

Estimasi Biomassa dan Karbon Tegakan *Rhizophora apiculata* Hasil Aforestasi di Kecamatan Mawasangka

Maharani*, Indra Ardiansyah, Syahrul Muhammad, Salsa Mariska,
La Ode Abdul Fajar Hasidu

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Perikanan dan Peternakan, Universitas Sembilanbelas November Kolaka
Jl. Pemuda No 339, Kolaka, Sulawesi Tenggara. 93511. Indonesia
Corresponding author, e-mail: maharanijafar2@gmail.com

ABSTRAK: *Rhizophora apiculata* merupakan jenis mangrove yang umum digunakan dalam program penanaman mangrove karena propagul yang mudah diperoleh, dan pertumbuhannya relatif mudah dikontrol. *R. apiculata* juga memiliki potensi besar dalam menyimpan karbon, sehingga penting untuk diketahui kontribusinya terhadap cadangan karbon di wilayah pesisir. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kerapatan, mengestimasi biomassa, dan stok karbon *R. apiculata* hasil aforestasi di pesisir Kecamatan Mawasangka, Kabupaten Buton Tengah. Penelitian dilaksanakan pada bulan Oktober-November 2025. Pengambilan data vegetasi menggunakan metode transek kuadrat sepanjang 50meter yang tegak lurus garis pantai, dengan dua garis transek dan enam plot berukuran 100 m². Persentase tutupan kanopi diukur menggunakan metode *Hemispherical Photography*. Estimasi biomassa dan stok karbon menggunakan pendekatan *Google Earth Engine* dan pengukuran langsung menggunakan model Allometrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentase tutupan kanopi *R. apiculata* sebesar 74,10 ± 14,53%, yang termasuk dalam kategori baik/padat. Berdasarkan ukuran dbh, kerapatan tertinggi pada kelas ukuran 4–6,99 cm dan 7–9,99 cm dengan nilai masing-masing 2616,66 ind/ha² dan 1666,66 ind/ha². Biomassa total 115,97 ton/ha², terdiri atas AGB 111,81 ton/ha² dan BGB 4,15 ton/ha². Nilai ini berbanding lurus dengan total stok karbon 54,50 ton C/ha² (AGC: 52,55 ton C/ha²; BGBC: 1,95 ton C/ha²). Secara umum, nilai biomassa dan stok karbon pada bagian atas tegakan lebih tinggi dibandingkan bagian bawah. *R. apiculata* hasil aforestasi masih berada pada tahap awal pertumbuhan dengan ukuran dbh relatif kecil. Meskipun demikian, potensinya sebagai penyimpan karbon sudah cukup baik. Upaya pelestarian dan perluasan area aforestasi perlu terus dilakukan untuk meningkatkan potensi penyerapan karbon di wilayah pesisir.

Kata kunci: Estimasi biomassa vegetasi; stok karbon; GEE

Estimation of Biomass and Carbon of Rhizophora apiculata Stands in Afforestation Mangrove Areas of Mawasangka District

ABSTRACT: *Rhizophora apiculata* is a mangrove species commonly used in plantation programs because its propagules are easy to obtain, and its growth is relatively easy to control. *R. apiculata* also has great potential in storing carbon, so it is important to know its contribution to carbon stocks in coastal areas. This study aims to determine the density, estimate biomass, and carbon stocks of *R. apiculata* from afforestation mangroves area on the coast of Mawasangka District, Central Buton Regency. The study was conducted in October-November 2025. Vegetation data collection used a 50-meter quadratic transect method perpendicular to the coastline, with two transect lines and six plots 100 m². The percentage of canopy cover was measured using the *Hemispherical Photography* method. Biomass and carbon stock estimation used the *Google Earth Engine* approach and direct measurements using the Allometric model. The results showed that the percentage of canopy cover of *R. apiculata* was 74.10 ± 14.53%, which is included in the good/dense category. Based on the dbh size, the highest density was in the 4–6.99 cm and 7–9.99 cm size classes with values of 2616.66 ind/ha² and 1666.66 ind/ha², respectively. The total biomass was 115.97 tons/ha², consisting of AGB 111.81 tons/ha² and BGB 4.15 tons/ha². This value is directly proportional to the total carbon stock of 54.50 tons C/ha² (AGC: 52.55 tons C/ha²; BGBC: 1.95 tons C/ha²). In general,

the biomass and carbon stock values in the upper part of the stand were higher than those in the lower part. R. apiculata resulting from afforestation is still in the early stages of growth with a relatively small dbh size. Nevertheless, its potential as a carbon store is quite good. Efforts to preserve and expand the afforestation area need to be continued to increase the potential for carbon absorption in coastal areas.

Keywords: Vegetation biomass estimation; carbon stock; GEE

PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove merupakan ekosistem yang memiliki fungsi yang sangat beragam. Dalam aspek fisik-kimia serta ekologis, mangrove berperan sangat krusial dalam memitigasi dampak perubahan iklim global melalui penyerapan emisi karbon (Kangkuso *et al.*, 2016; Cameron, Hutley and Friess, 2019; Phan *et al.*, 2019; Kauffman *et al.*, 2020; Indrayani *et al.*, 2021). Khusus pada peranan vegetasi mangrove sebagai penyerap emisi karbon terjadi melalui mekanisme fotosintesis yang menyerap emisi CO₂ dan menghasilkan O₂ (Adame *et al.*, 2017; Analuddin *et al.*, 2020). Beberapa hasil penelitian menemukan bahwa ekosistem mangrove jauh lebih efektif dalam menyerap karbon dibandingkan ekosistem terestrial (Analuddin *et al.*, 2023; Dharmayasa *et al.*, 2024). Hal ini dikarenakan komponen vegetasi mangrove dan substratnya memiliki peranan yang sama. Namun, lebih dari 50% karbon yang terserap, tersimpan ke dalam substratnya (Suprayogi *et al.*, 2022; Analuddin *et al.*, 2023). Oleh karena itu, jika ekosistem ini terdegradasi, maka potensinya juga lebih besar dalam melepaskan karbon kembali ke atmosfer (Sidik and Lovelock, 2013; Kauffman *et al.*, 2020).

Namun, dalam beberapa dekade terakhir, ekosistem mangrove di secara global, maupun di Indonesia mengalami tekanan akibat alih fungsi lahan, penebangan liar, dan degradasi habitat lainnya (Arifanti, 2020; Sasmito *et al.*, 2020). Sebagai respons terhadap kondisi ini, berbagai upaya konservasi dan rehabilitasi dilakukan, termasuk kegiatan revegetasi mangrove di kawasan pesisir yang telah kehilangan tutupan mangrove (Hasidu *et al.*, 2023a; Rudia *et al.*, 2024), maupun aforestasi pada kawasan yang sebelumnya tidak ditumbuhi mangrove. Salah satu lokasi aforestasi mangrove di Kabupaten Buton Tengah yaitu di kawasan pesisir Kecamatan Mawasangka, yang kini mulai menunjukkan perkembangan vegetasi mangrove, khususnya dari jenis *Rhizophora apiculata*.

R. apiculata merupakan salah satu spesies mangrove yang paling umum digunakan dalam program penanaman mangrove. Spesies ini memiliki toleransi yang tinggi terhadap berbagai kondisi lingkungan dan pertumbuhan yang relatif cepat (Usman, Hartoyo and Kusmana, 2022). Selain sebagai pelindung garis pantai, keberadaan tegakan *R. apiculata* juga berpotensi besar dalam menyimpan karbon, sehingga penting untuk diketahui kontribusinya terhadap stok karbon di wilayah tersebut.

Metode penilaian biomassa dan stok karbon dapat dilakukan dengan beberapa pendekatan metode seperti menggunakan pendekatan model allometrik (Komiyama, 2005; Sutaryo, 2009), menggunakan pendekatan teknologi *Remote Sensing* dan integrasi GIS, serta menggunakan pendekatan *Google Earth Engine (GEE)*. Analisis biomassa dan stok karbon mangrove menggunakan platform *GEE* merupakan pendekatan metode melalui pemanfaatan teknologi, yang dapat mengolah data berbasis cloud dengan berbagai algoritma machine learning (Husnayaen *et al.*, 2023). Pendekatan ini menghubungkan data penginderaan jauh (citra satelit) dengan data lapangan (biomassa atau karbon yang diukur dengan persamaan alometrik).

Penelitian mengenai penilaian biomassa dan stok karbon mangrove yang ada di beberapa kawasan pesisir di Indonesia telah banyak dilakukan, termasuk di Sulawesi Tenggara. Hasidu *et al.*, (2022; 2023b) menganalisis biomassa dan stok karbon mangrove dan substrat mangrove di pesisir Kabupaten Kolaka. Selain itu, Hasidu *et al.*, (2022b) membuat model allometrik untuk mengestimasi biomassa dan stok karbon mangrove, serta menganalisis stok karbon sedimen di kawasan mangrove regenerasi alami bekas kawasan tambak di Kabupaten Muna. Kharisma *et al.* (2023) juga menganalisis biomassa, stok karbon dan kerapatan tutupan mangrove menggunakan citra satelit

Landsat 8 OLI dan *Sentinel-2A Satellite Imagery* di pesisir Kabupaten Muna. Di kawasan pesisir Kabupaten Konawe Selatan, 2015) membandingkan biomassa mangrove di dalam kawasan konservasi Taman Nasional Rawa Aopa Watumohai (TNRAW) dan diluar kawasan konservasi TNRAW. Kangkuso *et al.*, (2016, 2018) dan Analuddin *et al.*, (2020) membuat model allometrik spesies *R. apiculata*, *R. mucronata*, *C. tagal*, *R. stylosa* dan *L. racemosa* di kawasan TNRAW, Sulawesi Tenggara.

Penggunaan pendekatan *Google Earth Engine (GEE)* dalam studi bioekologi mangrove sejatinya telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu. Husnayaen *et al.*, (2023) menganalisis kerapatan dan sebaran tutupan mangrove menggunakan *machine learning* pada *GEE* di Bali. Husnayaen *et al.*, (2025) juga menganalisis kerapatan dan deforestasi mangrove menggunakan *machine learning* pada *GEE* di Nusa Tenggara Barat. Di Sulawesi Tenggara, pemanfaatan *GEE* telah dilakukan di ekosistem yang berbeda, yaitu di ekosistem lamun perairan Teluk Moramo, Konawe Selatan (Samadi & Hamid, 2025). Namun, sampai saat ini riset mengenai pemanfaatan *GEE* untuk estimasi biomassa dan stok karbon mangrove di kawasan aforestasi mangrove masih sangat minim, khususnya yang dilakukan di Kabupaten Buton Tengah, Sulawesi Tenggara.

Riset ini bertujuan untuk mengestimasi biomassa dan stok karbon yang tersimpan di dalam tegakan *R. apiculata* hasil aforestasi di pesisir pantai Kecamatan Mawasangka Kabupaten Buton Tengah. Estimasi biomassa dan stok karbon dilakukan melalui dua pendekatan metode nondestruktif, yaitu melalui model allometrik dan *GEE*. Informasi ini diharapkan dapat memberikan data ilmiah yang mendukung pengelolaan mangrove berbasis mitigasi perubahan iklim serta menjadi dasar dalam penilaian potensi karbon biru di wilayah pesisir Kabupaten Buton Tengah.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilakukan pada bulan Oktober sampai November tahun 2025. Pengambilan data dilakukan di kawasan aforestasi mangrove Kecamatan Mawasangka, Kabupaten Buton Tengah, Provinsi Sulawesi Tenggara. Aforestasi mangrove tersebut dilakukan pada tahun 2007, dan saat ini berusia 18 tahun. Gambar 1 merupakan peta kawasan aforestasi mangrove di pesisir Kecamatan Mawasangka, Kabupaten Buton Tengah yang dijadikan sebagai lokasi penelitian.

Peralatan dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari GPS (*Global Positioning system*), *thermometer*, pH meter, *handrefractometer*, meteran roll, pita pengukur diameter, buku identifikasi mangrove, buku catatan, alat tulis, kamera, software Ms. Office Excel, software *ImageJ*, dan *Klaidagraph* versi 4.0, serta platform google earth engine untuk analisis data dan visualisasi data.

Data primer berupa kerapatan vegetasi, persentase tutupan vegetasi, jenis mangrove, diameter batang mangrove (dbh), temperature air, salinitas air, dan pH air diperoleh dengan pengukuran langsung di lokasi penelitian. Sebanyak 2 transek garis dibentangkan tegak lurus terhadap garis pantai. Di setiap transek diletakkan masing-masing 3 plot berukuran 10m x 10m, sehingga terdapat total 6 plot. Di setiap plot dilakukan pengukuran dbh dan penghitungan jumlah individu. Data tersebut digunakan untuk menghitung kerapatan tegakan berdasarkan jumlah individu per satuan luas. Selain itu, data persentase tutupan mangrove dikoleksi menggunakan foto kanopi (metode *hemispherical photography*) menggunakan software *imageJ*, yang mengacu kepada Dharmawan *et al.*, 2020). Data *Aboveground biomass* (AGB) dan *belowground biomass* (BGB) diestimasi berdasarkan hasil pengukuran diameter batang (DBH) menggunakan meteran jahit, yang kemudian dimasukkan ke dalam persamaan alometrik (Komiya *et al.*, 2005).

Data primer yang diperoleh dianalisis secara kuantitatif. Kerapatan mangrove dianalisis berdasarkan jumlah jenis dibagi dengan luas areal sampling. Persentase tutupan mangrove menggunakan foto kanopi, dan dianalisis menggunakan software *ImageJ* untuk menentukan persentase penutupan kanopinya.

Data *aboveground biomass* (AGB), dan *belowground biomass* (BGB) diestimasi menggunakan data dbh dan model model allometrik dari (Komiya *et al.*, 2005) berikut.

$$W_{top} = 0,251 D^{2,46} \text{ (untuk aboveground)}$$

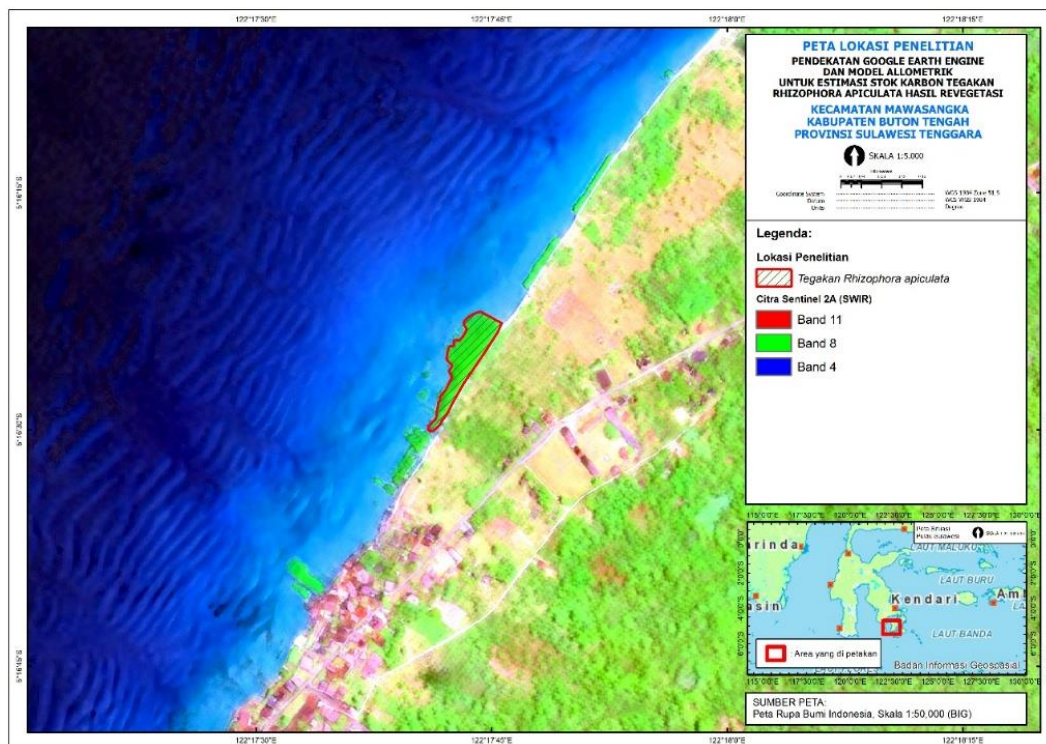
$$W_R = 0,199p^{0,899} D^{2,22} \text{ (untuk belowground)}$$

Data *aboveground carbon* (AGC) dan *belowground carbon* dari biomassa perakaran (BGBC) diestimasi menggunakan data AGB dan BGB menggunakan konstanta kadar karbon di dalam bahan organik (0,47), mengacu kepada Howard et al. (2014).

Analisis hubungan antara indeks vegetasi dan stok karbon dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan spektral setiap indeks dalam merepresentasikan variasi biomassa tegakan *R. apiculata* hasil aforestasi. Tahapan analisis dimulai dengan perhitungan enam indeks vegetasi yang umum digunakan dalam pemantauan vegetasi tropis, yaitu NDVI, OSAVI, TRVI, mRE_SR, IRECI, dan CIR. Perhitungan indeks dilakukan menggunakan kanal reflektansi permukaan (*surface reflectance*) dari citra Sentinel-2A yang telah melalui proses koreksi atmosferik. Pemrosesan dilakukan secara *cloud-based* pada platform *Google Earth Engine* (GEE) untuk menjamin efisiensi komputasi dan konsistensi spasial data (Gorelick et al., 2017).

Setiap indeks dihitung berdasarkan kombinasi kanal spektral sesuai formulasi aslinya: NDVI menggunakan kanal NIR dan RED (Huete et al., 2002), OSAVI menambahkan konstanta koreksi 0,16 untuk mengurangi pengaruh latar tanah (Rondeaux et al., 1996), TRVI menggabungkan kanal NIR, RED, GREEN, dan BLUE (Mutanga et al., 2012), mRE_SR memanfaatkan rasio kanal red-edge terhadap red (Delegido et al., 2011), IRECI mengombinasikan kanal red-edge dan red untuk mengatasi efek saturasi pada vegetasi padat (Clevers and Gitelson, 2013), sementara CIR (Chlorophyll Index Red-Edge) menggunakan rasio red-edge terhadap red untuk mendeteksi kandungan klorofil relatif (Gitelson et al., 2002).

Nilai indeks vegetasi diekstraksi pada titik-titik sampel lapangan yang telah memiliki data stok karbon terukur hasil pengukuran non-destruktif. Data karbon lapangan dihitung berdasarkan model alometrik spesifik mangrove (Komiyama et al., 2005), yang kemudian dikonversi dari biomassa kering ke karbon menggunakan faktor konversi (Howard et al. 2014). Sebelum dilakukan analisis statistik, nilai indeks dan stok karbon diuji kenormalan dan homogenitas variansnya untuk memastikan validitas model linear.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di kawasan aforestasi mangrove

Hubungan antara setiap indeks vegetasi dengan stok karbon diuji menggunakan analisis regresi linear sederhana, di mana stok karbon (C , ton/ha²) digunakan sebagai variabel dependen dan indeks vegetasi (VI) sebagai variabel independen. Model persamaan umum yang digunakan adalah:

$$C = a \times VI + b$$

dengan a sebagai koefisien regresi (kemiringan) dan b sebagai konstanta. Nilai koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk menilai kekuatan hubungan linear antara kedua variabel. Indeks dengan nilai R^2 tertinggi dianggap memiliki kemampuan terbaik dalam menjelaskan variasi stok karbon lapangan. Analisis regresi dilakukan menggunakan *JavaScript API* pada Google Earth Engine dengan pembagian data secara acak (*random split*) menjadi 80% untuk data latih dan 20% untuk data uji (*train-test split*) untuk menghindari overfitting (Belgiu and Drăguț, 2016).

Selanjutnya, distribusi spasial setiap indeks divisualisasikan untuk menilai konsistensi pola nilai indeks terhadap kondisi vegetasi aktual. Interpretasi dilakukan secara komparatif dengan mengaitkan pola indeks tinggi–rendah terhadap kondisi struktur tegakan di lapangan berdasarkan hasil observasi vegetasi. Korelasi yang signifikan antara nilai indeks dan stok karbon menunjukkan kemampuan indeks dalam menangkap variasi struktural dan fisiologis vegetasi yang mempengaruhi akumulasi biomassa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran luasan tutupan, persentase tutupan mangrove, serta pengukuran kondisi perairan di kawasan mangrove aforestasi di pesisir Kecamatan Mawasangka, Kabupaten Buton Tengah ditunjukkan pada Tabel 1.

Kawasan aforestasi mangrove yang ada di lokasi penelitian merupakan hasil penanaman mangrove yang telah dilakukan sejak tahun 2007, serta terdiri atas satu spesies (*R. apiculata*). Luasan kawasan seluas 0,75 ha, dengan persentase tutupan kanopi 74,10±14,53%. Menurut Kepmen LH No. 201, tahun 2004, tutupan tersebut termasuk dalam kategori baik/padat. Selain itu, kondisi perairan di kawasan tersebut meliputi pH 8, temperature 27°C, serta salinitas 28 psu. Berikut merupakan tabel kerapatan dan INP mangrove berdasarkan kelas ukuran dbh.

Tabel 1. Luasan, persentase tutupan dan kondisi perairan

Jenis	Luasan (ha)	Tutupan (%)	Kategori	pH	Temperatur (°C)	Salinitas (psu)
<i>R. apiculata</i>	0,75	74,10±14,53	Baik/Padat	8	27	28

Keterangan: Kategori status tutupan mangrove mengacu kepada Kepmen LH No. 201, tahun 2004



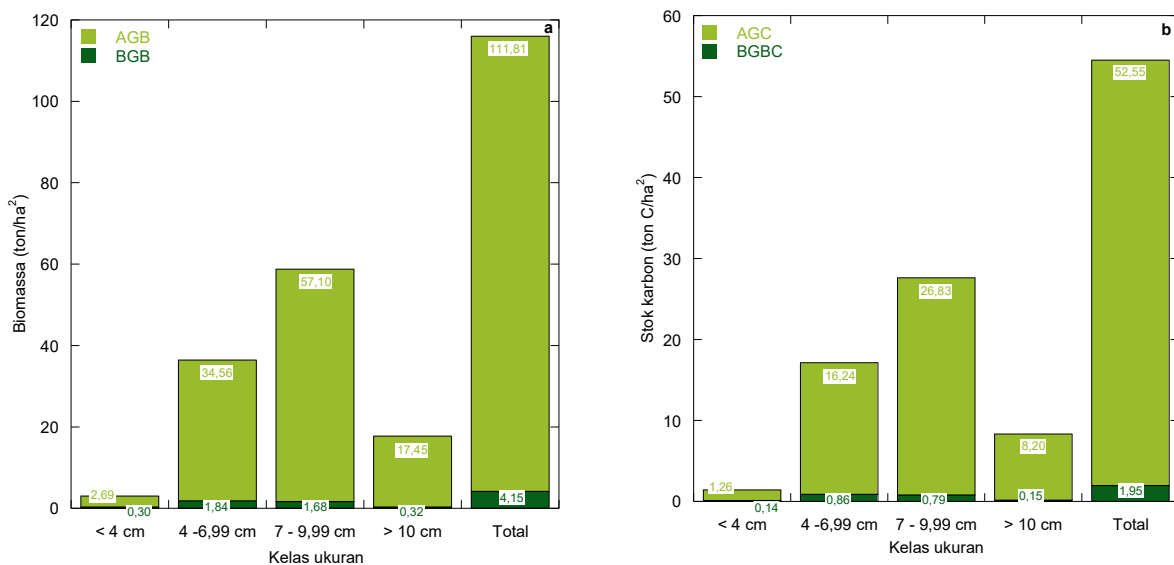
Gambar 2. Kondisi vegetasi mangrove di lokasi penelitian

Berdasarkan hasil survey, ukuran diameter batang (dbh) tegakan vegetasi mangrove berkisar antara 2-11 cm, serta dipisahkan menurut kelas ukuran dbh. Kelas ukuran dbh didominasi oleh ukuran 4-6,99 cm (2616,66 ind/ha²), diikuti oleh kelas ukuran 7-9,99 cm (1666,66 ind/ha²), kelas ukuran <4cm (666,66 ind/ha²), dan kelas ukuran >10 cm (250,00 ind/ha²). Total kerapatan mangrove sebesar 5200 ind/ha².

Berdasarkan data kerapatan mangrove tiap kelas ukuran dbh (Tabel 2) dapat disimpulkan bahwa tegakan *R. Apiculata* di lokasi penelitian ini merupakan tegakan muda yang masih dalam tahap pertumbuhan. Hal ini mengindikasikan bahwa tegakan *R. apiculata* masih berada pada fase pertumbuhan awal, ditunjukkan oleh dominasi kelas diameter kecil. Beberapa kawasan mangrove di Sulawesi Tenggara juga ditemukan tegakan muda mendominasi, seperti di kawasan mangrove pesisir Kecamatan Latambaga, Kabupaten Kolaka yang didominasi oleh kelas ukuran dbh 2-6 cm (Hasidu *et al.*, 2021a), serta di kawasan mangrove revegetasi alami dari bekas kawasan tambak pesisir Kabupaten Muna yang ditumbuhi spesies *Avicennia lanata* dengan ukuran dbh <2 cm (Hasidu *et al.*, 2021b). Selain karena faktor vegetasi yang masih cenderung dalam tahap awal pertumbuhan, dominasi mangrove dengan dbh yang kecil juga dapat disebabkan karena adanya aktivitas penebangan mangrove yang memiliki ukuran dbh yang lebih besar. (Kangkuso *et al.*, 2015) menemukan dominasi mangrove dengan kategori sapihan dan tiang (ukuran dbh relatif kecil) di luar kawasan konservasi TNRAW oleh karena adanya aktivitas penebangan mangrove di luar kawasan konservasi TNRAW sehingga menyisahkan mangrove muda.

Hasil analisis kerapatan, biomassa, stok karbon, dan kapasitas penyerapan CO₂ oleh mangrove yang ada di lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 3. AGB tertinggi berdasarkan kelas ukurannya diperoleh kelas ukuran 7 - 9,99 cm, yaitu 57,10 ton/ha², diikuti oleh kelas ukuran 4 - 6,99 cm, yaitu 34,56 ton/ha², kelas ukuran >10 cm, yaitu 17,45 ton/ha², dan kelas ukuran <4 cm, yaitu 2,69 ton/ha². Untuk total AGB yaitu 111,81 ton/ha². Sementara itu, BGB tertinggi pada kelas ukuran 4 - 6,99 cm, yaitu 1,84 ton/ha², diikuti oleh kelas ukuran 7 - 9,99 cm, yaitu 1,68 ton/ha², kelas ukuran >10 cm, yaitu 0,32 ton/ha², dan terakhir kelas ukuran <4 cm, yaitu 0,30 ton/ha². Untuk total BGB yaitu 4,15 ton/ha².

Untuk hasil analisis stok karbon mangrove, khususnya AGC tertinggi pada kelas ukuran 7-9,99 cm, sebesar 26,83 tonC/ha², diikuti oleh kelas ukuran 4-6,99 cm sebesar 16,24 tonC/ha², kelas ukuran >10 cm sebesar 8,20 tonC/ha², dan kelas ukuran <4cm sebesar 1,26 tonC/ha². Total AG C sebesar 52,55 tonC/ha². Sementara itu, BGBC tertinggi pada kelas ukuran 4-6,99 cm, yaitu 0,86 tonC/ha², diikuti oleh kelas ukuran 7-9,99 cm, yaitu 0,79 tonC/ha², kelas ukuran >10 cm, yaitu 0,15 tonC/ha², dan terakhir kelas ukuran <4 cm, yaitu 0,14 tonC/ha². Untuk total BGBC yaitu 1,95 tonC/ha².



Gambar 3. Biomassa (a), dan stok karbon (b)

Tabel 2. Kerapatan dan INP mangrove berdasarkan kelas ukuran dbh

Kelas Ukuran dbh (cm)	Jumlah	BA	K (ind/m ²)	KR (%)	F	FR (%)	Dom	DR (%)	INP (%)
< 4	40	369,63	0,07	12,82	1	26,09	0,62	3,42	42,32
4 -6,99	157	3782,36	0,26	50,32	1	26,09	6,30	34,95	111,36
7 - 9,99	100	5259,95	0,17	32,05	1	26,09	8,77	48,61	106,74
> 10	15	1409,78	0,025	4,81	0,83	21,74	2,35	13,03	39,57
			0,52	100	3,83	100	18,04	100	300

Beberapa penelitian terdahulu di kawasan mangrove Sulawesi Tenggara memperoleh biomassa dan stok karbon yang jauh lebih besar dari hasil yang diperoleh dalam penelitian ini. Di kawasan pulau kecil di gugusan Kepulauan Tiworo, Kabupaten Muna Barat diperoleh AGB yang jauh lebih besar dari hasil yang diperoleh di penelitian ini, yaitu berkisar antara 213,26–506,24 ton/ha², dan stok karbon berkisar 100,23 – 237,84 ton C/ha² (Maharani *et al.*, 2023). Di pesisir Kabupaten Kolaka, (Hasidu *et al.*, 2022) memperoleh total AGB dan AGC yang juga lebih besar, yaitu 1242 ton/ha² dan 583,85 ton C/ha².

Jika hasil yang diperoleh dalam penelitian ini dibandingkan dengan kawasan rehabilitasi mangrove Desa Kaliwlingi, Brebes menunjukkan mangrove yang ditanam pada tahun 2005 memiliki total biomassa 178,38 ton/ha² dan stok karbon total sebesar 80,69 ton C/ha². Usia hasil penanaman mangrove di kawasan tersebut yaitu ±15 tahun (penanaman tahun 2005, dan penelitian tahun 2020) (Albasit *et al.*, 2022). Di kawasan penanaman mangrove lainnya di pesisir Yogyakarta, usia mangrove hasil penanaman yaitu ±14 tahun. Diperoleh total karbon *Rhizophora* sp. sebesar 16,08±9,81 ton C/ha², dengan rincian AGC 12,98±7,75 ton C/ha², dan BGC 3,1±2,32 ton C/ha² (Budiadi, 2020). Hasil tersebut jauh lebih kecil dibandingkan hasil yang diperoleh dalam penelitian ini. Nilai biomassa dan stok karbon umumnya dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya komposisi spesies, kerapatan vegetasi, ukuran dbh maupun kondisi lingkungan tempat tumbuhnya.

Hasil analisis hubungan antara enam indeks vegetasi dengan stok karbon teramati menunjukkan bahwa seluruh indeks memiliki korelasi positif dan signifikan terhadap nilai karbon tegakan *R. apiculata* hasil aforestasi di Kecamatan Mawasangka. Secara umum, seluruh indeks menunjukkan pola sebaran nilai yang konsisten dengan kondisi vegetasi aktual di lapangan, di mana area dengan nilai indeks tinggi cenderung berada pada bagian tengah hingga utara kawasan yang merupakan lokasi vegetasi mangrove yang lebih padat dan matang. Sementara itu, nilai indeks yang rendah banyak dijumpai di bagian tepi atau daerah terbuka yang masih dalam tahap pertumbuhan awal.

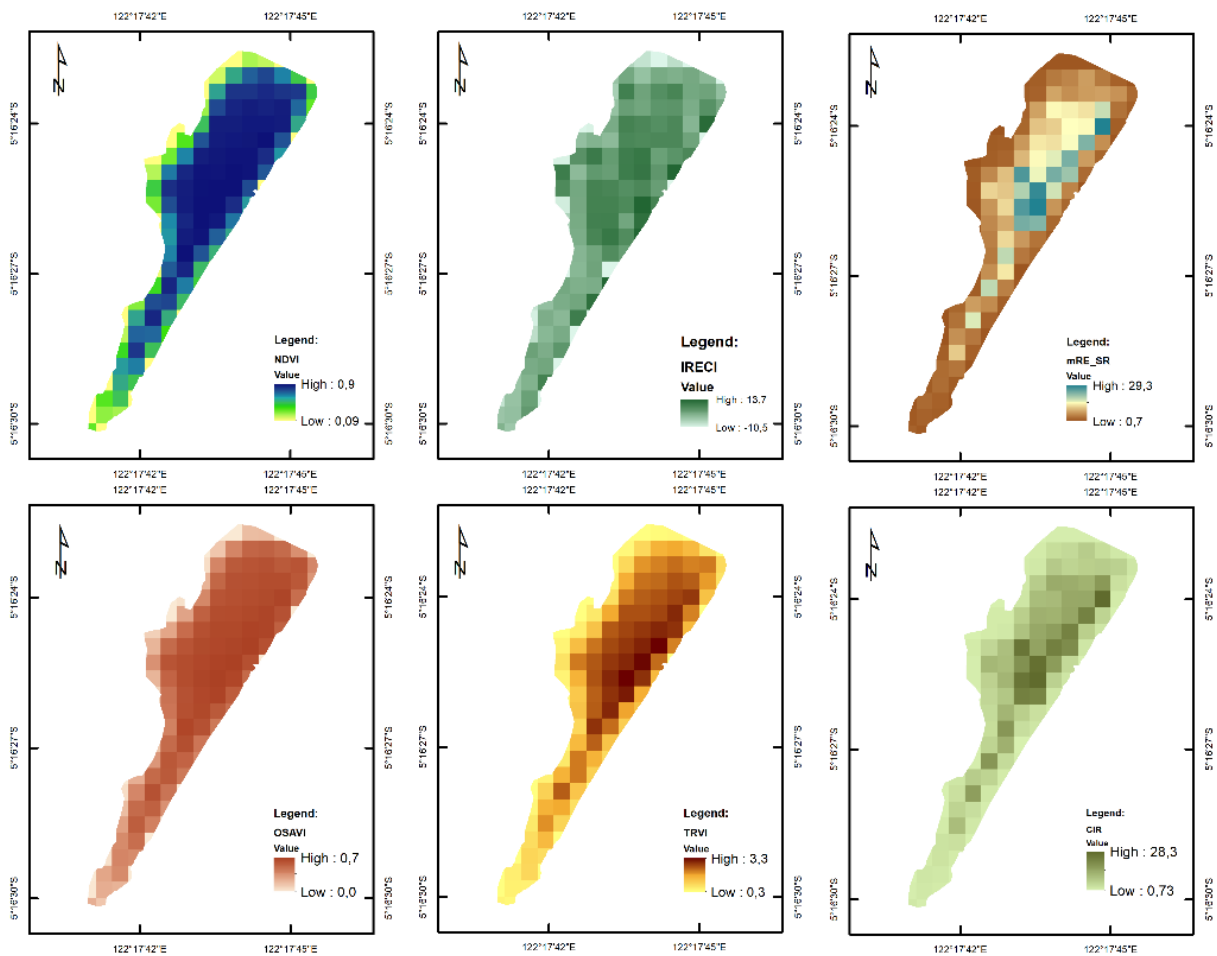
Nilai NDVI yang tinggi mengindikasikan area dengan reflektansi NIR yang kuat dan pantulan kanal merah yang rendah karakteristik khas vegetasi hijau sehat dengan kandungan klorofil tinggi (Huete *et al.*, 2002; Pettorelli *et al.*, 2005). Pola spasial NDVI menunjukkan konsentrasi vegetasi padat di bagian tengah-atas kawasan, sesuai dengan lokasi utama tegakan *R. apiculata* dewasa. Nilai tinggi pada IRECI mencerminkan tingkat fotosintesis dan vigor tanaman yang baik. Distribusi spasial IRECI mirip dengan NDVI, namun lebih menonjol pada area dengan kanopi padat karena sensitivitas red-edge terhadap variasi tajuk yang tidak dapat ditangkap sepenuhnya oleh NDVI konvensional. Namun, pada kawasan penelitian, pola spasial mRE_SR tampak lebih terfragmentasi dibandingkan NDVI atau IRECI. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh heterogenitas tajuk mangrove dan variasi kerapatan tegakan, di mana mRE_SR lebih peka terhadap variasi lokal kanopi daripada kondisi vegetasi secara keseluruhan (Delegido *et al.*, 2011).

OSAVI (*Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index*) memiliki rentang nilai dari ≈0.0 hingga ≈0.7. OSAVI dirancang untuk mengoreksi pengaruh latar tanah pada pantulan vegetasi, terutama pada area dengan tutupan sedang hingga jarang (Rondeaux *et al.*, 1996). Nilai OSAVI tinggi pada area mangrove yang relatif padat menunjukkan kemampuannya untuk tetap memberikan respon yang stabil meskipun terdapat perbedaan substrat lumpur atau pasir di sekitar akar mangrove.

Indeks ini relevan pada kawasan mangrove muda yang belum menutup penuh kanopi. Pada kawasan penelitian, nilai TRVI tinggi berasosiasi dengan tegakan yang lebih rapat dan berkanopi lebat. Indeks ini tampak mampu membedakan vegetasi muda dan dewasa dengan baik karena sensitif terhadap variasi struktur tajuk yang kompleks. CIR (*Chlorophyll Index-Red Edge*) memperlihatkan rentang nilai dari ≈ 0.73 hingga ≈ 28.3 . Indeks ini menekankan perbandingan antara reflektansi red-edge dan red untuk mengukur kandungan klorofil relatif (Gitelson *et al.*, 2002). Nilai tinggi pada CIR menunjukkan konsentrasi klorofil yang besar, meskipun pola sebarannya sedikit lebih homogen dibandingkan indeks lainnya. CIR cenderung lebih efektif untuk klasifikasi vegetatif vs non-vegetatif dibandingkan untuk membedakan tingkat biomassa antar tegakan mangrove yang sudah relatif homogen.

Nilai koefisien determinasi (R^2) berkisar antara 0,7092 hingga 0,7636, yang mengindikasikan bahwa variasi indeks vegetasi mampu menjelaskan sekitar 71–76% variasi stok karbon lapangan. Persamaan regresi linear antara masing-masing indeks dan stok karbon disajikan pada Tabel 3.

Nilai R^2 yang tinggi menunjukkan bahwa indeks vegetasi efektif untuk mengestimasi stok karbon mangrove hasil aforestasi. Indeks TRVI menunjukkan nilai korelasi tertinggi ($R^2 = 0.7636$), diikuti oleh IRECI ($R^2 = 0.7619$). Hal ini menandakan bahwa penggunaan kanal *red-edge* dan kombinasi spektral yang lebih kompleks mampu meningkatkan sensitivitas model terhadap variasi struktural kanopi mangrove. Peningkatan nilai indeks vegetasi berbanding lurus dengan kenaikan stok karbon, sejalan dengan prinsip dasar penginderaan jauh vegetasi bahwa reflektansi tinggi pada kanal *near-infrared* (NIR) dan rendah pada kanal *red* menggambarkan tingkat kerapatan tajuk dan biomassa yang lebih besar (Huete *et al.*, 2002).



Gambar 4. Peta indeks vegetasi di lokasi penelitian

Tabel 3. Persamaan regresi linear stok karbon dengan masing-masing indeks

Indeks	Persamaan Regresi	R ²
NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	$y = 431.03x - 142.89$	0.7299
TRVI (<i>Triangular Vegetation Index</i>)	$y = 159.83x - 211.9$	0.7636
OSAVI (<i>Optimized Soil Adjusted Vegetation Index</i>)	$y = 360.65x - 105.3$	0.7314
mRE_SR (<i>Modified Red-Edge Simple Ratio Index</i>)	$y = 448.65x - 67.41$	0.7092
IRECI (<i>Inverted Red-Edge Chlorophyll Index</i>)	$y = 354.95x - 7.5811$	0.7619
CIR (<i>Chlorophyll Index Red-Edge</i>)	$y = 138.12x - 1.2596$	0.7101

NDVI sebagai indeks vegetasi konvensional masih menunjukkan korelasi kuat ($R^2 = 0.7299$), meskipun memiliki keterbatasan pada vegetasi berkanopi rapat akibat efek saturasi (*saturation effect*), di mana peningkatan biomassa tidak lagi berbanding lurus dengan kenaikan nilai indeks (Myneni *et al.*, 1995). OSAVI, yang merupakan modifikasi NDVI dengan konstanta koreksi latar tanah, menunjukkan kestabilan yang lebih baik pada area revegetasi yang masih memiliki substrat berlumpur, sebagaimana dijelaskan oleh Rondeaux *et al.*, (1996).

Sementara itu, indeks TRVI memperlihatkan performa paling tinggi karena menggabungkan empat kanal spektral (NIR, RED, GREEN, BLUE) yang lebih mampu menangkap kompleksitas reflektansi tajuk *R. apiculata*. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Mutanga *et al.*, (2012) yang menunjukkan bahwa indeks berbasis kombinasi multi-spektral mampu meningkatkan akurasi estimasi biomassa di ekosistem bervegetasi padat.

Indeks OSAVI dan IRECI juga menunjukkan performa yang kompetitif dengan nilai R^2 di atas 0.73. IRECI secara khusus dirancang untuk memperbaiki masalah saturasi pada NDVI dengan memanfaatkan kombinasi *red-edge* dan *red bands* yang sensitif terhadap perbedaan kandungan klorofil serta struktur daun (Clevers and Gitelson, 2013). Keterkaitan ini menunjukkan karakteristik mangrove yang memiliki kanopi rapat dan reflektansi tinggi pada spektrum *red-edge*, sehingga korelasi yang tinggi antara IRECI dan stok karbon memperkuat hasil penelitian (Gitelson *et al.*, 2002) tentang efektivitas indeks *red-edge* dalam mendeteksi biomassa tinggi pada hutan tropis.

Sebaliknya, mRE_SR dan CIR menunjukkan nilai korelasi yang sedikit lebih rendah (R^2 sekitar 0.71). Hal ini dapat disebabkan oleh sensitivitas keduanya yang lebih tinggi terhadap variasi klorofil daun dibandingkan terhadap struktur biomassa tegakan secara keseluruhan. Dalam konteks ekosistem mangrove, stok karbon lebih dipengaruhi oleh karakteristik struktural seperti diameter batang dan tinggi pohon, bukan semata kandungan klorofil (Kumar *et al.*, 2015). Oleh karena itu, indeks yang menekankan pada struktur tajuk dan variasi reflektansi spektral, seperti TRVI dan IRECI, memberikan hasil estimasi yang lebih representatif.

Hasil prediksi terhadap data uji menunjukkan konsistensi yang baik antara nilai karbon hasil estimasi dan nilai karbon observasi lapangan. Estimasi total biomassa di atas permukaan (*above-ground biomass*, AGB) di area kajian diperoleh sebesar $\pm 103,40$ ton, yang setelah dikonversi menggunakan faktor karbon 0,47 (Kauffman and Donato., 2012), menghasilkan total stok karbon sebesar $\pm 48,6$ ton C. Nilai ini mencerminkan fase pertumbuhan menengah dari tegakan *R. apiculata* hasil aforestasi dan berada dalam kisaran stok karbon yang dilaporkan pada hutan mangrove sekunder di wilayah pesisir Indonesia, yaitu antara 40–80 ton C/ha untuk tegakan berumur 10–15 tahun (Donato *et al.*, 2011; Murdiyarsa *et al.*, 2015).

Konsistensi hasil antara model prediktif dan pengamatan lapangan menunjukkan bahwa pendekatan penginderaan jauh berbasis Google Earth Engine mampu memberikan estimasi karbon yang efisien, terstandar, dan dapat direplikasi di kawasan pesisir dengan kondisi ekologis serupa (Bunting *et al.*, 2018). Secara ekologis, hasil analisis menunjukkan bahwa kegiatan aforestasi *R. apiculata* di Kecamatan Mawasangka telah memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan simpanan karbon biru (*blue carbon stock*). Mangrove hasil rehabilitasi terbukti dapat memulihkan fungsi ekosistem penyerap karbon, terutama melalui peningkatan biomassa tajuk dan akumulasi karbon organik pada jaringan kayu (Murdiyarsa *et al.*, 2015; Hasidu *et al.*, 2021b).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa tegakan mangrove *R. apiculata* hasil aforestasi di pesisir Kecamatan Mawasangka, Kabupaten Buton Tengah memiliki potensi yang cukup baik dalam menyimpan karbon meskipun masih dalam tahap pertumbuhan. Tegakan *R. apiculata* dalam penelitian ini didominasi oleh kelas ukuran dbh yang kecil (4-6,99 cm) dengan kerapatan total 5200 ind/ha², dan tingkat tutupan kanopi 74,10% yang termasuk ke dalam kategori baik/padat. Hasil pengamatan langsung yang mengestimasi biomassa dan karbon menggunakan model allometrik menunjukkan total biomassa sebesar 115,97 ton/ha², dengan stok karbon total 54,50 ton C/ha². Nilai tersebut menunjukkan kontribusi aforestasi mangrove terhadap peningkatan cadangan karbon biru di wilayah pesisir. Analisis karbon menggunakan pendekatan *Google Earth Engine* (GEE) berhasil mengonfirmasi hasil tersebut, dimana indeks vegetasi, khususnya TRVI dan IRECI memiliki korelasi yang cukup tinggi ($R^2 > 0,76$) terhadap stok karbon. Hal ini menandakan kedua indeks tersebut cukup baik dalam memprediksi distribusi karbon dalam penelitian ini. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa kombinasi pengukuran secara langsung menggunakan metode allometrik dan pemanfaatan teknologi penginderaan jauh berbasis GEE efektif untuk mengestimasi biomassa dan stok karbon mangrove *R. apiculata* hasil aforestasi secara efisien. Upaya konservasi dan perluasan area aforestasi *R. apiculata* perlu dilanjutkan untuk meningkatkan potensi penyerapan karbon dan mendukung mitigasi perubahan iklim di kawasan pesisir.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih kepada pimpinan LPPM dan pimpinan Universitas Sembilanbelas November Kolaka atas hibah Penelitian Dosen dan Mahasiswa (PDM) tahun 2025, No. 331/UN56/HK.03.00/2025. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Kemal Muhsandi yang bersedia menjadi asisten peneliti, serta seluruh mahasiswa program studi ilmu kelautan USN Kolaka yang ikut terlibat dalam proses pengambilan data di lapangan.

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.
- Albasit, L.Z., Pribadi, R. & Pramesti, R. 2022. Estimasi stok karbon mangrove pasca rehabilitasi di Desa Kaliwlingi, Brebes menggunakan citra Sentinel-2. *Journal of Marine Research*, 11(4): 620–640. DOI: 10.14710/jmr.v11i4.31734.
- Analuddin, K., Kadidae, L.O., Haya, L.O.M.Y., Septiana, A., Sahidin, I., Syahrir, L., Rahim, S., Fajar, L.O.A. & Nadaoka, K. 2020. Aboveground biomass, productivity and carbon sequestration in *Rhizophora stylosa* mangrove forest of Southeast Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(4): 1316–1325. DOI: 10.13057/biodiv/d21 0407.
- Analuddin, K., Sharma, S., Kadidae, L.O., Haya, L.O.M.Y., Septiana, A., Rahim, S., Syahrir, L., Aba, L., Fajar, L.O.A., MacKenzie, R.A. & Nadaoka, K. 2023. Blue carbon stock in sediments of mangroves and seagrass ecosystems at Southeast Sulawesi, Indonesia. *Ecological Research*, 38(4): 508–520. DOI: 10.1111/1440-1703.12374.
- Arifanti, V.B. 2020. Mangrove management and climate change: a review in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 487(1): 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/487/1/012022.
- Belgiu, M. & Drăguț, L. 2016. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114: 24–31. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011.
- Budiadi, B. 2020. Pendugaan simpanan karbon pada kawasan rehabilitasi pesisir selatan Pulau Jawa. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 14(1): 71–83. DOI: 10.22146/jik.57473.

- Bunting, P., Rosenqvist, A., Lucas, R.M., Rebelo, L.M., Hilarides, L., Thomas, N., Hardy, A., Itoh, T., Shimada, M. & Finlayson, C.M. 2018. The Global Mangrove Watch—a new 2010 global baseline of mangrove extent. *Remote Sensing*, 10(10): 1669. DOI: 10.3390/rs10101669.
- Cameron, C., Hutley, L.B. & Friess, D.A. 2019. Estimating the full greenhouse gas emissions offset potential and profile between rehabilitating and established mangroves. *Science of The Total Environment*, 665: 419–431. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.104.
- Clevers, J.G.P.W. & Gitelson, A.A. 2013. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23: 344–351. DOI: 10.1016/j.jag.2012.10.008.
- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L. & Moreno, J. 2011. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors*, 11(7): 7063–7081. DOI: 10.3390/s110707063.
- Dharmawan, I.W.E., Suyarso, Ulumuddin, Y.I., Prayudha, B. & Pramudji. 2020. Panduan monitoring struktur komunitas mangrove di Indonesia. Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Penerbit PT Media Sains Nasional, Bogor, Indonesia. ISBN: 978-623-94306-0-3.
- Dharmayasa, I.G.N.P., Sugiana, I.P., Putri, P.Y.A. & Boonyasana, K. 2024. Assessment of soil fraction, carbon storage capacity, and rate of carbon uptake from three coastal ecosystems: mangroves, seagrass, and mudflats in Benoa Bay, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 25(6): 2541–2549. DOI: 10.13057/biodiv/d250623.
- 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.
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R. & Rundquist, D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 76–87. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R. 2017. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- Hasidu, L.O.A.F., Bantun, S., Saleh, R., Afrianti, I., Aba, L., Sety, L.O.M., Hasria, Prasetya, A., Arianto, Yulianti, E.T., Kamaruddin, A.A., Alghi, A.F., Safar, M. & Hamid, F. 2023a. Mitigasi bencana pesisir: pemberdayaan komunitas nelayan Sipatuo melalui penanaman mangrove di Kelurahan Taha, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara. *Dharma Raflesia: Jurnal Ilmiah Pengembangan dan Penerapan IPTEKS*, 21(2): 227–239. DOI: 10.33369/dr.v21i2.30751.
- Hasidu, L.O.A.F., Maharani, Kharisma, G.N., Saleh, R., Simamora, P.G., Rezeki, S., Prasetya, A., Nadia, L.O.M.H. & Adimu, H.E. 2023b. Stok karbon organik sedimen di kawasan ekosistem mangrove pesisir Kabupaten Kolaka Sulawesi Tenggara. *Jurnal Sumberdaya Hayati*, 9(3): 104–108. DOI: 10.29244/jsdh.9.3.104-108.
- Hasidu, L.O.A.F., Prasetya, A. & Ode, A.T.L. 2021b. Karakteristik vegetasi dan simpanan karbon sedimen kawasan regenerasi mangrove *Avicennia lanata* (Ridley) di pesisir Kabupaten Muna. *BioWallacea: Jurnal Penelitian Biologi (Journal of Biological Research)*, 8(2): 134–143.
- Hasidu, L.O.A.F., Prasetya, A., Maharani, Anisa, N., Utami, R.T. & Nadia, L.M.H. 2022a. Struktur komunitas, biomassa permukaan dan status simpanan karbon biru di kawasan mangrove terdegradasi Kabupaten Kolaka. *Journal of Marine Research*, 11(4): 667–675. DOI: 10.14710/jmr.v11i4.35058.
- Hasidu, L.O.A.F., Prasetya, A., Maharani, Asni, Agusriyadin, Mubarak, A.A., Ibrahim, A.F., Kamur, S. & Kharisma, G.N. 2021a. Analisis vegetasi, estimasi biomassa dan stok karbon ekosistem mangrove pesisir Kecamatan Latambaga, Kabupaten Kolaka. *JSiPi (Jurnal Sains dan Inovasi Perikanan)*, 5(2): 60–71. DOI: 10.33772/jsipi.v5i2.9371.
- Hasidu, L.O.A.F., Prasetya, A., Maharani, Syaiful, M. & Analuddin, K. 2022b. Allometric model, aboveground biomass and carbon sequestration of natural regeneration of *Avicennia lanata* (Ridley) at in-active pond of Muna Regency, Southeast Sulawesi. *HAYATI Journal of Biosciences*, 29(3): 399–408. DOI: 10.4308/hjb.29.3.399-408.
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M. & Pidgeon, E. 2014. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and

- seagrasses. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature, Arlington, Virginia, USA.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. & Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2): 195–213. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- Husnayaen, Amela, P., Arini, D.P. & Putra, I.K.A. 2023. Pemetaan sebaran dan kerapatan hutan mangrove menggunakan machine learning pada Google Earth Engine dan sistem informasi geografi di Pulau Bali. *Jurnal Perikanan Unram*, 13(1): 266–277. DOI: 10.29303/jp.v13i1.474.
- Husnayaen, Anhar, A., Bela, R. & Arini, D.P. 2025. Mapping mangrove forest density distribution and deforestation with machine learning on Google Earth Engine in West Nusa Tenggara Province. *Acta Aquatica: Aquatic Sciences Journal*, 1(1): 83–92. DOI: 10.29103/aa.v1i1.18783.
- Indrayani, E., Kalor, J.D., Warpur, M. & Hamuna, B. 2021. Using allometric equations to estimate mangrove biomass and carbon stock in Demta Bay, Papua Province, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 22(5): 263–271. DOI: 10.12911/22998993/135945.
- Kangkuso, A., Jamili, J., Septiana, A., Raya, R., Sahidin, I., Rianse, U., Rahim, S., Alfirman, A., Sharma, S. & Nadaoka, K. 2016. Allometric models and aboveground biomass of *Lumnitzera racemosa* Willd. forest in Rawa Aopa Watumohai National Park, Southeast Sulawesi, Indonesia. *Forest Science and Technology*, 12(1): 43–50. DOI: 10.1080/21580103.2015.1034191.
- Kangkuso, A., Jamili, Septiana, A., Izal, Fajar, L.O.A., Raya, R., Sahidin, I., Rianse, U., Rahim, S., Alfirman, Sharma, S. & Nadaoka, K. 2015. Aboveground biomass status and management effort of unprotected mangrove forest at the surrounding areas of Rawa Aopa Watumohai National Park, Indonesia. *Advances in Environmental and Geological Science and Engineering*: 393–400. ISBN: 978-1-61804-314-6.
- Kangkuso, A., Sharma, S., Jamili, J., Septiana, A., Sahidin, I., Rianse, U., Rahim, S. & Nadaoka, K. 2018. Trends in allometric models and aboveground biomass of family Rhizophoraceae mangroves in the Coral Triangle ecoregion, Southeast Sulawesi, Indonesia. *Journal of Sustainable Forestry*, 37(7): 691–711. DOI: 10.1080/10549811.2018.1453843.
- Kauffman, J.B. & Donato, D.C. 2012. Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. Center for International Forestry Research (CIFOR). DOI: 10.17528/cifor/003749.
- Kauffman, J.B., Fernanda, M., Arifanti, V.B., Schile-Beers, L.M., Bernardino, A.F., Bhomia, R.K., Donato, D.C., Feller, I.C., Ferreira, T.O., Garcia, M.D.C.J., MackKenzie, R.A., Megonigal, J.P., Murdiyarso, D., Simpson, L. & Trejo, H.H. 2020. Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecological Monographs*, 90(2): e01405. DOI: 10.1002/ecm.1405.
- Kauffman, J.B., Fernanda, M., Arifanti, V.B., Schile-Beers, L.M., Bernardino, A.F., Bhomia, R.K., Donato, D.C., Feller, I.C., Ferreira, T.O., Garcia, M.D.C.J., MackKenzie, R.A., Megonigal, J.P., Murdiyarso, D., Simpson, L. & Trejo, H.H. 2020. Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecological Monographs*, 90(2): e01405. DOI: 10.1002/ecm.1405.
- Keputusan Menteri LH tahun 2004. Surat Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No 201 Tentang Kriteria Baku Dan Pedoman Penentuan Kerusakan Mangrove. No. 201, Indonesia.
- Kharisma, G.N., Hasidu, L.O.A.F., Mandaya, I., Sidiq, A., Harsanto, M. & Prasetya, A. 2023. Studi kerapatan dan perubahan tutupan mangrove menggunakan citra satelit di Kecamatan Lasalepa, Kabupaten Muna. *Majalah Ilmiah Globē*, 25(1): 13–20.
- Kharisma, G.N., Hasidu, L.O.A.F., Mandaya, I., Sidiq, A., Harsanto, M. & Prasetya, A. 2023. Studi kerapatan dan perubahan tutupan mangrove menggunakan citra satelit di Kecamatan Lasalepa, Kabupaten Muna. *Majalah Ilmiah Globē*, 25(1): 13–20.
- 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.
- 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.

- Kumar, L., Sinha, P., Taylor, S. & Alqurashi, A.F. 2015. Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1): 097696. DOI: 10.1117/1.JRS.9.097696.
- Kumar, L., Sinha, P., Taylor, S. & Alqurashi, A.F. 2015. Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1): 097696. DOI: 10.1117/1.JRS.9.097696.
- Maharani, Kharisma, G.N., Hasidu, L.O.A.F., Ardiansyah, I., Prasetya, A., Riska, Agusrinal, Rosalina, D. & Ansar, S. 2023. Stok karbon dan status kondisi komunitas mangrove Pulau Simuang Kepulauan Tiworo Sulawesi Tenggara. *Journal of Marine Research*, 12(4): 717–726. DOI: 10.14710/jmr.v12i4.41024.
- Murdiyarsa, D., Purbopuspito, J., Kauffman, J.B., Warren, M.W., Sasmito, S.D., Donato, D.C., Manuri, S., Krisnawati, H., Taberima, S. & Kurnianto, S. 2015. The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 5(12): 1089–1092. DOI: 10.1038/nclimate2734.
- Mutanga, O., Adam, E. & Cho, M.A. 2012. High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 399–406. DOI: 10.1016/j.jag.2012.03.012.
- Myneni, R.B., Hall, F.G., Sellers, P.J. & Marshak, A.L. 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2): 481–486. DOI: 10.1109/TGRS.1995.8746029.
- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J. & Stenseth, N.C. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9): 503–510. DOI: 10.1016/j.tree.2005.05.011.
- Phan, S.M., Nguyen, H.T.T. & Lovelock, C. 2019. Modelling above ground biomass accumulation of mangrove plantations in Vietnam. *Forest Ecology and Management*, 432: 376–386. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.09.028.
- Rondeaux, G., Steven, M. & Baret, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2): 95–107. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00186-7.
- Rudia, L.O.A.P., Izal, Syah, M.A., Phradiansyah, Puteri, N., Cahyani, P. & Hasidu, L.O.A.F. 2024. Mangrove nursery training for marine and fisheries student group in Buton Tengah Regency. *Majalah Pengabdian Indonesia*, 1(1): 25–32. DOI: 10.69616/m.v1i1.6.
- Samadi, F., Halili & Hamid, A. 2025. Analisis spatio temporal padang lamun Kawasan Konservasi Perairan Teluk Moramo Area II dengan menggunakan platform Google Earth Engine. *Journal of Fishery Science and Innovation*, 9(2): 250–258. DOI: 10.33772/jsipi.v9i2.1111.
- Sasmito, S.D., Sillanpää, M., Hayes, M.A., Bachri, S., Saragi-Sasmito, M.F., Sidik, F., Hanggara, B.B., Mofu, W.Y., Rumbiak, V.I., Hendri, Taberima, S., Suhaemi, Nugroho, J.D., Pattiasina, T.F., Widagti, N., Barakalla, Rahajoe, J.S., Hartantri, H., Nikijuluw, V., Jowey, R.N., Heatubun, C.D., Ermgassen, P.Z., Worthington, T.A., Howard, J., Lovelock, C.E., Friess, D.A., Hutley, L.B. & Murdiyarsa, D. 2020. Mangrove blue carbon stocks and dynamics are controlled by hydrogeomorphic settings and land-use change. *Global Change Biology*, 26(5): 3028–3039. DOI: 10.1111/gcb.15056.
- Sidik, F. & Lovelock, C.E. 2013. CO₂ efflux from shrimp ponds in Indonesia. *PLoS ONE*, 8(6): e66329. DOI: 10.1371/journal.pone.0066329.
- Suprayogi, B., Purbopuspito, J., Harefa, M.S., Panjaitan, G.Y. & Nasution, Z. 2022. Ecosystem carbon stocks of restored mangroves and its sequestration in Northern Sumatra Coast, Indonesia. *Universal Journal of Agricultural Research*, 10(1): 1–19. DOI: 10.13189/ujar.2022.100101.
- Sutaryo, D. 2009. Penghitungan biomassa: sebuah pengantar untuk studi karbon dan perdagangan karbon. Wetlands International Indonesia Programme, Bogor.
- Usman, A.H.A., Hartoyo, A.P.P. & Kusmana, C. 2022. Use of *Rhizophora apiculata* and its cut-propagule seedling method for mangrove rehabilitation in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1109(1): 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/1109/1/012093.