

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pemanasan global adalah fenomena meningkatnya suhu rata-rata di atmosfer, laut dan daratan. Temperatur bumi rata-rata telah meningkat 0.74 ± 0.18 °C selama seratus tahun terakhir (Leu, 2021), yang salah satu penyebabnya adalah meningkatnya gas rumah kaca (GRK). Salah satu GRK adalah karbon dimana Indonesia merupakan bagian dari carbon emitters atau negara penghasil emisi GRK terbesar. Peningkatan emisi GRK ini memicu terjadinya pemanasan global, perubahan iklim dan bencana seperti tingginya permukaan laut, cuaca ekstrim, banjir, longsor, dan polusi udara (Patrianti et al., 2020)

Emisi karbon dalam bentuk karbon dioksida (CO₂ yang dihasilkan oleh manusia merupakan konsekuensi langsung dari ketergantungan akan penggunaan pada bahan bakar fosil. Pada tahun 2018, emisi ini menyumbang 68% (atau 37,5 GtCO₂) dari total emisi GRK global sebesar 55,3 GtCO₂ (Gur, 2022). Kenaikan konsentrasi karbon dioksida di atmosfer telah menjadi tantangan lingkungan besar karena kontribusinya terhadap pemanasan global (Forrester et al., 2024). Berbagai upaya tengah dilakukan untuk mengurangi dampak negatif emisi CO₂, termasuk dengan memanfaatkan tanaman yang ditanam di daratan dan/atau perairan laut. Salah satu tumbuhan laut yang mampu menyerap dan menyimpan karbon adalah tumbuhan lamun yang dikenal sebagai *blue carbon* (karbon biru) melalui proses fotosintesis. Karbon diserap selanjutnya akan disimpan dalam bentuk biomassa lamun pada tubuh lamun (Mashoreng et al., 2019).

Taman Nasional Wakatobi, yang merupakan salah satu kawasan konservasi laut terbesar di Indonesia, memiliki potensi besar dalam mendukung penyimpanan karbon biru melalui padang lamun yang luas dan beragam. Namun tekanan dan aktivitas manusia dapat mengancam keberlanjutan ekosistem ini. Oleh karena itu, diperlukan metode yang efektif untuk memantau kondisi lamun dan mengestimasi stok karbonnya secara spasial dan temporal.

Penginderaan jauh memiliki kemampuan untuk menyediakan data spatio-temporal tentang sumber daya alam, termasuk dinamika karbon di berbagai ekosistem darat dan pesisir (Wang et al., 2024). Mengukur dan memantau potensi penyimpanan karbon padang lamun secara akurat, penting untuk mengkuantifikasi kontribusi mereka terhadap penyerapan karbon global dan mengembangkan inisiatif baru karbon yang efektif (Juncal et al., 2022). Namun, ada beberapa tantangan yang

memastikan data padang lamun yang komprehensif, akurat, dan transparan untuk pengukuran karbon (Setyanto et al.,

penginderaan jauh dapat memenuhi persyaratan representatif, konsisten, dan akurat pengukuran karbon. Dengan teknologi tersebut, perubahan luas padang lamun serta estimasi stok karbonnya dapat diukur secara efektif, akurat, dan efisien. Teknologi penginderaan jauh yang berkembang sampai



saat ini, tidak terlepas dari semakin berkembangnya teknologi satelit yang diluncurkan, dalam hal ini satelit sumber daya alam. Teknologi satelit berkembang dengan berbagai kemampuan dalam menyediakan data citra terkait dengan informasi permukaan bumi. Citra satelit yang dihasilkan bervariasi mulai dari citra yang memiliki resolusi spasial dan resolusi spektral yang rendah hingga tinggi dan dari data citra yang gratis (*open source*) hingga data citra yang berbayar (Mastu et al., 2018).

Penginderaan jauh satelit telah digunakan untuk pemantauan biomassa dan kondisi lamun skala luas secara terus menerus. Pemantauan sinoptik ekosistem pesisir dengan penginderaan jauh satelit dapat memberikan informasi spasial penting tentang karakteristik ekologi lamun saat mereka berubah dari waktu ke waktu, mendukung pengelolaan dan konservasi pesisir (Nurjannah Nurdin et al., 2022; Rustam et al., 2021). Pemanfaatan citra satelit untuk memetakan kondisi padang lamun serta sebaran stok karbon pada padang lamun tentu tidak terlepas dari proses klasifikasi ataupun analisis digital dari citra tersebut. Seiring berlalunya waktu, mesin pintar atau cerdas perlahan-lahan akan menggantikan dan meningkatkan kemampuan manusia di berbagai bidang (Hahn et al., 2022).

Estimasi luasan, kondisi lamun dan stok karbon ekosistem daerah Taman Nasional (TN) Wakatobi masih sangat sedikit dilakukan, menyebabkan ketersediaan data spasial di daerah ini sangat terbatas. Sehingga pemanfaatan data citra dapat dijadikan sebagai alternatif akan kebutuhan dalam memperoleh data dan informasi yang bersifat spasial secara cepat. Hal tersebut menjadi salah satu alasan dasar perlunya dilakukan penelitian mengenai lamun sehingga pengelolaan ekosistem pesisir tidak hanya terfokus pada ekosistem mangrove dan ekosistem terumbu karang. Kurangnya informasi ilmiah mengenai peranan padang lamun dalam memfiksasi CO₂ juga menjadi alasan penting dalam penelitian ini.

Kondisi ekosistem yang baik tentu akan berdampak kepada jasa ekosistem yang dihasilkan, tidak terkecuali jasa ekosistem lamun dalam proses penyerapan karbon. Sampai saat ini masih sulit dalam penelusuran referensi terkait dengan stok karbon pada pulau Wangi-Wangi dalam skala luas dan distribusi karbon pada ekosistem lamun di perairan Kepulauan Wakatobi.

1.2. Landasan Teori

1.2.1. Peran Ekologis Padang Lamun dalam Ekosistem Pesisir

Padang lamun berfungsi sebagai habitat penting bagi berbagai spesies laut dan memiliki peran ekologis dalam menstabilkan sedimen pesisir, menyerap nutrisi, serta melindungi garis pantai dari erosi (Forrester et al., 2024a; Mwikamba et al., 2023).



Selain itu, lamun memiliki kapasitas untuk menyimpan karbon biru di ekosistem pesisir. Pemantauan ekologi untuk menilai kondisi kesehatan dan luas cakupan lamun, yang dipengaruhi oleh aktivitas manusia dan perubahan lingkungan, seperti polusi (Bokhlova et al., 2022).

1.2.2. Penginderaan Jauh untuk Pemantauan Ekosistem Lamun

Teknologi penginderaan jauh, melalui citra satelit dan fotografi udara, memungkinkan pemetaan distribusi, luas, dan kondisi kesehatan padang lamun secara efisien di wilayah yang luas, seperti di TN Wakatobi (Fauziah et al., 2023; Mastu et al., 2018). Teknik ini memanfaatkan data spektral dari citra multispektral atau hiperspektral untuk mengidentifikasi kelas tutupan lamun dan mengevaluasi parameter seperti kerapatan dan biomassa (Nurjannah Nurdin et al., 2022; Salsabila et al., 2024). Indeks vegetasi, seperti NDVI, juga sering digunakan untuk mendeteksi kondisi vegetasi lamun dan membantu dalam pemantauan jangka panjang.

1.2.3. Karbon Biru dan Signifikansinya dalam Mitigasi Perubahan Iklim

Karbon biru mengacu pada karbon yang disimpan dalam ekosistem pesisir seperti padang lamun (Comte et al., 2024; Shen et al., 2024; Stankovic et al., 2021a), yang memainkan peran penting dalam mitigasi perubahan iklim global (Lovelock & Reef, 2020; Pessarrodona et al., 2024). Lamun mampu menyimpan karbon dalam biomassa di atas dan di bawah substrat serta dalam sedimen laut yang stabil (Ndhlovu et al., 2024). Penilaian potensi karbon biru dari padang lamun di TN Wakatobi sangat penting untuk memahami kontribusi ekosistem pesisir dalam sekuestrasi karbon jangka panjang. Integrasi antara penginderaan jauh dan pengukuran lapangan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai potensi penyimpanan karbon, yang berguna untuk mendukung kebijakan pengelolaan yang efektif.

1.3. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan di atas, maka rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kondisi padang lamun dan berapa banyak jenis lamun di kawasan konservasi Taman Nasional Wakatobi, khususnya di perairan kepulauan Wangi-Wangi?
2. Bagaimana perubahan luasan padang lamun di perairan Kepulauan Wangi-Wangi, Taman Nasional Wakatobi dari tahun 2013 hingga 2023 berdasarkan estimasi teknologi penginderaan jauh?
3. Berapa besar stok karbon padang lamun di Kawasan Taman Nasional Wakatobi, khususnya di perairan kepulauan Wangi-Wangi, menggunakan teknologi penginderaan jarak jauh?



Manfaat

bertujuan untuk mengkaji potensi karbon biru yang disimpan di Taman Nasional Wakatobi menggunakan pendekatan secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengidentifikasi kondisi padang lamun dan keanekaragaman jenis lamun di perairan kepulauan Wangi-Wangi.
2. Mengestimasi perubahan luas area padang lamun di kawasan Taman Nasional Wakatobi dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh.
3. Mengestimasi stok karbon pada padang lamun di kawasan Taman Nasional Wakatobi khususnya kepulauan Wangi-wangi

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai sumber informasi mengenai luas, distribusi jenis, kondisi dan stok karbon Taman Nasional Wakatobi, khususnya di perairan kepulauan Wangi-Wangi
2. Sebagai referensi ilmiah mengenai metodologi dan aplikasi penginderaan jauh dalam pemantauan ekosistem pesisir, khususnya untuk estimasi karbon organik di padang lamun.
3. Sebagai dasar untuk pengelolaan pesisir yang lebih berkelanjutan serta mendukung implementasi kebijakan pengelolaan karbon biru di wilayah pesisir Indonesia

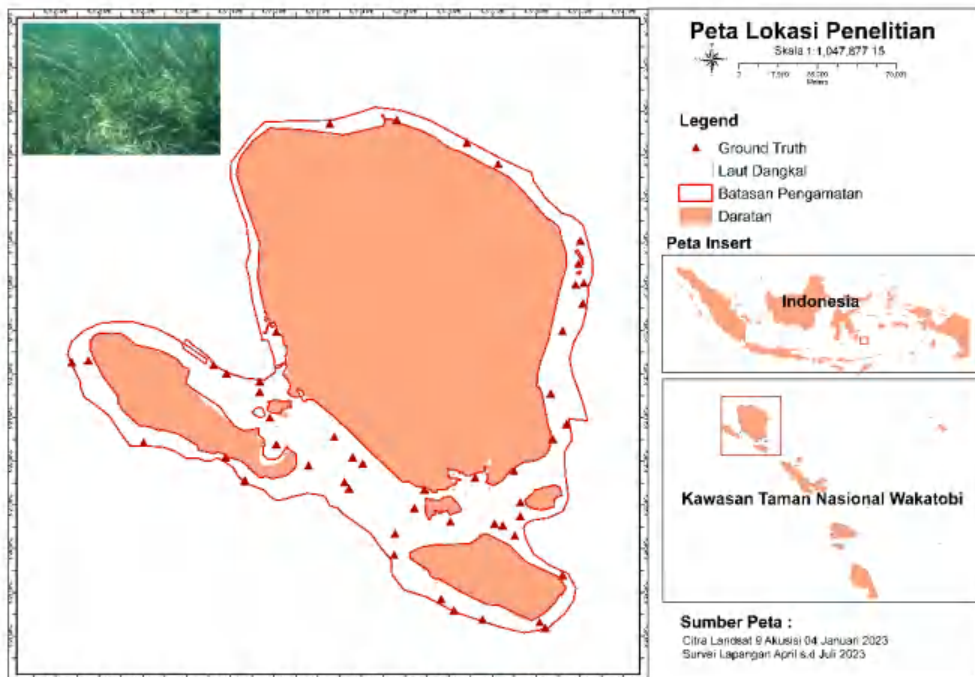
Kegunaan penelitian ini kegunaan penelitian sebagai acuan untuk pengelolaan pesisir yang berkelanjutan khususnya di kawasan TN Wakatobi serta mendukung implementasi kebijakan pengelolaan karbon biru di wilayah pesisir Indonesia.



BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari 2023 sampai Desember 2023 yang meliputi studi literature, pengambilan data lapangan, pengolahan dan analisis data, serta penulisan laporan hasil penelitian. Pengambilan data di lapangan dilaksanakan pada April dan Juli 2023 di perairan kawasan Taman Nasional Wakatobi Khususnya Kepulauan Wangi-Wangi.



Gambar 1. Lokasi penelitian dan *ground truthing* pada padang lamun di Kepulauan Wangi-Wangi kawasan konservasi Taman Nasional Wakatobi

Pertimbangan yang mendasari pemilihan lokasi penelitian ialah:

1. Perairan Kepulauan Wangi-Wangi merupakan kawasan konservasi BTNW dan telah terjadi peningkatan pembangunan lokasi wisata dan tanggul pada kawasan ekosistem lamun, sedangkan informasi luasan relatif belum banyak tersedia.
2. Pemilihan lokasi penelitian berdasarkan keterwakilan ekosistem perairan dan persentase tutupan lamun yang diperoleh melalui citra satelit.



2.2 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data citra Landsat 8 tahun 2013 dan Landsat 9 Tahun 2023 yang diperoleh dari sumber <https://glovis.usgs.gov/app>, kemudian lamun sebagai objek untuk menganalisis stok karbon. Analisis data citra satelit menggunakan aplikasi open sources yakni ArcGIS, dan NDVI yang membantu memberikan informasi geospasial dan kondisi vegetasi lamun dan sekitarnya. Untuk pengukuran kondisi lamun, peralatan yang digunakan yaitu transek kuadrat (1m x 1m), GPS, kamera digital, alat selam dasar, lembar identifikasi lamun, sabak, dan alat tulis. Peralatan ini mendukung pengamatan in-situ lamun, yaitu pengamatan langsung di lapangan untuk mengevaluasi kondisi lamun di habitatnya. Sedangkan untuk stok karbon, alat-alat yang digunakan meliputi transek kuadrat (1m x 1m), GPS. Alat-alat ini digunakan untuk pengambilan biomassa lamun, yang selanjutnya dianalisis di laboratorium untuk menentukan stok karbon. Pengambilan sampel dilakukan secara in-situ, sedangkan analisis kandungan karbon menggunakan metode Walkley and Black (WB) dilakukan di laboratorium untuk memperoleh data yang akurat.

2.3 Metode Penelitian

2.3.1 Penginderaan Jauh

Dalam penelitian ini, citra satelit Landsat 9 yang digunakan untuk menghasilkan peta lamun tahun 2023 dan citra Landsat 8 digunakan untuk menghasilkan peta lamun tahun 2013 diunduh melalui situs www.earthexplorer.usgs.gov, data ini juga digunakan untuk menganalisis perubahan distribusi spasial lamun pada tahun akusisi yang berbeda.

Pemetaan dilakukan dengan akurasi citra yang berbeda namun memiliki waktu pemotretan yang sama yakni pada pukul 14.00 dengan kondisi pasut senilai 0.381 m. hal ini menunjukkan data yang dihasilkan memiliki nilai kondisi oseanografi pasut yang sama, Hal ini diperlukan untuk menghindari kesalahan estimasi luasan yang disebabkan oleh tinggi pasang yang berbeda pada akuisisi citra yang berbeda.

Tabel 1. Citra satelit landsat 8-9 yang digunakan dalam penelitian

Band	Spectral Band	Wavelength (μm)	Spatial Resolution (m)
Band 2	Blue	0.452 - 0.512	30 m
Band 3	Green	0.533 - 0.590	30 m
Band 4	Red	0.636 - 0.673	30 m
	Infrared (NIR)	0.851 - 0.879	30 m



hasil diluncurkan ke orbit yang dituju pada tanggal 11 Februari
 berhasil diluncurkan ke orbit yang dituju pada tanggal 27
 andsat 9, yang diluncurkan pada tahun 2021, menawarkan
 spasial yang lebih baik dibandingkan dengan misi Landsat

sebelumnya, menjadikannya alat yang berharga untuk mempelajari lingkungan pesisir. Teknik klasifikasi berbasis piksel, yang menetapkan piksel individu ke tutupan lahan atau kelas habitat tertentu, telah diterapkan secara luas untuk memetakan berbagai ekosistem, termasuk lamun (Pham et al., 2023).

Tahap pengolahan Citra pada penelitian ini ialah sebagai berikut:

Pra Pengolahan Data Citra

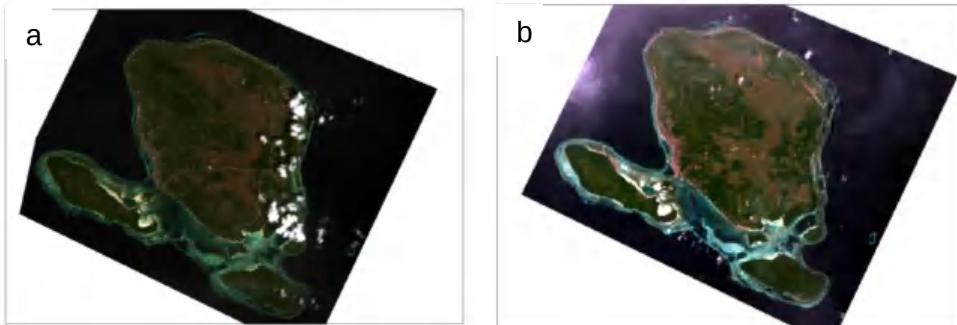
Pra pengolahan data citra Landsat 9 pada penelitian ini terdiri koreksi geometri, koreksi radiometri dan koreksi kolom air.

Koreksi radiometrik

Koreksi radiometrik yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan metode koreksi DOS (*Dark Object Subtraction*) guna untuk memperbaiki nilai radiometrik atau nilai piksel yang ada pada citra yang diakibatkan karena adanya gangguan atmosfer. Pengurangan nilai digital masing-masing kanal guna mendapatkan skor nol objek dengan pantulan paling rendah merupakan cara yang ditempuh dalam koreksi metode DOS. Selanjutnya, menurut Eastman (1992), mengatakan bahwasanya koreksi DOS bisa dilakukan lewat persamaan berikut:

$$\text{Atmospherically corrected radiance} = L_i - L_{si}$$

Citra yang telah dikoreksi radiometrik selanjutnya dilakukan proses *resampling* dan *pansharpening* untuk menyamakan resolusi spasialnya (Simeoni et al., 2023) hal tersebut disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil radiometrik data citra (a) citra landsat 8 Tahun 2013 akusisi 16-11-2013, (b) citra landsat 9 Tahun 2023 akusisi 04-01-2023

Koreksi radiometrik digunakan untuk memperbaiki kualitas visual citra dan sekaligus memperbaiki nilai-nilai piksel yang tidak sesuai. Koreksi radiometrik yang menggunakan metode dark pixel correction. Pada prinsipnya untuk memperbaiki nilai radiometrik (pixel value) pada citra akibat <. Objek yang berwarna hitam pada citra seharusnya memiliki an apabila objek tersebut tidak bernilai 0 maka nilai tersebut ty Wicaksono, 2015).



Koreksi geometrik adalah proses mengoreksi kesalahan dan menandai sifat-sifat peta pada sebuah citra. Hal utama pada koreksi geometrik adalah menempatkan ulang nilai-nilai piksel dengan sama persis sehingga hasil yang diperoleh dari rekaman sensor sesuai dengan objek di permukaan bumi (Rahman, 2018). Geometrik citra harus dikoreksi agar sesuai dengan peta yang digunakan dengan sistem koordinat yang dipilih, sehingga citra dapat diidentifikasi dengan baik atau titik-titik yang diamati di lapangan dapat ditemukan dengan mudah pada citra (Green et al. 2000). Koreksi geometrik menggunakan GCP (*ground control point*) untuk menyesuaikan posisi citra dengan posisi sebenarnya di lapangan. Titik GCP diambil menggunakan GPS saat survei lapang yang tersebar di lokasi studi.

Titik GCP ditempatkan pada citra dan citra referensi dengan tingkat akurasi satu piksel. Penempatan GCP yang benar akan menghasilkan metrics transformasi hubungan titik-titik pada citra dan system proyeksi yang terpilih. GCP yang digunakan sejumlah 30 titik diperoleh nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 3,65-meter dan *Mean Absolute Error* (MAE) sebesar 3,03-meter. Titik-titik GCP disesuaikan dengan posisi titik di citra yang akan dikoreksi dengan pertimbangan semakin kecil nilai *MRS error* maka akan semakin akurat penetapan posisi citra pada lokasi sebenarnya di bumi. Nilai RMSE menggambarkan deviasi rata-rata kuadrat antara titik acuan dan hasil koreksi, sedangkan MAE menunjukkan penyimpangan besar rata-rata *absolut*. Nilai kedua ini termasuk dalam kategori sangat baik untuk standar akurasi citra spasial, terutama dalam konteks pemetaan vegetasi pesisir seperti lamun. Nilai kesalahan yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa analisis koreksi geometrik telah dilakukan dengan baik dan dapat diandalkan untuk lanjutan spasial, seperti klasifikasi tutupan lamun dan estimasi stok karbon.

Perhitungan akurasi dari proses koreksi geometrik dilakukan dengan menghitung nilai *Root Means Square Error* (RMSE). RMS dihitung berdasarkan selisih koordinat GCP dan koordinat baru hasil estimasi di sepanjang sumbu x dan y, dengan rumus sebagai berikut.

$$RMS_E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{Ni}^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E - E_i)^2}$$

Dan

$$RMS_N = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{Ni}^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N - N_i)^2}$$

Keterangan:

n: jumlah total titik kontrol lapangan (GCP) Ei dan Ni: berturut turut, koordinat X (timur, E) dan Y (utara, N) dari GCP ke i, yang dihitung dengan fungsi Transformasi f1 dan f2 dalam rektifikasi. E dan N: berturut turut, koordinat X (timur, E) dan Y (utara,

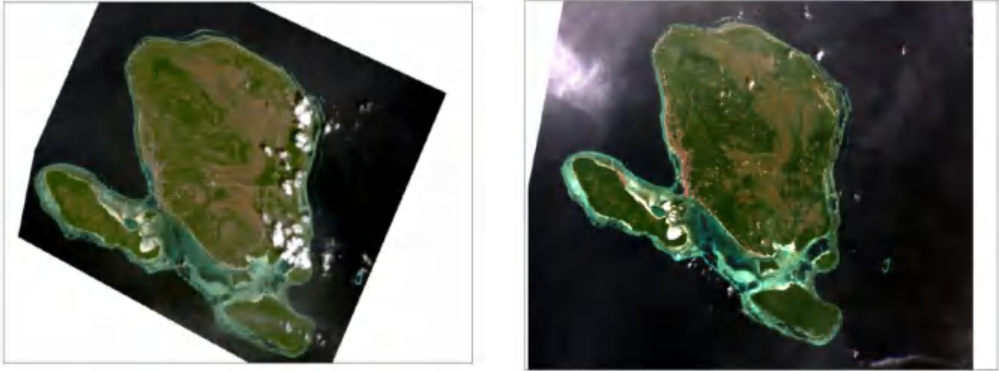


RMSE dan RMSN dapat dihitung indikator akurasi keseluruhan

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta_{Ni}^2 + \delta_{Ei}^2)}$$

Mean Absolute Error (MAE) jarang dilaporkan, meskipun memiliki interpretasi yang lebih jelas daripada RMSE karena MAE adalah kesalahan rata-rata (Jackson et al., 2019; Robeson & Willmott, 2023; Willmott & Matsuura, 2005) dengan rumus:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|$$



Gambar 3. Hasil geometrik data citra (a) citra landsat 8 Tahun 2013 akusisi 16-11-2013, (b) citra landsat 9 Tahun 2023 akusisi 04-01-2023

Koreksi Kolom Perairan

Koreksi kolom perairan merupakan suatu pendekatan yang berfungsi untuk mengurangi pengaruh kedalaman pada pemetaan objek dasar perairan dangkal. Metode koreksi kolom perairan merupakan pendekatan sederhana berbasis citra untuk mengkompensasi pengaruh variabel kedalaman atau mengurangi pengaruh koefisien atenuasi (*attenuation coefficients*) perairan untuk memprediksi reflektansi dasar perairan berdasarkan prosedur metode *Depth Invariant Index* (DII) dari tiap pasangan band spektral citra yang digunakan (Rosalina et al., 2022). Koefisien atenuasi radiasi cahaya dan kedalaman perairan dapat menghambat klasifikasi yang tepat dari substrat dasar yang sama pada kedalaman yang berbeda (Mastu et al., 2018). Metode koreksi kolom perairan ini menghasilkan DII dari setiap pasangan band spektral. Koreksi kolom perairan dibagi menjadi tiga tahap, yaitu: (1) mengurangi hamburan atmosfer dan pantulan eksternal dari permukaan air; (2) linearisasi hubungan antara kedalaman dan radian; dan (3) menghitung rasio koefisien atenuasi pasangan band yang menggambarkan besarnya atenuasi cahaya di dalam air pada band spektral.

Penerapan koreksi kolom perairan pada penelitian ini dilakukan pada kedua citra tersebut menggunakan komposisi band sinar tampak dengan mengekstrak nilai substrat yang sama (*homogen*) dalam hal ini substrat pasir dari Pasangan band yang digunakan pada penelitian ini adalah citra Landsat 9 dengan resolusi spasial 30 m yaitu band 2 (*blue*), band 4 (*red*). Langkah-langkah menerapkan algoritma *Depth* dengan mengikuti petunjuk (Congalton & Green, 2019) sebagai *training area* pada substrat yang *homogen* dengan kedalaman



yang berbeda. Data substrat dan kedalaman diperoleh dari hasil pengamatan lapangan. *Training area* dilakukan terhadap titik pengamatan objek *homogen* dalam band yang sama untuk mendapatkan nilai *koefisien attenuation*. b) Melakukan pengolahan data *spreadsheet Microsoft Excel* hasil *training area* pada setiap band kemudian dihitung nilai koefisien attenuasi K_i/K_j dengan persamaan berikut.

$$K_i/K_j = a + \sqrt{a^2 + 1}$$

dimana

$$\alpha = \frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2\sigma_{ij}}$$

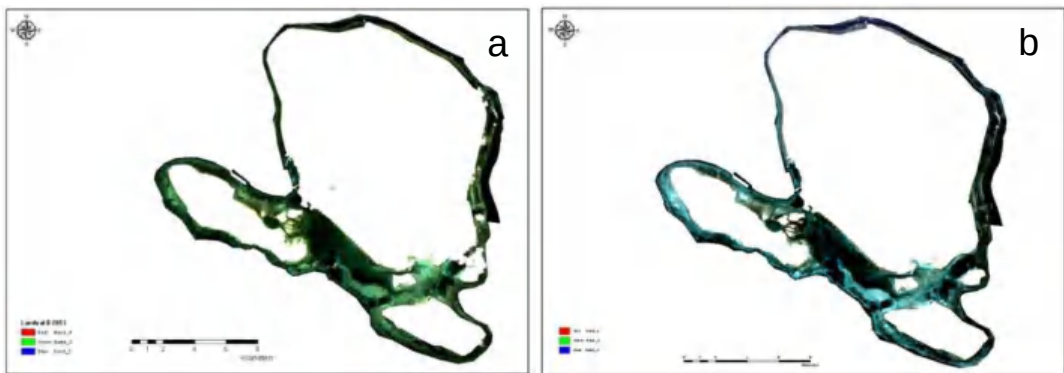
dan

$$\sigma_{ij} = X_i X_j - X_i X_j$$

Σ_{ii} adalah variance pengukuran X_i , σ_{jj} adalah variance pengukuran X_j dan σ_{ij} adalah variance X_i dan X_j

c) tahap akhir adalah perhitungan DII yaitu dengan persamaan:

$$DII_{ij} = \text{Log}(X_i) - \left[\left(K_i/K_j \right) * \text{Log}(X_j) \right]$$



Gambar 4. Hasil koreksi kolom air (a) citra landsat 8 Tahun 2013 akusisi 16-11-2013, (b) citra landsat 9 Tahun 2023 akusisi 04-01-2023

Pemrosesan Data Citra

Citra Komposit



a komposit warna dilakukan untuk menampilkan citra warna refer pada bentuk penajaman kontraks yang baik agar mudah secara visual. Komposit dilakukan dengan menggabungkan 3 untuk menghasilkan citra baru, yang menghasilkan warna yang sangat membantu dalam proses pengenalan objek. Dilakukan komposit tersebut merupakan komposit *natural color* dan mudah

diinterpretasikan secara umum karena pola ketampakan yang hampir sama dengan pola ketampakan yang sebenarnya.

Pemotongan Citra

Proses akhir dari pra-pengolahan citra adalah pemotongan citra atau cropping image. Pemotongan citra ini bertujuan untuk membuat *Area of Interest* (AoI), untuk mempertegas fenomena geospasial dan pembahasan pada daerah kajian.

Klasifikasi Multispektral

Beberapa penelitian terbaru telah mengeksplorasi metode klasifikasi berbasis piksel untuk pemetaan lamun menggunakan data Landsat 9. Pendekatan ini memanfaatkan karakteristik *spektral* komunitas lamun dan algoritma serta teknik klasifikasi yang canggih untuk menggambarkan secara akurat luas dan distribusi habitat lamun. Penelitian ini menggunakan data citra Landsat 8 dan Landsat 9 untuk memetakan kondisi lamun di wilayah Pesisir. Selain itu, integrasi data Landsat 9 dengan pengukuran in-situ dan sumber data penginderaan jauh dapat meningkatkan akurasi dan keandalan upaya pemetaan lamun (Sandoval et al., 2022).

Klasifikasi adalah proses identifikasi *piksel* citra dengan sifat-sifat yang sama, mengorganisir ke dalam kelompok kemudian menentukan penamaan kelompok tersebut dan tahap akhir dari klasifikasi adalah peta yang memuat informasi tertentu (J & Green, 2000). Klasifikasi citra merupakan proses mengelompokkan *piksel* ke dalam kelas-kelas tertentu berdasarkan nilai kecerahan *piksel* (*brightness value/ BV/ digital number*) pada citra. Saat ini, penerapan klasifikasi citra terdapat dua pendekatan yaitu klasifikasi berbasis piksel (*pixel based*) dan klasifikasi berbasis objek (*object based/OBIA*) (Danoedoro, 2015).

Algoritma Klasifikasi

Klasifikasi citra merupakan sebuah algoritma yang digunakan untuk memperoleh informasi tematik dengan cara mengelompokkan suatu fenomena/objek berdasarkan kriteria tertentu. Asumsi awal yang diperhatikan sebelum melakukan klasifikasi *multispectral* adalah bahwa setiap objek dapat dikenali dan dibedakan berdasarkan nilai spektralnya.

Klasifikasi berbasis objek menggunakan algoritma Bayesien. Bayesien adalah algoritma klasifikasi yang praktis dan mudah untuk klasifikasi citra penginderaan jauh berdasarkan teori probabilitas, yang mengasumsikan bahwa vektor fitur dari setiap kelas berdistribusi normal.

$$P(C_i/X) = \frac{P\left(\frac{C_i}{X}\right)P(C_i)}{P(X)}$$

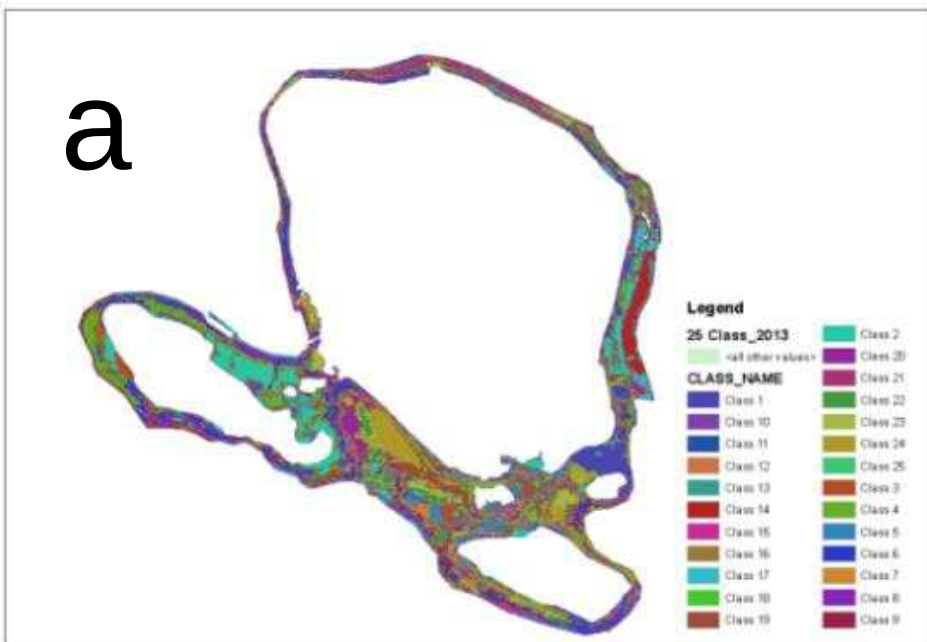


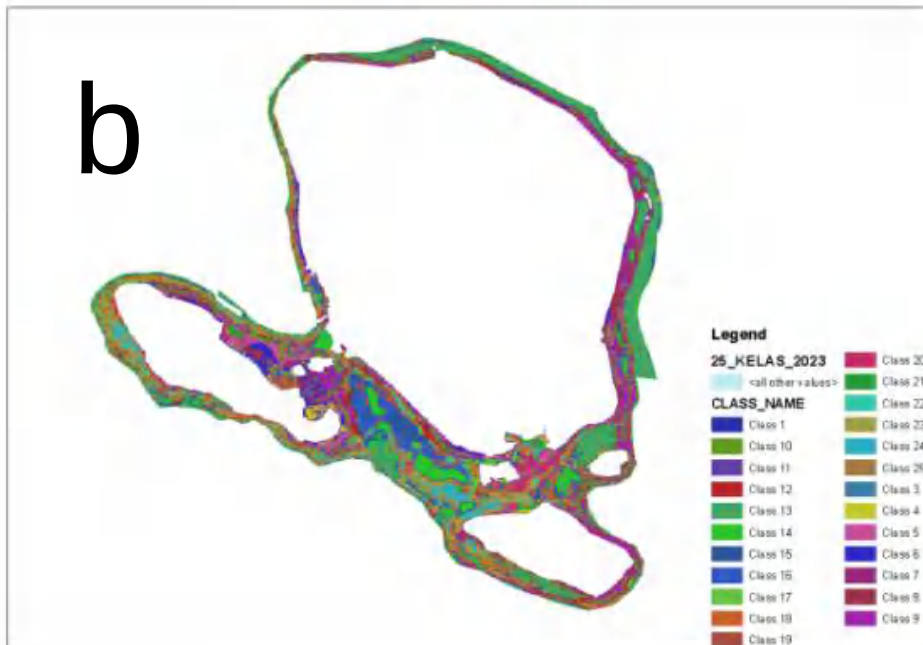
akan kriteria suatu kasus berdasarkan masukan, C_i kelas solusi ialah label kelas, $P(C_i/X)$ probabilitas kemunculan label kelas C_i jika masukan X , $P(X/C_i)$ probabilitas kriteria masukan X dengan label probabilitas label kelas C_i (Han et al., 2012).

1 data citra adalah proses penting dalam analisis data untuk memetakan dan memahami distribusi tutupan lahan,

vegetasi, atau fitur permukaan lainnya. Setelah pra-pemrosesan selesai, pemilihan band spektral atau fitur tambahan dilakukan untuk mengoptimalkan proses klasifikasi. Citra *multispektral* memiliki beberapa band yang merepresentasikan berbagai panjang gelombang cahaya, seperti inframerah dan tampak, yang bisa digunakan untuk membedakan tutupan lahan.

Tahap berikutnya adalah melakukan penyusunan set data penelitian, di mana sampel area tertentu dengan kelas tutupan lamun yang diketahui digunakan sebagai acuan. Data ini kemudian digunakan dalam klasifikasi *supervised* menggunakan algoritma seperti *Random Forest* atau *Support Vector Machine* (SVM). Alternatif lainnya, klasifikasi *unsupervised* dapat dilakukan ketika data tidak tersedia, di mana algoritma seperti *K-Means* atau *ISODATA* digunakan untuk mengelompokkan piksel berdasarkan pola spektralnya. Hasil dari klasifikasi ini dievaluasi menggunakan *confusion matrix* untuk memastikan akurasi dan validitas klasifikasi, hasil kalifikasi tersebut disajikan pada Gambar 5.





Gambar 5. Hasil proses klasifikasi multispektral (*supervised*) data citra (a) citra landsat 8 Tahun 2013 akusisi 16-11-2013, (b) citra landsat 9 Tahun 2023 akusisi 04-01-2023

Uji Akurasi

Ketelitian klasifikasi adalah ketepatan dan keakuratan peta dalam pendeteksian dan pengidentifikasian suatu objek. Uji akurasi ini mengikuti kaidah Short (1982) yang telah disarankan oleh Latumeten et al., 2023 dengan tahapan : (1) melakukan pengecekan lapangan pada beberapa titik sampel yang dipilih dari setiap kelas berdasarkan *homogenitas* ketampakannya dan diuji kebenarannya di lapangan; (2) menilai kecocokan hasil analisis citra satellite dengan kondisi sebenarnya di lapangan; (3) membuat metrics perhitungan setiap kesalahan (*confusion matrix*) pada setiap hasil data digital citra satelit, sehingga diketahui tingkat ketelitiannya. Ketelitian analisis dibuat dalam beberapa kelas yang dihitung dengan metode Short:

Rumus ketelitian interpretasi (K_p):

$$K_p = \frac{\text{Jumlah Pixel X yang betul}}{\text{Jumlah pixel x yang betul} + \text{jumlah omisi pixel x} + \text{jumlah komii pixel x}}$$



Optimized using
trial version
www.balesio.com

penginderaan jauh, analisis uji akurasi paling sering digunakan seberapa efektif suatu metode yang di terapkan dalam suatu dukung aplikasi tertentu. Meskipun demikian, penelitian tentang tode uji akurasi dijalankan ternyata relatif terbatas (Danoedoro, uji akurasi dengan, 14 lokasi dengan 4 kali pengulangan dalam menentukan/menggambarkan kondisi lamun yang di temukan.

Analisis uji akurasi (Tabel 2 dan Tabel 3) dilakukan dengan menggunakan *confusion/error matrix*, untuk memperoleh nilai *overall accuracy* (OA). Penggunaan sampel uji dalam bentuk titik acak cenderung tidak memberikan hasil yang konsisten. Uji akurasi dilakukan untuk menilai kualitas peta yang dihasilkan. Perhitungan akurasi dengan cara membuat Tabel matrik yang membandingkan kelas hasil klasifikasi citra dengan kenyataan di lapangan berdasarkan data sampel uji lapangan (Congalton & Green, 2019).

Tabel 2. Matrix Uji Akurasi pada non lamun dan lamun dengan tiga kelas kerapatan pada tahun 2013

Kategori	Non Lamun	Sangat Padat	Padat	Sedang	Total
Non Lamun	107	0	6	11	124
Sangat Padat	0	15	2	0	17
Padat	0	16	22	0	38
Sedang	11	0	2	8	21
Total	118	31	32	19	200

Berdasarkan hasil analisis dari matrix akurasi (Tabel 2) diperoleh bahwa pada tahun 2013 memiliki nilai *user accuracy* 68%, *producer accuracy* 62%, *overall accuracy* 76%, dan *kappa accuracy* 59%. sedangkan berdasarkan perhitungan uji akurasi dari Tabel matrix (Tabel 3) diperoleh bahwa pada tahun 2023 memiliki nilai *user accuracy* 78%, *producer accuracy* 74 %, *overall accuracy* 85%, dan *kappa accuracy* 76%. Peningkatan akurasi dari tahun 2013 ke 2023 adalah hasil dari beberapa faktor seperti kualitas data, algoritma yang digunakan, teknik pengolahan data yang lebih baik, dan representasi data *training* yang meningkat. Kombinasi dari semua faktor ini memberikan hasil klasifikasi yang lebih akurat dan dapat diandalkan pada tahun 2023 dibandingkan dengan tahun 2013.

Tabel 3. Matrix Uji Akurasi pada non lamun dan lamun dengan tiga kelas kerapatan pada tahun 2023

Kategori	Non Lamun	Sangat Padat	Padat	Sedang	Total
Non Lamun	100	0	0	7	107
Sangat Padat	0	40	10	1	51
Padat	2	3	20	5	30
Sedang	2	0	1	9	12
Total	104	43	31	22	200



lap peta hasil klasifikasi dengan menggunakan Tabel matrik uji akurasi keseluruhan *Overall Accuracy*, *producer accuracy* dan masing-masing kelas, seperti ditampilkan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Secara keseluruhan klasifikasi yang dilakukan baik. Nilai ini menunjukkan adanya kesamaan nilai *spektral* kelas-kelas yang menyebabkan kesalahan klasifikasi. Dalam penelitian lainnya akurasi pemetaan pada habitat dasar perairan dangkal dapat

menerapkan beberapa koreksi pada pra-pemrosesan citra yaitu koreksi *Sunglint* yang dapat meningkatkan akurasi sebesar 7% (Ari. Anggoro et al., 2016). Selain itu juga dapat menggunakan metode klasifikasi berbasis objek yang terbukti dapat meningkatkan akurasi sebesar 14% (A. Anggoro et al., 2018).

Ground Truthing

Ground Truth (GT) merupakan citra pembanding dengan citra hasil segmentasi, pada *Weizmann Segmentation Database* tidak terdapat citra *Ground Truth*. Jadi citra *Ground Truth* pada penelitian ini didapat berdasarkan hasil pengamatan secara langsung. Citra hasil segmentasi dibandingkan dengan citra *Ground Truth* dari hasil pengamatan secara langsung untuk mengetahui tingkat akurasi dari proses segmentasi obyek pada citra digital menggunakan Metode *Otsu thresholding*. Formula untuk menghitung tingkat akurasi dapat dilihat pada persamaan :

$$\text{Akurasi} = \frac{\text{Jumlah Citra Benar}}{\text{Jumlah Total Citra}} \times 100$$

Pelaksanaan *ground truthing* yang disajikan pada Gambar 6 dimulai dengan tahap persiapan, di mana lokasi studi dipilih berdasarkan analisis citra satelit dan peta awal. Data sekunder, seperti informasi oseanografi dan aktivitas manusia, dikumpulkan untuk mendukung penelitian. Serta mempersiapkan peralatan seperti GPS, kuadrat, kamera bawah air, dan alat pengambilan sampel lamun. Pengumpulan data di lapangan dilakukan dengan survei pada titik-titik yang telah ditentukan menggunakan metode *stratified random sampling*. Kuadrat digunakan untuk mengukur kepadatan, penutupan, dan komposisi spesies lamun, sementara biomassa lamun yang diambil untuk analisis karbon di laboratorium. Dokumentasi lokasi melalui foto juga dilakukan untuk verifikasi.



ground truth penelitian

alisis untuk menghitung distribusi lamun, kepadatan, serta stok
prosesan data dilakukan menggunakan perangkat lunak GIS
dan memvalidasi peta distribusi lamun. Estimasi stok karbon

dihitung berdasarkan biomassa lamun dan karbon organik menggunakan metode *Walkley and Black* (WB). Hasilnya kemudian divalidasi dengan data dari satelit citra satelit untuk memastikan keakuratan peta. Selanjutnya disusun laporan yang mencakup peta distribusi lamun, data biomassa, stok karbon organik, serta rekomendasi pengelolaan, seperti rehabilitasi area terdampak dan pengendalian aktivitas manusia. Tahap akhir mencakup evaluasi hasil *ground truthing* dan referensi publikasi ataupun laporan penelitian terkait. Proses ini memastikan data yang diperoleh akurat dan relevan untuk mendukung pengelolaan ekosistem lamun yang berkelanjutan.

2.3.2 Kondisi Lamun

Pengamatan kondisi lamun dilakukan setelah memperoleh data sebaran lamun yang berdasar pada hasil pengolahan data citra Landsat 9 yang dilakukan sebelumnya. pengambilan sampel karbon laboratorium dari padang lamun dilakukan berdasarkan kategori kerapatan tutupan: sangat padat, padat, dan sedang. Jumlah total pengamatan di situ mencapai 108 titik mencapai 108 titik, namun hanya 45 sampel yang dianalisis kandungan karbonnya di laboratorium.

Distribusi jumlah sampel karbon menunjukkan kecak, khususnya pada kategori padat yang memiliki jumlah pengamatan tertinggi (46 titik), tetapi hanya 8 sampel karbon yang dijelaskan. Sebaliknya yang dijelaskan. Sebaliknya, kategori sangat padat dan sedang memilikidan sedang memiliki jumlah sampel karbon yang relatif lebih representatif (19 dan 18 sampel dari masing-masing 38 dan 24 titik), kemudian untuk meminimalkan bias potensi dalam estimasi stok karbon, analisis dilakukan dengan pendekatan rata-rata tertimbang dan disertai penjelasan mengenai keterbatasan representasi data. Hal ini penting untuk menjaga validitas dan reliabilitas estimasi karbon yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil uji ANOVA dan analisis post-hoc Tukey HSD diketahui bahwa perbedaan nilai tutupan lamun antar kategori sangat padat, padat, dan sedang bersifat signifikan secara statistik ($p < 0,001$). Visualisasi boxplot mendukung temuan ini, menunjukkan sebaran nilai yang terpisah antar kategori. Oleh karena itu, pembagian kategori tutupan lamun dalam estimasi stok karbon dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah, dan pendekatan *terstratifikasi* berdasarkan kategori kerapatan menjadi metode yang valid untuk menghindari bias estimasi.

Pengamatan tersebut mengacu kepada Rahmawati et.al., (2014), dengan tahapan sebagai berikut:

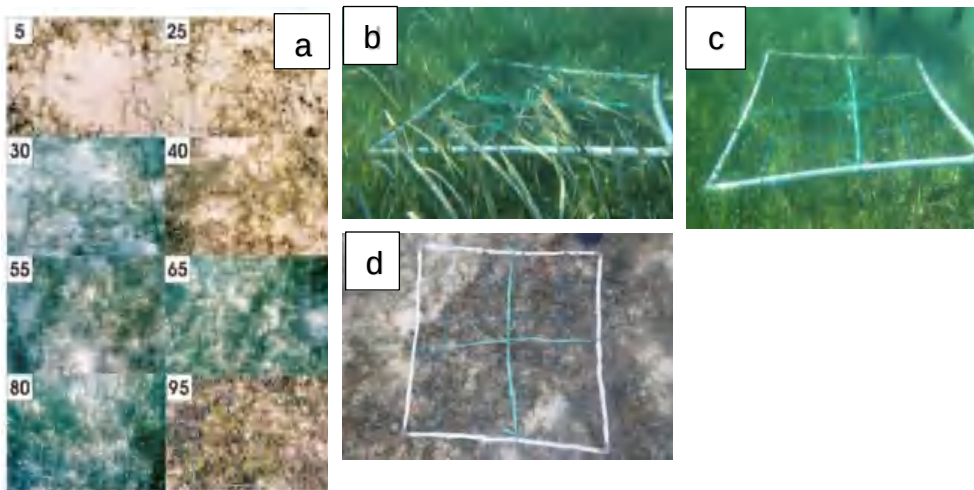
- (1) Melakukan estimasi persen tutupan lamun dengan menggunakan transek kuadrat (1m x 1m) secara *Purposive* sampling berdasarkan standar tutupan
- odifikasi untuk menentukan persentase total kondisi tutupan an Rahmawati et.al., (2014) dalam Tabel 4.



Tabel 4. Kategori Persen tutupan lamun (Rahmawati et.al., (2014), modifikasi)

Persen tutupan Lamun (%)	Kriteria Kondisi Lamun
0–50	Sedang
51 –75	Padat
76 - 100	Sangat Padat

Melakukan identifikasi jenis dan tutupan lamun berdasarkan *seagrass percentage cover* (McKenzie et al., 2003) (Gambar. 7) pada area penelitian berdasarkan titik yang ditentukan sebelumnya pada Gambar 6.



Gambar 7. (a) *seagrass percentage cover* (McKenzie et al., 2003) (b) kondisi sangat padat, (c) kondisi padat, (d) kondisi sedang

- (2) Mengidentifikasi spesies lamun yang ada didalam kuadrat 1m x 1m dalam 4 kali pengulangan pada setiap kategori persen tutupan lamun, salah satu jenis lamun yang ditemukan ialah *Thalassia hemprichii* (Gambar 8).



enis lamun (*Thalassia hemprichii*) yang ditemukan pada lokasi n



- (3) Mendokumentasikan foto tiap kuadrat, memberikan penanda terlebih dahulu disamping kuadrat dengan kode yang benar (lokasi, transek dan kuadrat) sebelum foto diambil.

2.3.3 Stok Karbon

Pengamatan stok karbon dilakukan bersamaan dengan pengamatan kondisi lamun, dengan tahapan sebagai berikut:

- (1) Mengambil 45 sampel lamun sesuai kebutuhan (6 tunas lamun) dalam transek kuadrat (1m x 1m) untuk menghitung biomass. Pengambilan sampel menggunakan secop sedalam 30 cm (agar dapat terambil biomassa bagian bawahnya), kemudian dimiringkan dan diangkat perlahan sehingga seluruh bagian biomassa terangkat;
- (2) Membersihkan sampel lamun dengan memasukkannya ke dalam kantong jaring, kemudian sampel yang telah bersih disimpan dalam kantong plastik dan diberi label.
- (3) Membersihkan kembali sampel lamun dari pasir dan epifit dengan menggunakan air tawar, kemudian dipisahkan sesuai jenis lamun dan disimpan dalam nampan plastik. Sampel dihitung jumlah individunya kecuali lamun yang berukuran besar (*E. acoroides*). Perhitungan jumlah individu lamun *E. acoroides* dilakukan pada saat pengamatan di lapangan dalam bingkai kuadrat 1m x 1 m.
- (4) Menimbang sampel lamun basah serta mencatat nilainya untuk mengetahui berat basah lamun, lamun yang di timbang disimpan dalam kantong sampel, dan diberi penamaan pada kantong sampel sesuai dengan sampling saat di lapangan. Kemudian mengeringkan sampel lamun di laboratorium dengan menggunakan oven beruhu 60 °C selama 48 jam, kemudian ditimbang berat keringnya;
- (5) Menimbang sampel lamun kering untuk mendapatkan nilai biomassa dengan menggunakan persamaan:

$$B = \frac{W}{A}$$

Keterangan :

B = Biomassa (gbk/m²);

W = Berat Kering Lamun (gbk); dan

A = Cuplikasn Area (m²).

- (6) Mengukur kandungan karbon pada sampel lamun yang sudah dikeringkan, dengan metode Walkley dan Black (WB). Metode ini pada prinsipnya bahan organik (oksidasi) melalui proses pengasaman ului titrasi menghitung sisa asam setelah mengoksidasi bahan e ini sering dikatakan metode basah dalam pengukuran bahan an asam yang digunakan adalah larutan asam Potasium (r2 O7) yang kemudian dititrasi dengan larutan Ferrous sulfat gga bahan organik dapat dihitung. Tahapan yang dilakukan



dalam metode WB adalah sebagai berikut (Schumacher, 2002; Mylavarapu, 2009).

- a) Menimbang 1-gram sampel lamun kering ke dalam media labu Erlenmeyer dengan kapasitas 250 mL.
- b) Melakukan standardisasi larutan Ferrous Sulfate terlebih dahulu yaitu dengan melakukan titrasi dua blanko (media tanpa sampel) sebelum melanjutkan dengan sampel yang akan dianalisa. Jika titrasi kedua blanko tersebut berbeda sebesar lebih dari 0,2 mL larutan Ferrous Sulfate, maka buret dan pipa harus dibersihkan. Kemudian lakukan analisis ulang untuk dua larutan blanko lagi agar diketahui apakah masalah telah dihilangkan.
- c) Meneteskan larutan 0,167 M Kalium dikromat (dengan menggunakan pipet) sebanyak 10,0 mL ke dalam setiap labu yang mengandung sampel kemudian labu diputar-putar dengan hati-hati agar tercampur.
- d) Meletakkan masing-masing labu didalam ruang pengasaman (lemari asam), kemudian dengan hati-hati menambahkan 20 mL Asam Sulfat pekat ke masing-masing labu dan mencampurkan dengan hati-hati, warna campuran akan berubah menjadi merah jingga.
- e) Membiarkan labu erlemeyer selama 5 menit di dalam lemari asam agar uap asamnya hilang.
- f) Menambahkan air murni ke masing-masing labu sehingga volume akhir kira-kira 125 mL., kemudian memutar-mutar labu secara lembut agar tercampur.
- g) Membiarkan sampel mendingin sampai mencapai suhu kamar kemudian memeriksa kembali volume setelah 30 menit.
- h) Menambahkan 1 ml indikator difinilamin dan 5 ml H₃PO₄ 85% dan segera dititrasi dengan larutan Ferrous Sulfate 1 M. Saat dititrasi, sampel diaduk dengan menggunakan pengaduk. Saat titrasi berlangsung, larutan akan berubah menjadi warna hijau yang akan berubah secara tiba-tiba menjadi coklat kemerahan ketika titik akhir titrasi tercapai.
- i) Mencatat setiap pembacaan volumetrik hingga mL terdekat.
- j) Perhitungan:

$$\%C = \frac{(B - A) \times M \text{ FeSO}_4 \times 12 \times 100}{\text{gr sampel} \times 4000}$$

Keterangan:

A = Volume larutan Ferrous Sulfate yang diperlukan untuk mentitrasi sampel, dalam mL.

B = Volume Rata-rata larutan Ferrous Sulfat yang diperlukan untuk mentitrasi dua blanko, dalam mL.

2/4000 = mili equevalen berat dari C dalam

lebih sesuai pada sampel yang memiliki nilai bahan organik selain itu pembuangan bahan-bahan asam harus sesuai (My, 2009).

OVA terhadap nilai stok karbon total berdasarkan kategori adanya perbedaan yang signifikan secara statistik ($F = 4,38$;



$p = 0,019$). Ini menunjukkan bahwa variasi tingkat kerapatan tutupan lamun secara nyata mempengaruhi besarnya stok karbon yang tersimpan. Penelitian ini memperkuat pendekatan analisis stok karbon secara *terstratifikasi* berdasarkan kategori tutupan, karena masing-masing kelas menunjukkan distribusi nilai yang berbeda secara statistik.

2.4 Analisis Data

2.4.1 Analisis perubahan luasan lamun

Pertama, tutupan lamun di lapangan didelineasi, kemudian dianalisa, untuk mengetahui perubahan luas lamun. Perubahan luas padang lamun dapat dihitung dengan menerapkan persamaan berikut yang menunjukkan kecenderungan perubahan lamun yang terjadi setiap tahun pada setiap pengamatan. Laju perubahan dapat dihitung dengan melihat laju perubahan yang terjadi pada tahun pertama pengamatan dan laju perubahan pada tahun pengamatan berikutnya yaitu pada tahun terakhir pengamatan, yang dapat dirumuskan sebagai berikut persamaan:

$$\Delta L = (Lt2 - Lt1) / Lt1 \times 100\%$$

Keterangan:

ΔL : Tingkat perubahan area (%)

$Lt1$: Luas pada tahun pengamatan pertama (ha)

$Lt2$: Luas pada tahun pengamatan berikutnya (ha)

Analisis deskriptif digunakan untuk menjelaskan perubahan sebaran lamun. Perubahan luas padang lamun yang terdeteksi tahun 2013 dan 2023 di Kawasan Taman Nasional Kepulauan Wangi-Wangi.

2.4.2 Analisis Hubungan Data Lapangan dan Data Citra

Untuk melihat hubungan antara data lapangan dengan data citra satelit digunakan analisa regresi dan korelasi. Pendekatan adanya hubungan antara data lapangan dengan data citra satelit digunakan model regresi linear sederhana sebagai berikut:

$$Y = Ax + B$$

Untuk mengambil keputusan berdasarkan pernyataan dari Suprpto (2001) bahwa $0.0 < r < 0.3$ merupakan hubungan yang lemah, $0.3 < r < 0.5$ merupakan hubungan yang sedang (moderat), $0.5 < r < 0.7$ merupakan hubungan yang kuat, $r > 0.7$ merupakan hubungan yang sangat kuat.

Pendugaan nilai konsentrasi klorofil-a citra satelit menggunakan rumus yang dikembangkan oleh Pentury (1997). Algoritma tersebut dimodifikasi berdasarkan data in situ dan nilai reflektansi Citra Landsat 8 daerah penelitian dengan persamaan



$$C = A \left(\frac{\lambda \text{ hijau}}{\lambda \text{ biru}} \right) + B$$

C : klorofil-a (mg/m³)
 A : reflektansi band hijau

λ biru = nilai reflektansi band biru

Nilai A dan B didapatkan dari persamaan hubungan linear antara data in situ dengan rasio band pada citra.

2.4.3 Biomassa Karbon

Setelah mendapatkan berat kering yang dilanjutkan dengan analisis kandungan karbon pada biomassa, maka kandungan karbon dapat dihitung menggunakan rumus (Fourqurean et al., 2014):

$$\text{Biomassa karbon} = \text{Berat kering (kg)} / \text{luas (m}^2\text{)} \times \% \text{ C}$$

$$\text{Konversi (Mg C/ ha)} = \text{Biomassa karbon (kgC/m}^2\text{)} \times (\text{Mg/1000kg}) \times (10.000\text{m}^2/\text{ha})$$

Perhitungan dilakukan pada setiap jenis lamun yang ditemukan dalam satu plot/kuadrat/bor. Jika dalam satu plot terdapat tiga jenis lamun maka total karbon stok biomassa adalah jumlah semua jenis lamun yang ditemukan dalam plot yang terbagi atas biomassa atas dan bawah. Setelah dihitung dalam setiap plot selanjutnya dirata-ratakan sehingga diperoleh total biomassa dalam lokasi penelitian dengan satuan Mg C/ha.

Total cadangan karbon lamun dihitung dengan menggunakan rumus (Supriadi et al., 2014):

$$C_t = \Sigma(L_i \times C_i)$$

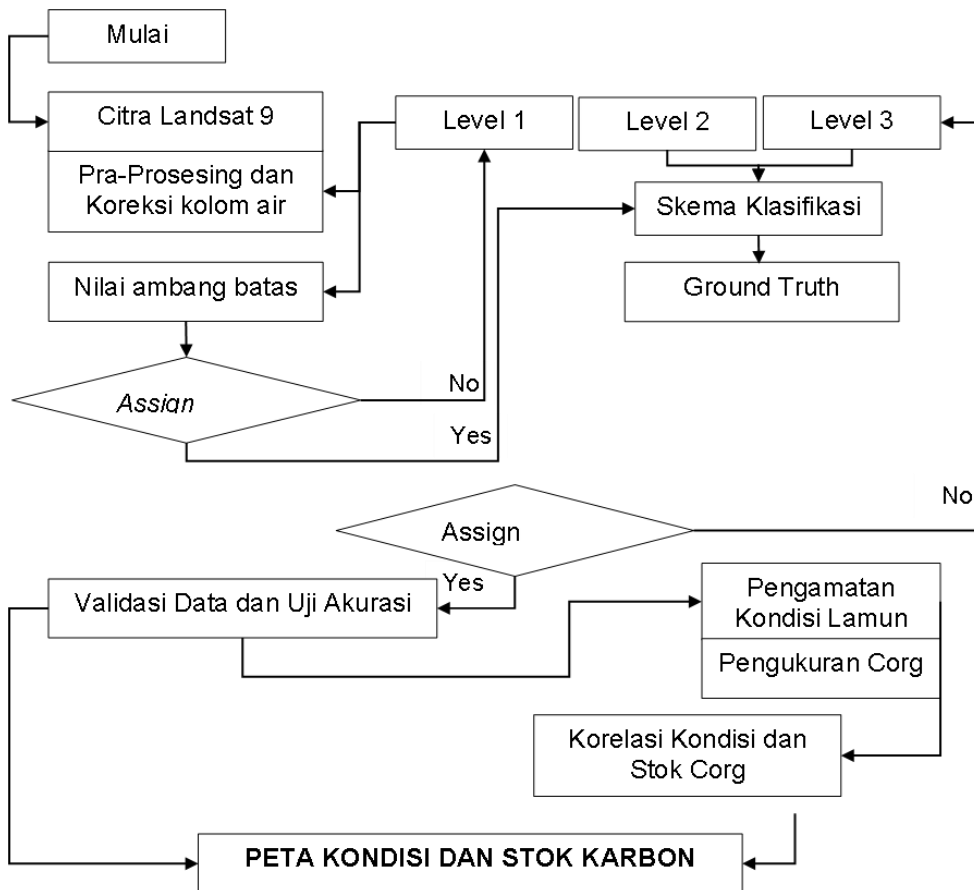
Keterangan C_t = Total karbon (ton); L_i = Luas padang lamun kelas ke-i (m^2); dan C_i = Stok karbon kelas ke-i (ton.m^2).

2.4.4 Stok Karbon pada Kepulauan Wangi-Wangi

Setelah mendapat luasan lamun dengan analisis citra satelit terbaru di lokasi tersebut atau menggunakan data global, maka didapat nilai stok karbon biomassa (Mg C) di kawasan tersebut dengan cara mengalikan nilai stok karbon biomassa per satuan luas (Mg C/ha) dengan luas ekosistem lamun yang diketahui (ha).

Stok karbon kawasan A (Mg C) = Mg C/ha x Luas ekosistem lamun kawasan A





Gambar 9. Diagram alur penelitian

