervariasi pada setiap wilayahnya tergantung pada jumlah dan luas mangrove di daerah tersebut. Berdasarkan data yang tercantum dalam tabel diatas, luas mangrove dengan kerapatan rapat jauh lebih besar daripada mangrove dengan kerapatan sedang dan jarang. Mangrove rapat mencakup 545,25 ha (96%) sedangkan mangrove sedang sekitar 17,06 ha (3%) dan mangrove jarang seluas 6,12 ha (1%). Hasil tersebut serupa dengan penelitian Irawan, yang menyatakan bahwa kerapatan rapat pada hutan mangrove Pesawaran jauh lebih besar dibandingkan dengan kerapatan sedang dan jarang [46].

Kondisi hutan mangrove terkait erat dengan kerapatan vegetasi mangrove yang sesuai dengan kriteria standar untuk mengukur tingkat kerusakan mangrove [35]. Kriteria baku kerusakan mangrove adalah ukuran batas perubahan fisik dan atau hayati mangrove yang dapat ditenggang dan dapat menentukan kondisi mangrove [28]. Kondisi mangrove di Kabupaten Pesawaran berada dalam kondisi baik seluas 562,31 ha (99%) dan kondisi rusak seluas 6,12 ha (1%).

Potensi Biomassa, Cadangan Karbon, dan Serapan CO_2 Lapangan

Berdasarkan data yang sudah dikumpulkan pada hutan mangrove Kabupaten Pesawaran dengan mengukur diameter pohon setinggi dada (dbh) dan menggunakan persamaan alometrik diperoleh total biomassa, cadangan karbon, dan serapan CO_2 dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 4. Grafik Potensi Biomassa, Cadangan Karbon, dan Serapan CO_2

Potensi Biomassa

Biomassa merupakan keseluruhan massa organik yang terdapat di atas permukaan pohon dan dinyatakan dengan satuan ton berat kering per satuan luas [47]. Para peneliti sebelumnya telah mengembangkan persamaan alometrik untuk menghitung biomassa pohon hutan mangrove [12]. Berdasarkan gambar diatas dapat diketahui bahwa biomassa tertinggi pada lokasi penelitian terdapat pada stasiun III yaitu sebesar 413,15 ton/ha sedangkan terendah terdapat pada stasiun II yaitu sebesar 134,81 ton/ha. Perbedaan besaran nilai biomassa pada setiap stasiun diduga dipengaruhi oleh diameter dan kerapatan jenis.

Menurut Hakim, yang menyatakan dalam penelitiannya, terdapat korelasi positif antara kerapatan jenis mangrove dengan biomassa mangrove [48]. Maka semakin tinggi kerapatan jenis mangrove, semakin tinggi juga kandungan biomassanya. Kerapatan tutupan lahan berpengaruh terhadap diameter tegakan [49]. Menurut Tuah, dalam penelitiannya menyatakan bahwa semakin besar diameter pohon maka semakin besar juga biomassa yang dihasilkan [50]. Pertumbuhan diameter pohon terjadi seiring bertambahnya usia tegakan yang menjadi faktor penting dalam memengaruhi potensi biomassa [51]. Bertambahnya usia, pohon menjadi lebih besar melalui proses fotosintesis [51]. Hal ini didukung oleh Suryono yang menyatakan bahwa biomassa terbentuk dari senyawa karbohidrat yang

mengandung unsur karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O) bersumber dari produksi oleh tanaman melalui proses fotosintesis [52]

Potensi Cadangan Karbon

Berdasarkan gambar diatas dapat diketahui bahwa cadangan karbon terbesar ada pada stasiun III sebesar 194,18 ton/ha sedangkan cadangan karbon terkecil ada pada stasiun II sebesar 63,36 ton/ha. Hal ini dikarenakan hasil biomassa yang telah didapat memberikan indikasi seberapa besar jumlah cadangan karbon yang ada. Karbon merupakan penyusun utama biomassa melalui proses fotosintesis [53]. Sekitar 45 – 50% dari biomassa tersusun oleh unsur karbon [46]. Cadangan karbon berbanding lurus dengan biomassa, dimana semakin tinggi nilai biomassa maka nilai cadangan karbon juga akan semakin tinggi [54].

Potensi cadangan karbon mangrove pada Kabupaten Pesawaran memiliki nilai 341,52 ton/ha. Nilai tersebut termasuk ke dalam kategori sangat baik dalam menyimpan cadangan karbon. Menurut IPCC, kelas karbon terbagi menjadi dua kategori yaitu kelas karbon kategori baik ketika cadangan karbon mencapai atau lebih dari 138 ton/ha dan kelas karbon kategori kurang baik apabila cadangan karbon di bawah 138 ton/ha [5]. Berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Rochmayanto, nilai yang didapat pada setiap stasiun sudah melewati nilai minimum cadangan karbon hutan mangrove tingkat nasional yaitu sebesar 41,8 ton/ha [55].

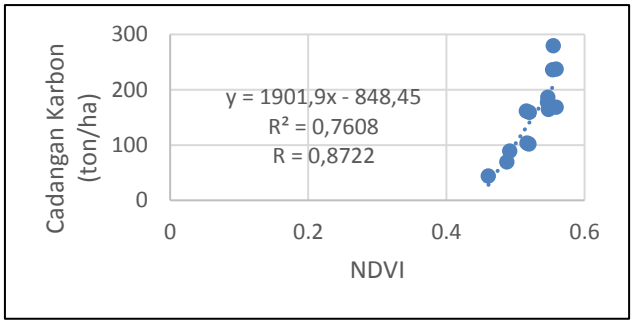
Potensi Serapan CO_2

Berdasarkan hasil serapan CO_2 yang telah didapatkan pada masing – masing stasiun penelitian di hutan mangrove Kabupaten Pesawaran disajikan pada gambar diatas. Stasiun 1 sebesar 307,96 ton/ha, stasiun II sebesar 232,34 ton/ha, dan stasiun III sebesar 712,07 ton/ha, serta total serapan sebesar 1252,36 ton/ha. Perbedaan serapan CO_2 pada masing – masing stasiun dipengaruhi oleh cadangan karbon. Hal tersebut dikarenakan penyerapan CO_2 memiliki hubungan dengan cadangan karbon [56]. Dapat dilihat dari gambar diatas bahwa kemampuan mangrove dalam menyerap CO_2 meningkat seiring dengan cadangan karbon pada vegetasi tersebut.

CO_2 diserap oleh pohon melalui proses fotosintesis. Penyerapan CO_2 melalui proses fotosintesis dengan melakukan difusi melewati stomata kemudian disimpan dalam bentuk biomassa [57]. CO_2 yang diserap digunakan dalam pembentukan dan pertumbuhan jaringan kemudian diubah menjadi O_2 dan karbohidrat lalu dikembalikan ke atmosfer [58]. Bagian CO_2 yang diserap pohon akan diubah menjadi energi untuk mendukung proses fotosintesis sementara sebagian lainnya akan dimasukkan ke dalam struktur pohon dan menjadi bagian dari berbagai komponen, seperti selulosa yang disimpan pada batang, akar, ranting, dan daun [59].

Model Pendugaan Cadangan Karbon

Hasil yang didapat pada hubungan korelasi antara NDVI dengan cadangan karbon dapat dilihat pada gambar dibawah.

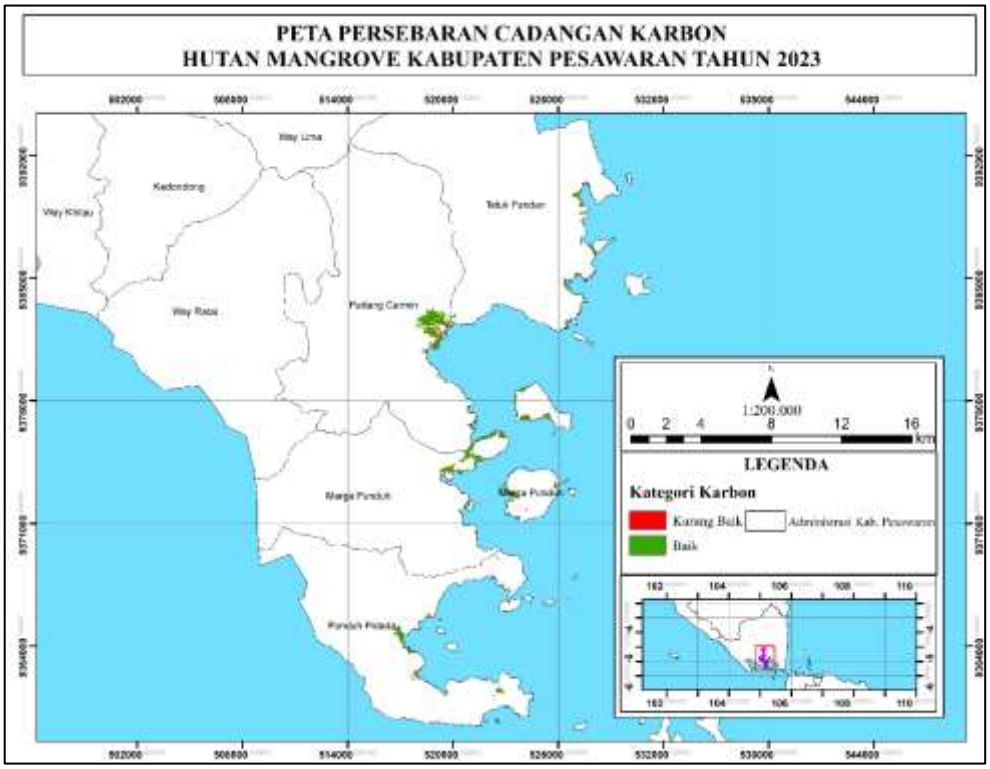


Gambar 5. Hubungan Korelasi

Berdasarkan gambar diatas didapatkan hasil nilai R^2 sebesar 0,7608 yang menunjukkan bahwa nilai NDVI dengan cadangan karbon mampu memengaruhi sebesar 76,08% terhadap cadangan karbon. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1. Ketika nilai mencapai 0 maka menunjukkan tidak adanya korelasi sama sekali sedangkan

apabila nilai mencapai 1 mengindikasikan bahwa adanya kesamaan sebaran antara prediksi dan observasi [60].

Potensi Cadangan Karbon



Gambar 6. Persebaran Cadangan Karbon

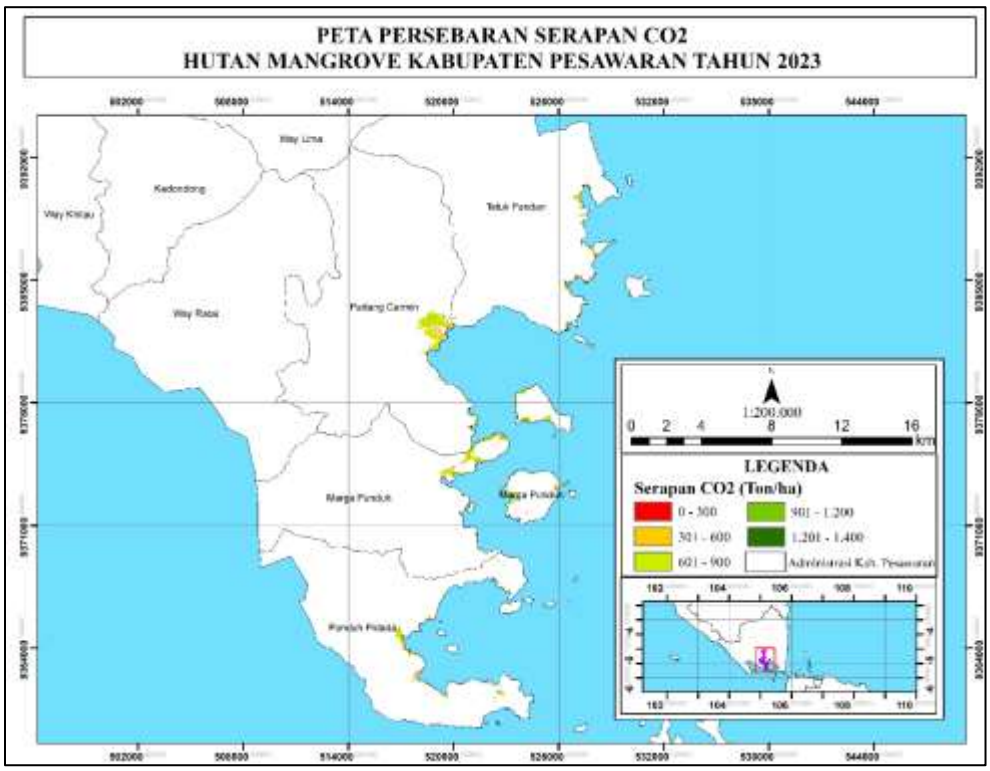
Berdasarkan gambar diatas didapatkan estimasi hasil cadangan karbon antar kecamatan yang dapat dilihat pada tabel dibawah

Tabel 11. Potensi Cadangan Karbon Antar Kecamatan

Kecamatan	Cadangan Karbon (Ton C)
Teluk Pandan	17.304,53
Padang Cermin	34.319,15
Marga Punduh	25.757,47
Punduh Pidada	14.347,32
Total	**91.728,47**

Perhitungan estimasi cadangan karbon menggunakan model yang sudah dibuat dengan nilai R^2 yaitu 0,7608. Cadangan karbon dibagi menjadi 2 kelas yaitu kurang baik dan baik. Sesuai dengan pernyataan IPCC, dimana cadangan karbon > 138 ton/ha dinyatakan dalam kondisi baik [5]. Total estimasi cadangan karbon yang dihasilkan menggunakan model yang sudah dibangun sebesar 91.728,47 ton C dengan luasan 568,43 ha dan mendapatkan 161,37 ton/ha. Nilai cadangan karbon di Kabupaten Pesawaran lebih besar jika dibandingkan dengan penelitian Husna, di hutan mangrove Tongke - Tongke, Sulawesi Selatan yaitu sebesar 6.431,46 ton C dengan luasan vegetasi 100,56 ha sehingga menghasilkan 63,96 ton/ha [61] tetapi lebih kecil bila dibandingkan dengan penelitian Rahadian, di hutan mangrove seluruh Indonesia yaitu 1.817.944.407,02 ton C dengan luasan kajian 3.156.744,78 ha yang mendapatkan 575,89 ton/ha [19]. Perbedaan estimasi cadangan karbon terjadi karena berbeda penggunaan persamaan alometrik [12]. Diameter pohon juga sangat memengaruhi besarnya cadangan karbon. Semakin besar diameter pohon maka cadangan karbon yang dihasilkan akan semakin besar.

Potensi Serapan CO_2



Gambar 7. Persebaran Serapan CO_2

Berdasarkan gambar diatas didapatkan serapan CO_2 setiap kecamatan yang dapat dilihat pada tabel dibawah

Tabel 12. Potensi Serapan CO_2 Antar Kecamatan

Kecamatan	Serapan CO2 (Ton CO_2)
Teluk Pandan	63.455,83
Padang Cermin	125.846,44
Marga Punduh	94.453,46
Punduh Pidada	52.611,74
Total	**336.367,47**

Hasil pendugaan estimasi serapan CO_2 didapat dari perkalian cadangan karbon dengan Mr CO_2 kemudian dibagi Ar C. Serapan CO_2 dibagi menjadi 5 kelas. Kelas terendah memiliki nilai dari 0 – 300 ton/ha sedangkan kelas tertinggi memiliki nilai 1.201 – 1.400 ton/ha. Total estimasi serapan CO_2 yang dihasilkan hutan mangrove Kabupaten Pesawaran ialah sebesar 336.367,47 ton CO_2.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Kondisi hutan mangrove di Kabupaten Pesawaran pada tahun 2023 didominasi oleh kondisi baik dengan luas 562,31 ha (99%) sementara 6,12 ha (1%) dalam kondisi rusak. Potensi serapan CO_2 yang dapat diserap oleh hutan mangrove Kabupaten Pesawaran ialah sebesar 336.367,47 ton CO_2 dan 591,75 ton CO_2/ha.

Saran

Saran pada penelitian selanjutnya yaitu perlu adanya penelitian lanjutan tentang biomassa di bawah permukaan tanah dan perlu dilakukan pemantauan kondisi hutan mangrove secara berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada pemberi dana penelitian atau

donatur. Ucapan terima kasih dapat juga disampaikan kepada pihak-pihak yang membantu pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

K. Samsu, A., "Pendugaan Potensi Simpanan Karbon Permukaan pada Ruang Terbuka Hijau di Hutan Kota Jompie Kecamatan Soreang Kota Pare-Pare," *J. Envisoil*, vol. 1, no. 1, pp. 34–43, 2019, [Online]. Available: http://www.elsevier.com/locate/scp

I. A. P. A. Sinthiya and D. Kusnadi, "Analisis Emisi Gas Rumah Kaca (Grk) Dan Pemetaan Zona Emisi Menggunakan Gis (Geospasial Information System) Di Kabupaten Pringsewu, Lampung," *Explor. J. Sist. Inf. dan Telemat.*, vol. 9, no. 2, 2018, doi: 10.36448/jsit.v9i2.1078.

KLHK, *Laporan IGRK MPV 2021*. 2022.

A. R. Rinjani, L. Setyaningsih, and A. R. Rusli, "Potensi Serapan Karbon di Jalur Hijau Kota Bogor (Studi Kasus: Jalan KH.Sholeh Iskandar dan Jalan Pajajaran)," *J. Nusa Sylva*, vol. 16, no. 1, pp. 32–40, 2016.

IPCC, "Climate Change 2014 Synthesis Report," in *IPCC*, 2014, pp. 1–151. doi: 10.1016/S0022-0248(00)00575-3.

V. N. Husna, "Estimasi Cadangan Karbon Biomassa di Atas Permukaan pada Tegakan Mangrove Menggunakan Pengindraan Jauh di Tongke-Tongke, Sulawesi Selatan," *J. Pengelolaan Sumberd. Alam dan Lingkung. (Journal Nat. Resour. Environ. Manag.*, vol. 9, no. 2, pp. 456–466, 2019, doi: 10.29244/jpsl.9.2.456-466.

V. Arianasari, R. Safe'i, A. Darmawan, and H. Kaskoyo, "Estimasi Simpanan Karbon di Atas Permukaan Tanah pada Hutan Rakyat di Kawasan Perkotaan, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung," *J. Ilmu Kehutan.*, vol. 15, no. 2, pp. 174–184, 2021, doi: 10.22146/jik.v15i1.1537.

P. D. Anggraeni, N. Mahmudati, and A. M. Hudha, "Analisis serapan karbon dioksida pada hutan lindung Gunung Banyak Kota Batu," in *Prosiding Seminar …*, 2021, pp. 275–282. [Online]. Available: http://research-report.umm.ac.id/index.php/psnpb/article/view/4762

M. A. Karim, A. I. Purwiyanto, and F. Agustriani, "Analisis Laju Produksi Kandungan Karbon (C) Serasah Daun Mangrove di Pulau Payung Kabupaten Banyuasin," vol. 11, no. 1, pp. 1–8, 2019.

S. Ramadhanti, "Pendugaan Simpanan Karbon Bagian Atas dan Bawah Permukaan Tanah pada Hutan Tanaman di Taman Hutan Raya Banten," Institut Pertanian Bogor, 2022.

R. Hakim, M. Asyari, and Suyanto, "Estimasi Cadangan Karbon Atas Permukaan Tanah di Kawasan Hutan Lindung Liang Anggang Kota Banjarbaru Kalimantan Selatan Estimation of Carbon Reserves Above Ground Level in Liang Anggang Protected Forest Area of Banjarbaru City South Kalimantan," *J. Sylva Sci.*, vol. 04, no. 5, 2021.

D. C. Donato, J. B. Kauffman, D. Murdiyarso, S. Kurnianto, and M. Stidham, "Mangrove adalah salah satu hutan terkaya karbon di kawasan tropis," *Br. CIFOR*, no. 12, pp. 1–12, 2012.

J. Howard, S. Hoyt, K. Isensee, E. Pidgeon, and M. Telszewski, *Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses*. 2019.

A. Wibowo, I. Samsoedin, Nurtjahjawilasa, Subarudi, and M. Z. Muttaqin, *Petunjuk Praktis Menghitung Cadangan Karbon Hutan*. 2013.

C. Giri *et al.*, "Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data," *Glob. Ecol. Biogeogr.*, vol. 20, no. 1, pp. 154–159, 2011, doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x.C. Giri, "Recent advancement in mangrove forests mapping and monitoring of the world using earth observation satellite data," *Remote Sens.*, vol. 13, no. 4, pp. 1–6, 2021, doi: 10.3390/rs13040563.

KLHK, *Peta Mangrove Nasional Tahun 2021*. 2021.

D. P. B. Prasetyo, R. A. T. Nuraini, and E. Supriyantini, "Estimation Carbon Stock on Mangrove Vegetation at Mangrove Area of Ujung Piring Jepara District," 2017. [Online]. Available: http://ejournal.undip.ac.id/index.php/ijmarccTembalangSemarang.50275Telp/fax

A. Rahadian, "Model Spasial Pendugaan Biomassa dan Karbon Mangrove di Indonesia," 2019.

N. Simarmata, F. Elyza, and R. Vatiady, "Kajian Citra Satelit Spot-7 Untuk Estimasi Standing Carbon Stock Hutan Mangrove Dalam Upaya Mitigasi Perubahan Iklim (Climate Changes) Di Lampung Selatan (the Study of Spot-7 Satellite for Standing Carbon Stock Estimation of Mangrove for Climate Change Mi," *J. Penginderaan Jauh dan Pengolah. Data Citra Digit.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–8, 2019, [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.30536/j.pjpdcd.2019.v16.a3050

LAPAN, "The Remote Sensing Monitoring Program of Indonesia's National Carbon Accounting System: Methodology and Products, Version 1," p. 96, 2014.

Z. Hidayah, H. A. Rachman, and A. R. As-syakur, "Pemetaan kondisi hutan mangrove di kawasan pesisir Selat Madura dengan pendekatan Mangrove Health Index memanfaatkan citra satelit Sentinel-2," vol. 37, no. 1, pp. 84–91, 2023, doi: 10.22146/mgi.78136.

Yuliasamaya, A. Darmawan, and R. Hilmanto, "Perubahan Tutupan Hutan Mangrove Di Pesisir Kabupaten Lampung Timur," *J. Sylva Lestari*, vol. 2, no. 3, pp. 111–124, 2014, doi: 10.23960/jsl32111-124.

P. K. Pesawaran, "Potensi Kehutanan," 2015. http://pesawarankab.go.id/potensi-2/potensi-3/ (accessed Jan. 26, 2015).

R. Davinsy, A. Kustanti, and R. Hilmanto, "Study of mangrove forest management in the pahawang island village marga punduh district pesawaran regency," *Sylva Lestari*, vol. 3, no. 3, pp. 95–106, 2015.I. G. Febryano, D. Suharjito, D. Darusman, C. Kusmana, and A. Hidayat, "The roles and sustainability of local institutions of mangrove management in Pahawang Island," *J. Manaj. Hutan Trop.*, vol. 20, no. 2, pp. 69–76, 2014, doi: 10.7226/jtfm.20.2.69.

Departemen Kehutanan, "Pedoman inventarisasi dan identifikasi lahan kritis mangrove," p. 13, 2005.

Kementerian Lingkungan Hidup, "Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup tentang Kriteria Baku dan Pedoman Penentuan Kerusakan Mangrove," 2004

W. S. Andini, Y. Prasetyo, and A. Sukmono, "Analisis Sebaran Vegetasi dengan Citra Satelit Sentinel menggunakan Metode NDVI dan Segmentasi (Studi Kasus: Kabupaten Demak)," *J. Geod. Undip*, vol. 7, no. 1, pp. 14–24, 2018.

A. Komiyama, S. Poungparn, and S. Kato, "Common Allometric Equations for Estimating the Tree Weight of Mangroves," *J. Trop. Ecol.*, vol. 21, no. 4, pp. 471–477, 2005, doi: 10.1017/S0266467405002476.

I. W. S. Dharmawan and C. A. Siregar, "Soil Carbon and Carbon Estimation of Avicennia alba at Ciasem, Purwakarta," *Penelit. Hutan dan Konserv. Alam*, vol. V, no. no-4, pp. 317–328, 2008.

BSN, *Pengukuran dan Penghitungan Cadangan Karbon – Pengukuran Lapangan untuk Penaksiran Cadangan Karbon Hutan (Ground Based Forest Carbon Accounting)*. 2011.

J. Sarwono and H. Budiono, *Statistik Terapan Aplikasi untuk Riset Skripsi, Tesis, dan Disertasi (Menggunakan SPSS, AMOS, dan Excel)*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo, 2012.

L. Wang, M. Mu, X. Li, P. Lin, and W. Wang, "Differentiation between true mangroves and mangrove associates based on leaf traits and salt contents," *J. Plant Ecol.*, vol. 4, no. 4, pp. 292–301, 2011, doi: 10.1093/jpe/rtq008.

I. G. M. Gito Hadiprayitno, dan M. Liwa Ilhamdi, Agil Al Idrus, "Kekhasan Morfologi Spesies Mangrove di Gili Sulat," *J. Biol. Trop.*, vol. 14, no. 2, 2014, doi: 10.29303/jbt.v14i2.139.

Indriyanto, *Ekologi Hutan*. Jakarta: PT. Bumi Aksara, 2006.

G. Raymond, N. Harahap, and Soemarno, "Pengelolaan Hutan Mangrove Berbasis Masyarakat Di Kecamatan Gending, Probolinggo," *Agritek*, vol. 18, no. 2, pp. 185–200, 2010.

I. Hanafi, Subhan, and H. Basri, "Analisis Vegetasi Mangrove (Studi Kasus di Hutan Mangrove Pulau Telaga Tujuh Kecamatan Langsa Barat)," *J. Ilm. Mhs. Pertan.*, vol. 6, no. 4, pp. 740–748, 2021, doi: 10.17969/jimfp.v6i4.18137.

A. D. Purwanto and W. Asriningrum, "Identification of Mangrove Forests Using Multispectral Satellite Imageries," *Int. J.*

Remote Sens. Earth Sci., vol. 16, no. 1, p. 63, 2019, doi: 10.30536/j.ijreses.2019.v16.a3097.

P. Danoedoro, *Pengantar Penginderaan Jauh Digital*. Yogyakarta: Penerbit Andi, 2012.

A. Mei, C. Manzo, G. Fontinovo, C. Bassani, A. Allegrini, and F. Petracchini, "Assessment of land cover changes in Lampedusa Island (Italy) using Landsat TM and OLI data," *J. African Earth Sci.*, vol. 122, pp. 15–24, 2016, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2015.05.014.

D. Pertami, I. W. Nuarsa, and I. D. N. Nurweda Putra, "Pemetaan Perubahan Penggunaan Lahan Wilayah Pesisir Kecamatan Rungkut, Kota Surabaya, Tahun 2013 dan 2019," *J. Mar. Res. Technol.*, vol. 5, no. 1, p. 10, 2022, doi: 10.24843/jmrt.2022.v05.i01.p03.

M. Hafizt and P. Danoedoro, "Kajian Pengaruh Koreksi Kolom Air pada Citra Multispektral Worldview-2 untuk Pemetaan Habitat Bentik di Pulau Kemujan Kepulauan Karimunjawa Kabupaten Jepara," *Pros. Pertem. Ilm. Tah. XX*, no. February 2015, 2016.

BIG, "Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar," 2014

S. Irawan and J. Sirait, "Perubahan Kerapatan Vegetasi Menggunakan Citra Landsat 8 Di Kota Batam Berbasis Web," *J. Kelaut. Indones. J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 2, p. 174, 2018, doi: 10.21107/jk.v10i2.2685.

A. Irawan, Isnaini, and A. Agussalim, "Analisis Perubahan Luasan dan Kerapatan Mangrove Menggunakan Data Citra Satelit Spot di Pesisir Teluk Pandan Kabupaten Pesawaran Provinsi Lampung," *J. Penelit. Sains*, vol. 21, no. 1, pp. 51–60, 2019.

F. F. Muhsoni, A. B. Sambah, M. Mahmudi, and D. G. R. Wiadnya, "Comparison of different vegetation indices for assessing mangrove density using sentinel-2 imagery," *Int. J. GEOMATE*, vol. 14, no. 45, pp. 42–51, 2018, doi: 10.21660/2018.45.7177.

S. Brown, "Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. (FAO Forestry Paper - 134)," *FAO For. Pap. 134*, no. January 1997, pp. 1–4, 1997, [Online]. Available: www.fao.org/docrep/w4095e/w4095e00.htm

M. A. Hakim, N. Kariada, T. Martuti, and A. Irsadi, "Estimasi Stok Karbon Mangrove di Dukuh Tapak Kelurahan Tugurejo Kota Semarang," *Life Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 87–94, 2016.

R. R. Safitri *et al.*, "Analisis Cadangan Karbon pada Tegakan Hutan Alam Sekunder Suaka Margasatwa Gunung Tunggangan Kabupaten Sragen Provinsi Jawa Tengah," *Semin. Nas. dalam Rangka Dies Natalis ke 47 UNS Tahun 2023*, vol. 7, no. 1, pp. 1215–1227, 2023.

N. Tuah, R. Sulaeman, and D. Yoza, "Penghitungan Biomassa dan Karbon di Atas Permukaan Tanah di Hutan Larangan Adat Rumbio Kab Kampar," *JOM Faperta UR*, vol. 4, no. 1, pp. 1–10, 2017.F. D. Sari, G. Anwar, and E. Suharto, "Potensi biomassa dan simpanan karbon pada agroforestri kayu bawang (Azadirachta excelsa Jacobs) dan kelapa sawit (Elaeis guineensis Jacq.)," *J. Glob. For. …*, vol. 2, no. 3, pp. 52–62, 2022, [Online]. Available: https://ejournal.unib.ac.id/jhutanlingkungan/article/view/25725%0Ahttps://ejournal.unib.ac.id/jhutanlingkungan/article/download/25725/11428

Suryono, N. Soenardjo, E. Wibowo, R. Ario, and E. F. Rozy, "Estimation of Biomass Content and Carbon in Perancak Mangrove Forest Jembrana Regency of Bali Province," *Bul. Oseanografi Mar.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2018.

Yuniawati and S. Suhartana, "Potensi Karbon pada Limbah Pemanenan Kayu Acacia Crassicarpa (Carbon Potential of Waste Timber Harvesting Acacia Crassicarpa)," *J. Ilmu Lingkung.*, vol. 12, no. 1, p. 21, 2014, doi: 10.14710/jil.12.1.21-31.

Asbar and M. Yunus, "Estimation of Carbon Absorption on Basic Substrate Based on Mangrove Density Level in The Lantebung Eco-Tourism Area, Makassar," *J. Indones. Trop. Fish. ISSN*, vol. 2655, no. 1, pp. 99–109, 2022.

Y. Rochmayanto, A. Wibowo, M. Lugina, T. Butarbutar, R. Mulyadin, and D. Wicaksono, *Cadangan Karbon pada Berbagai Tipe Hutan dan Jenis Tanaman Indonesia*, no. Seri 2. PT Kanisius, 2014.

N. M. Heriyanto and E. Subiandono,

"Komposisi dan Struktur Tegakan, Biomassa, dan Potensi Kandungan Karbon Hutan Mangrove di Taman Nasional Alas Purwo," *J. Penelit. Hutan dan Konserv. Alam*, vol. 9, no. 1, pp. 23–32, 2012, doi: 10.20886/jphka.2008.5.3.239-249.

W. A C, "Struktur Komunitas Hutan Manfrove, Estimasi Karbon Tersimpan, dan Perilaku Masyarakat Sekitar Kawasan Segara Anakan Cilacap," Universitas Jenderal Sudirman, 2014.

N. Sulistiyono and S. A. Hudjimartsu, "Potential of above-ground biomass (AGB) of mangrove vegetation restoration in Lubuk Kertang," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 782, no. 3, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/782/3/032036.

M. N. Fitrah, "Dinamika Perubahan Stok Karbon Biomassa pada Ekosistem Mangrove Menggunakan Data Satelit dan Pengukuran Karbon Permukaan di Pulau Bauluang," Universitas Hasanuddin, 2019.