BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanasan global berupa kenaikan suhu permukaan bumi yang disebabkan oleh meningkatnya gas rumah kaca seperti CO_2 dan CH_4 di atmosfer, yang berasal dari operasi industri, transportasi, dan praktik pertanian hal ini menyebabkan perubahan iklim, mempengaruhi permukaan laut, kebakaran hutan, kekeringan, dan kerusakan ekosistem (Nedhisa dan Tjahjaningrum, 2019). Yaqin et al., (2022) menyatakan bahwa hutan mangrove mampu menyimpan karbon hingga empat kali lebih banyak per unit area dibandingkan dengan hutan tropis daratan. Ekosistem mangrove memainkan peran ekologis penting di daerah pesisir dengan berfungsi sebagai penyerap karbon dan reservoir dalam upaya yang bertujuan untuk mengurangi pemanasan global.

Emisi yang dihasilkan dari hutan mangrove cenderung lebih rendah dibandingkan hutan daratan karena proses dekomposisi serasah tanaman air tidak melepaskan karbon ke atmosfer seperti pada hutan daratan. Ini terjadi karena proses dekomposisi serasah tanaman air tidak menghasilkan pelepasan karbon ke atmosfer seperti yang terjadi pada hutan daratan. Kehadiran biomassa yang signifikan dalam hutan mangrove memainkan peran krusial dalam siklus karbon, dengan sekitar setengah dari total karbon dalam hutan tersebut tersimpan dalam vegetasi mangrove. Dampaknya menjadi lebih jelas ketika terjadi kerusakan pada hutan mangrove, karena akan mengurangi kapasitas hutan dalam menyerap karbon dioksida. Prinsip dasar dalam estimasi stok karbon adalah bahwa sekitar 47% dari total biomassa (Nedhisa dan Tjahjaningrum, 2019).

Indonesia sebagai salah satu negara kepulauan terbesar di Asia Tenggara, memiliki wilayah pesisir yang sangat luas. Dengan panjang garis pantai mencapai 95.181 km, Indonesia tercatat sebagai negara dengan garis pantai terpanjang keempat di dunia. Keberadaan garis pantai yang ekstensif ini memberikan Indonesia potensi sumber daya alam pesisir yang sangat besar dan beragam, serta mendukung keanekaragaman ekosistem. Di antara berbagai ekosistem pesisir yang ada, ekosistem mangrove adalah salah satu yang paling menonjol dan penting (Pranata et al., 2016). Kabupaten Pangkep merupakan salah satu kabupaten dalam Sulawesi Selatan yang sebagian besar wilayahnya adalah laut. Pada rentang waktu 2003 sampai dengan 2007, kawasan hutan mangrove di sepanjang kawasan pesisir di Kabupaten Pangkep banyak mengalami konversi atau alih fungsi menjadi tambak. Pada tahun 2008, luas ekosistem mangrove di Kabupaten Pangkep seluas 347,84 ha (Arfan et al., 2022). Keterbatasan informasi mengenai kondisi mangrove di daerah tersebut menyebabkan kurangnya pengelolaan yang efisien untuk menjaga kelestariannya. Mengingat pentingnya hutan mangrove, diperlukan pengelolaan yang tepat agar pemanfaatannya berkelanjutan, yang memerlukan data dan informasi akurat. Teknologi penginderaan jauh dan pemetaan menjadi solusi untuk memperoleh data dan informasi ini (Pranata et al., 2016).

Teknologi penginderaan jauh saat ini telah mengalami perkembangan signifikan. Satelit yang tersedia memiliki berbagai tingkat resolusi, yang mempengaruhi akurasi model yang dihasilkan. Penggunaan citra dengan resolusi spasial tinggi memungkinkan

pemetaan mangrove yang lebih rinci. Salah satu satelit dengan resolusi spasial tinggi adalah Sentinel-2A, yang dirancang oleh *European Space Agency* (ESA) dan dilengkapi dengan *Multi-Spectral Instrument* (MSI). Satelit ini diluncurkan pada tahun 2015 sebagai bagian dari misi Sentinel-2 (Adinegoro et al., 2022). Citra Sentinel-2 merupakan salah satu citra satelit yang memiliki 13 band, 4 band beresolusi 10 m, 6 band beresolusi 20 m, dan 3 band beresolusi spasial 60 m dengan area sapuan 290 km. Penelitian oleh Rafsenja et al. (2020) membandingkan citra Landsat 8 dan Sentinel-2A untuk mengidentifikasi sebaran mangrove di Kabupaten Buton Utara, Sulawesi Tenggara dengan menggunakan algoritma NDVI. Hasilnya menunjukkan bahwa Sentinel-2A lebih efektif dalam memberikan gambaran sebaran mangrove dengan tingkat akurasi 87,75%, sementara Landsat 8 hanya mencapai 75,51%. Perbedaan utama dalam tingkat akurasi ini disebabkan oleh resolusi citra Sentinel-2A yang lebih tinggi, sehingga mampu memberikan detail yang lebih baik dalam pemetaan mangrove.

Estimasi biomassa menggunakan penginderaan jauh dilakukan dengan pendekatan indeks vegetasi *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Reflektansi spektral band merah dan inframerah dekat (NIR) telah terbukti secara langsung berhubungan dengan biomassa di atas tanah vegetasi hijau. Kombinasi matematis panjang gelombang merah dan NIR diukur sebagai indeks vegetasi, memanfaatkan kemampuan panjang gelombang dalam pantulan tanaman. Indeks seperti NDVI, yang memanfaatkan pantulan di band merah dan NIR dapat mengurangi variabilitas pengukuran karena jenis tanah, intensitas cahaya matahari dan sudut insiden sinar matahari (Oktian et al., 2021).

Pemetaan dan monitoring mangrove umumnya dilakukan dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh dan memanfaatkan algoritma NDVI. Namun, algoritma tersebut sering kali menunjukkan nilai indeks yang sama antara vegetasi mangrove dengan vegetasi lebat lainnya. Terutama jika pemetaan dilakukan tanpa adanya tambahan data sampel lapangan. Hal ini disebabkan oleh cara kerja algoritma NDVI yang mengidentifikasi kerapatan vegetasi berdasarkan kenampakan kanopinya. Pada tahun 2020, Baloloy, A. B., memperkenalkan algoritma indeks mangrove yang lebih sederhana dengan nama *Mangrove Vegetation Index* (MVI) yang memiliki fokus utama untuk membedakan mangrove dengan nonmangrove, seperti tanah, air, dan vegetasi lain, secara presisi, tanpa memerlukan teknik klasifikasi yang rumit, membutuhkan waktu yang lama, dan memerlukan keahlian khusus (Baloloy et al., 2020).

Penyediaan informasi data cadangan karbon secara komprehensif pada seluruh sumber penyimpanan karbon perlu dilakukan untuk merencanakan dan mengukur upaya mitigasi perubahan iklim yang dilakukan. Berdasarkan uruain tersebut, dalam penelitian ini penulis mengangkat judul **"Estimasi Stok Karbon di Atas Permukaan pada Hutan Mangrove Berbasis NDVI dan MVI Menggunakan Citra Sentinel-2A di Wilayah Pesisir Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan."** Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi data dan informasi baru tentang potensi cadangan karbon pada hutan mangrove di wilayah pesisir Kabupaten Pangkep.

1.2 Tujuan dan Kegunaan

1. Mengetahui model terbaik untuk mendugaan stok karbon hutan mangrove di atas permukaan melalui indeks vegetasi NDVI dan MVI berbasis citra sentinel-2A,
2. Mengetahui cadangan atau stok karbon di atas permukaan hutan mangrove Kabupaten Pangkajene Kepulauan (Pangkep) pada tahun 2024.

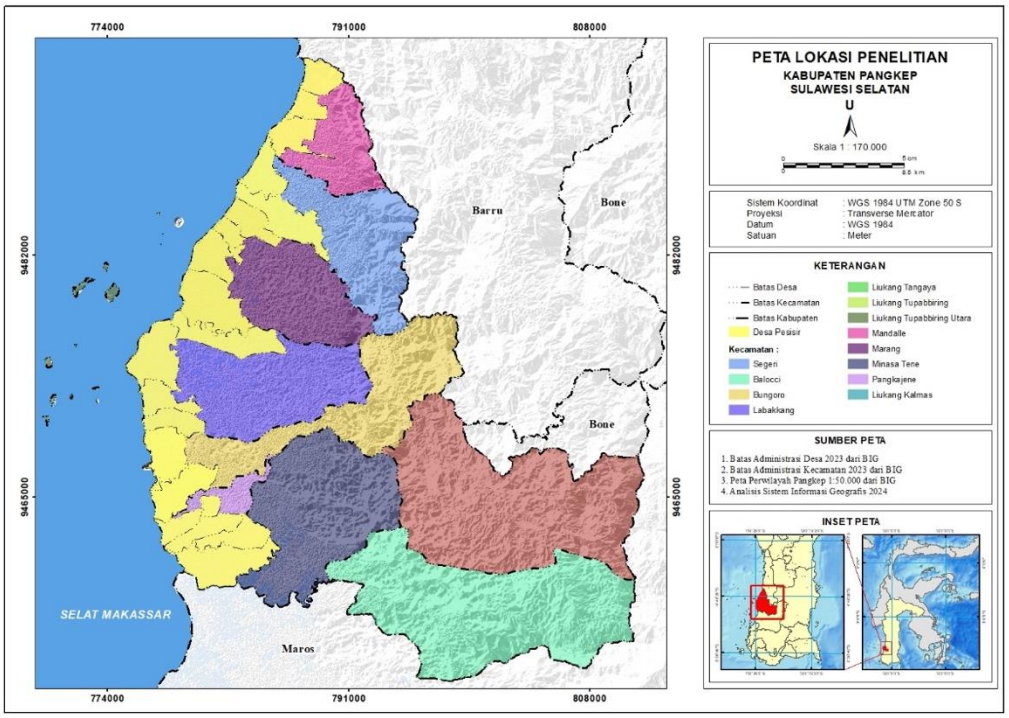
Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi data dan informasi baru tentang potensi stok karbon pada hutan mangrove di wilayah pesisir Kabupaten Pangkep. Peta hasil penelitian dapat dijadikan sebagai bahan pemerintah dan instansi terkait dalam upaya mengurangi peningkatan gas rumah kaca yang dapat menimbulkan pemanasan global. Hasil dari penelitian ini juga diharapkan menjadi referensi bagi penelitian-penelitian selanjutnya.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei 2024 – Maret 2025 tahapan kegiatan, yaitu pengumpulan data, kegiatan lapangan, dan analisis data. Pengumpulan dan pengolahan data dilaksanakan di Laboratorium Perencanaan dan Sistem Informasi Kehutanan, Universitas Hasanuddin. Kegiatan lapangan dilaksanakan pada di wilayah pesisir Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan, Sulawesi Selatan. Adapun lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

a. Laptop (Spesifikasi Ryzen 7, RAM 8 GB, SSD 512 GB), digunakan untuk menjalankan program/aplikasi
b. Perangkat lunak ArcGIS 10.8, digunakan untuk output dan visualisasi data
c. Perangkat lunak Microsoft Office, digunakan untuk mengolah data angka dan kata
d. Platform *Google Earth Engine* digunakan untuk memproses data citra,dengan cara memasukkan algoritma untuk melakukan proses analisis vegetasi NDVI dan MVI,
e. Aplikasi Mobile GPS, digunakan untuk mencari titik di lapangan
f. Smartphone, digunakan untuk mendokumentasikan kegiatan

g. Buku panduan mangrove, digunakan untuk mengidentifikasi jenis mangrove di lapangan
h. Tallysheet dan alat tulis menulis, digunakan untuk mencatat hasil kegiatan
i. Pita ukur/phiband, digunakan untuk mengukur diameter pohon dilapangan
j. Roll meter, digunakan untuk mengukur jarak plot
k. Patok, digunakan untuk menandai batasan plot
l. Tali, digunakan untuk memberi batasan ukuran suatu plot

2.2.2 Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

Tabel 1. Bahan Penelitian

No.	Judul	Kegunaan	Sumber
1	Peta Administrasi Kab. Pangkep	Untuk mengetahui batas lokasi penelitian	Badan Informasi Geospasial
2	Citra Sentinel-2 Rekaman Tanggal 21 Agustus 2024	Sebagai bahan analisis untuk membuat peta cadangan karbon	*Platform Google Earth Engine*
3	Data hasil inventarisasi hutan mangrove di wilayah pesisir Kab. Pangkep	Sebagai bahan analisis model regresi untuk membuat peta cadangan karbon	Hasil pengukuran di lapangan

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Pengunduhan dan Pengolahan Citra

Pengunduhan dan pengolahan citra meliputi *Image Mosaic & Cloud Masking,* dan *Filter Image*, dilakukan di *platform Google Earth Engine*. Pengolahan citra Sentinel-2A di *platform Google Earth Engine* (GEE) tidak memerlukan koreksi geometrik dan atmosferik manual karena data yang tersedia telah melalui proses koreksi. Citra Sentinel-2A yang diakses melalui GEE adalah produk Level-2A. Produk Level-2A memiliki komparabilitas yang sama dengan koreksi *Bottom of Atmosphere* pada penginderaan jauh menggunakan metode otomatis dengan sistem algoritma Sen2Cor dan Sentinel-2 ATBD *Library*, sehingga sudah terkoreksi secara geometrik dan atmosferik. Kemudian dilakukan interpretasi citra di aplikasi Arcmap dengan metode digitasi *on-screen*, selanjutnya dilakukan transformasi dua indeks vegetasi yaitu *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Mangrove Vegetation Index* (MVI) di *platform Google Earth Engine*.

Image Mosaic & Cloud Masking, Citra Sentinel-2 diunduh pada platform *google earth engine* diawali dengan *Image Mosaic & Cloud Masking* yakni memilih band QA60 dari citra Sentinel-2 yang berisi informasi kualitas atmosfer, termasuk keberadaan awan dan bayangan awan. Mendefinisikan *bitmask* untuk mendeteksi awan dan bayangan awan menggunakan bit ke-10 dan ke-11. Membuat filter dengan menetapkan piksel tanpa awan dan tanpa bayangan awan kemudian mengembalikan citra yang telah difilter untuk menghilangkan piksel dengan awan dan bayangan awan.

```
// ******************** Image Mosaic & Cloud Masking ********************

var sentinel2_mask = function(image) {

  // Memilih band QA_PIXEL dari citra
  var qa = image.select('QA60');

  // Bitmask untuk awan
  var cloudsBitMask = (1 << 10);

  // Bitmask untuk bayangan awan
  var cirrusBitMask = (1 << 11);

  // Piksel tanpa bayangan awan
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0)

  // Piksel tanpa awan
  .and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));
```

Gambar 2. Algoritma *Image Mosaic & Cloud Masking* Citra

Filter Image, memfilter dan mengunduh citra dari koleksi citra satelit Sentinel-2. Pertama, mengambil citra pada tanggal, dari 1 hingga 31 Agustus 2024, dan memilih citra dengan persentase awan kurang dari 20%. Citra yang terletak dalam batas area Mangrove diurut berdasarkan jumlah piksel awan. Citra tunggal diambil padai tanggal 21 Agustus 2024, dinormalisasi dengan mengalikan 0,0001 terhadap nilai pikselnya untuk penyesuaian skala 10x10m, dan dipotong sesuai dengan area kajian (ROI). Terakhir, layer citra ditambahkan ke peta dengan visualisasi warna sebenarnya menggunakan band merah, hijau, dan biru (B4, B3, B2).

```
// ******************** Filter Image ********************

// Pengunduhan Citra
var sentinel2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')

  // Filter Tanggal
  .filterDate('2024-08-01', '2024-08-31')

  // Filter Awan
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))
  .filterBounds(ROI)
  .sort('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', true)

var single =
ee.Image('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20240821T022321_20240821T022708_T50MQV')
                .multiply(0.0001)
                .clip(ROI)
var visualisasiS2 = {
  min:0,
  max:0.4,
  gamma:1.2,
  bands: ['B4','B3','B2']
};
print(sentinel2)
Map.addLayer(single, visualisasiS2, 'True_Color')
```

Gambar 3. Algoritma *Filter Image* Citra Sentinel-2A

Ekspor citra, mengekspor citra multispektral yang telah dipilih ke Google Drive dalam format GeoTIFF dengan resolusi 10 meter, menggunakan wilayah yang telah didefinisikan, dan menyimpannya dalam folder bernama ‘Penelitian’.

```
//******************** Eksport ********************

//Eksport Data
Export.image.toDrive({
  image: sentinel2,
  description: 'visualisasiS2',
  folder: 'Penelitian',
  scale: 10,
  region: Mangrove,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
  });
```

Gambar 4. Algoritma Ekspor citra di Google Drive

Interpretasi. Interpretasi citra satelit untuk menghasilkan penutupan lahan dilakukan secara visual. Kegiatan ini dilaksanakan dengan membuat batas setiap kelas penutupan lahan dengan cara mendelineasi kenampakan pada citra satelit yang tersaji di layar komputer (*digitasi on-screen*) menggunakan perangkat lunak penginderaan jauh dan sistem informasi geografis yaitu ArcGIS dengan mengenali pola, tekstur, bentuk, dan warna yang berbeda pada citra satelit. Klasifikasi tutupan lahan pada penelitian ini yaitu mangrove dan bukan mangrove.

2.3.2 Uji Akurasi Hasil Interpretasi Citra

Pengecekan lapangan, dilakukan terlebih dahulu untuk mengoreksi hasil interpretasi penutupan lahan dan mengamati kondisi penutupan lahan yang telah diidentifikasi sebelumnya. Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk membandingkan kondisi penutupan lahan di lapangan dengan hasil interpretasi citra yang telah dibuat. Proses pengecekan lapangan dimulai dengan menentukan titik koordinat sampel yang mewakili setiap kelas penutupan lahan yang ada. Jumlah sampel ditentukan menggunakan Rumus Slovin (Antoro, 2024) :

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{N}}{(\mathbf{1+Ne^2})} \quad (1)$$

Keterangan : n = Jumlah Sampel
N = Jumlah Populasi (Jumlah Polygon)
e = Batas Kesalahan (*Margin of Error*) yang bernilai 10%.

Uji Akurasi digitasi menggunakan *confusion matrix* (Tabel 2.) merupakan hubungan antara data referensi yang diketahui dengan hasil dari klasifikasi yang dilakukan berdasarkan interpretasi.

Tabel 2. Tabel *Confusion Matrix*

		Data Acuan (Pengecekan Lapangan)			**Total Kolom**
		A	B	C	
Data Hasil Klasifikasi Citra	A’	X_n			Σ_{n+}
	B’				
	C’			X_n	
Total Baris		Σ_{+n}			N

Sumber : (Sitinjak et al., 2024).

Keterangan : A, B, C = Data Acuan A', B', C' = Data hasil klasifikasi citra
X_n = Data yang diuji N = Total data yang diuji
ΣX_n = Jumlah masing-masing data acuan/klasifikasi citra

Berdasarkan Badan Informasi Geospasial (2012) perhitungan uji akurasi hasil klasifikasi harus ≥ 85%. Model yang digunakan untuk uji akurasi ini adalah Kappa *Accuracy* dengan persamaan sebagai berikut (Suryono et al., 2020) :

$$\boldsymbol{Kappa\ (k) = \frac{N\ \Sigma X_n - \Sigma X_{n+} X_{+n}}{N^2 - \Sigma X_{n+} X_{+n}} \times 100\%} \quad (2)$$

Keterangan: N = Total Data (Piksel) yang Diuji
X_n = Nilai Diagonal Matriks Baris ke-N dan Kolom ke-N
X_{n+} = Jumlah Piksel dalam Baris ke-N
X_{+n} = Jumlah Piksel dalam Kolom ke-N

2.3.3 Transformasi Indeks Vegetasi

Indeks vegetasi merupakan suatu algoritma yang diterapkan pada citra satelit untuk menunjukan sebuah informasi yang berkaitan dengan kerapatan vegetasi ataupun aspek yang berhubungan dengan vegetasi. Karakteristik transformasi indeks vegetasi bermacam-macam tergantung dari algoritmanya, beberapa indeks vegetasi akan mengekstraksi informasi nilai piksel dengan pendekatan berbeda-beda (Oktian et al., 2021). Transformasi indeks vegetasi yang digunakan pada penelitian ini adalah NDVI, dan MVI. Semua data yang digunakan untuk transformasi merupakan Citra Sentinel-2A yang sudah terkoreksi. Selain itu, citra yang digunakan dalam penelitaian ini juga sudah dipotong sesuai dengan daerah kajian penelitian. Seluruh pemrosesan transformasi indeks vegetasi dilakukan menggunakan *platform Google Earth Engine*.

***Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).** Hasil transformasi indeks vegetasi NDVI digunakan dalam penentuan titik pengambilan data lapangan. Rumus NDVI yaitu (Rachman et al., 2021) :

$$\mathbf{NDVI} = \frac{\mathbf{NIR - Red}}{\mathbf{NIR + Red}} \quad (3)$$

Keterangan : NDVI = *Normal Difference Vegetation Indeks*
NIR = Band Near Infra-Red/pita 8 (835,1 nm)
Red = Band Red/pita 4 (664,5 nm)

```
//********Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)********
var Red = single.select('B4');
var NIR = single.select('B8');

 // NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)
 var NDVI = (NIR.subtract(Red)).divide(NIR.add(Red));
 var NDVI_param = {
   min: -1.00,
   max: 1.00,
   palette: [
    '000000','a50026','d73027','f46d43','fdae61', 'fee08b',
    'ffffbf','d9ef8b','a6d96a','66bd63','1a9850', '006837'
  ] };
 Map.addLayer(NDVI, NDVI_param, 'Sentinel 2 - NDVI');
```

Gambar 5. Algoritma *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI)

Selanjutnya, kerapatan mangrove diklasifikasikan menjadi tiga kategori: kerapatan jarang, kerapatan sedang, dan kerapatan tinggi. Klasifikasi ini didasarkan pada kriteria tertentu yang diuraikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Kriteria Tingkat Kerapatan Tajuk

Kategori Kerapatan Mangrove	Nilai NDVI
Rendah	-1 ≤ 0.32
Sedang	0,33 ≤ 0,42
Tinggi	0,43 ≤ 1

Sumber : (Departemen Kehutanan, 2005)

Mangrove Vegetation Index **(MVI)** Hasil transformasi indeks vegetasi MVI digunakan untuk membangun model terbaik dalam menduga stok karbon mangrove melalui perbandingan dengan NDVI. Adapun rumus MVI yaitu (Baloloy et al., 2020) :

$$\mathbf{MVI} = \frac{(\mathbf{NIR} - \mathbf{GREEN})}{(\mathbf{SWIR1} - \mathbf{GREEN})} \quad (4)$$

Keterangan : MVI = Mangrove Vegetation Index
NIR = Band Near Infra-Red/pita 8 (835,1 nm)
GREEN = Band Green/pita 3 (560 nm)
SWIR1 = Band Swir1 /pita 11 (1613,7 nm)

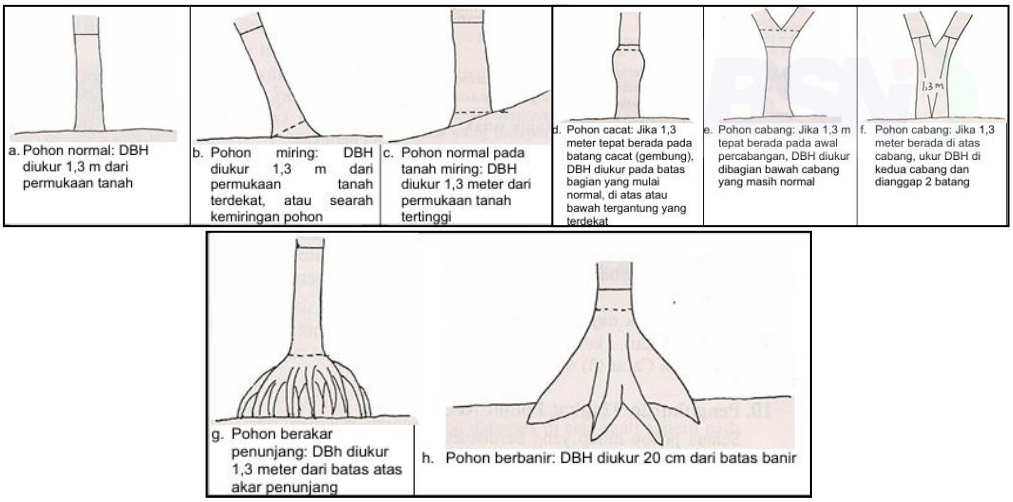
```
//***********Mangrove Vegetation Index (MVI)****************
var GREEN = single.select('B3');
var SWIR1 = single.select('B11');

// MVI = (NIR - GREEN) / (SWIR1 - GREEN)
var MVI = (NIR.subtract(GREEN)).divide(SWIR1.subtract(GREEN));
var MVI_param = {
  min: -1.00,
  max: 1.00,
  palette: [
    '000000','a50026','d73027','f46d43','fdae61', 'fee08b',
    'ffffbf','d9ef8b','a6d96a','66bd63','1a9850', '006837'
  ]
};
Map.addLayer(MVI, MVI_param, 'Sentinel 2 - MVI');
```

Gambar 6. Algoritma Mangrove Vegetation Indeks (MVI)

2.3.4 Pengukuran Data Lapangan

Teknik pengambilan data biomassa aktual menggunakan metode *purposive sampling* dimana penentuan plot sampel berdasarkan tingkat kerapatan tegakan mangrove dari transformasi NDVI dapat diliat pada tabel 3. Plot yang digunakan merupakan plot bujur sangkar berukuran 10 m x 10 m dimana plot ini merupakan hasil modifikasi dari plot survei menurut Kauffman & Danoto (2012) agar sesuai dengan ukuran piksel citra Sentinel-2A. Tegakan mangrove di wilayah pesisir Kabupaten Pangkep memiliki luas wilayah sebesar 396.46 ha dengan skala pemetaan yaitu 1:50.000 dengan Total Sampel Minimal (TSM) berdasarkan Badan Informasi Geospasial, (2014) yaitu 30 plot sampel. Titik koordinat plot dapat dilihat pada lampiran 1.

Sampel terdiri dari 30 plot yang 70% (21 plot) diantaranya digunakan untuk membangun model dan 30% (9 plot) sampel digunakan sebagai validator (Vincentius et al., 2024). Parameter yang diukur pada saat di lapangan meliputi pengukuran biomassa aktual yaitu berdasarkan Badan Standardisasi Nasional (2011), pengukuran lingkar batang pohon setinggi dada *(diameter at breast height)* pada ketinggian 1.3m diatas permukaan tanah dengan pohon berdiameter ≥ 20 cm, Tiang berdiameter 10 sampai dengan < 20 cm, dan Pancang berdiameter 2 cm sampai dengan < 10 cm, pengukuran dilakukan pada tempat yang ditentukan seperti pada Gambar 7, kemudian mengidentifikasi jenis mangrove, dan menghitung jumlah pohon dalam setiap plot pengukuran.



Gambar 7. Perkiraan DBH Pohon Mangrove (Sumber: SNI 7724:2011)

2.4 Analisis Data

Nilai cadangan karbon mangrove didapatkan dari nilai biomassa aktual mangrove. Data biomassa tersebut diperoleh berdasarkan pengukuran diameter pohon yang kemudian dimasukkan dalam suatu persamaan allometrik mangrove khusus *above ground biomass* untuk vegetasi mangrove spesifik. Data biomassa mangrove dalam luasan tertentu kemudian dikonversi ke nilai karbon dengan mengikuti aturan SNI 7724:2011 potensi biomassa mangrove dimana dalam 47% biomassa vegetasi mengandung karbon. Dari nilai cadangan karbon aktual dengan nilai transformasi NDVI dan MVI selanjutnya dilakukan analisis regresi dan korelasi menggunakan model Linear, Eksponensial, Logaritmik, dan Polynominall untuk membangun model terbaik cadangan karbon pada area penelitian. Pada akhir analisis dilakukan uji akurasi dengan menggunakan beberapa persamaan

2.4.1 Penghitungan Biomassa Mangrove

Perhitungan biomassa dilakukan setelah mengetahui luas daerah mangrove dari hasil interpretasi citra secara visual (digitasi *on-screen*) dan penentuan plot dilapangan, selanjutnya penentuan biomassa mangrove menggunakan data lapangan dengan mengukur lingkar bantang pohon dan diperoleh diameter pohon kemudian dimasukkan dalam persamaan allometrik untuk setiap jenisnya sehingga diperoleh biomassa plot.

Kemudian biomassa plot dirata-ratakan dan dikalikan dengan luas masing - masing kelas menjadi biomassa kelas, dan biomassa mangrove keseluruhan atau total biomassa vegetasi mangrove diperoleh dengan menjumlahkan biomassa masing-masing kelas vegetasi mangrove. Allometrik untuk beberapa jenis tegakan mangrove, sebagaimana yang dapat dilihat pada Tabel 5. dan Tabel 6.

Tabel 4. Persamaan Allometrik pada Beberapa Jenis Mangrove

Species	Persamaan Allometrik	Sumber
Bruguiera gymnorhiza	B = 0,0754 × ρ × $DBH^{2,50}$	Kauffama & Cole (2010)
Rhizophora apiculata	B = 0,043 × $DBH^{2,63}$	Komiyama et al., (2005)
Rhizophora mucronata	B = 0,128 × $DBH^{2,60}$	Flomard et al. (1998)
Rhizophora stylosa	B = 0,047 × $DBH^{2,9}$	Kauffman & Donato, (2012)
Xylocarpus granatum	B = 0,1832 × DBH^{29}	Komiyama et al., (2005)
Sonneratia alba	B = 0,3841 × ρ × $DBH^{2,10}$	Flomard et al. (1998)
Avicennia marina	B = 0,1848 × $DBH^{2,3624}$	(Dharmawan & Siregar, 2008)

Keterangan : B = Biomassa (kg)
DBH = Diameter Pohon (cm)
ρ = Berat Jenis Kayu (g/m^3)

Tabel 5. Berat Jenis Pohon Mangrove

Species	Berat Jenis (ρ)	Sumber
Bruguiera gymnorhiza	0.8683	Kauffama & Cole (2010)
Sonneratia alba	0.6443	Flomard et al. (1998)

Sumber Tabel 4 & 5 : Suardana et al., 2023

2.4.2 Penghitungan Stok Karbon

Adapun perhitungan cadangan karbon dari biomassa menggunakan rumus yang mengacu pada BSN SNI 7724:2011 yaitu:

$$\mathbf{C_b = B\ x\ \%\ C\ Organik} \quad (1)$$

Keterangan : Cb = Kandungan karbon dari biomassa (kg)
B = Total biomassa (kg)
%C organik = Nilai persentase kandungan karbon (0,47)

Penghitungan cadangan karbon per hektar di atas permukaan tanah dapat menggunakan persamaan sesuai dengan BSN SNI 7724:2011 sebagai berikut:

$$\boldsymbol{C_n = \frac{C_x}{1000}\ x\ \frac{10000}{L_{plot}}} \quad (2)$$

Keterangan : Cn = Kandungan karbon per hektar (ton C/ha)
Cx = Kandungan karbon pada tiap plot (kg)
l_{plot} = Luas plot pada masing-masing pool (m^2)

2.4.3 Analisis Korelasi dan Regresi

Analisis statistik yang digunakan adalah analisis korelasi dan analisis regresi. Analisis korelasi digunakan untuk mengukur keeratan hubungan antar variabel, di mana vaiabel terikat berupa biomassa lapangan (ton) dan variabel bebas berupa data penginderaan jauh dalam bentuk *Digital Number* (DN) indeks vegetasi NDVI dan MVI. Nilai dari data yang dihasilkan kemudian dikorelasikan dengan biomassa dan stok karbon pada plot sampel, korelasi indeks vegetasi terbaik kemudian digunakan sebagai penduga dari biomassa dan stok karbon pada lokasi penelitian. Korelasi digunakan untuk mengetahui hubungan antara dua variabel, besarnya korelasi dikisaran 0 s/d 1. Sedangkan analisis regresi digunakan untuk mengukur seberapa baik variabel bebas dapat menjelaskan variabel terikat, variabel bebas adalah nilai indeks vegetasi yang digunakan dan variabel terikat adalah nilai kandungan karbon pada setiap sampel. Model regresi yang digunakan dalam penelitian adalah (Lestari et al., 2016) :

1. Linear	$\boldsymbol{Y = a + bX}$	(3)
2. Eksponensial	$\boldsymbol{Y = ae^2}$	(4)
3. Logaritmik	$\boldsymbol{Y = a + b\ In\ X}$	(5)
4. Polynominal	$\boldsymbol{Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + \cdots + b_nX^n}$	(6)

Keterangan : Y = Variabel terikat/ biomassa (ton)
X = Variabel bebas/nilai indeks vegetasi
a, b = Nilai kostanta/koefisien

Untuk memilih model regresi yang terbaik pada setiap jenis indeks vegetasi dapat dilihat nilai tertinggi dari koefisien korelasi atau R dan koefisien determinasi atau R^2 (Widhi and Sigit, 2014).

2.4.4 Uji Akurasi Model Terbaik

Uji akurasi bertujuan untuk mengetahui perbandingan antara nilai stok karbon yang telah diestimasi menggunakan persamaan regresi yang telah didapatkan dengan nilai karbon yang diperoleh dari survei lapangan atau karbon aktual, sehingga ketelitian dalam mengestimasi nilai kandungan karbon oleh model yang telah dibangun dapat diperoleh. Proses ini menggunakan 30% (9 plot) sampel yang diperoleh dari survei lapangan dan bukan merupakan plot sampel yang digunakan untuk membangun model regresi.

Pada proses uji akurasi model terbaik, digunakan hasil persamaan regresi yang diperoleh dari NDVI dan MVI. Persamaan tersebut diterapkan pada titik sampel untuk menguji akurasi masing-masing persamaan regresi yang sesuai dengan setiap indeks vegetasi, menggunakan beberapa persamaan berikut.

1) Standar Error Estimasi

Uji akurasi menggunakan tabel Standar Error Estimasi, dengan hasil berupa nilai kandungan karbon yang menunjukkan selisih ± (lebih atau kurang). Akurasi persamaan yang digunakan dapat dinilai berdasarkan seberapa jauh hasil prediksi berada di atas atau di bawah nilai aktual dari proses uji akurasi. Semakin kecil nilai standar error estimasi, semakin tinggi tingkat akurasi model dalam memprediksi data (Wijaya et al., 2021).

$$SE = \sqrt{\frac{(\hat{y}-y)^2}{n-2}} \quad (7)$$

Keterangan: SE = Standar Error Estimasi
y = Karbon hasil pengukuran lapangan
ŷ = Karbon hasil berdasarkan persamaan regresi
n = Jumlah titik sampel

2) *Root Mean Square Error* (RMSE)

RMSE berfungsi untuk membedakan nilai yang diprediksi dari nilai aktual. Nilai RMSE yang semakin tinggi menunjukkan bahwa tingkat keakuratan prediksi semakin rendah, sementara nilai RMSE yang lebih rendah mengindikasikan tingkat keakuratan yang lebih tinggi (Sutomo et al., 2021).

$$RMSE = \frac{1}{n}\sqrt{\Sigma\frac{(\hat{y}-y)^2}{y}} \times 100\% \quad (8)$$

Keterangan : RMSE = *Root Mean Square Error*
n = Jumlah plot
ŷ = Karbon hasil berdasarkan persamaan regresi
y = Karbon hasil pengukuran lapangan

3) Bias (e)

Bias (e) adalah kesalahan sistematis yang terjadi dalam berbagai bentuk, termasuk kesalahan dalam proses pengukuran, baik yang disebabkan oleh faktor teknis selama pengukuran maupun oleh ketidaktepatan atau kekurangan pada alat ukur yang digunakan, jika mendekati nol menunjukkan prediksi yang tidak bias (tepat). (Firmansyah et all., 2022):

$$e = \sum_{i=1}^{n}\left\{\left(\frac{\hat{y}-y}{y}\right)/n\right\} \text{ x } 100\% \quad (9)$$

Keterangan: e = Bias
n = Jumlah plot
ŷ = Karbon hasil berdasarkan persamaan regresi
y = Karbon hasil pengukuran lapangan

4) Chi-square (X^2)

Uji ini bertujuan untuk menentukan apakah perbedaan antara hasil pengamatan (y) dan hasil harapan (ŷ) terjadi secara kebetulan atau menggambarkan pola yang signifikan. Dalam konteks uji akurasi, Chi-Square sering digunakan untuk mengukur akurasi prediksi atau model klasifikasi dengan membandingkan distribusi prediksi model dengan data aktual, Nilai X^2 yang lebih kecil menunjukkan prediksi yang lebih akurat. (Achmad et al., 2018).

$$X^2 \text{ Hitung} = \sum_{i=1}^{n}\frac{(\hat{y}-y)^2}{y} \text{ x } 100\% \quad (10)$$

Keterangan: n = Jumlah plot
ŷ = Karbon hasil berdasarkan persamaan regresi
y = Karbon hasil pengukuran lapangan

5) Simpangan Agregat (SA)

Uji simpangan agregat digunakan untuk menilai tingkat keakuratan suatu model dengan membandingkan hasil estimasi biomassa dengan data biomassa aktual. Semakin mendekati 0 nilai simpangan agregat yang dihasilkan oleh suatu model, semakin tinggi tingkat keakuratan model tersebut (Achmad et al., 2018).

$$SA = \left(\frac{\Sigma\hat{y} - \Sigma y}{\Sigma\hat{y}}\right) \quad (11)$$

Keterangan: SA = Simpangan Agregat
n = Jumlah plot
ŷ = Karbon hasil berdasarkan persamaan regresi
y = Karbon hasil pengukuran lapangan

2.5 Pembuatan Peta Sebaran Karbon

Peta sebaran stok karbon dibuat dengan menganalisis data menggunakan model regresi di Google Earth Engine (GEE), kode di GEE digunakan untuk menghitung dan memvisualisasikan nilai karbon berdasarkan indeks vegetasi diferensial (NDVI). Fungsi *calculateCarbon* diawali dengan menghitung nilai karbon dari NDVI yang telah dihitung sebelumnya, dan hasilnya ditambahkan ke peta dengan parameter visualisasi yang menetapkan rentang nilai dari 0 hingga 350 menggunakan palet warna dari merah hingga hijau. Total karbon dihitung dengan metode *reduceRegion*, yang menjumlahkan nilai karbon di seluruh area Mangrove dengan resolusi skala 10. Hasil total karbon ini kemudian ditampilkan di konsol, memberikan informasi mengenai jumlah karbon yang tersimpan di area tersebut. Kemudian hasilnya divisualisasikan menjadi peta yang lebih informatif menggunakan ArcGIS. Dalam proses ini, ArcGIS menambahkan elemen-elemen penting seperti skala dan legenda, sehingga peta memberikan gambaran detail tentang variasi stok karbon di berbagai area penelitian, algoritmanya dapat di liat pada Gambar 8.

```
// Menghitung nilai karbon berdasarkan NDVI
var carbonValue = calculateCarbon(NDVI);

// Menambahkan layer nilai karbon ke peta
var carbonValue_param = {
  min: 0,
  max: 350,  // Sesuaikan rentang sesuai dengan ekspektasi
  palette: ['red', 'orange', 'yellow', 'lightgreen', 'green']}

Map.addLayer(carbonValue, carbonValue_param, 'Nilai Karbon');

// ******************** Menghitung Total Karbon ********************
var totalCarbon = calculateCarbon(NDVI).reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: Mangrove,
  scale: 10,  // Sesuaikan dengan resolusi citra
  maxPixels: 1e9
});

// Menampilkan total karbon di konsol
print('Total Karbon:', totalCarbon);
```

Gambar 8. Algoritma Pemetaan Cadangan Karbon

Pembagian lima kelas karbon berdasarkan rentang statistik dilakukan dengan menghitung rentang (R), yaitu selisih antara nilai maksimum dan minimum dalam data menggunakan rumus:

$$R = \max - \min$$

Rentang ini kemudian dibagi dengan jumlah kelas yang diinginkan (*n*), untuk menentukan lebar kelas (L):

$$L = \frac{R}{n}$$

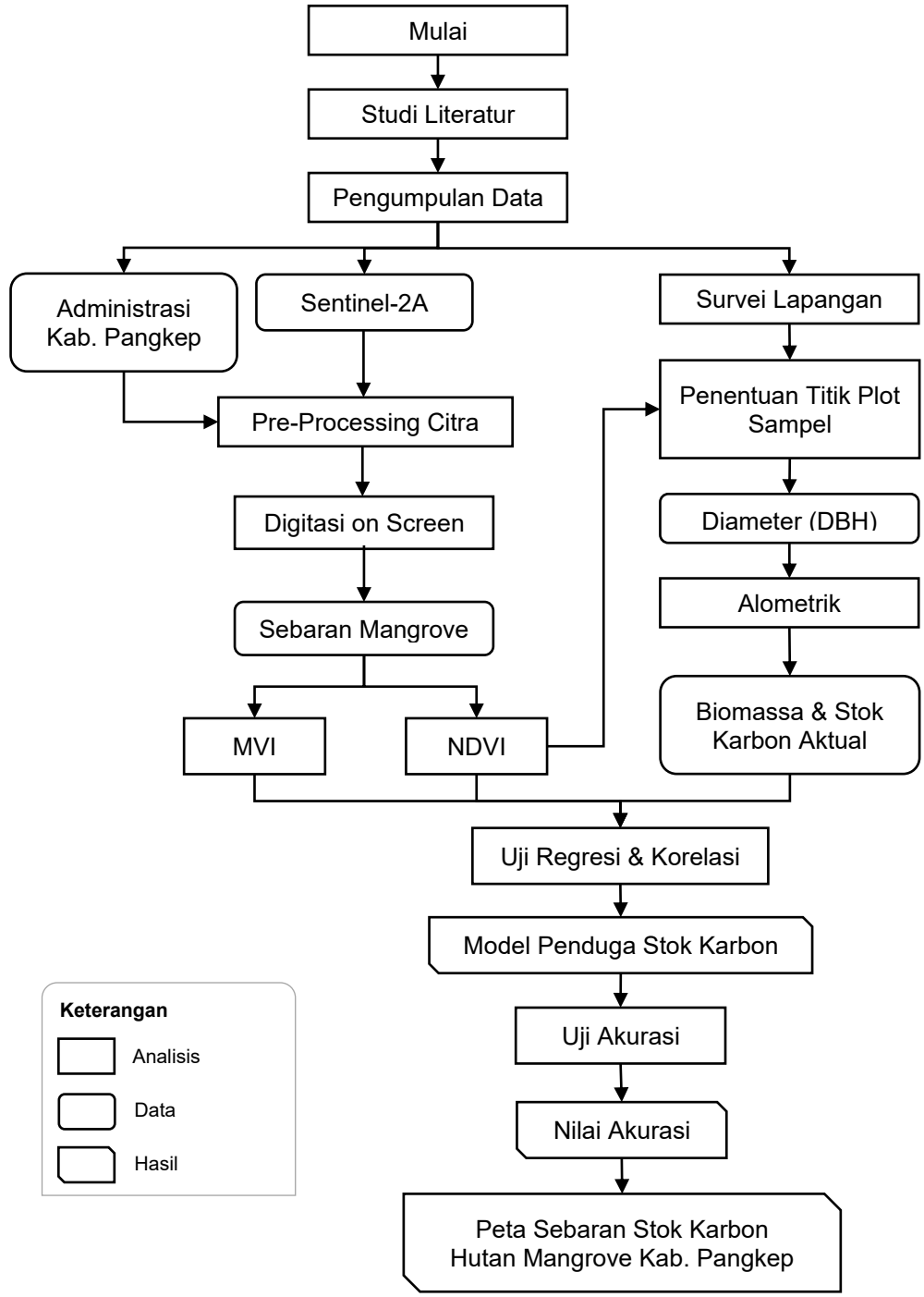
Batas kelas pertama ditentukan dengan menjadikan nilai minimum (*min*) sebagai batas bawah, sedangkan batas atasnya adalah penjumlahan antara *min* dan *L*:

$$\text{Batas bawah kelas 1} = \min$$
$$\text{Batas atas kelas 1} = \min + L$$

Kelas berikutnya dihitung dengan menambahkan *L* secara berurutan pada batas atas kelas sebelumnya. Pendekatan ini memungkinkan analisis distribusi karbon yang terstruktur dan mempermudah identifikasi pola dalam data.

2.6 Alur Tahapan Penelitian

Untuk tahapan pelaksanaan penelitian dapat dilihat secara seperti pada Gambar 9.



Gambar 9. Alur Tahapan Penelitian