

ANALISIS PENDUGAAN STOK KARBON VEGETASI DENGAN PENGINDERAAN JAUH MENGGUNAKAN METODE *LIGHT USE EFFICIENCY* DI HUTAN PENGGARON, KOTA UNGARAN KABUPATEN SEMARANG PROVINSI JAWA TENGAH

Ma'ruf Arief Fadillah^{1*}, Nurhadi Bashit¹, Shofiyatul Qoyimah¹, Helik Susilo², Dessy Apriyanti³

¹Departemen Teknik Geodesi-Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Jawa Tengah Indonesia

Jl. Prof Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia-75123 Telp./Faks: (024) 736834

²Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang, Jawa Timur Indonesia

Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65141

³Jurusan Teknik Geologi - Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta

Jl. Ring Road Utara No.104, Ngropoh, Condongcatur, Daerah Istimewa Yogyakarta 55283

e-mail: marufarief346@gmail.com*

(Diterima 3 April 2023, Disetujui 21 Juni 2023)

ABSTRAK

Efek rumah kaca merupakan masalah iklim yang menyebabkan munculnya fenomena pemanasan global. Stok karbon merupakan eksternalitas yang diperhatikan pada pencegahan pemanasan global. Sebagai salah satu kawasan hutan terluas di Kota Ungaran, Hutan Penggaron berperan penting dalam menjaga stok karbon. Oleh sebab itu, perlu adanya kajian terhadap stok karbon di Hutan Penggaron sebagai sebagai salah satu pilar pengendalian emisi karbon di Kota Ungaran. Penelitian ini mengkaji tentang pendugaan kelimpahan stok karbon Hutan Penggaron. Stok karbon diestimasi menggunakan penginderaan jauh dengan metode *light use efficiency* (LUE). Metode LUE memperoleh nilai estimasi biomassa vegetasi menggunakan 3 parameter antara lain fraksi radiasi aktif fotosintesis (*fPAR*) yang dimodelkan menggunakan NDVI, efisiensi penggunaan cahaya matahari maksimum, serta *photosynthetically active radiation* (PAR). Berdasarkan hasil pemodelan, Hutan Penggaron dengan luas kawasan sebesar 9,183 km² memiliki total kandungan stok karbon sebesar 3.049.515,14 KgC. Total stok karbon per hektar adalah 3.049,515 KgC/Ha. Lahan non-vegetasi memiliki kandungan stok karbon terendah sebesar -20,418 C, sementara kelas kerapatan sangat tinggi memiliki kandungan stok karbon tertinggi sebesar 2.980.908.135,909 C. Pohon Mahoni merupakan jenis pohon dengan kemampuan serapan karbon terbesar dengan rata-rata diameter batang sebesar 46,921 cm. Hasil pemodelan stok karbon di Hutan Penggaron memiliki akurasi nilai RMSE sebesar 97,289 KgC. Uji korelasi menggunakan uji korelasi *Pearson* dengan hasil korelasi sebesar 0,0974. Nilai uji Kolmogorov-Smirnov pada tingkat kepercayaan 90% dan level signifikansi 10% adalah sebesar 0,2. Nilai uji statistik adalah sebesar 0,111. Hasil penelitian menunjukkan adanya stok karbon dalam jumlah besar di Hutan Penggaron sehingga diharapkan adanya upaya pelestarian ekologis terhadap keberlangsungan Hutan Penggaron.

Kata kunci : LUE, NDVI, PAR, Stok Karbon.

ABSTRACT

The greenhouse effect is a climate problem that causes the emergence of the phenomenon of global warming. Carbon stock is an externality that is considered in preventing global warming. As one of the largest forest areas in Ungaran City, Penggaron Forest plays an important role in maintaining carbon stocks. Therefore, there is a need for a study of carbon stocks in the Penggaron Forest as one of the pillars of controlling carbon emissions in Ungaran City. This study examines the estimation of the abundance of carbon stocks in the Penggaron Forest. Carbon stocks are estimated using remote sensing with the light use efficiency (LUE) method. The LUE method obtains the estimated value of vegetation biomass using 3 parameters including the fraction of photosynthetically active radiation (*fPAR*) which is modeled using NDVI, the maximum efficiency of using sunlight, and photosynthetically active radiation (PAR). Based on the modeling results, Penggaron Forest with an area of 9.183 km² has a total carbon stock content of 3,049,515.14 KgC. The total

carbon stock per hectare is 3,049.515 KgC/Ha. Non-vegetated land has the lowest carbon stock content of 20.418 C, while the very high density class has the highest carbon stock content of 2,980,908,135.909 C. Mahogany trees are the type of tree with the greatest carbon absorption capability with an average trunk diameter of 46.921 cm. The results of carbon stock modeling in Penggaron Forest have an accuracy of the RMSE value of 97,289 KgC. The correlation test used the Pearson correlation test with a correlation result of 0.0974. The value of the Kolmogorov-Smirnov test at the 90% confidence level and 10% significance level is 0.2. The statistical test value is 0.111. The results of the study indicate that there is a large amount of carbon stock in the Penggaron Forest so that it is hoped that there will be ecological preservation efforts for the sustainability of the Penggaron Forest.

Keywords : LUE; NDVI; PAR; Carbon Stock;

1. PENDAHULUAN

Efek rumah kaca merupakan masalah iklim yang mempengaruhi seluruh dunia serta faktor utama munculnya fenomena pemanasan global (Suwedi, 2005). Salah satu faktor pendorong meningkatnya pemanasan global adalah tingginya emisi karbon di atmosfer dalam kaitannya dengan siklus karbon. Siklus karbon telah mendapatkan perhatian besar selama beberapa dekade terakhir dari para ilmuwan (Gomez dkk., 2019). Hal ini disebabkan perubahan penggunaan lahan yang tidak memperhatikan AMDAL serta penebangan hutan dalam skala besar menyebabkan berkurangnya proses penyerapan dan penyimpanan stok karbon oleh tumbuhan.

Stok karbon merupakan salah satu eksternalitas yang diperhatikan pada pembangunan kawasan dalam rangka pencegahan dan pengendalian pemanasan global. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi stok karbon adalah ketersediaan kawasan vegetasi (Zhou dkk., 2020). Karena itulah, sangat penting bagi Indonesia untuk mengkaji berapa besar kemampuan alam maupun berbagai aktivitas sektoral di Indonesia dalam menyumbang (*source*) maupun menyerap (*sink*) karbon. Oleh sebab itu, perlu adanya kajian terhadap kandungan stok karbon sebagai salah satu pilar pengendalian emisi karbon dan pemanasan global.

Penelitian ini mengkaji tentang pendugaan kelimpahan stok karbon hutan kota di Kota Ungaran menggunakan pemodelan *light use efficiency* (LUE). Studi kasus wilayah studi ini adalah Hutan Penggaron yang terletak di Kota Ungaran, Kabupaten Ungaran Provinsi Jawa Tengah. Dalam estimasi stok karbon parameter yang diperhitungkan antara lain adalah fraksi radiasi aktif fotosintesis (fPAR), efisiensi penggunaan cahaya matahari, serta *photosynthetically active radiation* (PAR). Ketika data tersebut selanjutnya digunakan dalam menghitung nilai karbon hutan Kota Ungaran dan selanjutnya divalidasi menggunakan pengukuran dan perhitungan stok karbon secara konvensional menggunakan rumus allometrik.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan jawaban seberapa besar stok karbon yang disimpan vegetasi Hutan Penggaron, serta pengaruh hutan tersebut terhadap penyerapan emisi karbon di Kota Ungaran. Adanya kajian mengenai estimasi stok karbon yang mampu diserap dan disimpan Hutan Penggaron dapat membantu memperkirakan jumlah emisi karbon yang mampu diserap Hutan Penggaron sehingga hal ini dapat membantu mengatasi pemanasan global serta menjaga iklim di Kota Ungaran.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Biomassa adalah materi yang berasal dari makhluk hidup, termasuk bahan organik baik yang ada di atas permukaan tanah maupun yang ada di bawah permukaan tanah. Biomassa pohon dapat dihitung menggunakan persamaan alometrik yang telah ditetapkan dalam SNI 7724 tahun 2011 tentang Pengukuran dan Perhitungan Cadangan Karbon dimana 47% dari biomassa diasumsikan sebagai karbon sehingga untuk mendapatkan estimasi karbon perlu dilakukan perhitungan biomassa yang disimpan vegetasi. Perhitungan biomassa vegetasi dilaksanakan dengan melakukan pengukuran keliling pada bagian batang vegetasi secara konvensional kemudian menghitung diameter vegetasi dengan rumus :

$$D : \frac{K}{\pi} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan :

D : Diameter vegetasi (cm)

Keliling : Keliling vegetasi (cm)

π : Rasio keliling lingkaran dengan diameter (3,14)

Merujuk pada ketentuan SNI 7724:11 tentang Pengukuran dan Perhitungan Cadangan Karbon, rumus untuk menghitung estimasi biomassa dari bagian batang, ranting dan daun vegetasi adalah:

$$B : 0,0912 \times D^{2,2} \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan :

B : Biomassa batang (Ca/ha)

D : Diameter vegetasi (cm)

2.2 Light Use Efficiency

Efisiensi penggunaan cahaya atau yang lebih populer dengan istilah *light use efficiency* (LUE) adalah sebuah proses terkait biokimia yang terlibat dalam respon *photoprotective* jaringan tanaman terhadap radiasi matahari yang berlebih ketika radiasi matahari yang diserap tanaman lebih banyak daripada yang dapat digunakan untuk fotosintesis (Gonsamo dan Chen, 2018). Model LUE didasarkan pada pengamatan indeks reflektansi fotokimia (PRI) dan fluoresensi yang diinduksi matahari (SIF) dari proses biokimia pada LUE dimana proses ini berkaitan erat dengan fotosintesis pada tumbuhan (Gonsamo dan Chen, 2018).

Dalam penginderaan jauh, konversi LUE dilakukan dengan menggunakan indeks vegetasi sederhana yang memanfaatkan *band* pada panjang gelombang tertentu. LUE menggunakan indeks vegetasi yang memberikan ukuran efisiensi dimana vegetasi dapat menggunakan cahaya datang untuk berfotosintesis. LUE sangat terkait dengan efisiensi penyerapan karbon dan tingkat pertumbuhan vegetasi (Harris Geospatial, 2017). Untuk mendapatkan nilai GPP menggunakan metode LUE, rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$GPP : \epsilon \times fPAR \times PAR \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan :

$$GPP : \text{Gross Primary Production } (\frac{gC}{m^2t})$$

$$\epsilon : \text{LUE Maksimum } \frac{MJ}{m^2t}$$

$$fPAR : \text{Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation } (\frac{MJ}{m^2t})$$

$$PAR : \text{Photosynthetically Active Radiation } (\frac{MJ}{m^2t})$$

Ada beberapa cara menghitung LUE maksimum dengan menggunakan penginderaan jauh salah satunya adalah *Red-Green Ratio Index* (RGRI).

Indeks ini memanfaatkan tingkat kemerahan daun yang disebabkan oleh antosianin terhadap klorofil. RGRI telah digunakan untuk memperkirakan perkembangan dedaunan pada kanopi. Nilai RGRI berkisar antara 0,1 hingga 8 dengan vegetasi hijau memiliki kisaran nilai antara 0,7 hingga 3 (Harris Geospatial, 2017). RGRI memanfaatkan panjang gelombang merah dan hijau dengan rumus sebagai berikut :

$$RGRI : \frac{Red}{Green} \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan :

RGRI : *Red-green ratio index*

Red : Saluran *red*

Green : Saluran *green*

2.3 Normalized Difference Vegetation Index

NDVI atau *Normalized Difference Vegetation Index* adalah salah satu jenis indeks vegetasi yang digunakan untuk mengukur kerapatan vegetasi dan berfungsi mengetahui kerapatan vegetasi serta menilai perubahan kesehatan tanaman. Indikator ini dipengaruhi tutupan tanah oleh vegetasi, kerapatan hingga tingkat kerapatan suatu vegetasi. NDVI juga menunjukkan kapasitas fotosintesis dari vegetasi yang menutupi permukaan tanah. Indeks vegetasi NDVI merupakan kombinasi matematis antara band *red* dan band NIR (*Near-Infrared Radiation*) yang telah lama dan umum digunakan sebagai indikator keberadaan dan kondisi vegetasi. Nilai NDVI diperoleh dengan kombinasi matematis antara band NIR dengan Red yang dipantulkan oleh tumbuhan dan dituliskan dalam persamaan (Zhao dkk., 2022) sebagai berikut :

$$NDVI : \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan :

NDVI : *Normal Difference Vegetation Index*

NIR : *Band Near Infra-Red*

Red : *Band Red*

Menurut Menteri Kehutanan Republik Indonesia dalam Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor: P.12/Menhut-I/2012 Tentang Perubahan Kedua Atas Peraturan Menteri Kehutanan Nomor P.32/Menhut-Ii/2009 Tentang Tata Cara Penyusunan Rencana Teknik Rehabilitasi Hutan Dan Lahan Daerah Aliran Sungai (RTk RHL-DAS), klasifikasi nilai NDVI dibagi ke dalam 5 kelas:

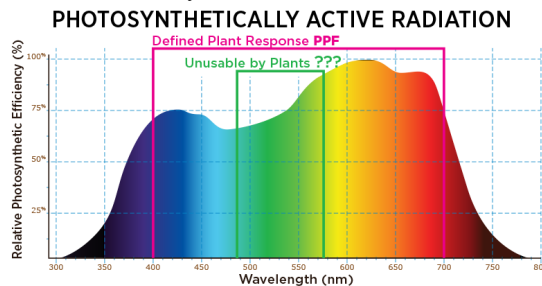
Kelas	NDVI	Keterangan
1	-1 s/d -0,03	Lahan tidak bervegetasi
2	-0,03 s/d 0,15	Kerapatan sangat rendah
3	0,15 s/d 0,25	Kerapatan rendah
4	0,26 s/d 0,35	Kerapatan sedang
5	0,36 s/d 1	Kerapatan tinggi

Tabel 1. Klasifikasi Kerapatan Vegetasi (Menteri Kehutanan, 2012)

2.4 Photosynthetically Active Radiation (PAR)

Radiasi aktif fotosintesis atau *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) adalah cahaya tampak dengan panjang gelombang 400-700 nm dan merupakan bagian dari spektrum cahaya yang digunakan oleh tanaman dalam proses fotosintesis (Haverkort, 2007). Panjang gelombang yang lebih pendek merusak sel dan disaring oleh lapisan ozon sementara panjang gelombang yang lebih panjang memiliki lebih sedikit energi dan

cocok digunakan dalam fotosintesis. Radiasi aktif fotosintesis (PAR) adalah sumber energi terpenting bagi tanaman dalam melakukan fotosintesis. Namun, intensitas PAR yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat menjadi faktor yang menyebabkan penghambatan partikel foton dan mengganggu fungsi peralatan fotosintesis (Howard dan Durako, 2013 dalam Kalaji dkk., 2014). Pada siang hari, PAR terus berubah dan tanaman mencoba untuk menjaga keseimbangan dengan mengubah energi radiasi terhadap penghambatan partikel foton cahaya.



Gambar 1. *Photosynthetically Active Radiation* (Albopepper, 2017)

LUE sangat penting untuk memahami dinamika fluks karbon dibawah perubahan iklim (Pei dkk., 2022). Model LUE mengekspresikan GPP sebagai hasil dari radiasi aktif fotosintesis (PAR) yang masuk, fraksi PAR yang diserap oleh tanaman (FPAR), nilai LUE maksimum, dan faktor lainnya (misalnya suhu, air, dan karbon dioksida) (Pei dkk., 2022). LUE biasanya diukur secara konvensional menggunakan alat ukur intensitas cahaya seperti *lux meter*, atau *spectrophotometer* untuk mendapatkan nilai yang akurat, namun LUE dapat diperoleh menggunakan teknik penginderaan jauh dengan presisi simulasi yang tinggi (Gonsamo dan Chen, 2018). Karena keunggulan ini, model LUE telah menjadi alat yang berharga untuk memperkirakan produktivitas vegetasi regional dan global.

Pigmen yang digunakan dalam menyerap PAR adalah klorofil. Klorofil adalah zat hijau daun yang merupakan penyerap cahaya utama pada alga dan tumbuhan tingkat tinggi lainnya dimana pigmen ini menyerap cahaya biru dan merah. Selain klorofil, tumbuhan juga memiliki pigmen lainnya yang membantu penyerapan cahaya seperti Karoten dan Xantofil. Klorofil a dan Klorofil b adalah dua pigmen fotosintesis terpenting yang ada pada tumbuhan tingkat tinggi (Environmental Monitor, 2010).

2.5 Teknik Sampling

Teknik *sampling* merujuk pada SNI 7724 tahun 2011 tentang Pengukuran dan Penghitungan Cadangan Karbon (pengukuran lapangan untuk penaksiran cadangan karbon hutan). Jenis *sampling*

yang digunakan adalah *simple random sampling* dengan toleransi kesalahan maksimal 20% (Badan Standar Nasional, 2011). Teknik *random sampling* adalah teknik pengambilan sampel yang dilakukan secara acak tanpa memandang karakteristik sampel (Saebani, 2015). Dalam teknik *random sampling* seluruh populasi diberikan kesempatan yang sama besar untuk menjadi anggota sampel (Saebani, 2015).

Berdasarkan SNI 7724 tahun 2011, dalam melakukan pengambilan sampel diperlukan stratifikasi yang bertujuan membagi wilayah kajian kedalam beberapa plot (tapak) (Badan Standar Nasional, 2011). Hal ini diperlukan sebab setiap sampel tidak dapat mewakili kawasan yang terlalu luas sehingga untuk meningkatkan akurasi, kawasan penelitian dibagi menjadi beberapa plot kemudian setiap plot diambil sampel dengan jumlah yang sama sehingga seluruh area tercakupi oleh setiap sampel. Adapun ketentuan pembuatan dan pemasangan plot area menurut SNI 7724 tahun 2011 adalah sebagai berikut :

1. Bentuk

Bentuk dari plot dapat berupa lingkaran, persegi, atau persegi panjang menyesuaikan kondisi lapangan.

2. Ukuran

Ukuran plot untuk tiap vegetasi adalah sebagai berikut :

- Semai dengan luasan minimal 4 m²
- Pancang dengan luasan minimal 25 m²
- Tiang dengan luasan minimal 100 m²
- Pohon dengan luasan minimal 400 m²

Jenis vegetasi yang diambil sebagai sampel perhitungan karbon merujuk pada panduan perhitungan karbon yang diterbitkan oleh Wetland International Indonesia Programme pada tahun 2009, dimana ketentuan jenis vegetasi yang diukur harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

Tabel 2. Ketentuan Pengukuran DBH

Diameter Batang (DBH) (cm)	Radius Plot Lingkaran (m)	Ukuran Plot Persegi (m ²)
<5	1	4
5-20	4	14
20-50	14	625
>50	20	1.225

Jumlah plot ditetapkan dengan memperhatikan estimasi variansi ekologis, presisi yang ditetapkan oleh selang kepercayaan (*confidence level*), dan estimasi galat (*error*) (Sutaryo, 2009).

2.6 Uji Normalitas

Semua uji statistik dan pengamatan didasarkan pada asumsi bahwa sampel mengikuti distribusi

normal (Gaussian). Jadi diasumsikan bahwa populasi dari sampel yang dikumpulkan berdistribusi normal (Rani Das, 2016). Untuk itu perlu adanya sebuah uji normalitas untuk menguji apakah distribusi dari sampel yang digunakan dalam penelitian adalah normal. Uji normalitas perlu digunakan untuk validasi dan meningkatkan kepercayaan dari prosedur statistik (Ghasemi dan Zahediasl, 2012). Apabila pengamatan sampel tidak terdistribusi secara normal, maka uji statistik umumnya menjadi tidak akurat dan akibatnya uji t dan F tidak valid dalam sampel terbatas (Rani Das, 2016).

Ada beberapa jenis uji normalitas yang dapat digunakan dalam pengujian statistik, namun uji normalitas yang sering digunakan adalah uji Kolmogorov-Smirnov dan Saphiro-Wilk (Tsagris dan Pandis, 2021). Uji Kolmogorov-Smirnov adalah sebuah uji non parametrik dari persamaan kontinu, distribusi probabilitas satu dimensi yang dapat digunakan untuk membandingkan sebuah sampel dengan distribusi probabilitas referensi (uji K-S satu sampel), atau untuk membandingkan dua buah sampel (uji K-S dua sampel) (Quraisy, 2020). Uji Kolmogorov-Smirnov dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$DHitung : maks |Fo(x) - Sn(x)| \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan :

F0 (x) = distribusi frekuensi kumulatif teoritis

Sn(x) = distribusi frekuensi kumulatif skor observasi

2.7 Uji Korelasi

Teknik statistik yang sering digunakan untuk mengetahui hubungan antara dua atau lebih variabel adalah uji korelasi. Uji korelasi atau *correlation product moment* adalah pengukuran parametrik yang menghasilkan koefisien korelasi untuk mengukur kekuatan hubungan linier antar variabel (Murti, 2022). Terdapat beberapa jenis uji korelasi seperti korelasi *Pearson*, *Spearman* dan *Kendall Tau*. Uji korelasi yang digunakan dalam perhitungan ini adalah korelasi *Pearson* yang digunakan untuk mengetahui hubungan antara kerapatan vegetasi sebagai variabel independen dengan stok karbon sebagai variabel dependen. Uji korelasi *Pearson* (r) atau *Pearson Product Moment* merupakan Teknik pengukuran parametrik yang digunakan untuk menghasilkan koefisien korelasi yang akan menunjukkan hubungan linier antara dua variabel. Jika kedua variabel memiliki hubungan tidak linier maka koefisien korelasi tidak mencerminkan kekuatan hubungan dua variabel tersebut meski kedua variabel memiliki korelasi yang kuat. Adapun perhitungan korelasi *pearson* sebagai berikut :

$$Pearson : \frac{xy}{\sqrt{(x^2*y^2)}} \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan :

x : variabel bebas (kerapatan NDVI)

y : variabel terikat (stok karbon vegetasi pesisir Bantul)

Tingkat hubungan antar variabel dapat bernilai positif atau negatif. Nilai korelasi positif menunjukkan hubungan yang berbanding lurus antara variabel bebas dan variabel terikat sementara nilai negatif menunjukkan hubungan berbanding terbalik antara dua variabel.

2.8 Uji Akurasi

Uji akurasi dapat dilakukan dengan berbagai persamaan yang cocok untuk akurasi. Matriks kesesuaian akurasi yang paling umum digunakan adalah RMSE (Liemohn dkk., 2021). RMSE merupakan sebuah metode yang umumnya digunakan untuk mengevaluasi kinerja model dalam hal kesesuaian dengan data (Hutasuhut, Anggraeni dan Tyasnurita, 2014). RMSE menghitung selisih antar nilai yang diprediksi oleh model dengan nilai yang dianggap mewakili nilai sebenarnya dari sebuah model yang dibuat. RMSE dianggap baik apabila nilai dihasilkan lebih kecil mirip dengan standar deviasi. Karena kemiripan dengan standar deviasi, RMSE terkadang dinormalisasi membentuk NRMSE. Normalisasi dapat dibentuk dari data apapun, termasuk rentang interkuartil atau rentang penuh dari data atau nilai model (Liemohn dkk., 2021). Luaran dari model ini dilaporkan dalam bentuk kesalahan akar rata-rata kuadrat dan kesalahan persentase absolut rata-rata (Rai dkk., 2022). Adapun persamaan dari RMSE adalah sebagai berikut :

$$RMSE : \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (At - Ft)^2}{n}} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan :

RMSE : *Root Mean Square Error*

At : Nilai Aktual

Ft : Nilai Model

N : Jumlah Data atau model

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alat dan Data

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

- a. Perangkat Keras
 1. Laptop berfungsi sebagai alat *input, processing, output* serta penyimpanan data penelitian.
 2. Meteran berfungsi sebagai alat ukur keliling dan diameter batang vegetasi.
 3. Alat Tulis sebagai alat catat hasil pengukuran keliling dan diameter batang vegetasi.

4. Android sebagai alat pelacak lokasi koordinat sampel dan dokumentasi.
- b. Perangkat Lunak
 1. QGIS berfungsi sebagai alat pengolah data raster dan vektor mulai dari *pre-processing* hingga *layouting* peta.
 2. Microsoft Excel sebagai perangkat perhitungan biomassa dan stok karbon serta uji statistik data validasi.
 3. Gap Light Analyze App (GLA) sebagai alat validasi analisis tingkat kerapatan dan kerapatan vegetasi di lapangan
4. SW Map sebagai alat perekam koordinat sampel.
5. Avenza Map sebagai aplikasi navigator dalam pengambilan sampel.
6. IBM SPSS 25 sebagai perangkat uji statistik tambahan.

Tabel 3. Data Penelitian

No	Nama Data	Tahun	Unit Data	Jenis Data	Sumber Data
1	Citra Satelit SPOT-7	2021	Raster (.jp2)	Sekunder	BRIN
2	Batas wilayah Hutan Penggaron	2022	Shapefile (.shp)	Sekunder	Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan
3	Keliling Batang Vegetasi	2023	Satuan (cm)	Primer	Pengukuran Lapangan
4	PAR	2021	Konstanta	Sekunder	NASA Power (power.larc.nasa.gov)

3.2 Tahapan Penelitian

1. Persiapan dan Studi Literatur

Tahapan ini terdiri dari penentuan topik penelitian, studi literatur terkait topik penelitian yang akan diangkat, pengumpulan data, survey pendahuluan serta akuisisi data penelitian.

2. Pre-Processing Citra

Tahapan pre-processing merupakan tahapan dimana citra dikoreksi terlebih dahulu untuk mengurangi kesalahan nilai pixel pada citra. Koreksi yang dilakukan pada penelitian ini adalah koreksi radiometrik dengan menggunakan metode Gain-Bias untuk mengubah nilai digital number (DN) menjadi surface reflectance. Perhitungan NDVI.

3. Perhitungan Stok Karbon

Perhitungan stok karbon menggunakan rumus (3) menggunakan data fPAR, PAR, dan LUE maksimum. fPAR dimodelkan menggunakan indeks NDVI yang mengindikasikan tingkat klorofil pada kawasan vegetasi, sementara LUE maksimum telah diketahui melalui indeks RGRI yang dapat menunjukkan reaksi spektral daun terhadap kedua band red dan green. Parameter terakhir yang diperlukan dalam perhitungan stok karbon adalah total radiasi aktif fotosintesis (PAR) berupa nilai

konstanta besarnya radiasi matahari yang datang ke bumi.

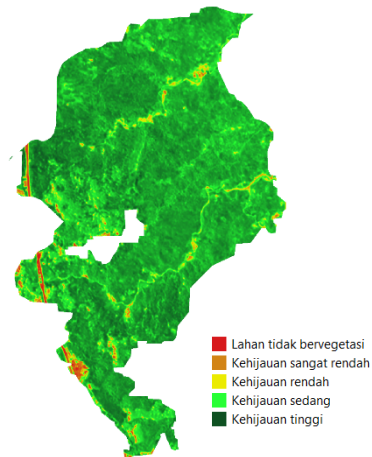
4. Uji Validasi

Tahap validasi merupakan tahapan terakhir yang sangat menentukan keberhasilan sebuah penelitian. Hal ini disebabkan parameter sebuah pengolahan dikatakan berhasil adalah apabila hasil pengolahan dan pemodelan memiliki perbandingan yang hampir mendekati dengan nilai sebenarnya. Penentuan dan pengambilan sampel didasarkan pada SNI 7724 tahun 2011 tentang Pengukuran dan Perhitungan Cadangan Karbon, dimana jumlah minimal sampel ditentukan berdasarkan rumus Choncran.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

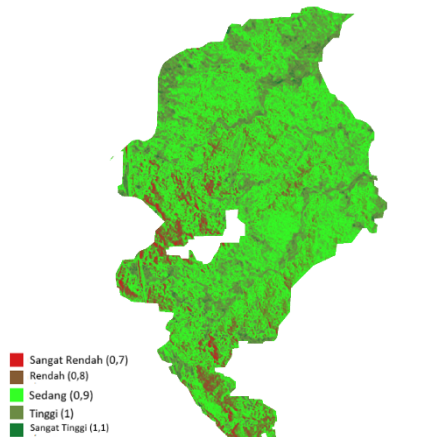
4.1 Hasil Perhitungan fPAR

Berikut adalah hasil dari perhitungan dan klasifikasi tingkat kerapatan vegetasi menggunakan NDVI.



Gambar 3. Hasil NDVI Hutan Penggaron
Tingkat kerapatan vegetasi yang mendominasi kawasan Hutan Penggaron secara sekuensial adalah kawasan dengan tingkat kerapatan vegetasi tinggi dan kerapatan sangat tinggi. Dominasi kawasan dengan tingkat kerapatan sangat tinggi mencapai 93,55% kawasan Hutan Penggaron, sementara kawasan dengan kerapatan tinggi hanya sebesar 0,04% kawasan Hutan Penggaron. Kawasan bukan vegetasi merupakan daerah dengan luas wilayah terkecil sebesar 0.008429 km² atau sebesar 0,0009% dari total kawasan hutan. Sebagian kecil kawasan memiliki tingkat kerapatan sedang dengan luas wilayah sebesar 0,129721 km² atau 0,014% dari kawasan hutan.

4.2 Hasil Perhitungan LUE Maksimum



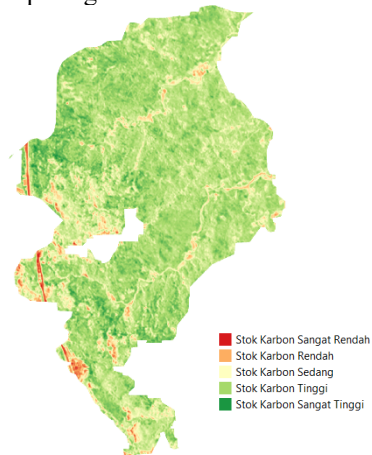
Gambar 4. Hasil LUE Hutan Maksimum Penggaron

Berdasarkan hasil pengolahan menggunakan QGIS, kawasan Hutan Penggaron memiliki nilai LUE dalam kisaran yang cukup rendah. Nilai maksimum LUE pada kawasan Hutan Penggaron sebesar 1,16 sementara nilai minimum berada dalam kisaran 0,7. Nilai modus berada pada kisaran 0,9 hingga 0,94 sementara median juga berada pada

nilai 0,9. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa kawasan Hutan Penggaron yang didominasi oleh vegetasi memiliki efisiensi cahaya yang cukup rendah akibat pengaruh kanopi tumbuhan yang menyerap banyak cahaya tampak pada panjang gelombang *red* dan memantulkan cahaya tampak pada panjang gelombang *green*. Hasil LUE menunjukkan bahwa vegetasi di Hutan Penggaron memiliki tingkat kerapatan yang cukup tinggi sehingga dapat disimpulkan bahwa tumbuhan di Hutan Penggaron berada dalam kondisi yang cukup sehat.

4.3 Hasil Perhitungan Stok Karbon

Perhitungan stok karbon menggunakan metode *light use efficiency* seperti pada Rumus (3) dengan dasar bahwa tumbuhan memiliki respon fotoprotektif terhadap radiasi matahari ketika estimasi radiasi matahari yang diserap lebih besar daripada radiasi matahari yang digunakan dalam proses fotosintesis. Radiasi berlebih ini kemudian menjadi salah satu sumber biomassa tanaman dan disimpan di berbagai bagian tanaman seperti batang, daun, ranting, maupun akar. Pemodelan stok karbon dilakukan dengan menghitung biomassa primer kotor (GPP) terlebih dahulu. Setelah GPP dihitung selanjutnya perhitungan stok karbon dilakukan dengan dasar ketentuan SNIT 7724 tahun 2011 tentang pengukuran dan perhitungan cadangan karbon bahwa 47% dari total biomassa tumbuhan adalah karbon, sehingga untuk dapat melakukan pemodelan stok karbon perlu dilakukan perkalian hasil GPP dengan konstanta 47% (0,47). Hasil pemodelan stok karbon menggunakan metode LUE dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. Hasil Pemodelan Stok Karbon Hutan Maksimum Penggaron

Nilai stok karbon minimum di kawasan penelitian adalah sebesar -27,678 KgC sementara nilai maksimum dari stok karbon di kawasan penelitian adalah sebesar 303,627 KgC. Rata-rata nilai stok

karbon pada Hutan Penggaron sebesar 200 KgC. Frekuensi tertinggi kandungan stok karbon di Hutan Penggaron juga berkisar pada nilai 200 KgC sehingga dapat disimpulkan bahwa sebagian besar kawasan Hutan Penggaron memiliki kandungan stok karbon pada kisaran nilai 200 KgC. Total kandungan stok karbon pada Hutan Penggaron dengan luas kawasan sebesar 9,183884 km² mencapai 3.049,515,14 KgC. Sementara total stok karbon per hektar adalah 3.049,515 KgC/Ha. Hasil ini menunjukkan bahwa Hutan Penggaron memiliki kandungan stok karbon yang sangat tinggi

Tabel 4. Statistik Hasil Pemodelan Stok Karbon

No.	Parameter Statistik Stok Karbon	Nilai dalam Keseluruhan Kawasan (KgCa)	Nilai per Hektar (KgCa/Ha)
1	Minimum value	-27,678	-0,027
2	Maximum value	303,627	0,303
3	Sum	5953919444,076	5953,919
4	Mean value	196,832	0,196
5	Standard deviation	39,087	0,039
6	Range	371,867	0,371

4.4 Hasil Uji Akurasi

No	Jenis Pohon	Stok Karbon Validasi	Stok Karbon Model	Selisih (KgC)
1	Mahoni	237,625	203,560	34,064
2	Puspa	159,996	230,438	-70,441
...
...
...
...
30	Pinus	271,974	154,621	117,353
	Jumlah	5638,456	5643,702	-5,245
	Rata Rata	187,948	188,123	-0,174

$$RMSE : \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (At - Ft)^2}{n}}$$

$$RMSE : \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{30} -283960,097^2}{30}}$$

$$RMSE : 97,289 \text{ KgC}$$

Hasil pemodelan memiliki selisih kecil dengan hasil validasi lapangan sebesar 97,289 KgC. Syarat RMSE yang baik adalah bernilai kurang dari 1 sehingga semakin kecil nilai RMSE maka semakin bagus dan akurat pengolahan dan perhitungan yang dilakukan. Dari hasil diatas dapat disimpulkan bahwa penelitian yang dilakukan sudah cukup baik dikarenakan RMSE yang didapat kurang dari 1. Pada beberapa sampel terdapat selisih yang cukup jauh antara hasil pemodelan dengan hasil validasi. Sampel yang memiliki selisih besar antara lain sampel 5, 7, 9, 22, 23, serta 30 dengan selisih nilai melebihi ± 100 C. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti pengaruh resolusi citra yang berdampak pada hasil NDVI dan Stok Karbon yang tidak menginterpretasikan informasi yang sebenarnya, pengambilan sampel yang kurang menginterpretasikan kondisi diameter batang dan tutupan kanopi sehingga hasil validasi yang didapat lebih besar dari hasil pemodelan yang menginterpretasikan nilai berdasarkan pixel.

4.5 Hasil Uji Korelasi

Uji korelasi juga dilakukan untuk mengetahui seberapa besar hubungan antara NDVI dengan stok karbon. Fpar yang dimodelkan menggunakan NDVI didefenisikan sebagai variabel terikat (*independent variable*) dengan symbol X sedangkan hasil stok karbon adalah variabel bebas (*dependent variable*) dan disimbolkan dengan Y.

$$Pearson : \frac{xy}{\sqrt{(x^2 * y^2)}}$$

$$Pearson = \frac{2886,392}{\sqrt{(7,901883^2 * 1110887^2)}}$$

$$Pearson = 0,974$$

Korelasi *Pearson* dari hubungan antara nilai fPAR yang dimodelkan menggunakan NDVI dengan hasil pemodelan stok karbon sebesar 0,974. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat hubungan kuat antara variabel terikat X dengan variabel bebas Y dalam pemodelan stok karbon. Tanda korelasi positif menunjukkan bahwa antara variabel stok karbon dengan variabel kerapatan vegetasi saling berhubungan linear. Semakin besar indeks vegetasi dan tutupan kanopi pada suatu kawasan maka semakin besar stok karbon yang dapat disimpan kawasan tersebut.

4.6 Hasil Uji Normalitas

Uji normalitas menggunakan metode uji Kolmogorov-Smirnov dimana terdapat 2 jenis data yang diuji untuk melihat distribusi kedua variabel apakah normal atau tidak. Berikut adalah hasil uji Kolmogorov-Smirnov.

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		stok karbon	fpar
N		30	30
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	187.9553	.5053
	Std. Deviation	42.01847	.09250
Most Extreme Differences	Absolute	.111	.134
	Positive	.093	.074
	Negative	-.111	-.134
Test Statistic		.111	.134
Asymp. Sig. (2-tailed)		.200 ^{c,d}	.177 ^c

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

c. Lilliefors Significance Correction.

d. This is a lower bound of the true significance.

Gambar 11. Hasil Uji Kolmogorov-Smirnov

Berdasarkan hasil uji Kolmogorov-Smirnov, data dari kedua variabel yakni Fpar dan stok karbon memiliki distribusi normal. Hal ini dapat dilihat dari hasil statistik **Gambar IV.25** dimana variabel Fpar memiliki rata-rata sebesar 0,5053 dan standar deviasi sebesar 0,0925. Selisih positif dari setiap data sebesar 0,074 sementara selisih negatif sebesar -0,134. Berdasarkan tabel Kolmogorov-Smirnov, nilai kuantil pengujian Kolmogorov-Smirnov pada tingkat kepercayaan 90% dan level signifikansi 10% adalah sebesar 0,05. Nilai uji statistik adalah sebesar 0,177 untuk fPAR. Karena nilai uji fPAR lebih besar dari nilai signifikansi yakni $0,177 > 0,05$ maka H_0 diterima dan data terdistribusi normal. Pada data variabel stok karbon, nilai rata-rata adalah sebesar 187,9553 dan standar deviasi adalah sebesar 42,018. Selisih terbesar positif adalah 0,111. Nilai uji Kolmogorov-Smirnov pada tingkat kepercayaan 90% dan level signifikansi 10% adalah sebesar 0,05. Nilai uji statistik adalah sebesar 0,2. Karena nilai uji lebih besar dari nilai tabel yakni $0,2 > 0,05$ maka H_0 diterima dan data terdistribusi normal.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis yang telah disampaikan pada Bab IV, kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Tingkat kerapatan vegetasi dibagi menjadi 5 klasifikasi sesuai Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor : P.12/Menhut-I/2012. Kelas yang mendominasi kawasan Hutan Penggaron adalah kelas kerapatan sangat

tinggi dengan tingkat kerapatan sangat tinggi seluas 8,591557 km², kelas kerapatan vegetasi tinggi dengan luas 0,375145 km². Kelas kerapatan sedang seluas luas wilayah sebesar 0,129721 km², kelas kerapatan rendah dengan luas sebesar 0,079030 km², serta kelas non vegetasi merupakan daerah dengan luas wilayah terkecil sebesar 0.008429 km².

2. Total kandungan stok karbon pada Hutan Penggaron dengan luas kawasan sebesar 9,183884 km² mencapai 3.049.515,14 KgC. Sementara total stok karbon per hektar adalah 3.049,515 KgC/Ha. Lahan non-vegetasi memiliki nilai stok karbon terendah dengan kandungan stok karbon sebesar -20,418 KgC. Kelas kerapatan vegetasi sedang memiliki stok karbon sebesar 4.447.632,937 KgC. Kelas kerapatan vegetasi rendah memiliki stok karbon sebesar 1.115.200,74 KgC. Kelas kerapatan vegetasi tinggi sebesar 43.679.116,611 KgC dan sangat tinggi sebesar 2.980.908.135,909 KgC.
3. Berdasarkan hasil uji akurasi, hasil pemodelan memiliki selisih yang cukup kecil dengan hasil validasi lapangan yakni sebesar 97,289 KgC sehingga dapat disimpulkan pengolahan yang dilakukan masih belum dapat mengestimasi stok karbon secara akurat.
4. Berdasarkan hasil uji korelasi menggunakan perangkat lunak SPSS, tingkat korelasi antara nilai Fpar yang dimodelkan menggunakan NDVI dengan hasil stok karbon mencapai 0,964. Estimasi standar kesalahan senilai 0,025 dengan *R square* sebesar 0,929. penggunaan metode LUE yang mempertimbangkan indeks kerapatan vegetasi dan tutupan kanopi sebagai parameter utama estimasi stok karbon sangat efektif dalam melakukan estimasi stok karbon pada kawasan hutan.

5.

5.2 Saran

Dalam pelaksanaan penelitian mengenai estimasi stok karbon, terdapat beberapa saran dan masukan yang dapat diperbaiki dan dipertimbangkan untuk keberlangsungan penelitian berikutnya.

1. Dalam melakukan estimasi stok karbon dengan penginderaan jauh menggunakan metode LUE. Nilai PAR harus dalam bentuk konstanta yang dapat diukur secara manual maupun data sekunder. Sementara nilai LUE maksimum sebaiknya menggunakan data sekunder atau pengukuran konvensional agar hasil estimasi semakin akurat.
2. Saat pengambilan validasi, pastikan titik sampel validasi merupakan titik yang dapat digapai atau diakses baik dengan kendaraan maupun berjalan kaki. Dalam melaksanakan validasi harus

memperhatikan kesesuaian titik sampel dengan kondisi NDVI pada hasil pengolahan citra serta hasil stok karbon. Hal ini disebabkan karena estimasi menggunakan penginderaan jauh memiliki kelemahan yakni perhitungan nilai stok karbon dilakukan per *pixel* citra sehingga hal tersebut dapat mempengaruhi kesesuaian hasil NDVI maupun stok karbon dan berakibat pada perbedaan nilai validasi dengan pemodelan.

3. Dalam pengambilan sampel, sebaiknya dilakukan dengan mengambil sampel yang dominan di area tersebut karena hal tersebut dapat membantu meningkatkan interpretasi stok karbon di sekitar wilayah tersebut. Sehingga hal ini dapat membantu meningkatkan akurasi hasil validasi dengan pemodelan stok karbon melalui penginderaan jauh.

DAFTAR PUSTAKA

- Adimagistra, T., Prakasa, R.R. dan ... (2020) "Pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (Sig) Dalam Identifikasi Daya Serap Emisi Karbon Di Kecamatan Tembalang, Kota Semarang," ... *Rekayasa dan Teknologi*, 16(2), hal. 177–182. Tersedia pada: <http://journals.usm.ac.id/index.php/jprt/article/view/3011>.
- Badan Standar Nasional (2011) "Pengukuran dan Penghitungan Cadangan Karbon – Pengukuran Lapangan untuk Penaksiran Cadangan Karbon Hutan (Ground Based Forest Carbon Accounting)," hal. 1–24.
- Danar, D. dan Wahyu, A. (2019) "Pengaruh Perubahan Tutupan Lahan Terhadap Emisi GRK pada Wilayah Cepat Tumbuh di Kota Semarang," *Jurnal Penginderaan Jauh Indonesia*, 1(1), hal. 24–31. Tersedia pada: <http://jurnal.mapin.or.id/index.php/jpji/article/view/8>.
- Dewa, D.D., Buchori, I. dan Sejati, A.W. (2022) "Assessing land use/land cover change diversity and its relation with urban dispersion using Shannon Entropy in the Semarang Metropolitan Region, Indonesia," *Geocarto International*, 0(0), hal. 1–22. doi:10.1080/10106049.2022.2046871.
- Environmental Monitor (2010) "What is Photosynthetically Active Radiation?," *Environmental Monitor* [Preprint]. Tersedia pada: <https://www.fondriest.com/news/photosynthetic-radiation.htm>.
- European Space Agency (2022) *SPOT - Earth Forest*, T. dan Indonesia, T. (2018) "Persamaan Alometrik Karbon."
- Gonsamo, A. dan Chen, J.M. (2018) "Vegetation Primary Productivity," *Comprehensive Remote Sensing*, 1–9, hal. 163–189. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.10535-4.
- Harmita, H. (2004) "Petunjuk Pelaksanaan Validasi Metode Dan Cara Perhitungannya," *Majalah Ilmu Kefarmasian*, 1(3), hal. 117–135. doi:10.7454/psr.v1i3.3375.
- Harris Geospatial (2017) "Light use efficiency," hal. 1–2.
- Kalaji, H.M. dkk. (2014) *The Use of Chlorophyll Fluorescence Kinetics Analysis to Study the Performance of Photosynthetic Machinery in Plants, Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance*. doi:10.1016/B978-0-12-800875-1.00015-6.
- Kiefer, R.W. dan T. M. Lillesland (1993) *Penginderaan Jauh dan Interpretasi Citra (Citra Foto)*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Lees, K.J. dkk. (2018) "Potential for using remote sensing to estimate carbon fluxes across northern peatlands – A review," *Science of the Total Environment*, 615, hal. 857–874. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.09.103.
- Liu, S.H. dkk. (2013) "Influence of sensor spectral parameters on the simulation of hyperspectral data based on the spectral reconstruction approach," *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi/Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(2), hal. 513–516. doi:10.3964/j.issn.1000-0593(2013)02-0513-04.
- Mega, B. (2022) *Validasi adalah: Pengertian, Jenis-Jenis, Manfaat & Contohnya, Superapp.id*. Tersedia pada: <https://superapp.id/blog/uncategorized/validasi-adalah/> (Diakses: 18 Maret 2023).
- Menteri Kehutanan (2012) "Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor : P.12/Menhut-I/2012 Tentang Perubahan Kedua Atas Peraturan Menteri Kehutanan Nomor P.32/Menhut-I/2009 Tentang Tata Cara Penyusunan Rencana Teknik Rehabilitasi Hutan Dan Lahan Daerah Aliran Sungai (Rt)," in *Acta Materialia*, hal. 348–352. Tersedia pada: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2015.12.003> %0Ahttps://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/027/30027298.pdf?r=1&r=1%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.04.004.
- Murti, R.H.A. (2022) "Perbedaan Uji Korelasi Pearson, Spearman dan Kendall Tau dalam Menganalisis Kejadian Diare." Padang: *Jurnal Endurance*, hal. 1–8.
- Patrianti, T., Shabana, A. dan Tuti, R.W. (2020) "Government Risk Communication on Greenhouse Gas Emission Reduction to Tackle Climate Change," *Jurnal Penelitian Komunikasi*

- Dan Opini Publik*, 24(2).
doi:10.33299/jpkop.24.2.3416.
- Pei, Y. dkk. (2022) "Evolution of light use efficiency models: Improvement, uncertainties, and implications," *Agricultural and Forest Meteorology*, 317(March), hal. 108905. doi:10.1016/j.agrformet.2022.108905.
- Pemerintah Provinsi Jawa Tengah (2021) *Jateng Valley Mulai Dikerjakan - Pemerintah Provinsi Jawa Tengah*, Portal Berita Pemerintah Provinsi Jawa Tengah. Tersedia pada: <https://jatengprov.go.id/publik/jateng-valley-mulai-dikerjakan/> (Diakses: 13 April 2023).
- Penman, J. dkk. (2006) *2006 IPCC - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Directrices para los inventarios nacionales GEI*. Tersedia pada: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- Rifandi, R.A. dan Abdillah, R.F. (2020) "Estimasi Stok Karbon Dan Serapan Karbon Pada Tegakan Pohon Mangrove Di Hutan Mangrove Trimulyo , Genuk , Semarang," *Journal of Environmental Sustainability*, 1(2), hal. 63–70. Tersedia pada: <http://e-journal.ivet.ac.id/index.php/envoist/>.
- Zhang, Z. dkk. (2020) "The potential of satellite FPAR product for GPP estimation: An indirect evaluation using solar-induced chlorophyll fluorescence," *Remote Sensing of Environment*, 240(January), hal. 111686. doi:10.1016/j.rse.2020.111686.
- Zhao, J. dkk. (2022) "An integrated remote sensing and model approach for assessing forest carbon fluxes in China," *Science of the Total Environment*, 811, hal. 1–10. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.152480.
- Zhou, G. dkk. (2020) "Estimation of karst carbon sink and its contribution to CO₂ emissions over a decade using remote sensing imagery," *Applied Geochemistry*, 121(December 2019), hal. 104689. doi:10.1016/j.apgeochem.2020.104689.