

ESTIMASI STOK KARBON BIOMASSA PADA EKOSISTEM MANGROVE MENGUNAKAN DATA SATELIT DI PULAU NUNUKAN KABUPATEN NUNUKAN KALIMANTAN UTARA

(*Estimation of Biomass Carbon Stock in Mangrove Ecosystems using Remote Sensing on
Nunukan Island Nunukan Regency North Kalimantan*)

Marzuki, Nurjannah Nurdin, Inayah Yasir, Supriadi Mashoreng, Muhammad Banda Selamat

Departemen Ilmu Kelautan, FIKP UNHAS,
Jl. Perintis Kemerdekaan km. 10, Tamalanrea Indah, Makassar 90245
e-mail: marzukisaleh27@gmail.com

Diterima: 20 April 2022; Direvisi: 2 April 2023.; Disetujui untuk Dipublikasikan: 21 April 2023

ABSTRAK

Ekosistem mangrove mempunyai kemampuan yang sangat efektif dalam mengurangi konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂) di alam. Estimasi stok karbon dapat dilakukan menggunakan teknologi penginderaan jauh yang mengacu pada indeks vegetasi dari suatu area. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret sampai Desember 2020 di Pulau Nunukan, Kabupaten Nunukan, Kalimantan Utara. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi stok karbon permukaan (*Above Ground Carbon*) di Pulau Nunukan menggunakan citra Landsat-8 dan pengukuran *in situ*. Pengukuran nilai cadangan karbon di lapangan dengan menggunakan persamaan alometrik yang dihitung berdasarkan jenis vegetasi. Penggunaan citra Landsat-8 OLI dilakukan setelah *pra-processing* dengan koreksi geometrik dan radiometrik. Selanjutnya citra Landsat-8 OLI dilakukan klasifikasi *unsupervised* untuk menentukan batas wilayah sebaran mangrove, lalu ditransformasi ke persamaan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Nilai NDVI dengan nilai stok karbon pada setiap titik sampel diuji dengan 3 jenis regresi. Dari 3 jenis uji regresi nilai R² tertinggi ditetapkan sebagai persamaan untuk membangun model estimasi stok karbon permukaan. Dua jenis model estimasi stok karbon yang dibangun, yaitu model yang menggunakan seluruh jenis yang teridentifikasi sebagai sampel, dan model yang hanya menggunakan jenis dominan yang ditemukan pada wilayah kajian. Jenis mangrove yang mendominasi di Pulau Nunukan yaitu *Rhizophora apiculata*, sehingga jenis tersebut digunakan sebagai sampel dalam model estimasi stok karbon jenis dominan. Nilai R² yang tertinggi dari persamaan regresi yang digunakan untuk mengestimasi stok karbon yaitu persamaan regresi kuadratik. Sehingga persamaan regresi kuadratik digunakan sebagai dasar model estimasi cadangan karbon. Nilai estimasi stok karbon permukaan (C) yang menggunakan model estimasi stok karbon seluruh jenis adalah 6.401.988,95 ton, sedangkan nilai estimasi stok karbon untuk model estimasi stok karbon jenis dominan adalah 5.616.404,46 ton.

Kata Kunci: Landsat-8 OLI, mangrove, NDVI, penginderaan jauh, stok karbon

ABSTRACT

*Mangrove ecosystems can be very effective in reducing the concentration of carbon dioxide gas (CO₂) in nature. Carbon stock estimation using remote sensing technology refers to the vegetation index of an area. This research was conducted from March to December 2020 on Nunukan Island, Nunukan Regency, North Kalimantan. This study aims to estimate the Above Ground Carbon on Nunukan Island using Landsat-8 imagery and in situ measurements. Measurement of the value of carbon stocks in the field using allometric Equations is calculated based on the species of vegetation. The use of Landsat-8 OLI imagery is conducted after Pre-processing of geometric and radiometric corrections. Furthermore, the Landsat-8 OLI image is classified using unsupervised method to determine the boundaries of the mangrove distribution area, then transformed into the equation Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The NDVI Values and the carbon stock values of each sample point were tested by 3 types of regression. The regression type with the highest R² is set as the equation to build a model of the carbon stock estimation. Two types of carbon stock estimation models are built, namely a model that uses all identified species as sample, and a model that only uses the dominant species found in the study area. The dominant mangrove species on Nunukan Island is *Rhizophora apiculata*, so this species was used as the sample in the dominant species carbon stock estimation model. The highest R² value of the regression equation used to estimate carbon stocks is the quadratic regression equation. Therefore, the quadratic regression equation was used as the basis for the carbon stock estimation model. The estimated value of surface carbon stock (C) using the carbon stock estimation model of all species is 6,401,988.95 ton, while the estimated carbon stock value for the carbon stock estimation model of dominant species is 5,616,404.46 ton.*

Keywords: Landsat-8 OLI, mangroves, NDVI, remote sensing, carbon stock

PENDAHULUAN

Hutan mangrove, padang lamun dan rawa asin berpotensi mengikat CO₂ dari atmosfer yang biasa disebut *blue carbon* (McLeod et al., 2011). Hutan mangrove memiliki fungsi ekologis yang sangat penting bagi ekosistem pesisir. Salah satu fungsi ekologisnya yaitu mangrove sebagai penyerap dan penyimpanan karbon sehingga dapat mengurangi peningkatan emisi karbon di alam (Savana, 2019). Kemampuan mangrove dalam menyimpan karbon lebih besar dari semua hutan daratan pada umumnya. Hutan mangrove tiap satu hektarnya dapat menyimpan sampai lima kali lipat lebih banyak karbon dibandingkan hutan hujan tropis di seluruh dunia (Nellemann et al., 2009; Donato et al., 2011; Fitrah, 2019).

Jumlah karbon dioksida (CO₂) yang terus meningkat di udara menjadi penyebab utama terjadinya pemanasan global yang berdampak pada terjadinya perubahan iklim dunia. Perubahan iklim dan isu pemanasan global menjadi pemicu meningkatnya kebutuhan informasi tentang karbon pada saat ini. Peningkatan jumlah karbon dioksida (CO₂) di atmosfer sebagai akibat dari aktivitas manusia, baik itu secara langsung maupun tidak langsung. Salah satu aktivitas itu adalah pembukaan lahan hutan sehingga menurunkan luasan hutan yang diketahui berfungsi sebagai penyimpanan karbon dioksida (CO₂).

Mangrove dapat menyerap CO₂ dari atmosfer melalui mekanisme fotosintesis. CO₂ yang diserap akan disimpan dalam bentuk biomassa atas (*above ground-biomass*), biomassa bawah (*below ground-biomass*) serta terakumulasi di dalam sedimen (Kauffman et al., 2011). Pengestimasian biomassa dihitung dengan menggunakan metode estimasi biomassa, salah satunya adalah dengan metode alometrik. Metode alometrik ini dilakukan dengan cara mengukur diameter batang pohon setinggi dada (*diameter at breast height*, DBH). Kemudian, DBH digunakan sebagai variabel bebas dari persamaan alometrik yang menghubungkan biomassa sebagai variabel terikat. Metode ini telah banyak diaplikasikan untuk estimasi stok karbon pada berbagai tipe vegetasi di Indonesia (Hairiah et al., 2001; van Noordwijk et al., 2001; Roshetko et al., 2002; Irsadi et al., 2017; Syukri et al., 2018). Provinsi Kalimantan Utara mempunyai garis pantai yang 90%-nya ditumbuhi oleh mangrove (RZWP3K, 2018). Salah satu Kabupaten yang terletak di Provinsi Kalimantan Utara adalah Kabupaten Nunukan.

Kabupaten Nunukan, yang terletak paling utara di Provinsi Kalimantan Utara, memiliki lokasi yang strategis karena berbatasan langsung dengan Malaysia. Kabupaten ini memiliki 29 pulau, salah satu diantaranya adalah Pulau Nunukan. Pulau Nunukan menjadi pusat kota dari Kabupaten Nunukan, sehingga Pulau Nunukan memiliki potensi sumber daya alam yang besar. Khususnya yang terkait dengan ekosistem mangrove yang tersebar di sekeliling Pulau Nunukan. Luas hutan

mangrove di wilayah Pulau Nunukan sebesar 3.165,27 ha, dengan 71,8% atau 2.271,79 ha diantaranya berada dalam kondisi masih baik (Beze & Suparjo, 2015).

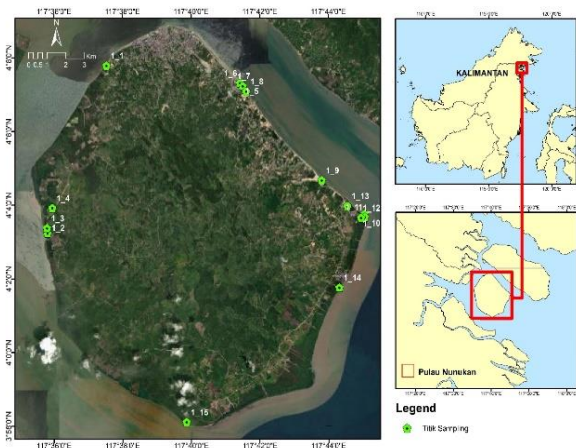
Terdapat dua cara untuk memperoleh informasi mengenai estimasi stok biomassa karbon yaitu menggunakan pendekatan dengan menghitung secara manual dan pendekatan dengan teknologi penginderaan jauh. Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh dalam proses perhitungan cadangan karbon berguna untuk menghindari metode pengukuran karbon secara destruktif melalui penebangan pohon mangrove. Tetapi metode penginderaan jauh dalam kajian cadangan karbon masih jarang dilakukan karena memiliki akurasi yang masih rendah. Akurasi yang rendah disebabkan karena teknologi penginderaan jauh hanya mampu merekam obyek yang ada di permukaan bumi sedangkan analisis pengukuran karbon berkaitan dengan karbon yang disimpan oleh biomassa yang ada di atas permukaan dan di bawah permukaan (Pambudhi, 2014; Husna et al., 2018).

Keunggulan data penginderaan jauh telah banyak dimanfaatkan untuk mendapatkan parameter biofisik hutan seperti biomassa. Terdapat tiga sensor citra penginderaan jauh yang dapat dimanfaatkan dalam untuk mengekstraksi data biofisik biomassa yaitu sensor optik, LiDAR, dan Radar. Sensor optik menggunakan pendekatan berbasis spektral sering digunakan untuk penilaian biomassa (Sharma et al. 2013; Rahadian 2019). Ketersediaan data sensor optik yang melimpah dan tidak berbayar sangat potensial digunakan seperti citra Landsat. Oleh karena itu, pendekatan dengan teknologi penginderaan jauh dinilai lebih efisien dan efektif dari segi biaya, waktu dan ketepatan estimasi khususnya pada daerah yang luas. Karena keunggulan inilah tujuan penelitian ini yaitu membangun model untuk mengestimasi stok karbon biomassa di Pulau Nunukan menggunakan citra satelit.

METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret sampai Desember 2020 yang meliputi studi literatur, pengambilan data lapangan, pengolahan data dan penyusunan hasil penelitian. Pengambilan data lapangan dilaksanakan pada bulan Maret 2020 di Pulau Nunukan Kabupaten Nunukan Kalimantan Utara. Lokasi titik sampel dapat dilihat pada **Gambar 1**. Titik berwarna hijau merupakan lokasi titik sampel untuk mengukur stok karbon secara in situ. Titik sampel ditentukan sebelum melakukan kerja lapangan, yang didasarkan pada kelas-kelas satuan lahan yang diperoleh. Penentuan titik sampel menggunakan teknik *stratified sampling*, dimana sampel diambil dari setiap pembagian yang diperoleh dari pendekatan-pendekatan indeks vegetasi yang digunakan yaitu NDVI.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Pulau Nunukan Kabupaten Nunukan Kalimantan Utara.

Metode Penelitian

Pengolahan Citra

Sebelum dilakukan pengolahan citra, terlebih dahulu dilakukan tahapan pra pengolahan citra. Tahap ini terdiri dari koreksi radiometrik dan koreksi geometrik. Tahapan pengolahan data citra dalam penelitian ini meliputi komposit *band* (*layer stacking*), pemotongan citra (*cropping*), interpretasi citra secara visual dan interpretasi citra secara digital. Proses komposit *band* mengacu pada nilai *Optimum Index Factor* (OIF) (Chavez et al., 1982). Nilai OIF tertinggi untuk menunjukkan vegetasi mangrove, pada Landsat 8 merupakan gabungan spektrum elektromagnetik *visible*, NIR, dan SWIR (Manoppo et al., 2015). Proses identifikasi sebaran mangrove digunakan klasifikasi tidak terbimbing (*unsupervised*). Metode klasifikasi tidak terbimbing dilakukan menggunakan algoritma *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique* (ISODATA) *classification* (LAPAN, 2015).

Citra satelit yang telah diklasifikasi, selanjutnya ditransformasikan dengan formula NDVI (*Normalized Different Vegetation Index*) menggunakan algoritma NDVI Rouse et al. (1973) seperti pada **Persamaan 1**.

$$NDVI = ((NIR - R))/((NIR + R)) \dots\dots\dots (1)$$

di mana:

- NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*
- NIR = Nilai reflektansi spektral pada *band* inframerah dekat
- R = Nilai reflektansi spektral pada *band* merah

Stok Karbon

Pengumpulan data lapangan berupa pohon pohon setinggi dada pada ketinggian ± 130 cm untuk kemudian dihitung diameter setinggi dada (*diameter at breast height/DBH* kadang-kadang disingkat menjadi D), pengamatan jenis-jenis mangrove (p), dan menghitung jumlah pohon di setiap jenis mangrove yang ditemukan. Plot yang digunakan adalah plot persegi empat 10 m x 10 m dengan luas 100 m². Plot tersebut menjadi batasan

pengambilan data biomassa, selanjutnya data biomassa dikonversi menjadi data stok karbon permukaan. Plot 10 m x 10 m menjadi perwakilan setiap 1 piksel pada citra Landsat. Pasangan data diambil untuk tiap kelas-kelas NDVI, pasangan data lapangan digunakan untuk membangun persamaan dengan statistik dan data lapangan untuk uji akurasi.

Pengukuran dilakukan pada daerah sampel yang telah ditentukan, dengan asumsi bahwa daerah lain yang homogen memiliki karakteristik yang sama dengan daerah sampel. Sehingga data lapangan yang diperoleh diasumsikan telah mewakili karakteristik wilayah yang telah dikelompokkan sebelumnya.

Persentase Tutupan Kanopi

Metode yang digunakan dalam menentukan persentase tutupan kanopi adalah metode *hemispherical photography*. Pengambilan tutupan kanopinya menggunakan kamera. Pengambilan gambar tutupan kanopi pohon dilakukan pada plot sampel mangrove terdiri dari 4-9 titik agar hasil gambar dapat mewakili kondisi vegetasi dalam satu plot sampel (Dharmawan & Pramudji, 2017). Hasil foto *hemispherical* kemudian dianalisis menggunakan software ImageJ untuk mengetahui persen tutupan kanopi pohon (Dharmawan & Pramudji, 2017).

Tipe Sedimen

Cara untuk mengetahui tipe sedimen dari komunitas mangrove tersebut dilakukan dengan cara visual dimana analisis visual ini dengan mengambil sedimen dengan tangan kemudian diidentifikasi warna, tekstur dan bau dari sampel sedimen, kemudian dikategorikan apakah termasuk dalam kategori pasir, lumpur atau campuran pasir dan lumpur (Rahmawati et al., 2014).

Analisis Data

Pengolahan Citra

Analisis pengolahan citra yang dilakukan setelah proses pengumpulan data lapangan perlu dilakukan agar dapat mengoreksi dan memperbaiki hasil klasifikasi yang salah. Oleh karena itu, proses reklasifikasi dilakukan berdasarkan hasil pengamatan lapangan. Tutupan lahan mangrove di citra namun di lapangan bukan tutupan lahan mangrove, perlu dikoreksi agar luasan mangrove yang dihasilkan sesuai dengan kenyataan di lapangan. Hasil reklasifikasi nantinya akan dilakukan proses *masking* yang membatasi hanya wilayah vegetasi mangrovenya saja. Sehingga perhitungan stok karbon dibatasi pada wilayah vegetasi mangrove saja.

Perhitungan Biomassa dan Stok Karbon Pohon

Perhitungan biomassa dilakukan setelah memperoleh hasil reklasifikasi citra. Penentuan biomassa mangrove menggunakan data lapangan hasil pengukuran lingkaran batang pohon yang dikonversi menjadi diameter pohon, kemudian dimasukkan ke dalam persamaan alometrik untuk masing-masing jenis sehingga diperoleh biomassa plot. Data analisis vegetasi kemudian dikuantifikasi menggunakan persamaan alometrik dengan pendekatan jenis (**Tabel 1**). Pada beberapa persamaan alometrik yang digunakan beberapa memerlukan nilai berat jenis tumbuhan. Sehingga beberapa berat jenis (ρ) mangrove yang dapat digunakan pada persamaan alometrik dapat dilihat pada **Tabel 2** (Simpson, 1996).

Data biomassa plot tersebut dikalikan dengan 0,47 untuk mendapatkan estimasi stok karbonnya pada setiap plot (BSN, 2011). **Persamaan 2**.

$$C = Biomassa \times 0,47 \dots\dots\dots (2)$$

Analisis Regresi

Analisis korelasi dilakukan sebelum menggunakan persamaan regresi. Analisis korelasi digunakan untuk mengukur keeratan hubungan antar variabel. Analisis korelasi menggunakan metode Pearson. Analisis regresi digunakan untuk mengukur seberapa besar variabel bebas mampu menjelaskan variabel terikat, dimana pada penelitian ini terdapat tiga perlakuan untuk analisis regresi linear sederhana yang dilakukan yaitu:

hubungan antara karbon dengan nilai indeks vegetasi (NDVI); hubungan antara karbon dengan persentase tutupan kanopi; dan hubungan antara persentase kanopi dengan nilai indeks vegetasi (NDVI).

Model untuk mengestimasi stok karbon menggunakan persamaan regresi. Persamaan regresi yang digunakan sebagai dasar model estimasi stok karbon permukaan yaitu persamaan regresi linear dengan **Persamaan 3**, kuadratik seperti pada **Persamaan 4**, dan eksponensial dengan **Persamaan 5**. Dari ketiga jenis regresi tersebut, persamaan regresi yang menghasilkan nilai koefisien determinasi yang paling tinggi dijadikan sebagai model penduga atau estimasi stok karbon.

a) Linear

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + e \dots\dots\dots (3)$$

b) Kuadratik

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 \dots\dots\dots (4)$$

c) Eksponensial

$$Y = \beta_0 e^{\beta_1 X} \dots\dots\dots (5)$$

Uji Akurasi

Uji akurasi dilakukan pada pengolahan citra yang telah dilakukan sebelumnya dengan kondisi di lapangan. Uji akurasi dihitung berdasar nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) menggunakan **Persamaan 6**.

Tabel 1. Persamaan alometrik beberapa jenis mangrove dari berbagai sumber.

No	Jenis Mangrove	Persamaan Alometrik
1	<i>Avicennia sp.</i>	$B = 0,251 \rho (D)^{2,46}$ (Komiyama et al., 2005)
2	<i>Avicennia marina</i>	$B = 0,1848 (D)^{2,3624}$ (Dharmawan & Siregar, 2008)
3	<i>Avicennia alba</i>	$B = 0,079211 (D)^{2,470895}$ (Tue et al., 2014)
4	<i>Ceriops tagal</i>	$B = 0,251 \rho (D)^{2,46}$ (Komiyama et al., 2005)
5	<i>Lumnitzera littorea</i>	$B = 0,251 \rho (D)^{2,46}$ (Komiyama et al., 2005)
6	<i>Rhizophora apiculata</i>	$B = 0,043 (D)^{2,63}$ (Amira, 2008)
7	<i>Rhizophora mucronata</i>	$B = 0,1466 (D)^{2,3136}$ (Dharmawan, 2010)
8	<i>Sonneratia alba</i>	$B = 0,3841 (D)^{2,101} \rho$ (Kauffman & Cole, 2010)
9	<i>Xylocarpus granatum</i>	$B = 0,1832 D^{2,21}$ (Tarlan, 2008)

Keterangan:

$B =$ Biomassa (kg/m^2),

$\rho =$ berat jenis tumbuhan (g/cm^3)

$D =$ diameter setinggi data (cm)

Tabel 2. Beberapa berat jenis kayu mangrove.

No	Jenis	Berat jenis kayu (g/cm^3)
1.	<i>Avicennia officinalis</i>	0,670
2.	<i>Avicennia marina</i>	0,661
3.	<i>Ceriops tagal</i>	0,803
4.	<i>Lumnitzera sp.</i>	0,565
5.	<i>Rhizophora apiculata</i>	1,050
6.	<i>Rhizophora mucronata</i>	0,867
7.	<i>Sonneratia alba</i>	0,780
8.	<i>Xylocarpus granatum</i>	0,700

Sumber : (Simpson, 1996).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y_i - y_i')^2}{n}} \dots\dots\dots (6)$$

di mana:

- RMSE = nilai Root Mean Square error
- y_i = nilai pengukuran
- y_i' = nilai dugaan
- n = jumlah sampel

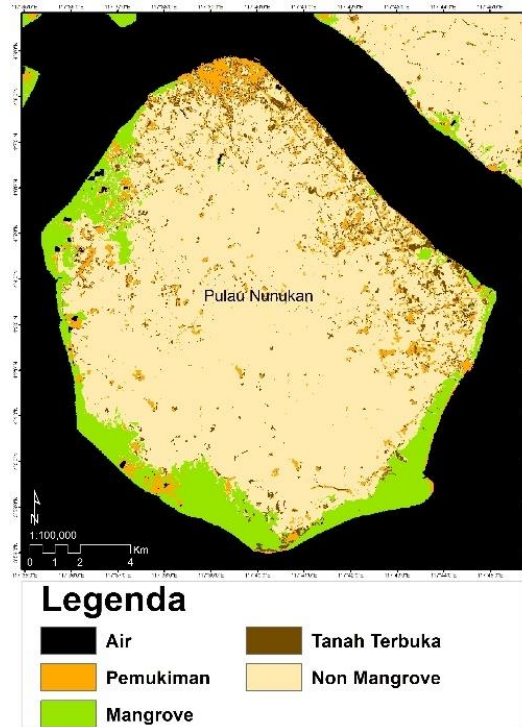
Pendugaan Total Stok Karbon

Nilai total hasil estimasi stok karbon permukaan diperoleh berdasarkan hasil ekstraksi nilai dari model estimasi stok karbon yang dilakukan pada setiap pikselnya. Selanjutnya, nilai estimasi stok karbon pada setiap pikselnya dijumlahkan secara keseluruhan untuk memperoleh nilai total estimasi stok karbon permukaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan Citra Landsat-8 OLI

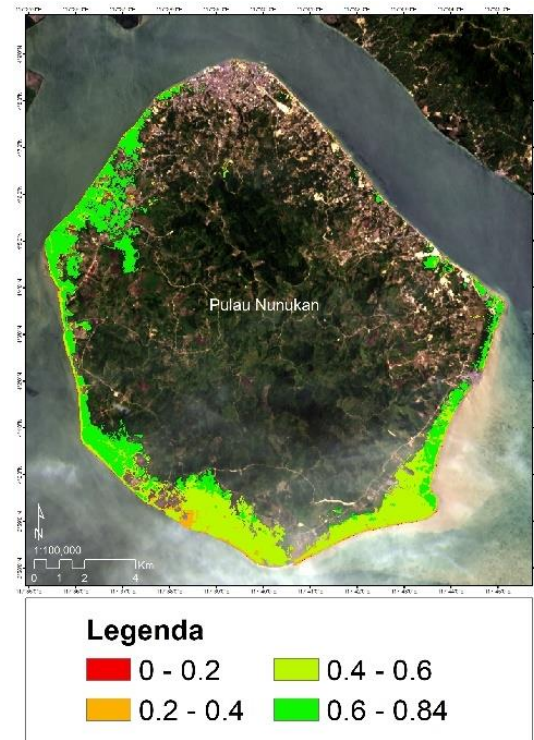
Penelitian ini menggunakan citra satelit Landsat-8 OLI dengan akuisisi perekaman pada tanggal 16 Maret 2019 dan WRS Path/Row-nya yaitu 117/57. Pemilihan citra didasarkan pada kualitas citra yang baik, dimana tutupan awan pada citra sebesar <10% dan kondisi cuaca pada saat perekaman citra cukup baik dengan tidak adanya kabut di atmosfer. Awan dianggap sebagai pengganggu karena ia akan menutupi sebagian wilayah dari citra satelit sehingga mengganggu proses interpretasi suatu citra satelit. Kondisi akuisisi citra seperti ini maka akan diperoleh citra yang memiliki kualitas yang baik.



Gambar 2. Hasil reklasifikasi *unsupervised*.

Citra Landsat-8 OLI yang telah dilakukan proses *pra-processing* selanjutnya dilakukan proses komposit *band* dan *cropping* citra. Komposit *band* untuk menunjukkan vegetasi mangrove pada citra Landsat-8 OLI yang mengacu pada nilai OIF dilakukan komposit *band* RGB 564 (*false color*). Pada komposit citra tersebut vegetasi mangrove terlihat berwarna merah gelap, vegetasi non mangrove berwarna merah lebih terang, perairan dangkal berwarna biru terang dan laut dalam merefleksikan warna sangat gelap (hitam).

Proses identifikasi sebaran mangrove menggunakan klasifikasi tidak terbimbing (*unsupervised*) dengan algoritma *isodata*. Klasifikasi ini menghasilkan peta satuan lahan yang selanjutnya digunakan untuk membedakan daerah sebaran vegetasi mangrove. Kluster-kluster yang dihasilkan oleh metode *isodata* selanjutnya dilakukan proses reklasifikasi. Hasil reklasifikasi citra seperti terlihat pada **Gambar 2**, merupakan peta kelas penutupan lahan yang digunakan untuk menentukan batas wilayah sebaran mangrove di Pulau Nunukan, Kalimantan Utara yang ditandai dengan kelas penutupan lahan mangrove. Kelas mangrove tersebut selanjutnya ditransformasikan ke persamaan indeks vegetasi NDVI.



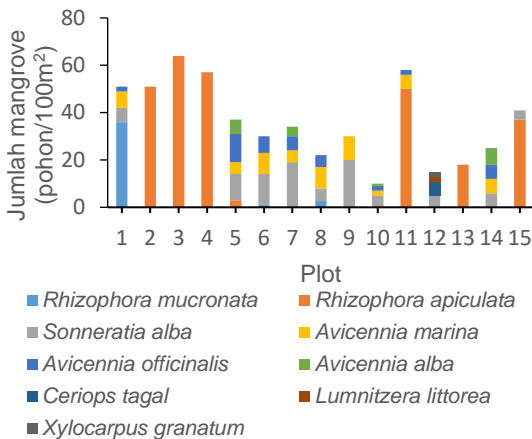
Gambar 3. Kerapatan mangrove berdasarkan nilai NDVI.

Transformasi indeks vegetasi NDVI dilakukan untuk merepresentasikan tingkat kerapatan vegetasi pada lokasi kajian yaitu Pulau Nunukan. Peta kerapatan mangrove seperti pada **Gambar 3**, diperoleh dari hasil *overlay* antara hasil klasifikasi tutupan lahan mangrove dengan citra hasil NDVI. Rentang nilai NDVI pada daerah vegetasi mangrove berkisar pada 0,008225 – 0,84327. Rentang data yang diperoleh termasuk dalam

kisaran ambang batas nilai NDVI yang dihasilkan yaitu -1 sampai +1. Hasil transformasi NDVI menunjukkan bahwa semakin berwarna merah mengindikasikan rendahnya nilai NDVI dan semakin berwarna hijau mengindikasikan tingginya nilai NDVI.

Komposisi Jenis Mangrove

Hasil survei lapangan diperoleh beberapa jenis vegetasi mangrove yang dihitung dalam plot 100 m². Jumlah keseluruhan plot yang diukur yaitu 15 plot. Jenis mangrove yang teridentifikasi dalam plot hanya berjumlah 9 jenis (**Gambar 4**). Jenis yang paling mendominasi pada wilayah kajian yaitu jenis *Rhizophora apiculata*.



Gambar 4. Komposisi jenis mangrove.

Komposisi jenis vegetasi mangrove secara khas memperlihatkan adanya pola zonasi pada suatu wilayah. Pola zonasi vegetasi mangrove berkaitan erat dengan tipe tanah (lumpur, pasir atau gambut), keterbukaan (terhadap hempasan gelombang), salinitas serta pengaruh pasang surut (Noor et al., 2006). Pola zonasi vegetasi mangrove

umumnya tumbuh dalam empat zona yaitu pada daerah terbuka, daerah tengah, daerah yang memiliki sungai berair payau sampai hampir tawar, serta daerah ke arah daratan yang memiliki air tawar. Komposisi jenis juga dipengaruhi oleh karakteristik substrat yang menjadi faktor pembatas terhadap pertumbuhan mangrove. Jenis mangrove *Rhizophora* dapat tumbuh baik pada substrat yang berlumpur tebal sedangkan jenis *Avicennia* dan *Brugueiera* hidup pada substrat lumpur berpasir.

Analisis Survei Lapangan

Hasil survei lapangan dan pengolahan citra yang telah dilakukan diperoleh nilai biomassa, nilai karbon, persentase tutupan kanopi, jenis substrat, dan ekstraksi nilai NDVI pada setiap plotnya. Persentase tutupan kanopi yang diperoleh berkisar antara 9,02-89,95% (**Tabel 3**). Berdasarkan kriteria penutupan oleh KepMen LH No. 201 Tahun 2004 (KLH, 2004), kondisi persentase tutupan kanopi tergolong dalam kategori jarang sampai padat. Tutupan kanopi terendah (9,02%) ditemukan pada plot 13 (**Tabel 3**). Jenis yang ditemukan pada plot tersebut yaitu *Acrostichum* sp. lebih dominan daripada *Rhizophora apiculata*. Tipe tumbuhan dalam bentuk pohon yang ada pada plot tersebut tidak banyak, sehingga menyebabkan persentase tutupan kanopinya rendah.

Pada plot lainnya diperoleh persentase tutupan kanopi >50%. Perbedaan nilai persentase tutupan kanopi diakibatkan adanya perbedaan dominansi jenis mangrove dan kerapatan pohon yang menyusun pada plot penelitian. Menurut Pretzsch et al. (2015), umumnya semakin besar luas permukaan daun, maka semakin rapat tutupan kanopi. Luas permukaan daun berbeda setiap jenisnya, perbedaan tersebut disebabkan karena setiap jenis mangrove memiliki karakteristik morfologi berbeda.

Tabel 3. Hasil survei lapangan.

Plot	Biomassa (toh/ha)	Karbon (ton/ha)	Kanopi (%)	NDVI	Substrat
1	209,53	98,48	80,82	0,70458	lumpur berpasir
2	197,36	92,76	89,95	0,70050	lumpur berpasir
3	132,78	62,41	82,53	0,74712	lumpur berpasir
4	221,94	104,31	85,09	0,75217	lumpur berpasir
5	120,22	56,50	65,54	0,54299	lumpur berpasir
6	72,93	34,28	57,04	0,46482	lumpur berpasir
7	105,43	49,55	59,22	0,48338	lumpur berpasir
8	73,38	34,49	54,61	0,36597	pasir berlumpur
9	57,08	26,83	56,66	0,38193	lumpur berpasir
10	62,62	29,43	58,50	0,46446	pasir berlumpur
11	113,05	53,13	84,37	0,65149	lumpur berpasir
12	79,53	37,38	53,72	0,54335	pasir berlumpur
13	10,43	4,90	9,02	0,36129	lumpur berpasir
14	87,76	41,25	45,97	0,45718	lumpur berpasir
15	126,68	59,54	51,51	0,40578	lumpur

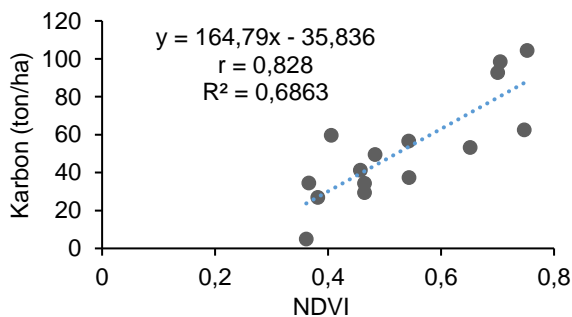
Umumnya *Rhizophora* mempunyai morfologi daun yang lebar, ukuran daun bisa mencapai 11-23 cm x 5-13 cm (Noor et al., 2006). Proses perkembangbiakan jenis *Rhizophora* yang buahnya sudah berkecambah sewaktu masih di pohon induknya (vivipar). Saat lepas dari induknya, propagul yang dilengkapi dengan hipokotil yang runcing akan jatuh dan menancap pada substrat dekat dari induknya. Jenis *Rhizophora* juga memiliki struktur perakaran yang rapat (Noor et al., 2006).

Hal tersebut yang menyebabkan pada area komunitas *Rhizophora* memiliki kerapatan yang tinggi sehingga banyak ditemukan persentase tutupan kanopi yang tinggi. Berbeda dengan jenis *Avicennia* dan *Sonneratia*, morfologi daunnya memiliki ukuran yang cenderung lebih kecil dan kerapatannya juga lebih rendah dibandingkan dengan jenis *Rhizophora*, sehingga tutupan kanopi yang dihasilkan oleh jenis ini juga cenderung lebih kecil.

Analisis Regresi

Hubungan Karbon dengan Nilai NDVI

Besarnya koefisien determinasi menunjukkan bahwa pengaruh variabel bebas (NDVI) terhadap nilai karbon sebesar 68,6%. Sisanya sebesar 31,4% dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan dalam penelitian ini. Grafik hubungan antara nilai karbon dengan nilai NDVI pada persamaan regresi linear disajikan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Regresi linear antara karbon dengan NDVI dari citra Landsat-8 OLI.

Nilai tersebut tergolong tidak terlalu tinggi karena nilai NDVI hanya menunjukkan tingkat kehijauan suatu vegetasi berdasarkan nilai reflektan suatu citra, sedangkan nilai karbon menunjukkan besarnya kandungan karbon tegakan pohon. Nilai NDVI digambarkan secara dua dimensi, sedangkan nilai karbon merupakan nilai yang digambarkan secara tiga dimensi (Rakhmawati, 2012). Perbedaan tersebut menjadi sebab tidak optimalnya nilai R^2 tersebut.

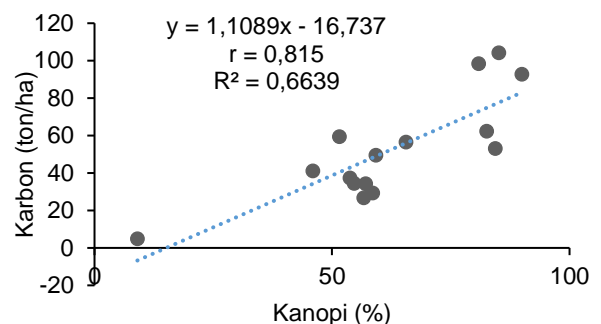
Penelitian mengenai hubungan antara karbon atau biomassa dengan nilai NDVI sudah banyak dilakukan (Fitrah, 2019; Rakhmawati, 2012; Winarso et al., 2015). Pada penelitian yang dilakukan oleh Fitrah (2019) di Pulau Bauluang, Kabupaten Takalar, Sulawesi Selatan, diperoleh

nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,69 dengan rentang nilai NDVI antara 0-0,45. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Rakhmawati (2012) di Kabupaten Mamuju Utara, Sulawesi Barat, diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,609 dengan rentang nilai NDVI antara 0,24-0,73. Nilai R^2 menunjukkan hubungan antara nilai NDVI dengan nilai biomassa atau karbon permukaan. Nilai R^2 tidak selalu bagus ($R^2 \geq 0,8$) (Nduru et al., 2014) untuk semua kondisi vegetasi. NDVI untuk biomassa hanya bagus untuk merepresentasikan nilai biomassa hutan yang ketinggian pohonnya homogen (Winarso et al., 2015).

Hubungan Karbon dengan Persentase Kanopi

Koefisien determinasi menunjukkan bahwa pengaruh variabel bebas (persentase kanopi) terhadap nilai karbon sebesar 66,4% sedangkan sisanya sebesar 33,6% dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan dalam penelitian ini. Grafik hubungan antara nilai karbon dengan persentase kanopi dengan persamaan regresi linear disajikan pada **Gambar 6**.

Nilai karbon yang diperoleh dari perhitungan nilai biomassa menggunakan persamaan alometrik setiap jenisnya. Dimana dengan persamaan alometrik yang digunakan pada penelitian ini hanya menerapkan diameter batang mangrove dan berat jenis mangrove sebagai nilai penduga.



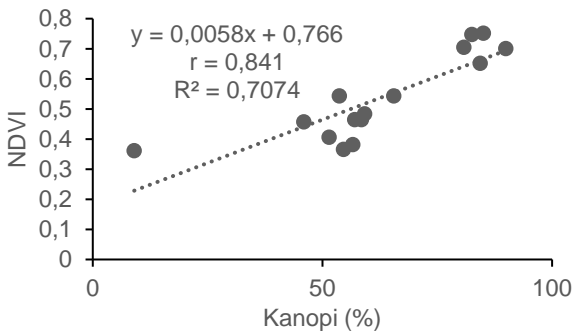
Gambar 6. Regresi linear antara karbon dengan persentase kanopi.

Tinggi rendahnya nilai biomassa yang dihasilkan suatu ekosistem mangrove disebabkan oleh tingkat kesuburan tanah dan kerapatan mangrove yang terdapat di kawasan tersebut (Dharmawan & Siregar, 2008). Chiraz (2013), juga menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang erat antara tinggi tegakan, diameter batang, cakupan akar dan diameter kanopi. Karena nilai persentase tutupan kanopi tergantung pada luas permukaan daun dan kerapatan pohon, maka tinggi rendahnya nilai karbon dipengaruhi oleh nilai persentase tutupan kanopi pada suatu kawasan.

Hubungan Persentase Kanopi dengan NDVI

Besarnya koefisien determinasi menunjukkan bahwa pengaruh variabel bebas (persentase kanopi) terhadap nilai NDVI sebesar 70,7%

sedangkan sisanya sebesar 29,3% dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dimasukkan dalam penelitian ini. Grafik hubungan antara persentase kanopi dengan nilai NDVI pada persamaan regresi linear disajikan pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Regresi linear antara persentase kanopi dengan NDVI.

Nilai NDVI diperoleh dari nilai reflektan objek yang diterima oleh citra satelit, semakin lebat tutupan kanopi semakin tinggi nilai NDVI. Nilai NDVI akan semakin tinggi di saat umur suatu pohon bertambah yang diiringi oleh penambahan luas kanopi dan bertambahnya diameter pohon. Bertambahnya luas kanopi akan mengakibatkan kandungan khlorofil di area tersebut menjadi meningkat. Khlorofil yang semakin tinggi akan menyebabkan meningkatnya reflektan spektrum hijau. Peningkatan reflektan spektrum hijau menyebabkan nilai NDVI di area tersebut juga semakin tinggi. Gelombang elektromagnetik yang tidak dapat menembus kanopi sehingga langsung dipantulkan dan diterima oleh sensor satelit. Beberapa penelitian serupa menunjukkan bahwa keduanya memiliki hubungan yang tinggi seperti penelitian yang dilakukan oleh Hendrawan et al. (2018), untuk citra Landsat 8 diperoleh koefisien korelasi $r=0,82$ dan koefisien determinasi $R^2=0,67$ sedangkan untuk citra SPOT 6 diperoleh koefisien korelasi $r=0,85$ dan koefisien determinasi $R^2=0,72$.

Model Estimasi Stok Karbon

Nilai estimasi stok karbon diperoleh dari hasil perhitungan model estimasi stok karbon. Model yang dibangun diperoleh dari persamaan regresi antara variabel terikat yaitu nilai karbon piksel dengan variabel bebas yaitu nilai NDVI. Nilai karbon piksel diperoleh dari perhitungan nilai biomassa dan karbon lapangan yang hanya mencakup area plot 10m x 10m selanjutnya dikonversi menjadi area plot 30m x 30m sesuai dengan resolusi spasial citra Landsat 8-OLI yaitu 30 meter.

Terdapat dua jenis model estimasi stok karbon yang dibangun, yaitu model yang menggunakan seluruh jenis yang teridentifikasi sebagai sampel, dan model yang hanya menggunakan jenis dominan yang ditemukan pada wilayah kajian. Model yang menggunakan seluruh jenis sebagai sampel mengacu pada penggunaan seluruh persamaan alometrik untuk setiap jenis mangrove,

sedangkan model yang menggunakan jenis dominan sebagai sampel hanya mengacu pada persamaan alometrik jenis *Rhizophora*, dengan *Rhizophora apiculata* sebagai jenis yang mendominasi wilayah kajian.

Model Estimasi Stok Karbon Seluruh Jenis Mangrove

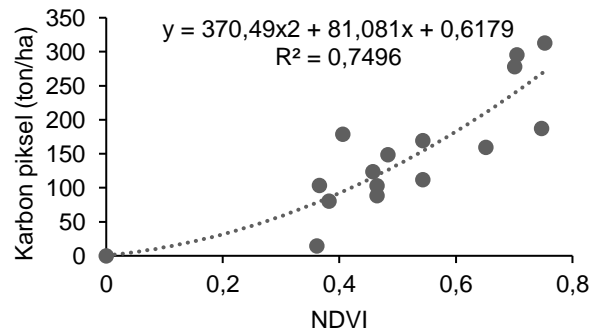
Model penduga atau estimasi stok karbon seluruh jenis mangrove yang dibangun, menggunakan persamaan regresi linear, kuadratik, dan eksponensial seperti disajikan pada **Tabel 4**.

Persamaan regresi kuadratik menghasilkan nilai koefisien determinasi yang paling tinggi. Koefisien determinasi (R^2) yang dihasilkan sebesar 0,7496. Dari ketiga jenis regresi tersebut, persamaan regresi kuadratik menghasilkan nilai koefisien determinasi yang paling tinggi sehingga persamaan regresi kuadratik dipilih sebagai model penduga atau estimasi stok karbon. Persamaan regresi kuadratik digunakan untuk mengestimasi stok karbon permukaan, dengan y adalah karbon dan x adalah nilai ekstraksi NDVI. Grafik hubungan antara nilai karbon piksel dengan nilai NDVI pada model regresi disajikan pada **Gambar 8**.

Persamaan kuadratik pada **Persamaan 7** yang tersaji pada **Tabel 4**, yang digunakan sebagai model penduga atau estimasi stok karbon diterapkan pada citra Landsat-8 OLI. Data raster citra Landsat-8 OLI yang telah ditransformasikan menjadi citra NDVI, kemudian dikalkulasi dengan menggunakan *raster calculator*. Sehingga diperoleh distribusi nilai karbon permukaan yang direpresentasikan oleh nilai piksel. Berikut hasil perhitungan estimasi stok karbon permukaan pada setiap piksel titik plot sampel seperti tersaji pada **Tabel 5**.

Tabel 4. Persamaan masing-masing regresi untuk model seluruh jenis.

Persamaan Regresi	R^2
Linear	
$Y = 395,95x - 51,409$(6)	0,7003
Kuadratik	
$Y = 370,49x^2 + 81,081x + 0,6179$ (7)	0,7496
Eksponensial	
$Y = 17,527e^{3,7496x}$ (8)	0,5139



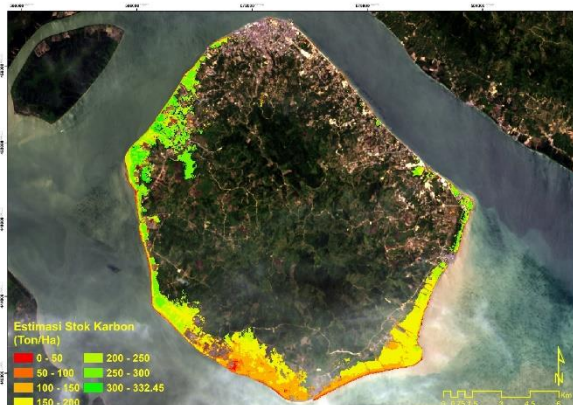
Gambar 8. Hubungan nilai karbon piksel dengan nilai NDVI dengan metode persamaan regresi kuadratik.

Tabel 5. Nilai biomassa per piksel, karbon per piksel, dan estimasi stok karbon.

Plot	NDVI	Biomassa per piksel (ton/ha)	Karbon per piksel (ton/ha)	Estimasi stok karbon (ton/ha)
1	0,704577	628,58	295,43	241,67
2	0,700498	592,09	278,28	239,21
3	0,747117	398,34	187,22	268,00
4	0,752172	665,83	312,94	271,21
5	0,542992	360,66	169,51	153,88
6	0,464823	218,80	102,83	118,35
7	0,483382	316,28	148,65	126,38
8	0,365965	220,13	103,46	79,91
9	0,381934	171,25	80,49	85,63
10	0,464463	187,87	88,30	118,20
11	0,651494	339,15	159,40	210,69
12	0,543351	238,60	112,14	154,05
13	0,361292	31,30	14,71	78,27
14	0,457184	263,27	123,74	115,13
15	0,405776	380,04	178,62	94,52

Peta distribusi nilai karbon permukaan pada Pulau Nunukan disajikan pada **Gambar 9**. Total nilai estimasi stok karbon permukaan yang diperoleh sebesar 6.401.988,95 ton C pada area mangrove seluas 3155,85 ha. Nilai estimasi stok karbon yang diperoleh berada kisaran 0-322,45 ton/ha setiap pikselnya.

Model estimasi stok karbon seluruh jenis yang dibangun belum memberikan hasil yang terbaik, jika dibandingkan dengan model yang dibangun oleh Rahadian (2019), dalam mengestimasi biomassa dan karbon mangrove di seluruh Indonesia menggunakan citra Landsat-8 yang diintegrasikan dengan ALOS PALSAR. Nilai koefisien determinasi yang diperoleh sebesar $R^2=0,806$ dengan menggunakan persamaan regresi eksponensial.



Gambar 9. Peta sebaran stok karbon permukaan.

Uji akurasi dilakukan dengan menggunakan semua sampel dari keseluruhan sampel yang diperoleh di lapangan sebanyak 15 sampel, dimana sampel tersebut juga dipergunakan untuk membangun model. Penentuan titik uji akurasi sebaiknya titik independen yang tidak digunakan sebagai pembangun model agar hasil uji akurasi lebih reliabel. Namun pada penelitian ini titik sampel yang diperoleh sangat terbatas sehingga pengujian akurasi masih menggunakan titik yang sama

untuk membangun model. Nilai akurasi ditentukan berdasarkan besar *Root Mean Square Error* (RMSE) antara hasil pengukuran karbon di lapangan dengan citra. Nilai RMSE hasil pengukuran lapangan dengan estimasi menggunakan citra dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6. RMSE antara hasil pengukuran karbon di lapangan dengan hasil estimasi karbon menggunakan citra satelit.

Plot	NDVI	Karbon (ton/ha)	Estimasi karbon (ton/ha)	Selisih estimasi karbon dengan karbon
1	0,704577	295,43	241,67	-53,77
2	0,700498	278,28	239,21	-39,07
3	0,747117	187,22	268,00	80,78
4	0,752172	312,94	271,21	-41,73
5	0,542992	169,51	153,88	-15,63
6	0,464823	102,83	118,35	15,52
7	0,483382	148,65	126,38	-22,27
8	0,365965	103,46	79,91	-23,55
9	0,381934	80,49	85,63	5,14
10	0,464463	88,30	118,20	29,90
11	0,651494	159,40	210,69	51,29
12	0,543351	112,14	154,05	41,91
13	0,361292	14,71	78,27	63,56
14	0,457184	123,74	115,13	-8,61
15	0,405776	178,62	94,52	-84,10
Total				-0,61
RMSE				45,25

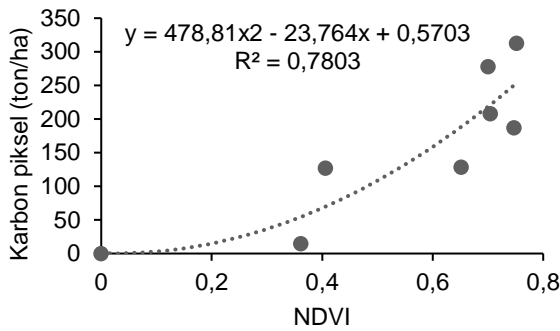
Model Estimasi Stok Karbon Jenis Dominan

Model penduga atau estimasi stok karbon jenis dominan yang dibangun, menggunakan persamaan regresi linear, kuadratik, dan eksponensial (**Tabel 7**). Dari ketiga jenis regresi tersebut, persamaan regresi kuadratik menghasilkan nilai koefisien determinasi yang paling tinggi sehingga persamaan regresi kuadratik dipilih sebagai model penduga atau estimasi stok karbon.

Tabel 7. Persamaan masing-masing regresi untuk jenis dominan.

Persamaan Regresi	R^2
Linear $Y = 360,42x - 37,607$ (9)	0,7209
Kuadratik $Y = 478,81x^2 - 23,764x + 0,5703$ (10)	0,7803
Eksponensial $Y = 5,5435e^{5,1698x}$ (11)	0,6679

Persamaan regresi kuadratik menghasilkan nilai koefisien determinasi yang paling tinggi. Koefisien determinasi (R^2) yang dihasilkan sebesar 0,7803. Persamaan regresi kuadratik (**Persamaan 10**) digunakan untuk mengestimasi stok karbon permukaan, dengan y adalah karbon dan x adalah nilai ekstraksi NDVI. Grafik hubungan antara nilai karbon piksel dengan nilai NDVI pada model regresi disajikan pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Hubungan nilai karbon piksel dengan nilai NDVI dengan metode persamaan regresi kuadratik.

Perhitungan nilai biomassa dan karbon yang hanya mencakup area plot 10m x 10m selanjutnya dikonversi menjadi area plot 30m x 30m sesuai dengan resolusi spasial citra Landsat 8-OLI yaitu 30 meter, sehingga diperoleh nilai biomassa setiap piksel dan nilai karbon setiap pikselnya (**Tabel 8**). Sampel yang digunakan untuk membangun persamaan model dalam regresi kuadratik adalah sampel yang memiliki jenis mangrove yang homogen yaitu jenis *Rhizophora* sp. Sampel dengan jenis *Rhizophora* sp. tersebut dipilih untuk membangun model karena dari keseluruhan wilayah kajian, jenis *Rhizophora* sp merupakan jenis mangrove yang mendominasi wilayah kajian. Pada saat diterapkan pada citra Landsat-8 OLI untuk estimasi cadangan karbon, tetap menggunakan persamaan yang berasal dari sampel *Rhizophora* sp, meskipun di daerah kajian juga terdapat jenis mangrove yang lain.

Persamaan yang digunakan sebagai model penduga atau estimasi stok karbon diterapkan pada citra Landsat-8 OLI. Data raster citra Landsat-8 OLI yang telah ditransformasikan menjadi citra NDVI, kemudian dikalkulasi dengan menggunakan *raster calculator*. Sehingga diperoleh distribusi nilai karbon permukaan yang direpresentasikan oleh nilai piksel. Berikut hasil perhitungan estimasi stok karbon permukaan pada setiap piksel titik plot sampel dari hasil filterisasi sample model (**Tabel 9**).

Tabel 8. Perhitungan biomassa piksel dan karbon piksel.

Plot	NDVI	Biomassa piksel (ton/ha)	Karbon piksel (ton/ha)
1	0,704577	628,58	295,43
2	0,700498	592,09	278,28
3	0,747117	398,34	187,22
4	0,752172	665,83	312,94
5	0,542992	360,66	169,51
6	0,464823	218,80	102,83
7	0,483382	316,28	148,65
8	0,365965	220,13	103,46
9	0,381934	171,25	80,49
10	0,464463	187,87	88,30
11	0,651494	339,15	159,40
12	0,543351	238,60	112,14
13	0,361292	31,30	14,71
14	0,457184	263,27	123,74
15	0,405776	380,04	178,62

Tabel 9. Nilai biomassa per piksel, karbon per piksel, dan estimasi stok karbon.

Plot	NDVI	Biomassa per piksel (ton/ha)	Karbon per piksel (ton/ha)	Estimasi stok karbon (ton/ha)
1	0,704577	442,92	208,17	221,52
2	0,700498	592,09	278,28	218,87
3	0,747117	398,34	187,22	250,08
4	0,752172	665,83	312,94	253,59
11	0,651494	339,15	159,40	128,84
13	0,361292	31,30	14,71	92,98
15	0,405776	380,04	178,62	100,96



Gambar 11. Peta sebaran stok karbon permukaan.

Peta distribusi nilai karbon permukaan pada Pulau Nunukan disajikan pada **Gambar 11**. Total nilai estimasi stok karbon permukaan yang diperoleh sebesar 5.616.404,46 ton C pada area mangrove seluas 3155,85 ha. Nilai estimasi stok karbon yang diperoleh berada kisaran 0-321 ton/ha setiap pikselnya. Model estimasi stok karbon jenis dominan yang dibangun menunjukkan nilai yang terbaik, jika dibandingkan model yang dibangun oleh Husna et al. (2018), dalam mengestimasi cadangan karbon hutan mangrove di Tongketongke, Sulawesi Selatan. Nilai koefisien determinasi yang diperoleh sebesar $R^2=0,588$ dan $R^2=0,629$ dengan menggunakan persamaan regresi kuadratik. Pada penelitian tersebut citra satelit yang digunakan yaitu citra Landsat dan ALOS PALSAR, kemudian yang menjadi jenis yang dominan yaitu *Rhizophora* sp. Berdasarkan penelitian tersebut dapat mempertegas bahwa penggunaan indeks vegetasi (NDVI) dapat dijadikan acuan untuk mengestimasi stok karbon mangrove.

Uji Akurasi

Uji akurasi dilakukan dengan menggunakan sampel sebanyak 8 sampel yang tersisa dari keseluruhan sampel yang diperoleh di lapangan, dimana sebagian besar sampel lain sudah dipergunakan untuk membangun model. Nilai akurasi ditentukan berdasarkan besar *Root Mean Square Error* (RMSE) antara hasil pengukuran karbon di lapangan dengan citra.

Perbandingan antara nilai stok karbon dan nilai estimasi stok karbon berdasarkan model yang dibangun diuji menggunakan persamaan *Root*

Mean Square Error (RMSE). Nilai akurasi yang diperoleh dari model estimasi stok karbon seluruh jenis yaitu 45,25 (**Tabel 6**) dan nilai akurasi yang diperoleh dari model estimasi stok karbon jenis dominan yaitu 31,82 (**Tabel 10**).

Tabel 10. RMSE antara hasil pengukuran karbon di lapangan dengan hasil estimasi karbon menggunakan citra satelit.

Plot	NDVI	Karbon (ton/ha)	Estimasi karbon (ton/ha)	Selisih estimasi karbon dengan karbon
5	0,54299	169,51	128,84	40,67
6	0,46482	102,83	92,98	9,86
7	0,48338	148,65	100,96	47,69
8	0,36597	103,46	56,00	47,46
9	0,38193	80,49	61,34	19,15
10	0,46446	88,30	92,82	-4,52
12	0,54335	112,14	129,02	-16,87
14	0,45718	123,74	89,79	33,95
Total				177,38
RMSE				31,82

Hasil dari perhitungan RMSE tergolong besar karena nilai akurasi yang didapat masih jauh dari kisaran 0,0-1,0. Nilai akurasi yang diperoleh mengindikasikan bahwa terdapat nilai bias yang besar pada model estimasi stok karbon yang dibangun. Hal tersebut disebabkan karena nilai stok karbon diperoleh dari perhitungan persamaan alometrik setiap jenis mangrove yang menggunakan diameter batang pohon sebagai nilai penduga sedangkan nilai NDVI hanya menunjukkan tingkat kehijauan atau kerapatan tajuk suatu vegetasi berdasarkan nilai reflektan suatu citra. Lebih jauh, nilai kerapatan tajuk atau tutupan kanopi dipengaruhi oleh luas permukaan daun yang berbeda setiap jenis mangrove.

Nilai total estimasi stok karbon yang dihasilkan dari kedua model yang dibangun mempunyai selisih yang besar. Hal tersebut disebabkan karena penggunaan sampel jenis dominan hanya menggunakan jenis *Rhizophora* sebagai nilai penduga dan mengabaikan jenis lain yang ada pada plot sampel. Sehingga terjadinya pengurangan nilai karbon pada plot sampel yang dijadikan nilai penduga. Sedangkan pada penggunaan sampel seluruh jenis menggunakan semua jenis yang teridentifikasi sebagai nilai penduga.

Model yang menggunakan jenis dominan dibangun karena hasil indeks vegetasi (NDVI) belum mampu secara spesifik membedakan setiap jenis mangrove. Sehingga diasumsikan bahwa seluruh hasil NDVI merupakan suatu jenis yang homogen. Sampel yang digunakan sebagai nilai penduga yaitu jenis mangrove yang bertipe pohon, sedangkan jenis mangrove yang bertipe semak tidak dijadikan sebagai sampel nilai penduga. Nilai NDVI yang hanya menunjukkan nilai kerapatan tajuk suatu vegetasi menjadi sebuah alasan untuk membangun model yang hanya menggunakan jenis dominan. Penggunaan jenis dominan sebagai sampel mengindikasikan bahwa bentuk dan ukuran

daun dari jenis mangrove tersebut lebih merata dan lebih seragam. Hal tersebut sesuai dengan pernyataan Winarso et al. (2015), nilai NDVI untuk stok karbon hanya bagus merepresentasikan nilai stok karbon untuk hutan yang mempunyai jenis yang homogen.

Nilai akurasi dan koefisien determinasi model yang hanya menggunakan jenis dominan lebih tinggi dibandingkan dengan model yang menggunakan seluruh jenis. Nilai koefisien determinasi yang dihasilkan dari kedua model tersebut hanya selisih 3% dan nilai RMSE yang dihasilkan dari keduanya juga masih tergolong besar. Nilai RMSE semakin rendah maka nilai hasil pendugaan semakin akurat.

Stok Karbon Mangrove di Pulau Nunukan

Perhitungan stok karbon menggunakan model yang dibangun diperoleh total stok karbon permukaan sebesar 6.401.988,95 ton C untuk model estimasi stok karbon yang menggunakan seluruh jenis dan 5.616.404,46 ton C untuk model estimasi stok karbon yang menggunakan jenis dominan. Perbedaan hasil nilai stok karbon dari kedua model yang digunakan disebabkan karena adanya proses generalisasi *training* data dalam membangun model estimasi stok karbon yang menggunakan jenis dominan. Penggunaan jenis dominan diasumsikan bahwa di dalam satu piksel citra Landsat (30x30 m) didominasi oleh satu jenis saja. Namun, ini berdampak pada hasil yang diperoleh dari model tersebut. Nilai stok karbonnya lebih rendah daripada model yang dibangun berdasarkan seluruh jenis. Perbedaan setiap jenis penting dilakukan, karena setiap jenis memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda sehingga nilai pantulan spektralnya juga berbeda-beda. Setiap jenis mangrove memiliki kemampuan yang berbeda-beda dalam menyerap dan menyimpan karbon. Sehingga pada proses estimasi stok karbon menggunakan data penginderaan jauh perlu memperhatikan komposisi jenis yang diwakili oleh satuan resolusi spasial citra.

Pemilihan model estimasi stok karbon sangat tergantung dari kondisi vegetasi mangrove pada wilayah yang dikaji dan karakteristik data penginderaan jauh yang ingin digunakan baik dari segi resolusi spasial maupun spektral. Model estimasi stok karbon mangrove menggunakan jenis dominan sebaiknya digunakan pada komposisi jenis mangrove di suatu wilayah hanya didominasi oleh satu jenis saja. Tetapi jika komposisi jenis mangrove di suatu wilayah itu beragam, sebaiknya model estimasi stok karbon menggunakan seluruh jenis. Karena setiap jenis mangrove telah memiliki persamaan alometriknya masing-masing.

Dari segi data penginderaan jauh, jika data citra yang digunakan memiliki resolusi spasial menengah seperti Landsat maka perlu mempertimbangkan komposisi jenis yang terdapat di dalam *pure pixel* mangrove. Sehingga, jika dalam satu pikselnya hanya terdapat satu jenis yang

dominan maka sebaiknya menggunakan model estimasi karbon jenis dominan, namun jika dalam satu pikselnya terdapat berbagai jenis yang mendominasi maka sebaiknya menggunakan model estimasi stok karbon seluruh jenis. Tetapi yang perlu dipertimbangkan yaitu membuat fraksi-fraksi komposisi jenis mangrove dalam setiap pikselnya, agar keterwakilan setiap jenis di dalam satu piksel itu terwakili. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan kedua model untuk membandingkan hasilnya dengan penelitian-penelitian lainnya.

Nilai stok karbon mangrove di Pulau Nunukan jika dibandingkan dengan penelitian-penelitian lainnya, diperoleh lebih besar dari stok karbon permukaan dari hutan mangrove di Tongke-Tongke, Sulawesi Selatan (Husna et al., 2018), dan hutan mangrove di Pulau Bauluang, Sulawesi Selatan (Fitrah, 2019), karena luasan vegetasi mangrove di Pulau Nunukan juga lebih luas yaitu sebesar 3.155,85 ha. Nilai estimasi stok karbon yang diperoleh lebih kecil bila dibandingkan dengan nilai stok karbon mangrove di Indonesia (Rahadian, 2019), karena luasan vegetasi mangrove pada penelitian tersebut mencakup pada seluruh wilayah mangrove di Indonesia (**Tabel 11**).

Tabel 11. Penelitian estimasi karbon di beberapa wilayah di Indonesia.

No	Sumber	Luas kajian (ha)	Stok karbon permukaan (ton C)
1	Fitrah, (2019)	252,90	66.911,73
2	Husna et al., (2018)	100,56	5.662,85 dan 6.431,46
3	Rahadian (2019)	3.156.744,78	1.817.994.407,02

Perbedaan nilai stok karbon yang ditemukan disebabkan karena penggunaan persamaan alometrik yang berbeda (Kauffman & Donato, 2012). Selain itu, perbedaan ukuran diameter batang juga mempengaruhi. Seiring dengan pertambahan waktu, jenis penyusun tegakan juga akan tumbuh yang berarti akan meningkatkan kapasitas penyimpanan karbon pada tegakan mangrove tersebut. Tinggi rendahnya nilai biomassa suatu ekosistem mangrove disebabkan tingkat kesuburan tanah dan kerapatan mangrove yang terdapat di kawasan tersebut (Dharmawan & Siregar, 2008). Informasi nilai stok karbon permukaan yang diperoleh dapat dijadikan landasan *blue economy* dan investasi ekologi, serta menjadi bahan pertimbangan untuk pemerintah Kabupaten Nunukan maupun yayasan pengelolaan kawasan hutan mangrove di Pulau Nunukan.

KESIMPULAN

Pulau Nunukan, Kalimantan Utara memiliki keanekaragaman jenis mangrove yang tinggi namun jenis mangrove yang mendominasi pada pulau tersebut yaitu *Rhizophora apiculata*.

Hasil pengolahan citra transformasi NDVI pada citra Landsat-8 OLI menunjukkan tingkat kerapatan mangrove yang didominasi kategori mangrove rapat.

Terdapat dua model yang dibangun untuk mengestimasi stok karbon permukaan mangrove dan diperoleh nilai estimasi stok karbon permukaan sebesar 6.401.988,95 ton C untuk model estimasi stok karbon seluruh jenis dan 5.616.404,46 ton C untuk model estimasi stok karbon jenis dominan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Puslitbang Laut, Pesisir dan Pulau-pulau Kecil LPPM Universitas Hasanuddin, Makassar yang telah memfasilitasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amira, S. (2008). Pendugaan biomassa jenis *Rhizophora apiculata* Bl. di hutan mangrove Batu Ampar Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat. In Skripsi (Tidak dipublikasikan). Fakultas Kehutanan. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- BSN (Badan Standar Nasional). (2011). Pengukuran dan penghitungan cadangan karbon – Pengukuran lapangan untuk penaksiran cadangan karbon hutan (*Ground based forest carbon accounting*) (SNI 7724:2011). Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Beze, H. & Suparjo, S. (2015). Analisa tutupan hutan Pulau Nunukan Kabupaten Nunukan Kalimantan Utara. *Jurnal Digit (Jurnal Ilmiah Digital of Information Technology)*, 5(1), 1-12. Diakses dari: <https://jurnaldigit.org/index.php/DIGIT/article/view/56>.
- Chavez, P.S., Berlin, G.L. & Sowers, L.B. (1982). Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8(1), 23-30. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.1982.350424>.
- Chiraz, M.-C. (2013). Growth of young olive trees: Water Requirements in relation to canopy and root development. *American Journal of Plant Sciences*, 4(7), 1316-1344. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2013.47163>.
- Dharmawan, I.W.E. & Pramudji. (2017). *Panduan pemantauan komunitas mangrove*. Edisi 2. CRITC Coremap CTI LIPI. Jakarta. 54 hlm.
- Dharmawan, I.W.S. (2010). Pendugaan biomassa karbon di atas tanah pada tegakan *Rhizophora Mucronata* di Ciasem, Purwakarta. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 15(1), 50-56.
- Dharmawan, I.W.S. & Siregar, C.A. (2008). Karbon tanah dan pendugaan karbon tegakan *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. di ciasem, Purwakarta. *Jurnal penelitian hutan dan konservasi alam*, 5(4), 317-328. DOI: <https://doi.org/10.20886/jphka.2008.5.4.317-328>.
- Donato, D.C., Kauffman, J.B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M. & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293-297. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>.
- Fitrah, M.N. (2019). Dinamika perubahan stok karbon biomassa pada ekosistem mangrove menggunakan data satelit dan pengukuran karbon

- permukaan di Pulau Bauluang. Tesis (Tidak diterbitkan). Pengelolaan Lingkungan Hidup. Sekolah Pascasarjana. Universitas Hasanuddin.. Makassar.
- Hairiah, K., Sitompul, S.M., van Noordwijk, M. & Palm, C. (2001). *Methods of sampling for sampling above and below-ground organic pools*. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF), Southeast Asian Regional Research Programme. Bogor. v, 24p.
- Hendrawan, H., Gaol, J.L. & Susilo, S.B. (2018). Studi kerapatan dan perubahan tutupan mangrove menggunakan citra satelit di Pulau Sebatik Kalimantan Utara. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 10(1), 99-109. DOI: <http://dx.doi.org/10.29244/jitkt.v10i1.18595>.
- Husna, V.N., Siregar V.P., Agus, S.B. & Arifin, T. (2018). Estimasi cadangan karbon biomassa di atas permukaan tanah pada mangrove menggunakan penginderaan jauh di Tongke-Tongke, Sulawesi Selatan. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, 9(2), 456-466. DOI: <http://dx.doi.org/10.29244/jpsl.9.2.456-466>.
- Irsadi, A., Martuti, N.KT. & Nugraha, S.B. (2017). Estimasi stok karbon mangrove di Dukuh Tapak Kelurahan Tugurejo Kota Semarang. *Saintekno: Jurnal Sains dan Teknologi*, 15(2), 119-128. DOI: - <https://doi.org/10.15294/saintekno.v15i2.12402>.
- Kauffman, J.B. & Cole, T.G. (2010). Micronesian mangrove forest structure and tree responses to a severe typhoon. *Wetlands*, 30(2010), 1077-1084. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-010-0114-y>
- Kauffman, J.B., & Donato, D.C. (2012). *Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests*. Working Paper 86 CIFOR, Bogor. vii, 40p.
- Kauffman, J.B., Heider, C., Cole, T.G., Dwire, K.A. & Donato, D.C. (2011). Ecosystem carbon stocks of micronesian mangrove forests. *Wetlands*, 31(2011), 343-352. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0148-9>.
- KLH (Kementerian Lingkungan Hidup). (2004). Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 201 Tahun 2004 tentang Kriteria Baku dan Pedoman Penentuan Kerusakan Mangrove. Kementerian Lingkungan Hidup Jakarta.
- Komiyama, A., Pongpam, S. & Kato, S. (2005). Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4), 471-477. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0266467405002476>.
- LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional). (2015). *Pedoman pengolahan data satelit multispektral secara digital supervised untuk klasifikasi*. Pusat Pemanfaatan Penginderaan Jauh. Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional. Jakarta. Diakses dari: http://pusfatja.lapan.go.id/files_uploads_ebook/pedoman/000_Buku_Pedoman_Klasifikasi_final.pdf.
- Manoppo, A. K., Anggraini, N., & Marini, Y. (2015). Identifikasi Mangrove Dengan Metode Optimum Index Factor (OIF) Pada Data SPOT 6 dan Landsat 8 di Pulau Lingayan. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XX dan Kongres VI Masyarakat Ahli Penginderaan Jauh Indonesia (MAPIN): Perkembangan Penginderaan Jauh di Indonesia dan Pemanfaatannya untuk Perencanaan Wilayah, Pengelolaan DAS, dan Mitigasi Bencana Alam*, 68-76. Institut Pertanian Bogor, Darmaga Bogor, 5-6 Feb 2015.
- McLeod, E., Chmura, G.L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C.M., Lovelock, C.E., Schlesinger, W.H. & Silliman, B.R. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552-560. DOI: <https://doi.org/10.1890/110004>.
- Nduru, R.E., Situmorang, M. & Tarigan, G. (2014). Analisa faktor-faktor yang mempengaruhi hasil produksi padi di Deli Serdang. *Saintia Matematika*, 2(1), 71-83.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C.M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L. & Grimsditch, G. (Eds) (2009). *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment*. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal. www.grida.no. ix, 73p.
- Noor, Y.R., Khazali, M. & Suryadiputra, I.N.N. (2006). *Pengenalan mangrove di Indonesia*. Cetakan Kedua. Ditjen PHPA-Wetlands International, Indonesia Programme (PHPA-WI-IP). Bogor. viii, 219hlm.
- Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Rötzer, T., Caldentey, J., Koike, T., van Con, T., Chavanne, A., Seifert, T., du Toit, B. Farnden, C. & Pauleit, S. (2015). Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry and Urban Greening*, 14(3), 466-479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006>.
- Rahadian, A. (2019). *Model spasial pendugaan biomassa dan karbon mangrove di Indonesia*. Tesis (Tidak diterbitkan). Prodi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan. Sekolah Pasca Sarjana. Institut Pertanian Bogor.
- Rahmawati, S., Irawan, A., Supriyadi, I.H. & Azkab, M.H. (2014). Panduan *monitoring padang lamun*. Di dalam M. Hutomo & A. Nontji (Ed.). Edisi Pertama. COREMAP-CTI. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Sarana Komunikasi Utama. Bogor. viii, 37hlm.
- Rakhmawati, M. (2012). Hubungan biomassa penutup lahan dengan indeks vegetasi di Kabupaten Mamuju Utara. *Globe*, 14(2), 157-169.
- Roshetko, J.M., Delaney, M., Hairiah, K. & Purnomosidhi, P. (2002). Carbon stocks in Indonesian homegarden systems: Can smallholder systems be targeted for increased carbon storage?. *American Journal of Alternative Agriculture*, 17(3), 138-148. DOI: <https://doi.org/10.1079/AJAA200116>.
- Savana, M.S. (2019). *Profil stok karbon di area ekosistem mangrove Pulau Sangiang, Banten*. Skripsi (Tidak diterbitkan). Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan (FPIK). Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Simpson, W.T. (1996). *Method to estimate dry-kiln schedules and species groupings: Tropical and temperate hardwoods*. Res. Pap. FPL-RP-548. Madison. Forest Products Laboratory, Forest Service. U.S. Department of Agriculture. Washington, DC. USA. 57 p.
- Syukri, M., Mashoreng, S., Werorilangi, S., Isyirini, R., Rastina, R., Faizal, A., Tahir, A. & Gosalam, S. (2018). Kajian stok karbon mangrove di Bebanga Kabupaten Mamuju Sulawesi Barat. *Prosiding Simposium Nasional Kelautan dan Perikanan*, V(2018) 335-342. Diakses dari <https://journal.unhas.ac.id/index.php/proceedingsimnaskp/article/view/4665>.
- van Noordwijk, M. Susswein, P.M., Tomich, T.P., Diaw, C. & Vosti, S. (Eds). (2001). *Land use practices in*

the humid tropics and introduction to ASB benchmark areas. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF). Southeast Asian Regional Research Programme. Bogor. v, 38p.
Winarso, G., Vetrira, Y., Purwanto, A.D., Anggraini, N., Darmawan, S. & Yuwono, D.M. (2015). Mangrove

above ground biomass estimation using combination of Landsat 8 and ALOS PALSAR data. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 12(2), 85-96. DOI: <https://doi.org/10.30536/j.ijreses.2015.v12.a2687>.

Halaman ini sengaja kami kosongkan