

**PENDUGAAN BIOMASSA DAN STOK KARBON PADA
KAWASAN TAMAN HUTAN RAYA BONTOBAHARI
DENGAN MENGGUNAKAN MODEL PENDUGA INDEKS
VEGETASI BERBASIS CITRA SENTINEL 2**

SKRIPSI

**Rifky Nur Ilham
M01191217**



**PROGRAM STUDI KEHUTANAN
FAKULTAS KEHUTANAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

HALAMAN PENGESAHAN

PENDUGAAN BIOMASSA DAN STOK KARBON PADA KAWASAN TAMAN HUTAN RAYA BONTOBahari DEGAN MENGUNAKAN MODEL PENDUGA INDEKS VEGETASI BERBASIS CITRA SENTINEL 2

Disusun dan diajukan oleh

RIFKY NUR ILHAM

M011191217

Telah dipertahankan di hadapan Panitia ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi program sarjana Program Studi Kehutanan Fakultas

Kehutanan Universitas Hasanuddin

pada tanggal 16 Februari 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Ir. Daud Malamassam, M.Agr, IPU
NIP. 19540209 1 97802 1 001

Pembimbing Pendamping



Ir. Munajat Nursaputra, S.Hut., M.Sc., IPM
NIP. 19900729202012 1 012

Mengetahui,

Ketua Program Studi Kehutanan



Dr. Ir. Sitti Nuraeni, M.P.
NIP. 19680410199512 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rifky Nur Ilham
NIM : M011191217
Program Studi : Kehutanan
Jenjang : S1

Dengan ini menyatakan bahwa karya tulisan saya berjudul:

**“Pendugaan Biomassa Dan Stok Karbon Pada Kawasan Taman Hutan Raya
Bontobahari Dengan Menggunakan Model Penduga Indeks Vegetasi
Berbasis Citra Sentinel 2”**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain, bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 20 Februari 2024

Yang menyatakan



Rifky Nur Ilham

ABSTRAK

Rifky Nur Ilham (M011191217). Pendugaan Biomassa dan Stok Karbon pada Kawasan Taman Hutan Raya Bontobahari Dengan Menggunakan Model Penduga Indeks Vegetasi Berbasis Citra Sentinel 2 di bawah bimbingan Daud Malamassam dan Munajat Nursaputra.

Meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer akibat ulah manusia telah menimbulkan masalah pemanasan global dan perubahan iklim. Hutan memiliki peran penting dalam menyerap karbon dan mengurangi emisi gas rumah kaca, sehingga estimasi biomassa dan stok karbon yang akurat sangat penting dalam menghadapi masalah pemanasan global dan perubahan iklim. Metode penginderaan jauh dengan citra Sentinel-2 dapat digunakan untuk memperkirakan biomassa dan stok karbon secara efisien dan efektif. Penelitian ini bertujuan untuk menduga biomassa dan stok karbon di kawasan Taman Hutan Raya Bontobahari dengan menggunakan model pendugaan indeks vegetasi berbasis citra Sentinel-2. Pengumpulan data lapangan dilakukan melalui pengukuran dimensi pohon, jenis pohon, dan jumlah pohon. Biomassa dihitung menggunakan pendekatan alometrik dan nilai karbon dikonversi dari biomassa. Analisis statistik digunakan untuk mengukur korelasi dan regresi antara data NDVI hasil penginderaan jauh dan biomassa/stok karbon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 40 jenis spesies pohon dengan rata-rata biomassa sebesar 115,59 ton/ha dan stok karbon di lapangan sebesar 54,33 tonC/ha. Selanjutnya diketahui bahwa model regresi eksponensial merupakan model terbaik untuk mengestimasi stok karbon di Taman Hutan Raya Bontobahari dengan nilai *Adjusted-R²* sebesar 0,722 dan SEE sebesar 5,38. Estimasi stok karbon di kawasan tersebut adalah 179.353,04 tonC, di mana lahan kosong memiliki NDVI <0,5 dengan stok karbon 497,8 ton (0,3% dari total), semak belukar dan padang rumput (NDVI 0,5-0,6) memiliki stok karbon 15.133,2 ton (8,4%), vegetasi kerapatan rendah (NDVI 0,6-0,7) memiliki stok karbon 41.009,5 ton (22,8%), sementara vegetasi kerapatan tinggi (NDVI >0,7) memiliki stok karbon tertinggi, 122.886,5 ton (68,5%)

Kata Kunci: *Biomassa, stok karbon, Sentinel 2, NDVI*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "**Pendugaan Biomassa dan Stok Karbon pada Kawasan Taman Hutan Raya Bontobahari Dengan Menggunakan Model Penduga Indeks Vegetasi Berbasis Citra Sentinel 2**".

Skripsi ini merupakan hasil dedikasi, kerja keras, dan perjuangan panjang yang penulis lakukan selama perjalanan pendidikan di program studi Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Universitas Hasanuddin. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Kehutanan (S.Hut).

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan bantuan, bimbingan, dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak **Prof. Dr. Ir. Daud Malamassam, M.Agr., IPU** dan **Bapak Ir. Munajat Saputra, S.Hut., M.Sc., IPM** selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
2. Bapak **Dr.Ir. Syamsu Rijal, S.Hut.,M.Si., IPU** dan **Bapak Prof. Dr. Ir. Samuel A. Paembonan, M.Sc** selaku penguji yang telah membantu dalam memberikan kritik serta saran guna perbaikan skripsi ini.
3. Ibu **Dr. Ir. Sitti Nuraeni, M.P** selaku Ketua Program Studi Kehutanan serta Bapak/Ibu Dosen dan seluruh Staf Administrasi Fakultas Kehutanan atas bantuannya
4. Kakak, adik serta teman-teman di **Laboratorium Perencanaan dan Sistem Informasi Kehutanan**, terkhusus **Ahmad Zam Zam Hidayatullah, S.Hut, Alif Fitrah, Refly, Erlangga Pratama Nasir, Lalu Kharismananda Hakiki, S.Hut, A. Muh. Syahrul R., Lucky Valentino, Andi Salma Nabila Hasan, S.Hut, Andi Yusnita, S.Hut, Nurul Muchlisah Basri, S.Hut, Tri Nadia Asrini dan PSIK 19 lainnya** atas bantuan selama penelitian ini dilakukan.

5. Teman seperjuangan **Adhiyaksa Ardaus, S.Hut, Akhyar Hamdi, Audrey Jentry Tangko, Hardiansyah Yusti Amada, S.Hut, Awaluddin dan Andi Musdalifah, S.Hut.**
6. Keluarga Besar **UKM Panahan** Universitas Hasanuddin dan teman-teman Volume 4 Karna terkhusus **Aliyah Sukma, Andi Nokhaidah Nurkhasanah, S.Farm, Fadlan Zharif, Nur Aflihyana Bugi, S.H, Kamsinar Nasir dan Nurhamida M, S.Psi**
7. Seluruh pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu penulis dalam semua proses selama berada di Fakultas Kehutanan Universitas Hasanuddin.

Terkhusus saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada kedua orang tua tercinta, **Alm. Muh. Hasbi dan Ellyani**, kakak dan adik saya, **Reski Dian Utami, Tri Ramdhani, Jalil Aqil dan Naifa Novitarani**. Terima kasih atas kasih sayang, pengorbanan, dan dukungan yang tiada henti-hentinya kalian berikan kepada saya. Kalian telah menjadi sumber kekuatan dan inspirasi bagi saya dalam menjalani setiap rintangan dan mencapai setiap pencapaian dalam hidup.

Dengan menyadari keterbatasan ilmu dan pengetahuannya, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Untuk itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak untuk meningkatkan kualitas skripsi ini. Penulis juga berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak

Makassar, 20 Februari 2024

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMBUNG	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan dan Kegunaan.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Biomassa dan Karbon.....	4
2.2. Penginderaan Jauh dan Citra	6
2.2.1. Penginderaan Jauh	6
2.2.2. Citra Sentinel-2	8
2.2.3. Pengolahan Citra.....	9
2.2.4. <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	11
2.3. Model Penduga dan Analisis Regresi.....	13
III. METODOLOGI PENELITIAN	16
3.1. Waktu dan Tempat	16
3.2. Alat dan Bahan	16

3.2.1.	Alat.....	16
3.2.2.	Bahan	17
3.3.	Metode Pelaksanaan Penelitian.....	17
3.3.1.	Pengolahan Citra.....	17
3.3.2.	Transformasi Indeks Vegetasi NDVI.....	18
3.3.3.	Pengambilan Data Lapangan	19
3.4.	Analisis Data	20
3.4.1.	Perhitungan Cadangan Karbon	20
3.4.2.	Analisis Korelasi dan Regresi.....	21
3.4.3.	Uji Akurasi.....	22
IV.	KEADAAN UMUM LOKASI	25
4.1.	Letak dan Luas	25
4.2.	Kondisi Fisik	25
4.3.	Kondisi Sosial, Ekonomi dan Budaya.....	26
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN	27
5.1.	Klasifikasi Nilai NDVI.....	27
5.2.	Hasil Pengukuran Biomassa dan Stok Karbon Lapangan.....	28
5.3.	Model Penduga Stok Karbon	30
5.4.	Uji Akurasi	32
5.5.	Estimasi Stok Karbon TAHURA Bontobahari	34
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	37
6.1.	Kesimpulan.....	37
6.2.	Saran.....	37
	DAFTAR PUSTAKA	38
	LAMPIRAN.....	42

DAFTAR TABEL

Tabel	Judul	Halaman
Tabel 1.	Karakteristik band pada citra Sentinel-2A	8
Tabel 2.	Klasifikasi NDVI	12
Tabel 3.	Klasifikasi hasil perhitungan korelasi	14
Tabel 4.	Bahan penelitian.....	17
Tabel 5.	Klasifikasi tutupan lahan berdasarkan NDVI dan observasi lapangan ...	27
Tabel 6.	Hasil inventarisasi Tahura Bontobahari	28
Tabel 7.	Variabel yang dianalisis	30
Tabel 8.	Rekapitulasi hasil analisis statistik model penduga stok karbon	31
Tabel 9.	Uji akurasi model	33
Tabel 10.	Sebaran stok karbon kawasan Tahura Bontobahari	34

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Judul	Halaman
Gambar 1.	Peta Lokasi Penelitian	16
Gambar 2.	Peta Sebaran Lokasi Plot Sampel Penelitian	20
Gambar 3.	Diagram alir penelitian	24
Gambar 4.	Klasifikasi nilai indeks NDVI	27
Gambar 5.	Peta klasifikasi sebaran stok karbon Kawasan Tahura Bontobahari tahun 2023	35

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Titik koordinat plot sampel Inventarisasi	43
Lampiran 2.	Data hasil inventarisasi dan perhitungan biomassa per plot.....	44
Lampiran 3.	Grafik Hasil Analisis Regresi	77

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer akibat ulah manusia telah menimbulkan masalah pemanasan global dan perubahan iklim yang dampaknya semakin terasa. Analisis ilmiah menunjukkan bahwa efek berbahaya dari perubahan iklim dapat dihindari dengan menjaga kenaikan suhu global tidak lebih dari 2°C hingga 1,5°C dibandingkan dengan masa pra-industri. Dunia setuju melalui Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), yang diadopsi di Paris pada tahun 2015, bahwa untuk menghindari dampak berbahaya dari perubahan iklim, gas rumah kaca harus dikurangi sebanyak mungkin dan mencapai tingkat NZE (*Net Zero Emission*) atau mendekati nol pada paruh kedua abad ke-21. Pada saat itu, sistem lahan dan hutan atau teknologi seperti penangkapan dan penyimpanan karbon, diharapkan mampu menyerap emisi yang ada dalam atmosfer dan meninggalkan emisi bersih menjadi nol yang disebut sebagai *Net Zero Emission*, NZE (KLHK, 2022).

Jumlah CO₂ yang diserap tanaman harus ditingkatkan semaksimal mungkin dan pelepasan karbondioksida (emisi) ke udara harus dibatasi dengan konsentrasi yang serendah mungkin. Biomassa adalah penyimpanan karbon. Hutan berperan penting dalam menyerap karbon melalui fotosintesis dan menyimpannya dalam bentuk biomassa. Tingkat cadangan karbon bervariasi dari satu negara ke negara lain, tergantung pada keanekaragaman dan kepadatan tumbuhan yang ada, jenis tanah dan pengelolaannya. Mengingat fungsi hutan sebagai penyerap karbon, informasi tentang jumlah karbon yang diterima oleh tutupan hutan (stok karbon) menjadi penting (Arianingsih, dkk., 2021)

Salah satu arah kebijakan umum dalam Rencana Kehutanan Tingkat Nasional (RKTN) adalah peningkatan mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Dalam mendukung kebijakan umum tersebut telah ditetapkan dalam kebijakan dan strategi yang menjadi arahan pemanfaatan ruang di kawasan hutan untuk menjamin upaya pencapaian target NDC salah satunya adalah pada kawasan konservasi (KLHK, 2022). Tahura Bontobahari dengan luas 3.758,7 ha

berdasarkan SK No. 362/Menlhk/Setjen/PLA.0/5/2019 yang berada di Kecamatan Bontobahari, Kabupaten Bulukumba. Selain berfungsi untuk menjaga kelestarian kawasan hutan beserta ekosistem serta terbinanya koleksi biodiversitas flora dan fauna, fungsi ekologis dari Tahura juga diharapkan mampu memberikan kontribusi dalam menyerap karbon yang lebih besar karena banyaknya stratifikasi tajuk yang terbentuk dari berbagai tingkat vegetasi di dalamnya.

Dengan melihat fungsi hutan sebagai penyerap karbon maka perlu dikembangkan metode-metode untuk estimasi stok karbon serta memantau perubahannya secara periodik (Antono, dkk., 2013). Informasi spasial indeks biogeofisik memberikan gambaran tentang kondisi kawasan pada tingkat unit pengelola dalam hubungannya dengan emisi dan serapan gas rumah kaca yang dapat digunakan sebagai landasan dalam penetapan lokasi prioritas pelaksanaan program sehingga berkontribusi terhadap penurunan emisi gas rumah kaca dari deforestasi dan degradasi serta kebakaran hutan dan lahan (karhutla), dan peningkatan serapan gas rumah kaca sejalan dengan komitmen NDC (KLHK, 2022).

Pada awalnya pengukuran biomasa dilakukan secara terestris pada skala plot. Namun metode konvensional tersebut biasanya membutuhkan waktu dan biaya cukup besar dalam pelaksanaannya sehingga untuk mengestimasi biomassa serta stok karbon dalam kawasan yang relatif sangat luas dibutuhkan suatu cara untuk mengekstrapolasikan perhitungan berbasis plot ke tingkat bentang alam. Metode yang dapat digunakan adalah dengan memanfaatkan citra multispektral berbasis penginderaan jauh yakni dengan mengkaji hubungan indeks vegetasi melalui nilai pantulan spektral terhadap biomassa pada suatu vegetasi.

Secara khusus, munculnya sensor multispektral yang tersedia secara gratis seperti Sentinel-2 menawarkan prospek yang lebih baik untuk pemodelan dan pemantauan vegetasi. Sensor ini ditandai dengan sifat spasial, spektral, dan radiometrik yang ditingkatkan yang dapat memperkirakan cadangan karbon di atas permukaan tanah pada skala lokal dan regional (Mngadi, dkk., 2021).

Kandungan stok karbon dapat diperkirakan dengan menggunakan indeks vegetasi, khususnya NDVI (*Normalized Differential Vegetation Index*). NDVI adalah perhitungan citra yang digunakan untuk menentukan tingkat kehijauan.

NDVI dapat menunjukkan parameter yang terkait dengan parameter vegetasi, misalnya biomassa tanaman serta luas kanopi daun, yang memberikan perkiraan distribusi vegetasi (Nurjannah, 2023).

Berdasarkan uraian di atas maka perlu dilakukan penelitian ini untuk mengetahui biomassa dan stok karbon di kawasan Tahura Bontobahari dengan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh berupa citra Sentinel-2 melihat tingkat efektifitas serta efisiensi dari segi waktu dan biaya yang diberikan untuk wilayah kajian yang cenderung luas. Data potensi karbon tersebut dapat dijadikan sebagai acuan dalam perencanaan oleh pemerintah daerah untuk pengembangan wilayah tersebut kedepannya.

1.2. Tujuan dan Kegunaan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menduga biomassa vegetasi pepohonan di atas permukaan,
2. Mengetahui model pendugaan cadangan karbon di atas permukaan melalui analisis indeks vegetasi berbasis Citra Sentinel-2.
3. Mengetahui cadangan atau stok karbon di atas permukaan Kawasan Tahura Bontobahari, Tahun 2023.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan atau informasi dasar yang berguna bagi Pemerintah Kabupaten Bulukumba dalam penyusunan Rencana Pembangunan Kabupaten dan khususnya dalam Rencana Pengelolaan Tahura Bontobahari.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biomassa dan Karbon

Biomassa merupakan jumlah bahan organik yang berasal dari makhluk hidup, termasuk tumbuhan, hewan dan mikroba. Biomassa adalah berat total atau volume suatu organisme dalam suatu area atau volume tertentu. Selain itu, biomassa dapat juga didefinisikan sebagai total materi hidup yang ada di atas permukaan pada suatu pohon yang dinyatakan dalam satuan ton berat kering per satuan luas (Sutaryo, 2009).

Total biomassa tegakan di atas tanah dari elemen vegetasi berkayu merupakan salah satu sumber karbon terbesar. Biomassa di atas tanah terdiri dari semua batang kayu, cabang, dan daun pohon hidup, tanaman merambat, pemanjat, dan epifit serta tumbuhan bawah herba. Untuk lahan pertanian, ini termasuk biomassa tanaman dan gulma. Kolam bahan organik mati (*necromass*) termasuk pohon mati tumbang dan puing-puing kayu kasar lainnya (Hairiah, dkk., 2001).

Pohon dan organisme fotoautotrof lainnya menyerap CO₂ (karbondioksida) dari atmosfer melalui proses fotosintesis, mengubahnya menjadi karbon organik (karbohidrat) dan menyimpannya dalam biomassa tubuhnya seperti batang, daun, akar dan umbi. Hasil keseluruhan dari proses fotosintesis sering disebut produktivitas primer. Dalam proses respirasi, memungkinkan sebagian CO₂ yang terikat dilepaskan ke atmosfer dalam bentuk CO₂. Besarnya biomassa hutan merupakan selisih antara produksi dan konsumsi melalui fotosintesis. Perubahan jumlah biomassa ini dapat terjadi melalui warisan alam dan aktivitas manusia seperti penghijauan, pemanenan dan penambangan. Itu juga bisa berubah karena bencana alam (Sutaryo, 2009).

Melalui proses fotosintesis yang dilakukan tumbuhan berperan penting mengurangi konsentrasi CO₂ di udara. Dalam proses fotosintesis maka CO₂ di udara akan ditangkap tumbuhan kemudian bersama air dan bantuan cahaya matahari diubah menjadi karbohidrat dalam bentuk glukosa (C₆H₁₂O₆) yang disimpan pada bagian-bagian tumbuhan (akar, batang, ranting, daun, buah dan biji) (Irawan and Purwanto, 2020).

Perkiraan biomassa vegetasi dapat memberi kita informasi tentang nutrisi dan karbon yang tersimpan dalam vegetasi secara keseluruhan, atau jumlah dalam fraksi tertentu seperti kayu yang dapat diekstraksi. Untuk mengukur biomassa vegetasi termasuk pohon tidaklah mudah, terutama pada tegakan campuran yang umurnya tidak merata. Ini membutuhkan tenaga kerja yang cukup besar dan sulit untuk mendapatkan pengukuran yang akurat mengingat variabilitas distribusi ukuran pohon. Hampir tidak pernah mungkin untuk mengukur semua biomassa pada area sampel yang cukup besar dengan pengambilan sampel destruktif dan beberapa bentuk alometri digunakan untuk memperkirakan biomassa masing-masing pohon hingga sifat yang mudah diukur seperti diameter batangnya (Hairiah, dkk., 2001).

Terdapat 5 bagian tempat penyimpanan karbon (*carbon pool*), yaitu (Irawan and Purwanto, 2020):

- a. Biomassa di atas permukaan tanah (pohon, tiang, pancang, semai, tumbuhan bawah), dengan persentase 70% dalam menyimpan karbon
- b. Biomassa di bawah permukaan tanah (akar), dengan persentase penyimpanan karbonnya sebesar 20%
- c. Biomassa serasah dan non kayu di atas permukaan tanah, dengan persentase penyimpanan karbon sebesar 2%
- d. Biomassa pohon mati dan kayu mati (nekromas), dengan persentase penyimpanan karbon sebesar 5%
- e. Biomassa tanah, yaitu bahan organik tanah dengan persentase penyimpanan karbon sebesar 3%

Menurut Sutaryo (2009) terdapat 4 cara untuk menghitung biomassa yaitu (a) sampling dengan pemanenan (*Destructive sampling*) secara in situ; (b) sampling tanpa pemanenan (*Non-destructive sampling*) dengan data pendataan hutan secara in situ; (c) Pendugaan melalui penginderaan jauh; dan (d) pembuatan model.

Biomassa hutan sangat relevan dengan isu perubahan iklim. Biomassa hutan berperan penting dalam siklus biogeokimia, khususnya siklus karbon. Sekitar 50% dari total karbon di hutan disimpan dalam vegetasi hutan. Akibatnya, ketika hutan

dihancurkan, jumlah karbon di atmosfer meningkat karena faktor-faktor seperti kebakaran dan penggundulan hutan (Irawan & Purwanto, 2020).

Deforestasi dan degradasi hutan yang terjadi disebabkan karena adanya tekanan manusia terhadap sumber daya hutan. Hal tersebut menyebabkan menurunnya jumlah dan kualitas hutan yang tidak hanya menyebabkan berkurangnya jumlah karbon yang tersimpan, namun juga secara tidak langsung menyebabkan pelepasan emisi karbon ke atmosfer serta mengurangi kemampuan hutan dalam menyerap karbon. Oleh karena itu, hutan sangat berperan penting di dalam upaya mitigasi perubahan iklim, melalui pertumbuhan riap pohon sebagai tempat penyimpanan CO₂ (Manuri, dkk., 2011).

2.2. Penginderaan Jauh dan Citra

2.2.1. Penginderaan Jauh

Penginderaan jauh merupakan istilah yang berasal dari terjemahan *remote sensing* yang telah dikenal sekitar tahun 1950-an di Amerika Serikat. Dan istilah tersebut mulai diperkenalkan di beberapa negara Eropa pada tahun 1970-an dengan beberapa sebutan yang berbeda-beda, seperti *teledirection* (Prancis), *telepercepcion* (Spanyol) dan *fernerkundung* (Jerman). *Remote sensing* (Penginderaan Jauh) didefinisikan sebagai ilmu dan seni pengukuran untuk mendapatkan informasi suatu obyek atau fenomena, menggunakan suatu alat perekaman jarak yang jauh tanpa melakukan suatu kontak langsung dengan objek atau fenomena yang sedang di amati (Jaya, 2014).

Data penginderaan jauh dapat berbentuk data citra (*image*), grafik atau data numerik. Untuk menjadi suatu informasi, data tersebut harus dilakukan analisis terlebih dahulu. Proses analisis data menjadi informasi tersebut disebut sebagai interpretasi data. Interpretasi data yang dilakukan dalam penginderaan jauh memerlukan data awal sebagai acuan seperti peta tematik, data statistik serta data lapangan (Palimbunga, 2020).

Teknologi penginderaan jauh dimanfaatkan untuk membantu dalam melakukan estimasi stok karbon hutan secara kuantitatif melalui model statistik yang dibangun dalam beberapa transformasi citra yang berkorelasi dengan biomassa hutan. Pendugaan biomassa menggunakan penginderaan jauh

dilakukan melalui analisis data yang diperoleh dari waktu dan tempat tertentu tanpa kontak langsung dengan objek atau daerah yang dikaji. Data yang umum digunakan dalam penginderaan jauh berupa citra digital yang direkam melalui sensor non-kamera berupa satelit seperti: Landsat ETM+, SPOT, NOAA, Quickbird, dan Ikonos (Tunggadewi, dkk., 2014).

Obyek-obyek yang ada dipermukaan bumi diinterpretasikan berdasarkan nilai pantulan energi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan kemudian direkam oleh sensor. Ada 3 kelompok utama obyek permukaan bumi yang dapat terdeteksi yakni: air, tanah, dan vegetasi yang memiliki karakteristik pancaran energi elektromagnetik yang berbeda dengan kemampuan pemetaan citranya bergantung dengan karakteristik dari satelit citra masing-masing (Suwargana, 2013).

Penginderaan jauh terutama untuk vegetasi dilakukan dengan memperoleh informasi reflektansi gelombang elektromagnetik dari kanopi menggunakan sensor pasif. Telah diketahui dengan baik bahwa pantulan spektrum cahaya dari tanaman berubah sesuai dengan objek yang terdapat di permukaan bumi seperti tanaman, kadar air dalam jaringan, dan faktor intrinsik lainnya. Pantulan dari vegetasi ke spektrum elektromagnetik (pantulan spektral atau karakteristik emisi vegetasi) ditentukan oleh karakteristik kimia dan morfologi permukaan objek. Emisivitas vegetasi di daerah inframerah dekat dan tengah telah dipelajari secara luas dalam kanopi tanaman. Indeks yang diekstraksi dari rentang spektrum cahaya ini dapat dikaitkan dengan berbagai karakteristik di luar pertumbuhan dan kuantifikasi kekuatan tanaman yang terkait dengan kadar air, pigmen, kadar gula dan karbohidrat, kadar protein, dan aromatik, antara lain (Xue and Su, 2017).

Penginderaan jauh merupakan teknik paling efisien untuk melakukan pengukuran stok karbon apabila diaplikasikan pada areal yang luas karena dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh dapat mengurangi biaya, waktu serta tenaga. Banyak pengukuran stok karbon yang saat ini digunakan dengan memanfaatkan teknik penginderaan jauh dengan sistem optik menggunakan data multispektral mulai dari resolusi rendah, menengah, dan tinggi. Namun, kelemahan dari data multispektral ini hanya merekam bagian kanopi atau kerapatan vegetasinya (Mponoi, 2022). Kandungan karbon dalam suatu vegetasi

dapat diestimasi melalui biomassa hutan karena 50% biomassa tersusun atas karbon (Brown dan Gaston, 1996 dalam Widhi & Sigit, 2014).

2.2.2. Citra Sentinel-2

Sentinel-2 adalah misi pencitraan satelit beresolusi spasial luas dan halus dari Badan Antariksa Eropa (ESA) yang dikembangkan dalam kerangka program Copernicus Uni Eropa. Menurut tujuan utama program, misi Sentinel-2 dirancang untuk kelangsungan data dan peningkatan misi Landsat dan SPOT. Satelit Sentinel-2 mencakup area dari garis lintang -56° hingga 84° , dan data utamanya ditujukan untuk mendukung layanan darat global, termasuk pemantauan vegetasi, tutupan tanah dan air, saluran air pedalaman, dan area pesisir. Satelit Sentinel-2 A diluncurkan pada 23 Juni 2015 dan kini telah beroperasi secara rutin. Penambahan satelit pelengkap Sentinel-2B akan diluncurkan pada pertengahan tahun 2016. Satelit kembar akan berada di orbit yang sama dan terpisah 180° satu sama lain, sehingga meningkatkan frekuensi jangkauan (Wang dkk, 2016).

Citra Sentinel-2 mencakup 13 pita spektral dalam panjang gelombang tampak, inframerah dekat (NIR) dan inframerah gelombang pendek (SWIR), dengan empat pita pada 10 m, enam pita pada 20 m dan tiga pita pada resolusi spasial 60 m. Sensor mencakup bidang pandang 290 km, petak yang jauh lebih luas dari sensor Landsat (185 km) yang telah diterapkan secara luas untuk pemantauan global selama beberapa dekade terakhir. Karakteristik dari 13 band dari Sentinel-2 dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik band pada citra Sentinel-2A

Band	Panjang gelombang	Resolusi spasial
	(nm)	(m)
Band 1 – <i>Coastal aerosol</i>	443	60
Band 2 – <i>Blue</i>	490	10
Band 3 - <i>Green</i>	560	10
Band 4 - <i>Red</i>	665	10
Band 5 – <i>Vegetation Red Edge</i>	705	20
Band 6 – <i>Vegetation Red Edge</i>	740	20

Band	Panjang gelombang (nm)	Resolusi spasial (m)
Band 7 – <i>Vegetation Red Edge</i>	783	20
Band 8 – <i>NIR</i>	842	10
Band 8A – <i>Vegetation Red Edge</i>	865	20
Band 9 – <i>Water vapour</i>	940	60
Band 10 – <i>SWIR-Cirrus</i>	1375	60
Band 11 – <i>SWIR</i>	1610	20
Band 12 – <i>SWIR</i>	2190	20

Sumber : Wang dkk., 2016

Untuk data Sentinel-2, band yang beresolusi 10 m dan 20 m dapat digunakan untuk pemetaan tutupan/penggunaan lahan (LCLU) dan deteksi perubahan. Sedangkan dengan band beresolusi 60 m ditujukan untuk koreksi atmosfer dan penyaringan awan (yaitu, pita biru 443 nm untuk pengambilan aerosol dan deteksi awan, pita NIR 940 nm untuk koreksi uap air, dan pita SWIR 1375 nm untuk deteksi awan tipis/cirrus) (Wang dkk, 2016)

2.2.3. Pengolahan Citra

Atmosfer merupakan lapisan berupa campuran gas yang mengelilingi bumi. Dalam penginderaan jauh, unsur-unsur tersebutlah yang mempengaruhi informasi yang langsung diturunkan dari kanal suatu citra, karena pantulan spektral masih bercampur dengan unsur-unsur dan molekul yang terdapat di atmosfer. Pengolahan citra diperlukan jika kualitas citra yang akan digunakan tidak mencukupi dalam melakukan pengolahan lebih lanjut. Citra yang diperoleh melalui perekaman sensor tidak lepas dari kesalahan, akibat dari mekanisme perekaman sensor, gerakan dan wujud dari geometri bumi, serta kondisi dari atmosfer saat perekaman. Perbaikan citra agar kualitasnya menjadi lebih baik disebut sebagai restorasi citra (Palimbunga, 2020).

Restorasi (koreksi) citra adalah pengkondisian citra yang digunakan agar memberikan informasi yang akurat secara geometris dan radiometris. Proses koreksi ini juga dipandang sebagai upaya untuk membangun kembali spektral yang tampak dan geometri seperti yang seharusnya. Koreksi radiometrik biasa

disebut operasi kosmetik citra, karena proses didalamnya mencakup proses pemolesan wajah citra agar layak dipakai.

Koreksi Radiometrik dan Atmosferik

Sebelum memanfaatkan citra satelit, melakukan koreksi radiometrik untuk ekstraksi informasi merupakan prosedur standar. Hal tersebut dilakukan karena hasil rekaman satelit mengalami kesalahan yang diakibatkan gangguan atmosfer. Gangguan atmosfer membuat nilai pantulan yang diterima oleh sensor mengalami penyimpangan. Koreksi radiometrik dimaksudkan untuk menyusun nilai pantulan yang direkam oleh sensor dengan nilai yang mendekati atau mempunyai pola yang seperti pantulan objek yang sebenarnya sesuai dengan panjang gelombangnya (Parman, 2010).

Kesalahan dalam melakukan interpretasi biasanya terjadi akibat adanya penyimpangan dari nilai reflektan. Hal tersebut terjadi akibat adanya penyerapan, hamburan, dan pantulan atmosfer sehingga terdapat perbedaan nilai reflektansi citra satelit dengan objek sebenarnya. Nilai reflektansi sangat penting dalam proses klasifikasi objek pada citra secara digital. Koreksi atmosferik mampu menghilangkan pengaruh atmosfer dan mengembalikan nilai reflektansi sesuai dengan nilai reflektansi objek sebenarnya di permukaan bumi (Siregar, dkk., 2018).

Metode koreksi atmosfer terdiri dari tiga metode: transfer radiasi, koreksi relatif berdasarkan karakteristik citra dan regresi linier permukaan. Di antara metode ini, model transfer radiasi lebih banyak digunakan dalam citra satelit dengan akurasi perhitungan reflektifitas yang lebih tinggi (Siregar, dkk., 2018).

Koreksi Geometrik

Geometrik merupakan posisi geografis yang berhubungan dengan distribusi keruangan (*spatial distribution*). Geometrik memuat tentang informasi data yang mengacu kepada bumi (data georeferencing) baik pada posisi (sistem koordinat lintang dan bujur) maupun informasi yang terkandung di dalamnya (Lukiawan dkk, 2019).

Menurut Mather (1987) dalam (Lukiawan dkk, 2019), koreksi geometrik merupakan transformasi citra hasil penginderaan jauh sehingga citra tersebut

mempunyai sifat-sifat peta dalam bentuk, skala dan proyeksi. Secara mendasar transformasi geometrik yang paling mendasar adalah penempatan kembali posisi *pixel* sedemikian rupa, sehingga pada citra digital yang tertransformasi dapat dilihat gambaran objek di permukaan bumi yang terekam sensor.

Koreksi Geometrik memiliki tujuan utama untuk menghilangkan distorsi geometrik pada citra yang sudah dapat diperkirakan seperti pengaruh sistem optik yang digunakan, faktor kelengkungan dan rotasi bumi serta variasi sudut pengamatan kamera (Hakim dkk, 2012). Terdapat beberapa metode koreksi geometrik yang sering digunakan yakni *image to image*, *image* dengan peta maupun *image* dengan data lapangan (Lukiawan dkk, 2019).

2.2.4. Normalized Difference Vegetation Index

Indeks vegetasi adalah persentase pantulan radiasi matahari oleh permukaan daun yang berhubungan dengan konsentrasi klorofil. Tingkat kehijauan vegetasi berbanding lurus dengan banyaknya konsentrasi klorofil yang dikandung oleh permukaan vegetasi tersebut. Hal ini dapat dijadikan informasi terkait dengan tingkat kerapatan suatu vegetasi. Data tentang kerapatan vegetasi sangat penting dalam melakukan inventarisasi dan pemantauan wilayah, karena bisa digunakan dalam menduga *leaf area index* (LAI), biomassa, volume tegakan, produktivitas dan lain-lain (Palimbunga, 2020).

Beberapa jenis indeks vegetasi yang sering dijumpai yaitu NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), RVI (*Ratio Vegetation Index*), TRVI (*Transformed RVI*), DVI (*Difference Vegetation index*), GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*), dan SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*).

Salah satu indeks yang paling banyak digunakan dan diimplementasikan yang dihitung dari informasi multispektral sebagai rasio normalisasi antara band *Red* dan *NIR* (*Near-infrared*) adalah *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Penggunaan langsung NDVI adalah untuk mengkarakterisasi pertumbuhan atau kekuatan kanopi; karenanya, banyak penelitian telah

membandingkannya dengan Leaf Area Index (LAI), di mana LAI didefinisikan sebagai luas daun bersisi tunggal per luas tanah (Xue and Su, 2017).

Klasifikasi nilai NDVI disajikan pada Tabel 2, yang perhitungannya dilakukan dengan untuk menghitung NDVI dengan mengadopsi metode Huete, dkk. (1990) dalam Kevin, dkk. (2019) sebagai berikut :

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Keterangan:

NDVI : *Normalized Different Vegetation Index*

NIR : Nilai spektral band *Near-infrared* (825 μm)

Red : Nilai spektral band *Red* (665 μm)

Tabel 2. Klasifikasi NDVI

Nilai NDVI	Jenis Penutupan Lahan
< 0	Badan Air
0 – 0,1	Tanah Kosong
0,2 – 0,3	Vegetasi Sedang
0,4 – 1	Vegetasi Tinggi

Sumber: Kevin, dkk., 2019

Nilai NDVI berkisar dari -1 hingga 1 terlepas dari penggunaan *radiance*, *reflectance*, atau DN sebagai input. Secara umum, nilai negatif untuk badan air, mendekati nol untuk batu, pasir, atau permukaan beton, dan positif untuk vegetasi, termasuk tanaman, semak, rumput, dan hutan (Jones and Vaughan (2010); dalam Huang, dkk., 2021).

Salah satu masalah umum yang diketahui terkait dengan NDVI adalah ketidakpekaannya terhadap perubahan lingkungan dan/atau biomassa ketika kondisi lingkungan dan biomassa mencapai tingkat tertentu yang tinggi. Van Der Meer, dkk. (2001) menemukan bahwa nilai NDVI menjadi jenuh pada nilai biomassa yang lebih besar (>100 ton/ha) untuk hutan berdaun lebar. Di sisi lain,

perhitungan NDVI peka terhadap komponen atmosfer, tanah, dan piksel. Respon spektral terhadap faktor-faktor ini tidak persis sama pada dua pita spektral yang digunakan untuk perhitungan NDVI, memperumit pola perilaku NDVI. Akibatnya, ada kemiripan yang erat dalam nilai NDVI antara hutan gugur dewasa dan rumput lapangan golf (Huang, dkk., 2021).

2.3. Model Penduga dan Analisis Regresi

Model penduga adalah model yang digunakan untuk menyatakan hubungan antara dua atau lebih variabel dan atau model yang dapat digunakan untuk menganalisis ada atau tidak adanya pengaruh satu atau lebih variabel bebas sebagai variabel penduga (*predictor*) yang disimbolkan dengan huruf “X” terhadap variabel terikat (*dependent*) sebagai variabel respon yang dilambangkan dengan huruf “Y”. Analisis model penduga dilakukan dengan menggunakan analisis regresi dan korelasi untuk mengetahui ataupun menentukan karakteristik hubungan antar variabel (Susanti, dkk., 2019).

Analisis regresi linear sederhana merupakan salah satu metode untuk menjelaskan hubungan antara satu variabel bebas (*independent*) dan satu variabel respon (*dependent*) (Susanti, dkk., 2019). Regresi eksponensial adalah analisis regresi dimana variabel bebas berfungsi sebagai pangkat atau *eksponen*, regresi logaritmik adalah analisis yang dimana variabel respon bersifat dikotomus, dan regresi polynominal adalah regresi yang variabel bebasnya sebagai faktor pangkat terurut. Bentuk matematis dari model regresi yang telah dijelaskan di atas adalah sebagai berikut:

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

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

Untuk memilih model regresi yang terbaik pada setiap jenis indeks vegetasi dapat dilihat nilai tertinggi dari koefisien korelasi atau R dan koefisien determinasi atau R² (Widhi and Sigit, 2014). Korelasi digunakan untuk mengetahui hubungan antara dua variabel, besarnya korelasi dikisaran 0 s/d 1. Semakin tinggi nilai korelasi maka hubungan antar variabel yang dimiliki sangat tinggi juga berlaku sebaliknya apabila nilai korelasi rendah maka hubungan antar keduanya semakin rendah pula (Sarwono, 2006), dimana klasifikasi nilai korelasi beserta keterangannya secara lebih lengkap diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi hasil perhitungan korelasi

Nilai Korelasi	Keterangan
< 0,20	Hubungan dapat dianggap tidak ada
0,20 – 0,40	Hubungan ada tetapi rendah
> 0,40 – 0,70	Hubungan cukup
> 0,70 – 0,90	Hubungan tinggi
> 0,90 – 1,00	Hubungan sangat tinggi

Sumber: Sarwono, 2006

Untuk mengetahui bagaimana pengaruh koefisien regresi yang dihasilkan oleh pemodelan terhadap potensi biomassa secara signifikan, proses pengujian yang dilakukan mengarah pada aturan statistik. Keakuratan model regresi diverifikasi dengan membandingkan nilai biomassa hasil regresi dengan data pengukuran sampel lapangan yang tidak termasuk dalam konstruksi model regresi, kemudian menghitung deviasinya. Standar error estimasi dihitung menggunakan rumus (Widhi dan Sigit, 2014):

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

Keterangan: SE = Standar Error Estimasi

y = Biomassa lapangan

\hat{y} = Biomassa hasil dengan berdasarkan persamaan regresi

n = Jumlah titik sampel

Pemilihan model terbaik didasarkan pada estimasi nilai standard error terkecil. Total biomassa hutan dan stok karbon di wilayah studi kemudian dihitung menggunakan model deviasi minimum (Widhi dan Sigit, 2014).