

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, dunia dihadapkan pada isu yang semakin mencolok yaitu perdagangan karbon. Isu ini muncul sebagai *respons* terhadap tantangan perubahan iklim yang semakin mendesak, di mana emisi gas rumah kaca, terutama karbondioksida, terus meningkat. Perdagangan karbon menjadi salah satu mekanisme yang diharapkan dapat membantu negara-negara mencapai target pengurangan emisi secara efektif dan berkelanjutan.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2023 Pasal 1 Ayat (1) menjelaskan bahwa Perdagangan Emisi Karbon adalah mekanisme berbasis pasar yang bertujuan mengurangi jumlah emisi gas rumah kaca (GRK) melalui kegiatan jual beli unit karbon. Perdagangan adalah aktivitas jual beli barang atau jasa yang bertujuan mencapai kesepakatan dan keuntungan bagi kedua belah pihak tanpa mengubah sifat atau bentuknya. Di sisi lain, emisi karbon adalah kondisi yang dihasilkan dari aktivitas manusia, seperti pembakaran bahan bakar, penggunaan perangkat elektronik, dan operasi pembangkit listrik, yang menyebabkan pelepasan karbondioksida ke atmosfer. Dengan demikian, perdagangan emisi karbon adalah aktivitas jual beli sertifikat kredit karbon, di mana yang diperdagangkan bukanlah karbon atau gas polutan itu sendiri, tetapi usaha untuk mengendalikan atau mengurangi emisi karbon melalui sertifikat kredit karbon. Aktivitas ini merupakan salah satu cara untuk mengurangi dampak negatif perubahan iklim (Ammara et al., 2024).

Perubahan iklim merupakan isu global yang dampaknya dapat dirasakan oleh seluruh masyarakat di dunia. Perubahan iklim ini disebabkan oleh peningkatan emisi karbon di atmosfer yang selanjutnya dapat mengakibatkan pemanasan global atau efek rumah kaca (Safitri et al., 2023). Menurut laporan pemantauan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), temperatur bumi meningkat sebesar 0.5°C selama abad 20 dan diperkirakan akan meningkat sekitar 1,5-5,8°C pada tahun 2100 (Adinatha & Arif, 2022).

Efek rumah kaca merupakan suatu kondisi dimana konsentrasi gas bumi mengalami peningkatan dari biasanya. *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) menyebutkan bahwa terdapat enam jenis gas yang termasuk dalam kategori gas rumah kaca (GRK), yaitu; Karbon Dioksida (CO₂), Dinitro Oksida (N₂O), Metana (CH₄), Sulfurheksaflorida (SF₆), Perflorokarbon (PFCS) dan Hidroflorokarbon (HFCs), hal ini menyebabkan meningkatnya suhu bumi. (Irma & Gusmira, 2024). Peningkatan suhu bumi terjadi karena adanya aktivitas manusia berupa penggunaan bahan bakar fosil, penggundulan hutan, perubahan tata guna lahan dan hutan serta aktivitas pertanian atau konversi kawasan hutan menjadi non hutan. Pemanasan global akan memberikan dampak negatif berupa terjadinya perubahan iklim secara drastis, gangguan ekosistem dan kenaikan permukaan laut (Mustikaningrum et al., 2021).

Salah satu bagian bumi yang dapat membantu menurunkan gas rumah kaca terkhusus karbondioksida yaitu ekosistem hutan. Hutan adalah sumber daya alam yang sangat penting dan memberikan manfaat besar bagi kehidupan, baik secara langsung maupun tidak langsung. Hutan di Indonesia memiliki peran penting dalam penyimpanan karbon dan mengurangi efek rumah kaca melalui peningkatan jumlah serapan CO₂ oleh

vegetasi di dalam hutan. Tegakan hutan memiliki kemampuan untuk menyimpan karbon dioksida dan mengurangi efek pemanasan global, serta membantu menjaga ketersediaan udara (Safitri, et al., 2023).

Melalui proses fotosintesis tumbuhan dapat menyerap gas karbondioksida di atmosfer. Hutan memiliki kapasitas menyimpan karbon (C) tertinggi dibandingkan dengan Sistem Penggunaan Lahan (SPL), karena keanekaragaman pohon yang tinggi serta keberadaan tumbuhan bawah dan serasah yang banyak di permukaan tanah. Melalui fotosintesis, tanaman menyerap CO_2 dari udara dan mengubahnya menjadi karbohidrat yang kemudian didistribusikan ke seluruh bagian tanaman dan akhirnya disimpan dalam bentuk daun, batang, ranting, bunga, dan buah. Kandungan karbon yang tersimpan dapat dihitung berdasarkan jumlah biomassa vegetasi yang ada pada lahan tertentu (Azizah et al., 2019).

Biomassa merupakan berat jenis bahan organik organisme per satuan unit area (Appi' et al., 2019). Biomassa diartikan sebagai total jumlah materi hidup di atas permukaan pohon, dinyatakan dalam satuan ton berat kering per satuan luas (Brown, 1997). Biomassa hutan bisa digunakan untuk memperkirakan potensi serapan karbon dalam vegetasi hutan karena 47% dari biomassa terdiri dari karbon (Brown, 1997). Menghitung biomassa merupakan satu langkah penting yang perlu diketahui dan dilakukan dalam kegiatan atau proyek mitigasi perubahan iklim di sektor kehutanan. Hanya kegiatan yang berupa substitusi karbon yang tidak membutuhkan penghitungan biomassa. Jenis kegiatan lain seperti pencegahan deforestasi, pengelolaan hutan tanaman, dan agroforestri memerlukan penghitungan biomassa (Kristiawan, 2021). Cadangan karbon adalah jumlah karbon yang tersimpan di permukaan tanah sebagai biomassa tanaman, sisa tanaman mati (nekromassa), serta dalam tanah sebagai bahan organik. Perubahan bentuk karbon ini menjadi dasar untuk menghitung suatu emisi, di mana sebagian besar unsur karbon (C) yang terurai ke udara biasanya berikatan dengan O_2 (oksigen) dan membentuk CO_2 (karbon dioksida) (Nuruddin, 2019).

Hutan tanaman mampu menyerap CO_2 dari udara dan menyimpannya dalam biomassa hutan, sehingga hutan mempunyai peran dalam upaya menstabilkan konsentrasi CO_2 di atmosfer, hal ini sering disebut dengan program *carbon sink* (Rahayu et al., 2013). Pohon membantu menstabilkan kadar CO_2 di atmosfer dengan menyerap CO_2 dan menyimpannya dalam bentuk biomassa saat mereka tumbuh.

Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Borisallo merupakan salah satu hutan tanaman yang dikelola oleh Balai Penerapan Standar Instrumen Lingkungan Hidup dan Kehutanan (BPSILHK) Makassar yang diperuntukkan untuk penelitian, pendidikan, wisata, konservasi dan fungsi produksi dengan luas mencai 180 ha. KHDTK Borisallo terletak di Kelurahan Bonto Parang, Kecamatan ParangLoe, Kabupaten Gowa yang di dominasi oleh tanaman *Eucalyptus deglupta* dan beberapa tanaman kehutanan lainnya berupa Gmelina (*Gmelina arborea*) dan akasia (*Acacia mangium*). Selain berfungsi sebagai tepat penelitian, KHDTK juga diharapkan mampu berkontribusi dalam penyerapan karbon.

KHDTK Borisallo saat ini menghadapi berbagai permasalahan signifikan, terutama konflik lahan antara pengelola kawasan dan masyarakat setempat. Konflik ini sering kali mengakibatkan perubahan dalam penggunaan lahan yang tidak sesuai dengan fungsi hutan, sehingga memicu kegiatan yang merusak, seperti kebakaran lahan dan hutan.

Selain itu, penggembalaan ternak secara liar dan penebangan pohon ilegal semakin memperburuk kondisi ekosistem, mengurangi kualitas dan luas hutan, serta menghilangkan vegetasi yang penting untuk penyerapan karbon (Balai Penerapan Standar Instrumen Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Makassar, 2023).

Dalam konteks ini, penelitian karbon menjadi sangat penting untuk menilai kapasitas penyimpanan karbon hutan yang tersisa dan merancang strategi pengelolaan yang dapat meningkatkan fungsi ekologi kawasan. Melibatkan masyarakat dalam penelitian dan pengelolaan tidak hanya akan membantu menjaga kelestarian hutan, tetapi juga menciptakan kesadaran dan komitmen bersama untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat tanpa merusak lingkungan. Dengan pendekatan yang kolaboratif, diharapkan solusi yang berkelanjutan dapat ditemukan untuk mengatasi permasalahan yang ada di KHDTK Borisallo (Balai Penerapan Standar Instrumen Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Makassar, 2023).

Untuk mengetahui besarnya stok karbon yang tersimpan pada suatu tegakan, diperlukan menghitung cadangan karbon. Namun menghitung cadangan karbon pada area yang luas akan memerlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit jika dilakukan secara langsung di lapangan. Oleh karena itu, dipermudah dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh (Andini et al., 2018). Salah satu teknologi penginderaan jauh yang saat ini baik digunakan dalam mengestimasi cadangan karbon yaitu dengan penggunaan satelit citra Sentinel-2 dengan memanfaatkan indeks vegetasi *Normalized Difference Vegetation Indeks* (NDVI) memungkinkan penghitungan stok karbon yang lebih cepat, efisien, dan akurat, dibandingkan metode survei lapangan. Citra sentinel-2 sendiri memiliki resolusi yang lebih baik dengan ukuran piksel 10 meter × 10 meter, citra yang dihasilkan oleh sentinel-2 menawarkan detail yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya dan kecepatannya lebih tinggi sedangkan NDVI digunakan sebagai indikator vegetasi (Rakhmawati, 2012).

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) adalah kombinasi matematis antara band merah (red) dan saluran inframerah dekat (NIR) pada citra satelit, yang telah lama digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan dan kondisi vegetasi. Namun, penggunaan indeks vegetasi saja tidak cukup untuk mengetahui sebaran biomassa hutan tanaman. Dibutuhkan model yang dapat menggambarkan pertumbuhan tanaman dan melibatkan NDVI sebagai variabel yang mewakili nilai vegetasi. Dengan metode ini memungkinkan penilaian cadangan karbon dapat dilakukan lebih cepat dan efisien dibandingkan survei secara langsung di lapangan (Fahlevi & Soni, 2020).

NDVI merupakan metode analisis citra yang digunakan untuk mengukur seberapa hijau suatu area. Nilai NDVI memberikan informasi tentang tingkat kehijauan pada daun, dengan menggunakan panjang gelombang inframerah yang sangat efektif untuk mengidentifikasi area vegetasi. Klorofil memiliki sifat optik yang unik, di mana klorofil menyerap cahaya merah dan memantulkan cahaya inframerah dengan sangat baik. NDVI dapat menunjukkan berbagai parameter yang terkait dengan vegetasi, seperti biomassa daun hijau dan luas area yang ditutupi daun hijau, yang berguna untuk membedakan jenis vegetasi. Secara umum, NDVI menghitung seberapa banyak tanaman, terutama daun, menyerap radiasi matahari (Freddy et al., 2015).

NDVI telah terbukti menjadi indeks yang unggul dalam estimasi cadangan karbon dibandingkan dengan indeks vegetasi lainnya. Penelitian oleh Jaya et al. (2019)

menunjukkan bahwa NDVI menghasilkan nilai korelasi tertinggi dalam menentukan stok karbon, dengan nilai R^2 mencapai 0,52 dan akurasi sebesar 83,73%. Selain itu, Yin et al. (2012) juga menegaskan bahwa NDVI memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan kerapatan tajuk vegetasi, menjadikannya lebih efektif dibandingkan dengan indeks vegetasi lainnya dalam konteks pengukuran cadangan karbon.

Dengan teknologi penginderaan jauh dan model alometrik (hubungan matematis) untuk menghitung biomassa, diperlukan perangkat lunak yang dapat mempermudah pengolahan data citra menjadi estimasi biomassa. Salah satu teknologi yang berkembang dalam bidang penginderaan jauh adalah *Google Earth Engine* (GEE). GEE adalah platform berbasis *cloud* untuk analisis data lingkungan skala global. Tujuan GEE adalah untuk membantu mengatasi tantangan global yang melibatkan kumpulan data geospasial yang besar serta dalam hal pengamatan perubahan yang terjadi di permukaan bumi (Fahlevi & Soni, 2020).

Google Earth Engine (GEE) tidak hanya menyediakan data mentah, tetapi juga data yang telah diolah. Selain itu, GEE menyertakan informasi metadata dan contoh-contoh *Application Programming Interface* (API) yang memudahkan pengguna dalam pengolahan data menggunakan bahasa pemrograman *JavaScript* (Nugroho et al., 2019). Pengolahan di GEE sangat praktis dan memungkinkan pengguna untuk memperoleh citra yang bebas dari awan. GEE juga dilengkapi dengan berbagai metode pembelajaran mesin, seperti *Random Forest* dan *Classification and Regression Trees*, yang berguna untuk analisis citra. Selain itu, *Google Earth Engine* dapat dimanfaatkan untuk memantau perubahan vegetasi secara efektif. Dengan semua fitur ini, GEE mempermudah dan meningkatkan efisiensi dalam memprediksi biomassa dan karbon (Fariz et al., 2021).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengestimasi potensi biomassa di atas permukaan tanah, mengetahui model pendugaan cadangan karbon dan memprediksi cadangan karbon pada tahun 2024 di Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Borisallo yang diharapkan menjadi basis data terbaru terkait stok karbon pada kawasan tersebut.

1.2 Tujuan dan Kegunaan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Mengestimasi potensi biomassa di atas permukaan tanah,
- 2) Mengetahui model pendugaan cadangan karbon,
- 3) Memprediksi cadangan karbon di atas permukaan tanah di KHDTK Borisallo pada tahun 2024

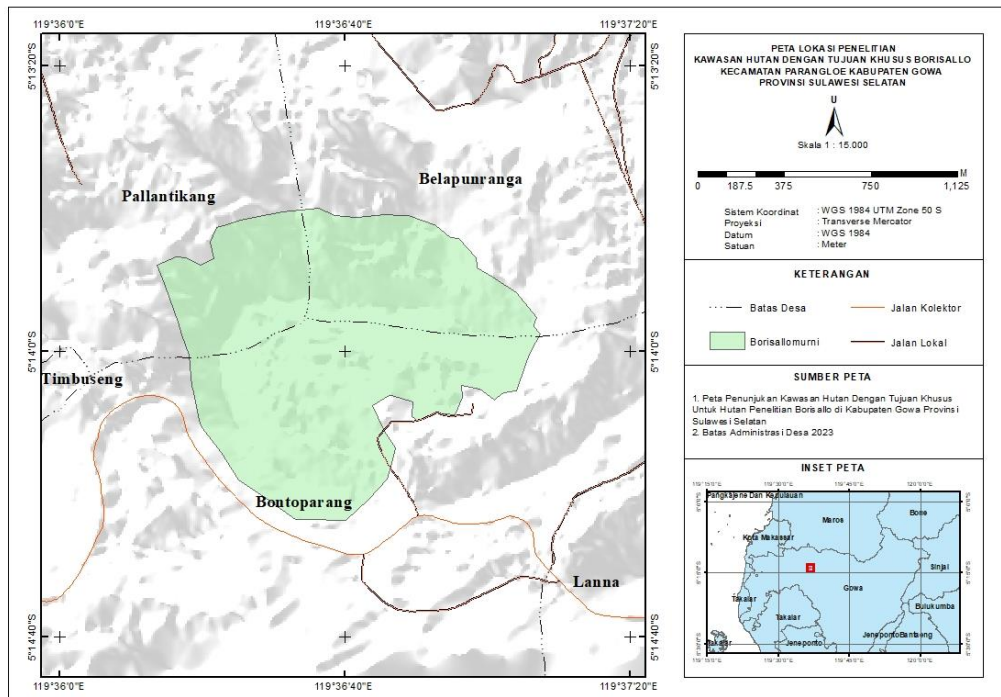
Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi basis data terbaru terkait stok karbon pada Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Borisallo Gowa yang dapat berguna bagi pihak pengelola untuk pengembangan KHDTK Borisallo kedepannya serta dapat menjadi salah satu referensi metode yang dapat digunakan pada lokasi yang lebih luas.

BAB II

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Juli 2024 - Maret 2025 dengan melalui dua tahapan, yakni pengambilan data di lapangan dan analisis data. Pengambilan data lapangan dilakukan pada bulan Oktober 2024 di Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Borisallo dan analisis data dilakukan pada bulan November 2024 – Maret 2025 di Laboratorium Perencanaan dan Sistem Informasi Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Universitas Hasanuddin. 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 sebagai berikut:

- 1) Laptop (Spesifikasi Ryzen 5, RAM 8.00 GB, SSD 512 GB) yang dilengkapi dengan perangkat lunak Arcgis yang digunakan untuk menjalankan program/aplikasi.
- 2) Aplikasi Mobile GPS, digunakan untuk mencari titik di lapangan
- 3) Handphone, digunakan untuk mendokumentasikan kegiatan
- 4) Pita ukur, digunakan untuk mengukur diameter pohon
- 5) *Hagameter*, digunakan untuk mengukur sudut kemiringan pohon
- 6) Platform *Google Earth Engine* digunakan untuk mengolah data citra sentinel-2, analisis NDVI dan karbon.
- 7) Microsoft Office untuk mengolah data statistik.

2.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Bahan Penelitian

No.	Judul	Kegunaan	Sumber
1.	Peta Administrasi Kab. Gowa	Untuk mengetahui batas lokasi penelitian	Badan Informasi Geospasial (https://tanahair.indonesia.go.id/unduh-rbi/#/)
2.	Batas administrasi KHDTK Borisallo Kab. Gowa	Untuk mengetahui batas lokasi penelitian dan sebagai bahan analisis untuk membuat peta cadangan karbon	SK:362/MENLHK/SETJEN/PLA.0/5/2019 tanggal 28 Mei 2019).
3.	Citra Sentinel-2A Level Rekaman Tahun 2024 (21/08/2024)	Sebagai bahan analisis untuk membuat peta cadangan karbon	Diakses langsung pada platform <i>Google Earth Engine</i> (https://code.earthengine.google.com/4e428893bf78bc9bd09c4e724b4c69)
4.	<i>Tally Sheet</i>	Untuk mempermudah pada saat pengambilan data dan sebagai lembar perhitungan	<i>Tally sheet</i> inventarisasi
5.	Data Hasil Inventarisasi KHDTK Borisallo meliputi: bagian dimensi dari pohon yaitu DBH (<i>Diameter Breast Height</i>) dan tinggi pohon	Sebagai bahan analisis model regresi untuk membuat peta cadangan karbon	Hasil Pengukuran di Lapangan

2.3 Prosedur Penelitian

Mekanisme penelitian yang dilakukan untuk perhitungan kandungan cadangan/stok karbon di atas permukaan tanah meliputi: pengolahan citra melalui platform *Google Earth Engine* (GEE), transformasi NDVI melalui *Google Earth Engine* (GEE), pengambilan data lapangan, estimasi biomassa dan stok karbon lapangan, melakukan uji korelasi, membuat model regresi dan uji model terbaik serta pemetaan cadangan karbon.

2.3.1 Persiapan dan Pengolahan Citra

Tahap awal pada penelitian ini dilakukan dengan persiapan data yang akan digunakan. Adapun data yang dikumpulkan berupa data batas administrasi KHDTK Borisallo dan data batas administrasi Kab. Gowa. Selanjutnya penyiapan data citra yang akan digunakan. Citra yang digunakan pada penelitian ini yaitu citra sentinel-2 yang diunduh melalui platform *Google Earth Engine*. Citra Sentinel-2 menghasilkan citra optik multispektral dengan 13 kanal yang mencakup spektrum yang terlihat, inframerah dekat, dan inframerah jarak pendek. Spesifikasi citra Sentinel-2 dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Spesifikasi citra sentinel-2

Spektrum	Band	Panjang Gelombang (μm)	Resolusi spasial (m)
<i>Coastal and Aerosol</i>	1	0.443	60
<i>Blue</i>	2	0.490	10
<i>Green</i>	3	0.560	10
<i>Red</i>	4	0.665	10
<i>Vegetation Red Edge1</i>	5	0.705	20
<i>Vegetation Red Edge2</i>	6	0.740	20
<i>Vegetation Red Edge3</i>	7	0.783	20
<i>NIR</i>	8	0.842	10
<i>Vegetation Red Edge4</i>	8A	0.865	20
<i>Water Vapour</i>	9	0.945	60
<i>SWIR - Cirrus</i>	10	1.375	60
<i>SWIR1</i>	11	1.610	20
<i>SWIR2</i>	12	2.190	20

Sumber: (Dharma et al., 2022)

Pengunduhan citra Sentinel-2 dilakukan melalui platform *Google Earth Engine* dengan melakukan *Cloud Masking*. *Cloud Masking* dilakukan untuk menghapus awan dari gambar satelit yang dimana awan dapat menghalangi fitur permukaan bumi dan membuat analisis gambar menjadi sulit.

Pada proses penghapusan awan (cloud masking) menggunakan band QA60 yang dikenal dengan *Quality Assessment (QA) band* yang berisi informasi tentang kualitas data citra, termasuk informasi mengenai keberadaan dan bayangan awan. Selanjutnya pemilihan bitmask yakni bit ke-10 yang akan menandai piksel yang mengandung awan, jika bit ke-10 ini bernilai 1 maka piksel tersebut mengandung awan. Untuk bitmask ke-11 digunakan untuk menandai bayangan awan dan jika nilainya 1 maka pikselnya mengandung bayangan awan. Kemudian *return image* yang mengembalikan dan mengganti nilai piksel yang mengandung awan dan bayangan awan pada citra. Algoritma image mosaic dan cloud masking dapat dilihat pada **Gambar 2**.

```
// ***** 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));

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

Gambar 2. Algoritma *image mosaic* dan *cloud masking* citra sentinel-2

Citra satelit sentinel-2 yang telah diolah kemudian diunduh. Pada proses dilakukan dengan membuat dan menyimpan objek koleksi citra dengan menyediakan citra yang telah melalui tahap harmonisasi dan kalibrasi dengan tujuan menyeragamkan spasial dan temporalnya. Selanjutnya memfilter citra sentinel-2 yang akan digunakan dengan menentukan rentang waktu yakni 2024-08-01 hingga 2024-08-31 yang dilanjutkan dengan memilih citra dengan persentase tutupan awan kurang dari 20%. Dari rentang tersebut kemudian dipilih satu tanggal pemotretan yang tidak memiliki awan yaitu pada tanggal 21-08-2024 Kemudian memotong citra sesuai dengan batas wilayah yang ditentukan.

```

// ***** 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(table)
.sort('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', true)

print(sentinel2)
var single =
ee.Image('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20240821T022321_20240821T
022708_T50MQV')
    .multiply(0.0001)
    .clip(table)

var visualisasiS2 = {
  min:0,
  max:0.4,
  gamma:1.2,
  bands: ['B4','B3','B2']
};

Map.addLayer(single, visualisasiS2, 'True_Color')

var NDVI = single.normalizedDifference(['B8','B4']).rename('NDVI');

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, 'NDVI')

```

Gambar 3. Algoritma *filter image* citra Sentinel-2

2.3.2 Transformasi Indeks Vegetasi

Pada penelitian ini menggunakan indeks vegetasi yang nantinya akan dikorelasikan dengan hasil pengukuran dilapangan. Transformasi indeks vegetasi dilakukan

berdasarkan metode *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Adapun rumus NDVI sebagai berikut (Putri et al., 2021) :

$$NDVI = \frac{Band\ 8 - Band\ 4}{Band\ 8 + Band\ 4}$$

Keterangan :

Band 8 = infra-merah dekat

Band 4 = merah

NDVI berkisar antara -1 sampai 1, NDVI = -1 berarti air (makin negatif makin dalam), NDVI = 0 berarti tanah gundul dan NDVI = 1 berarti hijau (lebat).

Algoritma ini mengukur seberapa banyak cahaya yang dipantulkan oleh tanaman dengan membandingkan cahaya yang dipantulkan pada dua panjang gelombang, yaitu merah dan infra-merah dekat. Semakin tinggi nilainya, semakin hijaunya daerah tersebut.

```
//*****Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*****

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');

Map.addLayer(Borisallo);
```

Gambar 4. Algoritma Transformasi *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI)

Citra sentinel-2 yang telah ditransformasikan ke indeks vegetasi NDVI (*Normalized Difference Vegetation Indeks*) kemudian diekspor ke *google drive* dengan skala 20 yang berarti setiap piksel pada citra tersebut akan mewakili 20 m persegi di permukaan bumi.

```
//*****Export Image*****

Export.image.toDrive({
  image: NDVI,
  description: 'NDVI_20240821',
  folder: 'GEE',
  region: table,
  scale: 20,
});
```

Gambar 5. Algoritma pengunduhan Citra

Citra yang telah dihitung NDVI nya kemudian dikasifikasikan pada software ArcGIS berdasarkan suatu ketentuan. Pada penelitian ini kerapatan vegetasi pada hutan

tanaman KHDTK Borisallo diklasifikasikan menjadi lima kategori, yang diuraikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Kelas NDVI

Kelas	Kerapatan Vegetasi	Keterangan
1	-1 s/d – 0,12	Lahan Tidak Bervegetasi
2	-0,12 s/d 0,22	Vegetasi Sangat Rendah
3	0,22 s/d 0,42	Vegetasi Rendah
4	0,42 s/d 0,72	Vegetasi Sedang
5	0,72 s/d 1,00	Vegetasi Tinggi

Sumber: (Marlina, 2022)

2.3.3 Pengambilan Data Lapangan

Pada penelitian ini menggunakan metode *purposive sampling* dengan alokasi proporsional untuk tiap kelas, yang mana merupakan teknik pengambilan sampel berdasarkan pertimbangan tertentu. Sugiyono (2019) menjelaskan bahwa *purposive sampling* adalah metode dimana sampel dipilih berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan sebelumnya oleh peneliti, yang berarti pemilihan sampel didasarkan pada pertimbangan yang spesifik. Pertimbangan pada penentuan sampling yaitu berdasarkan tingkat kelas kerapatan pada KHDTK Borisallo.

Ukuran plot yang digunakan mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) 7724:2011 yaitu 20 x 20 meter. Penentuan jumlah sampel yang diambil disesuaikan dengan skala peta yang digunakan. Jumlah titik sampel tertera pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Jumlah titik sampel berdasarkan skala peta yang digunakan

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

Penentuan jumlah titik sampel disesuaikan dengan skala pemetaan, hutan tanaman di KHDTK Borisallo dengan skala pemetaan 1 : 25.000 dengan Total Sampel Minimal (TSM), yaitu 51. Dari jumlah sampel tersebut 31 diantaranya digunakan untuk membangun model dan 20 lainnya digunakan untuk validator, peta sebaran titik sampel dapat dilihat pada **Gambar 6**. Pengambilan data di lapangan melibatkan pengumpulan informasi tentang dimensi pohon (diameter setinggi dada atau *Diameter Breast Height* (DBH) dan tinggi pohon untuk memperkirakan volume pohon dalam suatu area), jenis pohon, serta jumlah pohon. DBH diukur pada ketinggian 1,3 meter di atas tanah sesuai standar pengukuran lapangan dengan ukuran >10 cm, sementara tinggi pohon diukur menggunakan *Abney Level*.

Penentuan plot sampling dilakukan berdasarkan kelas NDVI yang dikelompokkan menjadi lima kelas. Untuk menentukan jumlah plot sampling yang dialokasikan pada masing-masing kelas NDVI, digunakan metode alokasi proporsional. Metode ini,

sebagaimana dijelaskan oleh Demokrawati & Fiqa (2014), bekerja dengan cara menyesuaikan ukuran sampel setiap stratum (dalam hal ini, kelas NDVI) dengan proporsi luasannya terhadap total area penelitian.

$$n_i = \frac{N_i}{N} \times n \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

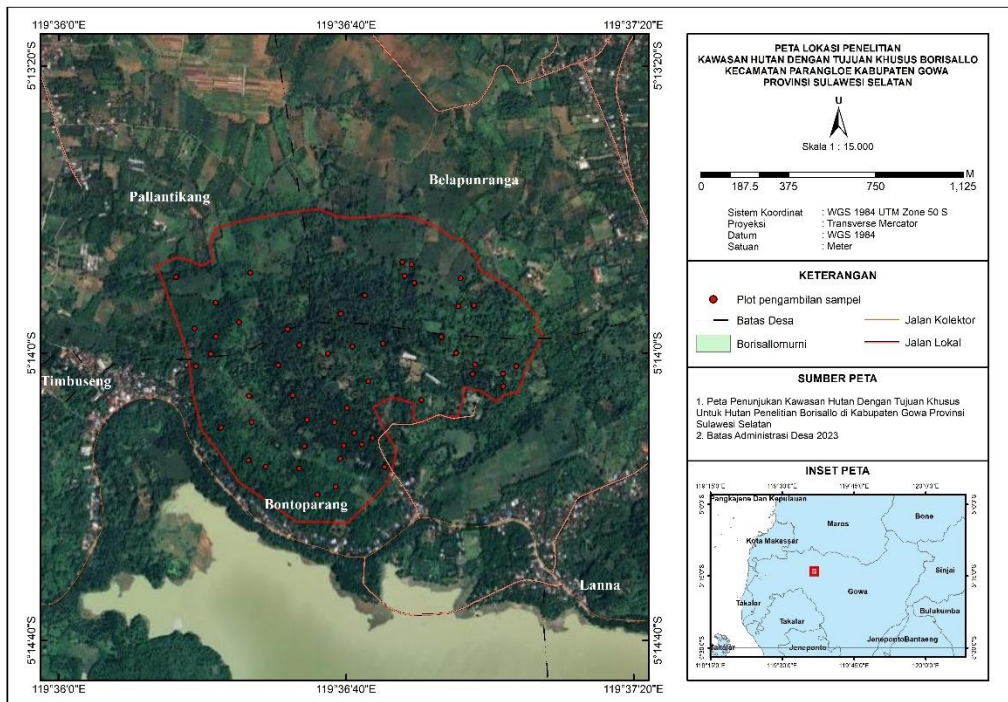
- n_i = Jumlah plot masing-masing kelas kerapatan
- N_i = Luas kelas kerapatan
- N = Luas wilayah kajian
- n = Total plot sampling

Dengan demikian, diharapkan sampel yang diperoleh dapat secara representatif menggambarkan variasi kelas NDVI yang ada. Pembagian jumlah plot untuk masing-masing kelas dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Jumlah Plot Sampling Berdasarkan Kelas Kerapatan Vegetasi

No	Keterangan	Luas (ha)	Persentase %	Jumlah Plot
1	Lahan Tidak Bervegetasi	0.03	0.02	0
2	Kerapatan Sangat Rendah	0.15	0.11	0
3	Kerapatan Rendah	4.81	3.41	3
4	Kerapatan Sedang	43.65	30.82	15
5	Kerapatan Tinggi	93.00	65.65	33
TOTAL		141.66	100	51

Alokasi 51 plot sampling menunjukkan variasi yang signifikan antar kelas kerapatan vegetasi. Lahan tidak bervegetasi dan kerapatan sangat rendah tidak mendapatkan alokasi plot, sementara area dengan kerapatan rendah, sedang, dan tinggi masing-masing dialokasikan 3, 15, dan 33 plot.



Gambar 6. Peta Sebaran Plot Pengambilan Sampel Penelitian

2.4 Analisis Data

2.4.1 Perhitungan Biomassa Tanaman

Untuk memperkirakan jumlah biomassa pada pohon di hutan hujan tropis, dapat menggunakan rumus allometrik (Chave et al., 2014). Dalam hal ini, kita dapat memilih dari dua rumus yaitu jika tersedia data tinggi dan jika tidak tersedia data tinggi. Jika tersedia data tinggi, maka persamaan allometrik sebagai berikut:

$$AGBest = 0,0673 \times (\rho D^2 H)^{0,976} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan: AGBest = Perkiraan biomassa atas permukaan (kg)

ρ = berat jenis (g/cm^3)

D = diameter dbh (cm)

H = Tinggi total (m)

Tabel 6. Berat Jenis Tanaman

Spesies	Berat jenis (g/cm^3)	Sumber
<i>Eucalyptus deglupta</i>	0,89	
<i>Gmelina arborea</i>	0,44	Mulyana et al., 2011
<i>Acacia mangium</i>	0,63	
<i>Swietenia mahagoni</i>	0.61	Pratiwi, 2003
<i>Diospyros celebica</i>	0.78	Bakri., 2008
<i>Mangifera indica</i>	0.64	Wijayanto et al., 2020

<i>Nephelium lappaceum</i>	0.91	Wijayanto et al., 2020
<i>Ceiba pentandra</i>	0,40	Prakosa et al., 2020
<i>Alstonia scholaris</i>	0.36	Rizki et al., 2022
<i>Artocarpus heterophyllus</i>	0.55	Rini et al., 2019
<i>Neolamarckia cadamba</i>	0.37	Widiyanto & Siarudin, 2016
<i>Vitex cofassus</i>	0.63	Aryadi et al., 2023
<i>Ficus Benjamin</i>	0.58	Krisdianto & Balfas., 2016
<i>Sandoricum koetjape</i>	0.52	Burhanuddin et al., 2016
<i>Senna siamea</i>	0.84	
<i>Tamarindus indica</i>	0.87	
<i>Aleurites moluccanus</i>	0.53	Nusantoro, 2021
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	0.35	

2.4.2 Perhitungan Cadangan Karbon

Menurut Badan Standardisasi Nasional (2011), sekitar 47% dari total biomassa vegetasi hutan terdiri dari karbon. Cara menghitung jumlah karbon dapat dilakukan dengan menggunakan rumus yang telah ditetapkan:

$$\text{Karbon C} = \text{AGB} \times 47\% \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan: C = Kandungan karbon (kg)
AG = Biomassa di atas permukaan tanah (kg/pohon)
47% = Faktor konversi standar internasional untuk pendugaan karbon

2.4.3 Perhitungan Cadangan Karbon Per Hektar

Berdasarkan (SNI 7724:2011) Penghitungan cadangan karbon perhektar dalam plot untuk biomassa diatas permukaan tanah dapat menggunakan persamaan berikut:

$$C_n = \frac{C}{1000} \times \frac{10000}{L_{\text{plot}}} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan: Cn = Kandungan karbon per hektar pada tiap plot (ton/ha)
C = Kandungan karbon dari biomassa pada tiap plot (kg/pohon)
Lplot = Luas per plot (m²)

2.4.4 Analisis Korelasi dan Regresi

Dalam analisis ini, digunakan dua metode statistik utama analisis korelasi dan analisis regresi. Analisis korelasi berguna untuk mengevaluasi seberapa erat hubungan antara variabel, dimana variabel terikatnya adalah biomassa lapangan (dalam ton) dan variabel bebasnya adalah data penginderaan jauh, yang diwakili oleh *Digital Number* (DN) indeks vegetasi NDVI. Data yang dihasilkan dari penginderaan jauh ini kemudian dikorelasikan dengan biomassa dan stok karbon di plot sampel. Nilai korelasi vegetasi yang paling kuat kemudian digunakan untuk memperkirakan biomassa dan stok karbon di lokasi penelitian. Analisis korelasi digunakan untuk menentukan seberapa dekat hubungan

antara dua variabel, dengan nilai korelasi berkisar dari 0 hingga 1. Nilai koefisien korelasi (R) dapat diketahui dengan rumus berikut (Karmila et al., 2020).

$$R = \frac{(n\sum x.lny) - (\sum x)(\ln \sum y)}{\sqrt{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n\sum \ln y^2 - (\sum \ln y)^2}} \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan: R = Koefisien korelasi
n = Jumlah plot sampel
x = *Digital Number* (DN) NDVI
y = Nilai karbon

Tabel 7. Penafsiran Koefisien Korelasi

No.	Nilai Koefisien Korelasi	Keterangan
1	0 - <0,2	Hubungannya yang sangat kecil dan bisa dianggap tidak ada korelasi
2	≥0,2 - <0,4	Hubungannya yang kecil/tidak erat
3	≥0,4 - <0,7	Hubungannya yang moderat/sedang
4	≥0,7 - <0,9	Hubungannya yang erat
5	≥0,9 - <1	Hubungannya yang sangat erat

Sumber: (Kurniawan & Budi, 2016)

Analisis regresi digunakan untuk menilai seberapa efektif variabel independen (bebas) bisa menjelaskan variabel dependen (terikat). Disini, variabel independen merujuk pada nilai indeks vegetasi, sementara variabel dependennya adalah jumlah karbon di setiap sampel. Model regresi yang digunakan dalam penelitian adalah:

1. Linear $Y = a + bX \dots\dots\dots(6)$

2. Eksponensial $Y = ae^{bx} \dots\dots\dots(7)$

3. Logaritmik $\log Y = a + b \ln X \dots\dots\dots(8)$

4. Polynominal $Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + \dots + b_nX^n \dots\dots\dots(9)$

5. Eksponensial kuadratik $Y = e^{(b_0+b_1X+b_2X^2)} \dots\dots\dots(10)$

Keterangan: Y = variabel terikat/biomassa (ton)
X = variabel bebas/nilai indeks vegetasi
a, b = nilai konstanta/koefisien

Dalam menentukan model regresi terbaik untuk setiap jenis indeks vegetasi, dilakukan dengan membandingkan nilai koefisien korelasi (R) dan koefisien determinasi (R_2). Semakin tinggi nilai R_2 , semakin baik model prediksi dalam penelitian. Uji ini dilakukan untuk mengetahui dan memprediksi seberapa besar kontribusi variabel independen terhadap variabel dependen. Nilai koefisien determinasi berkisar antara 0 hingga 1. Jika mendekati 1, variabel independen hampir sepenuhnya dapat memprediksi variabel dependen. Namun, jika nilai R_2 kecil, kemampuan variabel independen untuk menjelaskan variabel dependen terbatas (Ghozali, 2016).

2.4.5 Uji Model Terbaik

Uji akurasi model dilakukan untuk mengetahui model yang paling baik dan akurat yang akan digunakan dalam menduga potensi cadangan karbon. Untuk menilai apakah koefisien regresi dari model memiliki pengaruh yang signifikan terhadap potensi

biomassa, tahap pengujian dilakukan dengan mengikuti prinsip statistik. Keakuratan model regresi diuji dengan membandingkan nilai biomassa hasil regresi dengan data pengukuran lapangan. Beberapa persamaan yang digunakan untuk uji akurasi model terbaik adalah sebagai berikut:

1) Root Mean Square Error (RMSE)

Kualitas pengukuran dievaluasi dengan menghitung *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai RMSE yang ideal adalah 0, yang menunjukkan tidak adanya kesalahan pengukuran. Semakin kecil nilai RMSE, semakin kecil pula kesalahan pengukuran dan semakin tinggi pula akurasi pengukuran. RMSE dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Firmansyah et al., 2022):

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}-y)^2}{y}}}{n} \times 100\%.....(11)$$

Keterangan: RMSE = *Root Mean Square Error*
 n = Jumlah plot
 $\hat{y}$ = Biomassa hasil berdasarkan persamaan regresi
 y = Biomassa lapangan

2) Bias (e)

Bias (e) merupakan kesalahan sistematis dalam pengukuran yang disebabkan oleh beberapa faktor seperti kesalahan dalam proses pengukuran, kesalahan teknis, atau tidak akuratan alat ukur. Bias (e) dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Firmansyah et al., 2022):

$$e = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\frac{(\hat{y}-y)}{y}}{n} \right\} \times 100\%.....(12)$$

Keterangan: e = Bias
 n = Jumlah plot
 $\hat{y}$ = Biomassa hasil berdasarkan persamaan regresi
 y = Biomassa lapangan

3) Simpangan Agregat (SA)

Simpangan Agregat (SA) adalah ukuran yang menunjukkan seberapa jauh persamaan dapat memprediksi nilai aktual dengan tepat. Persamaan yang baik umumnya memiliki nilai SA antara -1% dan +1%, yang menunjukkan bahwa selisih total antara nilai aktual dan nilai prediksi relatif kecil. SA dihitung dengan membagi selisih total antara nilai aktual dan nilai prediksi dengan jumlah nilai aktual, dan dikalikan dengan 100% (Ramadhan & Siman, 2023).

$$SA = \left(\frac{\sum \hat{y} - \sum y}{\sum \hat{y}} \right).....(13)$$

Keterangan: SA = Simpangan Agregat
n = Jumlah plot
 $\hat{y}$ = Biomassa hasil berdasarkan persamaan regresi
y = Biomassa lapangan

4) *Chi-square*

Chi-square digunakan untuk mengukur perbandingan antara nilai estimasi ($\hat{y}$) dan nilai sebenarnya (y), sehingga dapat membantu dalam menganalisis seberapa besar perbedaan antara dugaan dan data aktual yang diperoleh (Firmansyah et al., 2022):

$$X^2 \text{ Hitung} = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}-y)^2}{y} \times 100\% \dots \dots \dots (14)$$

Keterangan: n = Jumlah plot
 $\hat{y}$ = Biomassa hasil berdasarkan persamaan regresi
y = Biomassa lapangan

2.4.6 Pembuatan Peta Sebaran Karbon

Pembuatan peta sebaran karbon dilakukan melalui dua tahap utama. Tahap pertama adalah pengolahan data yang dilakukan menggunakan *Google Earth Engine*, sebuah platform berbasis *cloud* yang memungkinkan analisis data geospasial secara efisien. Dalam tahap ini, *script* yang mendefinisikan fungsi *calculateCarbon(ndvi)* berperan penting untuk menghitung nilai karbon berdasarkan indeks NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Fungsi ini mengalikan nilai NDVI dengan 100 untuk mengonversinya ke dalam rentang yang lebih mudah dibaca, serta menambahkan konstanta kecil (0.0001) untuk menghindari masalah perhitungan ketika NDVI mendekati nol. Hasil dari penghitungan ini kemudian diterapkan fungsi eksponensial untuk memperhalus nilai karbon. Tahap kedua melibatkan pengklasifikasian atau pembagian kelas karbon serta penyusunan *layout* peta menggunakan perangkat lunak *ArcGIS*, yang menyediakan alat dan fitur untuk visualisasi dan analisis data spasial.

```

// ***** Fungsi untuk Menghitung Nilai Karbon *****
function calculateCarbon(ndvi) {
  return ndvi.multiply(100).add(0.0001).expression(
    '5.769 * exp(0.279 * x) * exp(4.513 * pow(x, 2))', {
      'x': ndvi
    }
  ).rename('Nilai Karbon');
}
// 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']}

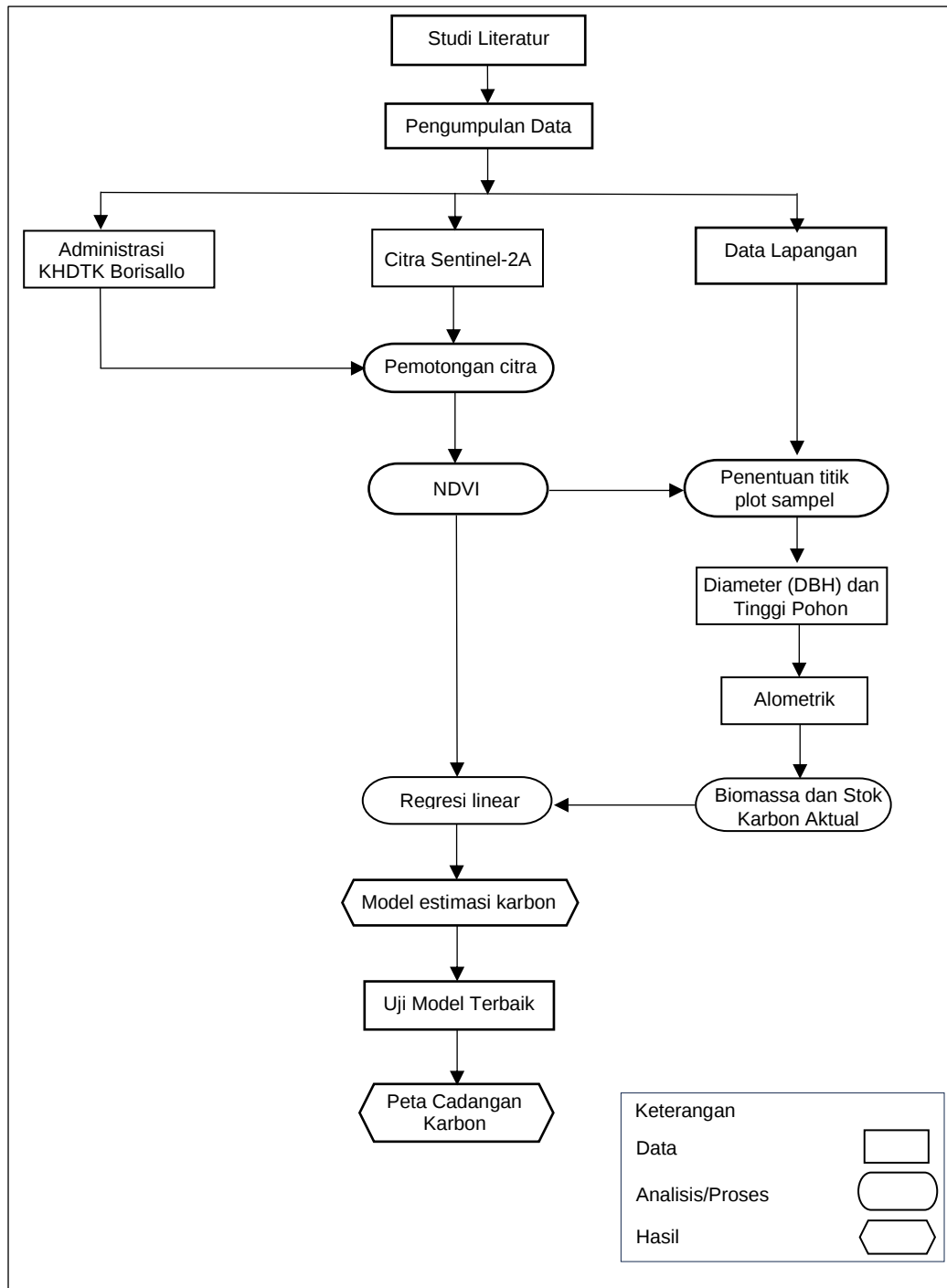
Map.addLayer(carbonValue, carbonValue_param, 'Nilai Karbon');

```

Gambar 7. Algoritma Pemetaan Cadangan Karbon

2.5 Alur Penelitian

Untuk tahapan pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Alur Tahapan Penelitian

