

## Estimasi Stok Karbon Mangrove Pasca Rehabilitasi di Desa Kaliwlingi, Brebes Menggunakan Citra Sentinel-2

Lovensia Zukruff Albasit\*, Rudhi Pribadi, Rini Pramesti

Departemen Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. H. Soedarto S.H, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia  
\*Corresponding author, e-mail: lovensiazukruff@gmail.com

**ABSTRAK:** Mangrove sebagai ekosistem karbon biru berperan penting dalam mitigasi perubahan iklim namun di sisi lain keberadaannya terancam oleh konversi lahan. Rehabilitasi mangrove telah banyak dilakukan dan untuk mengelolanya secara berkelanjutan stok karbon mangrove perlu diketahui untuk kebutuhan pasar karbon. Pesisir Kota Brebes menjadi salah satu daerah yang berhasil merehabilitasi kawasan hutan mangrove. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi stok karbon mangrove pasca rehabilitasi di Desa Kaliwlingi, Brebes berdasarkan perbedaan tahun tanam, yakni 2005, 2008, 2011, 2014 dan 2017. Penelitian lapangan dilakukan pada 21–23 November 2020. Metode terdiri dari survei lapangan, perhitungan allometrik dan pengolahan citra Sentinel-2. Survei lapangan dilakukan guna mengetahui komposisi spesies dan diameter setinggi dada (DBH) tiap tegakan mangrove. Rumus allometrik spesies-spesifik digunakan untuk menghitung biomassa mangrove yang kemudian dikonversi menjadi nilai stok karbon di tiap lahan rehabilitasi. Citra Sentinel-2 ditransformasi dengan Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), selanjutnya dilakukan analisis regresi antara nilai NDVI dan stok karbon untuk mendapatkan model pendugaan stok karbon menggunakan citra satelit. Terdapat tiga spesies mangrove yang ditemukan, yaitu *Rhizophora mucronata*, *Avicennia alba* dan *Avicennia marina*. Hasil menunjukkan bahwa stok karbon mangrove tahun tanam 2005, 2008, 2011, 2014 dan 2017 secara berturut-turut adalah 80,69 tonC/ha, 95,08 tonC/ha, 104,19 tonC/ha, 175,13 tonC/ha dan 137,35 tonC/ha. Hasil analisis regresi antara nilai NDVI dan stok karbon mangrove menunjukkan koefisien determinasi yang sangat rendah ( $R^2 = 0,06$ ), sehingga model tidak dapat digunakan untuk menduga stok karbon mangrove. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tidak ada peningkatan stok karbon seiring dengan semakin tua lahan mangrove. Spesies *A. marina* berkontribusi besar untuk perolehan stok karbon mangrove yang lebih tinggi dibandingkan *R. mucronata*.

**Kata kunci:** Karbon Biru; Stok Karbon Mangrove; Perhitungan Allometrik; Sentinel-2; NDVI

### *Estimation of Post-Rehabilitation Mangrove Carbon Stock in Kaliwlingi, Brebes Using Sentinel-2 Imagery*

**ABSTRACT:** Mangrove as blue carbon ecosystem has a significant role in mitigating climate change which existence is threatened by land conversion. Mangrove rehabilitation has been widely done and requires sustainable management by knowing the carbon stock as a call for carbon market. The coastal area of Brebes is one of the regions that has successfully rehabilitated mangrove forest area. This research aims to estimate post-rehabilitation mangrove carbon stock in Kaliwlingi, Brebes based on different planting years, i.e. 2005, 2008, 2011, 2014 dan 2017. A field research was conducted on November 21<sup>st</sup> – 23<sup>rd</sup> 2020. The method involved field survey, allometric calculation and Sentinel-2 processing. A field survey was conducted to collect the diameter at breast height (DBH) of each stand and species composition. Species-specific allometric equations were used to calculate mangrove biomass, subsequently converted into carbon stock in each rehabilitated area. Sentinel-2 imagery was transformed using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Regression analysis was performed between NDVI value and carbon stock to obtain the estimation model for mangrove carbon stock using satellite imagery. There are three species found, namely *Rhizophora mucronata*, *Avicennia alba* and *Avicennia marina*. The result shows carbon stock in plantation of 2005, 2008, 2011, 2014 and 2017 are 80.69 tonC/ha, 95.08 tonC/ha, 104.19 tonC/ha,

175.13 tonC/ha and 137.35 tonC /ha respectively. Regression analysis of NDVI and carbon stock shows a very poor coefficient of determination ( $R^2 = 0.06$ ), therefore the model is incompatible for estimating carbon stock. In this research, mangrove carbon stock is not increasing with plantation age. *A. marina* has huge contribution for a higher carbon stock compared to *R. mucronata*.

**Keywords:** Blue Carbon; Mangrove Carbon Stock; Allometric Equation; Sentinel-2; NDVI

## PENDAHULUAN

Mangrove merupakan kumpulan vegetasi dengan taksonomi yang beragam dan sebagian besar merupakan tumbuhan berkayu, toleran terhadap lingkungan bersalinitas, hidup di zona intertidal serta tersebar di wilayah tropis maupun subtropis (Primavera *et al.*, 2018) baik di sepanjang kawasan pesisir maupun estuari (Tomlinson, 2016). Mangrove memiliki berbagai jasa lingkungan baik secara fisik (perangkap sedimen, pelindung daratan dari badai, banjir dan penstabil geomorfologi garis pantai), ekologi (habitat flora dan fauna, pengendali polusi), maupun ekonomi (habitat perikanan komersil) (Barbier, 2017). Salah satu jasa lingkungan mangrove yang sangat diperlukan bumi saat ini adalah sebagai *blue carbon sink* yakni ekosistem pesisir penyerap dan penyimpan karbon dalam jangka waktu panjang (Taillardat *et al.*, 2018), dimana karbon disimpan dalam bentuk biomassa maupun karbon organik tanah (Donato *et al.*, 2011). Ekosistem mangrove mampu menyimpan karbon secara global hingga 6,5 milyar ton karbon atau hampir setara dengan 24 milyar ton CO<sub>2</sub>eq (Siikamäki *et al.*, 2012). Di sisi lain, persentasi stok karbon mangrove hanya 0,4 – 7% dari stok karbon ekosistem darat, namun dari seluruh stok karbon laut tropis alokasi stok karbon mangrove mencapai 17%. Selain itu, emisi CO<sub>2</sub> akibat konversi lahan mangrove hanya 0,2% dari total emisi global, sementara dari total emisi daerah laut tropis mencapai 18% (0,088 PgCO<sub>2</sub>eq a<sup>-1</sup>). Kontribusi mangrove untuk mitigasi perubahan iklim global memang kecil, namun mangrove tetap berperan signifikan untuk penyerapan karbon di pesisir dan efektif untuk mitigasi perubahan iklim dalam skala nasional maupun regional (Alongi, 2020).

Mangrove sebagai salah satu garda terdepan mitigasi perubahan iklim di laut tropis masih menghadapi masalah yang cukup serius, yakni rentan terhadap pembalakan (Richards & Friess, 2016). Indonesia memiliki kawasan hutan mangrove terbesar di dunia, yakni 3,49 juta ha, tetapi 52% (1,82 juta ha) di antaranya telah mengalami kerusakan (KKP, 2020). Laju kerusakan mangrove secara global diperkirakan mencapai 0,7 – 3% per tahun (Pendleton *et al.*, 2012). Sebagian besar konversi mangrove di Indonesia difungsikan untuk kegiatan akuakultur (Hamilton & Casey, 2016) yakni sebesar 48%, sementara hingga 2012, persentase mangrove yang tumbuh kembali sebesar 22,6% (Richards & Friess, 2016). Deforestasi mangrove memiliki dampak pada komunitas pesisir, di antaranya abrasi pantai, intrusi air laut, pengurangan luas daratan maupun berkurangnya hasil perikanan (Malik *et al.*, 2017).

Desa Kaliwlingi di Kabupaten Brebes merupakan salah satu daerah pesisir yang terdampak oleh konversi lahan mangrove untuk kegiatan akuakultur yang marak pada tahun 1987 – 1997. Konversi lahan tersebut menyebabkan abrasi pantai dan telah mengurangi luas daratan di Desa Kaliwlingi. Desa tersebut mengalami abrasi pantai terparah dari seluruh pesisir Brebes pada tahun 2000 – 2008 yakni mencapai 186 ha atau 30% dari total luas daerah abrasi (Hakim *et al.*, 2018). Hal ini menyadarkan masyarakat akan pentingnya mangrove sehingga masyarakat mulai melakukan rehabilitasi sejak tahun 2003 dan pada tahun 2019 total lahan mangrove di Desa Kaliwlingi mencapai 475,65 ha (Nugraha *et al.*, 2020) dari yang sebelumnya hanya 94,41 ha (tahun 2002) (Suyono *et al.*, 2015). Rehabilitasi mangrove dilakukan secara berkala dalam beberapa tahun, sehingga diduga hutan mangrove hasil rehabilitasi di Desa Kaliwlingi menyimpan stok karbon yang tinggi, namun penelitian stok karbon di desa tersebut masih sangat terbatas. Hanya terdapat satu estimasi oleh Nugraha *et al.* (2020) berdasarkan perubahan luas lahan dalam kurun waktu 23 tahun (1996 – 2019). Estimasi stok karbon pada mangrove rehabilitasi di Desa Kaliwlingi perlu dilakukan terutama pada tiap lahan dengan tahun tanam yang berbeda untuk mengetahui nilai stok karbon terkini pasca rehabilitasi. Terdapat lahan mangrove rehabilitasi tahun 2005, 2008, 2011, 2014 dan 2017 yang

belum diketahui stok karbonnya. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui nilai stok karbon mangrove hasil rehabilitasi di Desa Kaliwlingi berdasarkan perbedaan tahun tanam mangrove.

Umur lahan mangrove menjadi salah satu faktor yang berperan dalam pola distribusi stok karbon (karbon atas tanah, bawah tanah dan karbon organik tanah) disamping keanekaragaman spesies, densitas pohon dan tingkat gangguan (Phillips *et al.*, 2017). Menurut Camacho *et al.* (2011), peningkatan stok karbon mangrove berhubungan dengan umur individu mangrove, dimana pada 10 tahun pertama densitas karbon meningkat secara perlahan kemudian meningkatkan secara drastis pada tahun-tahun setelahnya. Penelitian Ren *et al.*, (2010) di Teluk Lheizou, China pada spesies *Sonneratia apetala* pada lahan mangrove berumur 4, 5, 8 dan 10 tahun menunjukkan nilai biomassa dan stok karbon (19,9 tonC/ha, 32,6 tonC/ha, 42,1 tonC/ha dan 49,0 tonC/ha) berbanding lurus dengan umur mangrove maupun diameter mangrove. Penelitian Camacho *et al.* (2011) menunjukkan nilai stok karbon total pada lahan mangrove berumur 15, 20 dan 40 tahun berturut-turut adalah 208,5 tonC/ha, 149,5 tonC/ha dan 370,7 tonC/ha dengan nilai koefisien determinasi antara umur mangrove dan stok karbon yang tinggi ( $R^2=0,89$ ). Sahu dan Kathiresan (2019) melaporkan pertambahan umur mangrove (2 – 14 tahun) meningkatkan potensi sekuestrasi karbon (199 GgC/ha – 283 GgC/ha) meskipun potensi sekuestrasi oleh mangrove umur 7 tahun lebih rendah dibandingkan umur 2 tahun. Di sisi lain, penelitian Kathiresan *et al.* (2013) menunjukkan hasil yang berbeda, dimana nilai stok karbon tidak proporsional dengan umur mangrove, selain itu penelitian Walcker *et al.* (2018) perubahan stok karbon biomassa mangrove secara kronologis (*Chronosequence*) selama 66 tahun justru semakin menurun setelah 10 tahun dan meningkat lagi setelah 50 tahun.

Jumlah stok karbon mangrove dapat di estimasi menggunakan teknologi penginderaan jauh. Estimasi tersebut dilakukan berdasarkan nilai indeks vegetasi pada suatu wilayah dan nilai stok karbon hasil survei lapangan yang diolah menggunakan analisis regresi (Situmorang *et al.*, 2016). Salah satu citra yang dapat digunakan untuk estimasi dan pemetaan stok karbon mangrove adalah citra Sentinel-2. Sentinel-2 merupakan citra multispectral pasif, dimana spektrum cahaya yang diterima oleh sensor satelit berasal dari matahari. Resolusi yang cukup tinggi, yakni mencapai 10 m menjadikan Sentinel-2 cocok digunakan untuk pemetaan stok karbon mangrove baik secara spasial maupun temporal (Phiri *et al.*, 2020). Berbagai penelitian estimasi stok karbon biomassa mangrove menggunakan penginderaan jauh telah dilakukan (Anand *et al.*, 2020; Muhsoni *et al.*, 2018; Situmorang *et al.*, 2016; Wicaksono *et al.*, 2016). Meski demikian, penggunaan Sentinel-2 untuk estimasi stok karbon mangrove masih sedikit jika dibandingkan dengan penggunaannya untuk memetakan biomassa maupun perubahan lahan mangrove.

Estimasi stok karbon mangrove hasil rehabilitasi oleh masyarakat setempat (*community based*) menjadi salah satu langkah awal untuk pengelolaan hutan mangrove yang berkelanjutan. Hal ini menjadi bukti manfaat bagi masyarakat setempat akan mangrove selain manfaat dari hasil eksploitasi. Hasil estimasi stok karbon ini juga dapat menjadi basis data untuk valuasi ekonomi karbon mangrove di Desa Kaliwlingi pada masa mendatang sehingga masyarakat dapat membentuk suatu fasilitas *offset* karbon untuk upaya mitigasi perubahan iklim sekaligus meningkatkan perekonomian masyarakat setempat. Hal ini sejalan dengan program REDD+ (*Reduction Emission from Deforestation and Degradation, Plus Conservation*) yang telah ditanda tangani secara bilateral oleh Indonesia dan Norwegia pada tahun 2010 untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dari deforestasi dan degradasi hutan maupun lahan gambut (The Government of the Kingdom of Norway and The Government of the Republic of Indonesia, 2010).

## MATERI DAN METODE

Materi penelitian ini adalah stok karbon mangrove baik karbon atas tanah (*aboveground*) yaitu pohon dan karbon bawah tanah (*belowground*) yaitu akar. Stok karbon diamati pada lahan mangrove dengan tahun tanam yang berbeda, yakni tahun 2005, 2008, 2011, 2014 dan 2017. Parameter yang diamati adalah diameter pohon, biomassa dan parameter lingkungan. Parameter lingkungan terdiri dari salinitas, suhu dan pH. Data yang digunakan merupakan data sekunder

karena data parameter stok karbon mangrove diperoleh dari Yayasan Keanekaragaman Hayati (KEHATI) dan Yayasan Inspirasi Keluarga KeSEMaT (IKAMaT) dibantu oleh Kelompok Masyarakat Pelestari Hutan Pesisir (KMPHP) Mangrove Sari. Hasil survei tersebut berupa data analisis vegetasi mangrove yang mana menjadi data sekunder penelitian ini. Survei tersebut dilakukan pada 21 – 23 November 2020. Data dari analisis vegetasi yang digunakan untuk penelitian ini meliputi data diameter setinggi dada (*diameter at breast height* / DBH), komposisi spesies, kerapatan mangrove, tutupan kanopi dan parameter lingkungan (pH, suhu, salinitas). Selain itu, data sekunder lain yang digunakan adalah data citra satelit Sentinel-2 Desa Kaliwlingi, Kabupaten Brebes. Citra tersebut diunduh dari situs NASA Earth Observatory System <https://eos.com/landviewer/> dengan tanggal akuisisi 12 November 2020. Berdasarkan dua data tersebut, penelitian ini hanya menggunakan data sekunder. Penelitian ini terdiri dari tiga tahap, yaitu pengambilan data atau survei lapangan, analisis data dan pengolahan citra.

Lokasi penelitian berada di hutan mangrove Desa Kaliwlingi, Kabupaten Brebes. Penelitian dilakukan pada lima stasiun (Tabel 1). Stasiun 1, 2 dan 3 merupakan lahan mangrove tahun tanam 2005, 2008 dan 2011 yang terletak di objek wisata Hutan Mangrove Pandansari dan berhadapan langsung dengan laut. Stasiun 4 dan 5 merupakan lahan mangrove tahun tanam 2014 dan 2017 yang terletak di sepanjang estuari Sungai Pemali. Kelima stasiun tersebut dipilih karena mewakili hutan mangrove hasil rehabilitasi pada tiap jenjang tahun di Desa Kaliwlingi.

Metode terdiri dari tiga tahap, yaitu survei lapangan, analisis stok karbon dan pengolahan data citra. Pertama, titik sampling ditentukan menggunakan citra Google Earth untuk mengetahui perwakilan koordinat dari tiap stasiun. Selanjutnya dilakukan sampling untuk mengambil data parameter stok karbon mangrove. Teknik sampling yang digunakan adalah *purposive sampling*, yaitu teknik sampling non-probabilitas yang bertujuan untuk menghasilkan sampel yang dinilai mewakili populasi, berdasarkan karakteristik populasi dan tujuan penelitian (Lavrakas, 2008). Sampling dilakukan secara non-destruktif, yakni pengukuran parameter (diameter, tinggi pohon, jumlah tegakan) tanpa merusak ataupun mengambil bagian dari mangrove (Situmorang *et al.*, 2016). Sampling mengacu pada metode Kauffman dan Donato (2012); Howard *et al.* (2014); Dharmawan dan Pramudji (2017) yakni menggunakan transek plot persegi ukuran 10 x 10 m. Terdapat tiga transek plot pada tiap stasiun. Ketiga plot disusun secara linier dan tegak lurus terhadap garis pantai ataupun ekoton mangrove. Pengambilan data parameter meliputi komposisi spesies, jumlah tegakan spesies dan *diameter at breast height* (DBH) yang diukur pada tiap individu. DBH diukur pada ketinggian 1,37 m dari tanah. Pengukuran diameter pada spesies berakar tunjang seperti *Rhizophora* spp., dilakukan 30 cm di atas akar tertinggi (Kauffman dan Donato, 2012).

**Tabel 1.** Titik koordinat lokasi penelitian.

| Stasiun  | Plot | Latitude         | Longitude        |
|----------|------|------------------|------------------|
| 1 (2005) | 1    | -6°47'11.065"S   | 109°2'18.2076"E  |
|          | 2    | -6°47'11.1948"S  | 109°2'18.5315"E  |
|          | 3    | -6°47'10.8564"S  | 109°2'18.76"E    |
| 2 (2008) | 1    | -6°47'12.685"S   | 109°2'17.959"E   |
|          | 2    | -6°47'12.2531"S  | 109°2'18.013"E   |
|          | 3    | -6°47'12.281"S   | 109°2'17.4552"E  |
| 3 (2011) | 1    | -6°47'11.73"S    | 109°2'15.3383"E  |
|          | 2    | -6°47'11.407"S   | 109°2'14.8703"E  |
|          | 3    | -6°47'11.076"S   | 109°2'14.96029"E |
| 4 (2014) | 1    | -6°46'34"S       | 109°3'14.774"E   |
|          | 2    | -6°46'34.201"S   | 109°3'14.48279"E |
|          | 3    | -6°46'34.24069"S | 109°3'14.076"E   |
| 5 (2017) | 1    | -6°46'22.5119"S  | 109°3'11.919"E   |
|          | 2    | -6°46'22.1735"S  | 109°3'13.22639"E |
|          | 3    | -6°46'22.169"S   | 109°3'13.219"E   |

Data lapangan kemudian dianalisis. Analisis pertama adalah analisis allometrik untuk menghitung *aboveground biomass* (AGB) dan *belowground biomass* (BGB) mangrove (Tabel 2 dan Tabel 3). Rumus allometrik yang digunakan adalah allometrik spesies-spesifik karena setiap spesies memiliki struktur dan densitas kayu yang berbeda-beda (Malik *et al.*, 2020). Rumus spesies-spesifik untuk AGB *R. mucronata* terbagi menjadi tiga kompartemen, yaitu daun, kayu dan akar tunjang di atas permukaan tanah (Kauffman & Cole, 2010; Nam *et al.*, 2016). Pembagian tersebut didasari oleh adanya perbedaan densitas kayu di tiap kompartemen mangrove genus *Rhizophora*, dimana densitas kayu pada akar tunjang dan cabang lebih kecil daripada batang sehingga berpengaruh pada biomassa (Van Vinh *et al.*, 2019). Apabila terdapat mangrove yang tidak memiliki rumus spesies-spesifik maka rumus allometrik umum digunakan (Komiya *et al.*, 2005; Wicaksono *et al.*, 2016). Rumus allometrik umum yang digunakan berasal dari Komiya *et al.* (2005) karena rumus tersebut dikembangkan menggunakan kondisi mangrove di Asia Tenggara sehingga merepresentasikan mangrove di Kaliwringi (Wicaksono *et al.*, 2016). Perhitungan dilakukan pada setiap tegakan pohon di seluruh plot (Kauffman dan Donato, 2012). Densitas kayu setiap spesies diperoleh dari basis data *International Centre for Research in Agroforestry* (ICRAF) <http://db.worldagroforestry.org/wd>.

Setelah nilai biomassa diketahui, selanjutnya dilakukan perhitungan stok karbon biru dengan mengonversi AGB dan BGB. Faktor konversi karbon yang digunakan adalah 46% untuk *aboveground carbon* (AGC) dan 39% untuk *belowground carbon* (BGC) (Howard *et al.*, 2014). Faktor konversi menunjukkan persentase karbon organik pada tiap tegakan mangrove (Hairiah & Rahayu, 2007). Perhitungan dilakukan dengan mengalikan nilai biomassa dengan faktor konversi karbon. Konversi nilai karbon dilakukan pada tiap tegakan mangrove di seluruh plot. Selanjutnya dilakukan penjumlahan nilai karbon untuk AGC maupun BGC. Nilai stok karbon diperoleh dalam satuan kilogram dikonversi menjadi satuan tonC/ha sesuai Standar Pengukuran dan Penghitungan

**Tabel 2.** Rumus allometrik spesies-spesifik.

| Spesies                       | Dmax (cm) | Rumus Allometrik Biomassa(kg)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                       | Sumber                      |
|-------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
|                               |           | AGB                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | BGB                   |                             |
| <i>Avicennia marina</i>       | 35        | $0,308(DBH)^{2,11}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $1.28(DBH)^{1,17}$    | (Comley & McGuinness, 2005) |
| <i>Avicennia alba</i>         | 35        | $0.079211(DBH)^{2,471}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | -                     | (Sutaryo, 2009)             |
| <i>Rhizophora mucronata</i> * | 39,5      | $V_{kayu} = 0,0000695(DBH)^{2,64}$<br>$AGB_{kayu} = V_{kayu} \times \rho \times 1000$<br>$AGB_{daun} = 10^{1,8571+2,1072 \times \log(DBH)}$<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• DBH ≤ 5 cm<br/> <math>AGB_{p.root} = AGB_{kayu} \times 0,101</math></li> <li>• DBH &gt; 5 ≤ 10 cm<br/> <math>AGB_{p.root} = AGB_{kayu} \times 0,204</math></li> <li>• DBH &gt; 10 ≤ 15 cm<br/> <math>AGB_{p.root} = AGB_{kayu} \times 0,356</math></li> <li>• DBH &gt; 15 ≤ 20 cm<br/> <math>AGB_{p.root} = AGB_{kayu} \times 0,273</math></li> <li>• DBH &gt; 20 cm<br/> <math>AGB_{p.root} = AGB_{kayu} \times 0,210</math></li> </ul> $TAGB = AGB_{kayu} + AGB_{daun} + AGB_{p.root}$ | $0,00698(DBH)^{2,61}$ | (Kauffman & Cole, 2010)     |

Keterangan: Dmax = DBH maksimal untuk perhitungan allometrik yang berkaitan (cm); DBH = *diameter at breast height* (cm) (\*untuk *Rhizophoraceae*, DBH diukur 30 cm di atas akar tunjang) (Wicaksono *et al.*, 2016);  $AGB_{p.root}$  = Biomassa akar tunjang (*prop root*) di atas permukaan tanah (kg)

**Tabel 3.** Rumus allometrik umum menurut Komiyama *et al.* (2005)

| Jenis Biomassa (kg) | Rumus Allometrik Umum                           | DMAX (cm) |
|---------------------|-------------------------------------------------|-----------|
| AGB                 | $0,251 \rho \times (\text{DBH})^{2,46}$         | 49        |
| BGB (akar)          | $0,199 \rho^{0,899} \times (\text{DBH})^{2,22}$ | 45        |

Keterangan:  $\rho$  = densitas kayu spesies mangrove ( $\text{kg/m}^3$ )

Cadangan Karbon Badan Standardisasi Nasional (SNI 7724:2011). Konversi nilai biomassa ke stok karbon (Howard *et al.*, 2014). Konversi stok karbon ke satuan tonC/ha menggunakan perhitungan menurut Lugina *et al.* (2011).

Pengolahan citra terdiri dari proses pra-pengolahan, *masking* citra, validasi, klasifikasi citra, transformasi citra dan pemodelan pada citra (Wicaksono, 2015). Tahap pra-pengolahan dilakukan menggunakan aplikasi ESA SNAP sedangkan seluruh tahap lainnya diproses dengan QGIS 3.16.2. Citra satelit yang digunakan adalah Sentinel-2 yang merupakan sensor pasif dan multispektral dengan 13 kanal (*band*) dan resolusi mencapai 10 m. Sentinel-2 dipilih karena lebih mudah didapatkan dibandingkan citra sensor aktif dan sebagai citra multispektral Sentinel-2 tergolong citra dengan resolusi tinggi dan terjangkau. Pemilihan citra Sentinel-2 didasari oleh adanya spektrum cahaya tampak, *near infrared* (NIR) dan *short wave infrared* (SWIR) dalam kanalnya yang menjadi kunci untuk interpretasi mangrove (Wicaksono, 2015). Citra Sentinel-2 diperoleh dari situs NASA Earth Observatory System <https://eos.com/landviewer/> dengan tanggal akuisisi pada 12 November 2020 dengan tutupan awan 29%.

Tahap pra-pengolahan terdiri dari koreksi geometrik, koreksi radiometrik, *resampling* dan *image subset* atau pemotongan citra mengadopsi metode Wicaksono (2017). Namun pada penelitian kali ini tidak dilakukan koreksi geometrik maupun radiometrik karena citra yang digunakan adalah citra Sentinel-2 level 2A yang sudah terkoreksi radiometrik maupun geometrik dan telah dalam keadaan BOA (*bottom of reflectance*) sehingga telah merepresentasikan hasil pantulan aktual dari permukaan bumi (European Space Agency, 2015). *Resampling* dilakukan guna menyamakan resolusi tiap *band* pada citra Sentinel-2 karena terdapat beberapa *band* yang memiliki resolusi spasial berbeda (10 m, 20 m, 60 m), sehingga resolusi seluruh *band* disamakan menjadi 10 m (Pratama *et al.*, 2019). Algoritma *resampling* yang digunakan adalah *Nearest Neighbor* karena merupakan algoritma terbaik untuk mengklasifikasi penggunaan lahan, selain itu nilai piksel yang dikalkulasi juga stabil dari citra masukan ke citra keluaran (Baboo dan Devi, 2010). *Image subset* atau *cropping* citra adalah tahap terakhir dalam pra-pengolahan citra. Citra Sentinel-2 mencakup luas area 290  $\text{km}^2$ , oleh karena itu *image subset* diperlukan untuk memotong area yang diperlukan saja dalam penelitian ini.

Interpretasi vegetasi mangrove pada citra Sentinel-2 dilakukan dengan penyusunan *false color composite* yang melibatkan *band* 4,8,11 (*Red*, *Near Infrared* (NIR), *Short-Wave Infrared* (SWIR)) (Jia *et al.*, 2019). Selanjutnya dilakukan klasifikasi citra menggunakan metode klasifikasi terbimbing (*supervised*) dengan algoritma *Minimum Distance Classifier* (Badan Informasi Geospasial, 2014; LAPAN, 2015). Selanjutnya dilakukan validasi citra menggunakan metode *confusion matrix*. Terdapat 100 titik validasi pada data terklasifikasi yang dicocokkan dengan citra Google Earth sebagai data referensi (Bournazel *et al.*, 2015). Menurut Humboldt State University (2019), terdapat tiga perhitungan uji akurasi pada *confusion matrix*, yaitu *overall accuracy* (seluruh piksel yang terklasifikasi dengan tepat), *producer's accuracy* (keakuratan klasifikasi berdasarkan sudut pandang pembuat peta) dan *user's accuracy* (keakuratan klasifikasi berdasarkan sudut pandang pengguna peta). Perhitungan kesalahan atau *error* terdapat dua macam, yaitu *omission error* (*false negative*) dan *commission error* (*false positive*). *Omission error* menunjukkan area yang seharusnya diklasifikasikan dalam kelas tertentu tetapi tidak dimasukkan, sedangkan *comission Error* menunjukkan area yang tidak seharusnya diklasifikasikan dalam kelas tertentu tetapi justru dimasukkan. Citra dianggap akurat apabila nilai *overall accuracy* mencapai  $\geq 70\%$  (Badan Informasi Geospasial, 2014).

**Tabel 4.** Kategori nilai NDVI menurut (Weier & Herring, 2000).

| Nilai NDVI | Kategori      | Objek                         |
|------------|---------------|-------------------------------|
| < 0,1      | Sangat rendah | Pasir, batu, salju, air       |
| 0,2 – 0,3  | Sedang        | Semak-semak                   |
| 0,6 – 0,8  | Tinggi        | Hutan hujan tropis, pepohonan |

**Tabel 5.** Kategori kerapatan mangrove berdasarkan nilai NDVI (Umroh *et al.*, 2016).

| Nilai NDVI  | Kategori | Kerapatan (ind/ha) |
|-------------|----------|--------------------|
| -1 – 0,33   | Jarang   | < 1000             |
| 0,33 – 0,42 | Sedang   | 1000 – <1500       |
| 0,42 – 1    | Rapat    | ≥ 1500             |

Transformasi indeks vegetasi pada citra dilakukan untuk mendapatkan nilai indeks vegetasi dari tiap piksel guna dilakukan persamaan regresi dengan nilai stok karbon mangrove (Frananda *et al.*, 2015). Indeks vegetasi yang digunakan adalah NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Tabel 4 dan 5). NDVI dipilih karena merupakan indeks vegetasi sederhana yang lazim digunakan (Wicaksono *et al.*, 2016), peka terhadap klorofil dan mengindikasikan radiasi fotosintesis aktif (Pandey *et al.*, 2019). Cara kerja NDVI adalah dengan mengobservasi gelombang NIR terbaik yang dipantulkan oleh klorofil daun maupun gelombang merah yang diabsorpsi oleh tumbuhan. Nilai NDVI berkisar antara -1 s.d. +1 yang merepresentasikan kesehatan dan kerapatan mangrove (Akbar *et al.*, 2020). Persamaan NDVI (Wicaksono *et al.*, 2016).

Pemodelan stok karbon mangrove pada citra dilakukan menggunakan regresi linier mengacu pada Wicaksono *et al.* (2016). Regresi linier ( $y = a + bx$ ) melibatkan nilai stok karbon mangrove ( $y$ ) dari data lapangan sebagai variabel dependen dengan nilai NDVI ( $x$ ) sebagai variabel independen (Pandey *et al.*, 2019). Fungsi analisis regresi adalah untuk mengetahui hubungan sebab akibat antara dua variabel, yakni stok karbon mangrove dan nilai indeks vegetasi. Analisis regresi pada penelitian ini akan menghasilkan persamaan untuk membandingkan data stok karbon dari hasil pengolahan data lapangan dengan hasil pada transformasi indeks vegetasi (Frananda *et al.*, 2015). Persamaan regresi yang telah didapatkan kemudian diaplikasikan pada citra Sentinel-2 menggunakan *raster calculator tool* pada perangkat lunak QGIS sehingga dapat mengestimasi stok karbon mangrove secara keseluruhan. Akurasi dari estimasi stok karbon mangrove pada citra diuji menggunakan metode *standard error of estimate* (SE) (Wicaksono *et al.*, 2016). Uji akurasi diperlukan untuk mengetahui perbandingan antara nilai stok karbon hasil perhitungan aktual dengan hasil dugaan menggunakan analisis regresi (Frananda *et al.*, 2015). Rumus uji akurasi SE mengacu Frananda *et al.* (2015).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

IKAMaT (2020) melaporkan terdapat tiga spesies yang ditemukan pada lokasi penelitian, yaitu *Rhizophora mucronata*, *Avicennia marina* dan *Avicennia alba*. Spesies *R. mucronata* ditemukan di seluruh stasiun, sementara *A. marina* ditemukan di lahan mangrove 2005, 2014 dan 2017, sedangkan *A. alba* hanya ditemukan di lahan mangrove 2011. Penelitian Nugraha *et al.* (2020) di Desa Kaliwlingi menemukan *R. mucronata*, *A. marina* dan *Sonneratia alba*. Perbedaan spesies yang ditemukan ini dapat disebabkan oleh perbedaan lokasi pengambilan data dan kompleksitas spesies yang tersebar di kawasan hutan mangrove karena cakupan hutan mangrove di Desa Kaliwlingi yang cukup luas. Selain itu, salah satu faktor penting dalam perbedaan pertumbuhan spesies pada suatu kawasan hutan mangrove adalah jenis substrat. Noor *et al.* (2006) menyatakan spesies *R. mucronata* biasanya hidup pada substrat lumpur maupun lumpur berpasir, sedangkan *S. alba* hidup pada substrat lumpur berpasir dengan pecahan karang. *S. alba* kemungkinan ditemukan pada zona

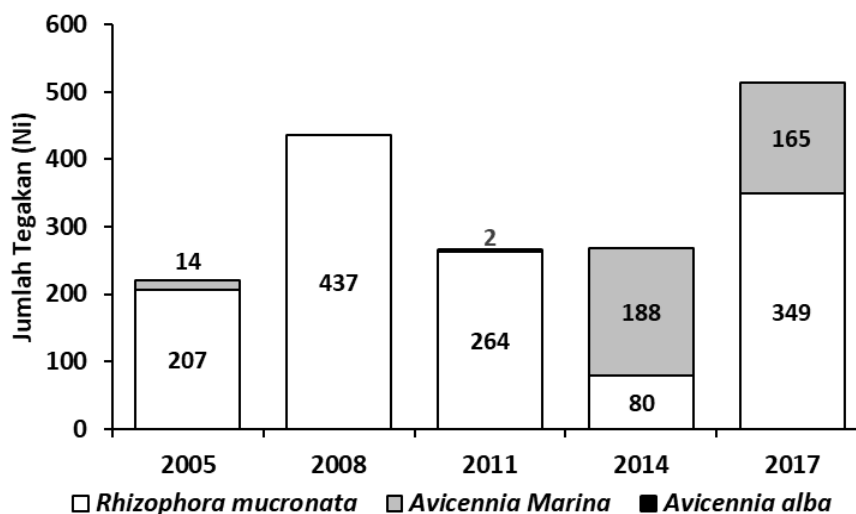
terdepan (*seaward zone*) yang merupakan habitatnya (Waycott *et al.*, 2011) dan tidak termasuk dalam jangkauan lokasi penelitian ini. *R. mucronata* hampir mendominasi seluruh lahan mangrove kecuali lahan mangrove 2014 yang didominasi oleh *A.marina*. Spesies *R. mucronata* dapat mendominasi karena bibit yang ditanam pada awal rehabilitasi hanya terdiri dari *R.mucronata* sebanyak ±2000 semai per ha (Suyono *et al.*, 2015).

Lahan mangrove 2005 – 2017 memiliki jumlah tegakan yang variatif dengan total pohon 1.706 tegakan. Lahan mangrove 2005 memiliki tegakan mangrove paling sedikit (221 pohon), sedangkan lahan mangrove 2017 memiliki tegakan yang paling banyak (514 pohon). Letak lahan mangrove 2005 yang berhadapan langsung dengan lepas pantai diduga menjadi faktor rendahnya jumlah tegakan pohon karena mangrove lebih sering terendam air laut ditambah dengan dampak kenaikan muka air laut sehingga mangrove lebih rentan terhadap kematian dan populasinya tidak dapat berekspansi di area tersebut (Ward *et al.*, 2016). Lahan mangrove 2017 memiliki tegakan mangrove yang paling banyak diduga karena letaknya di sepanjang estuari yang mana tidak terkena dampak kenaikan muka air laut secara langsung yang dapat meningkatkan kerentanan mangrove. Spesies terbanyak yang ditemukan adalah *Rhizophora mucronata* yang mendominasi hampir seluruh lahan mangrove kecuali lahan mangrove 2014 yang didominasi oleh *Avicennia marina*. Spesies *R. mucronata* memiliki jumlah tegakan terbanyak karena bibit yang ditanam pada awal rehabilitasi semuanya terdiri dari spesies *Rhizophora mucronata* dengan jumlah bibit yang ditanam ± 2000 semai per ha (Suyono *et al.*, 2015).

Rata-rata diameter (DBH) mangrove pada penelitian ini berkisar antara 3,78–5,22 cm. Tren menunjukkan tidak terdapat peningkatan DBH seiring dengan semakin tua lahan mangrove. Hasil ini lebih rendah dibandingkan penelitian Nugraha *et al.* (2020) di Desa Kaliwingsi yang rata-rata diameter mangrove-nya adalah 4,92–8,43 cm. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh lokasi stasiun pengambilan data yang berbeda, sehingga faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya diameter pun

**Tabel 6.** Komposisi spesies mangrove pada tiap stasiun penelitian (IKAMaT, 2020).

| Spesies                     | Nama Lokal | Stasiun (Tahun Tanam) |      |      |      |      |
|-----------------------------|------------|-----------------------|------|------|------|------|
|                             |            | 2005                  | 2008 | 2011 | 2014 | 2017 |
| <i>Avicennia alba</i>       | Api - Api  | -                     | -    | +    | -    | -    |
| <i>Avicennia marina</i>     | Api - Api  | +                     | -    | -    | +    | +    |
| <i>Rhizophora mucronata</i> | Bakau      | +                     | +    | +    | +    | +    |
| Total spesies               |            | 2                     | 1    | 2    | 2    | 2    |

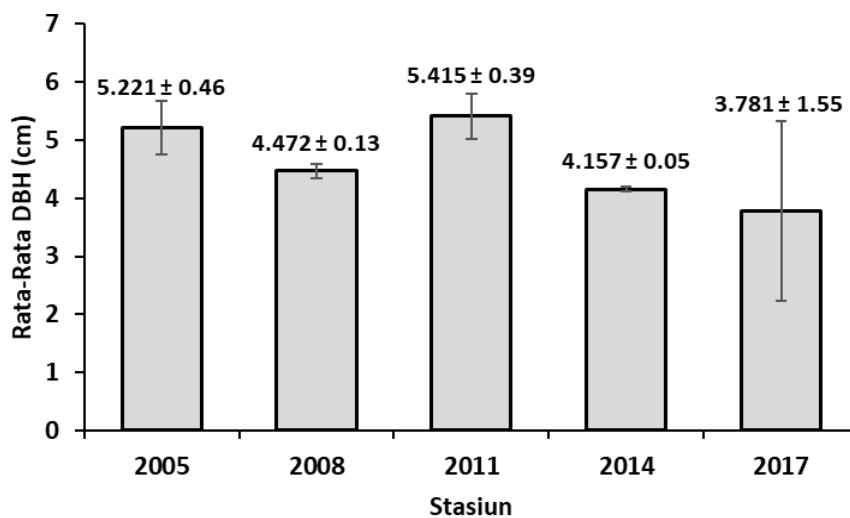


**Gambar 1.** Jumlah tegakan mangrove (Ni) berdasarkan spesies di tiap stasiun



berbeda. Umur lahan mangrove di penelitian Nugraha *et al.* (2020) tidak diketahui sehingga perbedaan diameter tidak dapat dibandingkan berdasarkan umur. Dugaan sementara diameter pohon di penelitian ini lebih kecil karena pengaruh perbedaan pH dan salinitas. Penelitian Nugraha *et al.* (2020) menunjukkan rata-rata pH antara 7,64-8,41 dimana mendekati netral, selain itu, salinitas berkisar antara 5,94-32,20 ppt. Sementara, kisaran pH di penelitian ini yakni 5,97–6,23 yang cenderung asam dan salinitas berkisar 17,7–38,7 ppt. Menurut Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor: 51 Tahun 2004 tentang baku mutu air laut untuk biota laut, baku mutu pH untuk mangrove adalah 7–8,5 sedangkan untuk salinitas  $\leq 34$  ppt. Oleh karena itu mangrove pada penelitian Nugraha *et al.* (2020) diduga tumbuh secara optimal sehingga diameter pohon pun lebih besar dibandingkan penelitian ini. Rata-rata suhu di tiap stasiun berkisar antara 28,67°C – 29,67°C. Suhu tersebut normal untuk habitat mangrove dan sesuai dengan batu muku suhu untuk mangrove dalam KEPMEN Lingkungan Hidup Nomor: 51 Tahun 2004.

Biomassa mangrove di Desa Kaliwlingi menunjukkan tren meningkat seiring dengan semakin muda lahan mangrove, meskipun pada lahan mangrove 2017 jumlah biomassa menurun. Lahan mangrove 2005 memiliki biomassa total terendah sebesar 178,37 ton/ha dengan rata-rata diameter 5,22 cm, sedangkan total biomassa tertinggi ada pada lahan mangrove 2014 sebesar 407,53 ton/ha dengan rata-rata diameter pohon 4,16 cm. Hasil tersebut berbeda dengan penelitian Nugraha *et al.* (2020) di Desa Kaliwlingi Brebes dimana biomassa terendah adalah 3,16 ton/ha dengan kisaran diameter pohon 4,3 – 5,37 cm, sedangkan biomassa tertinggi sebesar 13,82 ton/ha dengan kisaran diameter pohon 4,9 – 8,29. Dilihat dari ukuran diameter, biomassa terendah pada penelitian ini memiliki rata-rata diameter yang hampir sama dengan penelitian sebelumnya, namun pada lahan mangrove dengan nilai biomassa tertinggi justru rata-rata diameter pohonnya lebih kecil. Perbedaan nilai biomassa yang cukup signifikan ini diduga dipengaruhi oleh perbedaan metode, cakupan



**Gambar 2.** Rata-rata *diameter at breast height* (DBH) di tiap stasiun

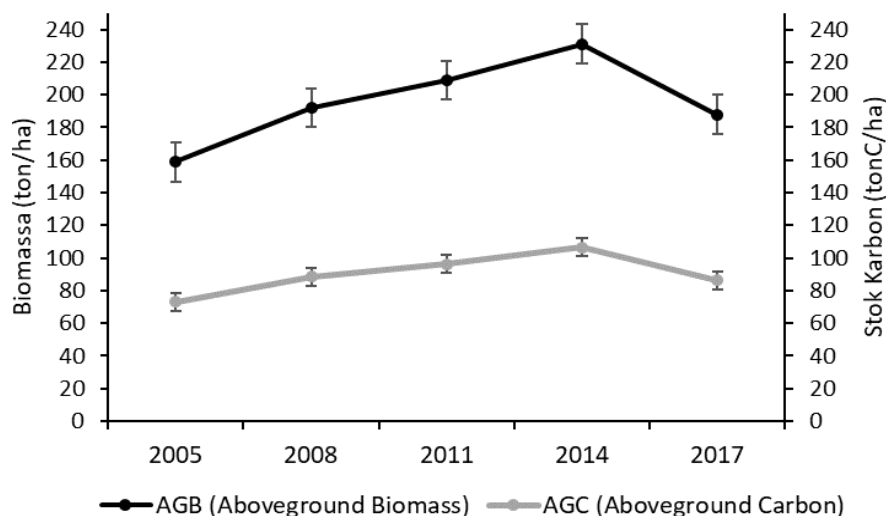
**Tabel 7.** Parameter lingkungan di tiap stasiun (IKAMaT, 2020)

| Parameter Lingkungan | 2005 | 2008 | 2011 | 2014 | 2017 |
|----------------------|------|------|------|------|------|
| pH                   | 5,9  | 5,9  | 6,1  | 6,2  | 6,2  |
| Suhu (°C)            | 29,7 | 28,7 | 29,1 | 29,7 | 28,8 |
| Salinitas (ppt)      | 38,7 | 30   | 24,7 | 24   | 17,7 |

mangrove yang diperhitungkan dan jumlah tegakan pohon. Penelitian Nugraha *et al.* (2020) menghitung nilai biomassa berdasarkan tingkat kerapatan mangrove, mulai dari rendah (17 tegakan), sedang, hingga tinggi (83 tegakan), sedangkan teknik perhitungan pada penelitian ini tidak dibatasi oleh tingkat kerapatan mangrove.

Total biomassa terkecil (178,38 ton/ha) ada di lahan mangrove 2005 meski umur mangrove lebih tua dibandingkan empat lokasi lainnya. Hasil ini berbeda dengan penelitian Ren *et al.* (2010) dimana pada lahan mangrove *Sonneratia apetala* umur 4, 5, 8 dan 10 tahun, nilai total biomassa secara berturut-turut 47,9 ton/ha, 71,7 ton/ha 95,9 ton/ha dan 108,1 ton/ha, sehingga nilai biomassa meningkat seiring dengan semakin tua lahan mangrove. Perbedaan ini diduga disebabkan oleh perbedaan spesies dan laju pertumbuhan mangrove yang dipengaruhi oleh kondisi iklim, musim, zona hidrogeomorfik dan manajemen rehabilitasi pada saat awal penanaman (Krauss *et al.*, 2007; Ren *et al.*, 2010). Rendahnya biomassa total di lahan mangrove 2005 disebabkan oleh jumlah individu yang paling sedikit daripada stasiun lainnya, yaitu hanya 221 pohon. Menurut Istomo *et al.* (2017), jumlah, kerapatan individu, basal area dan volume individu mangrove berbanding lurus dengan jumlah biomassa. Di sisi lain, lahan mangrove 2014 memiliki total biomassa, AGB dan BGB tertinggi meskipun lahan mangrove masih muda. Hal ini karena lahan mangrove 2014 terletak di bagian dalam estuari dan elevasi lebih tinggi, sedangkan lahan mangrove 2005 letaknya berhadapan langsung dengan laut. Kondisi tersebut sesuai dengan temuan Komiyama *et al.* (2008), bahwa nilai AGB cenderung lebih tinggi pada *inland mangrove* dibandingkan nilai AGB di area mangrove dekat laut.

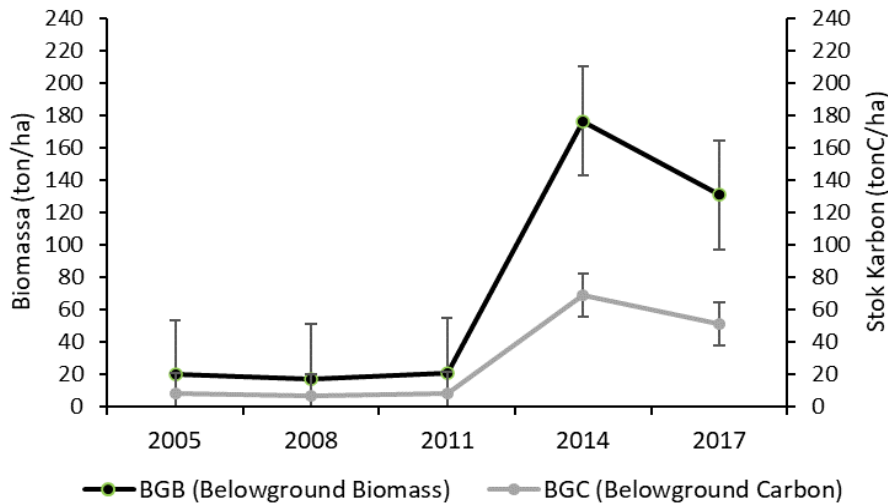
Komposisi spesies juga menjadi penyebab besarnya nilai biomassa di lahan mangrove 2014. Komiyama *et al.* (2008) menyatakan nilai biomassa mangrove salah satunya dipengaruhi oleh faktor spesies dominan. Komposisi spesies di lahan mangrove 2014 terdiri dari *Rhizophora mucronata* dan *Avicennia marina*, namun jumlah *A. marina* jauh lebih banyak daripada *R. mucronata*, yakni 86,94% dari keseluruhan tegakan. Alhasil, biomassa *A. marina* juga cenderung lebih tinggi dibandingkan *R. mucronata*. Hal ini didukung oleh penelitian Kathiresan *et al.* (2013), yang membuktikan bahwa *A. marina* mempunyai 77% biomassa total yang lebih besar daripada *R. mucronata*. Penelitian tersebut pun menyebutkan, nilai biomassa atas tanah (AGB) *A. marina* dua kali lipat lebih besar dan biomassa bawah tanah 40% lebih besar dari *R. mucronata*. Hal ini dipengaruhi oleh ukuran keliling batang *A. marina* yang 2,7 kali lebih besar, net fotosintesis kanopi 24% lebih tinggi dan efisiensi pertumbuhan *A. marina* yang 43% lebih tinggi dari *R. mucronata* (Kathiresan *et al.*, 2013). Nilai biomassa bawah tanah (BGB) cenderung sangat rendah pada lahan mangrove 2005, 2008 dan 2011 dengan nilai 19,50; 17,20 dan 20,77 ton/ha dibandingkan pada lahan mangrove 2014 dan 2017.



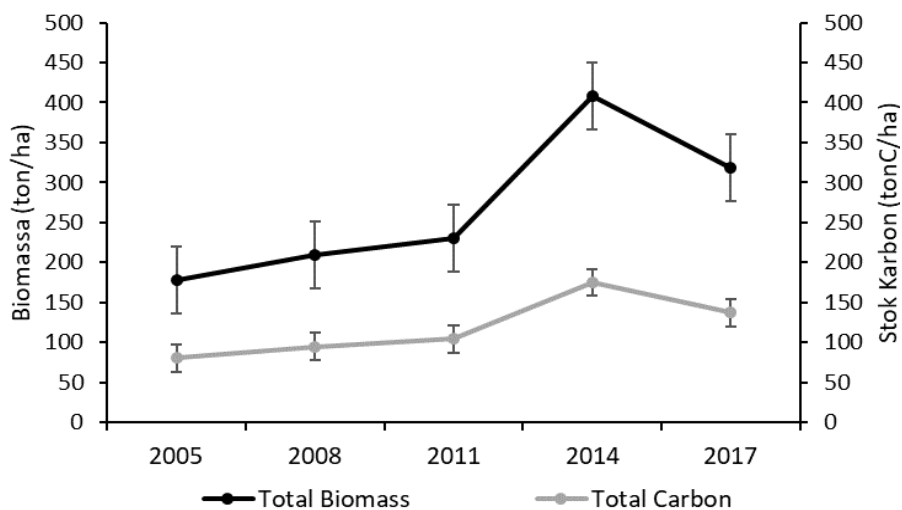
**Gambar 3.** Biomassa dan stok karbon mangrove atas tanah (*aboveground*) di tiap stasiun.

Rendahnya nilai BGB ini diduga disebabkan oleh komposisi spesies mangrove, dimana pada ketiga stasiun tersebut spesies yang dominan adalah *R. mucronata*. Tamooh *et al.* (2008) menyatakan akar medium dan akar halus dari *R. mucronata* hanya menyumbang 24% total BGB dibandingkan milik *A. marina* dan *S. alba* yang menyumbang 45% dari total BGB. Hal ini disebabkan oleh perbedaan produktivitas dan laju dekomposisi antar ukuran akar yang berbeda pada tiap spesies dan lokasi (Adame *et al.*, 2017).

Nilai stok karbon mangrove di Desa Kaliwlingi memiliki tren yang sama dengan nilai biomass mangrove, dimana stok karbon total, AGC dan BGC cenderung meningkat seiring dengan semakin muda lahan mangrove. Hal ini karena nilai stok karbon merupakan 46% dari nilai biomassa pohon (Howard *et al.*, 2014). Total stok karbon biomassa di tiap stasiun berkisar antara 80,69–175,13 tonC/ha, dengan rata-rata 118,48 tonC/ha. Rata-rata nilai stok karbon tersebut melampaui nilai rata-rata stok karbon mangrove global di daerah tropis (garis lintang: 0–10°) sebesar 103,7 tonC/ha maupun rata-rata stok karbon global, yakni 78,0 tonC/ha (Estrada dan Soares, 2017). Penelitian Nugraha *et al.*, (2020) di Desa Kaliwlingi Brebes memperoleh nilai rata-rata karbon biomassa yang jauh lebih rendah pada kerapatan jarang, sedang dan rapat secara berturut-turut 1,48 tonC/ha, 5,35 tonC/ha



**Gambar 4.** Biomassa dan stok karbon mangrove bawah tanah (*belowground*) di tiap stasiun



**Gambar 5.** Total biomassa dan stok karbon mangrove di tiap stasiun

dan 6,49 tonC/ha. Perbedaan ini diduga disebabkan oleh jumlah tegakan mangrove yang diperhitungkan pada penelitian sebelumnya lebih sedikit (83 tegakan) dibandingkan jumlah tegakan mangrove pada penelitian ini (1.706 tegakan).

Stok karbon mengalami peningkatan drastis pada lahan mangrove 2014 yang sekaligus menjadi nilai stok karbon tertinggi, yaitu 175,128 tonC/ha. Tingginya nilai stok karbon total di lahan mangrove 2014 ini dipengaruhi langsung oleh nilai AGC dan BGC tertinggi di stasiun yang sama, yakni sebesar 106,389 tonC/ha dan 68,739 tonC/ha. Sama halnya dengan biomassa, peningkatan stok karbon ini diduga disebabkan oleh komposisi spesies pada lahan mangrove 2014 yang didominasi oleh *A. marina*, yang memiliki stok karbon 77% lebih besar dibandingkan *R. mucronata* (Kathiresan *et al.*, 2013). *A. marina* berperan besar dalam akumulasi stok karbon di Desa Kaliwlingi dibandingkan *R. mucronata*, hal ini juga terjadi pada penelitian Camacho *et al.* (2011). Besarnya stok karbon pada *A. marina* berkaitan dengan perbandingan morfologi akar *A. marina* dan *R. mucronata*. *A. marina* memiliki tipe perakaran akar pensil dengan akar halus (*fine roots*) yang lebih banyak. Karakteristik perakaran tersebut menjadikan produktivitas *A. marina* lebih tinggi ditambah dengan lingkungan yang anoksik dan laju dekomposisi yang rendah berperan sangat signifikan dalam sekuestrasi karbon. Selain itu, *A. marina* juga memiliki sistem perakaran utama (*cable root*) di bawah tanah yang sangat ekstensif dan rumit maupun pneumatofor sehingga sekuestrasi karbon lebih maksimal. Berbeda dengan akar tunjang *R. mucronata* yang cenderung lebih banyak menopang di atas tanah dan strukturnya menyerupai spons (*spongy*), lebih lunak serta persebaran akar yang tidak seluas *A. marina* (Tamooh *et al.*, 2008). Penelitian-penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa *R. mucronata* memiliki biomassa dan stok karbon yang lebih rendah dibandingkan spesies mayor lainnya seperti *A. marina* dan *S. alba* (Eid *et al.*, 2020; Kathiresan *et al.*, 2013; Tamooh *et al.*, 2008).

Kecenderungan stok karbon mangrove yang tidak meningkat seiring dengan semakin tua lahan mangrove juga ditemukan pada penelitian Camacho *et al.* (2011), dimana nilai stok karbon lebih tinggi pada lahan mangrove umur 15 tahun (208,5 tonC/ha) dibandingkan lahan mangrove umur 20 tahun (145,9 tonC/ha). Pada penelitian tersebut, faktor yang berpengaruh pada nilai stok karbon adalah jumlah tegakan. Menurut Walcker *et al.* (2018), perubahan stok karbon mangrove secara kronologis (*Chronosequence*) selama 66 tahun justru semakin menurun setelah beberapa tahun pertama. Hal ini disebabkan oleh berhentinya pertumbuhan diameter seiring dengan pohon yang semakin dewasa dan penurunan biomassa dari tahun ke tahun. Penelitian tersebut juga menyatakan, pada umumnya hutan mangrove pada fase pertumbuhan menyerap CO<sub>2</sub> lebih banyak dibandingkan hutan yang sudah tua. Hingga saat ini, estimasi stok karbon berdasarkan umur belum ada hasil yang konsisten. Rumus allometrik sebagai basis estimasi tidak sepenuhnya dapat menyesuaikan kondisi lokasi penelitian seperti kondisi geomorfik dan variasi parameter lingkungan yang sulit untuk diobservasi (Walcker *et al.*, 2018).

Nilai AGC pada penelitian ini selalu lebih tinggi dibandingkan nilai BGC. Secara umum, karbon organik yang tersimpan pada bagian pohon lebih tinggi dibandingkan karbon yang tersimpan pada akar (Howard *et al.*, 2014). Karbon yang terkandung pada akar mangrove berkisar antara 36% – 42% dengan median 39% sebagai faktor konversi karbon bawah tanah (Jaramillo *et al.*, 2003). Sementara itu, persentase karbon atas tanah yang tersimpan di bagian pohon berbagai spesies mangrove rata-rata mendekati 46% yang mana lebih tinggi dari persentase karbon bawah tanah (Kauffman *et al.*, 2011). Hal ini juga didukung oleh pernyataan Donato *et al.* (2011) bahwa stok karbon atas tanah berkontribusi di kawasan laut dan estuari Indo-Pasifik lebih besar pada stok karbon mangrove secara keseluruhan dibandingkan stok karbon bawah tanah.

Hasil validasi citra dengan *confusion matrix* memperoleh nilai *overall accuracy* tinggi, yaitu 92,4% dan telah melampaui batas ketentuan akurasi yang ditetapkan oleh Badan Informasi Geospasial (2014), yaitu  $\geq 70\%$ . Maka dari itu citra Sentinel-2 dapat digunakan lebih lanjut untuk penelitian stok karbon mangrove. Nilai *overall accuracy* yang diperoleh lebih tinggi dibandingkan *overall accuracy* di kawasan hutan mangrove Teluk Youtefa, Jayapura menggunakan citra Landsat, yaitu sebesar 85,45% (Hamuna *et al.*, 2018). Hasil *user accuracy* pada penelitian ini cukup tinggi, hanya pada kelas objek mangrove yang hanya memperoleh *user accuracy* cukup rendah, yakni 44%. *User Accuracy* yang rendah ini disebabkan oleh 25 titik validasi pada citra Sentinel-2 yang

semula diklasifikasikan sebagai mangrove, justru hanya 11 titik yang sesuai dan terklasifikasi sebagai mangrove (*true positive*). Hasil *producer accuracy* menunjukkan bahwa seluruh kelas objek memperoleh nilai di atas 70%. Nilai *producer accuracy* paling rendah diperoleh kelas objek Lahan Terbuka / Tanah yang disebabkan oleh jumlah data referensi yang tidak diklasifikasikan sebagai Lahan Terbuka/Tanah pada citra (*omission error*).

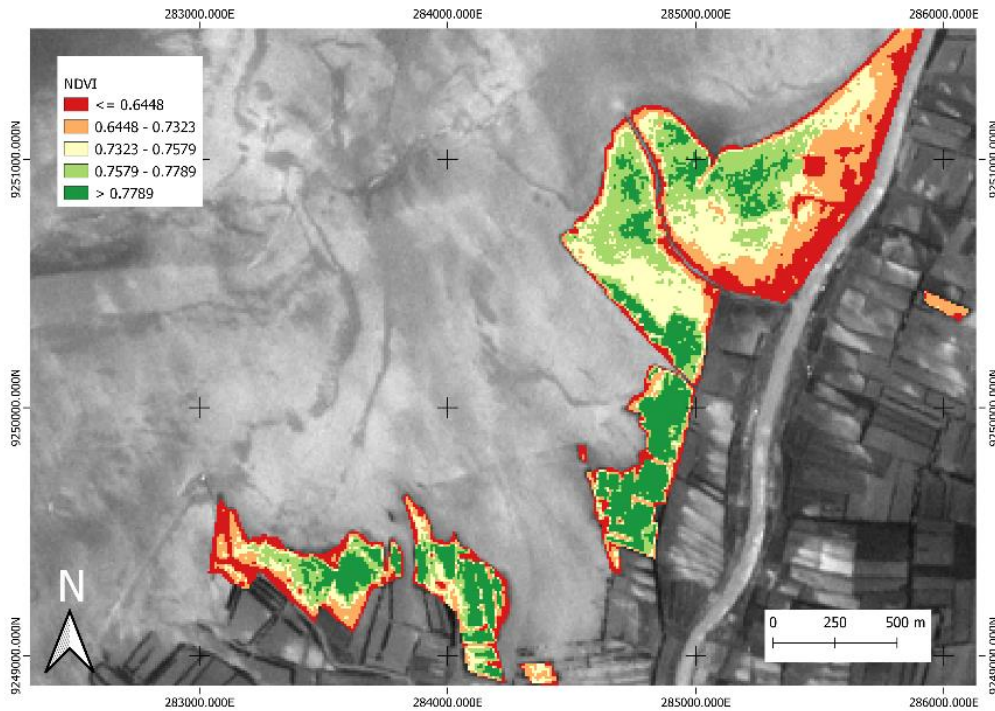
Hasil transformasi pada citra Sentinel-2 di Desa Kaliwlingi menunjukkan nilai NDVI dari tiap stasiun berkisar antara 0,65–0,79. Nilai NDVI tersebut termasuk dalam kategori tinggi karena berada dalam kisaran 0,6–0,8 (Weier dan Herring, 2000). Berdasarkan kriteria nilai NDVI oleh (Umroh *et al.*, 2016), kerapatan mangrove di lahan mangrove rehabilitasi Desa Kaliwlingi termasuk dalam kategori rapat dengan tingkat kerapatan pohon  $\geq 1500$  ind/ha karena nilai NDVI yang diperoleh termasuk dalam kisaran 0,42–1. Rizki *et al.* (2017) menyatakan, umumnya nilai NDVI mangrove berkisar antara +0,1–+0,7 dan nilai NDVI di atas +0,7 menunjukkan kesehatan mangrove yang sangat baik. Hasil NDVI tidak jauh berbeda dengan nilai NDVI di hutan mangrove Tahura Ngurah Rai, Bali menggunakan citra Sentinel-2 yang berkisar antara 0,5–0,905 (Pratama *et al.*, 2019). Tingginya nilai NDVI yang diperoleh menunjukkan adanya kerapatan pohon yang tinggi, dimana nilai NDVI mendekati 1 berarti kerapatan pohon semakin tinggi (Latuamury & Resesi, 2012). Kerapatan mangrove yang tinggi memiliki tutupan kanopi yang tinggi pula sehingga gelombang cahaya tampak (merah) terserap maksimal dan gelombang inframerah dekat (NIR) dipantulkan secara maksimal oleh struktur daun, maka nilai NDVI yang dihasilkan juga akan semakin tinggi (Pratama *et al.*, 2019).

Terdapat tiga parameter yang dapat dicocokkan dengan nilai NDVI pada penelitian ini, yaitu persentase tutupan kanopi, kerapatan mangrove dan nilai biomassa mangrove, namun ketiga parameter tersebut tidak menunjukkan kesebandingan dengan nilai NDVI. Sebagai contoh, rata-rata nilai NDVI pada lahan mangrove 2017 adalah yang tertinggi (0,78) dan sesuai dengan persentase kanopi mangrove yang juga tertinggi ( $87,91 \pm 0,87\%$ ), namun pada lahan mangrove 2011 yang rata-rata nilai NDVI-nya terendah (0,68), justru persentase kanopinya bukan yang terendah ( $83,29 \pm 0,62\%$ ) melainkan lahan mangrove 2008 ( $80,82 \pm 0,96$ ). Biomassa tertinggi ada pada lahan mangrove 2014 dan kerapatan pohon tertinggi berada di lahan mangrove 2011. Keduanya tidak sesuai dengan nilai NDVI tertinggi yang berada di lahan mangrove 2017. Penelitian Kresnabayu *et al.*, (2018) menemukan bahwa nilai NDVI dengan nilai kerapatan mangrove berbanding lurus, sementara penelitian Mayuftia *et al.* (2013) menemukan nilai NDVI dengan nilai biomassa mangrove maupun persentase tutupan kanopi berbanding lurus, namun tidak ada hubungan signifikan antara nilai NDVI dengan nilai kerapatan mangrove.

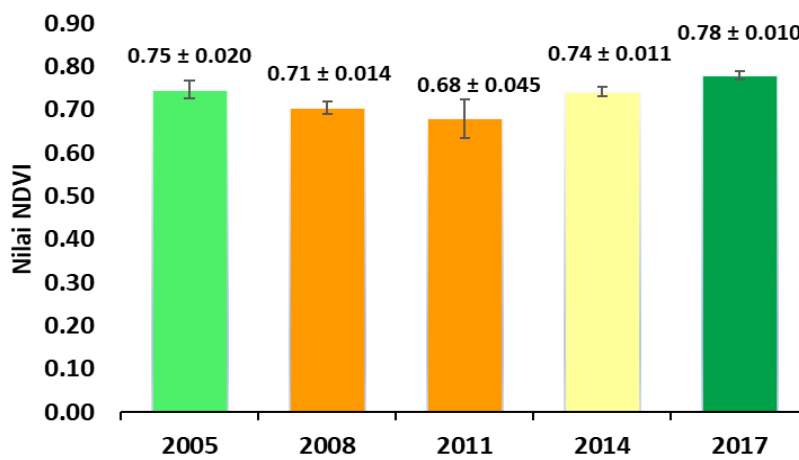
Ketidak-linieran antara nilai NDVI dengan parameter mangrove pada penelitian ini diduga disebabkan oleh resolusi citra Sentinel-2 (10 m) yang belum mampu memetakan kompleksitas mangrove secara detail terutama pada bagian *fringe mangrove*. Hal tersebut menyebabkan beberapa piksel menggabungkan mangrove dengan perairan ataupun daratan sehingga hasil nilai NDVI tidak sejalan dengan perhitungan data insitu (kerapatan mangrove, persentase kanopi maupun biomassa).

**Tabel 8.** Hasil uji validasi klasifikasi citra menggunakan *confusion matrix*

|                              |             | Data Referensi                |                                 |                 |                                       | Total Baris | User Accuracy(%) |
|------------------------------|-------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------|------------------|
|                              |             | 1<br>(Laut /<br>Badan<br>Air) | 2<br>(Sungai<br>/ Air<br>Tawar) | 3<br>(Mangrove) | 4<br>(Lahan<br>Terbuka<br>/<br>Tanah) |             |                  |
| Data<br>Klasifikasi          | 1           | 296                           | 7                               | 0               | 2                                     | 305         | 97               |
|                              | 2           | 0                             | 42                              | 0               | 3                                     | 45          | 93               |
|                              | 3           | 10                            | 3                               | 11              | 1                                     | 25          | 44               |
|                              | 4           | 0                             | 2                               | 2               | 17                                    | 21          | 80,9             |
|                              | Total Kolom | 306                           | 54                              | 13              | 23                                    | 396         |                  |
| <i>Producer Accuracy (%)</i> |             | 96,7                          | 77,8                            | 84,6            | 73,9                                  |             | 92,4             |



**Gambar 6.** Transformasi NDVI pada citra hutan mangrove Desa Kaliwlingi



**Gambar 7.** Rata-rata nilai NDVI di tiap stasiun (Warna *bar* menunjukkan warna piksel pada citra hasil transformasi).

Hal ini didukung oleh penelitian Wang *et al.* (2018) yang menunjukkan performa Sentinel-2 kurang maksimal untuk memetakan detail mangrove terutama di bagian *fringe mangrove*. Citra Sentinel-2 sering mengalami *over-classification* dimana pantulan spektrum mangrove, tanah, air dan uap atmosfer tercampur dalam satu piksel (Heenkenda *et al.*, 2014).

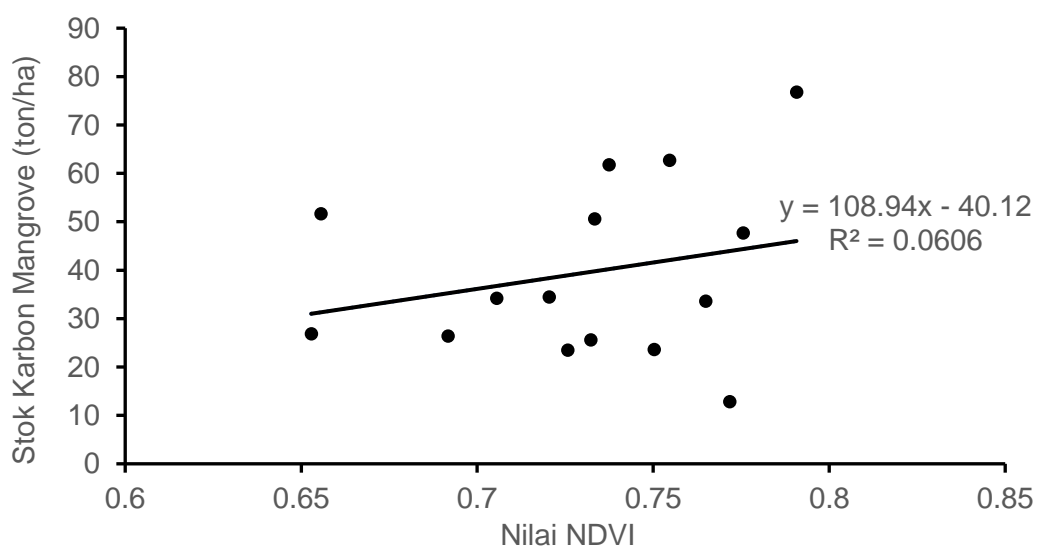
Analisis regresi antara stok karbon mangrove dengan nilai NDVI menunjukkan hubungan yang sangat lemah dengan koefisien determinasi  $R^2$  sebesar 0,06. Nilai  $R^2$  yang didapatkan jauh lebih rendah dibandingkan penelitian Muhsoni *et al.* (2018) di Pamekasan, yakni sebesar 0,869 dari analisis regresi non-linier NDVI dan stok karbon menggunakan citra Sentinel-2. Sementara itu, penelitian (Wicaksono *et al.*, 2011) mendapatkan  $R^2$  yang rendah pula baik untuk  $R^2$  tertinggi maupun terendah yang didapatkan, yaitu 0,34 dan 0,19. Hal ini juga ditemui pada penelitian Siddiq

*et al.* (2020), dimana nilai  $R^2$  hanya sebesar 0,21 untuk regresi linier, 0,19 untuk regresi eksponensial dan 0,20 untuk regresi logaritmik serta nilai *slope* (b) yang negatif atau hubungan berbanding terbalik. Berbeda dengan penelitian ini, dimana nilai *slope* (b) positif atau berbanding lurus. Rumus regresi linier pada penelitian ini tidak dapat digunakan untuk menduga stok karbon mangrove lebih lanjut menggunakan citra karena nilai koefisien determinasi yang sangat rendah.

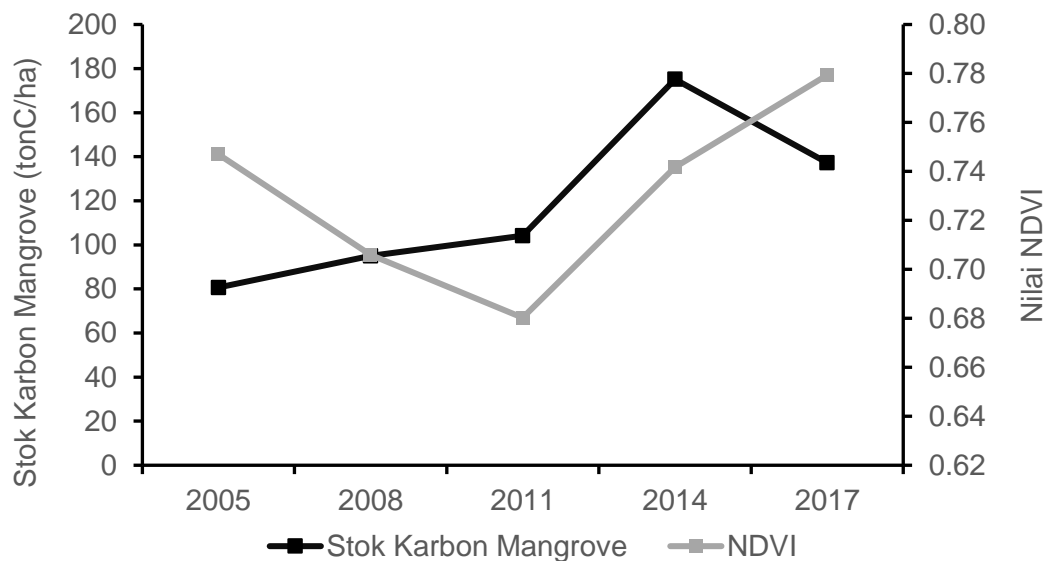
Rendahnya nilai  $R^2$  dapat disebabkan oleh kondisi kompleksitas hutan mangrove dan keterbatasan citra satelit dalam memetakan hal tersebut, serta adanya pergeseran penempatan GPS (*spatial displacement*) saat menentukan titik koordinat dan resolusi spasial citra yang terbatas (Wicaksono *et al.*, 2011). Kondisi hutan mangrove Desa Kaliwlingi yang kompleks mulai dari komposisi spesies, umur mangrove, kondisi substrat, kesehatan, kerapatan maupun kondisi biofisik

**Tabel 9.** Nilai NDVI, rata-rata NDVI dan persentase tutupan kanopi berdasarkan perbedaan tahun tanam mangrove. (\* = berdasarkan laporan analisis vegetasi IKAMaT (2020)).

| Stasiun     | Plot | NDVI | Rata-rata NDVI | Tutupan Kanopi (%)* | Kategori* |
|-------------|------|------|----------------|---------------------|-----------|
| 1<br>(2005) | 1    | 0,75 | 0,75 ± 0,020   | 85,42±0,95          | Padat     |
|             | 2    | 0,73 |                |                     |           |
|             | 3    | 0,76 |                |                     |           |
| 2<br>(2008) | 1    | 0,71 | 0,71 ± 0,014   | 80,82±0,96          | Padat     |
|             | 2    | 0,72 |                |                     |           |
|             | 3    | 0,69 |                |                     |           |
| 3<br>(2011) | 1    | 0,66 | 0,68 ± 0,045   | 83,29±0,62          | Padat     |
|             | 2    | 0,73 |                |                     |           |
|             | 3    | 0,65 |                |                     |           |
| 4<br>(2014) | 1    | 0,73 | 0,74 ± 0,011   | 83,27±0,60          | Padat     |
|             | 2    | 0,74 |                |                     |           |
|             | 3    | 0,75 |                |                     |           |
| 5<br>(2017) | 1    | 0,77 | 0,78 ± 0,010   | 87,91±0,87          | Padat     |
|             | 2    | 0,79 |                |                     |           |
|             | 3    | 0,78 |                |                     |           |



**Gambar 8.** Analisis regresi antara nilai stok karbon mangrove dengan nilai NDVI.



**Gambar 9.** Hubungan nilai stok karbon mangrove dengan nilai NDVI pada lahan mangrove dengan tahun tanam yang berbeda-beda.

mangrove lainnya ditambah dengan resolusi spasial Sentinel-2 yang hanya 10 m, diduga menjadi penyebab rendahnya hubungan antara nilai NDVI dan stok karbon mangrove. Hal ini juga telah dijelaskan oleh Heenkenda *et al.* (2014) dan Wang *et al.* (2018), bahwa rendahnya resolusi spasial suatu citra (Sentinel-2) dapat menyebabkan pantulan spektral yang berbeda (air, tanah, mangrove, uap air) tercampur dalam satu piksel dan berimplikasi pada akurasi indeks vegetasi sehingga tidak dapat menyesuaikan dengan kondisi biofisik mangrove yang asli di lapangan.

## KESIMPULAN

Stok karbon mangrove di lahan rehabilitasi Desa Kaliwlingi memiliki nilai yang cukup tinggi. Lahan mangrove 2005, 2008, 2011, 2014 dan 2017 memiliki stok karbon total masing-masing 80,69 tonC/ha, 95,08 tonC/ha, 104,19 tonC/ha, 175,13 tonC/ha dan 137,35 tonC/ha. Berdasarkan hasil estimasi disimpulkan bahwa jumlah stok karbon mangrove hasil rehabilitasi di Desa Kaliwlingi tidak meningkat seiring dengan semakin tua umur lahan mangrove. Berbagai faktor seperti jumlah tegakan, komposisi spesies dan diameter lebih mempengaruhi nilai stok karbon terlepas dari umur mangrove. Lahan mangrove dengan dominasi spesies *Avicennia marina* memiliki stok karbon yang lebih tinggi dibandingkan lahan mangrove yang didominasi oleh *Rizophora mucronata*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Yayasan Inspirasi Keluarga KeSEMaT (IKAMaT) yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk ikut serta dalam kegiatan survei karbon dan menggunakan data analisis vegetasi sebagai basis data perhitungan stok karbon. Penulis juga berterimakasih kepada Kelompok Masyarakat Pelestari Hutan Pesisir (KMPHP) Mangrove Sari dan masyarakat Desa Kaliwlingi yang aktif membantu dalam kegiatan survei lapangan dan pengambilan data parameter stok karbon.

## DAFTAR PUSTAKA

Adame, M.F., Cherian, S., Reef, R. & Stewart-Koster, B. 2017. Mangrove root biomass and the uncertainty of belowground carbon estimations. *Forest Ecology and Management*, 403:52–60. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.08.016



- Akbar, M.R., Arisanto, P.A.A., Sukirno, B.A., Merdeka, P.H., Priadhi, M.M. & Zallesa, S. 2020. Mangrove vegetation health index analysis by implementing NDVI (normalized difference vegetation index) classification method on sentinel-2 image data case study: Segara Anakan, Kabupaten Cilacap. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 584(1):1–7. DOI:10.1088/1755-1315/584/1/012069
- Alongi, D.M. 2020. Global Significance of Mangrove Blue Carbon in Climate Change Mitigation. *Science*, 2(3):67. DOI:10.3390/sci2030067
- Anand, A., Pandey, P.C., Petropoulos, G.P., Pavlides, A., Srivastava, P.K., Sharma, J.K. & Malhi, R.K.M. 2020. Use of hyperion for mangrove forest carbon stock assessment in bhitarikanika forest reserve: A contribution towards blue carbon initiative. *Remote Sensing*, 12(4):1–25. DOI: 10.3390/rs12040597
- Baboo, S. & Devi, M.R., 2010. An Analysis of Different Resampling Methods in Coimbatore, District. *Global Journal of Computer Science and Technology*, 10(15):61–66.
- Badan Informasi Geospasial. 2014. Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 3 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Pengumpulan Dan Pengolahan Data Geospasial Mangrove. In Peraturan Kepala Badan Informasi Geospasial Nomor 3 Tahun 2014 (p. 47). BIG.
- Badan Standardisasi Nasional. 2011. Pengukuran dan Perhitungan Cadangan Karbon-Pengukuran Lapangan untuk Penaksiran Cadangan Karbon Hutan (Ground Based Forest Carbon Accounting). Jakarta: Badan Standardisasi Nasional
- Barbier, E.B. 2017. Marine ecosystem services. *Current Biology*, 27(11):431–510. DOI: 10.1016/j.cub.2017.03.020
- Bournazel, J., Kumara, M.P., Jayatissa, L.P., Viergever, K., Morel, V. & Huxham, M. 2015. The impacts of shrimp farming on land-use and carbon storage around Puttalam lagoon, Sri Lanka. *Ocean and Coastal Management*, 113(2015):18–28. DOI:10.1016/j.ocecoaman.2015.05.009
- Camacho, L.D., Gevaña, D.T., Carandang, A.P., Camacho, S.C., Combalicer, E.A., Rebugio, L.L. & Youn, Y. C. 2011. Tree biomass and carbon stock of a community-managed mangrove forest in Bohol, Philippines. *Forest Science and Technology*, 7(4):161–167. DOI: 10.1080/21580103.2011.621377
- Comley, B.W.T. & McGuinness, K.A. 2005. Above- and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves. *Australian Journal of Botany*, 53(5):431–436. DOI: 10.1071/BT04162
- Dharmawan, I.W.E. & Pramudji. 2017. Panduan Pemantauan Komunitas Mangrove Edisi 2. In *CRITC Coremap CTI Lipi* (2nd ed., Issue 2). Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- 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: 10.1038/ngeo1123
- Eid, E.M., Khedher, K.M., Ayed, H., Arshad, M., Moatamed, A. & Mouldi, A. 2020. Evaluation of carbon stock in the sediment of two mangrove species, *Avicennia marina* and *Rhizophora mucronata*, growing in the Farasan Islands, Saudi Arabia. *Oceanologia*, 62(2):200–213. DOI:10.1016/j.oceano.2019.12.001
- Estrada, G.C.D. & Soares, M.L.G. 2017. Global patterns of aboveground carbon stock and sequestration in mangroves. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 89(2):973–989. DOI: 10.1590/0001-3765201720160357
- European Space Agency. 2015. *Sentinel-2 User Handbook*:1–64).
- Frananda, H., Hartono, H. & Jatmiko, R.H. 2015. Komparasi Indeks Vegetasi untuk Estimasi Stok Karbon Hutan Mangrove Kawasan Segoro Anak pada Kawasan Taman Nasional Alas Purwo Banyuwangi, Jawa Timur. *Majalah Ilmiah Globe*, 17(2):113–123.
- Hairiah, D.K. & Rahayu, S. 2007. Pengukuran karbon tersimpan di berbagai macam penggunaan lahan. World Agroforestry Centre (ICRAF).
- Hakim, K.L., Setiawan, B. & Radjiman, G. 2018. Pengelolaan Hutan Mangrove Berbasis Masyarakat di Desa Kaliwlingi Kabupaten Brebes. *Media Agrosains*, 4(1):9–15.
- Hamilton, S.E. & Casey, D. 2016. Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC-21). *Global Ecology and*

- Biogeography*, 25(6):729–738. DOI:10.1111/geb.12449
- Hamuna, B., Sari, A.N. & Megawati, R. 2018. Kondisi Hutan Mangrove di Kawasan Taman Wisata Alam Teluk Youtefa , Kota Jayapura. *Majalah Ilmiah Biologi Biosfera: A Scientific Journal*, 35(2):75–83. DOI:10.20884/1.mib.2018.35.2.611
- Heenkenda, M.K., Joyce, K.E., Maier, S.W. & Bartolo, R. 2014. Mangrove species identification: Comparing WorldView-2 with aerial photographs. *Remote Sensing*, 6(7):6064–6088. DOI:10.3390/rs6076064
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E. & Telszewski, M. 2014. Coastal Blue Carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows. *Conservation International*, 36(1):180.
- Humboldt State University. 2019. Introduction to Remote Sensing: Accuracy Metrics. Humboldt State University.
- IKAMaT. 2020. Laporan Kegiatan Analisis Vegetasi Brebes:1–40.
- Istomo, K.C. & Naibaho, B.D. 2017. Biomass potential on several mangrove planting models in Java Island, Indonesia. *AAFL Bioflux*, 10(4):754-767.
- Jia, M., Wang, Z., Wang, C., Mao, D. & Zhang, Y. 2019. A new vegetation index to detect periodically submerged mangrove forest using single-tide Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 11(17):1–17. DOI:10.3390/rs11172043
- Kathiresan, K., Anburaj, R., Gomathi, V. & Saravanakumar, K. 2013. Carbon sequestration potential of *Rhizophora mucronata* and *Avicennia marina* as influenced by age, season, growth and sediment characteristics in southeast coast of India. *Journal of Coastal Conservation*, 17(3):397–408. DOI:10.1007/s11852-013-0236-5
- Kauffman, J.B., & Cole, T.G. 2010. Micronesian mangrove forest structure and tree responses to a severe typhoon. *Wetlands*, 30(6):1077–1084. DOI: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 Pa). CIFOR.
- Kauffman, J. B., Heider, C., Cole, T.G., Dwire, K.A. & Donato, D.C. 2011. Ecosystem carbon stocks of micronesian mangrove forests. *Wetlands*, 31(2):343–352. DOI:10.1007/s13157-011-0148-9
- Keputusan Menteri Lingkungan Hidup. 2004. Baku Mutu Air Laut, Lampiran III: Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut (bagian Mangrove). Nomor: 51.
- KKP. 2020. Hari Mangrove Sedunia, KKP Targetkan Rehabilitasi 200 ha Lahan Mangrove di 2020.
- Komiyama, A., Ong, J.E. & Pongpan, S. 2008. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89(2):128–137. DOI:10.1016/j.aquabot.2007.12.006
- Komiyama, A., Pongpan, S., & Kato, S. 2005. Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4):471–477. DOI: 10.1017/S0266467405002476
- Krauss, K.W., Keeland, B.D., Allen, J.A., Ewel, K.C. & Johnson, D.J. 2007. Effects of Season, Rainfall, and Hydrogeomorphic Setting on Mangrove Tree Growth in Micronesia. *Biotropica*, 39(2):161–170. DOI: 10.1111/j.1744-7429.2006.00259.x
- Kresnabayu, I.M.P., Putra, I.D.N.N. & Suteja, Y. 2018. Kerapatan Hutan Mangrove Berbasis Data Penginderaan Jauh di Estuari Perancak Kabupaten Jembrana-Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 4(1):31–37. DOI: 10.24843/jmas.2018.v4.i01.31-37
- LAPAN. 2015. Pedoman Pengolahan Data Penginderaan Jauh Landsat 8 Untuk Mangrove. LAPAN.
- Latuamury, B. & Resesi, K. 2012. Perubahan tutupan lahan akan berdampak pada berubahnya sifat-sifat hidrologi seperti koefisien aliran , debit dan karakteristik hidrograf aliran. Indikator kerusakan hutan dapat dilihat dari karakteristik hidrograf. Evaluasi respon DAS berupa hidrograf. *Majalah Geografi Indonesia*, 26(2):98–118. DOI: 10.22146/mgi.13418
- Lavrakas, P.J. 2008. Purposive Sampling. In *Encyclopedia of Survey Research Methods*. DOI:10.4135/9781412963947.n419
- Lugina, M., Ginoga, K.L., Wibowo, A., Bainnaura, A. & Partiani, T. 2011. Prosedur Operasi Standar (SOP) untuk Pengukuran Stok Karbon di Kawasan Konservasi. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim dan Kebijakan Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan.

- Malik, A., Jalil, A.R., Arifuddin, A. & Syahmuddin, A. 2020. Biomass carbon stocks in the mangrove rehabilitated area of sinjai district, south sulawesi, indonesia. *Geography, Environment, Sustainability*, 13(3):32–38. DOI:10.24057/2071-9388-2019-131
- Malik, A., Mertz, O. & Fensholt, R. 2017. Mangrove forest decline: consequences for livelihoods and environment in South Sulawesi. *Regional Environmental Change*, 17(1):157–169. DOI:10.1007/s10113-016-0989-0
- Mayuftia, R., Hartoko, A. & Hendrarto, B. 2013. Tingkat Kerusakan dan Karbon Mangrove dengan Pendekatan Data Satelit NDVI di Desa Sidodadi Kabupaten Pesawaran Provinsi Lampung. *Diponegoro Journal of Maquares*, 2(4):146–154.
- Muhsoni, F.F., Sambah, A.B., Mahmudi, M. & Wiadnya, D.G.R., 2018. Estimation of mangrove carbon stock with hybrid method using image Sentinel-2. *International Journal of GEOMATE*, 15(49):185–192. DOI: 10.21660/2018.49.52661
- Nam, V.N., Sasmito, S.D., Murdiyarso, D., Purbopuspito, J. & MacKenzie, R.A. 2016. Carbon stocks in artificially and naturally regenerated mangrove ecosystems in the Mekong Delta. *Wetlands Ecology and Management*, 24(2):231–244. DOI:10.1007/s11273-015-9479-2
- Noor, Y.R., Khazali, M. & Suryadiputra, I.N.N. 2006. Panduan Pengenalan Mangrove di Indonesia. Wetland International, Indonesia Programme
- Nugraha, F.W., Pribadi, R. & Wirasatriya, A. 2020. Kajian Perubahan Luasan untuk Prediksi Simpanan Karbon Ekosistem Mangrove di Desa Kaliwlingi, Kabupaten Brebes. *Buletin Oseanografi Marina*, 9(2):104–116. DOI:10.14710/buloma.v9i2.30039
- Pandey, P.C., Anand, A. & Srivastava, P.K. 2019. Spatial distribution of mangrove forest species and biomass assessment using field inventory and earth observation hyperspectral data. *Biodiversity and Conservation*, 28(2143–2162):1–20. DOI:10.1007/s10531-019-01698-8
- Pendleton, L., Donato, D.C., Murray, B.C., Crooks, S., Jenkins, W.A., Sifleet, S., Craft, C., Fourqurean, J.W., Kauffman, J.B., Marbà, N., Megonigal, P., Pidgeon, E., Herr, D., Gordon, D. & Baldera, A., 2012. Estimating Global “Blue Carbon” Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. *PLoS ONE*, 7(9):1–7. DOI: 10.1371/journal.pone.0043542
- Phillips, D.H., Kumara, M.P., Jayatissa, L.P., Krauss, K.W. & Huxham, M. 2017. Impacts of Mangrove Density on Surface Sediment Accretion, Belowground Biomass and Biogeochemistry in Puttalam Lagoon, Sri Lanka. *Wetlands*, 37(3):471–483. DOI: 10.1007/s13157-017-0883-7
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V.R., Murayama, Y. & Ranagalage, M. 2020. Sentinel-2 Data for Land Cover / Use Mapping : A Review. *Remote Sensing*, 12(14):1–35. DOI: 10.3390/rs12142291
- 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. DOI: 10.24843/jmas.2019.v05.i02.p05
- Primavera, J.H., Friess, D.A., Van Lavieren, H. & Lee, S.Y. 2018. The mangrove ecosystem. In *World Seas: An Environmental Evaluation Volume III: Ecological Issues and Environmental Impacts*. DOI: 10.1016/B978-0-12-805052-1.00001-2
- Ren, H., Chen, H., Li, Z., & Han, W. 2010. Biomass accumulation and carbon storage of four different aged *Sonneratia apetala* plantations in Southern China. *Plant and Soil*, 327(1): 279–291. DOI: 10.1007/s11104-009-0053-7
- Richards, D.R. & Friess, D.A. 2016. Rates and drivers of mangrove deforestation in Southeast Asia, 2000-2012. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(2):344–349. DOI: 10.1073/pnas.1510272113
- Rizki, F., Situmorang, A.D.L., Wau, N., Lubis, M.Z. & Anurogo, W. 2017. Mapping of Vegetation and Mangrove Distribution Level in Batam Island Using SPOT-5 Satellite Imagery. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 2(4):264–267. DOI: 10.24273/jgeet.2017.2.4.1002
- Sahu, S.K. & Kathiresan, K. 2019. The age and species composition of mangrove forest directly influence the net primary productivity and carbon sequestration potential. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 20: 101235. DOI: 10.1016/j.bcab.2019.101235

- Siddiq, A., Dimiyati, M. & Damayanti, A. 2020. Analysis of Carbon Stock Distribution of Mangrove Forests in The Coastal City of Benoa, Bali with Combination Vegetation Index, and Statistics Approach. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(6):2386–2393. DOI:10.18517/ijaseit.10.6.12991
- Siikamäki, J.V., Sanchirico, J.N., Jardine, S., Mclaughlin, D. & Morris, D.F. 2012. Blue Carbon. Global Option for Reducing Emissions from the Degradation and Development of Coastal Ecosystems. *Washington, DC: Resources for the Future*, 74.
- Situmorang, J.P., Sugianto, S. & Darusman, D. 2016. Estimation of Carbon Stock Stands using EVI and NDVI Vegetation Index in Production Forest of Lembah Seulawah Sub-District, Aceh Indonesia. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 5(3):126–139. DOI:10.13170/aijst.5.3.5836
- Sutaryo, D. 2009. Penghitungan Biomassa: Sebuah pengantar untuk studi karbon dan perdagangan karbon. Wetlands International Indonesia Programme.
- Suyono, Supriharyono, Hendrarto, B. & Radjasa, O. 2015. Pemetaan degradasi ekosistem mangrove dan abrasi pantai berbasis geographic information system di Kabupaten Brebes-Jawa Tengah. *Oceatek*, 9(1):90–102.
- Taillardat, P., Friess, D. A. & Lupascu, M. 2018. Mangrove blue carbon strategies for climate change mitigation are most effective at the national scale. *Biology Letters*, 14(10):1-6 DOI: 10.1098/rsbl.2018.0251
- Tamooh, F., Huxham, M., Karachi, M., Mencuccini, M., Kairo, J.G. & Kirui, B. 2008. Below-ground root yield and distribution in natural and replanted mangrove forests at Gazi bay, Kenya. *Forest Ecology and Management*, 256(6):1290–1297. DOI:10.1016/j.foreco.2008.06.026
- The Government of the Kingdom of Norway and The Government of the Republic of Indonesia. 2010. Letter of Intent between the Government of the Kingdom of Norway and the Government of the Republic of Indonesia.
- Tomlinson, P.B. 2016. The botany of mangroves - 2nd edition. *The Botany of Mangroves*. DOI:10.2307/2996392
- Umroh, U., Adi, W. & Sari, S.P. 2016. Detection of Mangrove Distribution in Pongok Island. *Procedia Environmental Sciences*, 33:253–257. DOI:10.1016/j.proenv.2016.03.076
- Van Vinh, T., Marchand, C., Linh, T.V.K., Vinh, D.D. & Allenbach, M., 2019. Allometric models to estimate above-ground biomass and carbon stocks in *Rhizophora apiculata* tropical managed mangrove forests (Southern Viet Nam). *Forest Ecology and Management*, 434:131–141. DOI:10.1016/j.foreco.2018.12.017
- Walcker, R., Gandois, L., Proisy, C., Corenblit, D., Mougín, É., Laplanche, C., Ray, R. & Fromard, F. 2018. Control of “blue carbon” storage by mangrove ageing: Evidence from a 66-year chronosequence in French Guiana. *Global Change Biology*, 24(6):2325–2338. DOI: 10.1111/gcb.14100
- Wang, D., Wan, B., Qiu, P., Su, Y., Guo, Q., Wang, R., Sun, F. & Wu, X. 2018. Evaluating the performance of Sentinel-2, Landsat 8 and Pléiades-1 in mapping mangrove extent and species. *Remote Sensing*, 10(9):1–27. DOI:10.3390/rs10091468
- Ward, R.D., Friess, D.A., Day, R.H. & Mackenzie, R.A. 2016. Impacts of climate change on mangrove ecosystems: a region by region overview. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(4):1–25. DOI:10.1002/ehs2.1211
- Waycott, M., Mckenzie, L.J., Mellors, J.E., Ellison, J.C., Sheaves, M.T., Collier, C., Schwarz, A., Webb, A., Johnson, J.E. & Payri, C.E. 2011. Vulnerability of mangroves, seagrasses and intertidal flats in the tropical Pacific to climate change. In *Vulnerability of Tropical Pacific Fisheries and Aquaculture to Climate Change. Secretariat of the Pacific Community, Noumea, New Caledonia*:297–368.
- Weier, J. & Herring, D. 2000. Measuring Vegetation (NDVI & EVI). In *NASA Earth Observatory*. NASA.
- Wicaksono, P. 2017. Mangrove above-ground carbon stock mapping of multi-resolution passive remote-sensing systems. *International Journal of Remote Sensing*, 38(6):1551–1578. DOI:10.1080/01431161.2017.1283072

- Wicaksono, P. 2015. Pengembangan Model Penginderaan Jauh untuk Pemetaan Stok Karbon Padang Lamun dan Hutan Mangrove. *Disertasi Program Pascasarjana Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada*, 56.
- Wicaksono, P., Danoedoro, P., Hartono, H., Nehren, U. & Ribbe, L. 2011. Preliminary work of mangrove ecosystem carbon stock mapping in small island using remote sensing: above and below ground carbon stock mapping on medium resolution satellite image. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII*, 8174(81741B):1–10. DOI:10.1117/12.897926
- Wicaksono, P., Danoedoro, P., Hartono & Nehren, U. 2016. Mangrove biomass carbon stock mapping of the Karimunjawa Islands using multispectral remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 37(1):26–52. DOI:10.1080/01431161.2015.1117679