

ESTIMASI PERUBAHAN STOK KARBON DAN SERAPAN CO₂ PADA EKOSISTEM MANGROVE TAHUN 2019-2024 DI KARAWANG MENGUNAKAN SENTINEL 2A

(PROVENANCE AND WEATHERING PROCESSES OF SEAFLOOR SEDIMENTS AROUND SALAHNAMO AND PANDANG ISLANDS, NORTH SUMATRA: INSIGHTS FROM MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL ANALYSES)

Angelina Yohana Romauli^{1*}, Tri Muji Susantoro², Nineu Yuyu Gerhaneu³

¹ Teknik Kelautan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Karawang, Kementerian Kelautan dan Perikanan

² Pusat Riset Geoinformatika-Badan Riset dan Inovasi Nasional

³ Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan-Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

*yrs.angelina@gmail.com

Diterima : 21 Februari 2025 Disetujui : 30 November 2025

ABSTRAK

Gas rumah kaca mengakibatkan perubahan pola curah hujan, peningkatan frekuensi badai, naiknya permukaan air laut, menurunnya salinitas, dan meningkatnya sedimentasi di wilayah pesisir dan laut. Mangrove sebagai ekosistem pesisir mempunyai peran penting dalam mengurangi dampak gas rumah kaca melalui penyerapan karbon yang lebih baik dari hutan biasa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui estimasi kerapatan vegetasi, biomassa atas tanah, biomassa bawah tanah, total akumulasi biomassa, stok karbon total, serta jumlah serapan CO₂ pada ekosistem mangrove di Kecamatan Cilebar dan Tempuran, Kabupaten Karawang. Penelitian ini melakukan analisis terintegrasi terhadap pengolahan data Sentinel 2A, melalui survei lapangan dan perhitungan estimasi stok dan serapan karbon menggunakan rumus allometrik. Hasil penelitian di Kecamatan Cilebar dan Tempuran, Kabupaten Karawang menunjukkan estimasi stok karbon mangrove pada tahun 2019 bernilai 38,912-48,64 ton/ha pada area seluas 121,81 ha. Tahun 2021 stok karbon mangrove bernilai 41,58-51,975 ton/ha seluas 148,81 ha. Tahun 2024 stok karbon mangrove bernilai 45,032-56,29 ton/ha seluas 179,47 ha. Hasil analisis lanjutan serapan CO₂ pada tahun 2019 bernilai 127,08- 169,46 ton/ha dengan luas 121,81 ha. Tahun 2021 serapan CO₂ bernilai 132,3950-176,52 ton/ha seluas 148,81 ha. Tahun 2024 serapan

CO₂ bernilai 137,04-182,72 ton/ha seluas 179,47 ha. Penambahan serapan karbon terjadi karena keberhasilan rehabilitasi, pencegahan kerusakan, serta lingkungan yang cocok untuk pertumbuhan mangrove.

Kata kunci: Mangrove, CO₂, Karbon, Sentinel 2A.

ABSTRACT

Greenhouse gases cause changes in rainfall patterns, increased storm frequency, rising sea levels, decreased salinity, and increased sedimentation in coastal and marine areas. Mangroves as coastal ecosystems play a crucial role in mitigating the impact of greenhouse gases through better carbon sequestration than conventional forests. This study aims to determine the estimated vegetation density, aboveground biomass, belowground biomass, total biomass accumulation, total carbon stock, and the amount of CO₂ absorption in mangrove ecosystems in Cilebar and Tempuran Districts, Karawang Regency. This study conducted an integrated analysis of Sentinel 2A data processing, through field surveys and calculations of carbon stock and absorption estimates using allometric formulas. The results of the study in Cilebar and Tempuran Districts, Karawang Regency, showed that the estimated mangrove carbon stock in 2019 was 38,912-48.64 tons/ha over an area of 121.81 ha. In 2021, the mangrove carbon stock was 41.58-51,975 tons/ha over an area of 148.81 ha. In 2024, mangrove carbon stocks were valued at 45,032-56.29 tons/ha over an area of 179.47 ha. Further analysis of CO₂ absorption in 2019 showed a value of 127.08-169.46 tons/ha over an area of 121.81 ha. In 2021, CO₂ absorption was valued at 132.39-176.52 tons/ha over an area of 148.81 ha. In 2024, CO₂ absorption was valued at 137.04-182.72 tons/ha over an area of 179.47 ha. The increase in carbon absorption occurred due to successful rehabilitation, prevention of destruction, and a suitable environment for mangrove growth.

Keyword: Mangrove, CO₂, Carbon, Sentinel 2A.

PENDAHULUAN

Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca akibat aktivitas manusia telah menyebabkan pemanasan global, yang saat ini menjadi salah satu isu paling mendesak di dunia. Gas-gas seperti: karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan oksida nitrat (N₂O) berperan penting dalam proses pemanasan atmosfer bumi. Kenaikan konsentrasi CO₂ di atmosfer, yang sebagian berasal dari bahan bakar (Herlina et al., 2025), berkontribusi langsung pada perubahan iklim (Darmawan et al., 2022). Dampak fenomena ini mencakup perubahan pola curah hujan, peningkatan frekuensi badai, dan kenaikan permukaan air laut akibat pemuatan termal (Ainurrohman & Sudarti, 2022). Pemanasan global juga mempercepat pencairan es di kutub, menurunkan salinitas, dan meningkatkan sedimentasi di wilayah pesisir. Kondisi ini mengancam keberlanjutan ekosistem pesisir sebagai penyangga kehidupan (Cahyo, 2010) serta berpotensi menenggelamkan pulau-pulau kecil, seperti yang terindikasi dari berkurangnya luasan pulau (Geurhaneu & Susantoro, 2016).

Ekosistem hutan mangrove luasnya hanya sekitar 2% di permukaan bumi, sehingga menjadi salah satu ekosistem yang langka di dunia (Setyawan & Winarno, 2006). Menurut Giri et al., (2011), total luas hutan mangrove dunia pada tahun 2000 sekitar

137.760 km² yang tersebar di 118 negara dan berbagai teritorial di daerah tropis dan subtropis, dengan persentase sebaran terbesar berada pada 5° lintang utara sampai 5° lintang selatan. Menurut *International Union for Conservation of Nature* (IUCN), 75% dari total tersebut berada di 15 negara, tetapi hanya 6,9% yang berstatus dilindungi. Indonesia memiliki hutan mangrove terluas di dunia (3,2 juta ha atau 22,6% dari total global) (Pokja Mangrove Nasional, 2013; DasGupta & Shaw, 2013). Keberadaan mangrove krusial karena daya serap CO₂ nya jauh lebih tinggi dibandingkan tanaman darat, dengan optimalitas penyerapan karbon dilaporkan mencapai 77,9% (Sofyan et al., 2016). Pentingnya estimasi stok karbon mangrove sangat vital untuk strategi mitigasi pemanasan global dan menekankan urgensi konservasi ekosistem ini (Senoaji & Hidayat, 2016).

Penginderaan jauh merupakan data penting yang digunakan untuk monitoring perkembangan mangrove (Crystiana et al., 2021). Citra satelit Sentinel 2A, yang menawarkan data multispektral dengan resolusi spasial dan temporal tinggi, menjadi pilihan tepat untuk estimasi stok karbon (Drusch et al., 2012). Teknologi ini memungkinkan pengambilan data permukaan bumi secara konsisten dan akurat (Morton et al., 2003) sekaligus

menghemat waktu dan biaya dibandingkan pengukuran lapangan langsung (Turner et al., 2003).

Penelitian ini bertujuan mengestimasi kerapatan vegetasi, biomassa atas tanah, biomassa bawah tanah, total akumulasi biomassa, stok karbon total, serta jumlah serapan CO₂ pada ekosistem mangrove di Kecamatan Cilebar dan Tempuran, Kabupaten Karawang menggunakan metode allometrik. Lokasi ini dipilih karena ekosistem mangrovenya belum banyak diteliti, padahal memiliki potensi besar dalam penyimpanan karbon untuk mitigasi perubahan iklim. Mangrove di Karawang tidak hanya berfungsi sebagai pelindung pesisir, tetapi juga penyimpan karbon yang penting bagi keberlanjutan lingkungan.

METODE

Lokasi Studi

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 17 Juli 2024-16 Oktober 2024. Untuk mengolah data dilakukan di laboratorium Penginderaan Jauh, Pusat Riset Geoinformatika Badan Riset Inovasi dan Nasional (PRGI BRIN). Lokasi penelitian berada pada 5 Desa yaitu: Desa Mekarpohaci, Desa Tanjungjaya, Desa Sumberjaya, Desa Cikuntul, serta Desa Ciparageya. Peta Lokasi Studi dan Distribusi Titik Survei Lapangan dapat dilihat pada Gambar 1.

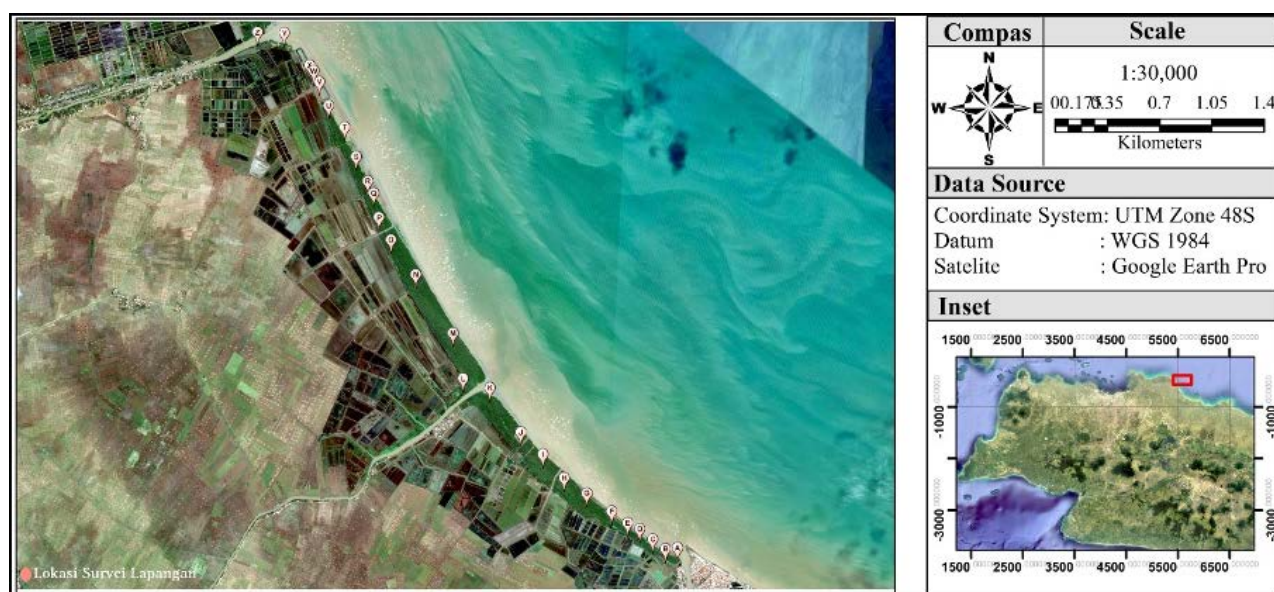
Data Citra dan Pengolahannya

Data citra satelit yang digunakan dalam penelitian ini adalah Sentinel 2A, merupakan bagian dari program Copernicus yang diluncurkan oleh Badan Antariksa Eropa (ESA), menyediakan data dengan resolusi tinggi dan spektrum yang baik untuk

analisis stok dan serapan CO₂. Karakteristik citra satelit Sentinel 2A dapat dilihat pada Tabel 1.

Pengolahan data citra Sentinel 2A untuk analisis karbon stok dan serapan CO₂ menggunakan metode allometrik. Metode ini ditemukan oleh George A. Harrison dan dikembangkan lebih lanjut oleh Julian Huxley dan A. W. Huxley pada awal abad ke-20. Akuisisi citra satelit dilakukan pada 3 tahun yang berbeda, yaitu: tanggal 25 Mei 2019, 03 Juli 2021, dan 17 Juni 2024. Tahapan penelitian diawali dengan pengolahan citra satelit Sentinel 2A guna menghitung nilai *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) sebagai indikator kerapatan vegetasi. Nilai NDVI yang diperoleh kemudian divalidasi dengan hasil survei lapangan. Jika tidak sesuai, dilakukan penyesuaian hingga data valid. Tahap berikutnya adalah perhitungan beberapa parameter penting dalam ekosistem mangrove, yaitu: biomassa di atas tanah (AGB), biomassa di bawah tanah (BGB), biomassa total (TBA), stok karbon total (TCS), dan serapan CO₂. Analisis ini bertujuan untuk memahami distribusi dan potensi karbon yang tersimpan dalam ekosistem mangrove. Akhirnya, dilakukan perhitungan serapan CO₂, dan seluruh data diolah menjadi peta hasil yang menggambarkan distribusi biomassa serta stok karbon dalam ekosistem mangrove. Gambar 2 menunjukkan prosedur kerja penelitian.

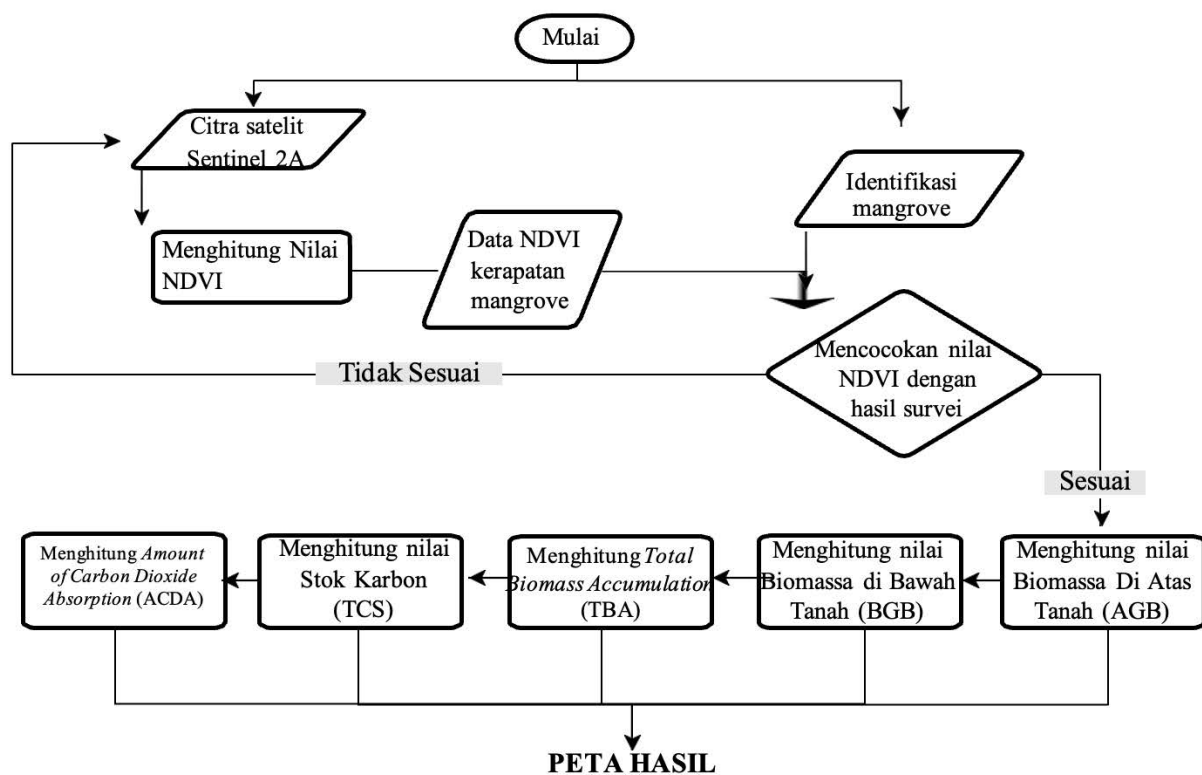
NDVI merupakan indeks yang digunakan untuk mengukur tingkat kehijauan vegetasi dan mengkaji kerapatan vegetasi atau perubahan kesehatan tanaman. Tingkat kehijauan yang dimaksudkan merupakan representasi dari jumlah klorofil pada sebuah vegetasi (Hadi et al., 2023). Semakin rindang suatu tumbuhan, NDVI yang diperoleh semakin



Gambar 1. Peta Lokasi Studi dan Distribusi Titik Survei Lapangan

Tabel 1. Rincian Bands Sentinel 2A

Sentinel 2 bands	Sentinel 2A		Spatial resolution (m)
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	
<i>Band 1-Coastal aerosol</i>	442,7	21	60
<i>Band 2-Blue</i>	492,4	66	10
<i>Band 3-Green</i>	559,8	36	10
<i>Band 4-Red</i>	664,6	31	10
<i>Band 5-Vegetation red edge</i>	704,1	15	20
<i>Band 6-Vegetation red edge</i>	740,5	15	20
<i>Band 7-Vegetation red edge</i>	782,8	20	20
<i>Band 8-NIR</i>	832,8	106	10
<i>Band 8A-Narrow NIR</i>	864,7	21	20
<i>Band 9-Water vapour</i>	945,1	20	60
<i>Band 10-SWIR – Cirrus</i>	1373,5	31	60
<i>Band 11-SWIR</i>	1613,7	91	20
<i>Band 12-SWIR</i>	2202,4	175	20



Gambar 2. Diagram Alir Prosedur Kerja

besar (Formula 1 dan Tabel 2). Penggunaan NDVI ini, karena diindikasikan mempunyai akurasi yang baik untuk memetakan mangrove ataupun vegetasi secara umum (Dammayatri et al., 2023; Susantoro et al., 2020).

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} = \frac{(Band\ 8 - Band\ 4)}{(Band\ 8 + Band\ 4)} \quad (1)$$

Keterangan:

NIR= radiasi inframerah dekat dari piksel.

Red= radiasi cahaya merah dari piksel

Tabel 2. Kelas Klasifikasi NDVI

Kelas	Interval	Keterangan
1	-1--0,03	Tanpa vegetasi
2	-0,03-0,15	Kehijauan sangat rendah
3	0,15-0,25	Kehijauan rendah
4	0,25-0,35	Kehijauan sedang
5	0,35-1	Kehijauan tinggi

Sumber : Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor : P.12/Menhut-II/2012.

Penghitungan biomassa atas tanah (*above ground biomass/AGB*) merujuk pada total massa bahan organik hidup yang berada di atas permukaan

tanah dalam ekosistem tertentu, terutama di hutan atau kawasan vegetasi (Hartoyo et al., 2022). Penghitungan biomassa ini mencakup semua komponen vegetasi hidup seperti batang, cabang, daun, bunga, buah dan bagian mangrove lain yang berada di atas permukaan tanah (Iswandar et al., 2017). Estimasi nilai biomassa atas tanah dilakukan dengan menggunakan hasil korelasi dengan pendekatan NDVI yaitu sebesar 0,787 (Jha et al., 2015). Rumus yang digunakan dapat dilihat pada Formula 2.

$$\text{AGB (ton/ha)} = 305.8 \times \text{NDVI}^{4.864} \quad (2)$$

Penghitungan biomassa bawah tanah (*below ground biomass/BGB*) merupakan total massa bahan organik hidup yang berada di bawah permukaan tanah dalam ekosistem tertentu (Murdiyarso et al., 2021). Penghitungan komponen utama biomassa bawah tanah meliputi sistem akar, serta mikroorganisme yang berasosiasi dengan akar, seperti mikoriza. Estimasi BGB diperoleh dari perkiraan AGB yang dirumuskan dengan menggunakan persamaan yang disusun oleh Cairns et al., (1997) pada Formula 3.

$$\text{BGB (ton/ha)} = \exp(-1,0587 + 0,8836 * \text{Ln (AGB)}) \quad (3)$$

Keterangan:

$\exp$ = exponential function

Ln = natural logarithm

Penghitungan total akumulasi biomassa (*total biomass accumulation/TBA*) merupakan pengukuran komprehensif yang mencerminkan produktivitas dan kesehatan ekosistem. Penghitungan ini mencakup semua komponen hidup dalam ekosistem dan dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, jenis vegetasi, dan aktivitas manusia (Muarif, 2017), dengan rumus dapat dilihat pada Formula 4.

$$\text{TBA (ton/ha)} = \text{AGB} + \text{BGB} \quad (4)$$

Penghitungan stok karbon total (*total carbon stock/TCS*) menggunakan metode yang dikembangkan dengan stok karbon yang diestimasi dari biomasanya dengan aturan 46% biomassa. Hasil perhitungan stok karbon dalam unit kilogram, oleh karena itu konversi penghitungan stok karbon selanjutnya menggunakan satuan ton. Perhitungan TCS berdasarkan Westlake (1963) menggunakan rumus pada Formula 5.

$$\text{TCS (ton/ha)} = \text{TBA} + \%C_{\text{organic}} \quad (5)$$

Keterangan:

$\%C_{\text{organic}}$ = Nilai persentase cadangan karbon = 0,46

Perhitungan jumlah serapan karbondioksida (*amount of carbon dioxide absorption/ACDA*) mengacu pada total CO₂ yang diserap dan disimpan oleh berbagai komponen ekosistem, baik oleh vegetasi, tanah, maupun lautan. Penyerapan CO₂ ini berperan penting dalam mengatur konsentrasi CO₂ di atmosfer dan mempengaruhi perubahan iklim global. Dengan memahami dan memantau jumlah serapan CO₂, kita dapat lebih baik mengelola dan melindungi ekosistem untuk mengatasi tantangan perubahan iklim global. Perhitungan ini menggunakan rumus dari IPCC (2001) seperti pada Formula 6.

$$\text{ACDA (ton/ha)} = 3,67 * \text{TCS} \quad (6)$$

Keterangan:

TCS: *Total Carbon Stock* (ton C/ha-1)

Survei Lapangan

Survei lapangan dilakukan untuk memverifikasi data NDVI. Hal ini merupakan langkah penting dalam proses pengumpulan dan analisis data vegetasi. Proses ini melibatkan pengukuran langsung di lokasi yang sama dengan area yang dianalisis menggunakan citra satelit untuk memastikan bahwa nilai NDVI yang dihasilkan akurat dan dapat diandalkan. Survei lapangan mengumpulkan data estimasi kerapatan hutan mangrove dalam persen (%), tinggi pohon (m), serta substrat. Lokasi survei dapat dilihat pada Gambar 1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Tutupan Mangrove Berdasarkan NDVI

Berdasar analisis NDVI, dapat diidentifikasi bahwa pada lokasi kajian terdapat 5 tutupan mangrove. Perubahan luasan mangrove terjadi dari tahun 2019-2024 meliputi lahan tidak bermangrove, dan lahan bermangrove dengan tingkat kehijauan sedang dan tinggi bertambah, sedangkan lahan dengan mangrove dengan tingkat kehijauan sangat rendah dan rendah berkurang (Tabel 3). Kondisi ini membuktikan bahwa secara umum kondisi mangrove di lokasi studi semakin membaik, karena area mangrove dengan tingkat kehijauan sedang dan tinggi meningkat. Kondisi ini sesuai dengan kajian Susantoro et al., (2020) yang menyatakan bahwa perkembangan mangrove di area pantai utara Jawa, seperti di Brebes semakin membaik. Apalagi masyarakat semakin memahami fungsi mangrove untuk mencegah abrasi dan juga ekonomi. Keberadaan mangrove di lokasi kajian juga tidak terpengaruh oleh adanya tumpahan minyak yang terjadi di wilayah laut bagian utara Karawang yang

Tabel 3. Perubahan Luas Tutupan Lahan di Lokasi Studi

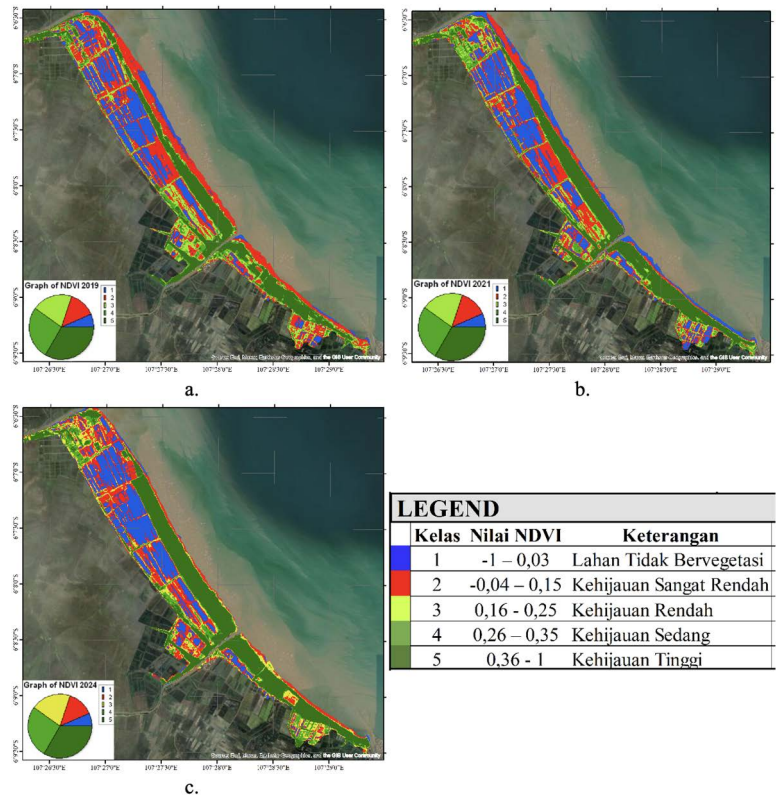
Kelas	Nilai NDVI	Tutupan Mangrove	Luas (ha)			Perubahan (ha)	
			2019	2021	2024	2019-2021	2021-2024
1	-1--0,03	Lahan tidak bervegetasi (non mangrove)	115,36	142,95	117,01	(+)27,59	(-)25,94
2	-0,03-0,15	Kehijauan sangat rendah	176,14	132,24	119,02	(-)43,9	(-)13,22
3	0,15-0,25	Kehijauan rendah	77,31	67,86	66,71	(-)9,45	(-)1,15
4	0,25-0,35	Kehijauan sedang	46,04	44,8	54,45	(-)1,24	(+)9,65
5	0,35-1	Kehijauan tinggi	121,81	148,81	179,47	(+)27	(+)30,66

kemudian mengalir ke pesisir (Matahelemual et al., 2020).

Tahun 2019 lahan tidak bervegetasi mangrove tersebar di bagian pesisir utara hingga selatan dengan luas 115,36 ha yang kemudian pada tahun 2021 bertambah sekitar 27,59 ha menjadi 142,95 ha (Gambar 3). Luas area tersebut kemudian pada tahun 2024 berkurang menjadi 117,01 ha. hal ini menunjukkan pada tahun 2021-2024 terjadi rehabilitasi mangrove yang baik, sehingga area tidak bervegetasi mangrove menjadi lebih rendah. Rehabilitasi mangrove secara umum telah digalakkan di pantai utara Jawa.

Tutupan lahan mangrove dengan tingkat kehijauan yang sangat rendah dari tahun 2019-2024 cenderung berkurang, yaitu dari 176,14 ha menjadi 119,02 ha. Artinya pada area tersebut mangrove

tumbuh dan berkembang dengan baik. Gambar 3 dapat diidentifikasi bahwa lokasi mangrove dengan tingkat kehijauan sangat rendah menyebar di sepanjang garis pantai dan daerah daratan dekat pesisir. Hal ini konsisten dari tahun 2019-2024. Area mangrove dengan tingkat kehijauan rendah pada tahun 2019-2024 tersebar di bagian barat daya hingga tengah lokasi kajian. Luas area tutupan mangrove dengan tingkat kehijauan rendah semakin berkurang dari tahun 2019-2024, yaitu dari 77,31 ha menjadi 66,71 ha. Tutupan mangrove dengan tingkat kehijauan sedang dan tinggi cenderung bertambah dari tahun 2019-2024. Tutupan mangrove dengan tingkat kehijauan sedang ditemukan bagian timur laut lokasi studi, sedangkan tutupan mangrove dengan tingkat kehijauan tinggi tersebar di



Gambar 3. Peta Tutupan mangrove Kabupaten Karawang. a. 25 Mei 2019. b. 3 Juli 2021, dan c. 17 Juni 2024

Tabel 4. Data *Groundcheck* atau Pengecekan Lapangan

Lokasi Survei	Estimasi Kerapatan Hutan Mangrove (%)	Tinggi Pohon (m)	Substrat
(A) 6° 9'25,19"S, 107°29'20,08"E	71,5	13	Lumpur berpasir
(B) 6° 9'25,73"S, 107°29'15,82"E	0		Air
(C) 6° 9'22,57"S, 107°29'11,16"E	44	8	Lumpur berair
(D) 6° 9'19,20"S, 107°29'6,41"E	49,5	9	Lumpur berair
(E) 6° 9'17,32"S, 107°29'2,09"E	27,5	5	Lumpur berair
(F) 6° 9'13,52"S, 107°28'56,24"E	60,5	11	Lumpur berpasir
(G) 6° 9'7,67"S, 107°28'47,19"E	100	18	Lumpur berpasir
(H) 6° 9'2,65"S, 107°28'38,93"E	77	14	Lumpur berpasir
(I) 6° 8'54,77"S, 107°28'31,02"E	82,5	15	Lumpur berpasir
(J) 6° 8'47,38"S, 107°28'22,83"E	0		Air
(K) 6° 8'32,40"S, 107°28'11,14"E	71,5	13	Lumpur berpasir
(L) 6° 8'29,56"S, 107°28'1,51"E	38,5	7	Lumpur berair
(M) 6° 8'13,73"S, 107°27'57,12"E	100	18	Lumpur berpasir
(N) 6° 7'53,65"S, 107°27'42,85"E	82,5	15	Lumpur berpasir
(O) 6° 7'41,79"S, 107°27'33,45"E	60,5	11	Lumpur berpasir
(P) 6° 7'34,02"S, 107°27'28,70"E	49,5	9	Lumpur berair
(Q) 6° 7'25,56"S, 107°27'26,42"E	93,5	17	Lumpur berpasir
(R) 6° 7'21,38"S, 107°27'24,08"E	82,5	15	Lumpur berpasir
(S) 6° 7'12,87"S, 107°27'19,49"E	100	18	Lumpur berpasir
(T) 6° 7'2,58"S, 107°27'14,83"E	55	10	Lumpur berpasir
(U) 6° 6'55,17"S, 107°27'8,68"E	88	16	Lumpur berpasir
(V) 6° 6'46,82"S, 107°27'4,97"E	0		Air
(W) 6° 6'42,95"S, 107°27'2,74"E	49,5	9	Lumpur berair
(X) 6° 6'40,99"S, 107°27'1,14"E	38,5	7	Lumpur berair
(Y) 6° 6'29,82"S, 107°26'51,45"E	55	10	Lumpur berpasir
(Z) 6° 6'30,07"S, 107°26'41,86"E	44	8	Lumpur berair

sepanjang bagian pesisir utara hingga tengah lokasi studi.

Verifikasi lapangan terhadap tutupan mangrove hasil analisis NDVI pada citra Sentinel 2A menunjukkan kesesuaian yang tinggi. Tutupan mangrove dengan tingkat kehijauan tinggi, pada survei lapangan menunjukkan area tersebut mempunyai kerapatan mangrove tinggi (di atas 70%), sedangkan pada lokasi survei dengan area tanpa vegetasi mangrove atau air hasil analisis NDVI menunjukkan lahan tidak bervegetasi juga. Demikian juga untuk verifikasi pada area mangrove dengan tingkat kehijauan sangat rendah, rendah dan sedang, hasil verifikasi lapangan menunjukkan kesesuaian yang baik. Tabel 4 menunjukkan hasil *groundcheck* yang digunakan untuk verifikasi hasil analisis NDVI.

Kandungan Biomassa pada Mangrove

Hasil perhitungan AGB, BGB dan TBA dapat dilihat pada Tabel 5. Tahun 2019 AGB tertinggi mempunyai nilai berkisar antara 28,784-35,98 ton/ha dengan luas 46,04 ha, sedangkan pada area studi yang tidak bervegetasi mempunyai luas 115,35 ha.

Perubahan terjadi pada tahun 2021, ketika AGB tertinggi mempunyai nilai 30,52-38,15 ton/ha dan mempunyai luas bertambah menjadi 67,86 ha. Namun demikian lahan yang tidak bervegetasi bertambah menjadi 142,95 ha. Kondisi ini semakin membaik, tahun 2024 AGB tertinggi bernilai 32,04-40,05 ton/ha luasan bertambah menjadi 66,71 ha. Adapun luas area yang tidak bervegetasi berkurang menjadi 117,01 ha.

Hasil perhitungan BGB menunjukkan bahwa BGB tertinggi pada tahun 2019 mempunyai nilai 63,92-79,90 ton/ha dengan luas 121,81 ha, sedangkan pada tahun 2021 BGB tertinggi bernilai 66,20-82,75 ton/ha dan bertambah luas menjadi 148,81 ha. Kemudian tahun 2024 BGB tertinggi bernilai 68,176-85,22 ton/ha, dan luas area meningkat menjadi 179,47 ha (Gambar 4).

Berdasarkan Tabel 5, dapat dilihat bahwa hasil analisis total akumulasi biomassa (TBA) pada lokasi kajian meningkat dari tahun 2019-2024. TBA yang semula 115,88 ton/ha menjadi 120,9 ton/ha pada tahun 2021 dan meningkat lagi menjadi 125,27 ton/ha pada tahun 2024. Peningkatan ini merupakan bagian penting dari usaha mitigasi pemanasan global

Tabel 5. Perbandingan Data AGB, BGB dan TBA di Lokasi Kajian Pada Periode Tahun 2019 Hingga 2024

Tahun	2019		2021		2024	
Biomassa	AGB	BGB	AGB	BGB	AGB	BGB
Tutupan mangrove-kehijauan sangat rendah	7,196-14,932	15,98-31,96	7,63-15,26	16,55-33,10	8,01-16,02	17,044-34,088
Tutupan mangrove-kehijauan rendah	14,932-21,588	31,96-47,94	15,26-22,89	33,10-49,65	16,02-23,03	34,088-51,132
Tutupan mangrove-kehijauan sedang	21,588-28,784	47,94-63,92	22,89-30,52	49,65-66,20	23,03-32,04	51,132-68,176
Tutupan mangrove-kehijauan tinggi	28,784-35,98	63,92-79,90	30,52-38,15	66,20-82,75	32,04-40,05	68,176-85,22
Total Biomassa (ton/ha)	115.88		120.9		125.27	

melalui rehabilitasi mangrove di lokasi kajian. Apalagi mangrove mempunyai kemampuan untuk menyimpan dan menyerap karbon lebih tinggi dari hutan daratan lainnya, yaitu sekitar 4 kali (Donato et al., 2011). Oleh karena itu peningkatan pemahaman masyarakat kedepannya semakin diperlukan untuk dapat mempertahankan ekosistem mangrove, karena sangat penting untuk keanekaragaman hayati, perlindungan pesisir dan penyerapan karbon (Rahmila et al., 2024).

Estimasi Stok Karbon Total, dan Serapan CO₂

Tahun 2019 total stok karbon (Total Carbon Stock/ TCS) tertinggi bernilai 38,912-48,64 ton/ha seluas 121,81 ha, dan TCS terendah 0 ton/ha seluas 115,36 ha. Tahun 2021 TCS tertinggi bernilai 41,58-51,975 ton/ha seluas 148,81 ha, dan TCS terendah 0 ton/ha seluas 142,95 ha. Tahun 2024 TCS tertinggi bernilai 45,032-56,29 ton/ha seluas 179,47 ha, dan TCS terendah 0 ton/ha seluas 117,01 ha. Gambar 5 bagian kiri menunjukkan Peta hasil TCS 2019-2024.

Tahun 2019 jumlah serapan karbondioksida (Amount of Carbon Dioxide Absorption/ACDA) tertinggi bernilai 127,08- 169,46 ton/ha seluas 121,81 ha, dan ACDA terendah 0 ton/ha seluas 115,36 ha. Tahun 2021 ACDA tertinggi bernilai 132,395-176,52 ton/ha seluas 148,81 ha, dan ACDA terendah 0 ton/ha seluas 142,95 ha. Tahun 2024 ACDA tertinggi bernilai 137,04-182,72 ton/ha seluas 179,47 ha, dan ACDA terendah 0 ton/ha seluas 117,01 ha. Gambar 5 bagian kanan menunjukkan Peta hasil ACDA 2010-2024.

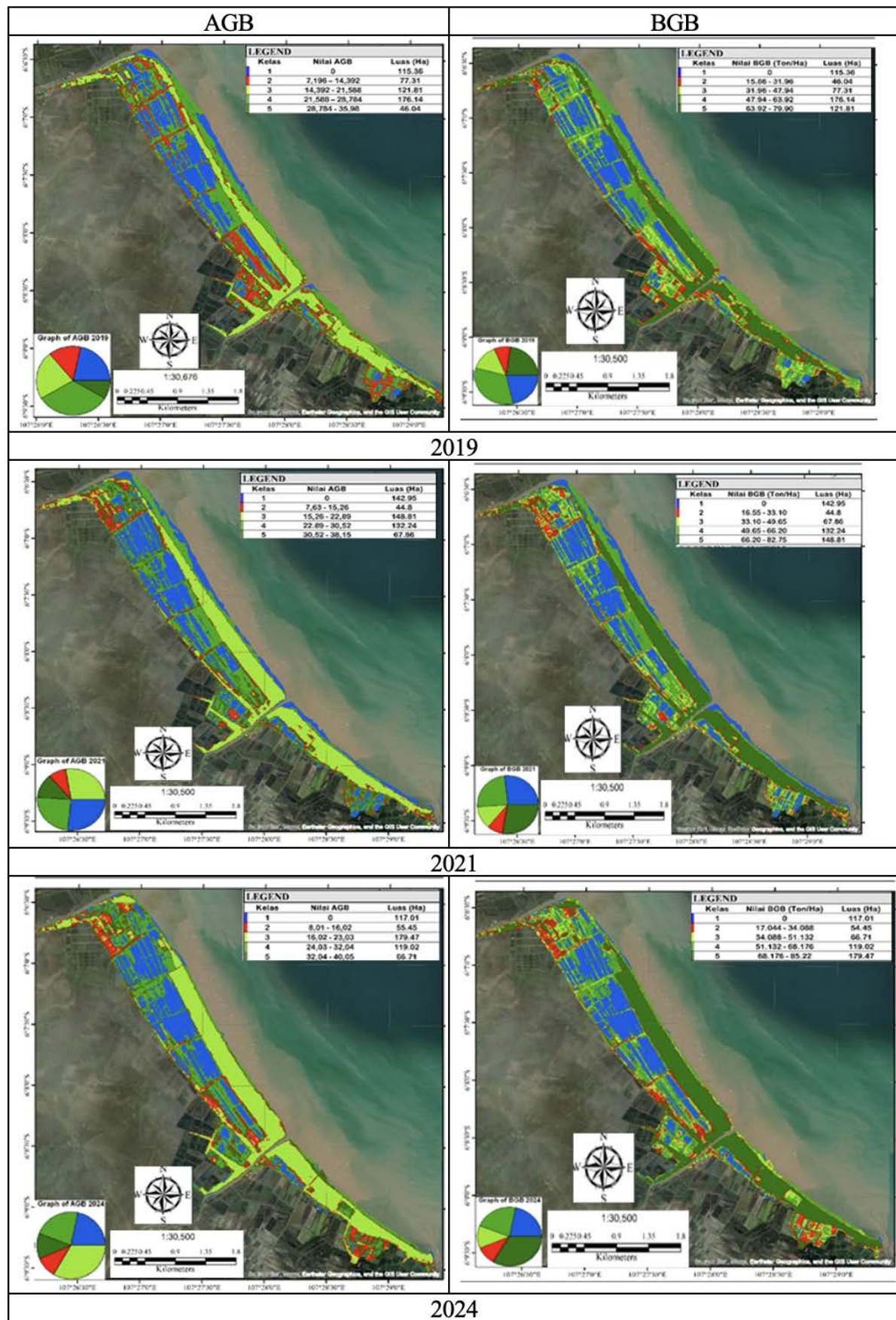
Berdasarkan hasil pengolahan data, dihasilkan Tabel 6 sebagai perbandingan parameter NDVI, AGB, BGB, dan TBA untuk hasil akhir stok karbon, dan serapan CO₂.

Penyebab Perubahan Stok Karbon dan Serapan CO₂ Mangrove

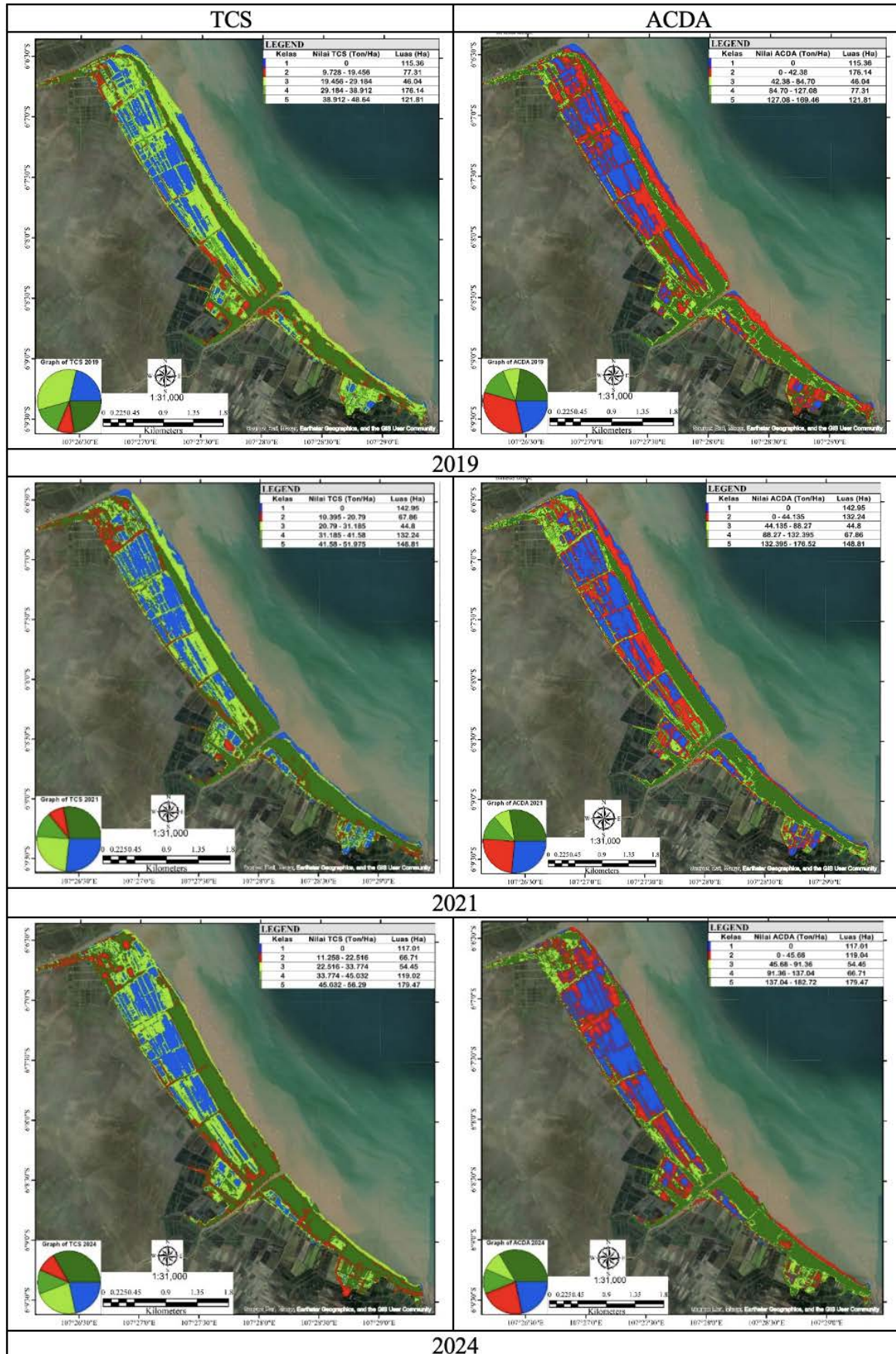
Stok karbon merujuk pada jumlah total karbon yang disimpan dalam bentuk biomassa (pohon, akar, dan tanah) di ekosistem (Alongi, 2012). Jika stok karbon dikatakan minim, berarti jumlah total karbon yang disimpan dalam ekosistem mangrove di Kecamatan Cilebar dan Tempuran, Kabupaten Karawang rendah. Sedangkan serapan CO₂ merujuk pada kemampuan ekosistem untuk menyerap karbon dioksida dari atmosfer melalui proses fotosintesis. Dalam konteks mangrove, hal ini berarti seberapa banyak CO₂ yang dapat diserap oleh tanaman mangrove dalam proses pertumbuhannya. Jika serapan CO₂ dikatakan minim, berarti ekosistem mangrove di Kabupaten Karawang tidak mampu menyerap karbon dioksida dari atmosfer dalam jumlah yang cukup.

Faktor Pengurangan

Penurunan stok karbon dan serapan CO₂ mangrove dipicu oleh berbagai faktor yang saling terkait. Konversi lahan menjadi tambak, pertanian, atau permukiman menghilangkan vegetasi dan merusak akar penyimpan karbon bawah tanah, sehingga CO₂ terlepas ke atmosfer. Eksploitasi sumber daya, seperti penebangan untuk bahan bakar, menurunkan biomassa, sementara degradasi tanah akibat aktivitas tersebut melemahkan absorpsi CO₂ (Rahim et al., 2017). Faktor eksternal seperti polusi air dari limbah industri dan domestik (contohnya di Karawang) juga menghambat pertumbuhan, memicu stres, bahkan kematian mangrove. Selain itu, perubahan iklim, terutama kenaikan permukaan laut, mempercepat degradasi melalui gangguan salinitas dan erosi (Prasetyo et al., 2020). Ketiadaan regulasi dan kebijakan perlindungan yang memadai memperparah kerusakan ini (Wiryo et al., 2016), sehingga konservasi terintegrasi sangat diperlukan (Sondak & Chung, 2015).



Gambar 4. Peta Perubahan Kandungan Biomassa Atas Permukaan dan Bawah Permukaan Pada Lokasi Kajian Pada Periode Tahun 2019 Hingga 2024



Gambar 5. Peta Perubahan Kandungan Stock dan Serapan Karbon Total Pada Lokasi Kajian Pada Periode Tahun 2019 Hingga 2024

Tabel 6. Perbandingan Hasil Olahan Data Stok Karbon dan Serapan CO₂ Periode Tahun 2019 Hingga 2024

Parameter	Tahun	ton/ha		
		Min	Max	Rata-rata
NDVI	2019	-1	1	0,49
	2021			
	2024			
AGB	2019	0	35,98	38,06
	2021		38,15	
	2024		40,05	
BGB	2019	0	79,90	82,62333
	2021		82,75	
	2024		85,22	
TBA	2019	0	115,88	120,6833
	2021		120,9	
	2024		125,27	
TCS	2019	0	48,64	52,30167
	2021		51,975	
	2024		56,29	
ACDA	2019	0	169,46	176,2333
	2021		176,52	
	2024		182,72	

Faktor Penambahan

Penambahan stok karbon terjadi saat mangrove tumbuh optimal. Proses fotosintesis akan menyerap CO₂ dari atmosfer dan mengubahnya menjadi biomassa vegetatif (akar, batang, daun) yang menyimpan karbon organik. Pengelolaan ekosistem yang efektif, rehabilitasi, serta pencegahan aktivitas merusak (seperti pembalakan liar dan alih fungsi lahan) akan memperkuat fungsi mangrove sebagai penyerap karbon (Permana & Wijaya, 2022).

Dampak Stok Karbon dan Serapan CO₂ Ekosistem Mangrove

Dampak Negatif (Menipis)

Penipisan stok karbon mangrove melepaskan CO₂ ke atmosfer. Pelepasan ini menambah konsentrasi CO₂ yang sudah ada, baik dari sumber alami (pernapasan) maupun buatan (bahan bakar fosil, industri, alih fungsi lahan) (Samidjo & Suharso, 2017). Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca ini terbukti meningkatkan paparan sinar ultraviolet-B (Latuconsina, 2010).

Secara ekonomi, degradasi mangrove mengurangi hasil sektor perikanan dan pariwisata yang menjadi tumpuan masyarakat pesisir, sehingga

menurunkan pendapatan dan memperbesar pengangguran (Dinilhuda et al., 2020). Dari sisi budaya, kerusakan ini mengancam identitas komunitas dan hubungan tradisional masyarakat dengan lingkungannya. Dalam aspek kesehatan, peningkatan emisi memperburuk penyakit pernapasan, sementara perubahan cuaca mengganggu ketahanan pangan.

Dampak Positif (Melimpah)

Stok karbon yang melimpah berperan krusial dalam mitigasi perubahan iklim dengan menyerap CO₂ dan menjaga stabilitas suhu global (Keenan et al., 2016). Ekosistem yang sehat juga menyediakan habitat esensial bagi biodiversitas (Baderan, 2017).

Di bidang pertanian, karbon tanah berkontribusi pada kesuburan dengan memperbaiki struktur tanah, meningkatkan retensi air, dan mendukung siklus nutrisi (Rachmawati et al., 2014). Secara ekonomi, keberlanjutan stok karbon mengurangi kebutuhan teknologi pengendalian emisi yang mahal. Selain itu, stok karbon yang sehat berkontribusi pada peningkatan kualitas udara dan kesejahteraan masyarakat secara keseluruhan.

KESIMPULAN

Tahun 2019, 2021, 2024 stok karbon (TCS)(TCS) dan serapan CO₂ (ACDA)(ACDA) mangrove di Kecamatan Cilebar dan Tempuran, Karawang mengalami fluktuasi. Stok karbon dan serapan CO₂ berkurang karena alih fungsi lahan menjadi tambak, pertanian, atau pemukiman, dan polusi limbah cair. Sedangkan penambahannya, disebabkan oleh pengelolaan dan pelestarian ekosistem mangrove yang efektif seperti rehabilitasi, pencegahan perusakan hutan mangrove, serta parameter perairan yang baik untuk pertumbuhan mangrove.

Estimasi stok karbon (TCS)(TCS) mangrove tertinggi di Kecamatan Cilebar dan Tempuran, Kabupaten Karawang pada tahun 2019 bernilai 38,912-48,64 ton/ha seluas 121,81 ha, dan terendahnya 0 ton/ha seluas 115,36 ha. Pada tahun 2021 stok karbon tertinggi bernilai 41,58-51,975 ton/ha seluas 148,81 ha, dan stok karbon terendah 0 ton/ha seluas 142,95 ha. Pada tahun 2024 stok karbon tertinggi bernilai 45,032-56,29 ton/ha seluas 179,47 ha, dan stok karbon terendah 0 ton/ha seluas 117,01 ha.

Serapan CO₂ (ACDA)(ACDA) tertinggi di Kecamatan Cilebar dan Tempuran, Kabupaten Karawang pada tahun 2019 tertinggi bernilai 127,08-169,46 ton/ha seluas 121,81 ha, dan serapan CO₂ terendah 0 ton/ha seluas 115,36 ha. Pada tahun 2021 serapan CO₂ tertinggi bernilai 132,395-176,52 ton/ha seluas 148,81 ha, dan serapan CO₂ terendah 0 ton/ha seluas 142,95 ha. Pada tahun 2024 serapan CO₂ tertinggi bernilai 137,04-182,72 ton/ha seluas 179,47 ha, dan serapan CO₂ terendah 0 ton/ha seluas 117,01 ha.

SARAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, kami mengajukan rekomendasi untuk optimalisasi stok karbon dan serapan CO₂ pada ekosistem mangrove di Kecamatan Cilebar dan Tempuran, Kabupaten Karawang:

1. Pemerintah daerah, institusi pendidikan, masyarakat lokal, dan sektor swasta patut memberikan penyuluhan terkait sampah dan limbah untuk menyadarkan pentingnya kebersihan di lingkungan masyarakat, serta meningkatkan SDM dalam merealisasikan karbon biru dengan cara melestarikan peranan hutan mangrove bagi kehidupan darat, laut, maupun udara.

2. Melakukan *ground-truthing* yang melibatkan pengambilan sampel pada lokasi yang representatif, meliputi pengukuran diameter pohon (DBH), tinggi pohon, spesies mangrove, sampel serasah, dan tanah untuk memvalidasi dan meningkatkan akurasi estimasi stok karbon dan serapan CO₂, sehingga mendukung analisis ilmiah yang dapat diandalkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Kelautan dan Perikanan Karawang atas dukungan biaya, Pusat Riset Geoinformatika-Badan Riset dan Inovasi Nasional atas izin penggunaan fasilitas dan pengolahan data dalam penelitian ini, serta Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan-Badan Geologi atas bantuan revisi dan akses publikasi karya ilmiah.

DAFTAR ACUAN

- Ainurrohman, S., & Sudarti, S. (2022). Analisis perubahan iklim dan global warming yang terjadi sebagai fase kritis. *Phi: Jurnal Pendidikan Fisika dan Terapan*, 8(1), 1-10. <https://doi.org/10.26737/phi.v8i1.2737>
- Alongi, D. M. (2012). *Carbon sequestration in mangrove forests*. *Carbon Management*, 3(3), 313-322. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- Cahyo, W. E. (2010). Pengaruh pemanasan global terhadap lingkungan bumi. *Berita Dirgantara*, 8(2). <https://doi.org/10.30536/bd.v8i2.146>
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>
- Crystiana I, Susantoro TM, Junaedi T. (2021). Monitoring Perkembangan Mangrove di Pulau Lumpur Sidoarjo, Kabupaten Sidoarjo. *Prosiding Seminar Nasional Perikanan dan Kelautan*, 6(1), 103-110. <https://doi.org/10.33019/semnaskan.v6i1.26>
- Damayatri R, Susantoro TM, Wikantika K. (2023). Green Open Space and Barren Land Mapping for Flood Mitigation in Jakarta, the Capital of Indonesia. *Indonesian Journal of Geography*, 55(2), 197-205. <https://doi.org/10.22146/ijg.76452>
- Darmawan, A. A., Ariyanto, D. P., Basuki, T. M., Syamsiyah, J., & Dewi, W. S. (2022). Biomass accumulation and carbon sequestration potential in varying tree species,

- ages and densities in Gunung Bromo Education Forest, Central Java, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 23(10). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d231061>
- DasGupta, R. dan Shaw, R. (2013). Cumulative Impacts of Human Interventions and Climate Change on Mangrove Ecosystems of South and Southeast Asia: An Overview. *Journal of Ecosystems*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/379429>
- Dinilhuda, A., Akbar, A. A., & Herawaty, H. (2020). Potentials of mangrove ecosystem as storage of carbon for global warming mitigation. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(11). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d211158>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293-297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote sensing of Environment*, 120, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Geurhaneu NY, Susantoro TM. (2016). Perubahan Garis Pantai Pulau Putri-Kota Batam Menggunakan data Citra Satelit tahun 2000-2016. *Jurnal Geologi Kelautan*, 14(2), 79-90. <https://doi.org/10.32693/jgk.14.2.2016.276>
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., ... & Duke, N. (2011). Status and Distribution of Mangrove Forests of the World Using Earth Observation Satellite Data. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 154-159. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>
- Hartoyo, A. P. P., Pamoengkas, P., Mudzaky, R. H., Khairunnisa, S., Ramadhi, A., Munawir, A., ... & Sunkar, A. (2022). Estimation of vegetation cover changes using normalized difference vegetation index (NDVI) in Mount halimun Salak National Park, Indonesia. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* (Vol. 1109, No. 1, p. 012068). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1109/1/012068>
- Herlina L, Sakarani D, Susantoro TM, Agustini, haris A, Yenti E, Adriany R, Herizal, Morina, Hidayati N, Suhartono R, Atmoko AD, Rahmadi A, Wahyudi P, Istiyanie D, Nardey S, Ardhyarini N. (2025). Indonesia's country-specific CO2 emission factor based on gas fuels for greenhouse gas inventory in the energy sector. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125749>
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg1/>
- Iswandar, M., Dewiyanti, I., & Kurnianda, V. (2017). Alleged carbon sequestration in mangrove vegetation in the mangrove area of Gampong Iboih, District Sukakarya, Sabang City. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Kelautan dan Perikanan Unsyiah*, 2(4), 512. <https://doi.org/10.21157/jimp.v2i4.8364>
- Jha, A. P., Morrison, A. B., Dainer-Best, J., Parker, S., Rostrup, N., & Stanley, E. A. (2015). Minds "at attention" : mindfulness training curbs attentional lapses in military cohorts. *PLoS ONE*, 10(2), e0116889. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116889>
- Keenan, T. F., Prentice, I. C., Canadell, J. G., Williams, C. A., Wang, H., Raupach, M., & Collatz, G. J. (2016). Recent pause in the growth rate of atmospheric CO2 due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nature communications*, 7(1), 13428. <https://doi.org/10.1038/ncomms13428>
- Kelompok Kerja Mangrove Tingkat Nasional. (2013). *Strategi Nasional Pengelolaan Ekosistem Mangrove Indonesia, Buku I Strategi dan Program*. Kementerian Kehutanan RI. <https://www.mangroveactionproject.org/wp-content/uploads/2016/08/Buku-1-Strategi-Nasional-Mangrove-INDONESIA.pdf>
- Matahelemual GJS, harto AB, Susantoro TM. (2020). Oil Spill Detection using Sentinel-1 Multitemporal Data in Offshore Karawang. *Scientific Contributions Oil and Gas*, 43(2), 69-79. <https://doi.org/10.29017/SCOG.43.2.522>
- Morton, D. L., Hoon, D. S., Cochran, A. J., Turner, R. R., Essner, R., Takeuchi, H., ... & Elashoff, R. (2003). Lymphatic mapping and sentinel lymphadenectomy for early-stage melanoma: therapeutic utility and implications of nodal microanatomy and molecular staging for

- improving the accuracy of detection of nodal micrometastases. *Annals of surgery*, 238(4), 538-550. <https://doi.org/10.1097/01.sla.0000089856.32785.8e>
- Muarif, M. (2017). Karakteristik Ekosistem Mangrove Di Kawasan Pesisir Kepulauan Natuna. *Jurnal Mina Sains*, 3(2), 44-49. <https://doi.org/10.30997/jmes.v3i2.810>
- Murdiyarso, D., Sasmito, S. D., Sillanpää, M., MacKenzie, R., & Gaveau, D. (2021). Mangrove selective logging sustains biomass carbon recovery, soil carbon, and sediment. *Scientific reports*, 11(1), 12325. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91811-y>
- Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia. (2012). Nomor : P.12/Menhut-II/2012. <https://jdih.esdm.go.id/peraturan/Permen%20Kehutanan%2012%202012.pdf>
- Permana, D. A., & Wijaya, N. I. (2022). Estimasi Cadangan Karbon dan Serapan Karbondioksida Biomassa Tegakan Mangrove di Gunung Anyar, Surabaya. *Jurnal Riset Kelautan Tropis (Journal Of Tropical Marine Research)(J-Tropimar)*, 4(2), 97-110. <https://doi.org/10.29244/j-tropimar.v4i2.56>
- Prasetyo, I., Mukti, N. I. F., Cahyono, R. B., Prasetya, A., & Ariyanto, T. (2020). Nanoporous carbon prepared from palm kernel shell for CO₂/CH₄ separation. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 5599-5606. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00832-6>
- Rachmawati, D., Setyobudiandi, I., & Hilmi, E. (2014). Potensi estimasi karbon tersimpan pada vegetasi mangrove di wilayah pesisir Muara Gembong Kabupaten Bekasi. *Omni-Akuatika*, 10(2). <https://doi.org/10.20884/1.oa.2014.10.2.144>
- Rahim, S., Baderan, D. W. K., & Hamidun, M. S. (2017). The density, composition and mangrove forest habitat in coastal areas of Torosiaje Jaya Village, Gorontalo, Indonesia. *International Journal of Bonorowo Wetlands*, 7(1), 38-42. <https://doi.org/10.13057/ijbw.v07i01.21735>
- Rahmila YI, Prasetyo LB, Kusmana K, Suyadi, Basyuni M, Pranoto B, Rahmania R, halwany W, Faubiany F, Susantoro TM, Winarso G, Efiyanti L, Indrawan DA. (2024). Spatial analysis of mangrove ecosystem dynamics in Banyuwangi: a geographically weighted regression approach. *Forest Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/21580103.2024.2438602>
- Setyawan, A.D. dan Winarno, K. (2006). Pemanfaatan Langsung Ekosistem Mangrove di Jawa Tengah dan Penggunaan Lahan di Sekitarnya; Kerusakan dan Upaya Restorasinya. *Biodiversitas*, 7(3): 282-291. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d070319>
- Sofyan, M., Mulyadi, A., & Elizal, E. (2016). Analysis of Biomass and Carbon Stock on Mangrove Forest Ecosystem in North Coastal Area of Rupat Island Riau Province. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Riau*, 3(2), 1-15. <https://jom.unri.ac.id/index.php/JOMFPK/article/view/10636>
- Sondak, C. F., & Chung, I. K. (2015). Potential blue carbon from coastal ecosystems in the Republic of Korea. *Ocean Science Journal*, 50, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s12601-015-0001-0>
- Susantoro TM, Wikantika K, Yayusman LF, Tan A, Ghazali MF. (2020). Monitoring of mangrove growth and coastal changes on the North Coast of Brebes, Central Java, using landsat data. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)*, 16(2), 197-214. <https://doi.org/10.30536/j.ijreses.2019.v16.a3221>
- Westlake, D. F. (1963). The measurement of the primary production of forest and woodland. In *The Ecology of the Forests of the British Isles* (pp. 69-78). Oxford University Press.
- Wiryo, W., Puteri, V. N. U., & Senoaji, G. (2016). The diversity of plant species, the types of plant uses and the estimate of carbon stock in agroforestry system in harapan Makmur Village, Bengkulu, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 17(1). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d170154>