

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim yang terjadi secara global merupakan isu yang saat ini sangat hangat dibicarakan oleh berbagai pihak. Menurut Hertianti et al., (2021), perubahan iklim saat ini adalah permasalahan yang sangat serius yang dihadapi oleh dunia internasional. Terganggunya keseimbangan energi yang terjadi antara bumi dan atmosfer merupakan penyebab dari terjadinya perubahan iklim global. Menurut Akbar & Sosilawati (2019), pemanasan global (*global warming*) yang sekarang terjadi dipengaruhi oleh peningkatan gas rumah kaca (GRK) seperti karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ) dan dinitrogen oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ) yang menyebabkan terjadinya kenaikan suhu rata-rata pada atmosfer secara drastis, dan pada akhirnya mengakibatkan terjadinya perubahan iklim.

Peningkatan aktivitas manusia dalam penggunaan kawasan hutan dan pemanfaatan hasil hutan sangat berpotensi menyebabkan kontributor (penyumbang) gas karbon dioksida yang paling besar ke atmosfer bumi. Hal ini berdampak pada terjadinya efek rumah kaca yang dapat mempengaruhi naiknya air laut, jumlah curah hujan serta berbagai aspek ekologi lainnya yang berpotensi mengancam kelangsungan hidup berbagai makhluk di bumi. Pelestarian ekosistem mangrove dilakukan sebagai upaya dalam penurunan emisi karbon serta melakukan peningkatan serapan karbon dan mempertahankan stok karbon (Amanda et al., 2021). Pelepasan karbon dioksida ke udara harus dikurangi atau dibatasi dengan konsentrasi serendah-rendahnya, hal ini berbanding terbalik dengan jumlah karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) yang diserap oleh tanaman harus ditingkatkan semaksimal mungkin.

Berdasarkan data yang dirilis oleh Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2021, Indonesia mempunyai luasan mangrove mencapai 3,63 juta hektar (Ha) atau sekitar 20,37 persen dari total mangrove di dunia. Negara Indonesia adalah salah satu pusat keanekaragaman mangrove terbesar di dunia, tetapi luasan mangrove di Indonesia secara bertahap terus menurun (Lestariningsih et al., 2022). Indonesia tercatat sebagai negara dengan kawasan hutan mangrove terluas di dunia, oleh karena itu potensi hutan mangrove di Indonesia sangat besar. Ekosistem mangrove memiliki banyak manfaat potensial bagi manusia dan lingkungan. Karbon biru adalah istilah karbon yang disimpan dalam bentuk biomassa yang ditemukan di ekosistem mangrove ini. Karbon yang terserap dan tersimpan di rawa garam, laut, dan ekosistem pesisir disebut karbon biru (Hasidu et al., 2021).

Hutan mangrove adalah hutan yang mempunyai fungsi ekologis yang sangat penting bagi ekosistem pesisir (Marzuki et al., 2023). Perlindungan dari badai tropis (Zhang et al., 2022), sebagai habitat dari berbagai jenis ikan (Vincentius et al., 2019), merupakan fungsi penting yang dimiliki oleh ekosistem. Selain itu hutan mangrove juga memiliki fungsi ekologis yang lain yaitu menyerap dan menyimpan karbon yang berpengaruh dalam penurunan dari peningkatan emisi karbon yang

terjadi di alam. Menurut Azzahra et al., (2020), hutan mangrove adalah salah satu ekosistem pesisir perairan tropis yang memiliki kapasitas paling tinggi untuk menyerap karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Hutan mangrove memiliki kemampuan dalam menyimpan karbon empat kali lebih banyak dibandingkan dengan hutan tropis lainnya (Simarmata et al., 2019).

Kondisi ekosistem mangrove di Kota Palopo menghadapi beberapa ancaman serius akibat konversi lahan untuk tambak dan aktivitas manusia lainnya. Hal ini mengakibatkan penurunan luas dan kualitas hutan mangrove, yang pada gilirannya mempengaruhi kapasitasnya dalam menyimpan karbon. Penyebab utama dari hilangnya hutan mangrove adalah kawasan hutan mangrove dikonversi menjadi lahan akuakultur, pertanian, minyak dan gas serta pembangunan perkotaan (Arifanti et al., 2021). Maka dari itu upaya konservasi pada kawasan hutan mangrove harus terus dilakukan. Keseimbangan ekologi yang ada pada ekosistem di wilayah pesisir akan terganggu jika ekosistem mangrove terus mengalami degradasi. Degradasi pada ekosistem mangrove dapat dicegah dengan upaya konservasi pada kawasan tersebut (Hasidu et al., 2021).

Pengukuran langsung stok karbon di hutan mangrove sangat krusial untuk memperoleh data yang tepat mengenai cadangan karbon dan serapan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), yang dapat dilakukan melalui metode alometrik dan pengukuran biomassa. Selain itu, pemanfaatan teknologi penginderaan jauh memungkinkan untuk mengumpulkan data secara luas dan efisien, serta menganalisis kondisi vegetasi tanpa harus melakukan pengukuran lapangan secara menyeluruh. Kombinasi antara pengukuran langsung dan teknologi penginderaan jauh dapat memberikan wawasan yang lebih menyeluruh mengenai potensi penyimpanan karbon di ekosistem mangrove.

Awalnya, pengukuran biomassa dilakukan secara terestrial pada skala plot, namun metode konvensional ini biasanya memerlukan waktu dan biaya yang cukup besar. Oleh karena itu, untuk mengestimasi biomassa dan stok karbon di kawasan yang sangat luas, diperlukan cara untuk mengekstrapolasikan perhitungan berbasis plot ke tingkat bentang alam. Metode yang bisa digunakan adalah dengan memanfaatkan citra multispektral berbasis penginderaan jauh, yaitu dengan mengkaji hubungan antara indeks vegetasi dan nilai pantulan spektral terhadap biomassa pada suatu vegetasi.

Teknologi penginderaan jauh memungkinkan pengumpulan data spasial dan temporal yang relevan dengan berbagai parameter vegetasi. Data dari penginderaan jauh dapat digunakan untuk mengidentifikasi kondisi kesehatan vegetasi, luas tutupan mangrove, dan estimasi stok karbon dengan lebih akurat. Terdapat beberapa indeks vegetasi berbasis data penginderaan jauh yang masih digunakan dalam penelitian karbon. Maka dari itu, penelitian ini akan melihat hubungan antara karbon dan beberapa indeks vegetasi, seperti NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), mRE-SR (*Modified Red Edge Simple Ratio*), DVI (*Difference Vegetation Index*), IRECI (*Inverted Red-Edge Chlorophyll Index*), MVI (*Mangrove Vegetation Index*), dan TRVI (*Total Ratio Vegetation Index*). Setiap indeks memiliki karakteristik unik dalam mendeteksi tingkat kehijauan, kepadatan,

atau kandungan klorofil vegetasi yang berkorelasi dengan kapasitas penyimpanan karbon.

Dalam penelitian ini, indeks vegetasi yang digunakan tidak hanya berbasis pada *band Merah (Red)*, melainkan juga pada *band Red Edge*. *Band Red Edge* memiliki keunggulan dalam menganalisis karakter biofisik vegetasi dan memberikan informasi yang lebih detail tentang fotosintesis vegetasi dibandingkan dengan indeks broadband. Selain itu, *band Red Edge* mampu mengatasi masalah saturasi sinyal pada indeks *broadband* yang disebabkan oleh tingginya kepadatan kanopi (Khan et al., 2020). Penggunaan *Red Edge* dan NIR sangat dianjurkan dalam membangun model estimasi stok karbon karena dapat meningkatkan akurasi (Suardana et al., 2023). *Band Red Edge* memiliki potensi yang kuat untuk memperkirakan Stok Karbon secara efisien dibandingkan dengan NDVI standar atau indeks *broadband* lainnya (Imran et al., 2020).

Berdasarkan uraian di atas, maka dinilai perlu melaksanakan penelitian dengan judul **“Pemetaan dan Estimasi Stok Karbon Mangrove di Atas Tanah dengan Menggunakan Data Indeks Vegetasi Berbasis Citra Sentinel-2 di Wilayah Pesisir Kota Palopo”**

## 1.2 Tujuan dan Manfaat

Penelitian ini bertujuan untuk:

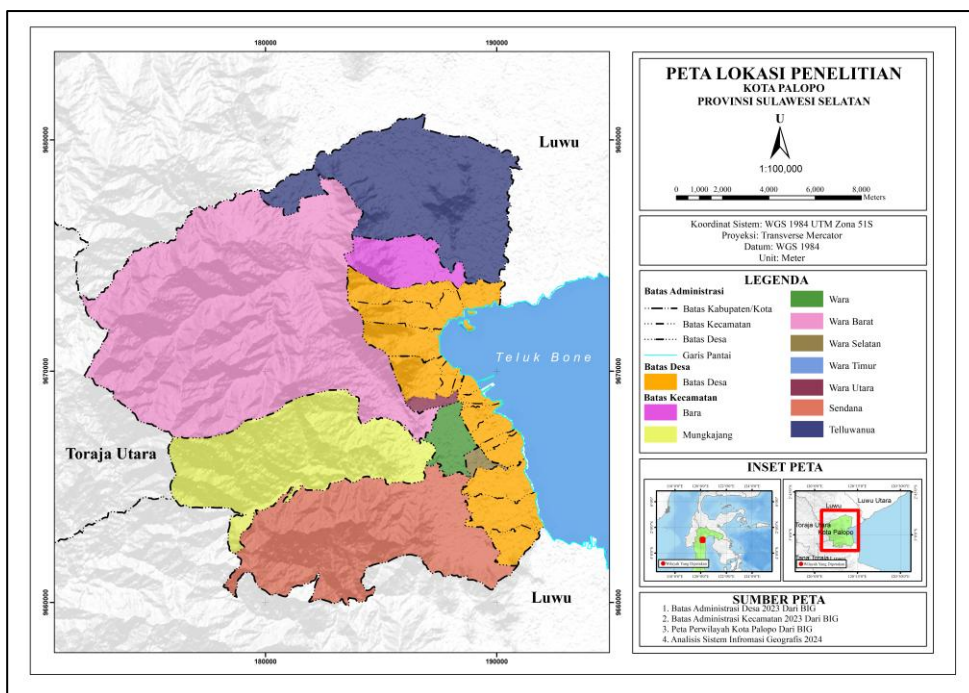
1. Mengetahui Indeks vegetasi serta memetakan cadangan atau stok karbon mangrove di atas permukaan, dengan menggunakan data Citra Sentinel-2,
2. Menganalisis model yang dapat menggambarkan hubungan antara Nilai Indeks Vegetasi dengan cadangan karbon mangrove di atas permukaan, di wilayah pesisir Kota Palopo.

Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai sumber informasi dan dasar perumusan rekomendasi bagi masyarakat dan pemerintah kota Palopo dalam merancang dan menyusun rencana pengelolaan kawasan mangrove di wilayah pesisir. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat digunakan sebagai basis data terbaru terkait stok karbon di Kota Palopo, dan sebagai sebuah referensi penelitian-penelitian selanjutnya.

## BAB II METODE PENELITIAN

### 2.1 Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli 2024 sampai Maret 2025 yang meliputi tiga tahapan kegiatan, yaitu pengumpulan data, kegiatan lapangan, dan analisis data. Kegiatan pengumpulan data dilaksanakan pada bulan Juli 2024 bertempat di Laboratorium Perencanaan dan Sistem Informasi Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Universitas Hasanuddin. Kegiatan lapangan dilaksanakan pada bulan September 2024 di wilayah pesisir Kota Palopo. Sementara itu kegiatan analisis data, dilaksanakan pada bulan Oktober 2024 sampai Maret 2025 yang bertempat Laboratorium Perencanaan dan Sistem Informasi Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Universitas Hasanuddin.



**Gambar 1.** Peta Lokasi Penelitian

### 2.2 Alat dan Bahan

#### 2.2.1 Alat

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian adalah:

1. Laptop, digunakan dalam pemrosesan platform atau *software*.

2. Platform *Google Earth Engine* digunakan untuk memproses data citra dengan cara memasukkan algoritma untuk melakukan proses analisis vegetasi NDVI, mRE-SR, DVI, IRECI, MVI dan TRVI.
3. *Microsoft Office* digunakan untuk mengolah data dan laporan.
4. Perangkat lunak *Arcgis* 10.8.2 digunakan untuk mengolah digunakan untuk output dan visualisasi data.
5. *Smartphone* digunakan sebagai alat dokumentasi.
6. *Receiver GPS (Global Positioning System)* digunakan untuk mencari titik *ground check* di lapangan.
7. *Tallysheet* dan alat tulis menulis, digunakan untuk mencatat hasil kegiatan.
8. Pita ukur/*phiband*, digunakan untuk mengukur diameter pohon dilapangan.
9. *Roll meter*, digunakan untuk mengukur jarak plot.
10. Patok, digunakan untuk menandai batasan plot.
11. Tali, digunakan untuk memberi batasan ukuran suatu plot.

### 2.2.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Bahan yang digunakan dalam penelitian

| No | Bahan                                                                                                                                     | Kegunaan                                                                        | Sumber                                                    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1  | Citra Sentinel-2A rekaman tahun 2024                                                                                                      | Sebagai bahan analisis untuk membuat peta cadangan karbon                       | Diakses langsung pada platform <i>Google Earth Engine</i> |
| 2  | Peta Adminisitrasi Kota Palopo                                                                                                            | Sebagai batas areal kajian penelitian                                           | Badan Informasi Geospasial                                |
| 3  | Data Hasil Inventarisasi Wilayah Pesisir Kota Palopo yang meliputi: bagian dimensi dari pohon yaitu DBH ( <i>Diameter Breast Height</i> ) | Sebagai bahan analisis model regresi dan uji akurasi stok karbon di Kota Palopo | Hasil pengukuran di lapangan                              |

## 2.3 Prosedur Penelitian

### 2.3.1 Pengolahan Citra

Tahapan pengolahan data citra meliputi tahap *cloud masking*, *filter image* dan pemotongan citra, menampilkan citra, *export image* dan interpretasi citra.

**Cloud Masking.** Pada tahap ini, pengunduhan citra satelit sentinel-2A dilakukan dengan menggunakan Platform *Google Earth Engine*. Pemrosesan citra

Sentinel-2 untuk *cloud masking* melibatkan penghapusan atau penandaan piksel yang terpengaruh oleh awan atau bayangan awan.

```
// ***** 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));
  return image.updateMask(mask);
};
```

**Gambar 2.** Algoritma Cloud Masking pada *Google Earth Engine*

**Filter Image dan Pemotongan Citra.** Tahapan ini bertujuan untuk memilih waktu perekaman citra serta melakukan pemotongan citra berdasarkan lokasi penelitian.

```
// ***** Filter Image *****
// Koleksi Citra
var sentinel2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
// Filter Tanggal
.filterDate('2024-01-1', '2024-12-31')
// Filter Awan
.filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))
// Load Masking Data Collection
.map(sentinel2_mask)
.median()
// Clip Raster
.clip(AOI)
// Faktor Skala Band
.multiply(0.0001);
//Zoom ke ROI
Map.centerObject(AOI);
```

**Gambar 3.** Algoritma *Filter Image* dan Pemotongan Citra pada *Google Earth Engine*

**Menampilkan Citra.** Tahapan ini bertujuan untuk menampilkan band-band multispectral, proses ini dilakukan pada *Google Earth Engine*.

```
// ***** Multispectral Band *****
// Composite Band
var multispectral = sentinel2.select(['B4', 'B3', 'B2', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8',
'B8A', 'B11', 'B12']);
// Parameter Visualisasi Multipleband
var multispectral_param = {min: 0, max: 0.25};
// Menampilkan Citra pada Layer Peta
Map.addLayer(multispectral, multispectral_param, 'Sentinel 2 - Multispectral');
```

**Gambar 4.** Algoritma menampilkan Multispectral Band pada *Google Earth Engine*

**Export Image.** Tahapan ini bertujuan untuk melakukan pengunduhan citra yang telah diolah di *Google Earth Engine*.

```
//*****Export Image*****
//Eksport Data
Export.image.toDrive({
  image: multispectral,
  description: "multispectral_sentinel",
  folder: 'Penelitian',
  scale: 10,
  region: AOI,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});
```

**Gambar 5.** Algoritma *Export Image* pada *Google Earth Engine*

**Interpretasi Citra.** Interpretasi citra satelit yang digunakan sebagai tutupan mangrove dilakukan secara visual. Metode digitasi *On Screen* merupakan pendekatan yang diterapkan dalam penelitian ini. Proses interpretasi citra meliputi identifikasi objek pada citra dengan memperhatikan unsur dan karakteristik citra (Rona/warna, bentuk, ukuran, pola) dengan mengidentifikasi tutupan tegakan mangrove pada Citra Sentinel-2A.

### 2.3.2 Pengecekan Data Lapangan

Tahapan pengecekan data lapangan ini meliputi kegiatan penetapan titik lokasi pengecekan data serta uji akurasi taksiran penutupan lahan.

**Penetapan Titik Lokasi Pengecekan Data Lapangan.** Pengecekan lapangan dilakukan untuk mengetahui hasil interpretasi citra yang telah dilakukan. Tujuan dari kegiatan adalah untuk membandingkan kondisi penutupan lahan di lapangan dengan hasil interpretasi citra penutupan lahan yang ada. Kegiatan pengecekan lapangan dimulai dengan menentukan titik koordinat perwakilan pada

setiap kelas penutupan lahan yang ada. Rumus yang digunakan untuk menentukan jumlah sampel adalah rumus Slovin.

$$n = \frac{N}{(1 + Ne^2)} \quad (2.1)$$

Keterangan : n = Jumlah sampel  
 N = Jumlah populasi  
 e = Batas Toleransi Kesalahan (*Margin of Error*) sebesar 10%

**Uji Akurasi Taksiran Penutupan Lahan.** Pengujian ketelitian atau akurasi dari hasil interpretasi merupakan tahap yang krusial dalam aplikasi penginderaan jauh, karena kelayakan suatu hasil interpretasi untuk digunakan sangat bergantung pada sejauh mana tingkat ketelitian dari hasil interpretasi tersebut. Metode *confusion matrix* digunakan dalam perhitungan akurasi interpretasi citra. Setelah memperoleh data dari tabel *confusion matrix*, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian akurasi melalui perhitungan *kappa accuracy*. Tabel *Confision Matrix* dapat dilihat pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Tabel *Confision Matrix*

|                                    | Data Acuan (Pengecekan Lapangan) |               |   |          | Total Kolom   |
|------------------------------------|----------------------------------|---------------|---|----------|---------------|
|                                    |                                  | A             | B | C        |               |
| Data Hasil<br>Klasifikasi<br>Citra | A'                               | $X_{nn}$      |   |          | $\Sigma_{n+}$ |
|                                    | B'                               |               |   |          |               |
|                                    | C'                               |               |   | $X_{nn}$ |               |
| Total Baris                        |                                  | $\Sigma_{+n}$ |   |          | N             |

Saat ini, akurasi yang dianjurkan adalah akurasi kappa, karena *overall accuracy* cenderung memberikan estimasi yang terlalu tinggi secara umum. Dalam proses pemetaan klasifikasi penutupan lahan, nilai akurasi yang dianggap dapat diterima adalah 85% atau 0,85. (Derajat et al., 2020). Adapun persamaanya adalah sebagai berikut:

$$Kappa (k) = \frac{N \Sigma X_{nn} - \Sigma X_{n+} X_{+n}}{N^2 - \Sigma X_{n+} X_{+n}} \times 100 \quad (2.2)$$

Keterangan : N : Total Data (Piksel) yang Diuji  
 $X_{nn}$  : 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

Pengolahan indeks vegetasi meliputi kegiatan pengklasifikasian citra menggunakan enam indeks vegetasi, yaitu NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), mRE-SR (*Modified Red Edge-Simple Ratio*), DVI (*Difference Vegetation Index*), IRECI (*Inverted Red Edge Chlorophyll Index*), MVI (*Mangrove Vegetation Index*) dan TRVI (*Total Ratio Vegetation Index*).

**Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).** Salah satu jenis indeks vegetasi adalah *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), yang digunakan untuk mengukur kepadatan vegetasi dan menilai perubahan kesehatan tanaman. Indeks vegetasi NDVI merupakan kombinasi matematis antara band NIR (*Near-Infrared Radiation*) dan Red (Fadillah et al., 2023)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2.3)$$

Keterangan :      NDVI            : *Normal Difference Vegetation Index*  
                          NIR                : Band Near Infra-Red (Band 8)  
                          Red                : Band Red (Band 4)

```
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 6.** Skrip NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

**Modified Red Edge-Simple Ratio (mRE-SR).** Algoritma *Modified Red Edge-Simple Ratio* (mRE-SR) digunakan untuk mengidentifikasi vegetasi dengan memanfaatkan panjang gelombang Red Edge dan NIR (*Near-Infrared Radiation*) (Putra et al., 2021).

$$mRE - SR = \frac{\left(\frac{NIR}{Red\ Edge}\right) - 1}{\sqrt{\left(\frac{NIR}{Red\ Edge}\right) + 1}} \quad (2.4)$$

Keterangan : mRE-SR : *Modified Red Edge-Simple Ratio*  
 NIR : Band Near Infra-Red (Band 8)  
 Red Edge : Band Red Edge (Band 5)

```
var mRESR = ((NIR.divide(RedEdge1)).subtract(1)).divide
((NIR.divide(RedEdge1)).sqrt().add(1));
var mRESR_param = {
  min : -1.00,
  max : 1.00,
  palette : [
    '000000','a50026','d73027','f46d43','fdae61', 'fee08b',
    'ffffbf','d9ef8b','a6d96a','66bd63','1a9850', '006837'
  ]
};
Map.addLayer(mRESR, mRESR_param, 'Sentinel 2 - mRE-SR');
```

**Gambar 7.** Skrip mRE-SR (*Modified Red Edge-Simple Ratio*)

***Difference Vegetation Index (DVI).*** Algoritma *Difference Vegetation Index* (DVI) merupakan salah satu indek vegetasi yang membedakan antara vegetasi dan tanah dan tidak berkaitan dengan perbedaan antara pencaran dan pantulan yang disebabkan oleh bayangan atau atmosfer (Hayati & Prasetyo, 2018).

$$DVI = NIR - Red \quad (2.5)$$

Keterangan : DVI : *Difference Vegetation Index*  
 NIR : Band Near Infra-Red (Band 8)  
 Red : Band Red (Band 4)

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

**Gambar 8.** Skrip DVI (*Difference Vegetation Index*)

***Inverted Red Edge Chlorophyll Index (IRECI)***. IRECI memanfaatkan *band* 8 dan *band* 4, yang akan disediakan oleh Citra Sentinel 2, dengan menggunakan reflektansi pada *band* NIR dan *band* Red, serta memanfaatkan kedua *band* RE yaitu *band* 5 dan *band* 6. Indeks vegetasi ini digunakan untuk mengukur kandungan klorofil dalam vegetasi (Frampton et al., 2013).

$$IRECI = \frac{NIR - Red}{\left( \frac{Red\ Edge\ 1}{Red\ Edge\ 2} \right)} \quad (2.6)$$

Keterangan : IRECI : *Inverted Red Edge Chlorophyll Index*  
 NIR : Band Near Infra-Red (Band 8)  
 Red : Band Red (Band 4)  
 Red Edge 1 : Band Red Edge 1 (Band 5)  
 Red Edge 2 : Band Red Edge 2 (Band 6)

```
var IRECI = (NIR.subtract(Red)).divide(RedEdge1.divide(RedEdge2));
var IRECI_param = {
  min : -1.00,
  max : 1.00,
  palette : [
    '000000','a50026','d73027','f46d43','fdae61', 'fee08b',
    'ffffbf','d9ef8b','a6d96a','66bd63','1a9850', '006837'
  ]
};
Map.addLayer(IRECI, IRECI_param, 'Sentinel 2 - IRECI');
```

**Gambar 9.** Skrip IRECI (*Inverted Red Edge Chlorophyll Index*)

***Mangrove Vegetation Index (MVI)***. Indeks MVI dirancang dengan menganalisis tanda spektral dan karakteristik dataset pada mangrove dan non mangrove. Indeks ini diformulasikan untuk menangkap kehijauan pada piksel mangrove. Indeks vegetasi ini memiliki fokus utama untuk membedakan membedakan mangrove dengan tutupan non-vegetasi lainnya seperti tanah kosong, air, dan bangunan (Baloloy et al., 2020).

$$MVI = \frac{NIR - Green}{SWIR\ 1 - Green} \quad (2.7)$$

Keterangan : MVI : *Mangrove Vegetation Index*  
 NIR : Band Near Infra-Red (Band 8)  
 Green : Band Green (Band 3)  
 SWIR 1 : Band SWIR 1 (Band 11)

```

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 10.** Skrip MVI (*Mangrove Vegetation Index*)

**Total Ratio Vegetation Index (TRVI).** TRVI memanfaatkan band 8 dan band 4 atau NIR dan *Red* yang berfungsi untuk memberikan kemampuan untuk menghasilkan pengukuran terhadap kondisi vegetasi (Fadaei, 2017).

$$TRVI = \sqrt{\frac{NIR}{Red}} \quad (2.8)$$

Keterangan :    TRVI            : *Total Ratio Vegetation Index*  
                       NIR            : Band Near Infra-Red (Band 8)  
                       Red            : Band Red (Band 4)

```

var TRVI = NIR.divide(Red).sqrt();
var TRVI_param = {
  min: -1.00,
  max: 2.00,
  palette: [
    '000000','a50026','d73027','f46d43','fdae61', 'fee08b',
    'ffffbf','d9ef8b','a6d96a','66bd63','1a9850', '006837'
  ]
};
Map.addLayer(TRVI, TRVI_param, 'Sentinel 2 - TRVI');

```

**Gambar 11.** Skrip TRVI (*Total Ratio Vegetation Index*)

### 2.3.4 Pengambilan Data Lapangan

Metode pengambilan data lapangan dilakukan menggunakan metode *purposive sampling*. Menurut Purwanto et al., (2020), *purposive sampling* merupakan metode yang digunakan oleh peneliti untuk mencapai tujuan penelitian tertentu dan didasarkan pada pertimbangan tertentu yaitu tingkat kelas kerapatan.

Menurut Badan Standardisasi Nasional (2011), data pengukuran mangrove di tiap stasiun dilakukan terhadap pohon (DBH  $\geq$  20 cm), tiang (DBH 10 < 20 cm) dan pancang (DBH 1 < 10 cm). Luas hutan mangrove yang didapatkan pada wilayah pesisir Palopo adalah 116,12 ha, dengan skala 1 : 50.000 maka didapatkan Total Sampel Minimal (TSM) yaitu 30. Menurut peraturan Badan Informasi Geografis tahun 2014, plot dibuat dengan ukuran 10 × 10 meter. Adapun pentuan jumlah titik sampel yang harus diambil disesuaikan dengan skala peta. Jumlah titik sampel dapat dilihat pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Jumlah titik sampel berdasarkan skala peta

| Skala      | Kelas Kerapatan (Kr) | Min. Plot | Total Sampel Minimal (TSM) |
|------------|----------------------|-----------|----------------------------|
| 1 : 25.000 | 5                    | 30        | 50                         |
| 1 : 50.000 | 3                    | 20        | 30                         |
| 1: 250.000 | 2                    | 10        | 20                         |

Sumber: (Badan Informasi Geospasial, 2014)

Menurut Badan Informasi Geospasial (2014), rumus yang digunakan untuk menghitung jumlah sampel minimal berdasarkan total luas mangrove (ha) adalah sebagai berikut :

$$A = TSM + \left( \frac{\text{Luas (ha)}}{1500} \right) \quad (2.9)$$

$$A = 30 + \left( \frac{116,12}{1500} \right)$$

$$A = 30 + 0,08$$

$$A = 30.08 \rightarrow 30$$

Keterangan : A : Jumlah Sampel Minimal  
TSM : Total Sampel Minimal  
1500 : Konstanta

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh jumlah plot sebanyak 30 plot. Sampel terdiri dari 30 plot yang 21 diantaranya digunakan untuk membuat sampel model, sedangkan 9 sampel sisanya digunakan sebagai validator. Kegiatan lapangan dilakukan untuk mengukur biomassa dan nilai karbon di atas permukaan tanah dengan pendekatan alometrik pada berbagai titik sampel yang telah ditentukan. Pengambilan data di lapangan merupakan pengumpulan data terkait dengan dimensi pohon (diameter setinggi dada/ *Diameter Breast Height* (DBH). Untuk menyamakan perhitungan, maka DBH yang digunakan adalah 1,3 meter sehingga pengukuran keliling pohon dilakukan pada ketinggian 1,3 meter dari tanah dengan menggunakan pita meter.

Untuk menentukan nilai kerapatan tajuk mangrove, digunakan hasil perhitungan dari NDVI. Kemudian nilai kelas NDVI tersebut diklasifikasikan ulang

menjadi 3 kelas. Tabel evaluasi tingkat kerapatan tajuk mangrove yang didasarkan pada nilai NDVI dapat dilihat pada **Tabel 4**.

**Tabel 4.** Kriteria Tingkat Kerapatan Tajuk

| Nilai NDVI                        | Tingkat Kerapatan Tajuk |
|-----------------------------------|-------------------------|
| $-1,0 \leq \text{NDVI} \leq 0,32$ | Jarang                  |
| $0,33 \leq \text{NDVI} \leq 0,42$ | Sedang                  |
| $0,43 \leq \text{NDVI} \leq 1,00$ | Lebat                   |

Sumber: (Departemen Kehutanan, 2005)

## 2.4 Analisis Data

### 2.4.1 Perhitungan Biomassa Mangrove

Persamaan allometrik dalam penelitian ini digunakan untuk perhitungan biomassa pada mangrove. Allometrik didefinisikan sebagai bidang ilmu dari hubungan antara pertumbuhan dan ukuran suatu bagian organisme dengan pertumbuhan atau ukuran keseluruhan organisme. Adapun persamaan allometrik pada beberapa jenis tegakan mangrove dapat dilihat pada **Tabel 5**.

**Tabel 5.** Persamaan Allometrik pada Beberapa Jenis Tegakan Mangrove

| Spesies                     | Persamaan Allometrik                    | Sumber                          |
|-----------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| <i>Avicennia marina</i>     | $B = 0,1848(\text{DBH})^{2,3524}$       | (Dharmawan & Siregar, 2008)     |
| <i>Rhizophora apiculata</i> | $B = 0,0275(\text{DBH})^{3,22}$         | (Pambudi, 2011)                 |
| <i>Rhizophora mucronata</i> | $B = 0,128(\text{DBH})^{2,60}$          | (Fromard et al., 1998)          |
| <i>Rhizophora spp.</i>      | $B = 0,1282(\text{DBH})^{2,6}$          | (Fromard et al., 1998)          |
| <i>Sonneratia alba</i>      | $B = 0,3841(\text{DBH})^{2,101} * \rho$ | dalam (Kauffman & Donato, 2012) |
|                             |                                         | (Kauffman & Cole, 2010)         |
|                             |                                         | dalam(Kauffman & Donato, 2012)  |
| <i>Xylocarpus granatum</i>  | $B = 0,1832 (\text{DBH})^{2,21}$        | (Talan, 2008)                   |

Keterangan : B : Biomassa (kg)  
 DBH : Diameter Pohon Setinggi Dada (cm)  
 $\rho$  : Berat Jenis Tumbuhan ( $\text{g/cm}^3$ )

**Tabel 6.** Berat Jenis pada Mangrove

| Spesies                | Berat Jenis Tumbuhan<br>( $\rho$ ) | Sumber                 |
|------------------------|------------------------------------|------------------------|
| <i>Sonneratia alba</i> | 0,6443                             | (Fromard et al., 1998) |

### 2.4.2 Perhitungan Cadangan Carbon

Perhitungan pada cadangan karbon mangrove menggunakan rumus yang mengacu pada Badan Standardisasi Nasional (2011), yaitu:

$$C_b = B \times \% C \text{ Organik} \quad (2.10)$$

Keterangan :  $C_b$  = Kandungan karbon dari Biomassa (kg)  
 $B$  = Total Biomassa (kg)  
 $\% C \text{ organic}$  = Nilai persentase kandungan karbon sebesar 47 %

### 2.4.3 Cadangan Karbon Mangrove per Hektar

Perhitungan cadangan karbon mangrove per hektar dapat menggunakan rumus yang mengacu pada Badan Standardisasi Nasional (2011), yaitu:

$$C_n = \frac{C_x}{1000} \times \frac{10000}{L_{plot}} \quad (2.11)$$

Keterangan :  $C_n$  = Kandungan Karbon Per Hektar pada masing-masing *Carbon Pool* ada Tiap Plot (ton/ha)  
 $C_x$  = Karbon pada masing-masing *Carbon Pool* pada Tiap Plot (kg)  
 $L_{plot}$  = Luas Plot pada masing-masing *Pool* (m<sup>2</sup>)

### 2.4.4 Analisis Korelasi dan Regresi

Analisis korelasi dan regresi adalah analisis statistik yang digunakan dalam penelitian ini. Analisis korelasi digunakan untuk mengukur keeratan hubungan antar variabel, di mana variabel terikat berupa biomassa lapangan (ton) dan variabel bebas berupa data penginderaan jauh. Data *Digital Number* (DN) adalah data penginderaan jauh yang digunakan untuk melakukan analisis dari keenam indeks vegetasi. Nilai dari data yang dihasilkan kemudian dikorelasikan dengan biomassa dan stok karbon pada plot sampel yang telah diukur dilapangan.

Sementara itu, untuk 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:

1. Linear  $Y = a + bX$
2. Eksponensial  $Y = ae^{bx}$
3. Logaritmik  $Y = a + b \ln X$
4. Polinomial  $Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3 + \dots b_nX^n$

Keterangan :  $Y$  : Variabel terikat/ biomassa (ton)  
 $X$  : Variabel bebas/ nilai indeks vegetasi  
 $a, b$  : Nilai konstanta/koeffisien

### 2.4.5 Uji Akurasi

Uji akurasi digunakan 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.

**Koefisien Determinasi ( $R^2$ ).** Koefisien determinasi ( $R^2$ ) merupakan nilai yang menunjukkan sejauh mana variasi atau perubahan pada variabel terikat dapat dijelaskan oleh variasi atau perubahan pada variabel bebas. Nilai  $R^2$  berkisar antara 0 hingga 1, di mana semakin mendekati 1, model dianggap semakin akurat dalam menjelaskan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat. Nilai Koefisien determinasi ( $R^2$ ) dihitung dengan rumus (Alam et al., 2020).

$$R^2 = \frac{\{\sum D_m D_o - (\sum D_m \sum D_o)/n\}^2}{\{\sum D_m^2 - (\sum D_m)^2/n\} \{\sum D_o^2 - (\sum D_o)^2/n\}} \quad (2.12)$$

Keterangan :    SA        : Simpangan Agregat  
                      Dm        : Karbon hasil pendugaan (Model)  
                      Do        : Karbon hasil pengukuran Lapangan  
                      n         : Jumlah titik sampel

**Simpangan Agregat (SA).** Simpangan Agregat (SA) adalah ukuran yang digunakan dalam analisis statistik dan pemodelan untuk menilai akurasi hasil estimasi atau prediksi. Simpangan Agregat (SA) mengukur selisih antara nilai yang diprediksi dan nilai aktual, memberikan gambaran tentang seberapa baik model dapat menggambarkan data yang sebenarnya. Persamaan yang baik memiliki SA antara -1 hingga +1. Nilai Simpangan Agregat (SA) dihitung dengan rumus (Yuwono et al., 2015).

$$SA = \left( \frac{\sum D_m \sum D_o}{\sum D_m} \right) \quad (2.13)$$

Keterangan :    SA        : Simpangan Agregat  
                      Dm        : Karbon hasil pendugaan (Model)  
                      Do        : Karbon hasil pengukuran Lapangan

**Bias (e).** Bias (e) merupakan kesalahan sistematis yang dapat terjadi akibat berbagai faktor, seperti kesalahan dalam pengukuran, kesalahan teknis, atau ketidakakuratan alat ukur. Bias dapat bernilai positif maupun negatif, dan dianggap baik jika nilainya mendekati nol. Nilai Bias (e) dihitung dengan rumus (Yuwono et al., 2015).

$$e = \left| \sum \left\{ \frac{(D_m - D_o)}{n} \right\} \times 100 \right| \quad (2.14)$$

Keterangan : e : Bias  
 Dm : Karbon hasil pendugaan (Model)  
 Do : Karbon hasil pengukuran Lapangan  
 n : Jumlah titik sampel

**Uji chi-square ( $X^2_{Hitung}$ ).** Uji chi-square digunakan untuk menguji apakah terdapat hubungan antara dua variabel kategori serta menghitung rasio perbedaan nilai dugaan dengan nilai aktual. Nilai Uji chi-square ( $X^2_{Hitung}$ ) dihitung dengan rumus (Wahyudi et al., 2023)

$$X^2_{Hitung} = \sum \left( \frac{Dm - Do}{Do} \right)^2 \quad (2.15)$$

Keterangan :  $X^2_{Hitung}$  : Uji chi-square  
 Dm : Karbon hasil pendugaan (Model)  
 Do : Karbon hasil pengukuran Lapangan

**Root Mean Square Error (RMSE).** *Root Mean Square Error* (RMSE) digunakan untuk menilai perbedaan kinerja model antara periode kalibrasi dan validasi, sekaligus membandingkan kinerja berbagai model prediksi. *Root Mean Square Error* (RMSE) adalah ukuran tingkat kesalahan dalam hasil prediksi. Semakin mendekati nol nilai RMSE, maka hasil prediksi dianggap semakin akurat. Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dihitung dengan rumus (Rhamadhani & Saputri, 2023).

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum \left( \frac{Dm - Do}{Do} \right)^2}}{n} \times 100 \quad (2.16)$$

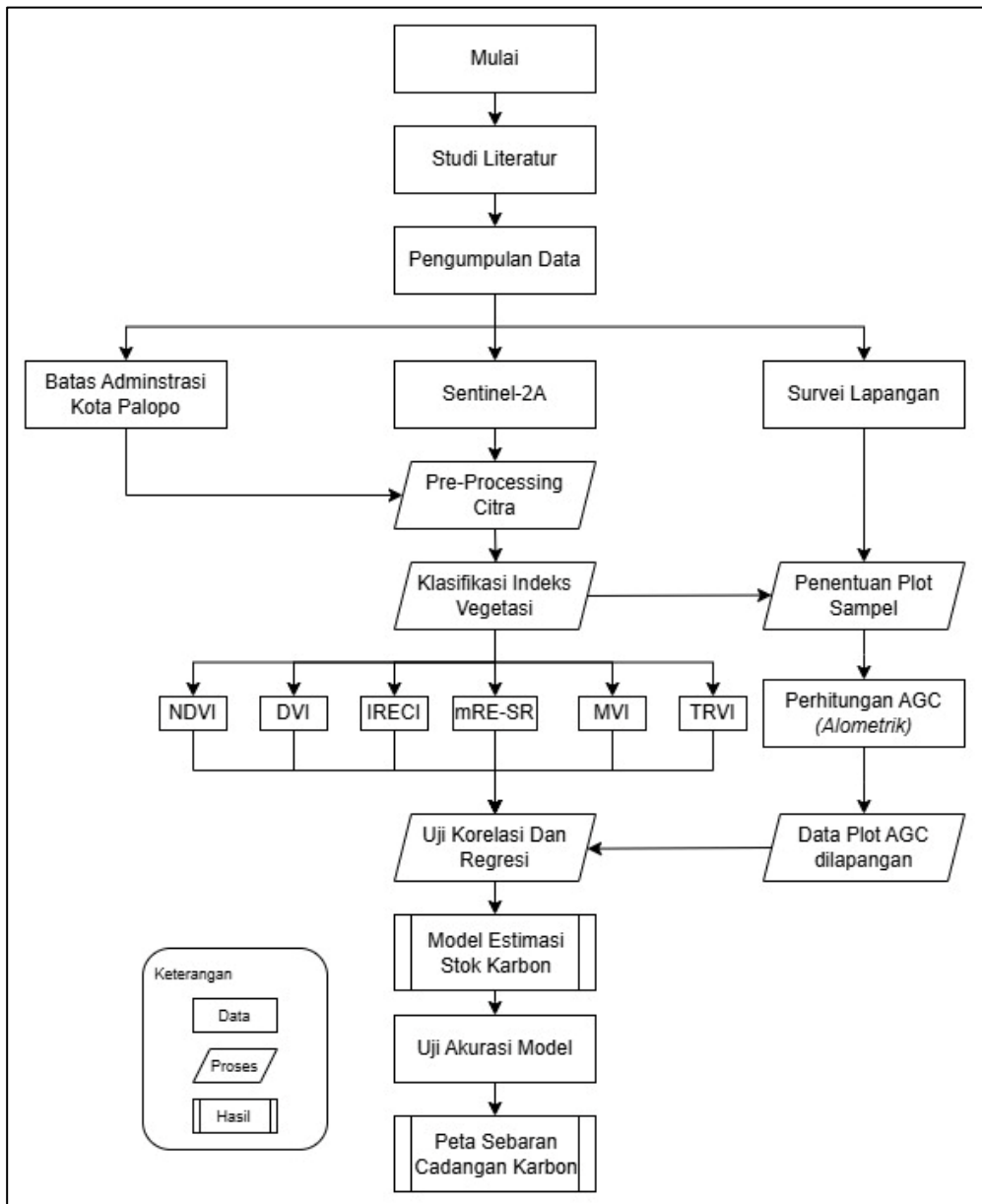
Keterangan : RMSE : *Root Mean Square Error*  
 Dm : Karbon hasil pendugaan (Model)  
 Do : Karbon hasil pengukuran Lapangan  
 n : Jumlah titik sampel

## 2.5 Pembuatan Peta Sebaran Stok Karbon

Pembuatan peta sebaran stok karbon dilakukan melalui serangkaian tahap yang memanfaatkan teknologi pemetaan dan analisis geospasial. Tahap awal melibatkan pengolahan serta analisis data menggunakan model regresi terbaik dengan bantuan Platform *Google Earth Engine* (GEE). Hasil analisis dari *Google Earth Engine* kemudian diproyeksikan ke dalam peta sebaran stok karbon menggunakan Software ArcGIS. ArcGIS berperan dalam menyusun layout peta secara lebih terstruktur dengan mencakup elemen-elemen penting seperti skala peta, legenda, arah mata angin, serta informasi geografis lainnya. Pada tahap ini, peta yang dihasilkan tidak hanya menampilkan distribusi stok karbon di wilayah penelitian, tetapi juga memberikan gambaran rinci mengenai variasi stok karbon di berbagai area berdasarkan hasil model yang digunakan.

## 2.6 Alur Penelitian

Untuk tahapan pelaksanaan penelitian dapat dilihat secara seperti pada **Gambar 12**.



**Gambar 12.** Diagram Alur Tahapan Penelitian