

ESTIMASI CADANGAN KARBON PADA HUTAN MANGROVE BERBASIS MODEL PENGINDERAAN JAUH TAHUN 2018-2024 (STUDI KASUS: PULAU RUPAT, PROVINSI RIAU)

Raisya Iska Azzahra, Erwin Hermawan, Sahid Agustian Hudjimartsu

Teknik Informatika, Universitas Ibn Khaldun Bogor
Jl. Sholeh Iskandar No.Km.02, Kota Bogor, Indonesia
Raisyaiska123@gmail.com

ABSTRAK

Pulau Rupat memiliki luas sekitar 152.370 ha dengan ekosistem hutan mangrove yang menutupi sekitar 9,35% wilayah pesisirnya. Hutan mangrove berperan penting sebagai penyerap dan penyimpan karbon, namun informasi spasial terkait cadangan karbon mangrove di Pulau Rupat masih terbatas. Keterbatasan data ini menjadi kendala dalam pengelolaan dan konservasi mangrove secara berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk memperkirakan cadangan karbon hutan mangrove di Pulau Rupat menggunakan teknologi penginderaan jauh. Metode yang digunakan meliputi analisis citra Sentinel-2A dengan klasifikasi Random Forest berbasis kombinasi indeks vegetasi pada tahun 2018 dan 2024. Akurasi keseluruhan klasifikasi mencapai 95% pada tahun 2018 dan 93% pada tahun 2024. Hasil penelitian menunjukkan bahwa luas hutan mangrove meningkat sebesar 6,9% atau sekitar 963,23 ha selama periode 2018–2024. Validasi model menghasilkan nilai RMSE sebesar 34,64 Mg/ha, MAE sebesar 28,47 Mg/ha, dan nilai R^2 sebesar 0,69. Rata-rata nilai Above-Ground Biomass (AGB) dan Above-Ground Carbon (AGC) meningkat dari 186,4 Mg/ha dan 87,61 Mg/ha pada tahun 2018 menjadi 204,5 Mg/ha dan 96,11 Mg/ha pada tahun 2024. Berdasarkan hasil penelitian ini, penggunaan citra Sentinel-2 terbukti efektif dalam memperkirakan stok AGB dan AGC hutan mangrove, serta memiliki potensi untuk diimplementasikan pada wilayah lain dengan karakteristik ekosistem yang serupa.

Kata kunci : Biomassa, Cadangan Karbon, Klasifikasi Random Forest, Sentinel-2A, Google Earth Engine

1. PENDAHULUAN

Dampak perubahan iklim dari emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari berbagai aktivitas manusia terus mengalami peningkatan. Karbon dioksida (CO_2) merupakan penyumbang terbesar emisi GRK, dengan rata-rata emisi sebesar 66,03 juta ton CO_2 ke atmosfer pada periode 2017–2021 yang berasal dari sektor lapangan usaha dan rumah tangga [1]. Upaya mitigasi emisi GRK dapat dilakukan melalui peningkatan peran hutan sebagai penyerap karbon melalui proses fotosintesis, khususnya pada ekosistem mangrove yang memiliki kemampuan penyerapan dan penyimpanan karbon yang tinggi [2].

Ekosistem mangrove sangat berpotensi dalam penyerapan emisi GRK dan mengatasi perubahan iklim [3]. Sementara itu, pada tahun 2000–2019 terjadi degradasi lahan mangrove di Provinsi Riau, sehingga luas mangrove mengalami penurunan dari 180.952,1 ha menjadi 161.655,5 ha yang diakibatkan oleh berbagai aktivitas manusia seperti alih fungsi lahan dan eksploitasi pesisir [4]. Perhitungan stok karbon mangrove dapat dilakukan melalui teknologi penginderaan jauh yang dikombinasikan dengan data lapangan seperti diameter pohon setinggi dada, tinggi pohon, dan persamaan alometrik sehingga metode ini diharapkan dapat mengurangi kehancuran mangrove [5][6].

Informasi spasial terkait distribusi dan cadangan karbon hutan mangrove, khususnya di Pulau Rupat, masih terbatas. Keterbatasan data ini menyulitkan upaya pemantauan perubahan mangrove serta pengelolaan dan konservasi yang berbasis data.

Metode konvensional berbasis pengukuran lapangan membutuhkan waktu, biaya, dan tenaga yang besar, sehingga diperlukan pendekatan alternatif yang lebih efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi cadangan karbon hutan mangrove di Pulau Rupat menggunakan teknologi penginderaan jauh berbasis citra Sentinel-2A. Pendekatan yang digunakan meliputi pemanfaatan citra Sentinel-2A MSI untuk menghasilkan kombinasi indeks vegetasi sebagai variabel masukan dalam klasifikasi mangrove menggunakan algoritma *Random Forest*. Selanjutnya, estimasi biomassa dan cadangan karbon dilakukan dengan menggabungkan hasil klasifikasi citra dan data lapangan melalui persamaan alometrik. Metode ini diharapkan mampu memberikan informasi spasial cadangan karbon mangrove yang akurat sebagai dasar pengelolaan dan konservasi mangrove secara berkelanjutan di Pulau Rupat [7].

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian sebelumnya dalam melakukan estimasi cadangan karbon seperti yang dilakukan oleh Son melalui metode perhitungan threshold CMRI (*Combined Mangrove Recognition Index*) menghasilkan klasifikasi tutupan mangrove yang baik dengan akurasi keseluruhan sebesar 90,5%. Adapun total AGC pada 2016 yaitu 842.747 ton, sedangkan pada 2022 sebesar 1.311.728 ton [8].

Sementara itu, Suardana menerapkan metode random forest yang menghasilkan klasifikasi mangrove dengan akurasi keseluruhan sebesar 98,4%

dan membangun model regresi untuk estimasi cadangan karbon hutan mangrove melalui indeks vegetasi IRECI (*Inverted Red Edge Chlorophyll Index*) dan TRVI (*Total Ratio Vegetation Index*) dengan RMSE (*Root Mean Squared Error*) sebesar 11,09 Mg/ha [6].

2.2. Cadangan Karbon

Cadangan karbon (*carbon stock*) adalah jumlah karbon yang tersimpan dalam suatu sistem atau lingkungan. Secara alami, emisi karbon dari hutan ke atmosfer terjadi melalui respirasi, dekomposisi, dan pembakaran biomassa. Meski tumbuhan juga melepaskan CO₂ lewat respirasi, jumlahnya relatif kecil karena dapat diserap kembali melalui fotosintesis [10].

Cadangan karbon merupakan bagian integral dari strategi mitigasi perubahan iklim karena penyimpanan karbon yang lebih tinggi di vegetasi dan tanah adalah cara untuk mengimbangi emisi gas rumah kaca [11]. Perhitungan cadangan karbon berkaitan erat dengan estimasi jumlah karbon yang disimpan dalam berbagai komponen ekosistem seperti tumbuhan, tanah, dan biomassa lainnya [12].

Secara geografis, hampir seluruh bagian besar wilayah pesisir Pulau Rupat di kelilingi ekosistem mangrove dengan luas keseluruhan Pulau Rupat sekitar $\pm 1.524,55 \text{ km}^2$ atau $\pm 152.455 \text{ ha}$ [13]. Oleh karena itu kajian estimasi cadangan karbon dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh dilakukan untuk meminimalisir destruktif mangrove dan mengurangi resiko kendala waktu dan biaya yang tinggi [13].

2.3. Google Earth Engine

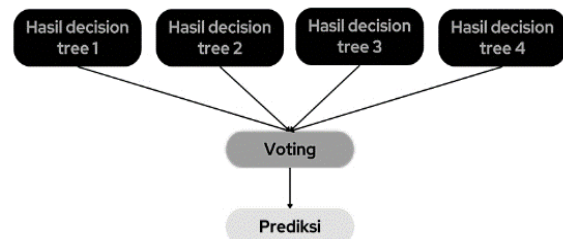
Google Earth Engine (GEE) adalah platform pemrosesan geospasial berbasis cloud computing yang mampu memproses data penginderaan jauh dalam skala besar. GEE menggunakan bahasa pemrograman JavaScript [14]. Keunggulan alat penelitian ini terletak pada kecepatan komputasinya yang luar biasa, tidak ada batasan penyimpanan, dan beragam kumpulan data yang terus diperbarui. Platform ini memberikan akses kepada publik dan memungkinkan pengguna untuk melakukan pengembangan algoritma yang sangat interaktif dan mengembangkan produk data dalam skala global [15].

2.4. Klasifikasi Random Forest

Klasifikasi citra multispektral telah lama dilakukan oleh para peneliti dan ahli geografis karena hasil klasifikasi menjadi dasar informasi penting dalam proses penelitian. Salah satu metode yang sering digunakan dalam klasifikasi citra yaitu algoritma *Random Forest*. *Random forest* membutuhkan beberapa *decision tree* (pohon keputusan) untuk memprediksi hasil yang akurat, maka setiap pohon mengandung nilai vektor sebagai input klasifikasi. Dalam hutan berisi gabungan pohon-pohon yang telah

diklasifikasi, maka dapat diketahui kelas terbanyak di antara pohon lainnya [16].

Karena ada banyaknya alternatif jawaban dalam *decision tree* dan kemungkinan bias yang tinggi, *random forest* mengambil hasil prediksi dari beberapa *decision tree* berdasarkan suara mayoritas dan memprediksi hasil yang lebih akurat. Berikut ilustrasi cara kerja algoritma *random forest* dapat dilihat pada Gambar 1 [17].



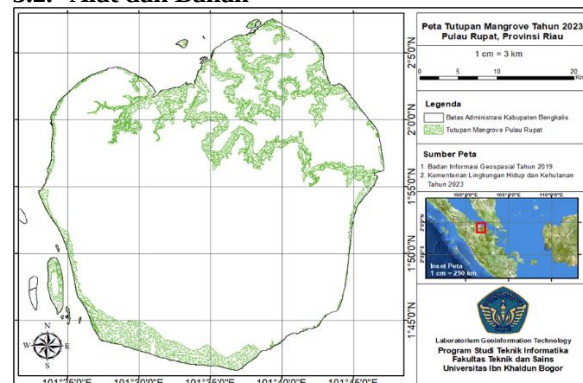
Gambar 1. Algoritma *Random Forest*

3. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari hingga Desember 2024 di Pulau Rupat, Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau yang memiliki luas area kurang lebih $\pm 152.455 \text{ ha}$ dengan ekosistem mangrove yang menutupi kurang lebih 9,35% atau seluas 14.246,6 ha di wilayah pesisir [13]. Lokasi ini dipilih karena memiliki ekosistem mangrove yang cukup luas dan penting sebagai penyimpan karbon biru. Selain itu, letak Pulau Rupat yang strategis di pesisir Selat Malaka dengan dinamika perubahan penggunaan lahan menjadikannya wilayah representatif untuk kajian estimasi cadangan karbon berbasis penginderaan jauh.

3.2. Alat dan Bahan



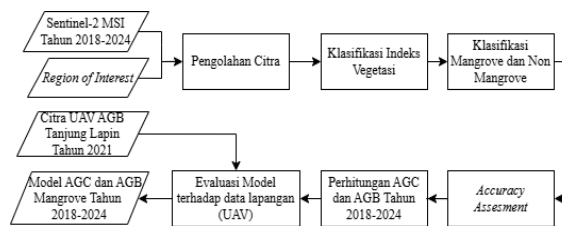
Gambar 2. Peta Tutupan Mangrove Pulau Rupat Tahun 2023

Perangkat lunak yang digunakan mencakup *Google Earth Engine* untuk pengolahan citra Sentinel-2A, *ArcGIS/QGIS* untuk pengolahan spasial, serta *RStudio* dan *Microsoft Excel* untuk analisis statistik dan uji validasi. Data sekunder yang digunakan meliputi Citra Sentinel-2A tahun 2018-2024 dipilih karena memiliki resolusi spasial 10–20 m dengan cakupan spektral yang luas sesuai area penelitian yang

telah ditentukan [18], citra AGB UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) Desa Tanjung Lapin tahun 2021 [19], batas administrasi Kabupaten Bengkalis dari Badan Informasi Geospasial tahun 2019, dan batas tutupan mangrove Pulau Rupat dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan tahun 2023 yang disajikan pada Gambar 2.

3.3. Metode

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk analisis vegetasi mangrove dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh untuk menduga cadangan karbon hutan mangrove. Berikut tahapan pengolahan data dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Alur Pengolahan Data

Tabel 1. Persamaan Indeks Vegetasi

Indeks Vegetasi	Persamaan
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$
Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$MSAVI = \{2 (NIR) + 1 - \sqrt{((2(NIR) + 1)^2 - 8 \{(NIR) - Red\})}\} / 2 \quad (2)$
Modified Red Edge-Simple Ratio	$mRE-SR = \frac{(\frac{NIR}{Red\ Edge}) - 1}{\sqrt{(\frac{NIR}{Red\ Edge}) + 1}} \quad (3)$
Difference Vegetation Index	$DVI = NIR - RED \quad (4)$
Inverted Red Edge Chlorophyll Index	$IRECI = \frac{NIR - RED}{\frac{Red\ Edge\ 1}{Red\ Edge\ 2}} \quad (5)$
Red-Edge Simple Ratio	$SRre = \frac{NIR}{Red\ Edge} \quad (6)$
Chlorophyll Index Red Edge	$Clre = (\frac{NIR}{Red\ Edge}) - 1 \quad (7)$
Total Ratio Vegetation Index.	$TRVI = \sqrt{\frac{NIR}{RED}} \quad (8)$
Di mana: NIR adalah band 8 Sentinel; RED adalah Band 4 Sentinel; RedEdge1 adalah band 5 Sentinel; RedEdge2 adalah band 6 Sentinel;	

3.5. Penilaian Akurasi (Accuracy Assesment)

Pengujian ini dilakukan untuk menilai seberapa baik kinerja hasil klasifikasi, diawali dengan melakukan penentuan ukuran sampel dengan teknik standar deviasi yang dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$N = (\sum_{i=1}^c (W_i * S_i) / S_o)^2 \quad (9)$$

Keterangan :

- N adalah jumlah ukuran sampel.
- Wi adalah proporsi wilayah kelas i yang dipetakan.
- Si adalah standar deviasi strata i.
- So adalah standar deviasi yang diharapkan dari akurasi keseluruhan, dengan nilai So = 0,01.

3.4. Pengolahan Citra Sentinel-2A

Tahapan pengolahan citra dalam penelitian ini meliputi beberapa proses utama, yaitu koreksi atmosfer, pemotongan (*cropping*) citra sesuai dengan batas administrasi wilayah penelitian, serta ekstraksi kombinasi indeks vegetasi yang digunakan sebagai variabel masukan dalam proses klasifikasi tutupan lahan. Proses koreksi atmosfer dilakukan untuk menghilangkan pengaruh gangguan atmosferik sehingga nilai reflektansi permukaan dapat diperoleh dengan lebih akurat.

Selanjutnya, tahap pemotongan citra bertujuan membatasi area analisis hanya pada wilayah studi Pulau Rupat, agar hasil klasifikasi lebih terfokus. Indeks vegetasi yang diekstraksi digunakan sebagai input utama dalam algoritma *Random Forest*, yang diterapkan untuk mengklasifikasikan tutupan lahan menjadi beberapa kelas utama. Metode ini dipilih karena memiliki tingkat akurasi tinggi dan mampu mengelola data dengan variabel yang kompleks [16]. Rincian kombinasi indeks vegetasi yang digunakan dapat dilihat pada tabel 1.

Kemudian dilakukan pengujian melalui tabel *confusion matrix*, yaitu sebuah matrik yang dibuat untuk dapat memvisualisasikan kinerja suatu algoritma klasifikasi, dimana setiap kolom dari matrik tersebut mewakili kelas pada data referensi, sementara tiap baris mewakili hasil prediksi klasifikasi. Interpretasi dari proses *confusion matrix* ini sesuai standar yang telah ditentukan oleh Badan Informasi Geospasial (2012) dengan output perhitungan uji akurasi hasil klasifikasi tutupan lahan yaitu sebesar > 85%.

3.6. Model Estimasi AGC dan AGB

Model yang digunakan pada penelitian ini merupakan model estimasi karbon hutan mangrove yang telah dikembangkan oleh Suardana dkk., (2023) di Teluk Benoa, Bali [6]. Dengan overall accuracy sebesar 98% dan spesies yang sama yaitu *Rhizophora*

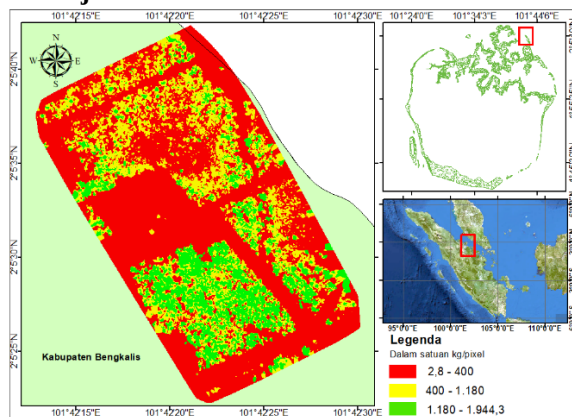
Apiculata [19], maka model ini dapat diterapkan pada kawasan mangrove Pulau Rupert sebagaimana yang dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$AGC = 13.99 + 104.741 * IRECI + 3.025 * TRVI \quad (10)$$

Setelah nilai AGC didapatkan, kemudian dilakukan konversi ke dalam nilai AGB dengan menggunakan rasio karbon pada umumnya yang biasanya sekitar 47% dari biomassa total. Maka untuk mengonversi nilai AGC menjadi AGB dilakukan dengan persamaan berikut:

$$AGB = \frac{AGC}{0,47} \quad (11)$$

3.7. Uji Validasi Model



Gambar 4. Citra AGB UAV Tahun 2021 di Desa Tanjung Lapi

Validasi model dilakukan setelah nilai AGB hasil estimasi dari citra Sentinel-2A diperoleh. Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai estimasi AGB dengan data AGB hasil pengukuran lapangan oleh Marliyani, (2022) berbasis UAV di desa Tanjung Lapi yang dapat dilihat pada Gambar 4.

Perbandingan kedua data tersebut bertujuan untuk mengetahui tingkat ketelitian model dalam menggambarkan kondisi biomassa aktual di lapangan. Nilai koefisien determinasi (R^2), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Mean Absolute Error* (MAE) dihitung sebagai parameter statistik untuk menilai kinerja model yang dapat dilihat pada persamaan berikut [20][21].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |Y_i - X_i| \quad (13)$$

$$R^2 = \text{corr}(Y, X)^2 \quad (14)$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Tutupan Hutan Mangrove di Pulau Rupert

Tutupan hutan mangrove di Pulau Rupert yang diperoleh dari hasil klasifikasi citra Sentinel-2A menunjukkan perbedaan luasan antara tahun 2018 dan 2023. Berdasarkan hasil klasifikasi dengan algoritma *Random Forest*, hutan mangrove pada tahun 2018 tercatat seluas 13.970,96 ha, sedangkan pada tahun 2024 seluas 14.934,2 ha.

Tabel 2. Accuracy Assesment Klasifikasi Tahun 2018

Klasifikasi	Mangrove	Non Mangrove	Total	User Accuracy (%)
Mangrove	491	15	506	96,65
Non Mangrove	17	180	197	92,31
Producer's Accuracy (%)	97,04	91,37		
Overall Accuracy 95,4%				

Tabel 3. Accuracy Assesment Klasifikasi Tahun 2024

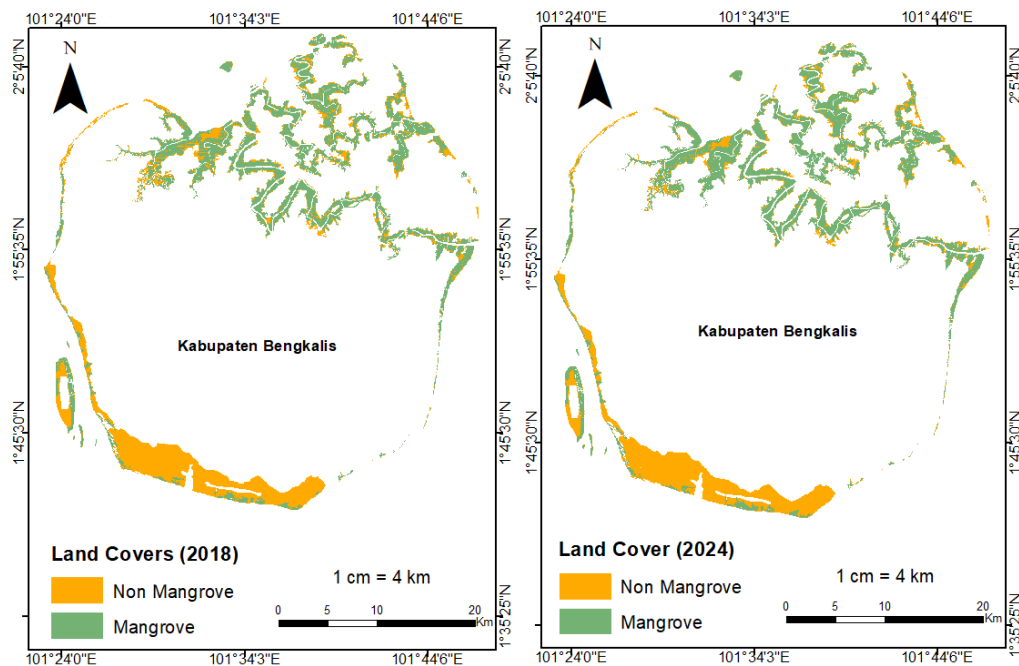
Klasifikasi	Mangrove	Non Mangrove	Total	User Accuracy (%)
Mangrove	564	7	571	96,91
Non Mangrove	18	208	226	96,74
Producer's Accuracy (%)	98,77	92,04		
Overall Accuracy 96,9%				

Hasil penilaian akurasi (*Accuracy Assesment*) dari klasifikasi tutupan mangrove tahun 2018 pada Tabel 2 menunjukkan nilai *Overall Accuracy* sebesar 95,4% dengan *User Accuracy* 94,5% dan *Producer's Accuracy* 94,2%.

Penilaian akurasi tahun 2024 pada Tabel 3 menunjukkan nilai *Overall Accuracy* sebesar 96,9% dengan *User Accuracy* kinerja yang sangat baik dalam melakukan 96,8% dan *Producer's Accuracy* 95,4%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan citra Sentinel-2A memiliki klasifikasi multitemporal pada tutupan mangrove yang sangat baik di Pulau Rupert.

4.2. Luas Tutupan Mangrove dan Non Mangrove di Pulau Rupert

Hasil klasifikasi citra menunjukkan adanya perubahan yang cukup signifikan pada tutupan lahan di wilayah Pulau Rupert selama periode 2018 hingga 2024. Pada tahun 2018, luas tutupan mangrove tercatat sebesar 13.970,96 hektar, sedangkan non mangrove seluas 2.889,34 hektar. Sementara itu, pada tahun 2024, luas tutupan mangrove meningkat menjadi 14.934,20 hektar, dan luas non mangrove menurun menjadi 1.926,11 hektar sebagaimana terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Tutupan Mangrove dan Non Mangrove Tahun 2018 dan 2024

Perubahan ini menunjukkan bahwa tutupan mangrove mengalami peningkatan sebesar 6,9% atau sekitar 963,23 hektar selama enam tahun terakhir. Peningkatan ini dapat diartikan sebagai hasil dari proses alami pertumbuhan vegetasi mangrove serta kemungkinan adanya kegiatan rehabilitasi atau konservasi di kawasan pesisir Pulau Rupat. Selain itu, berkurangnya area non mangrove mengindikasikan adanya konversi lahan menuju vegetasi mangrove yang lebih rapat dan luas. Secara keseluruhan, hasil ini menggambarkan dinamika positif ekosistem mangrove yang berpotensi besar dalam mendukung peningkatan cadangan karbon dan menjaga stabilitas ekosistem pesisir di wilayah tersebut.

4.3. Estimasi Cadangan Karbon dan Biomass Hutan Mangrove

Dalam studi ini, model yang dikembangkan oleh Suardana diterapkan untuk memperkirakan cadangan karbon di atas permukaan tanah pada ekosistem hutan mangrove di Pulau Rupat untuk tahun 2018-2024.

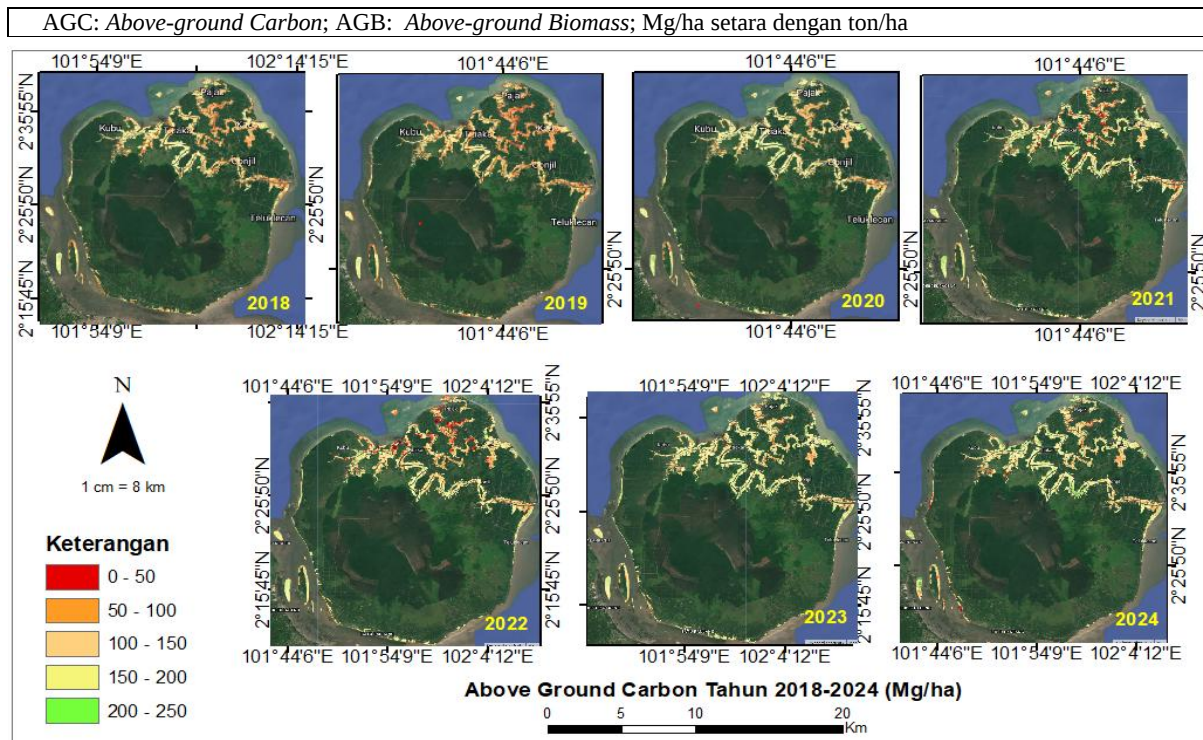
Model tersebut dipilih karena telah terbukti efektif dalam mengestimasi biomassa dan karbon vegetasi menggunakan pendekatan penginderaan jauh

yang berbasis pada hubungan empiris antara nilai reflektansi citra satelit dan hasil pengukuran lapangan. Penerapan model ini memungkinkan peneliti untuk memperoleh gambaran spasial mengenai distribusi cadangan karbon secara lebih efisien dan menyeluruh, tanpa harus melakukan pengukuran langsung di seluruh area penelitian. Nilai AGB kemudian dihitung berdasarkan hasil estimasi AGC yang diperoleh dari model tersebut, dengan mempertimbangkan faktor-faktor lingkungan dan karakteristik spektral vegetasi mangrove.

Melalui pendekatan ini, diperoleh hasil yang dapat menggambarkan kondisi aktual cadangan karbon mangrove di Pulau Rupat, sekaligus menjadi dasar penting dalam pemantauan perubahan karbon, perencanaan konservasi, dan upaya mitigasi perubahan iklim di kawasan pesisir secara berkelanjutan. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 6, rata-rata AGC mangrove di Pulau Rupat diperkirakan sebesar 87,61 Mg/ha pada tahun 2018 dan 96,11 Mg/ha pada tahun 2024. Adapun rata-rata AGB pada tahun 2018 dan 2024 masing-masing sebesar 186,40 Mg/ha dan 204,5 Mg/ha.

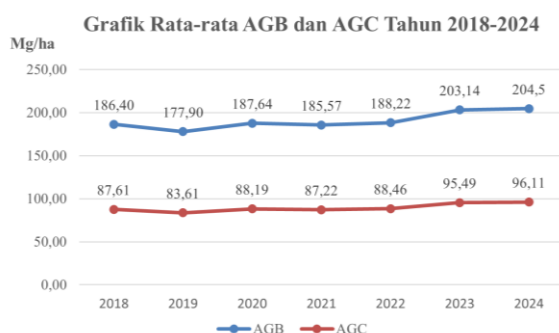
Tabel 4. Estimasi Rata-rata AGC dan AGB Mangrove Tahun 2018-2024

Tahun	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
AGC (Mg/ha)	87,61	83,61	88,19	87,22	88,46	95,49	96,11
AGB (Mg/ha)	186,40	177,90	187,64	185,57	188,22	203,14	204,5



Gambar 6. Estimasi AGC Hutan Mangrove Tahun 2018-2024 di Pulau Rupat

Berdasarkan Tabel 4 dapat disimpulkan bahwa terdapat peningkatan nilai AGC dan AGB selama periode 2018-2024. Rata-rata AGC bertambah sekitar 8,5 Mg/ha dan rata-rata AGB sekitar 18,1 Mg/ha dengan persentase sebesar 9,71%. Adapun grafik total rata-rata AGB dan AGC Mangrove dapat dilihat pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7. Grafik Rata-rata AGB dan AGC Tahun 2018-2024

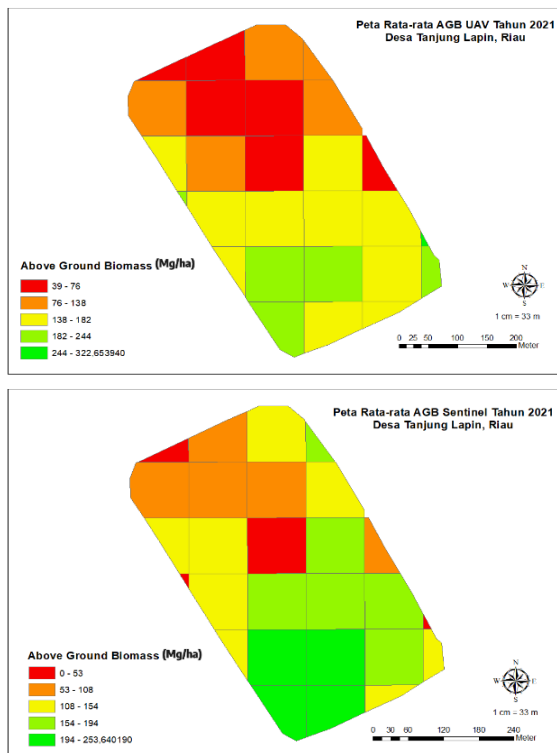
Pada Gambar 7 menunjukkan peningkatan stok karbon pada hutan mangrove di Pulau Rupat. Hal ini tidak terlepas dari adanya berbagai upaya rehabilitasi dan pelestarian yang dilakukan oleh masyarakat setempat maupun pihak pemerintah. Masyarakat di beberapa wilayah seperti Desa Selat Baru, Desa Deluk, dan Desa Pambang Pesisir di Kecamatan Bantan secara aktif berpartisipasi dalam kegiatan penanaman

dan pemeliharaan mangrove sebagai bentuk kesadaran terhadap pentingnya ekosistem ini dalam menjaga keseimbangan lingkungan pesisir. Upaya tersebut kemudian mendapat dukungan dari pemerintah melalui Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Hutan Lindung (BPDASHL) Indragiri Rokan yang pada tahun 2020 merealisasikan program Padat Karya Penanaman Mangrove di sepanjang kawasan Desa Pambang Pesisir.

Program ini tidak hanya bertujuan untuk mempercepat rehabilitasi ekosistem mangrove yang mengalami degradasi, tetapi juga memberikan manfaat sosial ekonomi bagi masyarakat sekitar melalui keterlibatan langsung dalam kegiatan penanaman. Kombinasi antara partisipasi masyarakat dan dukungan kelembagaan pemerintah ini menjadi faktor penting yang mendorong peningkatan tutupan mangrove di wilayah tersebut, sehingga berkontribusi signifikan terhadap peningkatan stok karbon melalui proses penyerapan dan penyimpanan karbon di biomassa vegetasi mangrove maupun sedimennya [22].

4.4. Uji Validasi Model

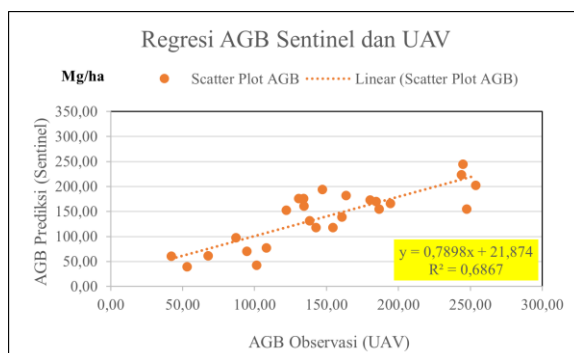
Pengujian model prediksi AGB sentinel dilakukan pada area mangrove desa Tanjung Lapin berdasarkan sampel data AGB dari observasi lapangan menggunakan UAV. Berikut peta rata-rata AGB citra UAV dan Sentinel tahun 2021 dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Peta Rata-rata AGB UAV dan AGB Sentinel Tahun 2021

Dalam penelitian ini, hasil validasi model menunjukkan nilai RMSE sebesar 34,64 Mg/ha, MAE sebesar 28,47 Mg/ha, dan R^2 sebesar 0,69. Nilai ini mengindikasikan bahwa model memiliki akurasi yang cukup baik dan mampu menjelaskan sekitar 69% variasi data aktual. Dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ali *et al.* (2024), yang memperoleh nilai R^2 sebesar 0,45 dalam estimasi biomassa lahan basah menggunakan *model random forest*, nilai R^2 dalam penelitian ini tergolong lebih tinggi [23].

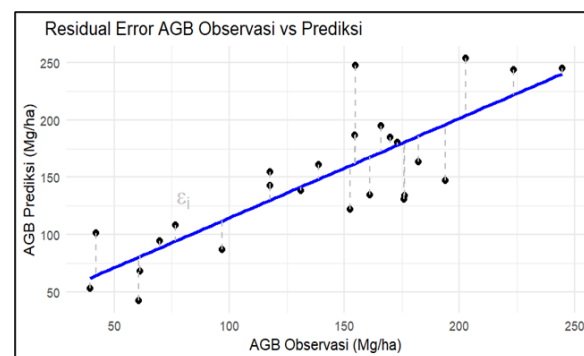
Hal ini menunjukkan bahwa model yang diterapkan dalam penelitian ini memiliki kinerja yang lebih baik dalam menjelaskan variabilitas data biomassa. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan jenis tutupan lahan, resolusi data penginderaan jauh, serta variabel input yang digunakan dalam masing-masing model.



Gambar 9. Regresi AGB Sentinel dan UAV

Gambar 9 menunjukkan adanya pola linear positif pada scatter plot antara AGB UAV dan AGB Sentinel, yang menandakan adanya hubungan positif yang kuat antara kedua model prediksi tersebut. Pola ini menggambarkan bahwa nilai AGB yang diestimasi menggunakan citra Sentinel-2 memiliki korelasi yang searah dengan hasil pengukuran menggunakan UAV. Artinya, ketika nilai AGB yang terdeteksi oleh UAV meningkat, maka nilai AGB yang diprediksi melalui citra Sentinel juga mengalami peningkatan.

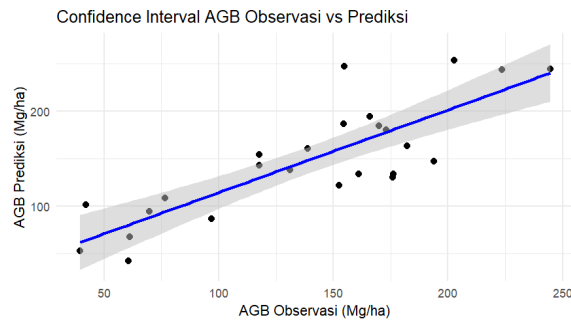
Hubungan ini menunjukkan bahwa model estimasi berbasis citra Sentinel-2 mampu merepresentasikan kondisi biomassa aktual di lapangan dengan cukup baik. Dengan demikian, hasil ini memperkuat validitas penggunaan data penginderaan jauh dalam memperkirakan biomassa dan cadangan karbon mangrove, serta mendukung penerapan metode ini untuk pemantauan vegetasi secara luas dan berkelanjutan.



Gambar 10. Regresi AGB dengan *Residual Error*

Gambar 10 menunjukkan bahwa sebagian besar titik data mengikuti pola garis regresi dengan garis *residual error* yang relatif kecil, yang mengindikasikan bahwa model memiliki tingkat ketepatan prediksi yang baik. Meskipun demikian, terdapat beberapa titik data dengan garis *residual* yang lebih panjang, menandakan adanya beberapa prediksi yang masih kurang akurat [24].

Ketidak-tepatan ini dapat disebabkan oleh perbedaan kondisi lapangan, variasi struktur vegetasi, atau perbedaan resolusi spasial antara data UAV dan citra Sentinel-2A yang digunakan. Secara keseluruhan, konsistensi pola tersebut menunjukkan bahwa model AGB Sentinel (prediksi) mampu merepresentasikan estimasi biomassa mangrove dengan cukup baik, meskipun masih terdapat sedikit deviasi akibat faktor teknis dan perbedaan metode perhitungan. Hasil ini menegaskan bahwa pendekatan berbasis penginderaan jauh tetap efektif digunakan untuk pemantauan dan analisis biomassa pada skala wilayah yang lebih luas.



Gambar 11. Regresi AGB dengan Confidence Interval

Gambar 11 memperlihatkan bahwa model regresi yang digunakan memiliki hubungan positif antara nilai AGB Observasi (UAV) dan AGB Prediksi (Sentinel), yang menunjukkan bahwa model mampu memperkirakan biomassa di atas permukaan tanah dengan tingkat akurasi yang cukup baik.

Hubungan positif ini mengindikasikan bahwa peningkatan nilai AGB hasil observasi di lapangan cenderung diikuti oleh peningkatan nilai AGB hasil prediksi model. Namun demikian, terdapat beberapa titik data yang menyimpang jauh dari garis regresi, yang menandakan adanya error atau variasi dalam hasil prediksi. Faktor penyebabnya dapat berupa perbedaan resolusi spasial, kondisi lingkungan setempat, atau variasi struktur vegetasi yang tidak sepenuhnya terdeteksi oleh citra Sentinel-2.

Sementara itu, *confidence interval* (area abu-abu) yang tampak tidak terlalu lebar menunjukkan bahwa tingkat ketidakpastian model masih berada dalam batas yang wajar. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa model regresi yang digunakan memiliki performa yang baik dan dapat diandalkan untuk memperkirakan nilai AGB berdasarkan data penginderaan jauh.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Teknologi penginderaan jauh (*Remote Sensing*) merupakan metode efektif untuk memantau dan mendeteksi perubahan tutupan lahan, terutama pada ekosistem mangrove yang berperan penting dalam penyimpanan karbon di wilayah pesisir. Dengan kemampuannya menyediakan data yang luas dan berkelanjutan, teknologi ini memungkinkan analisis perubahan spasial-temporal vegetasi mangrove secara akurat dari waktu ke waktu.

Berdasarkan hasil penelitian ini, penerapan algoritma klasifikasi Random Forest pada citra Sentinel-2 yang dikombinasikan dengan beberapa indeks vegetasi terbukti mampu menghasilkan klasifikasi tutupan mangrove dengan tingkat akurasi yang tinggi. Nilai *Overall Accuracy* yang diperoleh mencapai 0,95 pada tahun 2018 dan 0,93 pada tahun 2024, menunjukkan konsistensi kinerja model dalam membedakan kelas tutupan lahan dan mendeteksi perubahan ekosistem mangrove secara rinci. Oleh karena itu, penggunaan data citra Sentinel-2A dalam pendekatan penginderaan jauh dapat diasumsikan

sangat efektif untuk menganalisis dinamika spasial-temporal luasan mangrove di Pulau Rupat, Provinsi Riau, serta menjadi dasar penting dalam kegiatan konservasi, perencanaan pengelolaan wilayah pesisir, dan estimasi cadangan karbon yang berkelanjutan.

Hasil kajian ini menunjukkan bahwa selama periode 2018–2024 terjadi perubahan tutupan mangrove di Pulau Rupat, Provinsi Riau, sebesar 6,9% atau sekitar 963,23 ha. Nilai AGB dan AGC pada tahun 2018 masing-masing sebesar 186,4 Mg/ha dan 87,61 Mg/ha, meningkat pada tahun 2024 menjadi 204,5 Mg/ha dan 96,11 Mg/ha. Rata-rata AGC naik sekitar 9,71 Mg/ha atau 8,5%, menunjukkan pertumbuhan vegetasi yang positif serta peningkatan cadangan karbon. Hasil ini menegaskan potensi besar ekosistem mangrove sebagai penyerap karbon (*blue carbon*) yang penting dalam mitigasi perubahan iklim.

Berdasarkan hasil uji terhadap data UAV, model regresi berbasis TRVI dan IRECI menunjukkan performa yang cukup baik dengan R^2 sebesar 0,69, RMSE 34,64 Mg/ha, dan MAE 28,47 Mg/ha. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun model diadaptasi dari lokasi berbeda, hubungan spektral antara indeks dan karbon masih relevan di Pulau Rupat. Namun, disarankan dilakukan kalibrasi lanjutan agar hasil estimasi lebih akurat dan sesuai dengan kondisi lokal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BPS RI, *Neraca Arus Energi Dan Neraca Emisi Gas Rumah Kaca Indonesia Indonesia Energy Flow Accounts and Greenhouse Gas Emissions Accounts*. Jakarta: BPS Statistics Indonesia, 2023.
- [2] K. M. Lubis, Z. Imran, Taryono, and A. Damar, "Carbon Sequestration Estimation and Economic Valuation of *Rhizophora apiculata* in the North Nias Marine Conservation Area," *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, vol. 17, no. 1, pp. 63–72, 2025, doi: 10.29244/jitkt.v17i1.57948.
- [3] A. Fitria and G. Dwiyanoto, "Ekosistem Mangrove dan Mitigasi Pemanasan Global," *Jurnal Ekologi, Masyarakat & Sains*, vol. 2, no. 1, p. 33, 2021, [Online]. Available: <http://journals.ecotas.org/index.php/ems>
- [4] Y. Oktorini, E. Prianto, V. V. Darlis, R. Rahmatdillah, M. Miswadi, and R. Jhonnerie, "Mangrove Riau: Sebaran dan Status Perubahan," *Dinamika Lingkungan Indonesia*, vol. 9, no. 1, p. 50, Jan. 2022, doi: 10.31258/dli.9.1.p.50-57.
- [5] F. F. Muhsoni, *Buku Karbon Mangrove*. Madura: UTM Press, 2021.
- [6] A. A. M. A. P. Suardana *et al.*, "Estimation and Mapping Above-Ground Mangrove Carbon Stock Using Sentinel-2 Data Derived Vegetation Indices in Benoa Bay of Bali Province, Indonesia," *Forest and Society*, vol. 7, no. 1, pp. 116–134, Apr. 2023, doi: 10.24259/fs.v7i1.22062.

- [7] H. Suryono, A. H. Marsuhandi, and S. Pramana, "Klasifikasi Tutupan Lahan Berdasarkan Random Forest Algorithm Menggunakan Cloud Computing Platform (Land Cover Classification Based on Random Forest Algorithm Using Cloud Computing Platform)," *Jurnal Aplikasi Statistika & Komputasi Statistik*, vol. 12, no. 3, pp. 1–12, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.34123/jurnalasks.v14i1.383>.
- [8] H. T. Son, P. D. Quang, N. H. Hoa, and V. Van Truong, "Using Sentinel-2 Data For Above-Ground Mangrove Biomass And Carbon Stocks Mapping Over 7 Years (2016-2022) In Tien Yen, Quang Ninh Province," *Journal of Forestry Science and Technology*, no. 14, pp. 153–165, 2022, doi: 10.55250/jo.vnuf.2022.14.153-165.
- [9] S. S. Karuru, "Estimasi Cadangan Karbon Pada Berbagai Tutupan Lahan Di Kabupaten Luwu Timur," Makassar, Jan. 2021. Accessed: Dec. 24, 2025. [Online]. Available: https://repository.unhas.ac.id/3146/2/P012172001_tesis%20I-II.pdf
- [10] Z. Stein, "Carbon Stock." Accessed: May 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.carboncollective.co/sustainable-investing/carbon-stock>
- [11] L. Hanarisanty and B. A. Pratama, "Calculation of Greenhouse Gas Emissions (CH₄, CO₂, and N₂O) in Kasihan District in the Agricultural Sector Using the IPCC Application," Sep. 2022. [Online]. Available: <http://josi.ft.unand.ac.id/>
- [12] WALHI, "Lembar Fakta : 'Pulau Kecil Rupat: Dihancurkan di Darat, Dirusak di Laut,'" Pekanbaru, Feb. 2022. Accessed: May 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.walhiriau.or.id/pulau-kecil-rupat-dihancurkan-di-darat-dirusak-di-laut/>
- [13] I. M. D. Krisnanda, I. W. G. A. Karang, and I. D. N. N. Putra, "Komparasi Citra Multispektral Untuk Estimasi Simpanan Karbon Pada Kawasan Mangrove Nusa Lembongan," *Journal Of Marine Research And Technology*, pp. 116–129, Aug. 2025.
- [14] R. S. Sianturi, *Pemantauan Bumi dengan Google Earth Engine*, 1st ed. Malang: UB Press, 2023.
- [15] P. P. E. Papilaya, "Aplikasi Google Earth Engine Dalam Menyediakan Citra Satelit Sumberdaya Alam Bebas Awan," *MAKILA*, vol. 16, no. 2, pp. 96–103, Nov. 2022, doi: 10.30598/makila.v16i2.6586.
- [16] S. A. S. Mola, N. D. Rumlaklak, and D. P. N. Polly, *Analisis Sentimen dengan Metode Random Forest*. Bandung: Kaizen Media Publishing, 2024.
- [17] T. Noi Phan, V. Kuch, and L. W. Lehnert, "Land Cover Classification using Google Earth Engine and Random Forest Classifier-The Role of Image Composition," *MDPI: Remote Sensing*, vol. 12, no. 15, pp. 7–15, Aug. 2020, doi: 10.3390/RS12152411.
- [18] European Space Agency, *S2 MPC Level-1 Algorithm Theoretical Bases Document*, vol. 1. ESA, 2023.
- [19] A. Marliyani, "Analisis Biomass Pada Pohon Mangrove Menggunakan Metode Random Forest Regression," Bogor, 2022.
- [20] J. Gao, "R-Squared (R²) – How much variation is explained?," *Research Methods in Medicine & Health Sciences*, vol. 5, no. 4, pp. 104–109, Sep. 2024, doi: 10.1177/26320843231186398.
- [21] Marzuki, N. Nurdin, I. Yasir, S. Mashoreng, and M. B. Selamat, "Estimasi Stok Karbon Biomassa pada Ekosistem Mangrove Menggunakan Data Satelit Di Pulau Nunukan Kabupaten Nunukan Kalimantan Utara," Universitas Hasanuddin, 2023. Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <http://repository.unhas.ac.id:443/id/eprint/12884>
- [22] Jikalahari and Keslimasy, "Ancaman Bagi Si Pelindung Pesisir: Kajian menguak kondisi terkini mangrove di Kecamatan Bantan, Bengkalis dan menganalisis ancaman yang akan dihadapi," 2022. Accessed: Feb. 04, 2025. [Online]. Available: <https://jikalahari.or.id/wp-content/uploads/2024/03/2110-Kajian-Mangrove-Keslimasy.pdf>
- [23] M. Hemati, M. Mahdianpari, H. Shiri, and F. Mohammadimanesh, "Integrating SAR and Optical Data for Aboveground Biomass Estimation of Coastal Wetlands Using Machine Learning: Multi-Scale Approach," *Remote Sens (Basel)*, vol. 16, no. 5, Mar. 2024, doi: 10.3390/rs16050831.
- [24] A. Soetewey, "Multiple Linear Regression Made Simple," Stats and R. Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://statsandr.com/blog/multiple-linear-regression-made-simple/>