



## Komparasi Citra Multispektral Untuk Estimasi Simpanan Karbon Pada Kawasan Mangrove Nusa Lembongan

I Made Dwita Krisnanda<sup>a</sup>, I Wayan Gede Astawa Karang<sup>a\*</sup>, I Dewa Nyoman Nurweda Putra<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Udayana, Bali, Indonesia

\*Corresponding author, email: [gedekarang@unud.ac.id](mailto:gedekarang@unud.ac.id)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received:

July 1<sup>st</sup>, 2024

Received in revised form:

August 12<sup>th</sup>, 2024

Accepted:

November 20<sup>th</sup>, 2024

Available online:

August 30<sup>th</sup>, 2025

#### ABSTRACT

Mangroves are vegetation capable of absorbing carbon and controlling atmospheric CO<sub>2</sub> levels through sequestration. Remote sensing technology can estimate mangrove carbon stocks efficiently and quickly through radar and optical imagery. However, previous studies have shown that the spatial resolution of an image does not always correlate directly with the accuracy of the image. This study aimed to measure field carbon stocks, analyze the relationship between field carbon stocks and vegetation indices, and compare the capabilities of Sentinel-2 and Landsat-8 satellite imagery with different resolutions in estimating carbon stocks in Nusa Lembongan. Field research was conducted to assess and map mangrove carbon stock values. Mangrove carbon stock values were obtained using a general allometric equation for mangroves. The calculated results were then correlated with spectral vegetation indices using simple linear regression analysis. This study identified 13 mangrove species in Nusa Lembongan. Field measurements showed that the above-ground and below-ground carbon stocks were 100.81 tons/ha and 47.02 tons/ha, respectively. The relationship between Above-Ground Carbon (AGC) and vegetation indices resulted in the best R<sup>2</sup> values with IRECI (0.79) for Sentinel-2 and DVI (0.61) for Landsat-8. Meanwhile, the relationship between Below Ground Carbon (BGC) and vegetation indices showed the best indices as GCI (0.73) for Sentinel-2 and GCI (0.56) for Landsat-8. Accuracy measurements indicated that Sentinel-2 had lower error values than Landsat-8 across all vegetation indices concerning both AGC and BGC.

#### Keywords:

Stock Carbon, Mangrove, Nusa Lembongan, Sentinel-2, Landsat-8

#### ABSTRAK

Mangrove adalah salah satu vegetasi yang memiliki kemampuan signifikan dalam menyerap karbon dan mengendalikan kadar CO<sub>2</sub> di atmosfer melalui proses sekuestrasi. Teknologi penginderaan jauh dapat digunakan untuk memperkirakan simpanan karbon mangrove dengan cepat dan efisien melalui citra radar dan optik. Namun, penelitian sebelumnya menunjukkan tingkat resolusi spasial citra tidak selalu berbanding lurus dengan tingkat akurasi citra. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur simpanan karbon di lapangan, menganalisis hubungan stok karbon lapangan dengan indeks vegetasi, serta membandingkan kemampuan citra satelit Sentinel-2 dan Landsat-8 yang memiliki resolusi berbeda dalam mengestimasi simpanan karbon di Nusa Lembongan. Pengamatan lapangan dilakukan untuk mengestimasi dan memetakan nilai simpanan karbon mangrove. Nilai simpanan karbon mangrove diperoleh menggunakan persamaan allometrik umum untuk mangrove. Hasil perhitungan kemudian dihubungkan dengan nilai spektral indeks vegetasi menggunakan analisis regresi linier sederhana. Hasil penelitian ini mengidentifikasi 13 spesies mangrove di Nusa Lembongan. Pengukuran lapangan menunjukkan bahwa jumlah simpanan karbon di atas permukaan dan di bawah permukaan secara berturut-turut adalah 100,81 ton/ha dan 47,02 ton/ha. Hubungan antara Above Ground Carbon (AGC) dengan indeks vegetasi menghasilkan nilai R<sup>2</sup> terbaik pada IRECI (0,79) untuk Sentinel-2 dan DVI (0,61) untuk Landsat-8. Sementara itu, hubungan antara Below Ground Carbon (BGC) dan indeks vegetasi menunjukkan indeks terbaik yaitu GCI (0,73) untuk Sentinel-2 dan DVI (0,54) untuk Landsat-8. Hasil pengukuran akurasi menunjukkan bahwa Sentinel-2 memiliki nilai eror yang lebih kecil dibandingkan Landsat-8 pada semua indeks vegetasi baik dalam hubungan dengan AGC maupun BGC.

#### Kata Kunci:

Stok Karbon, Mangrove, Nusa Lembongan, Sentinel-2, Landsat-8

## 1. Pendahuluan

Vegetasi memiliki peran penting dalam upaya mitigasi pemanasan global karena kemampuannya dalam menyerap karbon di atmosfer. Mangrove adalah salah satu vegetasi yang memiliki kemampuan untuk menyerap karbon dan mengendalikan kadar CO<sub>2</sub> di atmosfer (Candra, 2016). Dalam mekanismenya, hutan mangrove menyerap karbon melalui proses sekuestrasi dimana CO<sub>2</sub> diserap dari atmosfer melalui proses fotosintesis lalu disimpan dalam sedimen dan biomassa (Hairiah & Rahayu, 2007). Biomassa dibedakan ke dalam dua kategori yaitu biomassa di atas permukaan tanah (*above-ground biomass*) dan biomassa tumbuhan di bawah permukaan tanah (*below-ground biomass*) (Istomo & Farida, 2017).

Terdapat beberapa cara dalam pendugaan simpanan karbon yaitu secara langsung ataupun secara tidak langsung. Pengukuran secara langsung dilakukan dengan menebang bagian tanaman yang akan diukur simpanan karbonnya (*destructive technique*) yang dimana metode ini memiliki kekurangan yaitu membutuhkan waktu yang relatif lama serta diperlukan biaya yang besar untuk pengukuran pada wilayah yang luas (Colgan *et al.* 2013). Pendugaan simpanan karbon secara tidak langsung (*non-destructive technique*) dilakukan dengan mengukur parameter struktur tegakan melalui persamaan alometrik (Komiya *et al.* 2005). Dalam menghadapi kondisi medan di hutan mangrove yang aksesnya masih susah untuk dilalui, diperlukan suatu pendekatan yang mampu mengatasi kendala-kendala seperti keterbatasan waktu, biaya, tenaga dan keselamatan diri. Salah satu alternatif yang bisa dilakukan adalah dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh. Pada umumnya untuk mendeteksi area vegetasi menggunakan transformasi indeks vegetasi (Danoedoro, 1996).

Provinsi Bali memiliki kawasan mangrove yang tersebar di tiga titik terluas yaitu TAHURA Ngurah Rai, Taman Nasional Bali Barat (TNBB) dan Nusa Lembongan. Mangrove pada Nusa Lembongan memiliki luasan sebesar 202 ha dimana 85 ha adalah hasil penanaman dan 117 ha adalah mangrove alami (Palguna *et al.* 2017). Penelitian mengenai pendugaan simpanan karbon sudah pernah dilakukan di Nusa Lembongan untuk mengestimasi simpanan karbon diatas dengan nilai rata-rata yang didapat sebesar 59,95 ton/ha untuk AGC dan 30,77 ton/ha untuk *Soil Carbon* (Kusumaningtyas *et al.* 2014). Penelitian serupa juga pernah dilakukan Pricillia *et al.* (2021), untuk menduga simpanan karbon diatas permukaan tanah dengan penambahan pendugaan stok karbon tanah dengan mendapatkan hasil total karbon sebesar  $68.10 \pm 20.92 \text{ MgC/ha}^{-1}$ . Penelitian tersebut juga menggunakan indeks vegetasi NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) untuk dihubungkan dengan kerapatan mangrove dengan hasil R<sup>2</sup> sebesar 0,377. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, penelitian mengenai estimasi stok karbon dengan menggunakan model indeks vegetasi masih minim dilakukan, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai estimasi simpanan karbon dengan indeks vegetasi untuk kawasan di Nusa Lembongan.

Citra multispektral merupakan citra yang terdiri atas beberapa spektrum yang memiliki saluran multispektrum yang tinggi sehingga dapat memberikan informasi berupa warna yang berdasarkan dari pantulan dan penyerapan energi elektromagnetik dari obyek yang ditangkap oleh sensor. Dengan adanya sensor multispektral, citra ini mampu digunakan dalam pengembangan indeks vegetasi yang sudah terbukti secara ilmiah untuk mengukur parameter biofisik vegetasi seperti indeks vegetasi NDVI yang telah digunakan secara luas dalam

memantau parameter vegetasi seperti pada penelitian Wicaksono *et al.* (2015), Suardana *et al.* (2023) dan Ahammed *et al.* (2024). Penelitian ini menggunakan citra multispektral untuk mengestimasi simpanan karbon pada mangrove Nusa Lembongan. Secara umum, data optik dianggap lebih unggul daripada data SAR karena sensor optik sangat sensitif terhadap berbagai karakteristik fisik vegetasi (Cherian, 2024).

Penelitian ini juga membandingkan 2 citra multispektral yaitu satelit Sentinel-2 dengan Landsat-8 dalam mengestimasi stok karbon di Nusa Lembongan. Pemilihan citra ini didasarkan pada perbedaan karakteristik resolusi spasial pada kedua citra yang berbeda dimana Sentinel-2 memiliki resolusi spasial tertinggi sebesar 10 m pada kanal multispektralnya sedangkan Landsat-8 memiliki resolusi spasial sebesar 30 m pada kanal multispektralnya. Ditambah ketersediaan data pada masing masing citra dimana kedua citra ini bisa diakses secara gratis serta sama-sama memiliki misi untuk pemetaan parameter biofisik seperti kandungan klorofil daun dan kadar air daun. Menurut Danoedoro (2012), karakteristik citra multispektral yang beragam dan ukuran resolusi spasial yang berbeda tentu akan memberikan hasil dengan tingkat kedetilan informasi yang berbeda. Sudah banyak penelitian yang memanfaatkan citra Landsat-8 dan Sentinel-2 dalam mengestimasi stok karbon atau biomassa vegetasi. Misalnya, Penelitian dari Anish *et al.* (2022) melakukan komparasi citra Landsat-8 dan Sentinel-2 dalam mengestimasi biomassa di atas tanah di Salbote Karele *Community Forest*, Nepal dan mendapatkan hasil model estimasi biomassa terbaik pada citra Sentinel-2 pada indeks vegetasi NDVI, sedangkan pada penelitian Li *et al.* (2023) menunjukkan bahwa Landsat-8 memiliki akurasi yang lebih baik dibandingkan Sentinel-2 dalam empat model prediksi *Above Ground Carbon* (AGC) di hutan kota Shanghai, China.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, terdapat ketidakpastian bahwa citra dengan resolusi lebih tinggi selalu memberikan hasil yang lebih baik. Perbedaan resolusi spasial pada citra satelit juga dapat mempengaruhi tingkat kedetilan informasi spektral yang terekam (Inglada *et al.* 2024). Penelitian ini akan melihat perbedaan informasi yang didapatkan dari dua buah citra multispektral yang memiliki karakteristik berbeda. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang kemampuan kedua jenis citra dalam mengestimasi simpanan karbon mangrove di Nusa Lembongan.

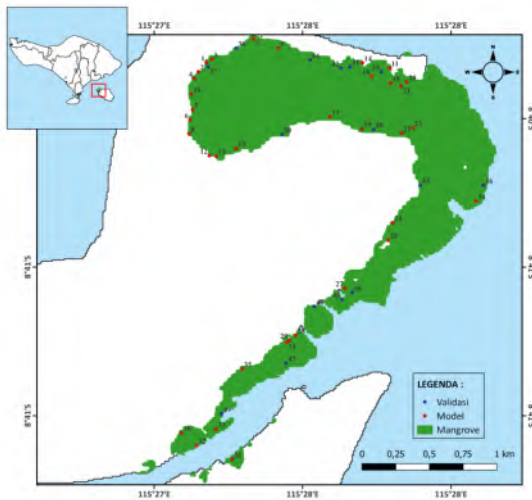
## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada tanggal 16 – 19 November 2023. Pengambilan data dilakukan di kawasan hutan mangrove Nusa Lembongan (Gambar 2). Nusa Lembongan terletak di Kabupaten Klungkung yang merupakan salah satu dari tiga pulau yang ada pada Kabupaten Klungkung yaitu Nusa Penida, Nusa Ceningan dan Nusa Lembongan. Hutan Mangrove Nusa Lembongan terletak di Desa Jungut Batu.

Tabel 1. Indeks Vegetasi

Indeks Vegetasi	Formula	Sumber
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$\frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$	Rouse <i>et al.</i> (1973)
Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)	$\frac{[NIR - (2 \times RED) + BLUE]}{[NIR + (2 \times RED) + BLUE]}$	Kauffman & Tanre (1992)
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} (1 + L)$	Rouse <i>et al.</i> (1973)
Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)	$\frac{(NIR - Blue)}{(NIR - Red)}$	Penuelas, (1995)
Green Normalized Vegetation Index (GNDVI)	$\frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$	Gitelson <i>et al.</i> (1996)
Green Chlorophyll Index (GCI)	$\frac{NIR}{Green} - 1$	Gitelson <i>et al.</i> (2005)
Normalized Burn Ratio (NBR)	$\frac{(NIR - SWIR 2)}{(NIR + SWIR 2)}$	Key & Benson, (2005)
Chlorophyll Vegetation Index (CVI)	$\left( \frac{NIR}{Green} \right) \times \left( \frac{Red}{Green} \right)$	Vincini <i>et al.</i> (2008)
Difference Vegetation Index (DVI)	$NIR - Red$	Tucker, (1980)
Total Ratio Vegetation Index (TRVI)	$\sqrt{\frac{NIR}{RED}}$	Fadaei <i>et al.</i> (2012)
Inverted Red Edge Chlorophyll Index (IRECI)	$\frac{(NIR - Red)}{\left( \frac{Red\ edge\ 1}{Red\ edge\ 2} \right)}$	Clevers <i>et al.</i> (2000)



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di Nusa Lembongan

## 2.1 Tahap Penelitian

### 2.3.1 Pra Pengolahan Citra

Pra-pengolahan citra yang dilakukan meliputi pemotongan (*cropping*) citra yang dilakukan pada kedua citra untuk memperkecil area penelitian. Selanjutnya dilakukan *resampling* citra yang hanya dilakukan pada Sentinel-2. Ini bertujuan untuk mengubah resolusi spasial yang berbeda-beda pada *band* multispektral citra Sentinel-2 menjadi sama yaitu beresolusi spasial 10 m dimana pada penelitian ini menggunakan *band red edge* Sentinel-2 yang memiliki resolusi spasial 20 m. Sementara pada Landsat-8 tidak dilakukan *resampling* karena semua *band* multispektralnya sudah berukuran sama yaitu 30 m. Selanjutnya masing-masing citra dilakukan kalibrasi yang bertujuan untuk menormalkan rentang data citra dari nilai *Digital Number* (DN) yang mentah menjadi *surface reflectance*. Pada Landsat-8 kalibrasi menggunakan rumus  $DN * 0.0000275 + (-0.2)$  (U.S. Geological Survey, 2021) dan pada Sentinel-2 kalibrasi menggunakan rumus  $DN/10000$  (European Space Agency, 2017).

### 2.3.2 Pengolahan Citra

Pengolahan citra terdiri atas komposit citra, masking citra dan transformasi indeks vegetasi. Komposit citra dilakukan dengan tujuan memperoleh visualisasi yang lebih terperinci dan jelas dalam mengenali objek, sehingga memudahkan dalam memilih pada *training area* (Pratama *et al.* 2019). Komposit citra yang digunakan pada penelitian ini adalah komposit citra *false color* yang menggunakan *band* NIR, SWIR dan *red*. Masking citra merupakan proses untuk memisahkan antara daerah yang menjadi kajian dengan wilayah yang tidak termasuk area pengamatan (Pratama *et al.* 2019). Untuk memisahkan area penelitian, dilakukan klasifikasi untuk membedakan area yang mangrove dan bukan mangrove. Klasifikasi yang digunakan pada penelitian ini adalah klasifikasi dengan metode *maximum likelihood*. Transformasi indeks vegetasi digunakan untuk menonjolkan vegetasi maupun aspek yang berkaitan dengan kerapatan vegetasi seperti biomassa. Dalam penelitian ini akan menggunakan 10 indeks vegetasi yang sama pada kedua citra dan penambahan 1 indeks vegetasi yang menggunakan *band red edge* pada Sentinel-2. Formula dari setiap indeks disajikan pada Tabel 1.

### 2.3.3 Pengambilan Data Penelitian

Metode penentuan sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah *stratified random sampling*. Metode ini dilakukan dengan cara menentukan *plot* pengamatan secara acak (*random*) berdasarkan pertumbuhan/*strata* zonasi mangrove agar tidak tumpang tindih. Penempatan *plot* pada tiap *strata* dengan mempertimbangkan kemudahan akses menuju lokasi *plot*. Sesuai dengan Pedoman Teknis Badan Informasi Geospasial (2014), jumlah sampel yang diambil harus sebanding dengan luasan mangrove yang ada. Tabel 2 menunjukkan jumlah titik pengambilan sampel minimal yang harus dilakukan di lapangan berdasarkan pedoman teknis data geospasial mangrove.

**Tabel 2.** Jumlah Titik Sampel Berdasarkan Skala Peta

Skala	Minimal Plot	Total Sampel Minimal
1: 25.000	30	50
1: 50.000	20	30
1: 250.000	10	20

Jumlah sampel minimal dalam total luas mangrove (Ha) ditentukan dengan Persamaan 1 (Badan Informasi Geospasial, 2014).

$$A = TSM + \frac{Luas (Ha)}{1500} \quad (1)$$

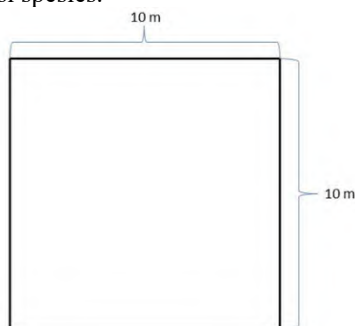
Keterangan:

A : Jumlah Sampel Minimal

TSM : Total Sampel Minimal

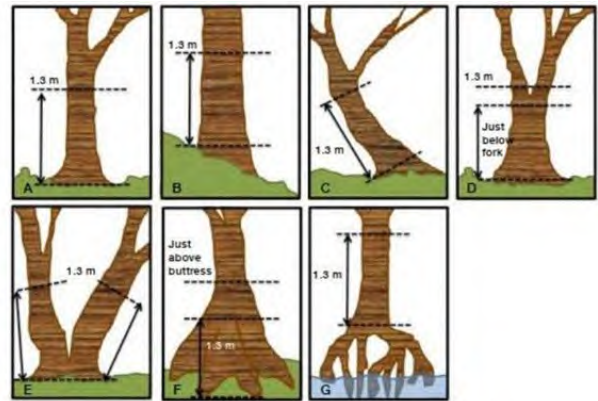
Pada penelitian ini jumlah sampel minimal adalah 50 plot, yang kemudian jumlah sampel dibagi menjadi 70% atau sebanyak 35 sampel plot digunakan untuk membangun model dan 30% atau 15 sampel plot digunakan untuk uji akurasi. Sampel plot pada penelitian ini menggunakan plot dengan ukuran 10m x 10m dengan menggunakan roll meter (Gambar 3). Gambaran plot pengambilan data dilapangan berdasarkan panduan Dharmawan *et al.* (2020) mengikuti metode COREMAP CTI. Dalam plot dilakukan pengukuran parameter penelitian yaitu simpana karbon atas permukaan.

Parameter lapangan yang diambil meliputi identifikasi spesies mangrove dan jenis substrat, lingkaran batang/*Girth at Breast Height* (GBH). Pengindetifikasian spesies mangrove panduan yang disajikan oleh beberapa peneliti, seperti Noor *et al.* (2012) dan As-syakur *et al.* (2023). Beberapa ciri penting yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi kelompok mangrove dengan fokus pada jenis akar, morfologi daun, serta alat reproduksi mangrove seperti bunga dan buah. Identifikasi substrat dilakukan secara kualitatif berdasarkan pada tiga klasifikasi, yaitu: pasir berlumpur, lumpur berpasir dan pasir/lumpur keras/berbatu/campuran pecahan karang (*rubble*) (Dharmawan *et al.* 2020). Selanjutnya spesies mangrove pada setiap plot akan dihitung dominansi spesiesnya menggunakan rumus dominansi spesies.

**Gambar 2.** Bentuk dan Ukuran Plot Pengambilan Data Lapangan

Mangrove yang tegak diasumsikan memiliki bentuk lingkaran dengan keliling dan diameter. Lingkaran batang atau keliling batang ini diukur pada ketinggian dada orang dewasa atau 1,3 meter, dan dikenal dengan istilah *Girth at Breast Height* (GBH). Untuk mengonversi nilai GBH menjadi *Diameter at Breast Height* (DBH), dapat digunakan rumus umum yang mengubah keliling menjadi diameter lingkaran. Untuk mendapatkan nilai DBH, dapat menggunakan persamaan  $DBH = GBH/\pi$ , dengan  $\pi$  merupakan nilai konstanta yang dapat dianggap sebagai 3,14 atau 22/7 (Dharmawan *et al.* 2020). DBH

hanya diukur pada batang pohon dengan diameter kurang dari 5 cm dan tinggi lebih dari 1,5 m, serta pada batang dengan diameter lebih dari atau sama dengan 5 cm. Pengukuran DBH tegakan dilakukan berdasarkan ketentuan pada Gambar 4.

**Gambar 3.** Teknik Pengukuran Lingkaran Batang Pohon

Sumber: Suardana *et al.* (2023)

## 2.2 Analisis Data

### 2.4.1 Perhitungan Simpanan Karbon

Data pengukuran Diameter at Breast Height (DBH) yang diperoleh di lapangan digunakan dalam perhitungan biomassa diatas permukaan dan di bawah permukaan tanah yang akan dimasukkan pada persamaan alometrik mangrove umum yang dikembangkan oleh Komiyama *et al.* (2005) dimana persamaan ini menghubungkan DBH dengan massa jenis kayu. Adapun persamaan allometri umum mangrove dapat dilihat pada Persamaan 2 dan Persamaan 3.

$$W_{top} = 0,251\rho D^{2,46} \quad (2)$$

Keterangan:

$W_{top}$  : Above Ground Biomass (AGB) (kg)

D : Diameter at breast height (DBH) (cm)

$\rho$  : Berat jenis kayu individu pohon mangrove ( $g/cm^3$ )

$$W_r = 0,199\rho^{0,899} D^{2,22} \quad (3)$$

Keterangan:

$W_r$  : Below Ground Biomass (BGB) (kg)

D : Diameter at breast height (DBH) (cm)

$\rho$  : Massa jenis kayu individu pohon mangrove ( $g/cm^3$ )

Massa jenis kayu (Tabel 3) pada setiap spesies mangrove memiliki nilai yang berbeda. Pada penelitian ini, massa jenis kayu yang digunakan merupakan massa jenis kayu yang sudah diterapkan pada penelitian sebelumnya di Bali atau di pulau kecil lainnya di Indonesia seperti oleh Suardana *et al.* (2023) dan Karang *et al.* (2024).

**Tabel 3.** Massa jenis mangrove

Spesies	Massa Jenis ( $g/cm^3$ )
<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	0,8683
<i>Rhizophora apiculata</i>	0,8814
<i>Rhizophora mucronata</i>	0,8483
<i>Rhizophora stylosa</i>	0,9400
<i>Rhizophora lamarckii</i>	0,8814
<i>Xylocarpus granatum</i>	0,6721
<i>Lumnitzera racemosa</i>	0,8325
<i>Excoecaria agallocha</i>	0,4288
<i>Sonneratia alba</i>	0,6443
<i>Aegiceras corniculatum</i>	0,5967

<i>Ceriops tagal</i>	0,8859
<i>Avicennia marina</i>	0,7316
<i>Avicennia officinalis</i>	0,6200

Sumber: World Agroforestry Center (2022)

Nilai biomassa yang sudah diperoleh dari persamaan alometrik sesuai dengan spesies mangrove kemudian dikalikan dengan konsentrasi karbon yang tersimpan pada tumbuhan. Berdasarkan *Indonesian National Standard* (2011) rumus perhitungan karbon dapat dilihat pada Persamaan 4.

$$C_b = B \times \%C \text{ Organik} \quad (4)$$

Keterangan:

C<sub>b</sub> : kandungan karbon dari biomassa (kg)  
 B : total biomassa (kg)  
 %C Organik : nilai persentase kandungan karbon, sebesar 0,47

#### 2.4.2 Uji ANOVA Satu Arah

ANOVA digunakan untuk menguji apakah terdapat perbedaan yang signifikan pada DBH mangrove berdasarkan spesies. Hasil uji ANOVA akan disajikan dalam bentuk statistik deskriptif.

#### 2.4.3 Analisis Regresi Linier

Pada penelitian ini analisis regresi linier (Persamaan 5) digunakan untuk mengetahui besaran pengaruh nilai variabel X (indeks vegetasi) terhadap nilai variabel Y (simpanan karbon mangrove dari data lapangan).

$$Y = a + bX \quad (5)$$

Keterangan:

X : nilai indeks vegetasi  
 Y : nilai simpanan karbon  
 a : konstanta  
 b : koefisien regresi

#### 2.4.4 Uji Akurasi

Uji akurasi model ini menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE) yang bertujuan untuk mengukur seberapa besar kesalahan yang terjadi pada hasil prediksi model jika dibandingkan dengan nilai sebenarnya (actual). Semakin kecil nilai RMSE yang diperoleh, semakin kecil pula kesalahan yang terjadi pada penggunaan model tersebut. Perhitungan RMSE menurut Sudjana (1995) dapat dilihat pada Persamaan 6.

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum(E - O)^2}}{n} \quad (6)$$

Keterangan:

E : nilai dugaan simpanan karbon  
 O : nilai aktual simpanan karbon  
 N : jumlah pengamatan validasi

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Mangrove Nusa Lembongan

Berdasarkan hasil penelitian lapangan, terdapat 13 spesies mangrove yang berasal dari 7 familia yang teridentifikasi. Tumbuhan mangrove yang berasal dari familia Rhizophoraceae ada sebanyak 6 species, Acanthaceae sebanyak 2 species, dan dari familia Sonneratiaceae, Meliaceae, Combretaceae, Primulaceae, Euphorbiaceae hanya terdiri dari 1 spesies mangrove. Adapun spesies mangrove yang ditemukan yaitu *Rhizophora apiculata*, *Rhizophora mucronata*, *Rhizophora stylosa*, *Rhizophora lamarckii*, *Bruguiera gymnorhiza*, *Ceriops tagal*, *Avicennia marina*, *Avicennia officinalis*,

*Sonneratia alba*, *Xylocarpus granatum*, *Lumnitzera racemosa*, *Excoecaria agallocha*, dan *Aegiceras corniculatum*.

**Tabel 4.** Hasil identifikasi Mangrove, substrat dan rata-rata DBH

Plot	Rata-Rata DBH (cm)	Spesies Dominan	Substrat
1	3,11	<i>L. racemosa</i>	Lumpur keras
2	4,28	<i>R. stylosa</i>	Lumpur keras
3	3,49	<i>R. stylosa</i>	Lumpur keras
4	3,81	<i>R. stylosa</i>	Lumpur keras
5	4,91	<i>R. stylosa</i>	Lumpur keras
6	5,56	<i>A. marina</i>	Lumpur keras
7	6,04	<i>R. stylosa</i>	Lumpur keras
8	5,48	<i>L. racemosa</i>	Lumpur keras
9	6,35	<i>R. stylosa</i>	Lumpur berpasir
10	5,11	<i>R. stylosa</i>	Lumpur berpasir
11	7,51	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
12	7,64	<i>A. marina</i>	Lumpur berpasir
13	4,53	<i>A. marina</i>	Lumpur berpasir
14	6,35	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
15	4,13	<i>R. stylosa</i>	Lumpur keras
16	9,11	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
17	4,56	<i>L. racemosa</i>	Lumpur keras
18	10,33	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
19	4,61	<i>C. tagal</i>	Lumpur berpasir
20	13,44	<i>B. gymnoriza</i>	Lumpur berpasir
21	9,97	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
22	6,14	<i>B. gymnoriza</i>	Lumpur berpasir
23	5,03	<i>B. gymnoriza</i>	Lumpur berpasir
24	5,27	<i>R. stylosa</i>	Lumpur berpasir
25	5,53	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
26	10,25	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
27	9,53	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
28	10,49	<i>S. alba</i>	Lumpur berpasir
29	3,56	<i>E. agallocha</i>	Lumpur keras
30	8,92	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
31	3,32	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
32	5,39	<i>S. alba</i>	Pasir berlumpur
33	6,48	<i>S. alba</i>	Pasir berlumpur
34	11,74	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
35	4,82	<i>R. stylosa</i>	Lumpur keras
36	6,53	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
37	6,06	<i>R. stylosa</i>	Lumpur keras
38	6,15	<i>R. stylosa</i>	Lumpur keras
39	5,92	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
40	4,95	<i>C. tagal</i>	Lumpur keras
41	7,11	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
42	5,73	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
43	3,47	<i>R. stylosa</i>	Lumpur keras
44	5,77	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
45	8,16	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
46	6,48	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
47	6,39	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
48	5,83	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
49	6,12	<i>R. apiculata</i>	Lumpur berpasir
50	4,73	<i>C. tagal</i>	Lumpur berpasir



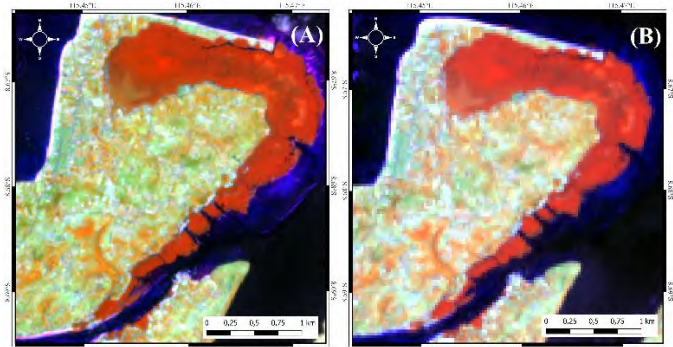
Berdasarkan Tabel 4, mangrove dari famili Rhizophoraceae memiliki jumlah spesies yang paling banyak dibandingkan dengan spesies lain yaitu sebanyak 6 spesies dan spesies *Rhizophora apiculata* merupakan spesies mangrove yang paling sering mendominasi pada plot penelitian. Banyak ditemukannya spesies dari famili Rhizophoraceae disebabkan karena substrat pada plot penelitian cenderung berlumpur. Menurut Noor *et al.* (2012) kondisi lingkungan lumpur berpasir akan mendukung kehadiran dan merupakan tempat tumbuh berkembang famili Rhizophoraceae. *R. apiculata* paling sering mendominasi pada plot pengamatan karena pada plot pengamatan yang didominasi oleh spesies ini memiliki substrat yang dominan berlumpur dan basah. Hal ini sesuai dengan pernyataan Raja *et al.* (2018) dimana spesies *R. apiculata* umumnya tumbuh pada tanah berlumpur, halus, dalam dan tergenang pada saat pasang normal. *Rhizophora apiculata* tidak menyukai substrat yang keras (Noor, 1999). Spesies *R. stylosa* juga banyak mendominasi pada plot pengamatan namun pada plot pengamatan yang di dominasi oleh spesies ini cenderung memiliki substrat yang lumpur atau tanah yang sudah mengeras. Hal ini sesuai dengan pernyataan Raja *et al.* (2018) dimana *R. stylosa* hidup pada substrat yang berkarakter keras karena spesies ini mempunyai kemampuan hidup pada substrat yang berkarakter keras, meskipun juga jenis ini ditemukan tumbuh pada substrat berlumpur. Spesies lainnya dari famili Rhizophoraceae yaitu *R. lamarckii*, *R. mucronata*, *B. gymnoriza*, *C. tagal* sering ditemukan pada substrat yang dominan lumpur dan sedikit berpasir. Famili Acanthaceae ditemukan sebanyak 2 species yaitu *A. marina* dan *A. officinalis* dimana spesies ini sering ditemukan pada substrat yang berlumpur padat dan lumpur berpasir. Menurut Masruroh & Insafitri (2020) substrat lumpur merupakan media yang baik bagi vegetasi *A. marina* karena substrat lumpur memiliki hara dan nutrisi yang cukup bagi pertumbuhan dan perkembangan mangrove tersebut. Famili Sonneratiaceae ditemukan hanya pada 1 spesies yaitu *S. alba* dimana spesies ini sering ditemukan pada daerah yang dekat dengan pantai dengan substrat dominan pasir dan minim lumpur. Menurut Yulinda *et al.* (2015) *S. alba* mampu tumbuh dengan baik pada kondisi substrat berpasir. Famili Combretaceae juga ditemukan hanya 1 spesies yaitu *L. racemosa* dimana spesies ini sering ditemukan pada substrat tipe lumpur padat atau kering. Spesies ini memiliki kriteria habitat yang dekat dengan asupan air tawar serta substrat pasir keras dan cenderung kering dengan sedikit lumpur (Noor, 2006). Pada famili Meliaceae, Primulaceae, Euphorbiaceae juga hanya terdapat 1 spesies per masing-masing famili secara berturut-turut yaitu *X. granatum*, *A. corniculatum* dan *E. agallocha* dimana ke tiga famili ini tidak pernah mendominasi pada plot penelitian.

Berdasarkan tabel, rata-rata DBH mangrove per plot pengamatan pada penelitian ini berada pada rentang 3,11 cm-13,44 cm. Hanya terdapat 9 spesies mangrove yang menjadi dominan dalam plot penelitian. Plot mangrove yang di dominasi oleh spesies *L. racemosa*, *C. tagal*, *R. stylosa* dan *E. agallocha* cenderung memiliki nilai rata-rata DBH yang lebih kecil dengan nilai kurang dari 5 cm dibandingkan dengan spesies lainnya yang mendominasi seperti *R. apiculata*, *B. gymnoriza*, *A. marina* dan *S. alba* yang memiliki nilai rata-rata DBH cenderung lebih besar dari 5 cm. Besar kecilnya nilai DBH akan berpengaruh pada nilai biomassa karena nilai biomassa secara langsung dipengaruhi DBH dimana semakin tinggi DBH suatu pohon, maka akan menghasilkan nilai biomassa yang lebih tinggi (Lestariningsih *et al.* 2022).

### 3.2 Pengolahan Citra

#### 3.2.1 Komposit Citra

Hasil komposit citra pada Sentinel-2 dan Landsat-8 ditunjukkan pada Gambar 5.

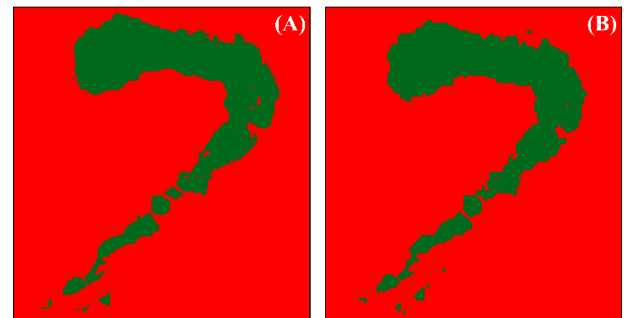


**Gambar 4.** Hasil Komposit Citra Sentinel-2 (A) dan Landsat-8 (B)

Komposit citra yang digunakan pada masing-masing citra adalah komposit *false color* yang menggunakan kanal NIR, SWIR dan merah. Objek mangrove terlihat sangat jelas berbeda dengan objek lain dengan menonjolkan warna merah kecoklatan. Objek mangrove merah kecoklatan karena memiliki nilai yang relatif tinggi pada kanal NIR, SWIR dan merah dibandingkan dengan objek lain Suardana *et al.* (2023).

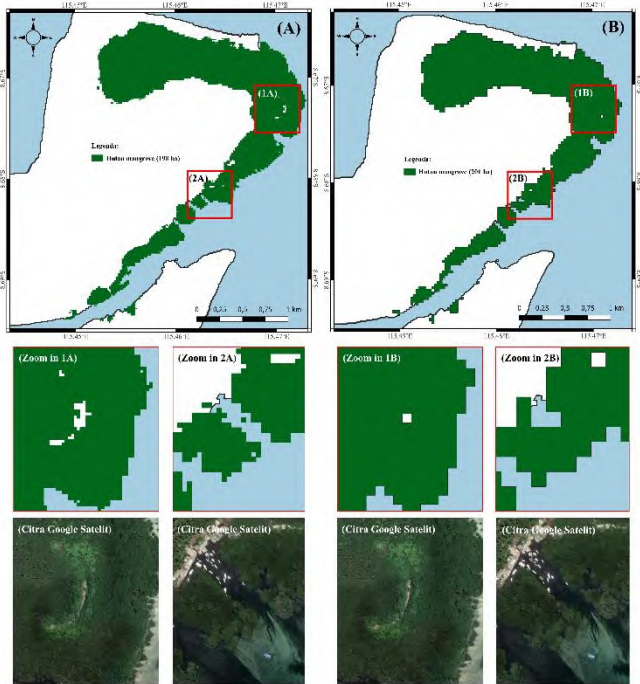
#### 3.2.2 Klasifikasi Citra

Hasil klasifikasi citra pada Sentinel-2 dan Landsat-8 ditunjukkan pada Gambar 6.



**Gambar 5.** Hasil Klasifikasi Citra Sentinel-2 (A) dan Landsat-8 (B)

Gambar 6 menunjukkan hasil klasifikasi *maximum likelihood* pada masing-masing citra, yang terbagi menjadi dua kelas yaitu kelas mangrove divisualisasikan dengan warna hijau dan kelas non-mangrove dengan warna merah. Uji akurasi pada Sentinel-2 menghasilkan *Overall Accuracy* (OA) sebesar 97,8% dan pada Landsat-8 sebesar 95,9%. Menurut Sutanto (2013), jika nilai *Overall Accuracy* >80% tingkat ketelitian hasil klasifikasi tersebut sudah terkategori baik dan sesuai. Menurut Suwanprasit & Srichai (2012), resolusi spasial yang lebih halus memiliki pengaruh signifikan pada hasil klasifikasi, sehingga hal itu memainkan peran krusial dalam kualitas variasi klasifikasi penggunaan lahan/tutupan lahan. Dalam penelitian Maksum *et al.* (2016), Manalu *et al.* (2018) dan Alfiansyah *et al.* (2023) juga mendapatkan hasil serupa dimana citra dengan resolusi spasial tinggi memiliki nilai OA lebih tinggi pada klasifikasi berbasis piksel.



**Gambar 6.** Hasil *masking* Citra Sentinel-2 (A), Hasil *masking* Landsat-8 (B), Perbesaran area klasifikasi Sentinel-2 (1A), Perbesaran area klasifikasi Sentinel-2 (2A), Perbesaran area klasifikasi Landsat-8 (1B), Perbesaran area klasifikasi Landsat-8 (2B)

Berdasarkan Gambar 7, pada Sentinel-2 didapatkan area mangrove yang terdeteksi sebesar 198 ha sementara pada Landsat-8 didapatkan area mangrove yang terdeteksi sebesar 201 ha. Luasan mangrove yang terdeteksi/terklasifikasi pada Landsat-8 memiliki area yang lebih luas dibandingkan dengan Sentinel-2 dengan perbedaan sebesar 3 ha. Pada Gambar 7 (1A, 2A, 1B, 2B), menunjukkan area yang menyebabkan terjadinya perbedaan luasan antara kedua hasil klasifikasi citra. Berdasarkan data citra dengan resolusi yang lebih tinggi melalui citra Google Satelit, bisa diverifikasi beberapa area yang mengalami kesalahan klasifikasi baik pada Sentinel-2 dan Landsat-8. Apabila dibandingkan, kesalahan lebih banyak terdapat pada Landsat-8. Hal ini diduga karena ukuran piksel yang besar pada Landsat-8 yang menyebabkan area non mangrove di tengah tersebut terklasifikasi menjadi mangrove sementara pada Sentinel-2 lebih detail dalam mengklasifikasinya.

Luasan mangrove yang terdeteksi pada penelitian ini berkurang apabila dibandingkan dengan penelitian Palguna *et al.* (2017) yang menyebutkan luasan mangrove Nusa Lembongan sebesar 202 Ha dan pada penelitian Pricillia *et al.* (2021) mendeteksi luasan mangrove Nusa Lembongan menggunakan Sentinel-2 sebesar 203,67 ha. Berkurangnya luasan mangrove pada penelitian ini diduga karena pada saat survey di lapangan terdapat kawasan yang sudah tertimbun batu kapur yang kemungkinan dialihfungsikan untuk tujuan lain (Gambar 8).

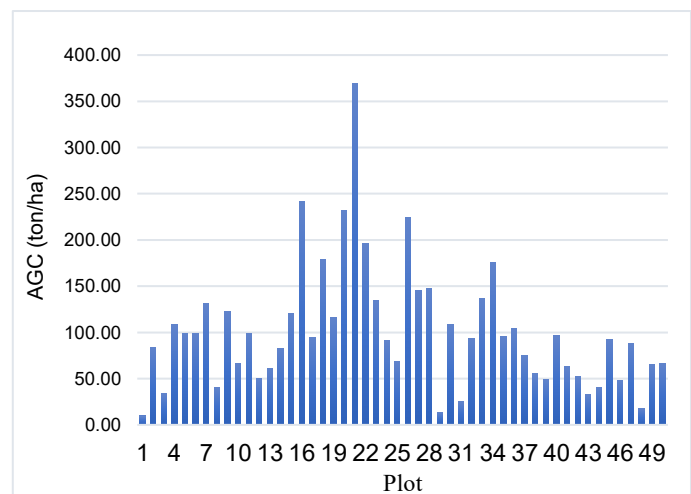


**Gambar 7.** Area mangrove yang mengalami perubahan

### 3.3 Simpanan Karbon Mangrove Nusa Lembongan

Jumlah AGC dan BGC pada setiap plot berdasarkan pengambilan data lapangan dapat dilihat pada Gambar 8. Berdasarkan Gambar 9, jumlah AGC tertinggi ada pada plot 21 dengan nilai sebesar 369,56 ton/ha dan spesies yang mendominasi adalah *Rhizophora apiculata* yang memiliki nilai rata-rata DBH sebesar 9,97 cm, sedangkan nilai AGC terendah ada pada plot 1 dengan nilai sebesar 9,76 ton/ha dan spesies yang mendominasi adalah *Lumnitzera racemosa* yang memiliki nilai rata-rata DBH sebesar 3,11 cm. Adinugroho dan Sidiasa, (2006) menyatakan ukuran diameter batang berbanding lurus dengan nilai biomassa, semakin tinggi nilai DBH maka mengindikasikan semakin tua pohon tersebut dan mempunyai cadangan karbon yang lebih banyak.

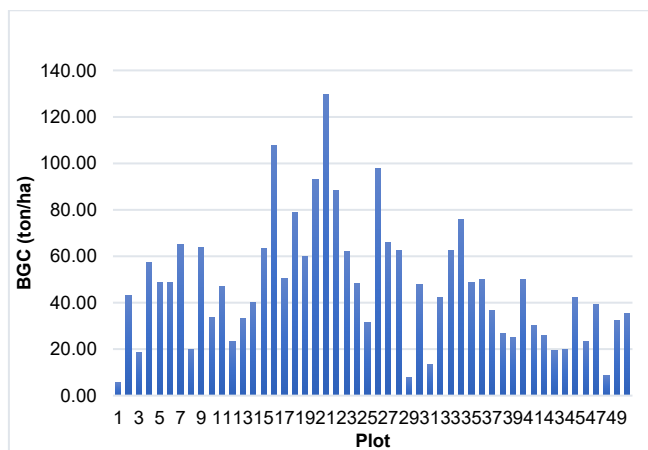
Dalam penelitian ini, nilai rata-rata DBH (Tabel 4) tertinggi ada pada plot 20 dengan nilai sebesar 13,44 cm, tetapi nilai AGC yang dihasilkan sebesar 232,27 ton/ha tidak sebesar plot 21. Hal ini dikarenakan plot 20 didominasi oleh *Bruguiera gymnoriza* sedangkan pada plot 21 didominasi oleh *Rhizophora apiculata*. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian dari Rachmawati *et al.* (2014), Suryono *et al.* (2018) dan Suardana *et al.* (2023) nilai biomassa dari spesies *Rhizophora* sp. lebih besar dibandingkan spesies mangrove yang lain sehingga menghasilkan nilai simpanan karbon yang lebih besar pula dari spesies lain. Perbedaan nilai massa jenis kayu juga turut memberikan perbedaan nilai estimasi simpanan karbon dimana nilai massa jenis kayu dari *Rhizophora* sp. lebih besar dibanding spesies lain. Menurut Rachmawati *et al.* (2014) kandungan biomassa mangrove dipengaruhi oleh kerapatan, diameter, spesies dan massa jenis kayu mangrove.



**Gambar 8.** Grafik AGC lapangan

AGC terendah ada pada plot 1 diduga karena spesies yang mendominasi pada plot tersebut yaitu *Lumnitzera racemosa* memiliki rata-rata diameter yang rendah. Rata-rata nilai AGC pada penelitian ini adalah sebesar 100,81 ton/ha. Hasil tersebut lebih besar dibandingkan penelitian sebelumnya di tempat yang sama yaitu penelitian dari Kusumaningtyas *et al.* (2014) mendapatkan nilai rata-rata AGC sebesar 59,95 ton/ha di Nusa Lembongan dan Penelitian dari Pricillia *et al.* (2021) mendapatkan rata-rata AGC sebesar  $56,41 \pm 50,94$  Mg C/ha. Sementara pada tempat berbeda penelitian dari Suardana *et al.* (2023) mendapatkan nilai rata-rata AGC sebesar 82,97 ton/ha di Teluk Benoa, penelitian dari Andiani (2021) mendapatkan nilai rata-rata AGC sebesar  $193,45 \pm 34,88$  ton/ha pada Teluk Benoa. Besar kecilnya nilai DBH akan berpengaruh pada nilai biomassa karena nilai biomassa secara langsung dipengaruhi DBH dimana semakin tinggi DBH suatu pohon, maka akan menghasilkan nilai biomassa yang lebih tinggi (Lestariningsih *et al.* 2022). Menurut Rachmawati *et al.* (2014) kandungan biomassa mangrove dipengaruhi oleh kerapatan, diameter, spesies dan massa jenis kayu mangrove.

Berdasarkan Gambar 10, jumlah BGC memiliki nilai tertinggi dan terendah di plot yang sama dengan simpanan karbon diatas permukaan tanah yaitu tertinggi ada di plot 21 dengan nilai sebesar 129,72 ton/ha dengan spesies yang mendominasi adalah *R. apiculata* dan terendah pada plot 1 dengan nilai 5,62 ton/ha dengan spesies yang mendominasi adalah *L. racemosa*. Secara keseluruhan, jumlah simpanan karbon di bawah permukaan tanah pada setiap plot memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai simpanan karbon di atas permukaan tanah. Hal ini sejalan dengan penelitian dari Kusumaningtyas *et al.* (2014), Suryono *et al.* (2018) dan Indrayani *et al.* (2021) dimana pada hasil penelitian mereka, nilai simpanan karbon di bawah permukaan lebih kecil dibandingkan dengan simpanan karbon diatas permukaan.



**Gambar 9.** Grafik Below Ground Carbon lapangan

Perhitungan *below ground biomass* pada penelitian ini menggunakan rumus allometrik umum untuk *below ground biomass* mangrove dimana dalam rumusnya menggunakan DBH untuk mengestimasi simpanan karbon di bawah tanah atau dalam hal ini biomassa akar. Menurut Adame *et al.* (2017) akar hanya menyumbang sekitar 1 hingga 16% dari total stok karbon, namun prediksi ini juga masih belum pasti karena biomassa akar biasanya diestimasi secara tidak langsung dengan persamaan allometrik. Lebih lanjut, pada penelitian Adame *et al.* (2017) mendapatkan hasil bahwa biomassa akar yang diperoleh dari persamaan allometrik memiliki nilai 40% lebih tinggi daripada biomassa akar yang langsung diukur di

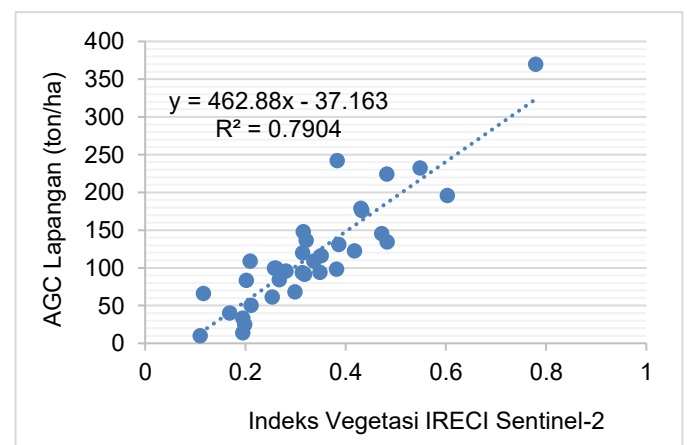
lapangan. Nilai rata-rata BGC pada penelitian ini adalah 47,02 ton/ha. Hasil nilai rata-rata ini lebih besar dari penelitian Kusumaningtyas *et al.* (2014) ditempat yang sama dengan nilai 30,77 ton/ha. Pengukuran BGC dilakukan dengan mengestimasi melalui DBH pohon sehingga berbeda ini juga dipengaruhi oleh perbedaan nilai DBH yang ditemui.

### 3.4 Hubungan Stok Karbon Lapangan Dengan Indeks Vegetasi

Hubungan stok karbon lapangan dengan indeks vegetasi dapat dilihat pada Tabel 5.

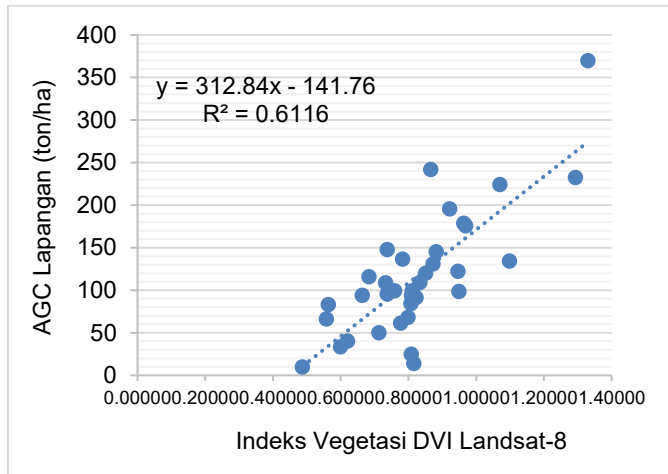
**Tabel 5.** Hubungan Antara Simpanan Karbon Lapangan dan Indeks vegetasi

Stok karbon	Indeks	Sentinel-2 ( $R^2$ )	Landsat-8 ( $R^2$ )
AGC	DVI	0,74	0,61
	NDVI	0,70	0,47
	SAVI	0,72	0,60
	TRVI	0,76	0,60
	GCI	0,77	0,54
	CVI	0,62	0,22
	GNDVI	0,71	0,47
	ARVI	0,72	0,50
	SIPI	0,46	0,34
	NBR	0,65	0,44
	IRECI	0,79	-
	DVI	0,67	0,54
	NDVI	0,69	0,43
	SAVI	0,69	0,54
BGC	TRVI	0,72	0,52
	GCI	0,73	0,48
	CVI	0,61	0,22
	GNDVI	0,70	0,44
	ARVI	0,70	0,46
	SIPI	0,49	0,34
	NBR	0,61	0,39
	IRECI	0,70	-

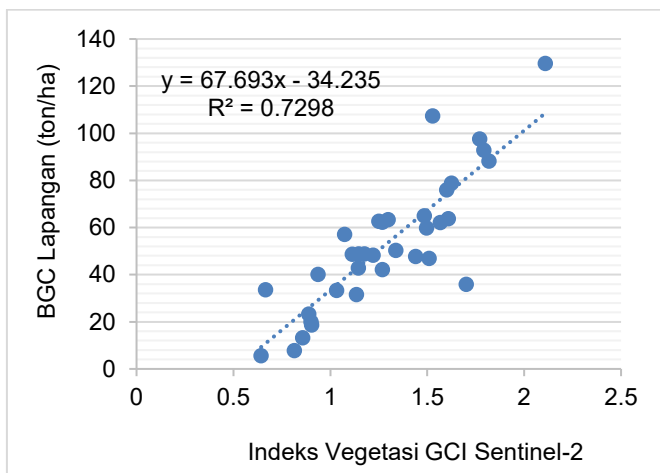


**Gambar 10.** Grafik Regresi Linier Terbaik AGC Lapangan Dengan Indeks Vegetasi Pada Sentinel-2.

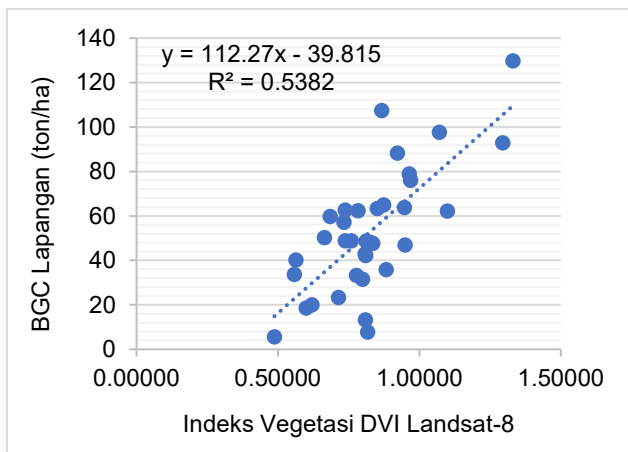




**Gambar 11.** Grafik Regresi Linier Terbaik AGC Lapangan Dengan Indeks Vegetasi Pada Landsat-8.



**Gambar 12.** Grafik Regresi Linier Terbaik BGC Lapangan Dengan Indeks Vegetasi Pada Sentinel-2.



**Gambar 13.** Grafik Regresi Linier Terbaik BGC Lapangan Dengan Indeks Vegetasi Pada Landsat-8.

Pada penelitian ini, dilakukan komparasi kinerja 10 indeks vegetasi yang dapat diaplikasikan pada citra Sentinel-2 dan Landsat-8 untuk mengestimasi stok karbon mangrove, yaitu AGC dan BGC. Hasil analisis (Tabel 5) menunjukkan bahwa nilai korelasi antara indeks vegetasi dan stok karbon pada Sentinel-2 umumnya lebih tinggi daripada Landsat-8. Ini menunjukkan bahwa Sentinel-2 memiliki sensitivitas yang lebih baik dalam mendeteksi variasi stok karbon pada vegetasi mangrove. Pada estimasi AGC pada 10 indeks vegetasi, indeks GCI pada Sentinel-2 menunjukkan korelasi tertinggi dengan

nilai  $R^2$  sebesar 0,77, sedangkan pada Landsat-8, indeks terbaik adalah DVI dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,61. GCI yang tinggi pada Sentinel-2 kemungkinan disebabkan oleh sensitivitas kanal hijau yang lebih optimal dalam menangkap reflektansi dari vegetasi mangrove, terutama yang kaya akan klorofil, yang berperan penting dalam estimasi stok karbon di atas permukaan. Berdasarkan spektralnya, vegetasi hijau memiliki reflektivitas yang tinggi di kanal hijau (Kurbanov, 2020). Pada Landsat-8, indeks DVI memiliki nilai terbaik dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,61. Menurut Wicaksono *et al.* (2015), DVI merupakan salah satu indeks vegetasi yang terbaik dalam pemetaan stok karbon karena DVI merupakan indeks vegetasi yang konsisten di berbagai tingkat koreksi radiometrik dan memiliki formula yang sederhana dimana hanya membutuhkan kanal merah dan NIR. Menurut Tucker (1980) penyerapan gelombang elektromagnetik di kanal merah oleh klorofil dan refleksinya yang tinggi di kanal NIR adalah alasan koefisien korelasi tinggi. Hal ini berlaku juga pada indeks yang formulanya terbentuk atas kanal merah dan NIR lainnya seperti indeks vegetasi TRVI, DVI, SAVI dan NDVI memiliki nilai  $R^2$  yang baik pada kedua citra, namun untuk NDVI pada Landsat-8 kinerjanya masih dibawah 50%. Berdasarkan hasil penelitian Wicaksono *et al.* 2015, indeks vegetasi NDVI memiliki kinerja yang optimal pada tingkat DN atau level radiansi dan menurun nilainya pada tingkat *surface reflectance*.

Pada penelitian ini, produk satelit yang digunakan merupakan produk yang sudah terkoreksi secara atmosferik, namun produk yang diunduh masih memiliki nilai dalam bentuk DN yang perlu di kalibrasi untuk diubah menjadi *surface reflectance* dimana pada Landsat-8 penerapan kalibrasi ini memiliki nilai yang berbeda pada tingkat DN dan *surface reflectance* sementara pada Sentinel-2 penerapan kalibrasi hanya mengecilkan nilainya menjadi desimal. Indeks vegetasi GCI, CVI, GNDVI terbentuk atas formula dari kanal hijau dan NIR. Pada GCI memiliki kinerja yang baik pada kedua citra, sedangkan indeks CVI dan GNDVI masih belum mampu menjelaskan 50% variasi pada Landsat-8, terutama pada indeks CVI yang memiliki nilai sangat rendah yang berarti penggunaan indeks ini untuk melihat variasi stok karbon mangrove pada Landsat-8 perlu dipertimbangkan. Indeks vegetasi ARVI dan SIPI sama-sama terbentuk atas kanal biru, merah dan NIR. Pada indeks vegetasi ARVI memiliki kinerja yang baik pada kedua citra tetapi indeks vegetasi SIPI menunjukkan kinerja yang kurang pada kedua citra karena belum mampu menjelaskan setengah dari variasi data. Ini menunjukkan bahwa SIPI diduga kurang cocok untuk digunakan dalam pemodelan stok karbon mangrove, terutama dengan data Landsat-8. Sementara pada indeks NBR memiliki kinerja yang kurang baik pada Landsat-8

Pada estimasi BGC (Tabel 5), korelasi antara indeks vegetasi dengan stok karbon umumnya lebih rendah dibandingkan AGC pada kedua satelit dimana nilai yang  $R^2$  yang dihasilkan cenderung lebih kecil dibandingkan dengan nilai  $R^2$  pada AGC, hanya indeks vegetasi CVI dan SIPI pada Sentinel-2 yang memiliki nilai  $R^2$  yang lebih tinggi dibanding  $R^2$  pada AGC, sementara pada Landsat-8 kedua indeks tersebut memiliki nilai  $R^2$  yang sama pada AGC dan BGC. Berdasarkan hasil penelitian Wicaksono *et al.* (2015) bahwa pemetaan BGC lebih sulit dilakukan karena BGC tidak secara langsung berkaitan dengan reflektansi daun. Selain itu, karena bagian atas pohon mangrove terkait dengan daun sebagai jaringan yang memantulkan cahaya, seharusnya bagian bawah tanah juga berkorelasi, namun terdapat berbagai kesalahan dari hubungan antara parameter pohon yang masuk ke dalam hubungan antara

jaringan yang memantulkan dan BGC mangrove. Sebagai hasilnya, nilai  $R^2$  antara nilai piksel mangrove dan BGC mangrove menurun. Sebagai akibatnya, akurasi peta BGC mangrove lebih rendah dibandingkan dengan peta AGC.

Selain 10 indeks tersebut, Sentinel-2 memiliki keunggulan dalam penggunaan kanal red-edge yang tidak tersedia di Landsat-8, yang diwakili oleh indeks IRECI. Indeks ini menunjukkan performa tertinggi untuk model AGC. dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,79. Sesuai dengan penelitian Castillo *et al.* (2017), red-edge sensitif terhadap perubahan biofisik vegetasi, termasuk kandungan klorofil yang mempengaruhi stok karbon di atas permukaan tanah. Kanal red-edge dapat menangkap variasi reflektansi pada panjang gelombang 670–760 nm yang dikenal efektif dalam mendeteksi perubahan klorofil (Curran *et al.* 1995), sehingga memberikan akurasi tinggi pada estimasi AGC. Dengan kinerja IRECI yang sangat baik ini, terlihat bahwa kanal red-edge pada Sentinel-2 memberikan informasi tambahan yang signifikan untuk penginderaan vegetasi mangrove, yang menjadikannya unggul dibandingkan dengan Landsat-8 dalam pemodelan stok karbon. Pada korelasi IRECI dengan BGC juga menghasilkan nilai  $R^2$  yang cukup baik namun belum menjadi yang terbaik dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,70 yang tergolong baik dibandingkan indeks-indeks vegetasi lain yang tidak memanfaatkan kanal *red-edge*, yang sering kali memiliki korelasi lebih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa kanal *red-edge* pada Sentinel-2 tetap memberikan kontribusi penting dalam pemodelan BGC meski tidak secara langsung berkaitan dengan karakteristik jaringan yang lebih dalam, seperti akar. Penelitian ini pun mempertegas bahwa IRECI pada Sentinel-2 memiliki keunggulan signifikan dalam model estimasi karbon, baik AGC maupun BGC, dibandingkan dengan indeks-indeks yang berbasis pada kanal spektral lain yang tersedia pada Landsat-8.

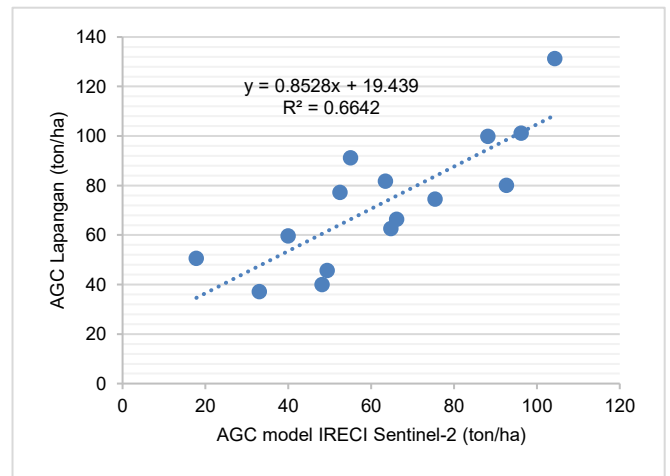
### 3.5 Perbandingan Kemampuan Citra Multispektral

Hasil RMSE dari setiap indeks pada Sentinel-2 dan Landsat-8 dapat dilihat pada Tabel 6.

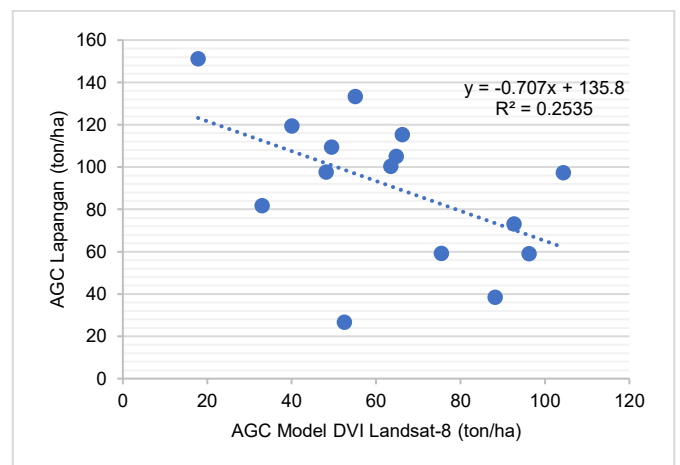
**Tabel 6.** Hasil Prediksi Error (RMSE) Dari Setiap Indeks

Stok karbon	Indeks	Sentinel-2	Landsat-8
AGC	DVI	20,87	57,27
	NDVI	23,12	87,02
	SAVI	20,67	64,93
	TRVI	19,65	85,26
	GCI	18,54	85,23
	CVI	28,26	75,32
	GNDVI	22,69	86,48
	ARVI	24,59	87,79
	SIPI	60,56	82,2
	NBR	58,12	92,38
BGC	IRECI	18,02	-
	DVI	8,98	23,69
	NDVI	10,31	35,23
	SAVI	9,05	26,82
	TRVI	9,22	34,2
	GCI	7,94	34,36
	CVI	10,76	31,31

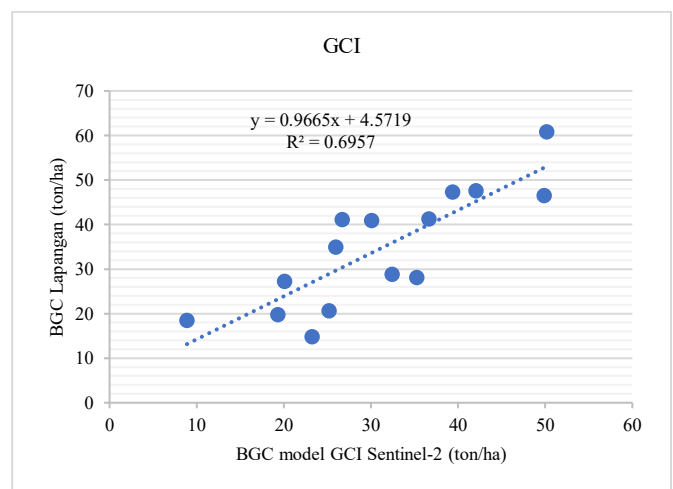
GNDVI	9,27	35,03
ARVI	11,18	35,43
SIPI	25,19	33,84
NBR	23,76	36,88
IRECI	9,29	-



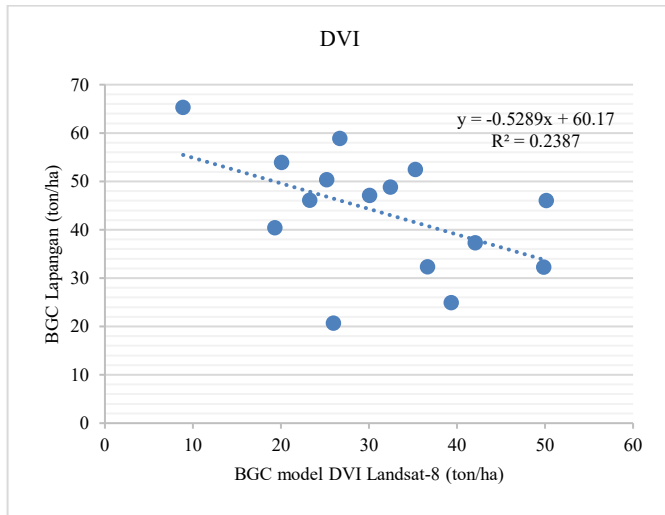
**Gambar 14.** Grafik Regresi Linier terbaik hubungan antara AGC Lapangan Dengan AGC Model Pada Sentinel-2.



**Gambar 15.** Grafik Regresi Linier terbaik hubungan antara AGC Lapangan Dengan AGC Model Pada Landsat-8.



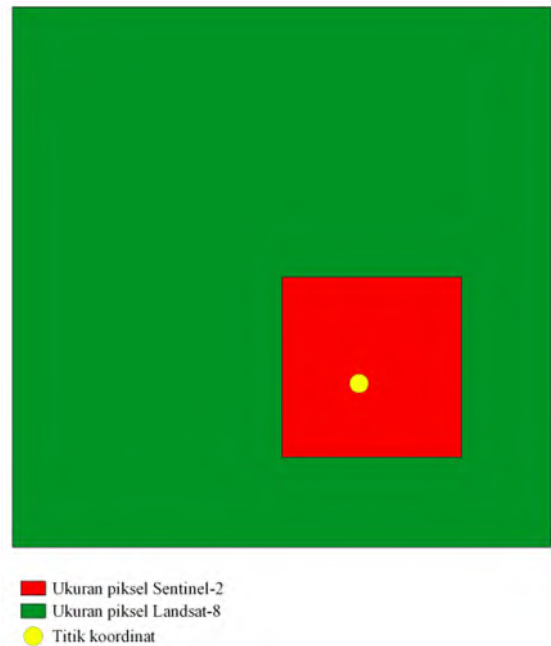
**Gambar 16.** Grafik Regresi Linier terbaik hubungan antara BGC Lapangan Dengan BGC Model Pada Sentinel-2.



**Gambar 17.** Grafik Regresi Linier terbaik hubungan antara BGC Lapangan Dengan BGC Model Pada Landsat-8.

Berdasarkan Tabel 6, secara keseluruhan nilai RMSE yang dihasilkan pada Sentinel-2 lebih kecil daripada Landsat-8 baik pada AGC maupun BGC yang berarti Sentinel-2 memiliki akurasi yang lebih baik dalam memetakan stok karbon mangrove. Perbedaan akurasi pada kedua citra ini diduga disebabkan karena perbedaan pixel pada kedua citra. Penelitian sebelumnya mengatakan citra pada resolusi spasial yang lebih tinggi menghasilkan hasil yang lebih presisi karena informasi stok karbon di atas permukaan mangrove dapat diperoleh sesuai dengan resolusi spasial citra (Wicaksono, 2017). Lebih rendahnya nilai akurasi pada Landsat-8 juga diduga karena ukuran sampel plot lapangan yang diintegrasikan pada resolusi spasial yang berbeda.

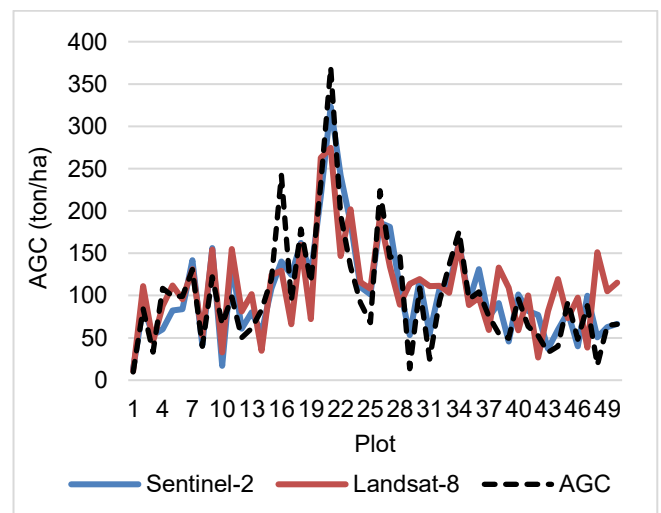
Dalam penelitian ini, ukuran sampel yang digunakan 10 x 10 m yang diintegrasikan ke dalam 2 citra yaitu Sentinel-2 dan Landsat-8 (Gambar 19). Citra Sentinel-2 memiliki akurasi yang lebih baik karena resolusi spasial citra tersebut sesuai atau mewakili dari ukuran sampel lapangan yang digunakan, sehingga citra Sentinel-2 ideal untuk memetakan AGC dan BGC mangrove dengan menggunakan ukuran sampel lapangan tersebut. Sementara pada Landsat-8, ukuran sampel lapangan tidak mewakili secara penuh karena pada dasarnya resolusi spasial citra Landsat-8 sebesar 30 m, sehingga hasil  $R^2$  dan akurasi SE yang dihasilkan dari citra Landsat-8 OLI memiliki hasil yang kurang baik dibandingkan citra Sentinel-2, namun masih mampu dalam memetakan AGC dan BGC pada indeks tertentu.



**Gambar 18.** Perbandingan Piksel Sentinel-2 dan Landsat-8 Pada Titik koordinat ke-30

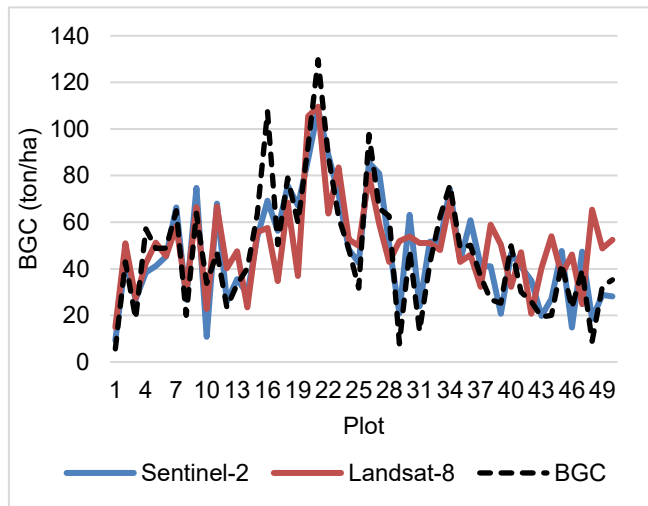
Hal ini berarti, penggunaan plot sample berukuran 10 x 10 m masih mampu bekerja pada Landsat-8, namun untuk penelitian selanjutnya, pertimbangan penggunaan plot sampel yang mewakili resolusi spasial citra perlu dilakukan untuk meningkatkan akurasi dari citra tersebut. Menurut Wicaksono (2017), model dengan  $R^2$  tertinggi dan SE terendah tidak selalu menghasilkan distribusi spasial stok karbon di atas permukaan mangrove yang dapat diterima. Sehingga, perlu dilakukan analisis lebih lanjut mengenai hasil distribusi spasial stok karbon di atas permukaan mangrove.

Estimasi simpanan karbon setiap citra berasal dari model indeks vegetasi terbaik. Penentuan indeks vegetasi terbaik dalam mengestimasi karbon dipilih berdasarkan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) tertinggi dan nilai RMSE yang rendah. Pemetaan simpanan karbon berasal dari model indeks vegetasi terbaik pada masing-masing citra. Pada AGC, digunakan karbon model IRECI (RMSE = 18,02) untuk Sentinel-2 dan DVI (RMSE = 57,27) pada Landsat-8, sedangkan Pada BGC, digunakan karbon model GCI (RMSE = 7,94) untuk Sentinel-2 dan DVI (RMSE = 23,69) pada Landsat-8.



**Gambar 19.** Grafik Perbandingan Hasil Estimasi Model AGC (ton/ha)

Berdasarkan Gambar 20, nilai estimasi pada citra Sentinel-2 berkisar antara 13,66-323,53 ton/ha dengan nilai rata-rata sebesar 103,87 ton/ha sedangkan pada citra Landsat-8 berkisar antara 10,65-274,54 ton/ha dengan nilai rata-rata sebesar 109,21 ton/ha. Nilai rata-rata estimasi AGC pada 50 plot yang dihasilkan oleh model pada Sentinel-2 memiliki nilai yang mendekati nilai rata-rata AGC lapangan (100,81 ton/ha) dengan perbedaan nilai sebesar 3,04 ton/ha sementara nilai rata-rata estimasi AGC yang dihasilkan model Landsat-8 memiliki perbedaan nilai sebesar 8,39 ton/ha.



**Gambar 20.** Grafik Perbandingan Hasil Estimasi Model AGC (ton/ha)

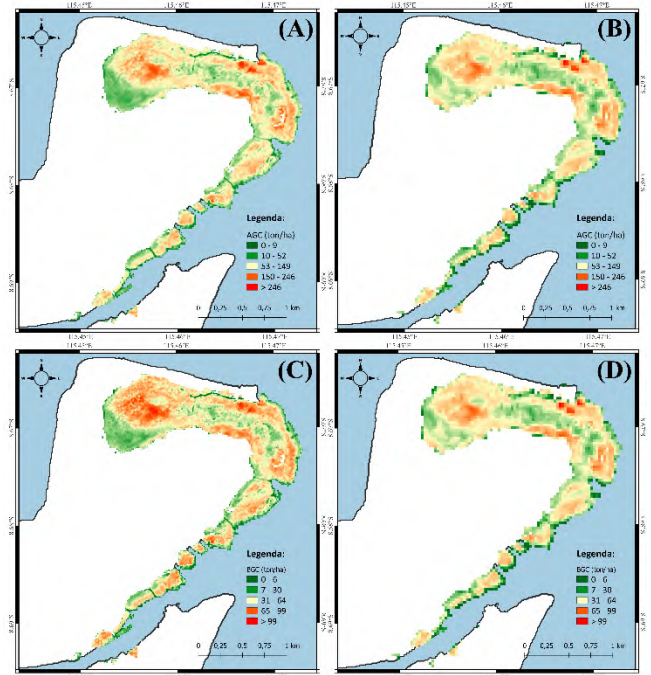
Berdasarkan Gambar 21, nilai estimasi pada citra Sentinel-2 berkisar antara 9,26-108,49 ton/ha dengan nilai rata-rata sebesar 47,48 ton/ha sedangkan pada citra Landsat-8 berkisar antara 14,88-109,58 ton/ha dengan nilai rata-rata sebesar 50,25 ton/ha. Hasil estimasi model BGC menunjukkan hasil yang serupa dimana Sentinel-2 memiliki nilai rata-rata estimasi BGC yang lebih mendekati nilai rata-rata BGC lapangan (47,02 ton/ha) dengan nilai perbedaan sebesar 0,46 ton/ha sementara nilai rata-rata estimasi BGC yang dihasilkan model Landsat-8 memiliki perbedaan nilai sebesar 3,23 ton/ha. Berdasarkan hasil pada Gambar 11 dan Gambar 12 menunjukkan kinerja model pada Sentinel-2 yang lebih baik dibandingkan dengan Landsat-8.

**Tabel 7.** Hasil estimasi AGC & BGC total berdasarkan data citra

Stok Karbon	Sentinel-2 (ton)	Landsat-8 (ton)
AGC	20.566,26	21.951,21
BGC	9.401,04	10.100,25

Berdasarkan Gambar 7, luas hutan mangrove nusa lembongan adalah 198 ha pada Sentinel-2 dan 201 ha pada Landsat-8, sehingga berdasarkan luas tersebut jumlah total AGC pada hutan mangrove Nusa Lembongan adalah sebesar 20.566,26 ton pada Sentinel-2 dan 21.951,21 ton pada Landsat-8 sedangkan berdasarkan luas tersebut juga, jumlah total BGC pada hutan mangrove Nusa Lembongan adalah sebesar 9.401,04 ton pada Sentinel-2 dan 10.100,25 ton pada Landsat-8 (Tabel 7).

Model indeks terbaik dari masing-masing citra dipilih untuk dijadikan model distribusi spasial AGC dan BGC. Distribusi model AGC dan BGC pada Nusa Lembongan bisa dilihat pada Gambar 13.

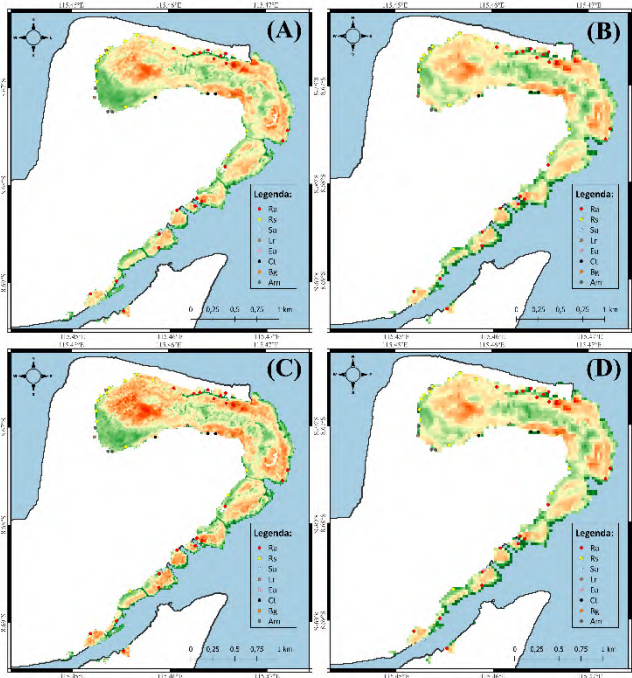


**Gambar 21.** Distribusi Spasial AGC Citra Sentinel-2 (A) dan Landsat-8 (B) dan Distribusi Spasial BGC Sentinel-2 (C) dan Landsat-8 (D)

Pada Gambar 22, peta distribusi AGC dan BGC baik pada Sentinel-2 dan Landsat-8 memiliki pola warna yang mirip dimana warna hijau cenderung berada pada daerah pinggir atau di sisi luar mangrove dan ada juga yang di sisi tengah yang menandakan pada area tersebut terdapat kandungan AGC dan BGC yang lebih rendah sementara warna kuning dan merah cenderung berada pada zona tengah mangrove yang menandakan zona tersebut memiliki kandungan AGC dan BGC yang lebih tinggi.

Pada Gambar 23, peta distribusi AGC dan BGC menggambarkan terdapat perbedaan warna dimana hijau merupakan zona yang memiliki nilai karbon rendah dan merah merupakan zona yang memiliki nilai karbon tinggi. Sebaran warna merah dan kuning cenderung berada di zona tengah hutan sementara warna hijau cenderung berada pada zona luar baik yang dekat dengan laut maupun dekat dengan daratan. Apabila sebaran warna dibandingkan dengan sebaran dominasi spesies pada plot penelitian, zona warna merah dan kuning cenderung didominasi oleh spesies *R. apiculata* dan *B. gymnoriza*. Sementara zona warna hijau cenderung didominasi oleh spesies *R. stylosa*, *E. agallocha*, *L. racemosa*, *C. tagal*. Besar kecilnya nilai karbon oleh spesies ini disebabkan karena perbedaan nilai DBH yang ditemukan pada plot penelitian.





**Gambar 22.** Distribusi Spasial AGC Citra Sentinel-2 (A) dan Landsat-8 (B) dan Distribusi Spasial BGC Sentinel-2 (C) dan Landsat-8 (D) Berdasarkan Spesies Dominan

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, maka dapat disimpulkan:

1. Berdasarkan data lapangan ditemukan 13 spesies mangrove yang berasal dari 7 familia yang teridentifikasi dengan nilai rata-rata AGC dan BGC sebesar 100,81 ton/ha dan 47,02 ton/ha.
2. Citra Sentinel-2A menunjukkan korelasi yang lebih kuat dalam mengestimasi simpanan karbon baik AGC ataupun BGC dibandingkan dengan Landsat-8. Hal ini mengindikasikan bahwa Sentinel-2A lebih unggul dalam analisis vegetasi untuk mengestimasi simpanan karbon mangrove di Nusa Lembongan.
3. Citra Sentinel-2A memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mengestimasi stok karbon mangrove di Nusa Lembongan dibandingkan dengan Landsat-8 dengan hasil analisis RMSE pada estimasi dari citra Sentinel-2A yang lebih kecil dibandingkan estimasi dari citra Landsat-8 pada seluruh indeks vegetasi baik AGC maupun BGC.

## Ucapan Terimakasih

Penelitian ini didanai oleh Korea-Indonesia MTCRC (Marine Technology Cooperation Research Center) dan UNICERF (Udayana University International Senior Researcher Fellowship).

## Daftar Pustaka

- As-syakur, Abd. Rahman & Wijaya, I Made & Andiani, Anak Agung & Pradnyandari Dewi, I Gusti Ayu & Sugiana, I Putu & Faiqoh, Elok & Budi Wiyanto, Dwi & Rachman, Herlambang. (2023). Pedoman Identifikasi Mangrove di Bali.
- Adame, M. F. Cherian, R. Reef, R. & Stewart-Koster, B. (2017). Mangrove root biomass and the uncertainty of belowground carbon estimations. In *Forest Ecology and Management* (Vol. 403, pp. 52–60). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.016>
- Adinugroho, W. C. & Sidiyasa, K. (2006). Model pendugaan biomassa pohon mahoni (*Swietenia macrophylla* King) di atas permukaan tanah. *Jurnal penelitian Hutan dan Konservasi alam*, 3(1), 103-117.
- Alfiansyah, M. Nuarsa, I. W. & Brasika, I. B. M. (2023). Perbandingan Beberapa Metode Klasifikasi Menggunakan Citra Landsat dan

- Sentinel Untuk Pemetaan Sebaran Mangrove Di Kawasan Ekowisata Mangrove PIK Jakarta Utara. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 9(1), 82-95.
- Andiani, A. A. E. Karang, I. W. G. A. Putra, I. N. G. & Dharmawan, I. W. E. (2021). Hubungan antar parameter struktur tegakan mangrove dalam estimasi simpanan karbon aboveground pada skala komunitas. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 13(3), 483-496.
- Antu, Y. R. Sahami, F. M. Hamzah, S. N. Id, Y. C. Manajemen, J. Perairan, S. Perikanan, F. & Kelautan, I. (2015). Keanekaragaman Jenis dan Indeks Nilai Penting Mangrove di Desa. In *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan* (Vol. 3, Issue 1).
- Badan Informasi Geospasial. (2014). Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 3 Tahun 2014 tentang Pedoman Teknis Pengumpulan dan Pengolahan Data Geospasial Mangrove.
- Candra, E. D. Hartono, Wicaksono, P. (2016). Above Ground Carbon Stock Estimates of Mangrove Forest Using Worldview-2 Imagery in Teluk Benoa, Bali. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 47 (2016). <http://iopscience.iop.org/1755-1315/47/1/012014>
- Castillo, J. A. A. Apan, A. A. Maraseni, T. N. & Salmo III, S. G. (2017). Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134, 70-85.
- Clevers, J. G. P. W. Jong, S. M. De, Epema, G. F. Addink, E. a, & Box, P. O. (2000). Meris and the Red-Edge Index. 2nd EARSeL Workshop, Enschede.
- Colgan, M.S. G. P. Asner dan T. Swemmer. (2013). *Harvesting Tree Biomass at The Stand-Level To Assess The Accuracy Of Field And Airborne Biomass Estimation In Savannas*. Ecological Applications 23: 1170–1184.
- Curran, P. J. Windham, W. R. & Gholz, H. L. (1995). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. *Tree physiology*, 15(3), 203-206.
- Danoedoro, P. (1996). Pengolahan Citra Digital, Teori dan Aplikasinya dalam Penginderaan Jauh. Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. 253 hal
- Danoedoro, P. (2012). Pengantar Penginderaan Jauh Digital. Yogyakarta: Penerbit ANDI.
- Dharmawan, I.W.E. Ulumuddin, Y.I. & Prayudha, B. (2020). Panduan Monitoring Struktur Komunitas Mangrove di Indonesia. PT Media Sains Nasional, Bogor, 94
- European Space Agency. (2017). *S2 MPC Level 2A product format specification (Reference: S2-PDGS-MPC-L2A-PFS-V14.2, Issue: 1.1, Date: 2017-06- 23)*. Retrieved from ESA.
- Fadaei, H. Suzuki, R. Sakai, T. & Torii, K. (2012). a Proposed New Vegetation Index, the Total Ratio Vegetation Index (Trvi), for Arid and Semi-Arid Regions. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B8 (September), 403–407. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxix-b8-403-2012>
- Gitelson, A. A. Kaufman, Y. J. Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote sensing of Environment*, 58(3), 289-298. Available form: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Gitelson, A. A. Viña, A. Ciganda, V. Rundquist, D. C. & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical research letters*, 32(8).
- Hadi, H. A. (2022). *Perbandingan Akurasi Klasifikasi Komposisi Struktural Vegetasi Berbasis Pikel dan Objek di Kota Salatiga dan Sekitarnya* (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- Inglada, J. Arias, M. Tardy, B. Hagolle, O. Valero, S. Morin, D. ... & Koetz, B. (2015). Assessment of an operational system for crop type map production using high temporal and spatial resolution satellite optical imagery. *Remote Sensing*, 7(9), 12356-12379.
- Indrayani, E. Kalor, J. D. Warpur, M. & Hamuna, B. (2021). Using Allometric Equations to Estimate Mangrove Biomass and Carbon Stock in Demta Bay, Papua Province, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 22(5), 263–271. <https://doi.org/10.12911/22998993/135945>
- Istomo, I. & Farida, N. E. (2017). Potensi simpanan karbon di atas permukaan tanah tegakan *Acacia nilotica* L. (Willd) ex. Del. di Taman Nasional Baluran, Jawa Timur. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam*

- dan Lingkungan (*Journal of Natural Resources and Environmental Management*), 7(2), 155-162.
- Indonesian National Standard (SNI). 2011. Pengukuran dan Perhitungan Cadangan Karbon– Pengukuran Lapangan untuk Penaksiran Cadangan Karbon Hutan (Ground Based Forest Carbon Accounting). Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Karang, I. W. G. A. Nuarsa, I. W. Hendrawan, I. G. Dewi, N. M. N. B. S. Yasa, P. K. & Krisnanda, I. M. D. (2024). Satellite remote sensing techniques for mapping and estimating mangrove carbon stocks in the small island of Gili Meno, West Nusa Tenggara, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 25(9).
- Kaufman, Y. J. Tanré, D. Holben, B. N. Markham, B. L. & Gitelson, A. A. (1992). Atmospheric Effects on the NDVI--Strategies for its Removal.
- Key, C. H. & Benson, N. C. (2005). Landscape assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In D. C. Lutes (Ed.), FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. General Technical Report, RMRS GTR-164-CD:LA1-LA51. (pp.) Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- K. Hairiah and S. Rahayu. 2007. Pengukuran Karbon Tersimpan di Berbagai Macam Penggunaan Lahan. Bogor.
- Kurbanov, R. K. & Zakharova, N. I. (2020). Application of vegetation indexes to assess the condition of crops. *Agricultural machinery and technologies*, 14(4), 4-11.
- Kusumaningtyas, M. A. Daulat, A. Suryono, D. D. Ati, R. N. A. Kepel, T. L. Rustam, A. ... & Hutahaean, A. A. (2014, November). Blue carbon stock of mangrove ecosystem in Nusa Penida, Bali. In *12th Biennial Conference of Pan Ocean Remote Sensing Conference (PORSEC 2014)*.
- Komiyama A, S. Pongpam, & S. Kato. 2005. Common allometric equation for estimating the tree weight of mangroves. *J. of Tropical Ecology*, 21: 471–477. <https://doi.org/10.1017/S0266467405002476>
- Lestariningsih, W. A. Putra, M. G. A. Rahmania, A. Putri, B. P. Muhammad, F. Santoso, P. ... & Zamani, N. P. (2022). Struktur Komposisi dan Estimasi Cadangan Karbon Tegakan Ekosistem Mangrove di Pulau Sangiang, Banten. *Jurnal Ilmu Kelautan Lesser Sunda P-ISSN*, 2775, 0078.
- Li, H. Zhang, G. Zhong, Q. Xing, L. & Du, H. (2023). Prediction of urban forest aboveground carbon using machine learning based on Landsat 8 and sentinel-2: A case study of Shanghai, China. *Remote Sensing*, 15(1), 284.
- Maksum, Z. U. Prasetyo, Y. & Haniah, H. (2016). Perbandingan klasifikasi tutupan lahan menggunakan metode klasifikasi berbasis objek dan klasifikasi berbasis piksel pada citra resolusi tinggi dan menengah. *Jurnal Geodesi Undip*, 5(2), 97-107.
- Manalu, J. Sutanto, A. & Trisakti, B. (2018). Perbandingan Metode Klasifikasi Penutup Lahan Berbasis Piksel dan Berbasis Obyek Menggunakan Data PiSAR-L2 (Comparison Between Pixel-Based and Object-Based Methods for Land Cover Classification Using PiSAR-L2 Data) *Jurnal Penginderaan Jauh dan Pengolahan Data Citra Digital*, 13(1).
- Masruroh, L. & Insafitri, I. (2020). Pengaruh Jenis Substrat terhadap Kerapatan Vegetasi *Avicennia marina* di Kabupaten Gresik. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan Dan Perikanan*, 1(2), 151–159. <https://doi.org/10.21107/juvenil.v1i2.7569>
- Noor, Y.R. Khazali, M & Suryadiputra, I. N. N. (2006). Panduan Pengenalan Mangrove di Indonesia PHKA/WI-IP. Bogor
- Noor, Y.R. M. Khazali, I.N.N. Suryadiputra. 2012. Panduan pengenalan mangrove di Indonesia. Bogor: Wetlands International Indonesia Programme.
- Noor, Y.R.M. Khazali, I.N.N. Suryadiputra. 1999. Panduan Pengenalan Mangrove di Indonesia. PKA/WI-IP, Bogor.
- Palguna, I. B. A. Ardhana, I. P. G. & Arthana, I. W. (2017). Struktur dan keanekaragaman jenis mangrove di kawasan hutan mangrove Nusa Lembongan, Kecamatan Nusa Penida, Kabupaten Klungkung. *Ecotrophic*, 11(2), 108-115.
- Penuelas, J. Baret, F. & Filella, I. (1995). Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31(2), 221-230.
- Pratama, I. G. M. Y. Karang, I. W. G. A. & Suteja, Y. (2019). Distribusi spasial kerapatan mangrove menggunakan citra sentinel-2A di TAHURA Ngurah Rai Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 5(2), 192-202.
- Pricillia, C. C. Herdiansyah, H. & Patria, M. P. (2021). Environmental conditions to support blue carbon storage in mangrove forest: A case study in the mangrove forest, Nusa Lembongan, Bali, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(6).
- Rachmawati, D. Setyobudiandi, I. & Hilmi, E. (2014). Potensi estimasi karbon tersimpan pada vegetasi mangrove di wilayah pesisir Muara Gembong Kabupaten Bekasi. *Omni-Akuatika*, 10(2).
- Raja, U. M. Haji, A. Universitas, A. Z. & Raja, M. (2018). Hubungan Jenis Substrat dengan Kerapatan Vegetasi *Rhizophora* sp. di Hutan Mangrove Sungai Nyirih Kecamatan Tanjungpinang Kota Tanjungpinang Dwi. <https://www.researchgate.net/publication/322055729>
- Rianghepat, M. L. W. B. Nuarsa, I. W. & Brasika, I. B. M. (2022). Pemetaan Perubahan Penggunaan Lahan Wilayah Pesisir di Kecamatan Bulak, Surabaya Tahun 2014 dan 2020. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 8(1), 131-142.
- Rouse, J. W. Haas, R. H. Schell, J. A. & Deering, D. W. (1973). Monitoring Vegetation Systems In The Great Plains With Ertis. In Remote Sensing Center. <https://doi.org/10.1021/jf60203a024>
- Sudjana. (1995). *Metoda Statistika*. Bandung: Penerbit Tarsito
- Suryono, S. Soenardjo, N. Wibowo, E. Ario, R. & Rozy, E. F. (2018). Estimasi kandungan biomassa dan karbon di hutan mangrove Perancak Kabupaten Jembrana, Provinsi Bali. *Buletin Oseanografi Marina*, 7(1), 1-8.
- Tucker, C.J. (1980). A spectral method for determining the percentage of green herbage material in clipped sample. *Remote Sens. Environ.* 9, 175–181. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90007-3](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(80)90007-3)
- U.S. Geological Survey. (2021). *Landsat Collection 2* (ver. 1.1, January 15, 2021): U.S. Geological Survey Fact Sheet 2021–3002, 4 p. <https://doi.org/10.3133/fs20213002>
- Sutanto. (2013). *Metode Penelitian Penginderaan Jauh*. Yogyakarta, Indonesia: Badan Penerbit Fakultas Geografi (BPGF) Universitas Gajah Mada.
- Vincini, M. Frazzi, E. R. M. E. S. & D'Alessio, P. A. O. L. O. (2008). A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precision Agriculture*, 9, 303-319.
- Wicaksono, P. (2015). Remote Sensing Model Development for Seagrass and Mangroves Carbon Stock Mapping. Disertasi. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Wicaksono, P. (2017). Mangrove Above Ground Carbon Stock Mapping of Multi Resolution Passive Remote Sensing Systems. *International Journal of Remote Sensing*, 2017(38), 1551-1578. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1283072>