

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim menjadi salah satu tantangan global paling serius pada abad ini karena berdampak luas terhadap sistem lingkungan, ekonomi, dan sosial masyarakat. Peningkatan suhu bumi, kenaikan muka air laut, perubahan pola curah hujan, frekuensi kejadian cuaca ekstrem, pengasaman laut, serta degradasi ekosistem merupakan konsekuensi nyata dari meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Sumber utama emisi tersebut berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, industrialisasi, urbanisasi, perubahan tata guna lahan, serta berbagai aktivitas antropogenik lainnya (Murugan et al., 2024). Dalam konteks ini, upaya mitigasi perubahan iklim tidak hanya bergantung pada pengurangan emisi, tetapi juga pada peningkatan kapasitas ekosistem alami dalam menyerap dan menyimpan karbon. Salah satu sistem alami yang memiliki kemampuan tinggi tersebut adalah ekosistem *Blue Carbon*, yaitu ekosistem pesisir vegetatif yang mampu menyerap karbon secara efisien dan menyimpannya dalam jangka panjang, terutama mangrove, rawa garam, dan padang lamun (Fourqurean et al., 2012; Macreadie et al., 2014; Liu, Failler, & Ramrattan, 2023).

Padang lamun merupakan komponen utama ekosistem karbon biru yang memiliki peran ekologis sangat penting. Selain berfungsi sebagai habitat biota laut, daerah asuhan ikan dan invertebrata, penstabil sedimen, pelindung garis pantai, dan pendukung produktivitas perikanan, padang lamun juga berperan sebagai penyerap karbon yang sangat efektif. Lamun mampu menyimpan karbon tidak hanya pada biomassa daun, tetapi juga pada akar, rimpang, dan material organik yang terakumulasi di sedimen bawahnya. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kapasitas penyimpanan karbon lamun per satuan luas dapat melampaui banyak ekosistem daratan karena kombinasi produktivitas primer tinggi dan kemampuan mengubur karbon dalam kondisi anaerobik (Fourqurean et al., 2012; Serrano et al., 2019; Traganos et al., 2022). Kemampuan ini menjadikan padang lamun sebagai aset strategis dalam pendekatan mitigasi perubahan iklim berbasis alam (*nature-based solutions*).

Namun demikian, padang lamun di berbagai wilayah terus mengalami penurunan luas dan kualitas. Berdasarkan penelitian Orth et al. (2006) melaporkan penurunan padang lamun global akibat eutrofikasi, peningkatan kekeruhan, gangguan fisik, dan pembangunan pesisir. Selanjutnya hasil penelitian Waycott et al. (2009) menunjukkan bahwa kehilangan lamun terjadi secara cepat dan luas pada banyak wilayah pesisir dunia. Penurunan ini berdampak langsung terhadap berkurangnya jasa ekosistem, hilangnya habitat perikanan, menurunnya perlindungan pantai, serta berkurangnya kapasitas penyerapan karbon biru. Tekanan perubahan iklim seperti peningkatan suhu laut dan perubahan pola curah hujan juga berpotensi menurunkan produktivitas lamun dan mengganggu kestabilan habitatnya (Marbá et al., 2022). Bahkan, degradasi lamun berpotensi melepaskan kembali karbon yang sebelumnya tersimpan ke atmosfer dan kolom air, sehingga

memperburuk perubahan iklim (Pendleton et al., 2012; Macreadie et al., 2014). Dengan demikian, konservasi lamun memiliki dimensi ekologis sekaligus dimensi iklim global.

Indonesia sebagai negara kepulauan tropis memiliki posisi sangat strategis dalam konservasi lamun dunia. Indonesia merupakan salah satu negara dengan keanekaragaman spesies lamun tertinggi dan memiliki luasan padang lamun yang sangat besar. Hasil penelitian Sjafrie et al. (2018) memperkirakan luas lamun Indonesia berkisar antara 875.967 hingga 1.847.341 ha, setara sekitar 5 - 10% dari total padang lamun dunia. Potensi tersebut menunjukkan bahwa Indonesia dapat berkontribusi besar terhadap cadangan karbon global. Selain itu, kawasan pesisir Indonesia yang luas dan berpenghuni padat menjadikan pengelolaan lamun sangat penting dalam konteks ketahanan pangan, perlindungan pesisir, dan mitigasi perubahan iklim nasional. Namun, berbagai kawasan pesisir Indonesia juga mengalami tekanan akibat sedimentasi dari daratan, limbah domestik, perubahan tata guna lahan, reklamasi, dan aktivitas perikanan. Salah satu wilayah yang merepresentasikan kondisi tersebut adalah Kepulauan Spermonde di Sulawesi Selatan. Berdasarkan hasil penelitian Nurdin et al., (2023) Menunjukkan salah satu pulau di Kepulauan Spermonde mengalami penurunan tutupan lamun selama periode 2000–2022. Dengan demikian, Kepulauan Spermonde merupakan lokasi yang relevan untuk mengkaji dinamika karbon lamun dalam sistem pulau kecil tropis yang berada di bawah tekanan lingkungan kompleks. Sebagai wilayah penelitian, Kepulauan Spermonde memiliki keunggulan ilmiah karena merepresentasikan gradien tekanan antropogenik dan ekologis yang kompleks. Pulau-pulau yang dekat dengan daratan utama cenderung menerima limpasan sedimen, nutrisi, dan polutan lebih tinggi, sedangkan pulau yang lebih jauh relatif dipengaruhi kondisi oseanografi terbuka. Dalam penelitian ini, Pulau Barrang Lompo dan Pulau Pannikiang dipilih karena mewakili karakteristik tekanan lingkungan yang berbeda. Kondisi tersebut sangat ideal untuk menguji bagaimana karbon lamun merespons variasi faktor lingkungan dan tekanan manusia pada skala pulau kecil. Di sisi lain, kebutuhan data karbon lamun yang akurat dan luas belum sepenuhnya dapat dipenuhi oleh metode survei lapangan konvensional. Pendekatan lapangan membutuhkan biaya tinggi, waktu lama, tenaga besar, serta cakupan area yang terbatas. Pengukuran karbon biomassa melalui metode destruktif dan analisis laboratorium juga sulit diterapkan secara periodik untuk wilayah luas. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan alternatif yang mampu menghasilkan informasi spasial secara cepat, berulang, dan efisien.

Perkembangan teknologi penginderaan jauh memberikan peluang besar dalam menjawab kebutuhan tersebut. Citra satelit mampu menyediakan informasi spasial secara luas, cepat, dan berulang, sehingga sangat efektif digunakan untuk memantau ekosistem pesisir dibanding metode konvensional. Padang lamun sebagai vegetasi perairan dangkal memiliki karakteristik spektral tertentu yang dapat dibedakan dari pasir, karang, dan perairan terbuka melalui kombinasi kanal biru, hijau, merah, dan inframerah dekat. Seiring meningkatnya resolusi spasial dan temporal satelit modern, kemampuan deteksi lamun juga semakin baik. Platform seperti Copernicus Programme Sentinel-2 menyediakan resolusi spasial 10 meter

dengan frekuensi ulang tinggi, sehingga sangat efektif untuk pemetaan lamun skala bentang alam. Planet Labs PlanetScope menyediakan resolusi lebih tinggi untuk skala pulau kecil dan monitoring detail. NASA Landsat memiliki arsip historis panjang yang sangat berguna untuk analisis perubahan multitemporal. Penelitian Lee et al. (2023), Blume et al. (2023), Veiras-Yanes et al. (2024), dan Salsabila et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi citra satelit dan data lapangan sangat potensial untuk memetakan lamun dan karbon biru secara efisien.

Seiring perkembangan data satelit, metode analisis juga mengalami transformasi melalui penggunaan Machine Learning. Algoritma seperti *Random Forest*, *Support Vector Machine*, *XGBoost*, dan *Artificial Neural Network* mampu memodelkan hubungan nonlinier antara data citra, variabel lingkungan, dan parameter ekologi. Dalam konteks lamun, *machine learning* telah terbukti meningkatkan akurasi klasifikasi habitat, estimasi biomassa, dan pemetaan tutupan dibanding regresi konvensional (Wedding et al., 2021; Ha et al., 2020). Selain itu, dukungan komputasi awan melalui *Google Earth Engine* memungkinkan pemrosesan data satelit multitemporal dalam jumlah besar secara efisien dan reproducible (Blume et al., 2023; Chen et al., 2023). Dengan demikian, integrasi penginderaan jauh dan *Artificial Intelligence* (AI) memberikan peluang besar untuk membangun sistem pemetaan karbon lamun yang modern, presisi, dan adaptif.

Meskipun perkembangan teknologi sangat pesat, telaah terhadap literatur menunjukkan bahwa penelitian karbon lamun masih memiliki sejumlah keterbatasan mendasar. Sebagian besar studi hanya berfokus pada satu aspek secara terpisah, misalnya pemetaan tutupan lamun, estimasi karbon total, atau karbon atas (*above-ground carbon/AGC*) saja. (Salsabila et al. 2024) Menunjukkan keberhasilan pemetaan AGC menggunakan PlanetScope di Pulau Rote, namun belum mengestimasi karbon bawah (*below-ground carbon/BGC*). (Ramadona et al. 2021) telah membandingkan karbon atas dan bawah lamun melalui survei lapangan, namun belum menggunakan pendekatan spasial berbasis satelit. (Blume et al. 2023 dan Montero-Hidalgo et al. 2023) melakukan inventarisasi karbon skala luas, tetapi belum menganalisis secara rinci hubungan karbon lamun dengan faktor lingkungan multivariat. Dengan kata lain, studi yang mengintegrasikan pemetaan AGC dan BGC secara simultan masih sangat terbatas, khususnya pada ekosistem lamun Indonesia. Selain aspek spasial, karbon lamun juga sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Peningkatan suhu laut dapat menurunkan produktivitas lamun dan mengganggu metabolisme tanaman (Marbá et al., 2022). Tingginya *total suspended solids* (TSS) mengurangi penetrasi cahaya yang dibutuhkan untuk fotosintesis. Curah hujan memengaruhi limpasan sedimen, nutrien, dan perubahan salinitas pesisir. Sementara itu, *Nitrogen Dioxide* (NO₂) dan *Carbon Monoxide* (CO) dapat digunakan sebagai indikator spasial tekanan antropogenik, seperti transportasi, pembakaran, dan aktivitas urban, yang secara tidak langsung memengaruhi kualitas habitat pesisir. Namun, model kuantitatif yang menjelaskan hubungan karbon lamun dengan suhu, TSS, NO₂, CO, dan curah hujan secara terpadu masih sangat terbatas, terutama pada skala pulau kecil tropis. Di sisi pengelolaan, kebijakan konservasi lamun saat ini umumnya masih berfokus pada perlindungan habitat atau luasan

tutupan, belum secara spesifik memasukkan nilai stok karbon, tingkat tekanan lingkungan, dan prioritas spasial sebagai dasar pengambilan keputusan. Tetapi setiap pulau memiliki karakteristik ekologi dan tekanan berbeda, sehingga pendekatan seragam sering kali kurang efektif. Oleh karena itu, diperlukan strategi pengelolaan karbon lamun yang adaptif, berbasis bukti ilmiah, dan spesifik lokasi (*site-specific management*).

Berdasarkan kondisi tersebut, kebaruan utama penelitian ini terletak pada pengungkapan pola respons diferensial karbon atas dan karbon bawah padang lamun terhadap kombinasi tekanan laut dan atmosfer dalam kerangka spasial. Kebaruan ini penting karena akan menghasilkan pemahaman baru tentang mekanisme ekologis penyimpanan karbon biomassa lamun, yang selama ini belum banyak dibahas secara eksplisit. Sebagai pendukung, penelitian ini juga mengembangkan model spasial AGC dan BGC berbasis data geospasial multi sumber menggunakan *Geospatial Artificial Intelligence* (GAI), sehingga estimasi karbon dapat dilakukan lebih efisien dan akurat dibanding metode konvensional. Selain itu, hasil model akan diterjemahkan ke dalam strategi pengelolaan pesisir adaptif berbasis bukti ilmiah.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memetakan stok karbon atas dan karbon bawah padang lamun menggunakan pendekatan *Geospatial Artificial Intelligence* (GAI), membangun model hubungan karbon lamun dengan faktor lingkungan karbon organik lamun dengan parameter lingkungan (suhu, TSS, NO₂, CO, dan Curah Hujan) dan merumuskan strategi pengelolaan karbon padang lamun adaptif dan berbasis bukti ilmiah. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi penting terhadap ilmu pengetahuan dan praktik pengelolaan pesisir. Secara ilmiah, penelitian ini memperluas pemahaman tentang dinamika karbon biomassa lamun dan respons diferensial AGC dan BGC terhadap tekanan lingkungan tropis. Secara metodologis, penelitian ini mengembangkan model geospasial karbon lamun berbasis *Artificial Intelligence* yang memungkinkan direplikasi di wilayah lain. Secara strategis, penelitian ini mendukung agenda mitigasi perubahan iklim dan pembangunan pesisir berkelanjutan di Indonesia

1.2 Rumusan Masalah

1. Ketersediaan data stok karbon berbasis spasial masih terbatas dan metode survei lapangan belum mampu menggambarkan distribusi karbon secara luas, cepat, dan berkala. Oleh karena itu bagaimana memetakan stok karbon padang lamun menggunakan pendekatan *Geospatial Artificial Intelligence* (GAI) serta mengembangkan model untuk estimasi karbon atas (AGC) dan karbon bawah (BGC)?
2. Hubungan antara stok karbon padang lamun dengan faktor lingkungan masih belum dipahami secara komprehensif, serta diduga menunjukkan respons yang berbeda pada setiap lokasi penelitian. Sehubungan dengan itu, bagaimana membangun model hubungan karbon organik lamun dengan parameter lingkungan (suhu, TSS, NO₂, CO, dan curah hujan)?

3. Pengaruh faktor lingkungan terhadap karbon atas dan bawah padang lamun masih belum dipahami secara menyeluruh dan menunjukkan variasi antar lokasi penelitian. Dengan pertimbangan masalah tersebut, bagaimana merumuskan strategi pengelolaan karbon padang lamun yang adaptif dan berbasis bukti ilmiah

1.3 Tujuan Penelitian

1. Memetakan stok karbon atas dan karbon bawah padang lamun menggunakan pendekatan *Geospatial Artificial Intelligent* (GAI)
2. Membangun model hubungan karbon organik lamun dengan parameter lingkungan (suhu, TSS, NO₂, CO, dan Curah Hujan)
3. Merumuskan strategi pengelolaan karbon padang lamun adaptif dan berbasis bukti ilmiah

1.4 Kegunaan Penelitian

Penelitian ini diharapkan memiliki kegunaan secara ilmiah maupun praktis dalam pengelolaan ekosistem pesisir, khususnya padang lamun. Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pemetaan stok karbon padang lamun melalui pendekatan *Geospatial Artificial Intelligence* (GAI), serta pengembangan model estimasi karbon atas (*Above Ground Carbon/AGC*) dan karbon bawah (*Below Ground Carbon/BGC*) berbasis data penginderaan jauh. Selain itu, penelitian ini bermanfaat untuk memperjelas hubungan antara karbon organik lamun dengan parameter lingkungan utama seperti suhu, TSS, NO₂, CO, dan curah hujan, sehingga dapat memperkaya kajian mengenai dinamika karbon biru pada ekosistem lamun. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar penyusunan strategi pengelolaan karbon padang lamun yang adaptif, berbasis bukti ilmiah, dan spesifik lokasi. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mendukung upaya mitigasi perubahan iklim, pengelolaan sumber daya pesisir yang berkelanjutan, serta penguatan peran Indonesia dalam pengembangan karbon biru di tingkat nasional maupun global.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Fokus pengamatan pada wilayah pesisir mencakup jenis , tutupan, *above-ground carbon* (AGC) dan *below-ground carbon* (BGC) dalam ekosistem padang lamun. Parameter yang dianalisis meliputi faktor yang mempengaruhi pengelolaan karbon di padang lamun, seperti suhu, TSS, NO₂, CO, dan curah hujan

1.6 Kebaruan Penelitian

Penelitian ini mengembangkan model monitoring stok karbon padang lamun berbasis teknologi geospasial dengan memanfaatkan citra satelit resolusi tinggi secara spasial dan multitemporal, serta menganalisis hubungan antara karbon lamun dengan parameter lingkungan utama. Fokus penelitian diarahkan pada estimasi karbon atas permukaan (*Above-Ground Carbon/AGC*) dan karbon bawah permukaan (*Below-Ground Carbon/BGC*) tanpa memasukkan komponen sedimen,

sehingga penelitian ini menitikberatkan pada dinamika biomassa lamun hidup sebagai komponen penyerap karbon aktif yang paling responsif terhadap perubahan lingkungan. Pendekatan ini penting karena sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak menekankan karbon total atau karbon sedimen, sementara informasi mengenai dinamika karbon biomassa hidup masih relatif terbatas. Parameter lingkungan yang dianalisis meliputi *Sea Surface Temperature*, *Total Suspended Solids* (TSS), *Nitrogen Dioxide*, *Carbon Monoxide*, serta curah hujan. Variabel tersebut dipilih karena merepresentasikan interaksi kompleks antara sistem laut, darat, dan atmosfer yang memengaruhi produktivitas lamun, kualitas habitat, serta kapasitas penyimpanan karbon biomassa. Suhu dan TSS berkaitan langsung dengan kondisi perairan dan penetrasi cahaya untuk fotosintesis, sedangkan NO_2 dan CO merepresentasikan tekanan antropogenik wilayah pesisir. Curah hujan berpengaruh terhadap limpasan daratan, masukan sedimen, nutrisi, dan perubahan salinitas.

Menegaskan posisi kebaruan penelitian ini, dilakukan penelusuran literatur berbasis Scopus dengan kata kunci yang relevan. Hasil pencarian menunjukkan bahwa meskipun topik *seagrass carbon satellite* telah menghasilkan 160 artikel, kajian yang secara khusus membahas AGC dan BGC masih sangat terbatas. Kata kunci *Seagrass carbon AGC* hanya menghasilkan 3 artikel, *Seagrass Carbon AGC dan BGB* sebanyak 7 artikel, sedangkan kombinasi *above-ground carbon* dan *below-ground carbon* hanya menemukan 1 artikel. Keterbatasan serupa juga terlihat pada studi hubungan karbon lamun dengan lingkungan, di mana topik SST menghasilkan 41 artikel, TSS 2 artikel, *air quality* 3 artikel, dan NO_2 hanya 2 artikel. Temuan ini menunjukkan bahwa penelitian yang mengintegrasikan pemetaan AGC dan BGC secara simultan serta menguji pengaruh faktor laut dan atmosfer masih sangat jarang dilakukan.

Berdasarkan hal tersebut, kebaruan utama penelitian ini terletak pada upaya menjelaskan bagaimana karbon atas dan karbon bawah padang lamun memberikan respon terhadap kombinasi faktor laut dan atmosfer dalam kerangka spasial dan multitemporal. Penelitian ini tidak hanya bertanya berapa besar stok karbon lamun yang tersedia, tetapi juga mencoba memahami faktor apa yang paling berpengaruh terhadap masing-masing komponen karbon tersebut. Pendekatan ini menghasilkan pengetahuan baru mengenai mekanisme ekologis penyimpanan karbon biomassa lamun yang selama ini masih jarang dibahas secara komprehensif.

Kebaruan penting lainnya dalam penelitian ini adalah pemilihan pulau-pulau kecil berdasarkan gradien jarak terhadap daratan utama serta tingkat sebagai dasar analisis karbon padang lamun. Pendekatan ini relevan karena pulau yang dekat dengan daratan utama dan memiliki permukiman padat umumnya menerima tekanan lingkungan lebih besar berupa limpasan sedimen, masukan nutrisi, limbah domestik, aktivitas transportasi, serta intensitas pemanfaatan pesisir yang tinggi (*land-based and settlement pressure*), sehingga berpotensi menurunkan kualitas habitat lamun melalui peningkatan kekeruhan dan pencemaran perairan (Yi et al., 2024; Looby et al., 2026).

Selain itu, penelitian ini juga diarahkan agar hasil ilmiah yang diperoleh tidak berhenti pada level akademik. Informasi mengenai sebaran karbon, wilayah dengan stok tinggi, area yang rentan mengalami penurunan, serta faktor tekanan lingkungan akan diterjemahkan menjadi dasar rekomendasi pengelolaan pesisir yang adaptif. Dengan cara ini, hasil penelitian dapat dimanfaatkan untuk menentukan lokasi prioritas konservasi, area restorasi lamun, maupun wilayah yang perlu dipantau secara berkala.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kajian karbon lamun telah berkembang melalui berbagai pendekatan, namun masih bersifat parsial. Penelitian Salsabila et al. (2024) menunjukkan bahwa citra Planet Labs PlanetScope efektif digunakan untuk mengestimasi karbon atas lamun (AGC) di Indonesia, sedangkan Ramadona et al. (2021) menegaskan pentingnya pemisahan karbon atas dan bawah lamun melalui pengukuran lapangan. Pada skala kawasan, penelitian Veiras-Yanes et al. (2024) memanfaatkan citra Copernicus Programme Sentinel-2 dan Random Forest untuk memetakan lamun serta potensi karbon biru, sementara Blume et al. (2023) menggunakan Google Earth Engine untuk inventarisasi karbon lamun secara cepat pada wilayah luas. Dari sisi temporal, penelitian Montero-Hidalgo et al. (2023) menekankan pentingnya analisis multitemporal dalam memantau perubahan karbon biru dan kehilangan habitat lamun. Adapun hubungan karbon lamun dengan lingkungan telah dibahas oleh (Halim et al. 2020) melalui pengaruh kekeruhan dan kedalaman, serta penelitian Murugan et al. (2024) melalui keterkaitan kualitas air dengan biomassa lamun. Namun demikian, sebagian besar studi tersebut masih berfokus pada satu aspek secara terpisah, sehingga belum banyak penelitian yang mengintegrasikan estimasi karbon atas dan bawah lamun, analisis multitemporal, serta pengaruh faktor lingkungan laut-atmosfer dalam satu kerangka penelitian yang utuh, khususnya pada ekosistem lamun tropis di Indonesia.

Meskipun demikian, penelitian tersebut umumnya masih berdiri sendiri. Sebagian fokus pada pemetaan luasan lamun, sebagian pada karbon atas saja, sebagian pada perubahan temporal, dan sebagian lain pada hubungan lingkungan tertentu. Masih sangat sedikit penelitian yang menggabungkan estimasi karbon atas dan bawah secara simultan, analisis multitemporal, serta pengujian hubungan karbon lamun dengan kualitas air dan kualitas udara ambien dalam satu kerangka penelitian terpadu, terutama pada wilayah lamun tropis di Indonesia.

Dengan demikian, posisi kebaruan penelitian ini tidak terletak semata-mata pada penggunaan machine learning atau citra satelit, melainkan pada integrasi pendekatan geospasial untuk menghasilkan pemahaman baru bahwa respons karbon atas dan karbon bawah lamun bersifat kompleks, berbeda antar komponen, dan sangat dipengaruhi oleh karakteristik lingkungan spesifik lokasi (*site-specific*). Temuan ini diharapkan menjadi dasar ilmiah baru dalam pengembangan sistem monitoring karbon biru lamun dan penyusunan strategi pengelolaan pesisir yang lebih adaptif, presisi, dan berkelanjutan. Penegasan mengenai posisi kebaruan, perbedaan metode, serta kontribusi penelitian ini terhadap studi sebelumnya disajikan pada Tabel 1.1.

Tab 1.1 Sintesis Penelitian Terdahulu, Kesenjangan Riset, dan Posisi Kebaruan Penelitian

No	Penulis	Tahun	Fokus Penelitian	Metode	Hasil Utama	Gap / Keterbatasan	Relevansi ke Disertasi	Posisi Novelty Disertasi
1	Salsabila, Wicaksono & Danoedoro	2024	Pemetaan karbon atas lamun (AGC) di Pulau Rote, Indonesia	Sampel lapangan; LOI; persamaan AGC berbasis % tutupan; PlanetScope SuperDove; validasi	$r = 0,61$; $R^2 = 0,36$; akurasi 71,93%	Hanya AGC; belum BGC; belum faktor lingkungan	Referensi paling mirip di Indonesia	Menambahkan BGC, machine learning, multi-variabel lingkungan
2	Veiras-Yanes et al.	2024	Pemetaan lamun dan estimasi blue carbon <i>Cymodocea nodosa</i>	Sentinel-2; RF, KNN, KDTree-KNN; data in-situ	RF terbaik F1 0,96–0,99; luas 237±5 ha	Fokus satu spesies; karbon total	Bukti RF efektif	Memisahkan AGC-BGC dan analisis driver lingkungan
3	Blume et al.	2023	Pemetaan nasional lamun dan blue carbon Bahama	>18.000 citra Sentinel-2; Google Earth Engine; feature engineering; RF	Stok karbon ±723 Mg C; sequestration tinggi	Belum AGC-BGC; belum faktor lingkungan	Referensi cloud geospasial	Karbon biomassa detail + faktor pengontrol
4	Montero-Hidalgo et al.	2023	Dinamika karbon Canary Islands	InVEST Blue Carbon; citra 20 m; analisis temporal	Luas lamun turun ±50%; proyeksi hilang 2036	Tidak ML; belum lingkungan detail	Referensi proyeksi	Machine learning + hubungan ekologis
5	Ramadona et al.	2021	Simpanan karbon atas dan bawah lamun	Transek-kuadrat; LOI; kualitas air in-situ	BGC > AGC; karbon total 0,23 ton C/ha	Lokal; tidak spasial	Bukti dual carbon	Skalasi ke peta spasial prediktif
6	Fourqurean et al.	2012	Stok karbon global lamun	Meta-analisis global biomassa dan sedimen	Lamun penyimpan karbon global penting	Agregat global; tidak spasial detail	Dasar teori karbon	Aplikasi lokal resolusi tinggi AGC-BGC
7	Murugan et al.	2024	Biomassa lamun, karbon sedimen, pH	Biomassa spesies; karbon biomassa-sedimen; regresi	pH berpengaruh signifikan	Tidak spasial; variabel terbatas	Dasar hubungan lingkungan	Tambah ML + multi-variabel + peta
8	Halim et al.	2020	Turbidity dan kedalaman terhadap karbon lamun	Sampling lapangan; statistik	TSS dan depth berpengaruh	Tidak AI; terbatas lokal	Referensi TSS	Integrasi TSS dengan variabel lain
9	Lin et al.	2021	Nitrogen loading dan kesehatan lamun	Nutrient analysis; monitoring kualitas air	Nitrogen enrichment menurunkan kesehatan lamun	Bukan NO ₂ satelit; bukan karbon	Dasar nitrogen lamun	Menggunakan NO ₂ satelit sebagai proksi tekanan antropogenik

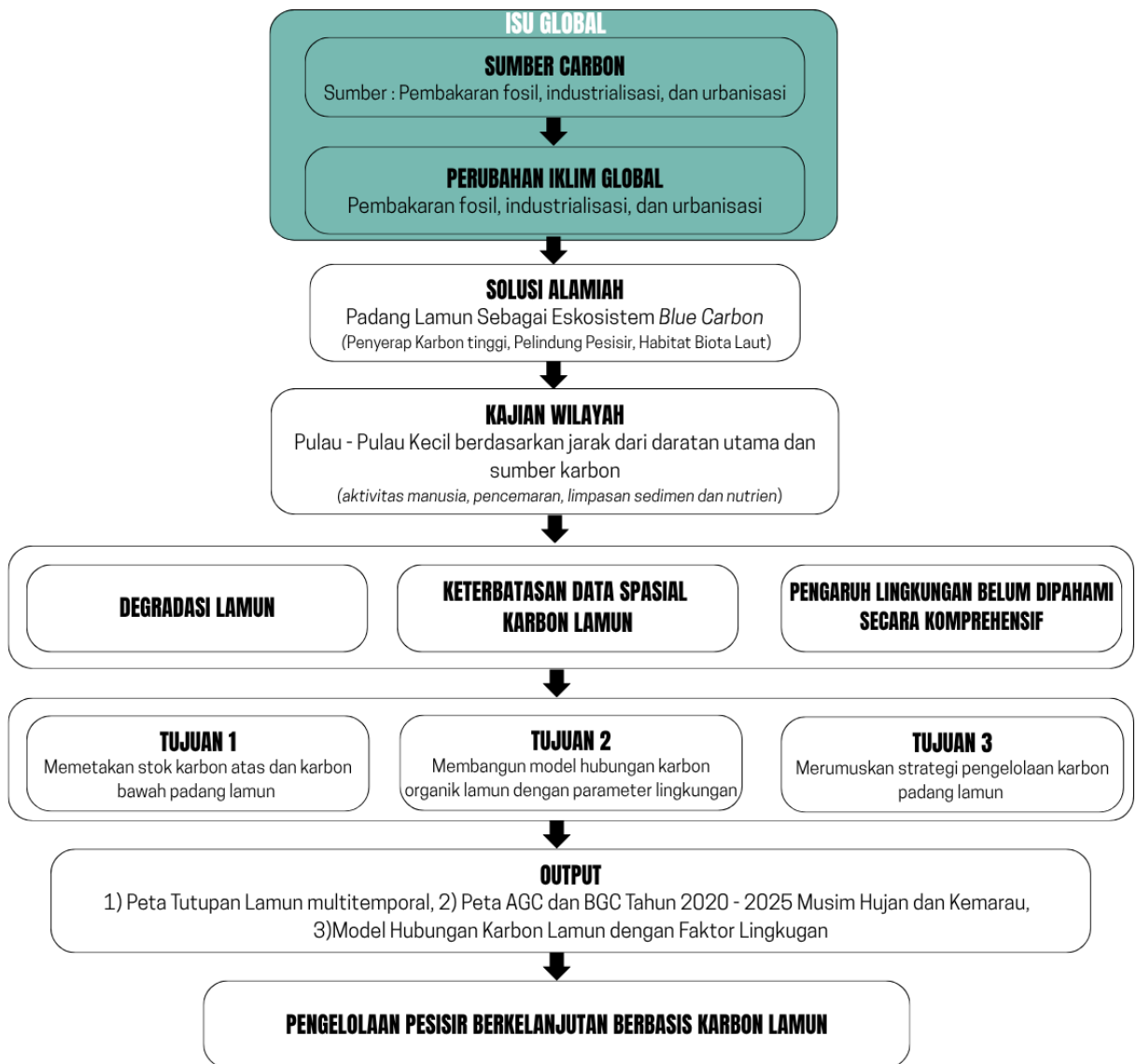
10	Mohapatra et al.	2022	Polusi pesisir dan lamun	Water pollution assessment	Polusi menekan tutupan lamun	Tidak spesifik karbon	Dasar tekanan manusia	Hubungkan polusi dengan karbon AGC-BGC
11	Zhao et al.	2025	Faktor lingkungan blue carbon lamun China	Multi-factor ecological analysis	Nutrien & tekanan manusia memengaruhi karbon	Belum AGC-BGC; belum AI	Sangat relevan	ML spasial + dual carbon
12	Lee et al.	2023	Pemetaan lamun nasional Seychelles	PlanetScope NICFI; RF; validasi multi-region	Akurasi tinggi skala nasional	Fokus habitat, bukan karbon	Referensi pemetaan luas	Mengubah habitat map menjadi carbon map
13	Roelfsema et al.	2020	Pemetaan habitat lamun global	Multisensor satelit; klasifikasi habitat	Akurasi habitat baik	Tidak karbon	Dasar remote sensing	Estimasi stok karbon dari citra
14	Wedding et al.	2021	Machine learning habitat pesisir	AI classification	AI meningkatkan akurasi	Tidak fokus karbon	Dasar metodologi AI	AI untuk estimasi karbon biomassa
15	Liu, Failler & Ramrattan	2023	Sistem akuntansi blue carbon nasional China	Framework nasional; cost-benefit restoration	Inventarisasi nasional	Tidak detail spasial	Dasar kebijakan	Zonasi pengelolaan karbon pesisir adaptif

Sumber : Hasil sintesa peneliti 2026

1.7 Kerangka Penelitian

Penelitian ini diawali dari isu global terkait perubahan iklim yang dipicu oleh peningkatan emisi karbon akibat aktivitas antropogenik, seperti pembakaran bahan bakar fosil, industrialisasi, dan urbanisasi (Rafly M. 2023).. Peningkatan emisi tersebut berkontribusi terhadap terjadinya pemanasan global yang berdampak langsung pada perubahan kondisi lingkungan, termasuk ekosistem pesisir. Sebagai respon terhadap kondisi tersebut, diperlukan solusi berbasis alam (*nature-based solution*), salah satunya melalui pemanfaatan ekosistem padang lamun sebagai penyerap karbon biru (*blue carbon*). Padang lamun memiliki peran penting dalam menyerap dan menyimpan karbon, melindungi garis pantai, serta menyediakan habitat bagi biota laut. Namun demikian, efektivitas fungsi tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan tekanan dari aktivitas manusia.

Dalam konteks wilayah, penelitian ini difokuskan pada pulau-pulau kecil yang memiliki karakteristik berbeda berdasarkan jaraknya dari daratan utama. Perbedaan tersebut berkaitan dengan tingkat pengaruh aktivitas manusia, pencemaran, serta masukan sedimen dan nutrisi yang berdampak pada kondisi ekosistem lamun. Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat beberapa permasalahan utama yang diidentifikasi, yaitu terjadinya degradasi lamun, keterbatasan data spasial terkait stok karbon lamun, serta belum dipahaminya secara komprehensif pengaruh parameter lingkungan terhadap dinamika karbon lamun. Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian ini dirancang dalam tiga tahapan utama. Tahap pertama adalah pemetaan stok karbon lamun, baik karbon atas permukaan (AGC) maupun karbon bawah permukaan (BGC), menggunakan pendekatan geospasial berbasis *Artificial Intelligence*. Tahap kedua adalah pembangunan model hubungan antara karbon lamun dengan parameter lingkungan, meliputi suhu, *Total Suspended Solids* (TSS), NO_2 , CO, dan curah hujan, guna memahami faktor-faktor yang memengaruhi dinamika karbon lamun. Tahap ketiga adalah perumusan strategi pengelolaan karbon lamun yang adaptif dan berbasis bukti ilmiah. Output yang dihasilkan dari penelitian ini meliputi peta tutupan lamun multitemporal, peta distribusi karbon AGC dan BGC pada periode 2020 - 2025 (musim hujan dan kemarau), serta model hubungan antara karbon lamun dengan faktor lingkungan. Seluruh hasil tersebut kemudian menjadi dasar dalam mendukung pengelolaan wilayah pesisir yang berkelanjutan berbasis karbon lamun. Untuk lebih jelasnya tentang alur kerangka pikir penelitian, dapat dilihat pada diagram berikut ini



Gambar 1.1 Kerangka Pikir Penelitian

Daftar Pustaka

- Aji. F. B, Febrianto. S, Afiati. N., Estimasi Stok Karbon Di Padang Lamun Pulau Nyamuk Dan Pulau Kemujan, Balai Taman Nasional Karimunjawa, Jepara. 2020. *J. Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 12(3): 805-819
- Bando. N. R. S., Carbon Stock Estimation Using Worldview-2 Imagery In The Seagrass Bed Of Kodingareng Island, Spermonde Archipelago, South Sulawesi. 2022. Computer Science Study Program Faculty Of Mathematics And Natural Sciences Bogor Agriculture University. Bogor
- Blume, A., Pertiwi, A. P., Lee, C. B., & Traganos, D. (2023). Bahamian seagrass extent and blue carbon accounting using Earth observation. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1058460. doi: 10.3389/fmars.2023.1058460.
- Chen H, Yang L, Wu Q. Enhancing Land Cover Mapping and Monitoring: An Interactive and Explainable Machine Learning Approach Using Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 2023; 15(18):4585. <https://doi.org/10.3390/rs15184585>
- Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., & Marbà, N. (2021). The role of coastal ecosystems in climate change mitigation. *Frontiers in Marine Science*, 2(3), 20-34
- F Ramdani, A Wirasatriya, A R Jalil. Monitoring The Sea Surface Temperature and Total Suspended Matter Based on Cloud-Computing Platform of Google Earth Engine and Open-Source Software. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 750.2021. 012041. doi:10.1088/1755-1315/750/1/012041
- Ha, N. T., Manley-Harris, M., Pham, T. D., & Hawes, I. (2020). A Comparative Assessment of Ensemble-Based Machine Learning and Maximum Likelihood Methods for Mapping Seagrass Using Sentinel-2 Imagery in Tauranga Harbor, New Zealand. *Remote Sensing*, 12(3), 355. <https://doi.org/10.3390/rs12030355>
- Halim, M., Bengen, D. G., & Prartono, T. (2020). Influence of turbidity and water depth on seagrass carbon stock in Indonesian coastal waters. *Biodiversitas*, 21(9), 4125–4133.
- Kurniawan.A. Pengukuran Parameter Kualitas Udara CO₂, NO₂, SO₂, O₃, dan PM₁₀ di Bukit Kototabang Berbasis ISPU. 2017. *Jurnal TeknoSains*. DOI 10.22146/teknoSains.34658
- Lee, C., et al. (2023). National-scale seagrass mapping using PlanetScope imagery in Seychelles. *Remote Sensing*, 15(7), 1892.
- Lee CB, Martin L, Traganos D, Antat S, Baez SK, Cupidon A, Faure A, Harlay J, Morgan M, Mortimer JA, et al. Mapping the National Seagrass Extent in Seychelles Using Planet Scope NICFI Data. *Remote Sensing*. 2023; 15(18):4500. <https://doi.org/10.3390/rs15184500>
- Liu J, Failler P, Ramrattan D. Blue carbon accounting to monitor coastal blue carbon ecosystems. *J Environ Manage*. 2024;352:120008. doi:10.1016/j.jenvman.2023.120008

- Looby, A., Lim, E. G., Murchy, K. A., Reynolds, L. K., Martin, C. W., Côté, I. M., Juanes, F., & Cox, K. D. (2026). Habitat-mediated noise pollution reduction in seagrass meadows. *Marine Pollution Bulletin*, 222(Pt 2), 118784. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118784>
- Losciale, R., Day, J. C., Rasheed, M. A., & Heron, S. F. (2023). The vulnerability of World Heritage seagrass habitats to climate change. *Global Change Biology*, 30(1), e17113. <https://doi.org/10.1111/gcb.17113>
- Macreadie, P.I.; Hardy, S.S.S. Response of Seagrass 'Blue Carbon' Stocks to Increased Water Temperatures. *Diversity* 2018, 10, 115. <https://doi.org/10.3390/d10040115>
- Marbà, N., et al. (2022). Thermal thresholds of seagrasses under climate warming scenarios. *Global Change Biology*, 28(6), 2145–2158.
- Mazarrasa, I., Samper-Villarreal, J., Lavery, P. S., et al. (2020). Habitat characteristics provide insights of carbon storage in seagrass meadows. *Journal of Ecology*, 108(1), 205-217.
- Monnier, G., et al. (2021). Seagrass meadows as efficient long-term carbon sinks: belowground processes and sediment storage. *Biogeosciences*, 18, 2347–2365.
- Montero-Hidalgo M, Tuya F, Otero-Ferrer F, Haroun R, Santos-Martín F. Mapping and assessing seagrass meadows changes and blue carbon under past, current, and future scenarios. *Sci Total Environ*. 2023 May 10;872:162244. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162244. Epub 2023 Feb 14. PMID: 36796703.
- Muhammad Rafly, Asril Maulana, Dimasya Deskar, Ariq Fadhlur Rahman, Ibnu Fadhil Ramadhan, Attala Adha, Vickie Devon Attala. Analisis Pengaruh Globalisasi Dan Perubahan Iklim Terhadap Perekonomian Indonesia Yang Berkelanjutan. 2023. Publiciana Volume – No – Hal 1 – 48 ISSN : 1979 – 0295 | E-ISSN : 2502 – 7336 | DOI : <https://doi.org/10.36563/p>
- Murugan R, Balachandar K, Boopathy NS, Nagarajan R, Ramasubramanian R. Assessment of blue carbon in seagrass meadows in Pulicat Lake, Andhra Pradesh, India. *Mar Pollut Bull*. 2024;198:115868. doi:10.1016/j.marpolbul.2023.115868
- Nazmi. A. N,. Pemanfaatan Data Citra Satelit Sentinel-2 Untuk Estimasi Stok Karbon Atas Padang Lamun Di Gili Petarando, Lombok Timur. 2020. Departemen Ilmu Dan Teknologi Kelautan Fakultas Perikanan Dan Ilmu Kelautan Institut Pertanian Bogor
- Niu, X., Chen, B., Sun, W., Feng, T., Yang, X., Liu, Y., Liu, W., & Fu, B. (2024). Estimation of Coastal Wetland Vegetation Aboveground Biomass by Integrating UAV and Satellite Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, 16(15), 2760. <https://doi.org/10.3390/rs16152760>
- Nurdin N, Komatsu T, Agus, Akbar M.AS, Djalil AR, Amri K. Multisensor and multitemporal data from Landsat images to detect damage to coral reefs, small

- islands in the Spermonde Archipelago, Indonesia. *Ocean Science Journal*. 2015;50(2): 1-9.
- Nurdin N, Amri K, Mashoreng S, Komatsu T. Estimation of Seagrass Biomass by In Situ Measurement and Remote Sensing Technology on Small Islands, Indonesia. *Ocean Science Journal*. 2022, 57(1), pp. 118–129.
- Nurdin N, Komatsu T, Rani C, Supriadi, Fakhriyyah S, Agus. Coral reef destruction of small island in 44 years and destructive fishing in Spermonde Archipelago, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016;47(1): 012011. Available from: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/47/1/012011>.
- Nurdin N, Prasyad H, Rani C, Al Azizi S.Q, Pulubuhu D.A.T, Aris A, Aushaf S.T, Nurdin N & Komatsu T. Tracking coral loss in the Spermonde Archipelago of Indonesia: 32 years of satellite monitoring from 1990 to 2022, *International Journal of Remote Sensing*. 2023. DOI: 10.1080/01431161.2023.2268823
- Nurdin N. Informasi Geospasial Gugusan Pulau Kecil Kepulauan Spermonde. Penerbit Andi. 2020. ISBN: 6230107554, 9786230107559.
- Orth, R. J., Carruthers, T. J. B., Dennison, W. C., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., Olyarnik, S., Short, F. T., Waycott, M., & Williams, S. L. (2006). A global crisis for seagrass ecosystems. *BioScience*, 56(12), 987–996.
- Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Sifleet, S., Craft, C., Fourqurean, J. W., Kauffman, J. B., Marbà, N., Magonigal, P., Pidgeon, E., Herr, D., Gordon, D., & Baldera, A. (2012). Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLoS ONE*, 7(9), e43542.
- Ramadona. D. N, Ain. C, Febrianto. S, Suryanti, Nurul Latifah. N . Potensi Simpanan Karbon Padang Lamun Di Pantai Pokemon, Karimunjawa. *J. Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*. 2021, 13(2): 319-332
- Roelfsema, C., et al. (2020). Multi-scale mapping of seagrass habitats using satellite remote sensing. *Remote Sensing*, 12(18), 2973.
- Rustan.A, Adi. N.S, Daulat. A, Kiswara. W, Yusuf. D. S, Rappe. R. A,. Pedoman Pengukuran Karbon di Ekosistem Padang Lamun. 2019. ITB Press
- Salsabila H N, Wicaksono P, Danoedoro P. Seagrass Aboveground Carbon Stock Mapping using PlanetScope SuperDove Imagery in Nemberala, Rote Island, East Nusa Tenggara. 2024. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1291 012013.
- Samper-Villarreal, J., Lovelock, C. E., Saunders, M. I., Roelfsema, C., & Mumby, P. J. (2016). Organic carbon in seagrass sediments is influenced by seagrass canopy

- complexity, turbidity, wave height, and water depth. *Limnology and Oceanography*, 61(3), 938-952. <https://doi.org/10.1002/lno.10262>
- Savenets, M. Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* Vol. 125, No. 2, April – June, 2021, pp. 271–290. DOI:10.28974/idojaras.2021.2.6
- Sjafrie, N. D. M., Hernawan, U. E., Prayudha, B., Iswari, M. Y., Rahmat, Anggraini, K., Rahmawati, S., Suyarso, & Supriyadi, I. H. (2018). *Status padang lamun Indonesia 2018*. Jakarta: Pusat Penelitian Oseanografi LIPI.
- Sullivan, E., Papagiannopoulos, N., Clewley, D., Groom, S., Raitos, D. E., & Hoteit, I. (2025). Mapping Coastal Marine Habitats Using UAV and Multispectral Satellite Imagery in the NEOM Region, Northern Red Sea. *Remote Sensing*, 17(3), 485. <https://doi.org/10.3390/rs17030485>
- Serrano, O., Lavery, P. S., Rozaimi, M., & Mateo, M. A. (2019). Influence of water depth and sediment characteristics on blue carbon stocks in seagrass meadows. *Science of the Total Environment*, 658, 1003–1013.
- Traganos, D., Lee, C. B., Blume, A., Poursanidis, D., Čížmek, H., Deter, J., Mačić, V., Montefalcone, M., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Ricart, A. M., & Reinartz, P. (2022). Spatially Explicit Seagrass Extent Mapping Across the Entire Mediterranean. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.871799>
- Veiras-Yanes J, Martin-Garcia L, Casas E, Arbelo M. Mapping Seagrass Meadows and Assessing Blue Carbon Stocks Using Sentinel-2 Satellite Imagery: A Case Study in the Canary Islands, Spain. *Environmental Sciences Proceedings*. 2024; 29(1):10. <https://doi.org/10.3390/ECRS2023-15856>
- Viedra, G. G. Z , Sukojo, B. M., Analysis of The Effect of Deforestation Rates on Air Pollution Concentration and Land Surface Temperature Using Landsat-8 Imagery with Google Earth Engine Kalimantan Province, 2019-2020). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1127 (2023) 012032. doi:10.1088/1755-1315/1127/1/012032
- Walden, L., Serrano, O., Zhang, M. et al. Multi-scale mapping of Australia's terrestrial and blue carbon stocks and their continental and bioregional drivers. *Commun Earth Environ* 4, 189 (2023). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00838-x>
- Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J. B., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., Calladine, A., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., Short, F. T., & Williams, S. L. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(30), 12377–12381.
- Yi, Y., Zhao, F., Hou, C., Zhang, C., & Tang, C. (2024). Mechanism and threshold of environmental stressors on seagrass in high-turbidity estuary: case of *Zostera japonica* in Yellow River Estuary, China. *Frontiers in Marine Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1432106>

BAB II

MEMETAKAN STOK KARBON ATAS DAN BAWAH PADANG LAMUN MENGUNAKAN PENDEKATAN *GEOSPATIAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE* (GAI)

2.1 Abstrak

Ekosistem padang lamun merupakan komponen penting dalam penyimpanan karbon biru, namun estimasi stok karbon berbasis penginderaan jauh masih menghadapi tantangan akibat variasi kondisi lingkungan antar lokasi. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan stok karbon padang lamun menggunakan pendekatan *Geospatial Artificial Intelligence* (GAI). Metode yang digunakan meliputi klasifikasi tutupan lamun menggunakan algoritma Random Forest, analisis karbon atas (*above-ground carbon*, AGC) dan bawah (*below-ground carbon*, BGC) melalui data lapangan, serta pengembangan model regresi berbasis indeks spektral. Hasil penelitian menunjukkan stok karbon lamun didominasi oleh komponen BGC dengan kontribusi 60–80% dari total karbon. Total karbon di Pulau Barrang Lompo berkisar antara 103,79–419,83 ton C sedangkan di Pulau Pannikiang mencapai 334,49–1.478,03 ton C. Dinamika temporal menunjukkan bahwa nilai karbon cenderung lebih tinggi pada musim hujan dibandingkan dengan musim kemarau, dengan puncak yang terjadi pada tahun 2022 di kedua lokasi. Model regresi menunjukkan bahwa tidak terdapat satu indeks spektral yang optimal untuk semua lokasi. Pada Pulau Barrang Lompo, model terbaik untuk AGC menggunakan rasio Coastal Blue/Green ($R^2 = 0,85$; RMSE = 23,29), sedangkan BGC menggunakan NDVI ($R^2 = 0,54$). Sebaliknya, pada Pulau Pannikiang, AGC dimodelkan menggunakan NDVI ($R^2 = 0,81$) dan BGC menggunakan rasio *Coastal Blue/Green* ($R^2 = 0,73$). Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan *site-specific modeling* lebih efektif dibandingkan dengan model tunggal dalam meningkatkan akurasi estimasi karbon lamun. Integrasi penginderaan jauh, artificial Intelligent, dan model regresi spektral terbukti mampu memetakan dinamika karbon lamun secara spasial dan temporal, serta memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pemetaan karbon biru untuk mendukung pengelolaan ekosistem pesisir

2.2 Pendahuluan

Pemanasan global menyebabkan ketidakstabilan gelombang dan pasang surut air laut serta peningkatan karbon dioksida, yang pada gilirannya mengakibatkan pengasaman air laut (Hilmi, et.al. 2021). Aktivitas manusia seperti pengerukan pasir, reklamasi, dan akuakultur juga berkontribusi pada penurunan kemampuan penyerap dan penyimpan karbon (Mashoreng, et.al 2021). Kerusakan ekosistem pesisir menjadi masalah mendesak yang perlu segera diatasi. Melindungi dan memulihkan habitat pesisir dapat mengurangi dampak pemanasan global dan perubahan iklim, serta meningkatkan potensi karbon biru. Karbon biru adalah karbon yang diserap dan disimpan oleh ekosistem laut atau pesisir. Ekosistem seperti lamun, bakau, alga, dan habitat pesisir lainnya berfungsi sebagai penyerap karbon yang efektif, mampu menyimpan sejumlah besar karbon. Ekosistem lamun memiliki peran penting dalam adaptasi dan mitigasi perubahan iklim melalui penyerapan karbon biru (Nabil, et.al.

2021). Di Indonesia, ekosistem lamun memiliki cadangan karbon biru yang cukup besar, dengan kemampuan menyerap dan menyimpan sekitar 18 persen karbon biru dunia (Fortes, et.al. 2018). Di sepanjang pesisir Indonesia, terdapat 16 spesies lamun yang berkontribusi pada tingginya potensi penyerapan dan penyimpanan karbon (Salsabila. 2024). Karbon yang diserap dan disimpan dalam ekosistem lamun dapat dipetakan dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh dan data persen tutupan lamun. Identifikasi biofisik lamun, seperti persen tutupan lamun, dapat dilakukan dengan citra penginderaan jauh, yang memungkinkan pemetaan wilayah yang luas dengan cepat dan tanpa merusak lingkungan (Salsabila. 2024). Menurut Wahyudi (2020), terdapat korelasi yang baik antara persen tutupan lamun dan cadangan karbon, dengan tutupan yang lebih tinggi mengindikasikan serapan karbon yang lebih besar. Kombinasi antara analisis laboratorium dan pemetaan berbasis penginderaan jauh dapat digunakan untuk mengembangkan persamaan untuk mengukur AGC lamun.

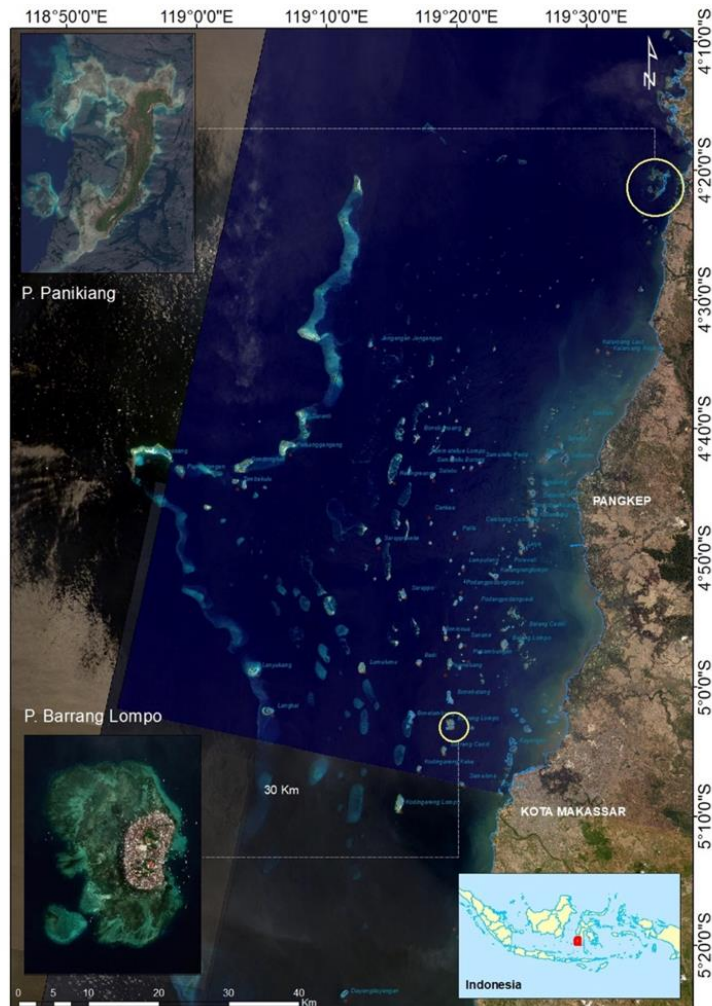
Namun demikian, beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji dinamika temporal padang lamun menggunakan penginderaan jauh, sehingga pendekatan multitemporal bukan merupakan hal yang sepenuhnya baru. Akan tetapi, sebagian besar penelitian tersebut cenderung menggunakan pendekatan model yang seragam tanpa mempertimbangkan secara mendalam variasi karakteristik lingkungan antar lokasi, yang dapat memengaruhi hubungan antara respon spektral dan parameter biofisik lamun. Perbedaan kondisi lingkungan, seperti jarak dari daratan utama, tingkat kekeruhan perairan, serta pengaruh aktivitas antropogenik, berpotensi menyebabkan variasi hubungan antara indeks spektral dan estimasi karbon lamun. Oleh karena itu, pengembangan model yang spesifik terhadap kondisi lokal (*site-specific model*) menjadi penting untuk meningkatkan akurasi estimasi karbon berbasis penginderaan jauh. Seiring dengan berkembangnya teknologi penginderaan jauh, PlanetScope SuperDove menawarkan potensi besar melalui 8 band spektral, termasuk coastal blue, green I, red edge, dan near-infrared, yang dapat meningkatkan sensitivitas deteksi vegetasi perairan dangkal. Di sisi lain, pendekatan *Artificial Intelligence* (AI), khususnya *machine learning*, telah terbukti mampu meningkatkan akurasi klasifikasi dan pemodelan spasial dibandingkan metode konvensional (Sagar et al., 2021). Berdasarkan hal tersebut kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan model regresi berbasis indeks spektral dan kombinasi band untuk estimasi stok karbon lamun yang dibangun secara spesifik pada dua lokasi pulau dengan karakteristik lingkungan berbeda. Pendekatan ini menekankan pentingnya penyesuaian model terhadap kondisi lokal untuk meningkatkan akurasi estimasi karbon.

Dengan demikian, hipotesis penelitian ini adalah bahwa hubungan antara respon spektral dan parameter karbon lamun bersifat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan lokal, sehingga model regresi yang dikembangkan secara spesifik per lokasi akan memberikan hasil estimasi yang lebih akurat dibandingkan penggunaan model tunggal yang seragam. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan stok karbon padang lamun melalui pendekatan *Geospatial Artificial Intelligent* (GAI).

2.3 Metodologi

2.3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di pesisir Sulawesi dengan lokasi pengamatan ditentukan melalui survei awal dan interpretasi citra, mempertimbangkan keberadaan lamun serta pengaruh antropogenik dan industrialisasi. Lokasi penelitian terletak di Pulau Barrang Lompo Kota Makassar dan Pulau Pannikiang di Kabupaten Barru (Gambar 2.1). Penelitian dilaksanakan bulan November Tahun 2024 – Oktober 2025.



Gambar 2. 1 Lokasi Penelitian Pulau Barrang Lompo dan Pulau Pannikiang

2.3.2 Jenis Data

Berdasarkan tujuan penelitian, beberapa jenis data yang digunakan mencakup data spasial, survei lapangan, dan analisis laboratorium. Jenis dan sumber data yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam tabel berikut (Tabel 2.1)

Tabel 2.1 Jenis Data

1. Citra Satelit PlanetScope Tahun 2020 - 2025			
Jenis Sensor	Akuisisi	Musim	Lokasi
Super Dove	3 Januari 2025	Hujan	P. Barrang Lompo
	19 Agustus 2025	Kemarau	
	2 Desember 2024	Hujan	
	13 Agustus 2024	Kemarau	
	23 Januari 2023	Hujan	
	23 Agustus 2023	Kemarau	
	26 Januari 2022	Hujan	
	19 Agustus 2022	Kemarau	
	7 Februari 2021	Hujan	
	14 Agustus 2021	Kemarau	
Dove R	2 Februari 2020	Hujan	P. Pannikiang
	24 Agustus 2020	Kemarau	
Super Dove	9 Januari 2025	Hujan	
	13 Agustus 2025	Kemarau	
	14 Februari 2024	Hujan	
	11 Agustus 2024	Kemarau	
	22 Februari 2023	Hujan	
	17 Agustus 2023	Kemarau	
	9 Januari 2022	Hujan	
	15 Agustus 2022	Kemarau	
	3 Januari 2021	Hujan	
	8 Agustus 2021	Kemarau	
Dove R	22 Januari 2020	Hujan	
	24 Agustus 2020	Kemarau	
2. Jenis dan Tutupan Lamun			
Akuisisi	Sumber	Metode	Lokasi
24 - 27 Juli 2025	Insitu	Transek Kuadran & CPCe	Pannikiang
28 – 30 Juli 2025	Insitu	Transek Kuadran & CPCe	Barrang Lompo
3. Biomassa Lamun	Analisis Laboratorium	Core Sampling	Pannikiang, Barrang Lompo
4. Karbon AGC dan BGC	Analisis Laboratorium	CHn Analyzer	Pannikiang , Barrang Lompo

2.3.3 Survei Lapangan

Sesuai dengan tujuan teknik pengumpulan data dari penelitian ini yaitu dengan melakukan survei lapangan untuk memperoleh informasi tutupan lamun dan karbon AGC dan BGC. Adapun penjelasan detail masing-masing data sebagai berikut:

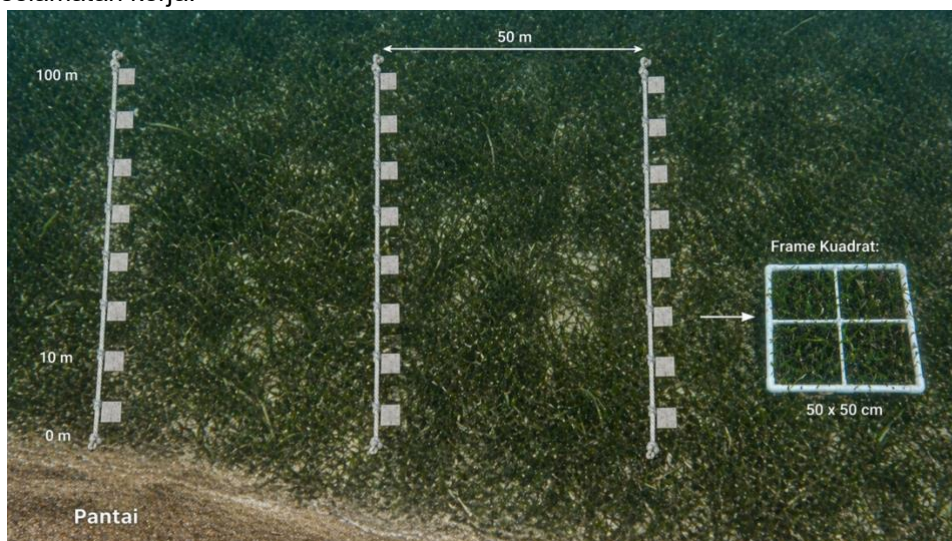
2.3.3.1 Tutupan Lamun

Pengukuran ekosistem lamun dilakukan untuk mengetahui pola distribusi, komposisi jenis dan tutupan lamun. Beberapa metode pengukuran dapat dilakukan merujuk dari beberapa protokol pengukuran yang sudah ada, seperti ASEAN-Australia Marine Science Project: Living Coastal Resources (English, et. al, 1997).

Pengamatan lamun menggunakan metode teknik *underwater photo transect* (UPT). UAV juga digunakan dalam membantu monitoring lamun (Bando. 2022). Dasar penentuan lokasi berdasarkan perwakilan tutupan lamun, dengan menggunakan aplikasi Avenza Map yang berisi geopdf peta kerja.

Metode pengukuran ekosistem lamun dimulai dengan menetapkan lokasi transek (line transect) untuk menentukan posisi yang tetap (tidak berpindah-pindah). English et al. (1997) menekankan bahwa pemilihan titik transek sebaiknya mewakili seluruh area lamun yang akan disurvei atau dimonitoring, serta sedapat mungkin mencakup karakteristik dari area tersebut. Penentuan titik awal garis transek pada metode ini dimulai dari jarak 10 m di lokasi ditemukannya lamun, dan diakhiri dengan penetapan titik akhir garis transek 10 m dari daerah dimana lamun sudah tidak ditemukan lagi. Transek ditegakkan tegak lurus pantai sepanjang 100 m menuju laut dengan jarak 50 m (Gambar 2.2).

Ekosistem lamun berada di wilayah perairan yang selalu tergenang oleh air laut, sehingga perubahan ketinggian air akibat pasang surut bisa menjadi tantangan, terutama di area dengan kedalaman lamun sekitar 1-2 meter. Oleh karena itu, memprediksi pasang surut air laut menjadi sangat penting sebelum melakukan kegiatan pengukuran di ekosistem lamun untuk memastikan kelancaran aktivitas serta menjaga keselamatan kerja.



Gambar 2.2. Skema Transek Kuadrat

Pemetaan awal menggunakan teknik penginderaan jauh diperlukan sebagai data dalam penentuan lokasi. Dalam hal ini, penelitian menggunakan citra satelit SuperDove dari PlanetScope, dimana dilakukan pra-processing kemudian memanfaatkan aplikasi mobile GIS. Pengambilan data In-Situ dilakukan beberapa langkah pada pengamatan

kuadrat. Pertama, dilakukan pengaturan alat seperti aktivasi GPS pada kamera, dokumentasi berupa pengambilan foto dengan jarak setiap 10 m. Pengambilan foto dengan memperhatikan meteran sebagai penanda foto. Kemudian dilakukan pengamatan jenis dan tutupan lamun. Selain metode transek, data juga dikumpulkan secara acak di perairan dangkal, masih menggunakan kuadrat sebagai unit pengamatan. Pendekatan ini bertujuan untuk menangkap variasi kondisi lamun yang tidak sepenuhnya terwakili oleh transek dan sebagai dasar titik klasifikasi dan validasi.

2.3.3.2 Karbon Lamun

Penyimpanan karbon dalam ekosistem lamun terbagi dalam 3 kolam karbon (*carbon pool*) yaitu: biomassa hidup lamun bagian atas, meliputi pelepah dan helai daun dan biota efit yang menempel, biomassa lamun bagian bawah, meliputi rhizoma dan akar lamun, dan sedimen baik yang bersumber dari ekosistem (*autochthonous*), maupun dari luar ekosistem (*allochthonous*) (Fourqurean et al, 2014). Selain itu juga diperlukan pengukuran biomassa mati bagian atas (serasah).

Pengamatan karbon dilakukan bersamaan dengan kondisi lamun. Data dikumpulkan berupa *above-ground biomass* (AGB) dan *below-ground biomass* (BGB). Pengambilan sampel biomassa dilakukan di luar plot kuadrat yang terdekat dan diperkirakan mewakili jenis yang ada dalam plot. Tahapan mengambil dengan pipa paralon ukuran 5 inci minimal sedalam 25 cm agar biomassa bagian bawah juga terambil. Sampel di bersihkan dan dimasukkan dalam plastik dan diberi label kemudian analisis di laboratorium.

2.3.4 Analisa Data

2.3.4.1 Kerapatan dan Tutupan Lamun

Foto transek lamun dianalisis menggunakan *Coral Point Count with Excel extension* (CPCe) untuk menghitung persentase tutupan lamun. Selain itu, dilakukan analisis kerapatan lamun untuk mengetahui jumlah tegakan lamun pada setiap satuan luas pengamatan menggunakan persamaan Fonseca et al. (2002), yaitu $D_i = \frac{n_i}{A}$ di mana D_i adalah kerapatan lamun jenis ke- i (ind/m²), n_i adalah jumlah tegakan lamun, dan A adalah luas area pengamatan (m²). Selanjutnya, dilakukan generalisasi untuk menentukan dominansi objek setiap piksel yang kemudian digunakan sebagai input proses klasifikasi. Kategori tutupan lamun dibagi menjadi empat kelas, yaitu jarang (0–25%), sedang (25–50%), padat (51–75%), dan sangat padat (75–100%) (Bando, 2022). Titik sampel kemudian dibagi menjadi dua kategori, yaitu untuk permodelan dan validasi.

2.3.4.2 Karbon Lamun

Setiap sampel diproses dengan cara dikeringkan pada suhu ruang hingga mencapai berat konstan, yang umumnya membutuhkan waktu sekitar lima hari, untuk memperoleh nilai berat kering. Setelah itu, sampel ditimbang untuk mendapatkan biomassa kering masing-masing jenis dan bagian (AGB dan BGB). Sampel yang telah kering kemudian dihaluskan menggunakan blender hingga menjadi serbuk homogen sebagai tahap preparasi sebelum analisis kandungan unsur.

Analisis kandungan karbon dilakukan menggunakan CHN Analyzer tipe CHN628, yang mampu mengukur kandungan karbon (C), hidrogen (H), dan nitrogen (N) dalam sampel secara simultan. Sebelum analisis sampel, dilakukan analisa blank sebanyak 3–

5 kali setelah proses conditioning alat guna memastikan kestabilan sistem dan memperoleh nilai referensi yang akurat. Sampel yang telah dihaluskan kemudian ditimbang dengan massa sekitar 1 gram, dibungkus menggunakan kapsul timah (tin foil), dan dimasukkan ke dalam autosampler (carousel). Proses analisis dijalankan melalui sistem perangkat lunak dengan menekan tombol analisis (Analyze/F5).

Setelah mendapatkan berat kering dan nilai persentase karbon (%) dari CHN maka kandungan karbon dapat dihitung berdasarkan formula:

$$\text{Biomassa karbon} = \text{Berat kering (g)} / \text{luas (m}^2\text{)} \times \% \text{ C} \dots\dots (\text{Rustan. 2019})$$

Perhitungan dilakukan setiap jenis lamun dalam kuadrat. Setelah mendapat luasan lamun berdasarkan tutupan, maka didapat stok karbon biomassa dikawasan tersebut.

Perhitungan ini dilakukan baik untuk AGC maupun BGC, kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan total karbon pada padang lamun per jenis maupun per lokasi pengamatan.

2.3.4.3 Pemetaan stok karbon lamun

Penelitian ini menggunakan citra multi temporal planetscope yang telah di koreksi geometrik dan radiometrik (Lee. et.al. 2023). Penelitian ini menggunakan pendekatan GAI untuk menghasilkan aplikasi semi-otomatisasi dalam pemetaan stok karbon (Gambar 2.3). Klasifikasi tutupan lamun menggunakan metode berbasis *machine learning* disebut *random forest classification*. Kemudian peta tutupan lamun digunakan basis area pendugaan karbon. Data pengukuran akan dihubungkan dengan nilai spektral untuk dimodelkan secara regresi linear. Hasil regresi akan dijadikan formula untuk mengubah nilai spektral menjadi nilai karbon. Berikut merupakan rumus regresi linear (Nazmi. 2020):

$$Y = ax + b \dots\dots\dots (\text{Nazmi. 2020})$$

Dimana :

Y : Nilai karbon lamun per piksel

x : nilai reflectance citra

a : kemiringan (gradient)

b : koefisien

Untuk mengetahui tingkat akurasi dan kemampuan model dalam mengestimasi karbon lamun berdasarkan data citra satelit, dilakukan uji kinerja model menggunakan Koefisien Determinasi (R^2) dan Root Mean Square Error (RMSE). Nilai R^2 digunakan untuk menilai kemampuan model dalam menjelaskan variasi data observasi, sedangkan RMSE digunakan untuk mengukur besarnya kesalahan prediksi antara hasil estimasi model dan data lapangan. Titik uji akurasi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari hasil survei lapangan pada masing-masing lokasi penelitian. Pulau Barrang Lompo menggunakan 15 titik pengamatan, sedangkan Pulau Pannikiang menggunakan 12 titik pengamatan. Data lapangan tersebut digunakan sebagai data referensi dalam proses

validasi model estimasi karbon lamun berbasis citra satelit. Adapun rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Koefisien Determinasi (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Keterangan:

- y_i = nilai observasi lapangan AGC/BGC
- $\hat{y}_i$ = nilai hasil prediksi model AGB/BGB
- $\bar{y}$ = rata-rata nilai observasi
- n = jumlah sampel

2. Root Mean Square Error (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Keterangan:

- y_i = nilai observasi lapangan AGC/BGC
- $\hat{y}_i$ = nilai prediksi model AGC/BGC
- n = jumlah sampel

Dalam penelitian ini, proses pengolahan data tidak hanya menggunakan aplikasi *stand-alone*, tetapi juga memanfaatkan platform *Google Earth Engine* untuk mendukung analisis data citra satelit secara lebih efisien dan semi-otomatis.

- Input Data
 - Batasan wilayah
 - Data survei model dan data uji untuk melatih dan menguji model klasifikasi.
- Pra pengolahan
 - Masking awan citra planet scope menggunakan formula NDWI (Lee. et.al 2023) , clip, dan *Multi-temporal aggregation* (Chen. et.al. 2023)
$$\text{Normalised Difference } ij = \frac{i-j}{i+j} \dots \dots \dots (\text{Lee. et.al 2023})$$

Dimana i dan j band yang digunakan
- Klasifikasi Citra
 - Algoritma *Random Forest* diimplementasikan menggunakan fungsi *ee.Classifier.smileRandomForest* di GEE (Blume. et.al. 2023).
- Uji Akurasi

Untuk mengevaluasi hasil klasifikasi, dibuat confusion matrix (matriks kesalahan) untuk tahun menggunakan data validasi. Pendekatan penilaian akurasi yang digunakan meliputi *overall accuracy* (OA) dan koefisien kappa Cohen (Congalton et al., 2008).

Metode matriks kesalahan yang digunakan dalam penelitian ini mengikuti persamaan berikut:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \cdot X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \cdot X_{+i})}$$

N merupakan jumlah total seluruh sampel. Nilai X_{ii} menunjukkan elemen diagonal pada matriks kesalahan, yaitu jumlah sampel yang terklasifikasi dengan benar untuk setiap kelas. Nilai X_{i+} adalah jumlah total sampel pada baris ke- i yang merepresentasikan total data referensi (ground truth) untuk suatu kelas, sedangkan X_{+i} merupakan jumlah total sampel pada kolom ke- i yang menunjukkan total hasil klasifikasi untuk kelas tersebut. r menyatakan jumlah kelas yang dianalisis dalam proses klasifikasi, dan K merupakan nilai koefisien kappa yang digunakan untuk mengukur tingkat kesesuaian antara hasil klasifikasi dengan data referensi.

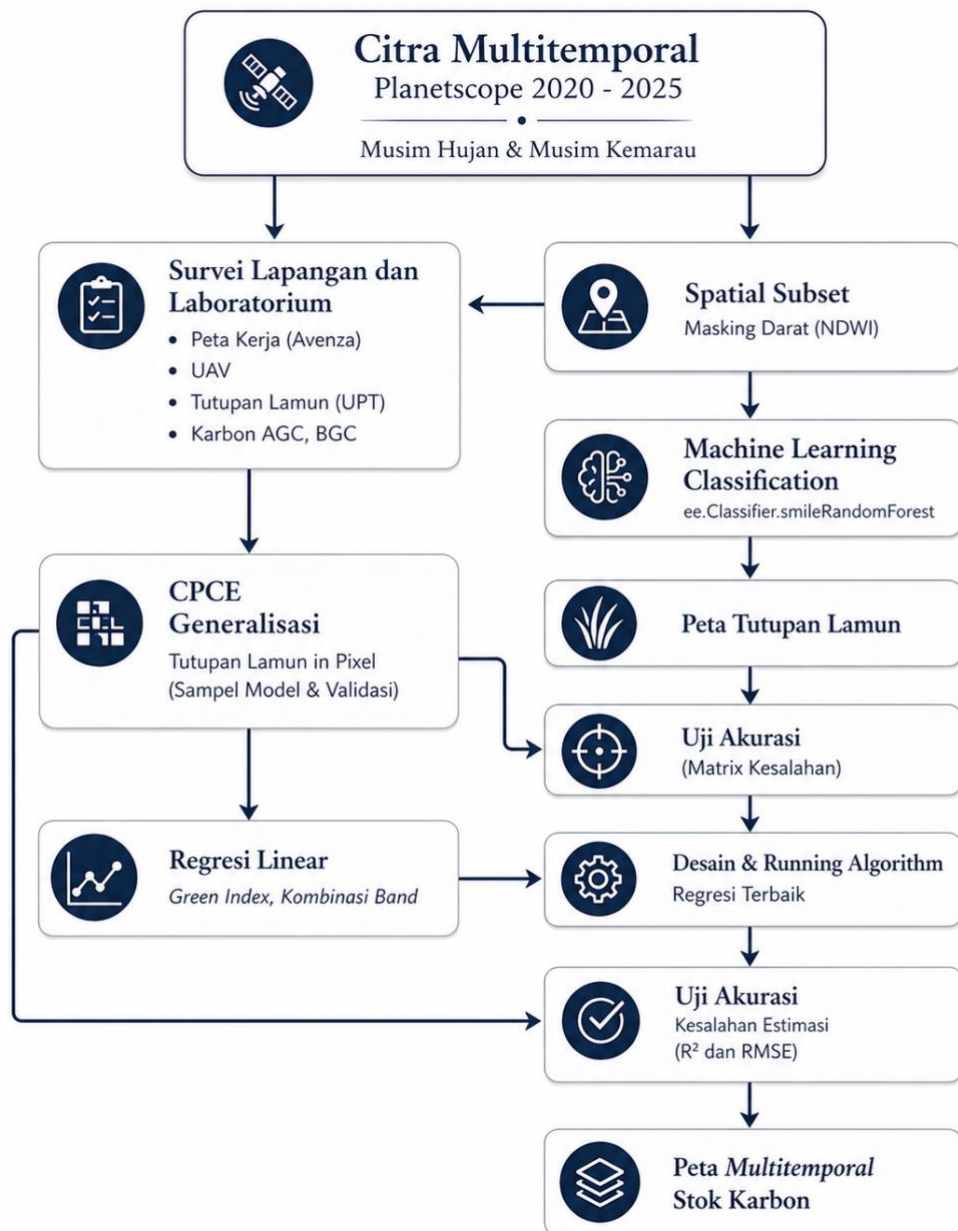
- Menjalankan Model
 - Model klasifikasi disimulasi menggunakan data latihan dengan fitur yang telah diekstrak dari citra PlanetScope NICFI.
- Desain algoritma karbon lamun
 - Integrasi formula hasil regresi dengan batasan hasil *random forest*.
 - Sebelum desain algoritma dilakukan, analisis regresi sederhana dilakukan dengan beberapa kombinasi band dan green index. Adapun kombinasi band dan green index sebagai berikut: NDVI, GNDVI, NDRE, VARI, Band Rasio Green / Red, Band Rasio Blue / Green, Band Rasio Coastal / Green, Band Rasio Red + Coastal Blue, Depth Invariant Index band Green, Red (DII 46), DII band Blue, Red (26), dan DII band Blue, Green (DII 24)
- Evaluasi Akurasi
 - Akurasi model dievaluasi menggunakan data uji, jika hasil model >61% maka simulasi dilanjutkan untuk implementasikan secara temporal.
- Perhitungan Stok Karbon (AGC dan BGC)

Perhitungan stok karbon dilakukan berdasarkan hasil pemodelan karbon yang memiliki satuan (g C/m^2) dari citra PlanetScope. Analisis dilakukan menggunakan metode zonal statistics untuk memperoleh nilai statistik berupa SUM (jumlah), MEAN (rata-rata), dan AREA (luas area) pada area lamun. Nilai SUM yang dihasilkan masih merepresentasikan akumulasi densitas karbon, sehingga perlu dikonversi menjadi total karbon dengan mempertimbangkan luas piksel citra. Resolusi spasial citra sebesar $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ digunakan sebagai dasar untuk menghitung luas piksel. Total karbon kemudian diperoleh dengan mengalikan nilai SUM dengan luas piksel, lalu dikonversi dari satuan gram ke ton karbon. Selanjutnya, luas area dihitung dalam satuan hektar untuk mendukung analisis kepadatan karbon. Adapun Persamaan yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut :

Total Karbon

$$Total_C = \frac{SUM \times 9 \text{ (Ukuran Pixel)}}{1,000,000 \text{ (Faktor Konversi Gram ke Ton)}}$$

Keterangan : *Total_C* = Total karbon pada area penelitian (ton C), dan *SUM* = Jumlah nilai karbon hasil zonal statistics (akumulasi nilai piksel dalam satuan g C/m²)

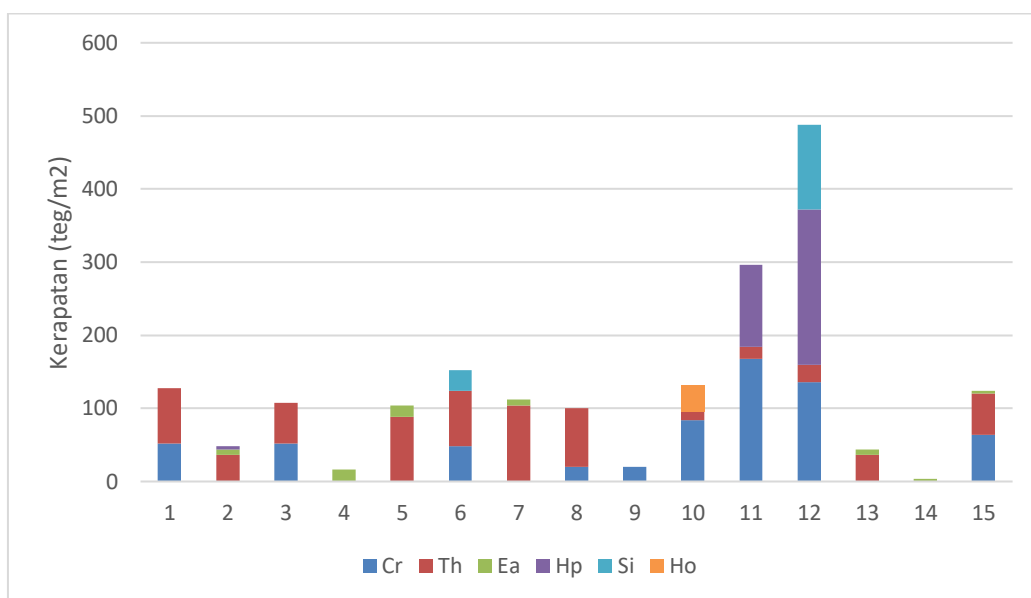


Gambar 2.3. Diagram Alir pemetaan Stok karbon Lamun menggunakan pendekatan GAI

2.4 Hasil dan Pembahasan

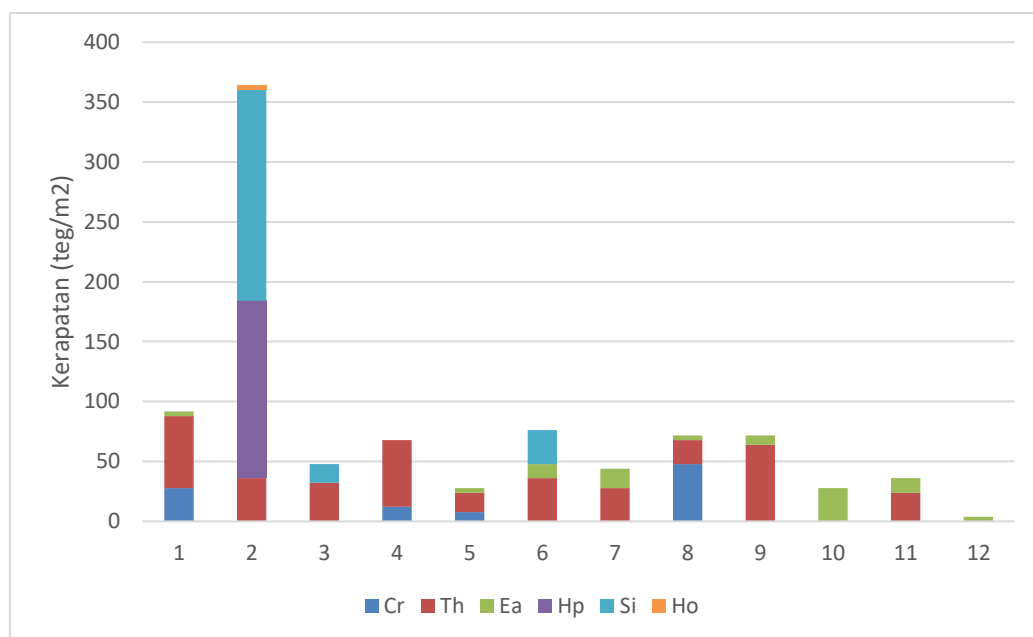
2.4.1 Komposisi Lamun

Hasil pengamatan komposisi kerapatan jenis lamun pada dua lokasi penelitian menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan baik dari segi kerapatan individu, dominansi spesies, maupun distribusi antar stasiun. Pulau Barrang Lompo, total kerapatan tertinggi ditemukan pada stasiun 12 yaitu 488 teg/m², diikuti oleh stasiun 11 (296 teg/m²), sedangkan nilai terendah terdapat pada stasiun 14 (4 teg/m²). Komposisi jenis menunjukkan dominansi kuat oleh spesies *T. hemprichii* dan *C. rotundata*, yang tersebar hampir di seluruh stasiun dengan kerapatan relatif tinggi. Selain itu, spesies *Halodule pinifolia* dan *Syringodium isoetifolium* juga menunjukkan kontribusi signifikan pada stasiun tertentu, terutama pada stasiun 11 dan 12. Sebaliknya, spesies *Enhalus acoroides* dan *Halophila ovalis* cenderung memiliki jumlah individu yang lebih rendah dan distribusi yang terbatas (Gambar 2.4).



Gambar 2.4 Komposisi kerapatan lamun per stasiun Pulau Barrang Lompo

Pada Pulau Pannikiang, pola distribusi menunjukkan karakteristik yang berbeda. Total kerapatan tertinggi ditemukan pada stasiun 2 (364 teg/m²), yang didominasi oleh spesies *Halodule pinifolia* dan *Syringodium isoetifolium*, sedangkan stasiun dengan nilai terendah adalah stasiun 12 (4 teg/m²). Secara umum, spesies *T. hemprichii* tetap menjadi spesies yang paling konsisten ditemukan di hampir seluruh stasiun, namun kontribusi spesies *Syringodium isoetifolium* dan *Halodule pinifolia* relatif lebih tinggi dibandingkan di Barrang Lompo. Distribusi spesies di Pannikiang juga menunjukkan variasi yang lebih heterogen, di mana beberapa stasiun hanya didominasi oleh satu atau dua spesies, sementara stasiun lainnya memiliki komposisi yang lebih kompleks (Gambar 2.5).



Gambar 2.5 Komposisi kerapatan lamun per stasiun Pulau Pannikiang

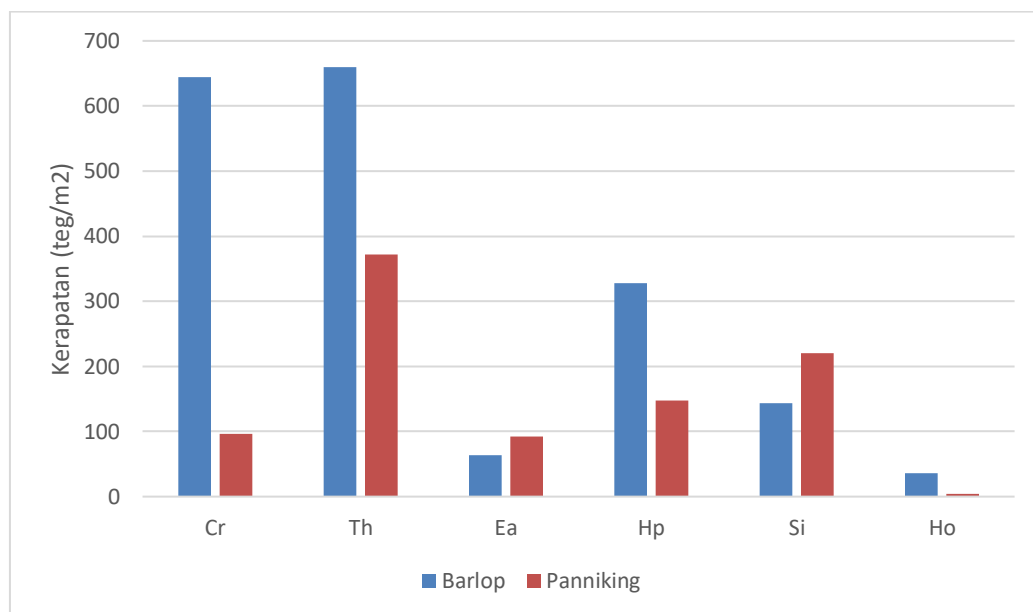
Analisis komparatif secara agregat menunjukkan bahwa pada Barrang Lompo, spesies *T. hemprichii* dan *C. rotundata* merupakan komponen utama dengan jumlah kerapatan masing-masing sebesar 660 dan 644, diikuti oleh *Halodule pinifolia* (328 teg/m²), *Si* (144 teg/m²), *Ea* (64 teg/m²), dan *Halophila ovalis* (36 teg/m²). Sementara itu, pada Pannikiang, meskipun *T. hemprichii* tetap menjadi spesies dominan (372 teg/m²), kontribusi spesies *Syringodium isoetifolium* (220 teg/m²) dan *Halodule pinifolia* (148 teg/m²) relatif lebih tinggi, sedangkan *C. rotundata* mengalami penurunan yang cukup signifikan (96 teg/m²). Perbedaan ini mengindikasikan adanya pergeseran struktur komunitas lamun antara kedua Lokasi (Gambar 2.6).

Secara ekologis, dominansi *T. hemprichii* pada kedua lokasi menunjukkan bahwa spesies ini memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap berbagai kondisi lingkungan, sebagaimana dilaporkan oleh Short et al. (2015) yang menyatakan bahwa *Thalassia hemprichii* merupakan spesies klimaks dengan toleransi lingkungan yang luas. Tingginya kelimpahan *C. rotundata* pada Barrang Lompo menunjukkan bahwa kondisi substrat dan perairan di lokasi tersebut lebih stabil dan mendukung pertumbuhan spesies ini, yang umumnya berkembang optimal pada substrat berpasir hingga lumpur dengan tingkat gangguan yang rendah (Waycott et al., 2011).

Sebaliknya, meningkatnya kontribusi spesies *Syringodium isoetifolium* dan *Halodule pinifolia* di Pannikiang mengindikasikan kondisi lingkungan yang lebih dinamis atau mengalami tekanan tertentu, seperti peningkatan kekeruhan atau nutrisi. Spesies tersebut dikenal memiliki strategi pertumbuhan cepat dan toleransi yang lebih tinggi terhadap kondisi lingkungan yang fluktuatif (Unsworth et al., 2012; Nordlund et al., 2016). Pola distribusi yang lebih heterogen di Pannikiang juga menunjukkan adanya variabilitas spasial yang tinggi, yang dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti arus, kedalaman, serta aktivitas antropogenik. Variasi kerapatan antar stasiun, terutama

tingginya nilai pada stasiun tertentu seperti stasiun 12 di Barrang Lompo dan stasiun 2 di Pannikiang, mengindikasikan adanya zona dengan kondisi optimal bagi pertumbuhan lamun. Faktor-faktor seperti ketersediaan cahaya, kondisi substrat, dan rendahnya gangguan fisik diduga menjadi penyebab utama tingginya kepadatan lamun pada lokasi tersebut (Colvin & Snelgrove, 2025; Hirst et al., 2017). Sebaliknya, stasiun dengan jumlah individu yang sangat rendah menunjukkan kemungkinan adanya tekanan lingkungan seperti sedimentasi tinggi atau gangguan aktivitas manusia.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Barrang Lompo cenderung memiliki struktur komunitas lamun yang lebih stabil dan didominasi oleh spesies berbiomassa tinggi, sedangkan Pannikiang menunjukkan struktur komunitas yang lebih heterogen dan dinamis. Perbedaan ini memiliki implikasi penting terhadap potensi biomassa dan kapasitas penyimpanan karbon, di mana lokasi dengan dominansi spesies besar dan stabil umumnya memiliki kemampuan penyimpanan karbon yang lebih tinggi (Fourqurean et al., 2012). Dengan demikian, analisis komposisi jenis dan distribusi lamun ini menjadi dasar penting dalam memahami mekanisme ekosistem serta dalam pengembangan strategi pengelolaan dan konservasi lamun berbasis karbon biru.



Gambar 2.6 Perbandingan kepadatan Lamun Pulau Barrang Lompo dan Pannikiang

2.4.2 Karakteristik AGC dan BGC Lamun

Karakteristik karbon lamun pada penelitian ini dianalisis berdasarkan dua komponen utama, yaitu above-ground carbon (AGC) dan below-ground carbon (BGC). Kandungan karbon (%) pada masing-masing sampel diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan CHN Analyzer, yang memberikan nilai persentase karbon organik berdasarkan hasil pembakaran sampel. Nilai karbon (%) ini kemudian dikonversi menjadi stok karbon dalam satuan gram karbon per meter persegi (gC/m²) dengan mengalikan persentase karbon terhadap biomassa kering. Pulau Barrang Lompo menunjukkan nilai

karbon (%) pada AGC berkisar antara sekitar 23% hingga 32%, dengan variasi antar stasiun yang relatif moderat. Nilai tertinggi umumnya ditemukan pada spesies *T. hemprichii* dan *C. rotundata*, yang memiliki biomassa daun yang lebih besar. Secara kuantitatif, nilai karbon AGC (gC/m^2) menunjukkan variasi yang signifikan, di mana stasiun dengan kepadatan lamun tinggi seperti stasiun 5, 6, dan 7 memiliki kontribusi AGC yang lebih besar dibandingkan stasiun lainnya. Namun demikian, kontribusi AGC terhadap total karbon secara umum masih lebih rendah dibandingkan BGC (Tabel 2.2). Sedangkan Pulau Pannikiang, nilai karbon (%) AGC relatif berada pada kisaran yang sama (24.656 - 30.391%), menunjukkan konsistensi kandungan karbon jaringan lamun antar lokasi. Akan tetapi, distribusi nilai karbon AGC (gC/m^2) lebih bervariasi, dengan nilai yang sangat tinggi pada stasiun tertentu seperti stasiun 10 dan 11 yang didominasi oleh *Ea*. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun nilai persentase karbon relatif seragam, variasi biomassa sangat mempengaruhi besarnya stok karbon AGC (Tabel 2.3).

Komponen BGC menunjukkan kontribusi yang jauh lebih dominan dibandingkan AGC pada kedua lokasi. Pulau Barrang Lompo menunjukkan nilai karbon (%) BGC berkisar antara 25% hingga 34%, dengan nilai yang cenderung lebih tinggi dibandingkan AGC. Hal ini mencerminkan bahwa jaringan bawah lamun (akar dan rimpang) memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi dan lebih stabil. Nilai karbon BGC (gC/m^2) pada beberapa stasiun, seperti stasiun 5 dan 7, menunjukkan lonjakan yang signifikan, bahkan mencapai lebih dari dua hingga tiga kali lipat dibandingkan AGC. Pada Lokasi Pulau Pannikiang, pola yang sama juga terlihat, di mana nilai karbon BGC jauh lebih tinggi dibandingkan AGC. Stasiun seperti 6, 9, dan 11 menunjukkan nilai karbon BGC yang sangat tinggi, terutama pada spesies *Ea*, yang dikenal memiliki sistem perakaran besar dan dalam. Nilai BGC yang tinggi ini menunjukkan bahwa sebagian besar karbon tersimpan di dalam sedimen, sehingga lebih terlindungi dari proses dekomposisi cepat.

Akumulasi karbon total menunjukkan variasi yang sangat signifikan antar stasiun dan antar lokasi. Pulau Barrang Lompo menghasilkan nilai karbon total tertinggi ditemukan pada stasiun 5 dan 7, yang menunjukkan kombinasi antara biomassa tinggi dan dominansi spesies berkontribusi besar terhadap karbon. Sebaliknya, nilai terendah ditemukan pada stasiun dengan kepadatan rendah, seperti stasiun 4 dan 9. Pada Pulau Pannikiang, nilai karbon total juga menunjukkan pola hotspot, dengan nilai tertinggi pada stasiun 6, 9, dan 11. Distribusi karbon total di lokasi ini lebih tersebar dibandingkan Barrang Lompo, mencerminkan struktur komunitas yang lebih heterogen. Secara umum, kontribusi BGC terhadap total karbon mencapai lebih dari 60–80% pada sebagian besar stasiun, menegaskan dominasi penyimpanan karbon pada bagian bawah substrat. Dominasi karbon pada BGC yang ditemukan pada kedua lokasi merupakan karakteristik umum ekosistem lamun tropis. Hal ini disebabkan oleh akumulasi biomassa akar dan rimpang yang tertanam dalam sedimen, sehingga karbon yang tersimpan relatif lebih stabil dan memiliki waktu tinggal (*residence time*) yang lebih lama (Fan et al., 2024). Selain itu, kondisi sedimen juga memperlambat proses dekomposisi, sehingga meningkatkan efisiensi penyimpanan karbon. Nilai karbon (%) yang relatif seragam antara AGC dan BGC menunjukkan bahwa perbedaan utama dalam stok karbon lebih dipengaruhi oleh jumlah biomassa dibandingkan kandungan karbon per unit jaringan. Hal ini sejalan dengan temuan (Krause et al., 2025; Tanaya et al., 2018) yang

menyatakan bahwa variasi stok karbon lamun lebih banyak ditentukan oleh produktivitas biomassa dan stabilitas habitat dibandingkan variasi kimia jaringan.

Tabel 2.2 Nilai Karbon Organik Lamun Pulau Barrang Lompo

<i>Stasiun Jenis</i>		AGC			BGC		
		<i>Carbon (%)</i>	<i>gc/m2</i>	<i>Total gc/m2</i>	<i>Carbon (%)</i>	<i>gc/m2</i>	<i>Total gc/m2</i>
1	Cr	31.173	14.492	44.426	32.223	61.063	142.975
	Th	30.86	29.934		31.583	81.911	
2	Th	23.172	132.137	189.232	27.300	39.215	257.537
	Ea	28.267	57.047		33.595	217.797	
	Hp	20.291	0.048		21.424	0.524	
3	Th	27.83	80.349	88.132	32.138	69.374	148.667
	Cr	23.478	7.783		32.939	79.293	
4	Ea	27.748	217.648	217.648	26.391	82.506	82.506
5	Ea	28.425	42.873	140.793	30.674	395.106	569.639
	Th	28.293	97.920		24.263	174.533	
6	Th	29.822	100.693	126.496	30.780	145.130	193.921
	Cr	32.761	24.538		31.813	44.393	
	Si	27.621	1.264		30.961	4.399	
7	Th	29.193	154.836	197.679	31.295	386.853	459.790
	Ea	28.721	42.843		32.482	72.937	
8	Cr	28.794	9.363	106.427	31.763	15.693	177.900
	Th	28.356	97.064		28.824	162.206	
9	Cr	30.367	36.742	36.742	26.861	79.608	79.608
10	Th	30.707	10.421	41.741	31.252	33.299	113.768
	Ho	30.378	0.959		30.321	3.542	
	Cr	26.529	30.361		30.110	76.927	
11	Hp	30.526	5.831	95.912	30.109	60.907	303.513
	Th	30.539	11.039		28.608	55.048	
	Cr	30.748	79.042		33.329	187.558	
12	Th	32.529	13.145	76.368	32.060	42.839	186.289
	Si	26.789	7.210		29.524	20.459	
	Cr	29.597	43.706		32.944	80.007	
	Hp	29.53	12.306		29.248	42.983	
13	Ea	28.183	64.329	122.579	32.363	209.964	309.615
	Th	29.171	58.250		31.098	99.651	
14	Ea	27.652	126.955	126.955	30.025	167.922	167.922

15	Cr	30.059	18.505	183.071	34.936	25.037	224.286
	Th	32.223	122.305		25.774	115.810	
	Ea	29.88	42.261		32.280	83.439	

Perbedaan antara kedua lokasi menunjukkan adanya pengaruh struktur komunitas dan kondisi lingkungan terhadap distribusi karbon. Barrang Lompo didominasi oleh spesies seperti *T. hemprichii* dan *C. rotundata*, menunjukkan pola karbon yang lebih terkonsentrasi pada stasiun tertentu, mengindikasikan kondisi lingkungan yang relatif stabil dan mendukung akumulasi karbon jangka panjang. Sebaliknya, Pannikiang menunjukkan distribusi karbon yang lebih heterogen, yang dapat dikaitkan dengan variasi kondisi lingkungan seperti kekeruhan, arus, dan kemungkinan tekanan antropogenik (Ricart et al., 2020). Selain itu, dominansi spesies tertentu juga mempengaruhi kapasitas penyimpanan karbon. Spesies dengan sistem akar dan rimpang yang berkembang baik, seperti *Thalassia hemprichii* dan *Enhalus acoroides*, cenderung memiliki kontribusi yang lebih besar terhadap karbon BGC (Rahman et al., 2018; Zhang et al., 2020).

Tabel 2.3 Nilai Karbon Organik Lamun Pulau Pannikiang

Stasiun	Jenis	AGC			BGC		
		Carbon (%)	gc/m2	Total gc/m2	Carbon (%)	gc/m2	Total gc/m2
1	Ea	27.656	2.074	90.763	24.051	1.670	239.989
	Th	24.773	68.492		27.434	197.538	
	Cr	30.392	20.197		31.777	40.781	
2	Hp	28.131	13.477	89.620	29.679	22.511	111.060
	Si	26.984	18.209		27.765	25.552	
	Th	26.411	57.930		25.897	62.990	
3	Th	30.157	51.174	54.527	30.424	89.975	103.315
	Si	26.549	3.353		29.191	13.340	
4	Th	30.391	78.292	81.860	31.638	259.072	266.550
	Cr	25.113	3.568		29.335	7.478	
5	Cr	28.799	1.818	47.927	29.540	4.476	42.588
	Th	29.180	22.040		29.653	37.213	
	Ea	26.086	24.068		23.741	0.899	
6	Ea	28.836	10.219	55.153	32.762	403.022	517.289
	Si	23.912	3.963		30.184	6.504	
	Th	28.791	40.971		32.416	107.763	
7	Ea	27.894	43.899	81.682	30.296	107.291	138.366
	Th	27.061	37.783		25.401	31.075	
8	Ea	26.119	29.294	75.691	32.047	107.017	174.126

	Th	28.337	21.516		28.093	25.033	
	Cr	26.097	24.882		31.157	42.075	
9	Ea	26.700	27.733	100.676	30.565	332.307	426.334
	Th	25.397	72.944		27.731	94.027	
10	Ea	26.459	239.509	239.509	30.540	313.692	313.692
11	Ea	24.656	173.409	215.058	28.068	278.332	335.390
	Th	28.757	41.649		26.042	57.058	
12	Ea	28.062	17.586	17.586	32.570	285.649	285.649

Namun demikian, terdapat beberapa anomali pada data, di mana beberapa stasiun menunjukkan nilai karbon yang relatif rendah meskipun terdapat kehadiran lamun. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan lamun tidak selalu berbanding lurus dengan stok karbon, melainkan dipengaruhi oleh faktor lain seperti umur padang lamun, gangguan fisik, dan dinamika sedimen. Temuan ini mendukung pernyataan (Berger et al., 2020; Trevathan-Tackett et al., 2018) bahwa stok karbon lamun sangat bergantung pada kondisi ekosistem jangka panjang dan sejarah gangguan.

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa ekosistem lamun di kedua lokasi memiliki kapasitas penyimpanan karbon yang tinggi, dengan kontribusi terbesar berasal dari biomassa bawah. Secara ilmiah, temuan ini memperkuat konsep bahwa lamun merupakan komponen penting dalam mitigasi perubahan iklim melalui mekanisme karbon biru. Secara praktis, informasi ini dapat digunakan untuk menentukan lokasi prioritas konservasi, khususnya pada area dengan stok karbon tinggi dan kondisi ekosistem yang stabil. Secara keseluruhan, karakteristik karbon lamun pada penelitian ini menunjukkan bahwa distribusi karbon dipengaruhi oleh interaksi antara biomassa, komposisi jenis, dan kondisi lingkungan. Pendekatan analisis yang memisahkan AGC dan BGC memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme penyimpanan karbon, yang selanjutnya menjadi dasar dalam pengembangan model spasial dan temporal karbon lamun dalam penelitian ini.

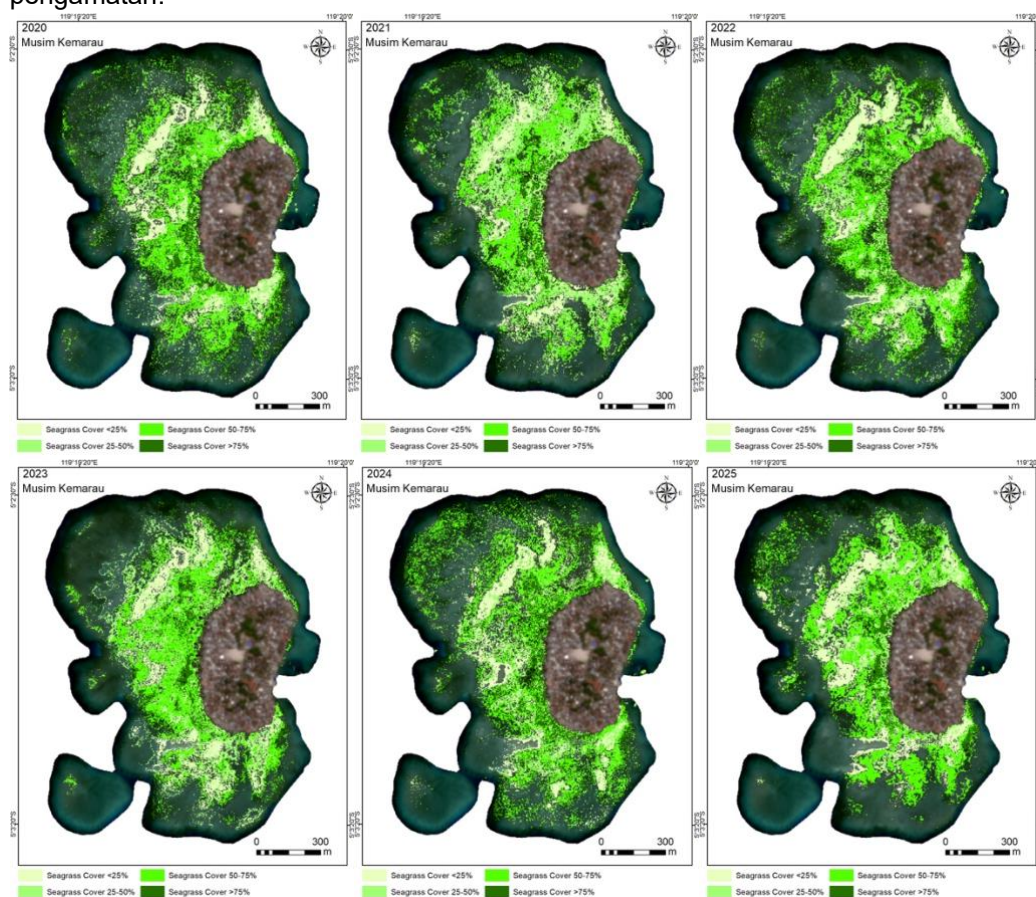
2.4.3 Pemetaan Stok Karbon Lamun

2.4.3.1 Dinamika Tutupan Lamun

Algoritma random forest (rf) merupakan metode klasifikasi ensemble berbasis pohon keputusan (decision tree). Prinsip utama rf yaitu menetapkan kelas berdasarkan keputusan RF dengan menggunakan: (a) 500 pohon untuk melatih model, (b) subsampling dengan penggantian, dan (c) menggunakan sejumlah variabel per node yang dibagi sama dengan akar kuadrat dari total variabel. Peta klasifikasi divalidasi dengan menggunakan satu set piksel (3 m) tunggal yang terpisah yang dihasilkan dari survei lapangan dan pemeriksaan visual komposit RGB. 578 piksel diekstraksi dari batas-batas objek yang diklasifikasikan dengan menerapkan jenis pengambilan sampel. Memilih poligon dengan beberapa piksel membantu dalam memiliki set pelatihan yang kuat; namun, memilih poligon untuk validasi akan menyebabkan kesalahan klasifikasi yang kurang tepat dalam penelitian ini. Oleh karena itu, dengan memilih piksel tunggal,

objektivitas prosedur validasi meningkat dan hasil yang salah dapat ditangkap secara efektif.

Berdasarkan hasil pemantauan selama enam tahun periode (2020-2025), ekosistem lamun di pulau barrang lombo menunjukkan stabilitas yang cukup baik dalam hal total tutupan. Pada musim hujan, total tutupan lamun berada dalam kisaran 44,94-50,40 Ha, sedangkan pada musim kemarau berkisar antara 46,17-47,88 Ha (Gambar 2.7). Fluktuasi tahunan yang terjadi tidak mengindikasikan adanya tren penurunan atau peningkatan yang signifikan secara konsisten, baik pada musim hujan maupun musim kemarau. Stabilitas ini mengimplikasikan bahwa ekosistem lamun secara keseluruhan memiliki ketahanan yang baik terhadap variabilitas lingkungan musiman selama periode pengamatan.



Gambar 2.7 Peta Tutupan Lamun P. Barrang Lombo Musim Kemarau, 2025, 2024, 2023, 2022, 2021, 2020

Analisis terhadap distribusi kategori tutupan pada musim hujan mengungkapkan pola yang menarik. Kategori tutupan sedang (50-75%) mendominasi dan menunjukkan tren peningkatan dari 16,14 Ha pada tahun 2020 menjadi 20,55 Ha pada tahun 2025. Sementara itu, kategori tutupan tinggi (>75%) relatif stabil pada kisaran 4,75-6,65 Ha (Tabel 2.4). Kategori tutupan rendah (<25% dan 25-50%) tidak menunjukkan pola

perubahan yang seragam, meskipun kategori 25-50% cenderung lebih tinggi dibandingkan kategori <25%.

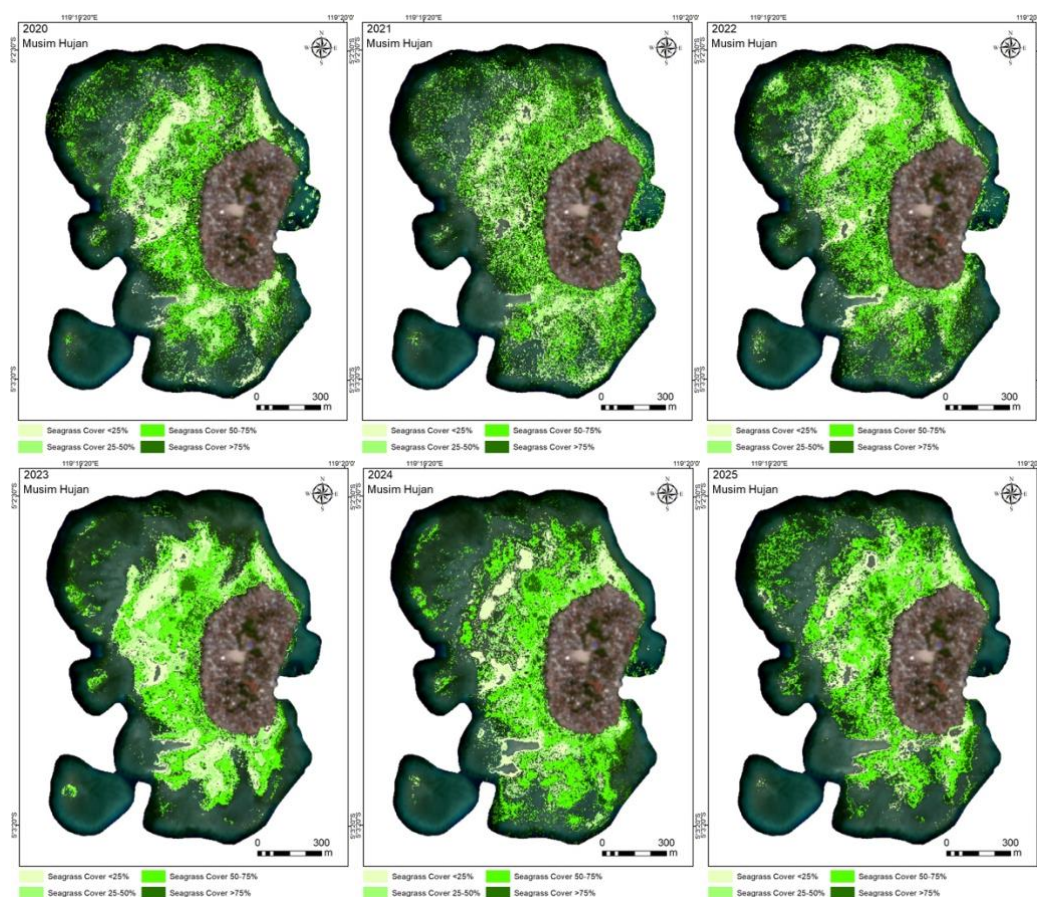
Tabel 2.4 Luas Tutupan Lamun P. Barrang Lompo musim hujan 2020 - 2025

Seagrass Cover	2025	2024	2023	2022	2021	2020
Musim Hujan						
Seagrass Cover <25%	7.50	7.51	11.43	12.08	8.42	10.11
Seagrass Cover 25-50%	12.21	13.34	14.34	13.38	14.54	14.70
Seagrass Cover 50-75%	20.55	20.46	18.84	19.66	16.64	16.14
Seagrass Cover >75%	5.67	5.28	4.75	5.29	5.34	6.65
Total	45.93	46.59	49.36	50.40	44.94	47.60

Berbeda dengan musim hujan, musim kemarau menunjukkan karakteristik sebaran tutupan yang unik. Kategori tutupan rendah (<25%) mengalami fluktuasi yang cukup besar, dengan puncaknya mencapai 18,81Ha pada tahun 2021 (Gambar 2.8). Sebaliknya, kategori tutupan tinggi (>75%) cenderung lebih stabil dan secara numerik lebih tinggi dibandingkan dengan nilai yang sama pada musim hujan di sebagian besar tahun pengamatan. Kategori tutupan sedang (50-75%) justru menunjukkan nilai yang lebih rendah pada musim kemarau jika dibandingkan dengan musim hujan (Tabel 2.5). Variasi ini mengindikasikan adanya respons diferensial komunitas lamun terhadap kondisi lingkungan pada musim kemarau.

Tabel 2.5 Luas Tutupan Lamun P. Barrang Lompo musim kemarau 2020 - 2025

Seagrass Cover	2025	2024	2023	2022	2021	2020
Musim Kemarau						
Seagrass Cover <25%	12.27	13.05	16.51	13.28	18.81	12.40
Seagrass Cover 25-50%	20.08	19.84	17.32	17.59	15.18	18.36
Seagrass Cover 50-75%	9.46	8.19	8.60	8.58	8.16	8.49
Seagrass Cover >75%	6.07	6.44	4.79	7.67	5.32	6.93
Total	47.88	47.52	47.22	47.12	47.46	46.17

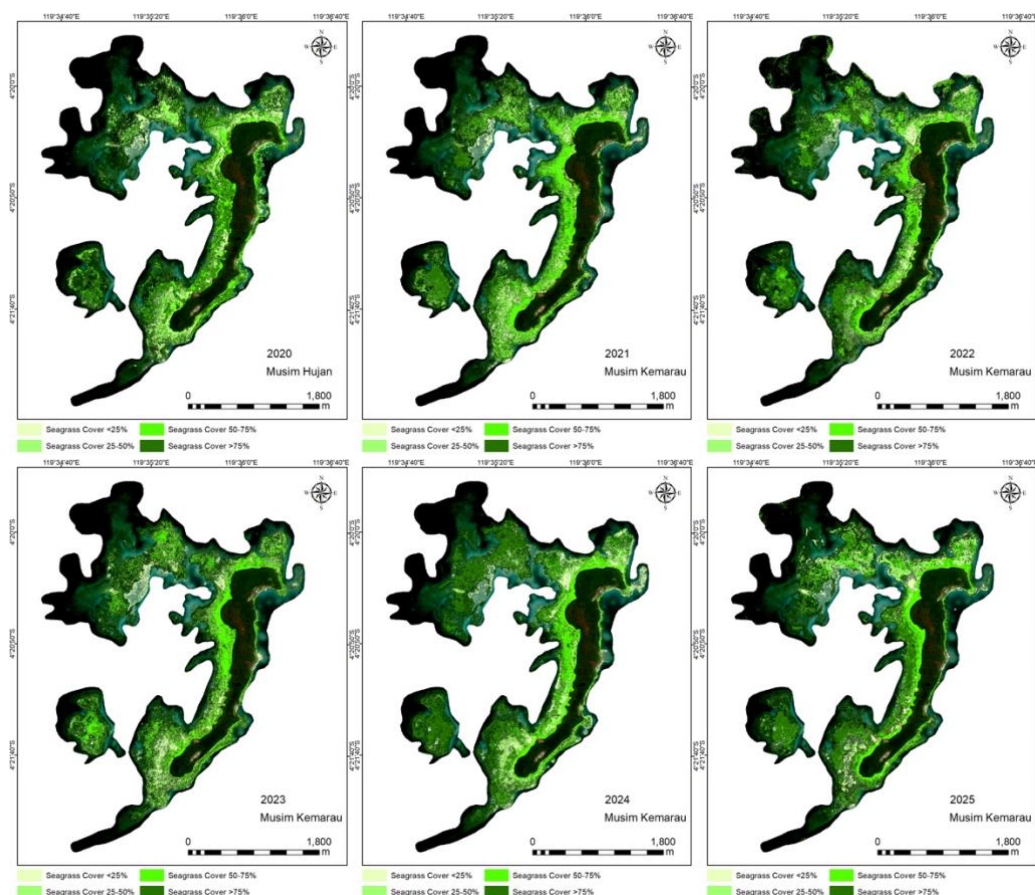


Gambar 2.8 Peta Tutupan Lamun P. Barrang Lompo Musim Hujan, 2025, 2024, 2023, 2022, 2021, 2020

Perbandingan antar musim mengungkapkan bahwa musim hujan cenderung didominasi oleh kategori tutupan sedang (50-75%), sementara musim kemarau menunjukkan sebaran yang lebih merata. Kategori tutupan tinggi (>75%) secara konsisten menunjukkan performa yang lebih baik pada musim kemarau, yang diduga terkait dengan kondisi perairan yang lebih stabil, intensitas cahaya yang optimal, dan tekanan hidrodinamika yang lebih rendah. Sebaliknya, kategori tutupan sangat rendah (<25%) menunjukkan kerentanan yang lebih besar selama musim kemarau pada tahun-tahun tertentu, yang mungkin dipicu oleh faktor stres seperti peningkatan salinitas atau kompetisi ruang.

Sedangkan hasil pemantauan selama enam tahun periode (2020-2025) di Pulau Pannikiang, ekosistem lamun menunjukkan stabilitas yang cukup baik dalam hal total tutupan. Pada musim hujan, total tutupan lamun berada dalam kisaran 44,94-50,40%, sedangkan pada musim kemarau berkisar antara 46,17- 47,88% (Gambar 2.9). Fluktuasi tahunan yang terjadi tidak mengindikasikan adanya tren penurunan atau peningkatan yang signifikan secara konsisten, baik pada musim hujan maupun musim kemarau. Stabilitas ini mengimplikasikan bahwa ekosistem lamun secara keseluruhan memiliki

ketahanan yang baik terhadap variabilitas lingkungan musiman selama periode pengamatan.



Gambar 2.9 Peta Tutupan Lamun P. Pannikiang Musim Kemarau, 2025, 2024, 2023, 2022, 2021, 2020

Analisis terhadap distribusi kategori tutupan pada musim hujan mengungkapkan pola yang menarik. Kategori tutupan sedang (50-75%) mendominasi dan menunjukkan tren peningkatan dari 16,14% pada tahun 2020 menjadi 20,55% pada tahun 2025. Sementara itu, kategori tutupan tinggi (>75%) relatif stabil pada kisaran 4,75-6,65%. Kategori tutupan rendah (<25% dan 25-50%) tidak menunjukkan pola perubahan yang seragam, meskipun kategori 25-50% cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan kategori <25% (Tabel 2.6). Kondisi ini diduga berkaitan dengan faktor lingkungan musiman seperti intensitas curah hujan dan dinamika perairan yang memengaruhi sebaran lamun.

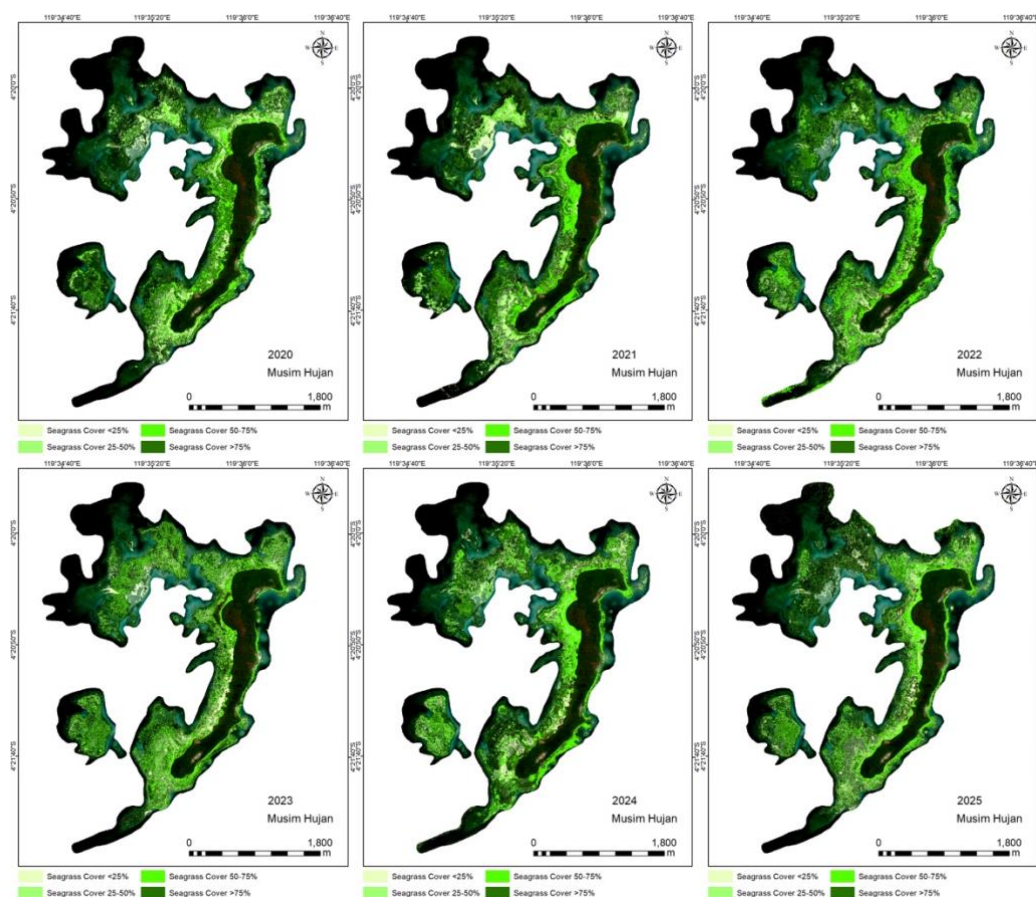
Tabel 2.6 Luas Tutupan Lamun P. Pannikiang musim Hujan 2020 - 2025

Seagrass Cover	2025	2024	2023	2022	2021	2020
Musim Hujan						
Seagrass Cover <25%	27.05	28.55	31.55	21.80	30.55	29.34
Seagrass Cover 25-50%	33.12	24.34	27.83	17.23	26.33	27.29
Seagrass Cover 50-75%	54.59	70.25	62.93	89.39	61.35	52.57
Seagrass Cover >75%	42.98	41.94	46.27	52.53	42.64	55.55
Total	157.76	165.10	168.60	180.97	160.89	164.76

Berbeda dengan musim hujan, musim kemarau menunjukkan karakteristik sebaran tutupan yang unik. Kategori tutupan rendah (<25%) mengalami fluktuasi yang cukup besar, dengan puncaknya mencapai 18,81% pada tahun 2021 (Gambar 2.10). Sebaliknya, kategori tutupan tinggi (>75%) cenderung lebih stabil dan secara numerik lebih tinggi dibandingkan dengan nilai yang sama pada musim hujan di sebagian besar tahun pengamatan. Kategori tutupan sedang (50-75%) justru menunjukkan nilai yang lebih rendah pada musim kemarau jika dibandingkan dengan musim hujan (Tabel 2.7). Variasi ini mengindikasikan adanya respons diferensial komunitas lamun terhadap kondisi lingkungan pada musim kemarau.

Tabel 2.7 Luas Tutupan Lamun P. Pannikiang musim Kemarau 2020 - 2025

Seagrass Cover	2025	2024	2023	2022	2021	2020
Musim Kemarau						
Seagrass Cover <25%	19.99	24.40	18.981	28.44	19.45	24.78
Seagrass Cover 25-50%	55.29	58.95	63.34	58.97	69.60	56.40
Seagrass Cover 50-75%	26.60	29.95	31.60	24.71	33.47	24.78
Seagrass Cover >75%	59.38	72.15	35.54	60.23	55.57	57.97
Total	161.27	185.47	149.47	172.37	178.11	163.96



Gambar 2.10 Peta Tutupan Lamun P. Pannikiang Musim Hujan, 2025, 2024, 2023, 2022, 2021, 2020

Peneilitian ini telah melakukan analisis uji kesalahan untuk memastikan kelayakan hasil klasifikasi digunakan untuk estimasi karbon lamun. Metode ini dilakukan setiap pulau untuk memastikan tingkat kepercayaan klasifikasi dari masing-masing pulau. hasil uji akurasi di Pulau Barrang Lompo menunjukkan peningkatan yang konsisten dari tahun 2020 hingga 2025, di mana nilai overall accuracy meningkat dari kisaran 60–65% (Kappa 0,47–0,55) menjadi 79–83% (Kappa 0,75–0,77) (Tabel 2.8). Pada periode awal, akurasi yang masih sedang mengindikasikan keterbatasan dalam kualitas citra dan metode klasifikasi, terutama pada lingkungan perairan dangkal yang kompleks. Seiring waktu, peningkatan akurasi mencerminkan adanya perbaikan dalam pemilihan variabel spektral, algoritma klasifikasi, serta kualitas data referensi lapangan. Selain itu, akurasi pada musim hujan cenderung lebih tinggi dibandingkan musim kemarau, yang menunjukkan adanya pengaruh kondisi kolom air dan gangguan optik terhadap hasil klasifikasi. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa keberhasilan klasifikasi ekosistem pesisir sangat dipengaruhi oleh kondisi perairan dan kualitas citra ([Hakim et al., 2024](#); [Iza Fajarendra et al., 2024](#)). Peningkatan akurasi dalam penelitian ini juga konsisten dengan studi yang menunjukkan bahwa optimalisasi metode dan data pelatihan dapat meningkatkan performa klasifikasi

secara signifikan (Iza Fajarendra et al., 2024). Dengan demikian, hasil ini memperkuat bahwa model yang digunakan telah cukup andal untuk mendukung analisis lanjutan, seperti estimasi karbon dan dinamika ekosistem lamun.

Tabel 2.8 Uji Akurasi Pulau Barrang Lompo

Tahun	Musim	Overall	Kappa
2025	Hujan	83%	0.77
	Kemarau	79%	0.75
2024	Hujan	73%	0.65
	Kemarau	72%	0.63
2023	Hujan	68%	0.60
	Kemarau	65%	0.55
2022	Hujan	68%	0.60
	Kemarau	61%	0.50
2021	Hujan	65%	0.55
	Kemarau	62%	0.51
2020	Hujan	65%	0.54
	Kemarau	60%	0.47

Hasil uji akurasi klasifikasi di Pulau Pannikiang menunjukkan bahwa meskipun secara umum terjadi peningkatan hingga tahun-tahun terbaru, terdapat fluktuasi bahkan penurunan akurasi pada beberapa periode awal, khususnya sebelum tahun 2023. Nilai overall accuracy yang masih berada pada kisaran 61–68% dengan Kappa <0,60 mengindikasikan bahwa performa model pada periode tersebut masih sedang (Tabel 2.9). Kondisi ini tidak hanya dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti kekeruhan perairan dan kompleksitas objek dasar perairan, tetapi juga sangat berkaitan dengan keterbatasan jumlah dan kualitas data validasi yang digunakan. Minimnya data validasi lapangan pada tahun-tahun awal menyebabkan proses training dan evaluasi model menjadi kurang representatif, sehingga menurunkan tingkat kepercayaan hasil klasifikasi.

Seiring dengan peningkatan jumlah dan kualitas data validasi pada tahun-tahun berikutnya, akurasi klasifikasi menunjukkan perbaikan yang signifikan hingga mencapai 76–79% dengan Kappa 0,70–0,71 pada tahun 2025. Hal ini menegaskan bahwa ketersediaan data validasi yang memadai merupakan faktor kunci dalam meningkatkan performa klasifikasi berbasis penginderaan jauh. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa akurasi klasifikasi sangat bergantung pada kualitas data referensi dan distribusi sampel yang representatif (Vo et al., 2020). Dengan demikian, peningkatan akurasi pada penelitian ini tidak hanya mencerminkan perbaikan metodologis, tetapi juga menunjukkan bahwa hasil klasifikasi telah cukup andal dan layak digunakan untuk analisis lanjutan, seperti estimasi karbon dan dinamika ekosistem lamun.

Tabel 2.9 Uji Akurasi Pulau Pannikiang

Tahun	Musim	Overall	Kappa
2025	Hujan	76%	0.70
	Kemarau	79%	0.71
2024	Hujan	73%	0.67
	Kemarau	70%	0.64
2023	Hujan	71%	0.65
	Kemarau	72%	0.65
2022	Hujan	66%	0.37
	Kemarau	68%	0.60
2021	Hujan	68%	0.60
	Kemarau	64%	0.52
2020	Hujan	66%	0.55
	Kemarau	61%	0.48

2.4.3.2 Pemetaan karbon AGC dan BGC Pengembangan Model Karbon

Hasil analisis menunjukkan bahwa hubungan antara indeks spektral dan stok karbon lamun di Pulau Barrang Lompo bervariasi dari lemah hingga kuat, dengan rasio Coastal/Green sebagai prediktor terbaik untuk Aboveground Carbon (AGC) ($r = 0,54$). Sementara itu, NDVI memiliki hubungan paling konsisten terhadap Belowground Carbon (BGC) ($r = 0,48$) dan total karbon ($r = 0,50$), meskipun tidak sekuat untuk AGC (Tabel 2.10). Indeks lain seperti GNDVI dan NDRE menunjukkan hubungan positif moderat, sedangkan DII cenderung berkorelasi negatif, mengindikasikan bahwa pengaruh kolom air belum sepenuhnya tereliminasi. Model empiris memperkuat hasil ini, di mana rasio Coastal/Green menghasilkan model AGC dengan akurasi tinggi ($R^2 = 0,85$; RMSE = 23,29), sedangkan model BGC berbasis transformasi NDVI menunjukkan akurasi moderat ($R^2 = 0,54$; RMSE = 131,18) (Tabel 2.11).

Tabel 2.10 Koefisien Korelasi (r) antara Stok Karbon Lamun (insitu) dan Nilai Indeks, Rasio dan Band Citra Terkoreksi Kolom Air Pulau Barrang Lompo

Karbon Organik	ND VI	GN DVI	ND RE	VA RI	Green /Red	Blue/G reen	Coastal/ Green	Red+Coas tal blue	DII 46	DII 26	DII 24
AGC	0.2	0.32	0.2	0.0	0.05	0.14	0.54	-0.57	-	-	-
	7		5	6					0.53	0.55	0.54
BGC	0.4	0.36	0.4	0.2	0.30	-0.04	0.12	-0.07	0.02	0.03	0.04
	8		3	4							
Total Karbon	0.5	0.41	0.4	0.2	0.27	0.01	0.26	-0.23	-	-	-
	0		5	3					0.14	0.13	0.12

Secara interpretatif, tingginya performa rasio Coastal Blue /Green dalam memodelkan AGC disebabkan oleh kemampuan kanal Coastal Blue dalam menembus kolom air dan meningkatkan sensitivitas terhadap kanopi lamun, sehingga variasi

biomassa atas dapat terdeteksi dengan baik. Sebaliknya, BGC tidak terdeteksi langsung oleh sensor optik, sehingga NDVI hanya berperan sebagai indikator tidak langsung melalui kerapatan vegetasi, yang menjelaskan nilai R^2 yang lebih rendah dan RMSE yang lebih tinggi. Korelasi negatif pada DII menunjukkan bahwa pendekatan koreksi kolom air dapat mengurangi sinyal biologis ketika kondisi perairan heterogen. Temuan ini konsisten dengan (Wicaksono & Lazuardi, 2018) yang menekankan pentingnya kanal biru dalam pemetaan habitat benthik, serta (Janowski et al., 2021; Koren et al., 2015) yang menyatakan bahwa biomassa atas lebih responsif terhadap sinyal optik dibandingkan biomassa bawah. Berdasarkan penelitian (Salsabila et al., 2022) juga menunjukkan band Coastal blue menunjukkan hasil regresi kuat dalam deteksi Above Ground Carbon. Implikasinya, pemodelan karbon lamun di Barrang Lompo lebih efektif menggunakan pendekatan multi-indeks, dengan rasio Coastal/Green untuk AGC dan NDVI sebagai pendekatan tidak langsung untuk BGC, dengan mempertimbangkan adanya ketidakpastian pada estimasi biomassa bawah.

Table 2.11 Ringkasan model empiris untuk pemodelan karbon lamun di Pulau Barrang Lompo

Band	RMSE	R^2	Regression Function
Coastal Blue/Green	23,29	0,85	$AGC = 225.23 - 193.94 * (Coastal\ Blue/Green)$
NDVI	131,18	0,54	$BGC = 85.0 + 380.0 * pow((1.0 - abs(NDVI)), 1.3)$

Pulau Pannikiang, hubungan antara indeks spektral dan stok karbon lamun menunjukkan pola yang lebih kuat dan konsisten. NDVI menjadi prediktor utama untuk AGC ($r = 0,494$; $R^2 = 0,81$; $RMSE = 39,84$), sedangkan rasio Coastal Blue/Green menunjukkan korelasi tinggi terhadap BGC ($r > 0,5$) dengan model yang juga kuat ($R^2 = 0,73$; $RMSE = 106,54$) (Tabel 2.12). Berbeda dengan Barrang Lompo, beberapa indeks seperti NDVI menunjukkan korelasi negative terhadap BGC, menegaskan bahwa hubungan spektral terhadap biomassa bawah bersifat tidak langsung dan dipengaruhi kondisi lingkungan (Tabel 2.13).

Interpretasi hasil ini menunjukkan bahwa kondisi perairan di Pannikiang relatif lebih jernih dan homogen, sehingga NDVI dapat bekerja optimal dalam merepresentasikan kepadatan kanopi lamun melalui respons klorofil pada kanal merah dan inframerah dekat. Sejalan dengan temua bahwa indeks tersebut dapat mendeteksi Di sisi lain, kekuatan rasio Coastal/Green dalam memodelkan BGC menunjukkan bahwa kanal biru tetap penting untuk menangkap informasi bawah permukaan melalui penetrasi kolom air dan interaksi dengan substrat (Marziliano et al., 2015). Penggunaan pendekatan semi-empiris dengan kalibrasi nilai minimum biomassa terbukti efektif untuk menghindari nilai estimasi negatif dan meningkatkan stabilitas model secara spasial.

Tabel 2.12 Koefisien Korelasi (r) antara Stok Karbon Lamun (insitu) dan Nilai Indeks, Rasio dan Band Citra Terkoreksi Kolom Air Pulau Pannikiang

Karbon Organik	ND VI	GN DVI	ND RE	VA RI	Green /Red	Blue/G reen	Coastal/ Green	Red+Coas tal blue	DII 46	DII 26	DII 24
----------------	-------	--------	-------	-------	------------	-------------	----------------	-------------------	--------	--------	--------

AGC	0.4	-	0.1	0.3	0.226	0.158	-0.272	-0.232	0.1	-	-
	94	0.0	03	45					16	0.0	0.0
		43							67	81	
BGC	-	0.0	0.0	-	-0.188	0.562	0.574	-0.553	-	-	-
	0.2	07	10	0.0					0.6	0.1	0.1
	01			73					06	81	36
Total	0.0	-	0.0	0.0	-0.068	0.526	0.369	-0.548	-	-	-
	25	0.0	48	73					0.4	0.1	0.1
		10							57	76	44

Implikasinya, model di Pulau Pannikiang memiliki reliabilitas yang lebih tinggi untuk pemetaan karbon lamun secara operasional, baik untuk AGC maupun BGC. Perbandingan kedua lokasi ini menegaskan bahwa performa model sangat ditentukan oleh kondisi optik perairan, sehingga pendekatan pemodelan harus adaptif terhadap karakteristik biofisik lokal, dengan kombinasi indeks spektral sebagai strategi utama dalam meningkatkan akurasi estimasi karbon lamun

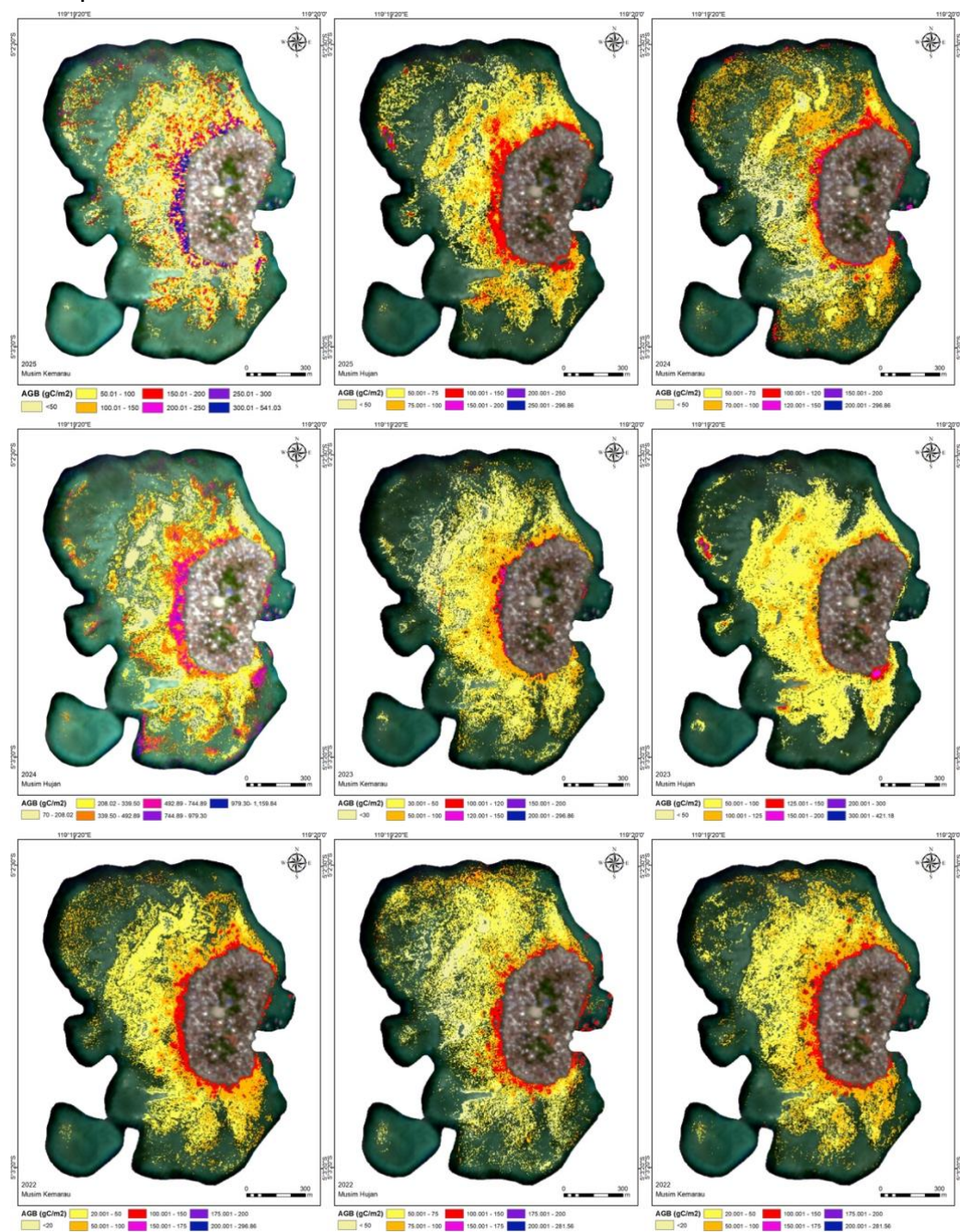
Table 2.13 Ringkasan model empiris untuk pemodelan karbon lamun di Pulau Pannikiang

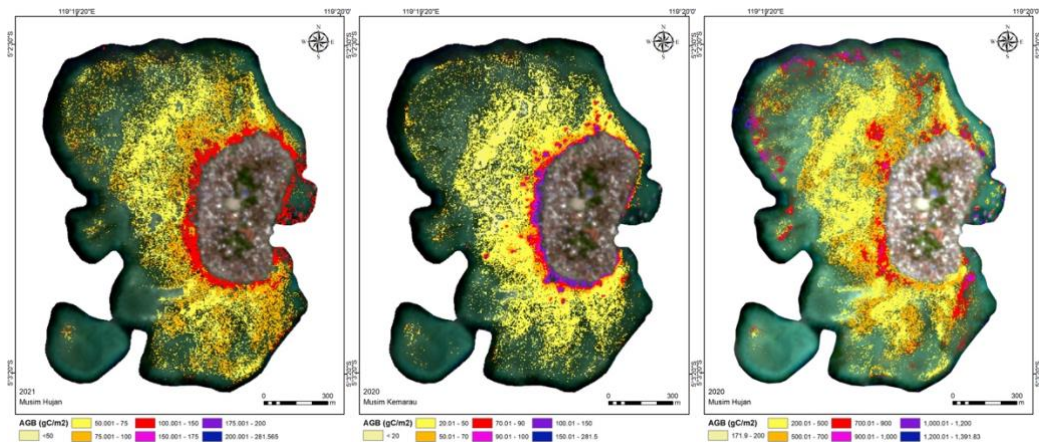
Band	RMSE	R²	Regression Function
NDVI	39,84	0,81	AGC = 117.00 + (113.78 * NDVI)
Coastal Blue/Green	106,54	0,73	BGC = 42.59 + 474.70 * Coastal Blue/Green

Implementasi Model

Model empiris yang telah dikembangkan selanjutnya diimplementasikan untuk analisis dinamika stok karbon lamun periode 2020–2025 dengan mempertimbangkan perbedaan karakteristik biofisik antar lokasi. Pemilihan model tidak hanya didasarkan pada kinerja statistik (R² dan RMSE), tetapi juga pada stabilitas spektral dan kesesuaian ekologis tiap indeks. Oleh karena itu, strategi implementasi model dibedakan antar pulau, di mana pada Pulau Barrang Lompo AGC dimodelkan menggunakan rasio Coastal Blue/Green dan BGC menggunakan NDVI, sedangkan pada Pulau Pannikiang berlaku sebaliknya, yaitu AGC menggunakan NDVI dan BGC menggunakan rasio Coastal Blue/Green. Pendekatan ini mencerminkan bahwa tidak terdapat satu indeks universal yang optimal, melainkan sangat bergantung pada kondisi optik perairan dan struktur biomassa lamun (Jerome et al., 2025). Implementasi model dilakukan secara konsisten pada citra multi-temporal yang telah terkoreksi, sehingga memungkinkan analisis dinamika karbon lamun secara komparatif antarmusim (hujan dan kemarau) dan antar tahun. Hasil pemodelan ini tidak hanya merepresentasikan distribusi spasial karbon lamun, tetapi juga memberikan gambaran mengenai pola fluktuasi biomassa yang berkaitan dengan faktor lingkungan. Dengan demikian, tahap implementasi ini menjadi penting dalam menjembatani pengembangan model dengan aplikasi praktis untuk pemantauan ekosistem lamun dan estimasi stok karbon.

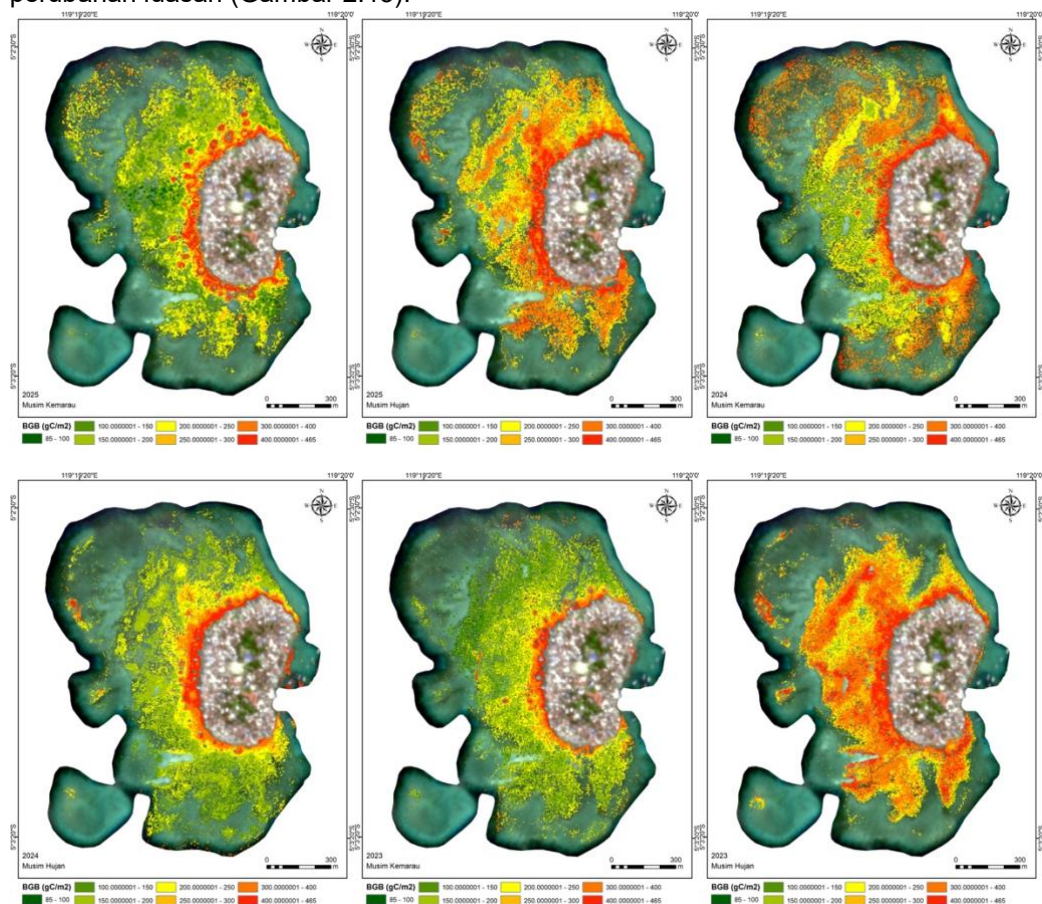
Hasil pemetaan temporal karbon lamun periode 2020–2025 di Pulau Barrang Lompo menunjukkan dinamika yang fluktuatif dengan pola musiman yang konsisten (Gambar 2.11 dan 2.12), di mana nilai karbon total cenderung lebih tinggi pada musim hujan dibandingkan musim kemarau. Nilai total karbon tertinggi terjadi pada tahun 2022 musim hujan 419,827 ton C, sedangkan nilai terendah umumnya terjadi pada musim kemarau, seperti tahun 2020 yaitu 103,791 ton C.

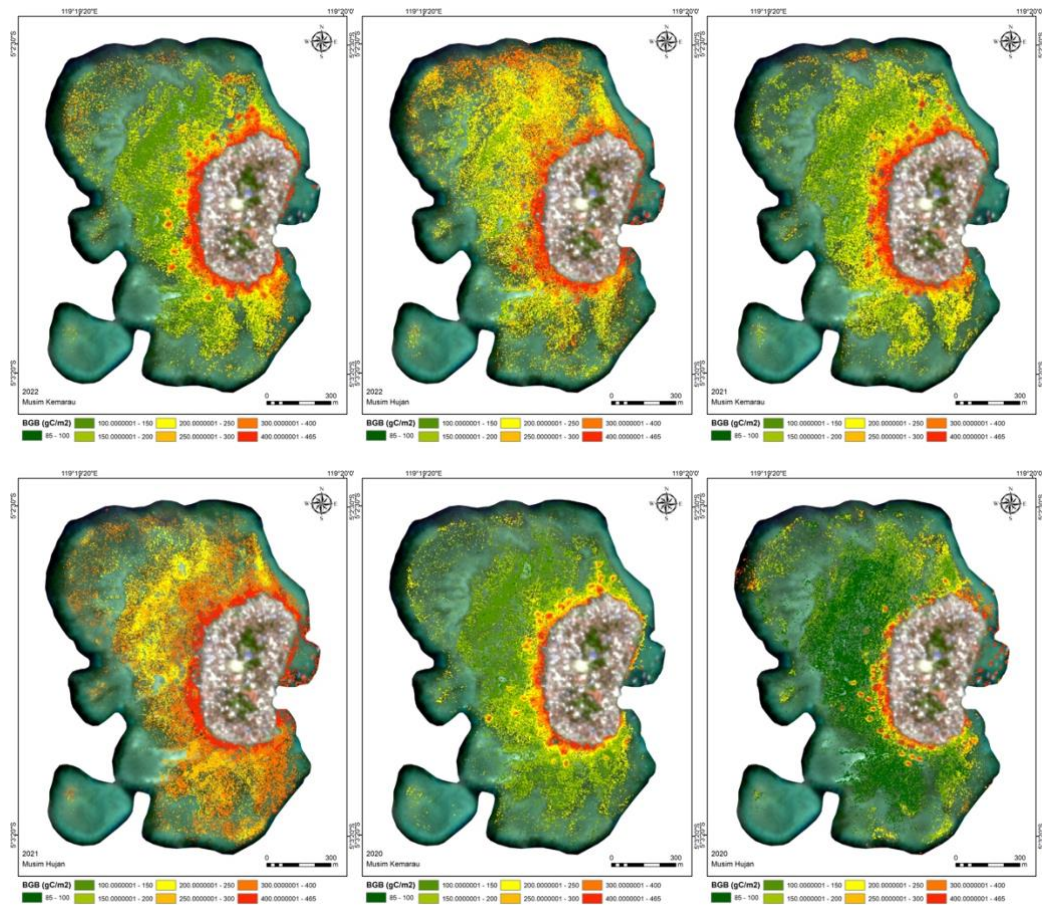




Gambar 2.11 Peta Sebaran Karbon (AGC) model Coastal Blue/Green (2020-2025)

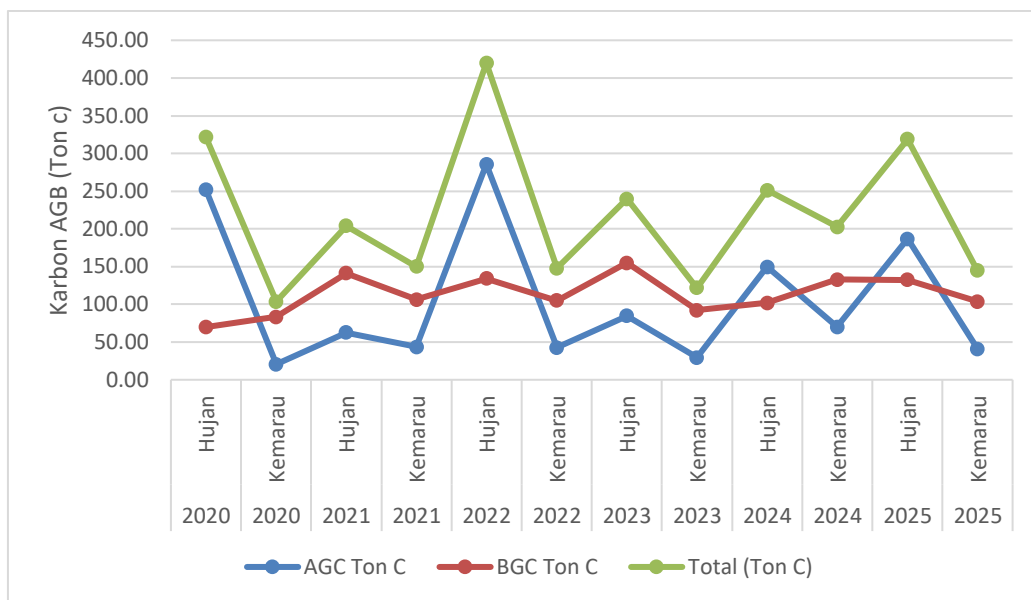
Secara komponen, AGC menunjukkan variasi yang lebih dinamis dibandingkan BGB, dengan lonjakan signifikan pada tahun-tahun tertentu, sementara BGB relatif lebih stabil meskipun tetap mengalami fluktuasi. Luas lamun relatif konstan 45.93–50.4 ha, sehingga perubahan stok karbon lebih mencerminkan perubahan biomassa daripada perubahan luasan (Gambar 2.13).





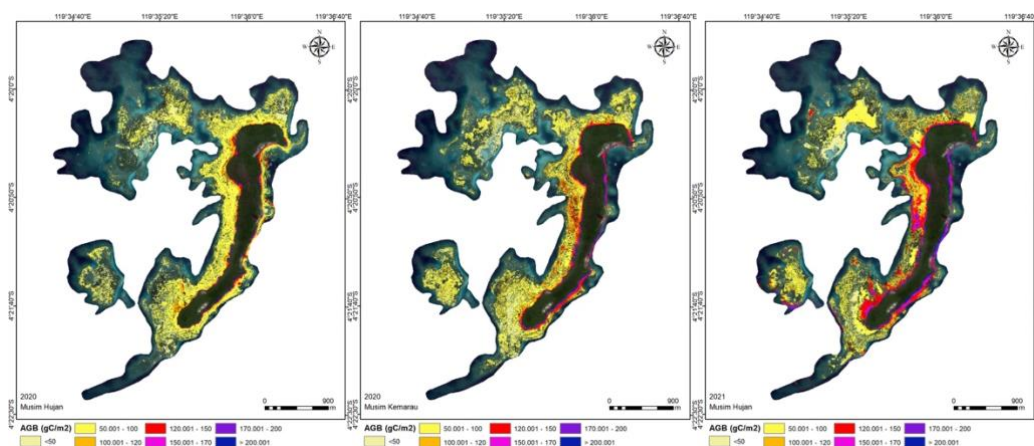
Gambar 2.12 Peta Sebaran Karbon (BGC) model NDVI (2020-2025)

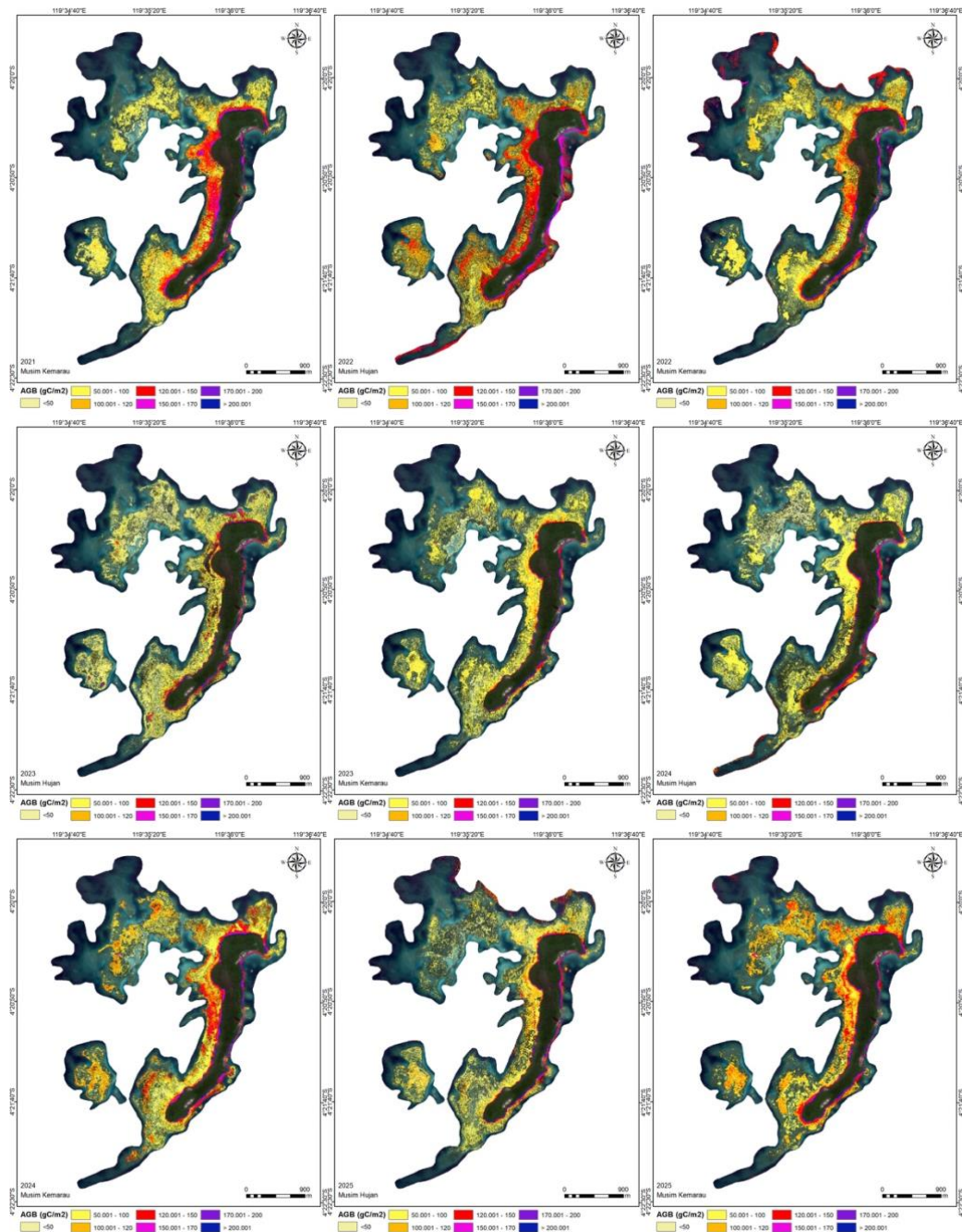
Secara keseluruhan, peningkatan karbon pada musim hujan mengindikasikan bahwa kondisi lingkungan seperti ketersediaan nutrisi, intensitas cahaya yang masih cukup, serta suplai material organik mendukung pertumbuhan lamun, khususnya pada komponen AGC. Sebaliknya, penurunan pada musim kemarau dapat dikaitkan dengan peningkatan stres lingkungan seperti suhu tinggi dan keterbatasan nutrisi. Variabilitas AGC yang lebih tinggi dibandingkan BGC menunjukkan bahwa biomassa atas lebih responsif terhadap perubahan lingkungan jangka pendek, sementara BGC berfungsi sebagai kompartemen penyimpanan yang lebih stabil. Temuan ini konsisten dengan (Guidetti et al., 2002) yang menyatakan bahwa dinamika biomassa lamun sangat dipengaruhi oleh faktor musiman, serta (Wahyudi et al., 2020) yang menegaskan bahwa variasi stok karbon lamun lebih banyak dikontrol oleh perubahan biomassa daripada luas habitat. Implikasinya, Pulau Barrang Lompo menunjukkan sistem lamun yang sensitif terhadap variabilitas musiman, sehingga pemantauan temporal menjadi penting untuk memahami dinamika karbon secara lebih akurat. Selain itu, pendekatan berbasis penginderaan jauh yang digunakan dalam penelitian ini terbukti mampu menangkap dinamika tersebut, meskipun interpretasi terhadap BGC tetap memerlukan kehati-hatian karena sifatnya yang tidak terdeteksi langsung secara optik.



Gambar 2.13 Nilai Karbon AGC,BGC, dan Total Karbon Lamun dari Tahun 2020 – 2025
Pulau Barrang Lompo

Berbeda dengan Pulau Barrang Lompo, hasil di Pulau Pannikiang menunjukkan stok karbon yang jauh lebih tinggi dengan dominasi kuat pada komponen *Belowground Carbon* (BGC). Nilai total karbon mencapai puncaknya pada tahun 2022 musim hujan yaitu 1.478,030 ton C dengan kontribusi BGC yang sangat dominan dibandingkan dengan AGC (Gambar 2.14 dan 2.15). Secara umum, BGC di Pulau Pannikiang berkisar jauh lebih tinggi dibandingkan dengan AGC sepanjang periode pengamatan, menunjukkan bahwa sebagian besar karbon tersimpan pada bagian bawah.

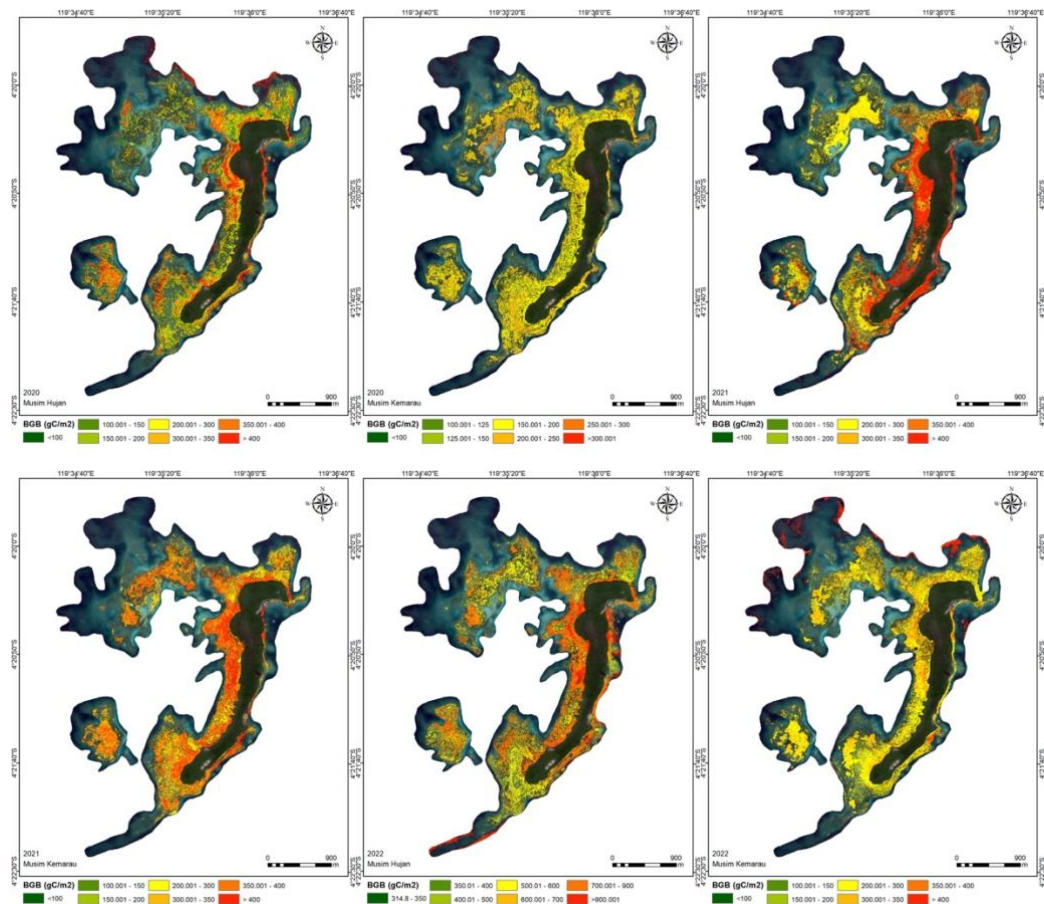


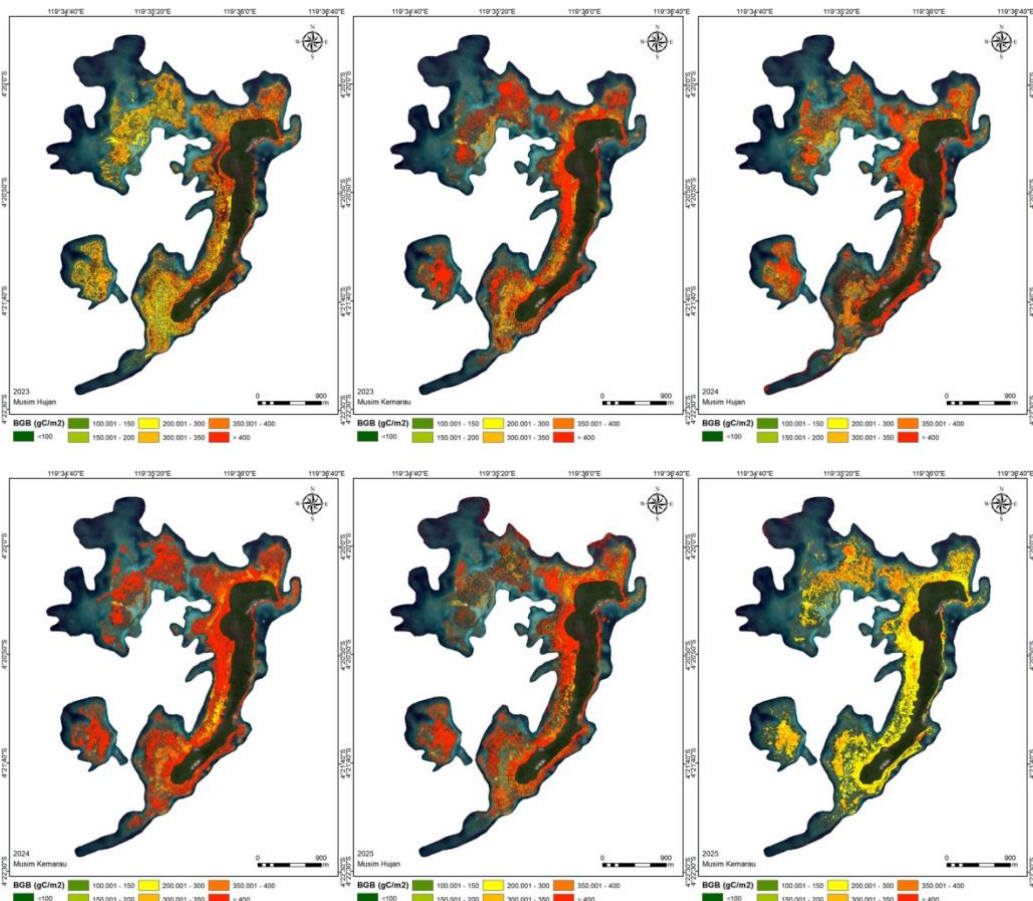


Gambar 2.14 Peta Sebaran Karbon (AGC) model NDVI (2020-2025)

Pola musiman tetap terlihat, di mana musim hujan cenderung memiliki nilai karbon lebih tinggi, namun fluktuasi antar tahun juga cukup signifikan, termasuk penurunan tajam pada tahun 2024 musim kemarau. Luas lamun yang relatif besar (149.47–185.47 ha) turut berkontribusi terhadap tingginya total stok karbon (Gambar 2.16). Interpretasi hasil ini menunjukkan bahwa ekosistem lamun di Pulau Pannikiang memiliki kapasitas

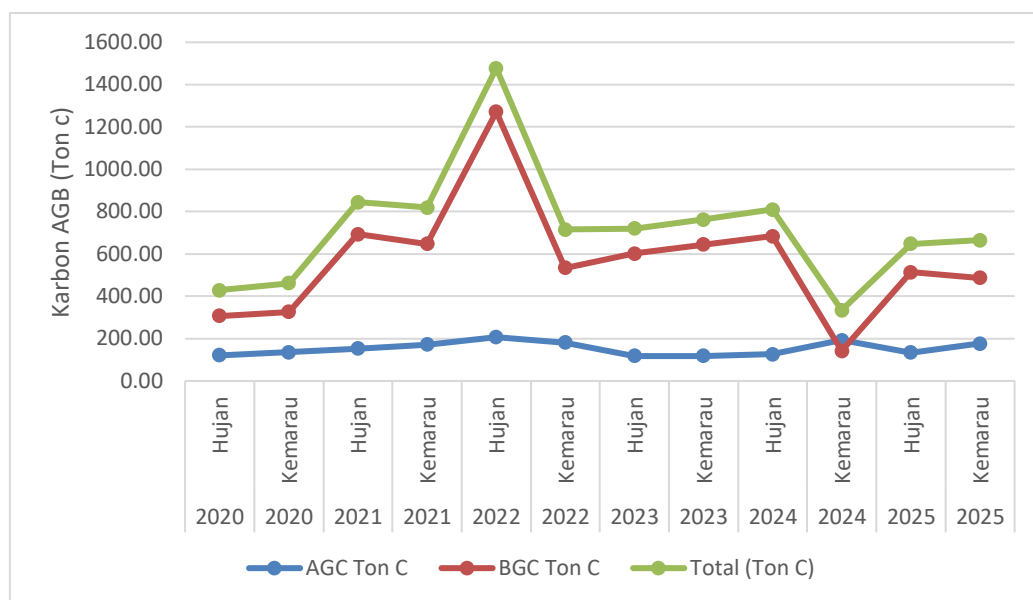
penyimpanan karbon yang tinggi, terutama pada sistem perakaran (BGC), yang umumnya lebih stabil. Dominasi BGC mengindikasikan kondisi lingkungan yang mendukung akumulasi karbon jangka panjang, seperti substrat yang lebih halus dan kondisi perairan yang relatif tenang. Fluktuasi musiman dan antar tahun kemungkinan dipengaruhi oleh variasi kondisi oseanografi, seperti arus, kekeruhan, dan input material organik. Hal ini sejalan (Yang & Tilman, 2020) dengan yang menunjukkan bahwa sebagian besar karbon lamun tersimpan pada sedimen dan biomassa bawah, serta relatif stabil dibandingkan biomassa atas.





Gambar 2.15 Peta Sebaran Karbon (BGC) model Coastal Blue/Green (2020-2025)

Implikasinya, Pulau Pannikang memiliki peran strategis sebagai penyimpan karbon (*blue carbon hotspot*), sehingga penting dalam konteks mitigasi perubahan iklim. Namun, dominasi BGC juga menunjukkan bahwa pendekatan penginderaan jauh memiliki keterbatasan dalam mengestimasi stok karbon secara langsung, sehingga integrasi dengan data lapangan tetap diperlukan. Secara keseluruhan, perbandingan kedua lokasi ini menegaskan bahwa dinamika karbon lamun sangat dipengaruhi oleh kondisi biofisik lokal, baik dari sisi struktur biomassa maupun faktor lingkungan, sehingga pendekatan pemodelan harus adaptif dan mempertimbangkan perbedaan karakteristik ekosistem.



Gambar 2.16 Nilai Karbon AGC, BGC, dan Total Karbon Lamun dari Tahun 2020 – 2025 Pulau Pannikiang

2.5 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa struktur komunitas lamun pada dua lokasi memiliki karakteristik yang berbeda dan berimplikasi langsung terhadap kapasitas penyimpanan karbon. Pulau Barrang Lompo didominasi oleh *Thalassia hemprichii* (660 teg/m²) dan *Cymodocea rotundata* (644 teg/m²), yang mencerminkan kondisi lingkungan relatif stabil. Sebaliknya, Pulau Pannikiang menunjukkan struktur komunitas lebih heterogen dengan dominansi *Thalassia hemprichii* (372 teg/m²) serta kontribusi tinggi spesies oportunistik seperti *Syringodium isoetifolium* (220 teg/m²) dan *Halodule pinifolia* (148 teg/m²), yang mengindikasikan kondisi lingkungan lebih dinamis.

Hasil analisis karbon menunjukkan bahwa below-ground carbon (BGC) merupakan komponen dominan, dengan kontribusi mencapai 60–80% dari total karbon pada kedua lokasi. Pada Pulau Barrang Lompo, total karbon berkisar antara 103,79–419,83 ton C, sedangkan pada Pulau Pannikiang berkisar antara 334,49–1.478,03 ton C. Tingginya kontribusi BGC menunjukkan bahwa karbon tersimpan secara stabil dalam sedimen melalui sistem akar dan rimpang lamun.

Dinamika temporal karbon lamun periode 2020–2025 menunjukkan pola fluktuasi yang dipengaruhi musim. Pada Pulau Barrang Lompo, nilai karbon tertinggi terjadi pada tahun 2022 musim hujan (419,83 ton C) dan terendah pada tahun 2020 musim kemarau (103,79 ton C). Sementara itu, Pulau Pannikiang menunjukkan nilai karbon jauh lebih tinggi, dengan puncak pada tahun 2022 musim hujan (1.478,03 ton C) dan nilai terendah pada tahun 2024 musim kemarau (334,49 ton C). Secara umum, musim hujan menghasilkan nilai karbon lebih tinggi dibandingkan musim kemarau, terutama pada komponen AGC, yang lebih responsif terhadap perubahan lingkungan.

Komponen AGC menunjukkan variasi yang lebih dinamis dibandingkan BGC. Pada Pulau Barrang Lompo, AGC berkisar antara 20,63–285,60 ton C, sedangkan BGC berkisar antara 69,85–155,10 ton C. Pada Pulau Pannikiang, AGC berkisar antara

117,58–206,92 ton C, sementara BGC jauh lebih tinggi yaitu 307,65 –1.271,11 ton C, menegaskan dominasi penyimpanan karbon pada bagian bawah. Stabilitas BGC dibandingkan AGC menunjukkan bahwa biomassa bawah berfungsi sebagai penyimpanan karbon jangka panjang, sedangkan AGC lebih sensitif terhadap dinamika lingkungan musiman.

Hasil klasifikasi Random Forest menunjukkan peningkatan akurasi yang signifikan. Pada Pulau Barrang Lombo, nilai overall accuracy meningkat dari 60–65% (Kappa 0,47–0,55) pada tahun 2020 menjadi 79–83% (Kappa 0,75–0,77) pada tahun 2025. Pada Pulau Pannikiang, akurasi meningkat dari 61–68% (Kappa <0,60) menjadi 76–79% (Kappa 0,70–0,71). Peningkatan ini menunjukkan bahwa kualitas data validasi dan pemilihan variabel sangat memengaruhi performa klasifikasi.

Pengembangan model regresi menunjukkan perbedaan performa antar lokasi. Pada Pulau Barrang Lombo, model terbaik untuk AGC menggunakan rasio Coastal Blue/Green ($R^2 = 0,85$; RMSE = 23,29), sedangkan BGC dimodelkan menggunakan NDVI ($R^2 = 0,54$; RMSE = 131,18). Sebaliknya, pada Pulau Pannikiang, AGC dimodelkan menggunakan NDVI ($R^2 = 0,81$; RMSE = 39,84) dan BGC menggunakan Coastal Blue/Green ($R^2 = 0,73$; RMSE = 106,54). Perbedaan ini menunjukkan bahwa tidak terdapat satu indeks spektral yang universal untuk semua lokasi.

Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa hubungan antara respon spektral dan parameter karbon lamun sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan lokal, sehingga pendekatan *site-specific* modeling lebih efektif dibandingkan model tunggal yang seragam. Model yang dikembangkan mampu menggambarkan distribusi spasial dan dinamika temporal karbon lamun secara representatif, meskipun estimasi BGC tetap memiliki keterbatasan karena tidak terdeteksi langsung oleh sensor optik.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi penginderaan jauh, *machine learning*, dan regresi spektral mampu menghasilkan pemetaan stok karbon lamun yang akurat secara spasial dan temporal. Hasil ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan metode pemetaan karbon biru serta mendukung penentuan prioritas konservasi ekosistem lamun berbasis potensi penyimpanan karbon.

2.6 Daftar Pustaka :

- Aji. F. B, Febrianto. S, Afiati. N,. Estimasi Stok Karbon Di Padang Lamun Pulau Nyamuk Dan Pulau Kemujan, Balai Taman Nasional Karimunjawa, Jepara. 2020. J. Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis, 12(3): 805-819
- Bando. N. R. S,. Carbon Stock Estimation Using Worldview-2 Imagery In The Seagrass Bed Of Kodingareng Island, Spermonde Archipelago, South Sulawesi. 2022. Computer Science Study Program Faculty Of Mathematics And Natural Sciences Bogor Agriculture University. Bogor
- Berger, A. C., Berg, P., Mcglathery, K. J., & Delgard, M. L. (2020). Long-term trends and resilience of seagrass metabolism: A decadal aquatic eddy covariance study. *Limnology and Oceanography*, 65(7), 1423–1438. <https://doi.org/10.1002/lno.11397>

- Blume, A., Pertiwi, A. P., Lee, C. B., & Traganos, D. Bahamian seagrass extent and blue carbon accounting using Earth observation. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1058460. doi: 10.3389/fmars.2023.1058460.
- Chen H, Yang L, Wu Q. Enhancing Land Cover Mapping and Monitoring: An Interactive and Explainable Machine Learning Approach Using Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 2023; 15(18):4585. <https://doi.org/10.3390/rs15184585>
- Colvin, T., & Snelgrove, P. (2025). Role of seagrass physical structure in macrofaunal biodiversity-ecosystem functioning relationships. *Marine Ecology Progress Series*, 754, 35–49. <https://doi.org/10.3354/meps14774>
- Fan, L.-F., Kang, E.-C., Natividad, M. B., Hung, C.-C., Shih, Y.-Y., Huang, W.-J., & Chou, W.-C. (2024). The Role of Benthic TA and DIC Fluxes on Carbon Sequestration in Seagrass Meadows of Dongsha Island. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(11), 2061. <https://doi.org/10.3390/jmse12112061>
- Fonseca, M., Whitfield, P. E., Kelly, N. M., & Bell, S. S. (2002). MODELING SEAGRASS LANDSCAPE PATTERN AND ASSOCIATED ECOLOGICAL ATTRIBUTES. *Ecological Applications*, 12(1), 218–237. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2002\)012\[0218:mslpaa\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2002)012[0218:mslpaa]2.0.co;2)
- Fortes, M. D., Ooi, J. L. S., Tan, Y. M., Prathep, A., Bujang, J. S., & Yaakub, S. M. (2018). Seagrass in Southeast Asia: A review of status and knowledge gaps, and a road map for conservation. *Botanica Marina*, 61(3), 269–288. <https://doi.org/10.1515/bot-2018-0008>
- Fourqurean, J. W., Duarte, C. M., Kennedy, H., Marbà, N., Holmer, M., Mateo, M. A., Apostolaki, E. T., Kendrick, G. A., Krause-Jensen, D., McGlathery, K. J., & Serrano, O. (2012). Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, 5(7), 505–509. <https://doi.org/10.1038/ngeo1477>
- Hakim, G. H., Taufiq-Spj, N., & Redjeki, S. (2024). Variasi Ukuran Kerang Hijau (*Perna viridis*) Di Pesisir Tambak Lorok, Semarang. *Journal of Marine Research*, 13(4), 617–624. <https://doi.org/10.14710/jmr.v13i4.43127>
- Hilmi, N., Chami, R., Sutherland, M. D., Hall-Spencer, J. M., Lebleu, L., Benitez, M. B., & Levin, L. A. (2021). The Role of Blue Carbon in Climate Change Mitigation and Carbon Stock Conservation. *Frontiers in Climate*, 3(September). <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.710546>
- Hirst, A. J., Giri, K., Ball, D., & Lee, R. S. (2017). Determination of the physical drivers of *Zostera* seagrass distribution using a spatial autoregressive lag model. *Marine and Freshwater Research*, 68(9), 1752–1763. <https://doi.org/10.1071/mf16252>
- Hossain, M. S., Bujang, J. S., Zakaria, M. H., & Hashim, M. (2015). The application of remote sensing to seagrass ecosystems: an overview and future research prospects. *International Journal of Remote Sensing*, 36(1), 61–114. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.990649>

- Iza Fajarendra, Y., Rizal Fauzan, Y., & 'Uyun, S. (2024). KLASIFIKASI CITRA EUROSAT MENGGUNAKAN ALGORITMA KNN, DECISION TREE DAN RANDOM FOREST. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(4), 7754–7761. <https://doi.org/10.36040/jati.v8i4.10458>
- Jerome, T. S., Ballard, M. S., Lee, K. M., Capistrant-Fossa, K. A., Mcneese, A. R., Cushing, C. W., Taylor, R. T., Dunton, K. H., & Wilson, P. S. (2025). Bayesian inference for acoustic monitoring of above-ground biomass in a seagrass meadow over two annual cycles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 158(6), 4802–4815. <https://doi.org/10.1121/10.0041880>
- Krause, J. R., Cameron, C., Arias-Ortiz, A., Cifuentes-Jara, M., Crooks, S., Dahl, M., Friess, D. A., Kennedy, H., Lim, K. E., Lovelock, C. E., Marbà, N., Mcglathery, K. J., Oreska, M. P. J., Pidgeon, E., Serrano, O., Vanderklift, M. A., Wong, L.-W., Yaakub, S. M., & Fourqurean, J. W. (2025). Global seagrass carbon stock variability and emissions from seagrass loss. *Nature Communications*, 16(1), 3798. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59204-4>
- Lee CB, Martin L, Traganos D, Antat S, Baez SK, Cupidon A, Faure A, Harlay J, Morgan M, Mortimer JA, et al. Mapping the National Seagrass Extent in Seychelles Using Planet Scope NICFI Data. *Remote Sensing*. 2023; 15(18):4500. <https://doi.org/10.3390/rs15184500>
- Marziliano, P. A., Laforteza, R., Medicamento, U., Lorusso, L., Giannico, V., Colangelo, G., & Sanesi, G. (2015). Estimating belowground biomass and root/shoot ratio of *Phillyrea latifolia* L. in the Mediterranean forest landscapes. *Annals of Forest Science*, 72(5), 585–593. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0486-5>
- Mashoreng, S., Nafie, Y. A. L., Selamat, B., Isyrini, R., & Amri, K. (2021). Changes in seagrass carbon stock: Implications of decreasing area and percentage cover of seagrass beds in Barranglompo Island, Spermonde archipelago, South Sulawesi, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 763(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/763/1/012014>
- Nabil Akbar, M., Faizal, A., Anugrah La Nafie, Y., Werorilangi, S., & Mashoreng, S. (2021). Seagrass carbon stock estimation in Panrangluhu coastal waters using remote sensing technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 860(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/860/1/012085> United Nations Environment Programme (2020). *Out Of The Blue: The Value Of Seagrasses To The Environment And To People*. Nairobi: UNEP
- Nazmi. A. N., Pemanfaatan Data Citra Satelit Sentinel-2 Untuk Estimasi Stok Karbon Atas Padang Lamun Di Gili Petarando, Lombok Timur. 2020. Departemen Ilmu Dan Teknologi Kelautan Fakultas Perikanan Dan Ilmu Kelautan Institut Pertanian Bogor
- Rahman, F. A., Qayim, I., & Wardiatno, Y. (2018). Carbon storage variability in seagrass meadows of Marine Poton Bako, East Lombok, West Nusa Tenggara, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 19(5), 1626–1631. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d190505>

- Ricart, A. M., York, P. H., Bryant, C. V., Rasheed, M. A., Ierodiaconou, D., & Macreadie, P. I. (2020). High variability of Blue Carbon storage in seagrass meadows at the estuary scale. *Scientific Reports*, 10(1), 5865. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62639-y>
- Rustan, A., Adi, N. S., Daulat, A., Kiswara, W., Yusuf, D. S., Rappe, R. A., Pedoman Pengukuran Karbon di Ekosistem Padang Lamun. 2019. ITB Press
- Sagar, S., et al. (2021). "Satellite-based mapping of carbon stocks in seagrass meadows: a machine learning approach." *Remote Sensing of Environment*
- Salsabila H N, Wicaksono P, Danoedoro P. Seagrass Aboveground Carbon Stock Mapping using PlanetScope SuperDove Imagery in Nemberala, Rote Island, East Nusa Tenggara. 2024. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1291 012013.
- Short, F. T., Polidoro, B., Livingstone, S. R., Carpenter, K. E., Bandeira, S., Bujang, J. S., Calumpong, H. P., Carruthers, T. J. B., Coles, R. G., Dennison, W. C., Erftemeijer, P. L. A., Fortes, M. D., Freeman, A. S., Jagtap, T. G., Kamal, A. H. M., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., La Nafie, Y. A., Nasution, I. M., ... Zieman, J. C. (2015). Extinction risk assessment of the world's seagrass species. *Biological Conservation*, 144(7), 1961–1971. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.04.010>
- Tanaya, T., Watanabe, K., Yamamoto, S., Hongo, C., Kayanne, H., & Kuwae, T. (2018). Contributions of the direct supply of belowground seagrass detritus and trapping of suspended organic matter to the sedimentary organic carbon stock in seagrass meadows. *Biogeosciences*, 15(13), 4033–4045. <https://doi.org/10.5194/bg-15-4033-2018>
- Trevathan-Tackett, S. M., Wessel, C., Cebrián, J., Ralph, P. J., Masqué, P., & Macreadie, P. I. (2018). Effects of small-scale, shading-induced seagrass loss on blue carbon storage: Implications for management of degraded seagrass ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 55(3), 1351–1359. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13081>
- Unsworth, R. K. F., Collier, C. J., Henderson, G. M., & McKenzie, L. J. (2012). Tropical seagrass meadows modify seawater carbon chemistry: Implications for coral reefs impacted by ocean acidification. *Environmental Research Letters*, 7(2), 024026. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024026>
- Veiras-Yanes J, Martin-Garcia L, Casas E, Arbelo M. Mapping Seagrass Meadows and Assessing Blue Carbon Stocks Using Sentinel-2 Satellite Imagery: A Case Study in the Canary Islands, Spain. *Environmental Sciences Proceedings*. 2024; 29(1):10. <https://doi.org/10.3390/ECRS2023-15856>
- Vo, T.-T., Lau, K., Liao, L. M., & Nguyen, X.-V. (2020). Satellite image analysis reveals changes in seagrass beds at Van Phong Bay, Vietnam during the last 30 years. *Aquatic Living Resources*, 33, 4. <https://doi.org/10.1051/alr/2020005>
- Wahyudi, A. J., Rahmawati, S., Irawan, A., Hadiyanto, H., Prayudha, B., Hafizt, M., Afdal, A., Adi, N. S., Rustam, A., Hernawan, U. E., Rahayu, Y. P., Iswari, M. Y., Supriyadi, I. H., Solihudin, T., Ati, R. N. A., Kepel, T. L., Kusumaningtyas, M. A., Daulat, A.,

- Salim, H. L.,Kiswara, W. (2020). Assessing Carbon Stock and Sequestration of the Tropical Seagrass Meadows in Indonesia. *Ocean Science Journal*, **55**(1), 85–97. <https://doi.org/10.1007/s12601-020-0003-0>
- Wicaksono, P., & Lazuardi, W. (2018). Assessment of PlanetScope images for benthic habitat and seagrass species mapping in a complex optically shallow water environment. *International Journal of Remote Sensing*, **39**(17), 5739–5765. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1506951>
- Yang, Y., & Tilman, D. (2020). Soil and root carbon storage is key to climate benefits of bioenergy crops. *Biofuel Research Journal*, **7**(2), 1143–1148. <https://doi.org/10.18331/brj2020.7.2.2>
- Zhang, X., Zhao, C., Yu, S., Jiang, Z., Liu, S., Wu, Y., & Huang, X. (2020). Rhizosphere Microbial Community Structure Is Selected by Habitat but Not Plant Species in Two Tropical Seagrass Beds. *Frontiers in Microbiology*, **11**(e804), 161. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00161>