

5.3.3.	<i>Green Normalized Difference Vegetation Index</i>	35
5.3.4.	<i>Renormalized Difference Vegetation Index</i>	36
5.3.5.	<i>Infrared Percentage Vegetation Index</i>	37
5.3.6.	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	38
5.4.	Model Penduga Sebaran Karbon	39
5.5.	Sebaran Cadangan Karbon	43
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN	46
6.1.	Kesimpulan.....	46
6.1.	Saran.....	46
	DAFTAR PUSTAKA	47
	LAMPIRAN	52

DAFTAR TABEL

Tabel	Judul	Halaman
Table 1.	Daftar 13 Kanal Citra Sentinel-2A.....	9
Table 2.	Rentang Klasifikasi NDVI.....	12
Table 3.	Rentang Klasifikasi RVI.....	13
Table 4.	Rentang Klasifikasi SAVI.....	14
Table 5.	Bahan Penelitian.....	17
Table 6.	Jumlah Titik Sampel berdasarkan Skala Peta	23
Table 7.	Nilai BEF Pohon yang Dikembangkan untuk Beberapa Jenis Pohon dan Tipe Ekosistem di Indonesia.....	27
Table 8.	Kelas Kelerengan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin	30
Table 9.	Hasil Rekapitulasi Pengukuran Karbon pada Tiap Plot	32
Table 10.	Nilai <i>Digital Number</i> dan Biomassa per Plot yang Diregresikan.....	40
Table 11.	Korelasi antara Dua Variabel (Biomassa dan <i>Digital Number</i>).....	41
Table 12.	Model dari Seluruh Regresi yang Telah Dilakukan Pengujian	41
Table 13.	Sebaran Karbon per <i>Pixel</i> pada Kawasan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin Tahun 2021	44
Table 14.	Sebaran Karbon per ha pada Jenis Tutupan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin Tahun 2021	45
Table 15.	Standar Error (SE) Nilai Karbon tiap Jenis Tutupan.....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Judul	Halaman
Gambar 1.	Peta Lokasi Penelitian	20
Gambar 2.	Peta Sebaran Titik Pengambilan Sampel Plot Penelitian	25
Gambar 3.	Alur Tahap Penelitian.....	28
Gambar 4.	Hasil Interpretasi Tutupan Lahan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin Tahun 2021.....	31
Gambar 5.	Indeks Vegetasi RVI pada Kawasan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin.....	34
Gambar 6.	Indeks Vegetasi SAVI pada Kawasan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin.....	35
Gambar 7.	Indeks Vegetasi GNDVI pada Kawasan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin.....	36
Gambar 8.	Indeks Vegetasi RDVI pada Kawasan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin.....	37
Gambar 9.	Indeks Vegetasi IPVI pada Kawasan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin.....	38
Gambar 10.	Indeks Vegetasi NDVI pada Kawasan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin.....	39
Gambar 11.	Diagram Hubungan antara Biomassa Aktual dengan Nilai NDVI Model Eksponensial	43
Gambar 12.	Sebaran Cadangan Karbon Pendidikan Universitas Hasanuddin Tahun 2021.....	44

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Kenampakan Visual (<i>True Color</i>) Kombinasi Band 3,4,8 Citra Sentinel-2A	53
Lampiran 2.	Titik Koordinat Plot Penelitian	54
Lampiran 3.	Peta Kelerengan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin	55
Lampiran 4.	Data Perhitungan Biomassa per Plot.....	56
Lampiran 5.	Grafik Regresi Seluruh Indeks Vegetasi yang Digunakan.....	89
Lampiran 6.	Model Regresi Linear Perbandingan Data Lapangan dan NDVI (Indeks Vegetasi Terbaik)	92
Lampiran 7.	Standar Error	93

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Hutan memiliki peran penting dalam mengurangi dampak perubahan iklim global, diantaranya sebagai acuan dalam pendugaan biomassa pohon terhadap banyaknya karbon yang dapat diserap hutan (Muhdi, 2018). Perubahan luasan tutupan hutan secara global saat ini turut meningkatkan emisi gas rumah kaca di atmosfer. Berdasarkan hasil pemetaan tutupan lahan berhutan yang dilakukan oleh Direktorat Inventarisasi dan Pemantauan Sumber Daya Hutan, Direktorat Jendral Planologi Kehutanan dan Tata Lingkungan menggunakan penafsiran citra LDCM (*The Landsat Data Continuity Mission*)/ Landsat 7 tahun 2006 diperoleh luasan sebesar 132,4 juta ha dan penafsiran Landsat 8 tahun 2018 seluas 85,8 juta ha. Angka tersebut mengalami penurunan yang signifikan seluas 46,6 juta ha.

Salah satu wilayah di Indonesia yang mengalami penurunan luas kawasan hutan yang sangat besar adalah provinsi Sulawesi Selatan seluas 2.610.060 ha (KLHK, 2019) dengan lahan berhutan seluas 1.360.418 ha (Sulfitra, 2019), serta data sekuestrasi cadangan karbon tahun 2009-2011 sebesar 40.829,92 CO₂-eq ton (Pemprov Sulsel, 2020). Data dan informasi terkait cadangan karbon, perlu untuk diperbarui setiap tahun agar diperoleh kondisi cadangan karbon terbaru dan pengaruhnya akibat perubahan tutupan hutan. Melihat fungsi hutan sebagai penyerap karbon, maka perlu dikembangkan berbagai metode dalam mengestimasi cadangan stok karbon dan memantau perubahannya secara periodik (Antono et al., 2013).

Pada kawasan yang luas diperlukan suatu cara untuk mengekstrapolasikan hasil pengukuran berbasis plot ke tingkat bentang alam atau area tutupan hutan yang luas. Salah satu metode potensial untuk memenuhi kebutuhan tersebut yaitu dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh. Metode ini tidak membutuhkan waktu yang lama dan biaya yang mahal terutama pada kajian yang luas. Salah satu citra satelit yang bisa digunakan untuk mendeteksi cadangan

karbon adalah Sentinel-2A yang mempunyai 13 band (4 band resolusi 10 m, 6 band resolusi 20 m, dan 3 band resolusi 60 m) dengan area sapuan 290 km (Nadira, 2018).

Penelitian dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh untuk pendugaan cadangan karbon telah banyak dilakukan, diantaranya penelitian oleh Nabila, (2019) yang menggunakan citra Sentinel 2 pada tegakan campuran di wilayah Kota Kendari dengan transformasi indeks vegetasi NDVI, serta Nguyen dkk., (2019) yang menggunakan citra Sentinel 2 pada tutupan mangrove dengan beberapa transformasi indeks vegetasi seperti NDVI, *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), dan *Green Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI). Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, pendugaan cadangan karbon hanya terbatas pada kawasan perkotaan dan tutupan homogen, yaitu mangrove. Sehingga dalam penelitian ini akan melihat wilayah kajian dengan dengan jenis tutupan hutan Hutan Alam dan Hutan Tanaman serta transformasi indeks vegetasi yang digunakan lebih beragam.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini penulis mengangkat judul “Pemanfaatan Citra Sentinel-2A untuk Estimasi Cadangan Karbon Pada Tutupan Hutan” dengan studi kasus beberapa jenis hutan di Kawasan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin yang merupakan salah satu Kawasan Hutan dengan Tujuan Khusus (KHDTK) yang terdapat di Provinsi Sulawesi Selatan. Kawasan ini juga terdapat ekosistem hutan, yaitu hutan alam dan hutan tanaman yang nantinya dapat menjadi lokus awal pengembangan metode pemanfaatan penginderaan jauh untuk estimasi cadangan karbon tegakan hutan.

1.2 Tujuan dan Kegunaan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk membangun model pendugaan karbon terbaik, dengan menggunakan indeks vegetasi hasil Analisis Citra Sentinel-2A, di Kawasan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi basis data terbaru terkait stok karbon pada Kawasan Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin dan sebagai referensi metode untuk dapat diimplementasikan pada lokasi yang lebih luas.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa dan Karbon

Biomassa adalah jumlah bahan organik yang diproduksi oleh organisme tumbuhan. Biomassa dapat dinyatakan dalam ukuran berat, seperti berat kering dalam satuan gram (gr) atau dalam kalori per satuan luas. Biomassa diukur dalam kondisi berat kering. Hal ini dikarenakan kandungan air yang ada pada tumbuhan berbeda-beda. Unit satuan biomassa adalah gram/m² atau ton/ha. Sutaryo (2009) menjelaskan terdapat empat cara utama untuk menghitung biomassa, yaitu:

1. *Destructive sampling*, sampling dengan pemanan secara *in situ*,
2. *Non-destructive sampling*, sampling tanpa pemanenan dengan data pendataan hutan secara *in situ*,
3. Pendugaan melalui penginderaan jauh, dan
4. Pembuatan model.

Hutan memiliki peran penting dalam menyerap CO₂ dari atmosfer dan menyimpannya dalam ekosistem hutan. Biomassa hutan yang berisi sekitar 80% dari total karbon terestrial di atas tanah dan sekitar 40% dari semua karbon di bawah tanah. Konversi lahan, deforestasi, degradasi, dan reforestasi hutan dapat mengubah jenis tutupan lahan dan berkonsekuensi mengubah komposisi biomassa terestrial, sehingga pengkuantifikasian komposisi biomassa berbagai jenis tegakan hutan dalam memperkirakan daya tampung dan daya serap karbon merupakan hal yang penting untuk dilakukan karena dengan mengetahui data serapan karbon maka kegiatan yang kiranya dapat mengurangi cadangan karbon dapat dikontrol dan diawasi. Hal ini hanya dapat dilakukan jika tersedia metode yang tepat dan data yang dapat dipertanggungjawabkan. Hingga saat ini metode estimasi massa karbon dalam pohon yang digunakan di Indonesia adalah persamaan alometrik biomassa pohon. Dalam perhitungan massa karbon dalam biomassa vegetasi pada kedua model tersebut diasumsikan bahwa kadar karbon rata-rata dalam biomassa semua jenis pohon adalah 50%. Dengan adanya asumsi

tersebut dapat diperkirakan akan menyebabkan hasil estimasi yang kurang tepat apabila diterapkan pada wilayah tropis yang tinggi akan keanekaragaman dengan berbagai tipe hutan (Widhi & Murti, 2013).

Mardiatmoko (2017) menyatakan bahwa hutan sebagai gudang penyimpanan karbon berperan sebagai penyedia kantong karbon (*carbon pool*) merupakan reservoir atau sistem yang dapat mengakumulasi dan melepas karbon terkait dengan kemampuan tanaman dalam menyerap atau menahan kandungan karbon di udara. Berbagai macam usaha mitigasi terkait perubahan iklim telah banyak dilakukan, salah satunya pada bidang lahan agar dapat mempertahankan laju konversi. Vegetasi yang memiliki peran sebagai penyerap CO₂ menjadi bagian penting saat ini dalam rangka mengatasi pemanasan global. CO₂ yang diserap oleh tanaman disimpan dalam bentuk biomassa kayu, sehingga cara yang paling efektif untuk meningkatkan cadangan karbon adalah dengan menanam dan memelihara pohon serta mempertahankan lahan agar tetap bervegetasi.

Dalam inventarisasi karbon hutan terdapat 4 cara yang dapat diperhitungkan, keempat cara tersebut diantaranya:

1. Biomassa atas permukaan; dimana semua material hidup diatas permukaan termasuk batang, tunggul, cabang, kulit kayu, biji, dan daun dari begetasi baik dari strata pohon maupun dari strata tumbuhan bawah dilantai hutan.
2. Biomassa bawah permukaan; dimana semua biomassa dari akar tumbuhan yang hidup. Pengertian akar ini berlaku hingga ukuran diameter tertentu yang ditetapkan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui tumbuhan bawah dengan bahan organik tanah dan serasah.
3. Bahan organik mati; dimana semua bahan organik mati yang telah ditetapkan dengan berbagai tingkat dekomposisi yang terletak di permukaan tanah.
4. Karbon organik tanah yang mencakup karbon pada tanah mineral dan tanah organik termasuk gambut.

Brown (1997) menjelaskan bahwa hampir 50% dari biomassa vegetasi hutan tersusun atas unsur karbon sehingga biomassa hutan memiliki kandungan karbon yang cukup potensial. Informasi atas besarnya biomassa pohon di atas maupun dalam tanah sangat diperlukan untuk mempelajari cadangan karbon dan unsur hara lainnya dalam suatu ekosistem serta pengaruhnya terhadap siklus biogeokimia.

2.2 Penginderaan Jauh

Teknik penginderaan jauh digunakan sebagai salah satu metode estimasi karena lebih efektif apabila dilihat dari segi biaya dan waktu pengukuran, serta dapat diterapkan pada area hutan yang luas dan memiliki banyak variasi bentukan fisik. Hingga saat ini, estimasi stok karbon dari biomasanya mengikuti aturan 45% (Brown, 1997). Untuk wilayah yang kecil pada lokasi tertentu penggunaan metode ini dinilai cukup akurat akan tetapi menjadi tidak praktis jika diterapkan pada cakupan wilayah yang luas karena memerlukan waktu yang lama dan mahal. Hal inilah yang menyebabkan ketersediaan data mengenai stok karbon untuk Indonesia amat jarang tersedia (Rakhmawati et al., 2012).

Konsep penginderaan jauh yang menjelaskan bahwa berbagai objek di muka bumi ini memiliki karakteristik pantulan spektral yang khas terhadap sumber energi yang datang, hal ini memungkinkan studi vegetasi dilakukan. Transformasi indeks vegetasi merupakan salah satu teknik analisis citra yang sering dilakukan dalam menganalisis vegetasi secara umum. Terdapat banyak jenis transformasi indeks vegetasi yang dapat digunakan (Frananda et al., 2015).

Komponen dapat berupa fenomena, objek, atau keadaan permukaan bumi yang sangat bervariasi. Setiap kenampakan di permukaan bumi informasi yang tersedia dapat dilacak karena setiap objek memiliki karakteristik spektral tersendiri dalam interaksinya dengan tenaga yang menangkapnya, sehingga menimbulkan perbedaan jumlah tenaga yang dipantulkan. Sensor terpasang pada wahana yang berfungsi sebagai alat perekam tenaga alam sistem penginderaan jauh. Tiap sensor memiliki resolusi spektralnya masing-masing, yaitu kepekaan

sensor terhadap bagian spektrum elektromagnetik tertentu dan resolusi spasial yang berbeda-beda. Perbedaan kedua hal tersebut sangat berpengaruh terhadap kualitas citra penginderaan jauh yang dihasilkan (Susanto, 1996).

Pengukuran stok karbon dengan menggunakan teknik penginderaan jauh merupakan teknik paling efisien jika di aplikasikan pada area yang luas karena memiliki keunggulan dalam menghemat biaya, waktu dan tenaga. Saat ini, banyak pengukuran stok karbon menggunakan teknik penginderaan jauh dengan sistem optik melalui data multispektral mulai dari resolusi rendah, menengah, dan tinggi. Namun, data multispektral ini sebagian besar hanya merekam pada bagian kanopinya saja dengan melihat kondisi daun. Disisi lain, data multispektral ini juga memiliki kelemahan jika diaplikasikan pada daerah-daerah yang sering tertutup oleh awan. Untuk mengatasi hal tersebut, saat ini terdapat teknologi penginderaan jauh sistem aktif yang mampu beroperasi pada siang maupun malam hari dengan berbagai macam kondisi cuaca termasuk menembus awan tebal (Cahyawati & Danoedoro, 2012). Dalam mengestimasi cadangan stok karbon diperlukan aspek dari penginderaan jauh seperti pantulan spektral dari citra satelit dan transformasi indeks yang digunakan untuk membangun model sebaran cadangan karbon.

2.2.1 Pantulan Spektral

Karakteristik pantulan spektral vegetasi dipengaruhi oleh material organik, air, pigmen daun, dan karakteristik struktural daun seperti bentuk daun dan luas daun. Baik daun muda maupun daun tua memiliki perbedaan dari warna daun yang dipengaruhi oleh kandungan klorofil. Hal ini berpengaruh pada kemampuan daun berfotosintesis. Daun tua yang hampir mati menjadi kekuningan dan tidak mampu berfotosintesis karena rusaknya klorofil dan hilangnya fungsi kloroplas (Andree Ekadinata et al., 2015).

Spektral merupakan bentuk jamak dari spektrum. Nilai spektral setiap objek memiliki ciri tersendiri walaupun terlihat sama secara visual. Hal ini terjadi karena masing-masing objek memiliki karakteristik berbeda dengan objek seperti

warna, keras atau tidak kerasnya objek maupun intensitas gelombang elektromagnetik pada saat mengenai objek (Danoedoro, 2012).

Salah satu hal yang merupakan sebuah transformasi penajaman spektral dari citra oleh tiap indeks vegetasi seperti NDVI, RVI, SAVI, GNDVI, RDVI, IPVI dan indeks vegetasi lainnya tentu memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Pada, indeks vegetasi NDVI dan RVI yang memanfaatkan kombinasi matematis antara *band red* dan *band NIR* dimana NDVI untuk mengidentifikasi keberadaan dan kondisi vegetasi dan RVI untuk estimasi biomassa hijau (Purwanto, 2015). Sama halnya dengan NDVI dan RVI, indeks vegetasi SAVI mengkombinasikan spektrum merah inframerah dan faktor penyesuaian tanah untuk meminimalkan pengaruh tanah terhadap vegetasi (Sobieraj & Mróz, 2004). Sedangkan indeks vegetasi lainnya seperti GNDVI, RDVI dan IPVI merupakan indeks yang dikembangkan dari indeks sebelumnya dengan menggunakan spektrum lainnya seperti GNDVI yang mengganti spektrum merah pada NDVI dengan spektrum hijau untuk meningkatkan sensitifitas (Candiago et al., 2015), RDVI yang mengkombinasikan manfaat dari spektrum indeks vegetasi DVI dan NDVI (Andianto & Handayani, 2014), dan IPVI yang merelevankan nilai dari indeks vegetasi NDVI (Andianto & Handayani, 2014).

2.2.2 Citra Sentinel-2A

Pada tanggal 23 Juni 2015 di *Guiana Space Centre*, Kourou, *French Guyana European Space Agency* (ESA) meluncurkan satelit observasi bumi (Sentinel-2A) dengan menggunakan kendaraan peluncur Vega. Satelit ini merupakan salah satu dari dua satelit program Copernicus yang telah diluncurkan dari total perencanaan yaitu sebanyak 6 satelit. Sebelumnya pada tanggal 3 April 2014 telah diluncurkan satelit Sentinel-1A yang merupakan satelit radar dan kemudian menyusul Satelit Sentinel-2B pada tahun 2017 (Andini, 2018). Kedua satelit yang masuk ke dalam seri Citra Sentinel-2A mempunyai waktu revisit selama lima hari. Satelit Sentinel-1A akan menghasilkan citra radar, sedangkan Satelit Sentinel-2A menghasilkan citra optik multispektral yang memiliki 13

kanal-kanal yang masuk ke spektrum *visible, near infrared, shortwave infrared*.

Karakteristik dari 13 kanal tersebut akan dijelaskan pada tabel dibawah ini:

Tabel 1. Daftar 13 Kanal Citra Sentinel-2A

Kanal	Panjang Gelombang (μm)	Resolusi Spasial (m)
Kanal 1 - <i>Coastal aerosol</i>	0,443	60
Kanal 2 - <i>Blue</i>	0,490	10
Kanal 3 - <i>Green</i>	0,560	10
Kanal 4 - <i>Red</i>	0,665	10
Kanal 5 - <i>Vegetation Red Edge</i>	0,705	20
Kanal 6 - <i>Vegetation Red Edge</i>	0,740	20
Kanal 7 - <i>Vegetation Red Edge</i>	0,783	20
Kanal 8 - <i>NIR</i>	0,842	10
Kanal 8A - <i>Vegetation Red Edge</i>	0,865	20
Kanal 9 - <i>Water vapour</i>	0,945	60
Kanal 10 - <i>SWIR - Cirrus</i>	1,375	60
Kanal 11 - <i>SWIR</i>	1,610	20
Kanal 12 - <i>SWIR</i>	2,190	20

Sumber: Andini, 2018

Sentinel-2A bertujuan menyajikan data untuk kepentingan seperti monitoring lahan dan menjadi data dasar untuk penggunaan pada beragam aplikasi mulai dari perhutanan, pertanian, monitoring lingkungan sampai dengan perencanaan kehutanan, deteksi perubahan tutupan lahan, penggunaan lahan, pemetaan resiko bencana serta beragam aplikasi lainnya (Nadira, 2018). Salah satunya adalah dengan membangun model indeks vegetasi seperti NDVI, RVI, SAVI, dan indeks vegetasi lainnya yang memanfaatkan beberapa kanal, yaitu kanal merah, *NIR*, Hijau, dan kanal-kanal lainnya yang disesuaikan dengan rumus indeks vegetasinya. Sebagai salah satu satelit penginderaan jauh dengan sensor pasif buatan Eropa citra Sentinel-2A mempunyai 13 kanal (*band*), 4 band beresolusi 10 m, 6 band beresolusi 20 m, dan 3 band beresolusi spasial 60 m

dengan area sapuan 290 km. Resolusi spasial yang tinggi disertai cakupan spektrum yang luas merupakan langkah maju yang besar jika dibandingkan dengan multispektral lainnya (Kawamuna et al., 2017).

2.2.3 Koreksi Radiometrik dan Atmosferik

Pada umumnya citra satelit memiliki nilai *Digital Number* (DN) asli yang belum diproses berdasarkan nilai spektral radian sesungguhnya yang akan berdampak pada informasi hasil yang kurang akurat. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan oleh perbedaan kondisi cuaca, nilai sudut perekaman, lokasi matahari, dan faktor pengaruh lainnya (Kustiyo et al., 2014). Koreksi radiometrik ini diperlukan guna memperbaiki kualitas visual citra dan sekaligus memperbaiki nilai-nilai piksel yang tidak sesuai dengan nilai pantulan spektral obyek yang sebenarnya. Proses dari koreksi radiometrik terbagi menjadi dua, yaitu (Danoedoro, 1996):

1. Kalibrasi radiometrik, kalibrasi ini bertujuan dalam hal mengubah *digital number* (DN) ke nilai radian atau reflektan menggunakan parameter yang tersedia di metadata.

Radiometrik oleh kesalahan faktor internal sensor sering disebut sebagai koreksi radiometrik sistematis. Produk standar dari citra optik resolusi menengah sudah dilakukan koreksi radiometrik sistematis, namun informasi dari hasil koreksi sistematis yang belum sesuai dengan kondisi objek sesungguhnya dikarenakan pada saat radiasi elektromagnetik direkam oleh sensor satelit, radiasi elektromagnetik telah melewati dari atas dan bawah atmosfer sebanyak dua kali, yaitu pada saat sinar matahari mengenai objek dan pada saat objek merefleksikan ke sensor. Pada proses tersebut telah terjadi absorpsi dan penghamburan radiasi yang arahnya dapat berubah sehingga proses ini akan menghasilkan adanya dampak *effect haziness* yang dapat mengurangi kontras citra dan *effect adjacency* yang memiliki nilai radian direkam berdasarkan dari penggabungan nilai hamburan piksel yang

terdekat. Kedua efek tersebut perlu untuk diminimalisir untuk memperbaiki kesalahan faktor eksternal dan koreksi atmosfer. Koreksi radiometrik yang diakibatkan oleh pengaruh faktor eksternal adalah koreksi yang disebabkan oleh perbedaan posisi matahari, sudut perekaman, dan topografi wilayah (Kustiyo et al., 2014). Sensor sistem pasif pada penginderaan jauh merupakan sensor yang menangkap energi pantulan atau pancaran gelombang elektromagnetik dari objek tanpa mengirim gelombang energi ke arah objek-objek tersebut (Danoedoro, 2012). Sinar matahari adalah salah satu energi yang terdapat pada objek tersebut. Energi pancarannya dinyatakan dalam paket gelombang elektromagnetik. Pada alur perjalanannya, paket gelombang elektromagnetik akan melewati atmosfer hingga tertangkap oleh sensor satelit dalam bentuk reflektansi. Nilai reflektansi objek yang diterima oleh sensor satelit dapat dipengaruhi oleh pantulan, penyerapan, dan hamburan atmosfer yang menyebabkan nilai reflektansi citra tidak sama dengan nilai reflektansi objek sebenarnya di permukaan bumi.

2. Koreksi atmosfer, kalibrasi ini bertujuan untuk menurunkan reflektansi objek dari total radiansi TOA (*Top of Atmosphere*) setelah proses normalisasi kondisi pencahayaan dan penghapusan efek atmosfer.

Koreksi atmosfer perlu dilakukan untuk mengurangi pengaruh atmosfer dan mengembalikan nilai reflektansi sesuai dengan nilai reflektansi objek sebenarnya di permukaan bumi dengan melihat nilai minimum pada tiap *band* (*dark* substrat) dan menggunakan nilai offset akibat pengaruh atmosfer (Fibriawati, 2016).

Pada citra Sentinel 2A pengukuran radiometrik tiap piksel citra disediakan dalam satuan reflektansi *Top of Atmosphere* (TOA) pada semua parameter untuk diubah menjadi radiansi (European Space Agency, 2015). Jadi, citra ini telah dilakukan koreksi geometrik dan radiometrik sistematis oleh pihak Sentinel. Akan

tetapi pada saat pengolahan di aplikasi QGIS adapun persamaan manual yang bisa dijabarkan untuk mendapatkan *wavelength* dari citra ini antara lain:

$$\text{Wavelength Citra Sentinel 2} = \frac{\text{Digital Number (DN)}}{\text{Solar irradiance}}$$

2.3 Indeks Vegetasi

2.3.1 *Normalized Difference Vegetation Index*

Andini et al., (2018) menyatakan bahwa Indeks vegetasi merupakan suatu transformasi matematis yang melibatkan beberapa saluran sekaligus dan menghasilkan citra baru yang lebih representative dalam hal menyajikan fenomena vegetasi. Model algoritma transformasi indeks vegetasi yang digunakan yaitu *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). NDVI adalah salah satu indeks vegetasi yang paling sering digunakan karena merupakan indeks kehijauan vegetasi atau aktivitas fotosintesis vegetasi. NDVI didasarkan pada pengamatan bahwa permukaan yang berbeda-beda merefleksikan berbagai jenis gelombang cahaya yang berbeda-beda. Vegetasi yang aktif melakukan fotosintesis akan menyerap sebagian besar gelombang merah sinar matahari dan mencerminkan gelombang inframerah dekat lebih tinggi. Vegetasi yang kurang sehat atau yang sudah mati dominan mencerminkan gelombang merah dan lebih sedikit pada gelombang inframerah dekat. Perhitungan NDVI berdasarkan piksel, per-piksel dari selisih normalisasi antara kanal merah dan inframerah dekat pada citra. Adapun rumus perhitungan klasifikasi NDVI adalah sebagai berikut, dan untuk rentang nilai NDVI yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$$

Keterangan:

NDVI = Nilai NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

NIR = Band Near Infra-Red/Band 8 (0,842 μm)

Red = Band Red/Band 4 (0,665 μm).

Tabel 2. Rentang Klasifikasi *NDVI*

Kelas	Rentang Klasifikasi	Kerapatan
1	-1 – 0,03	Lahan Tidak Bervegetasi
2	0,03 – 0,15	Kehijauan Sangat Rendah
3	0,15 – 0,25	Kehijauan Rendah
4	0,26 – 0,35	Kehijauan Sedang
5	0,35 – 1	Kehijauan Tinggi

Sumber: Fadlillah et al., 2018.

Nilai *NDVI* mempunyai rentang klasifikasi antara -1 (minus) hingga 1 (positif). Nilai yang mewakili vegetasi berada pada rentang 0,1 hingga 0,7. Nilai *NDVI* di atas menunjukkan tingkat kesehatan dari tutupan vegetasi yang lebih baik (Vision of Technology, 2020) Lillesand dan Kiefer (1990) dalam Kawamuna et al., (2017) menyatakan adanya tutupan seperti awan, objek non vegetasi, dan air mempunyai nilai *NDVI* yang kurang dari nol.

Freddy dkk, (2015) dalam Mardiatmoko dan Suhardiman (2017) menjelaskan bahwa *NDVI* menunjukkan parameter yang berhubungan dengan parameter vegetasi seperti biomassa dedaunan hijau, daerah dedaunan hijau yang merupakan nilai yang dapat diperkirakan untuk pembagian vegetasi. Pada umumnya dasar perhitungannya adalah seberapa besar penyerapan radiasi matahari oleh tanaman terumata pada bagian daun.

2.3.2 *Ratio Vegetation Index dan Soil Adjusted Vegetation Index*

Ratio Vegetation Index (*RVI*) merupakan indeks vegetasi pertama yang dideskripsikan oleh Jordan (1969) dalam (Danoedoro, 2012) yang biasa juga disebut sebagai *Simple Ratio* (*SR*), dimana dalam ilmu penginderaan jauh digunakan untuk menghilangkan pengaruh albedo. Rentang nilai *RVI* bervariasi dari 0 – 20. *RVI* banyak digunakan untuk pemantauan dan estimasi biomassa

hijau, khususnya pada tutupan vegetasi dengan kerapatan tinggi. Indeks ini sangat sensitif terhadap vegetasi dan memiliki korelasi yang baik dengan biomassa tanaman. Namun, jika tutupan vegetasi jarang (kurang dari 50%), RVI sensitif terhadap efek atmosfer dan representasi biomassa akan lemah (Xue & Su, 2017). Indeks ini sensitif terutama pada variasi radiasi merah dan indeks ini juga biasa digunakan untuk membuktikan perbedaan antara permukaan batuan, mineral pada daerah gersang dan pada daerah yang tidak terdapat tutupan vegetasinya (Takwir, 2017). Adapun rumus perhitungan klasifikasi RVI adalah sebagai berikut, dan untuk tabel rentang nilai RVI dapat dilihat pada Tabel 3:

$$RVI = \frac{R}{NIR}$$

Keterangan:

RVI = Nilai RVI (*Ration Vegetation Index*)

R = Band Red/Band 4 (0,665 μ m)

NIR = Band Near Infra-Red/Band 8 (0,842 μ m)

NIR adalah reflektansi band inframerah dekat dan R adalah pantulan band merah. Menurut karakteristik spektral vegetasi, tegakan yang lebat memiliki reflektansi band merah yang rendah yang akan menunjukkan korelasi salah satunya adalah terhadap biomassa dan kandungan klorofil daun (Xue & Su, 2017).

Tabel 3. Rentang Klasifikasi RVI

Kelas	Rentang Klasifikasi	Kerapatan
1	0 – 14%	Kehijauan Sangat Rendah
2	15 – 25%	Kehijauan Rendah
3	26 – 50%	Kehijauan Sedang
4	51 – 70%	Kehijauann Tinggi
5	>70%	Kehijauan SangatTinggi

Sumber: Lintang dkk, 2017.

Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) merupakan indeks vegetasi yang disesuaikan dengan latar belakang tanah. Indeks ini diusulkan oleh Huete (1988) dimana bertujuan untuk meminimalkan pengaruh tanah terhadap kuantifikasi vegetasi dengan memperkenalkan faktor penyesuaian tanah (L). Nilai L untuk tutupan vegetasi rapat/tinggi nilai L adalah 0,0 atau 0,25 untuk tutupan vegetasi rendah 1,0 dan untuk tutupan vegetasi menengah adalah 0,5 (Sobieraj & Mróz, 2004).

Mengingat efek tanah pada latar belakang vegetasi, radiasi akan meningkat secara signifikan jika tutupan vegetasi jarang dan begitupun sebaliknya, inframerah dekat berkurang untuk mengeratkan hubungan yang bijaksana antara vegetasi dan tanah. Banyak indeks vegetasi dengan latar belakang tanah yang telah dikembangkan dan salah satunya adalah SAVI (Xue & Su, 2017). Adapun rumus perhitungan klasifikasi RVI adalah sebagai berikut dan rentang nilai klasifikasi SAVI dapat dilihat pada Tabel 4:

$$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + L} (1 + L)$$

Keterangan:

SAVI = Nilai SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*)

R = Band Red/Band 4 (0,665 μm)

NIR = Band Near Infra-Red/Band 8 (0,842 μm)

L = Nilai Faktor Penyesuaian Tanah

Model di atas dibuat dengan menekan latar belakang tanah, dimana L adalah indeks kondisi tanah (Xue & Su, 2017). SAVI dipercaya mampu menekan latar belakang tanah. Diasumsikan bahwa gangguan - gangguan spektral tanah pada daerah penelitian dapat timbul karena adanya pengaruh topografi yang terjal dan juga efek bayangan gunung yang dihasilkan ketika perekaman citra berlangsung (Lintang dkk., 2017).

Tabel 4. Rentang Klasifikasi SAVI

Kelas	Rentang Klasifikasi	Kerapatan
1	0,0 – 0,2	Kehijauan Sangat Rendah
2	0,2 – 0,4	Kehijauan Rendah
3	0,4 – 0,6	Kehijauan Sedang
4	0,6 – 0,8	Kehijauann Tinggi
5	0,8 – 1	Kehijauan SangatTinggi

Sumber: Nugraha dan Citra, 2021.

2.3.3 *Green Normalized Vegetation Index, Renormalized Vegetation Index, dan Infrared Percentage Vegetation Index*

Perhitungan *Green Normalized Vegetation Index* (GNDVI) mirip dengan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Tetapi, *Band Green* GNDVI digunakan sebagai *Band Red* pada NDVI. Hal ini berkaitan dengan proporsi ion yang diserap secara fotosintesis dan berkorelasi liner dengan LAI (*Leaf Area Index*) dan biomassa. Dengan demikian, GNDVI lebih sensitif terhadap konsentrasi klorofil dari NDVI. Untuk nilai dari GNDVI sendiri berkisar dari 0 sampai 1,0 (Candiago et al., 2015). Rumus perhitungan GNDVI adalah sebagai berikut (Miller & Morris, 2020):

$$\text{GNDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{G}}{\text{NIR} + \text{G}}$$

Keterangan:

GNDVI = Nilai GNDVI (*Green Normalized Vegetation Index*)

Green = Band Hijau/Band 3 (0,560 μm)

NIR = Band Near Infra-Red/Band 8 (0,842 μm)

Renormalized Vegetation Index (RDVI) merupakan indeks yang menggunakan perbedaan antara panjang gelombang inframerah dekat dan merah. Sama halnya dengan NDVI yaitu untuk melihat vegetasi yang sehat. Indeks vegetasi ini dikembangkan untuk melinierisasikan hubungan variable fisik dari suatu vegetasi. Tujuan dari indeks ini adalah dengan mengkombinasikan manfaat dari indeks vegetasi *Difference Vegetation Index* (DVI) dan NDVI untuk nilai *Leaf Area Index* (LAI) tinggi dan rendah. RDVI dianggap kurang sensitif terhadap klorofil dibanding NDVI. Adapun rumus indeks vegetasi RDVI adalah sebagai berikut (Andianto dan Handayani, 2014):

$$\mathbf{RDVI} = \frac{\mathbf{NIR} - \mathbf{R}}{\sqrt{\mathbf{NIR} + \mathbf{R}}}$$

Keterangan:

RDVI = Nilai RDVI (*Renormalized Difference Vegetation Index*)

R = Band Red/Band 4 (0,665 μm)

NIR = Band Near Infra-Red/Band 8 (0,842 μm)

Infrared Precentage Vegetation Index (IPVI) merupakan indeks vegetasi yang disadari bahwa adanya pengurangan sinar merah dalam indeks vegetasi NDVI yang dianggap kurang relevan. Indeks vegetasi ini secara fungsional setara dengan NDVI dan RVI, tetapi nilainya dari 0.0-1.0. IPVI juga menghilangkan satu operasi matematika per piksel gambar yang dihasilkan. Dimana hal ini berguna dalam pemrosesan data dengan jumlah yang besar. Sehingga rumusnya adalah sebagai berikut (Crippen, 1990):

$$\mathbf{IPVI} = \mathbf{0.5 (NDVI + 1)}$$

Keterangan:

IPVI = Nilai IPVI (*Infrared Precentage Vegetation Index*)

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*

0.5 dan 1 = Nilai Konstanta

2.4 Analisis Regresi

Analisis regresi merupakan suatu analisis yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh suatu variable terhadap variable lain. Apabila hanya terdapat satu variabel bebas dan satu variabel terikat, maka regresi tersebut dinamakan regresi linear sederhana (Juliandi, dkk. 2014). Regresi eksponensial ialah regresi dimana variabel X berfungsi sebagai pangkat atau eksponen, regresi Logaritma/logaritmik adalah suatu analisa regresi yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara variabel respon (*dependent*) dan variabel predictor (*independent*), dimana variabel respon bersifat dikotomus, serta regresi Polynomial ialah regresi dengan sebuah variabel bebas sebagai faktor dengan pangkat terurut (Aryandi dan Zuharnen, 2014).

Model matematis yang dimaksud dapat dilihat pada uraian berikut:

1. Model Linear $Y = a + bX$
2. Model Eksponensial $Y = a^{(bX)}$
3. Model Logaritma $Y = a + b \ln(X)$
4. Model Polynomial (Kuartik) $Y = b_0 + b_1 X^2 + b_2 X^2 + b_3 X^3 + b_4 X^4$

Keterangan:

Y : biomassa (ton)/variabel tak bebas

X : nilai Indeks Vegetasi/variabel bebas

a dan b: nilai konstanta/koeffisien

Hubungan derajat kekuatan antara 2 variabel disebut derajat korelasi (r).

Secara Kuantitatif dapat dibagi menjadi 4 area yaitu:

r = 0,00 – 0,25 (tidak ada hubungan/hubungan lemah)

r = 0,26 – 0,50 (hubungan sedang)

r = 0,51 – 0,75 (hubungan kuat)

r = 0,76 – 1 (hubungan sangat kuat/semurna)

Nilai r ditentukan oleh derajat koefisien determinasi (R^2) yang menunjukkan besaran pengaruh suatu variabel terhadap variabel lain dengan selang nilai 0 - 100% (Margaretha, 2013). Untuk mengetahui pengaruh signifikansi koefisien regresi yang dihasilkan melalui pembuatan model terhadap potensi biomassa, maka proses pengujian yang dilakukan mengarah pada kaidah statistik. Uji akurasi model regresi ini dilakukan dengan cara membandingkan nilai biomassa hasil analisis regresi dengan data pengukuran sampel lapangan yang tidak dimasukkan dalam proses membangun model, kemudian dihitung penyimpangannya. Standar error estimasi dihitung dengan menggunakan rumus:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(y - y')^2}{n - 2}}$$

Keterangan:

SE = Standar Error

y = Biomassa lapangan

y' = Biomassa hasil dari persamaan regresi

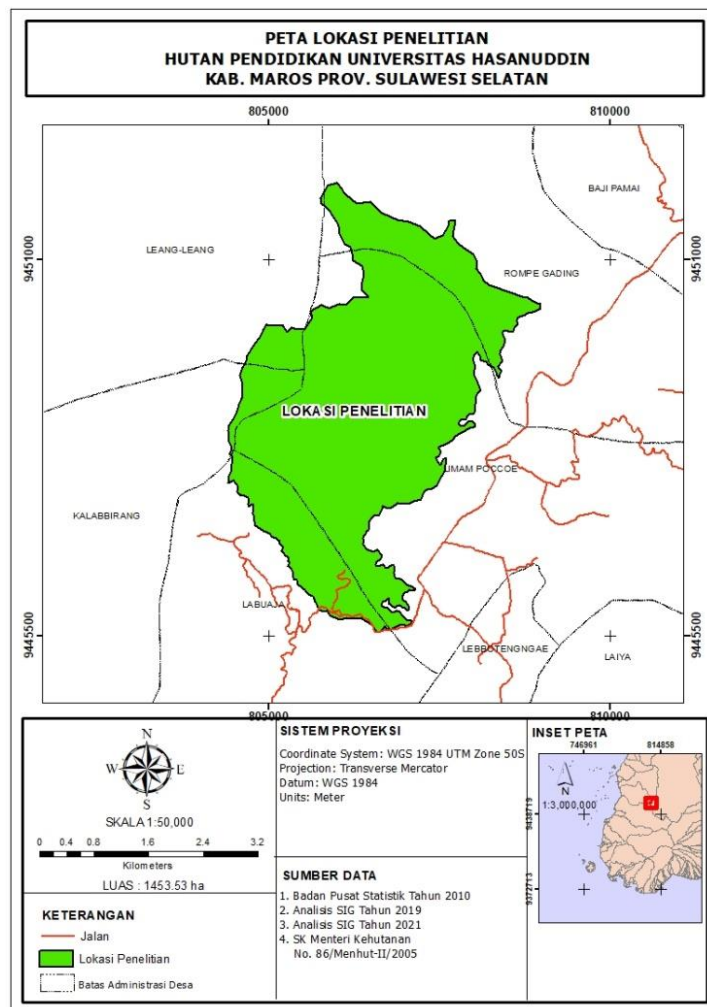
n = Jumlah titik sampel

Standar error menyatakan bahwa semakin kecil nilai standar maka semakin mewakili sampel dari keseluruhan populasi (Setyawan, 2016).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret 2021 – Desember 2021 dengan melalui dua tahapan, yaitu kegiatan lapangan dan analisis data. Pengumpulan data dilakukan pada bulan Maret – April 2021. Analisis data dilakukan pada bulan Juni – Desember 2021 di Laboratorium Perencanaan dan Sistem Informasi Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Universitas Hasanuddin. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian