



## Analisis Sekuestrasi Karbon dan Stok Karbon pada Hutan Mangrove di Desa Waworaha, Kecamatan Soropia, Kabupaten Konawe

*(Analysis of Carbon Sequestration and Carbon Stocks in Mangrove Forests of Waworaha Village, Soropia District, Konawe Regency)*

Lies Indriyani, Kahirun, Ayu Wulandari, La Ode Muhammad Erif\*

Program Studi Ilmu Lingkungan, Fakultas Kehutanan dan Ilmu Lingkungan, Universitas Halu Oleo, Kampus Bumi Tridharma Anduonohu, Jalan H.E.A. Mokodompit, Kota Kendari, Sulawesi Tenggara, kode pos 93232. Indonesia

### Informasi Artikel:

Submission : 02 Juli 2025  
Revised : 13 Oktober 2025  
Accepted : 14 Oktober 2025  
Published : 01 Desember 2025

### \*Penulis Korespondensi:

La Ode Muhammad Erif  
Program Studi Ilmu Lingkungan, Fakultas  
Kehutanan dan Ilmu Lingkungan, Universitas  
Halu Oleo, Kampus Bumi Tridharma  
Anduonohu, Jalan H.E.A. Mokodompit, Kota  
Kendari, Sulawesi Tenggara, kode pos 93232.  
Indonesia  
e-mail: [laodemuhammad.erif@uho.ac.id](mailto:laodemuhammad.erif@uho.ac.id)  
Telp: +6285291818100

Makila 19 (2) 2025: 370-382

DOI:

<https://doi.org/10.30598/makila.v19i2.21568>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Copyright ©2025 Author(s): Lies Indriyani, Kahirun, Ayu Wulandari, La Ode Muhammad Erif

Journal homepage:  
<https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/makila>  
Journal e-mail: [makilajournal@gmail.com](mailto:makilajournal@gmail.com)

Research Article · [Open Access](#)

### ABSTRACT

Mangrove ecosystems play a strategic role in global climate change mitigation due to their capacity to sequester and store carbon. This study aims to analyse carbon sequestration and carbon stocks in the mangrove forests of Waworaha Village, Soropia District, Konawe Regency. The research was conducted in February 2025 using a non-destructive sampling approach combined with established allometric equations to estimate aboveground biomass, with carbon content assumed to be 50% of the total biomass. Seven plots measuring 20 m × 20 m were purposively established based on mangrove zonation and substrate characteristics. Diameter at breast height (DBH) was measured for trees ≥10 cm, and data were analysed descriptively to quantify biomass variation across species and plots. The results indicate that mean biomass, carbon sequestration, and carbon stock values reached 174.76 tons/ha, 295.05 tons CO<sub>2</sub>/ha, and 80.38 tons C/ha, respectively. Among recorded species, *Sonneratia alba* exhibited the highest carbon values, while *Rhizophora apiculata* contributed the lowest, reflecting significant interspecific variation influenced by morphological traits, density, and environmental conditions. Spatial variability across plots suggests the influence of tidal inundation frequency, nutrient availability, and substrate stability on biomass accumulation. These findings underscore the ecological significance of mangrove forests in storing blue carbon and their contribution to Indonesia's Nationally Determined Contribution (NDC). The study recommends targeted rehabilitation in low-density plots, prioritising high-biomass species to enhance carbon uptake. Further research integrating soil carbon pools is essential to generate comprehensive carbon estimates for sustainable mangrove management.

**KEYWORDS:** Mangrove forest, biomass, carbon sequestration, carbon stock, blue carbon.

---

## INTISARI

Ekosistem mangrove memiliki peran strategis dalam mitigasi perubahan iklim global melalui kemampuan menyerap dan menyimpan karbon. Penelitian ini bertujuan menganalisis sekuestrasi karbon dan stok karbon pada hutan mangrove di Desa Waworaha, Kecamatan Soropia, Kabupaten Konawe. Penelitian dilaksanakan pada Februari 2025 menggunakan pendekatan pengambilan sampel non-destruktif yang dikombinasikan dengan persamaan alometrik untuk mengestimasi biomassa di atas permukaan tanah, dengan kandungan karbon diasumsikan sebesar 50% dari total biomassa. Sebanyak tujuh plot berukuran 20 m × 20 m ditetapkan secara purposif berdasarkan zonasi mangrove dan karakter substrat. Pengukuran diameter setinggi dada (DBH) dilakukan pada pohon dengan diameter ≥10 cm, dan data dianalisis secara deskriptif untuk menggambarkan variasi antarspesies dan antarplot. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai rata-rata biomassa, sekuestrasi karbon, dan stok karbon masing-masing mencapai 174,76 ton/ha, 295,05 ton CO<sub>2</sub>/ha, dan 80,38 ton C/ha. Spesies *Sonneratia alba* memiliki nilai stok karbon tertinggi, sedangkan *Rhizophora apiculata* terendah, mencerminkan variasi interspesifik akibat perbedaan morfologi, kerapatan, dan kondisi lingkungan. Variabilitas spasial antarplot mengindikasikan pengaruh frekuensi pasang surut, ketersediaan nutrien, dan stabilitas sedimen terhadap akumulasi biomassa. Temuan ini menegaskan pentingnya hutan mangrove sebagai penyimpan karbon biru serta kontribusinya terhadap pencapaian Nationally Determined Contribution (NDC) Indonesia. Rehabilitasi pada plot berkerapatan rendah dengan prioritas spesies berbiomassa tinggi direkomendasikan untuk meningkatkan kapasitas serapan karbon. Penelitian lanjutan yang mencakup karbon tanah diperlukan guna memperoleh estimasi yang lebih komprehensif bagi pengelolaan mangrove berkelanjutan.

**KATA KUNCI:** Hutan mangrove, biomassa, sekuestrasi karbon, stok karbon, karbon biru.

---

## PENDAHULUAN

Pemanasan global merupakan salah satu isu lingkungan paling krusial secara global saat ini. Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK), terutama karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), menjadi penyebab utama perubahan iklim melalui efek rumah kaca (Manuari *et al.*, 2011). Peningkatan emisi CO<sub>2</sub> tidak hanya berdampak pada sistem iklim, tetapi juga mengancam keberlanjutan kehidupan manusia dan menghambat pertumbuhan ekonomi jangka panjang (Basyiran, 2014). Menurut *World Risk Report* yang diterbitkan oleh The Nature Conservancy (NTC), United Nations University Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS), dan German Alliance for Development Works (Alliance) pada

tahun 2012, kerusakan lingkungan merupakan salah satu faktor penting yang menentukan tingkat risiko suatu wilayah terhadap bencana alam.

Dalam konteks mitigasi perubahan iklim, ekosistem mangrove memiliki peran strategis karena kemampuannya dalam menyerap (sequesterate) CO<sub>2</sub> dari atmosfer dan menyimpan karbon dalam bentuk biomassa (Mandari *et al.*, 2016). Mangrove berfungsi sebagai penahan abrasi, peredam gelombang, penyaring sedimen, habitat biota akuatik, serta penghasil detritus yang menyuburkan perairan. Sebagai penyerap karbon, mangrove membantu mengurangi konsentrasi CO<sub>2</sub> atmosfer melalui proses fotosintesis, sementara sebagai penyimpan karbon, ekosistem ini menyimpan cadangan karbon dalam biomassa di atas permukaan (batang, ranting, daun) dan di bawah permukaan tanah (akar) (Sondak, 2015; Bachmid *et al.*, 2018). Stok karbon terbesar biasanya terdapat pada batang pohon, menjadikan mangrove salah satu ekosistem penyerap karbon paling efisien di wilayah pesisir.

Secara nasional, Indonesia menempatkan ekosistem blue carbon seperti mangrove sebagai komponen penting dalam pencapaian Nationally Determined Contribution (NDC) untuk pengurangan emisi GRK. Dinamika luas kawasan mangrove berpengaruh langsung terhadap kapasitas Sequestrasi dan Stok karbon, sehingga konservasi dan rehabilitasi menjadi strategi penting dalam mendukung target NDC dan pembangunan rendah karbon (Januar, 2023). Upaya ini juga selaras dengan agenda konservasi karbon biru yang menekankan pentingnya intervensi kebijakan dan teknologi ramah lingkungan dalam mengendalikan perubahan lahan pesisir.

Secara ilmiah, biomassa menjadi indikator utama dalam penilaian cadangan karbon karena besarnya nilai karbon yang tersimpan dalam vegetasi mangrove sangat bergantung pada biomassa total yang dimilikinya (Sondak, 2015). Faktor fisiologis seperti laju fotosintesis, kandungan klorofil, jumlah stomata per satuan luas daun, dan umur tegakan turut memengaruhi kemampuan penyerapan karbon (Uthbah *et al.*, 2017). Semakin tinggi biomassa vegetasi, semakin besar pula kapasitas mangrove dalam menyerap CO<sub>2</sub> dari atmosfer dan menyimpannya dalam bentuk karbon organik.

Meskipun penelitian mengenai karbon mangrove telah banyak dilakukan di Indonesia, kajian spesifik mengenai sekuestrasi dan stok karbon di hutan mangrove Desa Waworaha, Kecamatan Soropia, Kabupaten Konawe, masih sangat terbatas. Padahal, kawasan ini memiliki ekosistem mangrove yang luas dan potensial untuk berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menjawab pertanyaan utama: (1) seberapa besar kemampuan hutan mangrove di Desa Waworaha dalam menyerap karbon dari atmosfer, dan (2) berapa besar stok karbon yang tersimpan dalam tegakan mangrove di kawasan tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sekuestrasi karbon dan stok karbon pada ekosistem mangrove di Desa Waworaha sebagai dasar ilmiah pengelolaan pesisir yang berkelanjutan dan mendukung pencapaian target pengurangan emisi nasional.

## METODE PENELITIAN

### Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari 2025 di kawasan hutan mangrove Desa Waworaha, Kecamatan Soropia, Kabupaten Konawe, Sulawesi Tenggara, dengan luas total area penelitian 43,3 ha (KPH Unit XXI Laiwoi Tenggara).

### Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh vegetasi pohon mangrove yang tumbuh di kawasan hutan mangrove Desa Waworaha, Kecamatan Soropia, Kabupaten Konawe. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan metode purposive sampling dengan intensitas sampling sebesar 1%, menghasilkan tujuh plot pengamatan berukuran 20 m × 20 m (total luas sampel 0,100 ha). Penetapan lokasi plot dilakukan secara purposif berdasarkan kriteria ekologis, yaitu: (1) perbedaan zonasi mangrove dari tepi laut hingga ke arah daratan untuk merepresentasikan variasi struktur tegakan; (2) dominasi spesies pada tiap zona vegetasi; serta (3) kondisi substrat (lumpur, pasir, atau campuran) yang dapat memengaruhi pertumbuhan dan biomassa mangrove. Meskipun data vegetasi awal mencakup seluruh tingkat pertumbuhan (seedling, sapling, pole, dan tree), dalam penelitian ini analisis difokuskan pada kategori pohon dengan diameter  $\geq 10$  cm (DBH). Hal ini dipilih karena kontribusi biomassa terbesar berasal dari pohon dewasa, sementara kategori lainnya memberikan kontribusi yang relatif kecil terhadap total biomassa dan simpanan karbon ekosistem. Pendekatan ini juga selaras dengan tujuan penelitian yang berfokus pada estimasi biomassa di atas permukaan tanah dan stok karbon utama, sebagaimana digunakan dalam berbagai studi sejenis (Sahami, 2018).

### Jenis dan Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan meliputi data kuantitatif (diameter batang, biomassa, karbon) dan data kualitatif (kondisi umum lokasi). Pengukuran diameter pohon dilakukan pada tinggi 130 cm dari permukaan tanah (*Diameter at Breast Height* / DBH). Vegetasi yang diukur difokuskan pada kategori pohon (diameter  $\geq 10$  cm) sesuai kriteria pengukuran struktur tegakan (Sahami, 2018).

### Analisis Data

Biomassa dihitung menggunakan pendekatan alometrik non-destruktif, kemudian nilai karbon ditentukan sebesar 50% dari biomassa. Potensi sekuestrasi karbon dihitung dengan mengalikan nilai karbon dengan faktor konversi 3,67 untuk memperoleh nilai ekuivalen CO<sub>2</sub>. Data dianalisis secara deskriptif untuk menggambarkan variasi biomassa, sekuestrasi karbon, dan stok karbon antarplot serta antarspesies.

#### Biomassa pohon

Data diameter batang mangrove kemudian diolah menggunakan persamaan allometrik untuk mengetahui biomassa batang.

**Tabel 1.** Persamaan Allometrik Biomassa Batang Mangrove

| Jenis Mangrove              | Persamaan Allometrik                               | Sumber Penelitian             |
|-----------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|
| <i>Rhizophora mucronata</i> | $B = 0,1466 \times D^{2,3136}$                     | Dharmawan, 2010               |
| <i>Avicennia marina</i>     | $B = 0,1848 \times D^{2,3524}$                     | Dharmawan dan Siregar, 2008   |
| <i>Avicennia alba</i>       | $B = 0,251 \times p \times D^{2,46}$ ( $p=0,506$ ) | Komiyama <i>et al.</i> , 2005 |
| <i>Bruguiera gymnorhiza</i> | $B = 0,0754 \times D^{2,505}$                      | Kauffman dan Donato, 2012     |

| Jenis Mangrove              | Persamaan Allometrik          | Sumber Penelitian         |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| <i>Sonneratia alba</i>      | $B = 0,3841 \times D^{2,101}$ | Kauffman dan Donato, 2012 |
| <i>Rhizophora apiculata</i> | $B = 0,043 \times D^{2,63}$   | Amira, 2008               |

Keterangan:

B = Biomassa (kg)  
D = DBH (cm)  
p = Massa jenis kayu (gr/m<sup>3</sup>)

Stok karbon di atas tanah dapat diasumsikan bahwa 46% dari biomassa adalah karbon (Widyastuti *et al.*, 2018). Rumusnya adalah sebagai berikut:

$$\text{Karbon (ton/ha)} = \text{Biomassa (ton/ha)} * 0.26 \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Karbon (ton/ha)} = \text{Biomassa (ton/ha)} \times 0,46$$

#### Sequestrasi Karbon Pohon

Menurut Mardiyarso *et al.*, (1999), potensi penyerapan gas CO<sub>2</sub> diperoleh melalui perhitungan perkalian kandungan karbon terhadap besarnya Sequestrasi CO<sub>2</sub> dengan rumus yang digunakan, yaitu :

$$\text{WCO}_2 = C \times \text{FKCO} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana :

WCO<sub>2</sub> = Banyaknya CO<sub>2</sub> yang diserap (ton)

C = Karbon (ton)

FKCO<sub>2</sub> = Faktor konversi unsur karbon (C) ke CO<sub>2</sub> = 3,67

#### Stok Karbon Pohon

Data diameter batang mangrove kemudian diolah menggunakan persamaan alometrik untuk mengetahui biomassa batang. Stok karbon di atas tanah dapat diasumsikan bahwa 46% dari biomassa adalah karbon (Widyastuti *et al.*, 2018). Rumusnya adalah sebagai berikut :

$$C = \text{Biomassa} \times 0,46 \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan :

C = Karbon

0,46 = Faktor konversi untuk pendugaan karbon

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian Sequestrasi karbon dan Stok karbon pada hutan mangrove di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe menunjukkan bahwa terdapat perbedaan total biomassa dan karbon pohon pada setiap plotnya.

#### Biomassa Mangrove

Total biomassa mangrove ditentukan dari jumlah jenis mangrove yang berada pada masing-masing plot di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe dan menunjukkan nilai yang berbeda-beda. Hasil tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Total Biomassa berdasarkan Jenis Mangrove di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe

| Jenis Mangrove              | Biomassa<br>(kg plot <sup>-1</sup> ) | Biomassa<br>(ton plot <sup>-1</sup> ) | Biomassa<br>(ton ha <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Rhizophora apiculata</i> | 1272                                 | 1,27                                  | 127,21                              |
| <i>Bruguiera gymnorhiza</i> | 3232                                 | 3,23                                  | 323,24                              |
| <i>Sonneratia alba</i>      | 9476                                 | 9,48                                  | 947,64                              |
| <b>Rata-Rata</b>            | <b>4660</b>                          | <b>4,66</b>                           | <b>466,03</b>                       |

Sumber : Data primer hasil pengukuran lapangan menggunakan metode alometrik (diolah), 2025.

**Tabel 2** menunjukkan bahwa total biomassa mangrove berdasarkan jenis yang terdapat pada setiap plot di Desa Waworaha, Kecamatan Soropia, Kabupaten Konawe, bervariasi cukup signifikan antarspesies. Nilai tertinggi tercatat pada *Sonneratia alba* sebesar 947,64 ton ha, sedangkan nilai terendah terdapat pada *Rhizophora apiculata* sebesar 127,21 ton ha. Jika dihitung secara sederhana, rata-rata biomassa dari ketiga spesies mencapai 466,03 ton ha. Namun demikian, rata-rata ini merupakan nilai aritmetika yang belum memperhitungkan proporsi dominansi dan kerapatan tiap spesies di lapangan, sehingga interpretasinya perlu dilakukan secara hati-hati. Dalam kenyataan ekosistem, nilai total biomassa akan sangat bergantung pada komposisi relatif spesies, distribusi umur tegakan, dan kondisi substrat, yang dapat menyebabkan kontribusi karbon antarspesies berbeda dari sekadar rata-rata sederhana.

Perbedaan mencolok antara *Sonneratia alba* dan *Rhizophora apiculata* menunjukkan variasi potensi penyerapan dan penyimpanan karbon yang signifikan. Spesies seperti *Sonneratia alba* berkontribusi besar terhadap total stok karbon ekosistem dan karenanya perlu menjadi prioritas dalam program konservasi. Sebaliknya, *Rhizophora* meskipun memiliki biomassa lebih rendah, tetap berperan penting dalam stabilisasi substrat dan perlindungan garis pantai, menjadikannya penting dalam upaya rehabilitasi kawasan pesisir.

Meskipun hasil ini menegaskan potensi besar hutan mangrove dalam mendukung mitigasi perubahan iklim dan pencapaian Nationally Determined Contribution (NDC) Indonesia, analisis lanjutan seperti perhitungan proporsi spesies berdasarkan kerapatan serta uji statistik (*standar deviasi*, ANOVA) diperlukan untuk memperoleh gambaran yang lebih representatif dan signifikan secara ilmiah. Pendekatan ini akan menghasilkan dasar yang lebih kuat bagi perencanaan konservasi dan strategi pengelolaan berbasis sains, sehingga kontribusi ekosistem mangrove terhadap pengurangan emisi karbon dapat dimaksimalkan secara nasional maupun global.

Sedangkan total biomassa mangrove berdasarkan jumlah plot di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe dapat dilihat pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Biomassa Mangrove berdasarkan Plot pada Hutan Mangrove di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe

| Plot | Biomassa<br>(kg/plot-1) | Biomassa<br>(ton/plot-1) | Biomassa<br>(ton ha-1) | Jumlah<br>Individu (pohon<br>plot-1) |
|------|-------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| 1    | 1446                    | 1,45                     | 145,6                  | 10                                   |
| 2    | 1235                    | 1,24                     | 123,5                  | 8                                    |
| 3    | 863                     | 0,863                    | 86,3                   | 7                                    |
| 4    | 2785                    | 2,785                    | 278,5                  | 11                                   |

| Plot             | Biomassa<br>(kg/plot-1) | Biomassa<br>(ton/plot-1) | Biomassa<br>(ton ha <sup>-1</sup> ) | Jumlah<br>Individu (pohon<br>plot-1) |
|------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 5                | 2068                    | 2,068                    | 206,8                               | 13                                   |
| 6                | 1744                    | 1,744                    | 174,4                               | 10                                   |
| 7                | 1561                    | 1,561                    | 156,1                               | 9                                    |
| 8                | 2279                    | 2,279                    | 227,9                               | 9                                    |
| <b>Rata-Rata</b> | <b>1748</b>             | <b>1,75</b>              | <b>174,76</b>                       | <b>9,6</b>                           |

Sumber : Data primer hasil pengukuran lapangan menggunakan metode alometrik (diolah), 2025.

**Tabel 3** menunjukkan bahwa total biomassa mangrove di Desa Waworaha, Kecamatan Soropia, Kabupaten Konawe, bervariasi cukup signifikan antarplot. Biomassa tertinggi tercatat pada Plot 4 sebesar 278,5 ton ha<sup>-1</sup>, sedangkan biomassa terendah terdapat pada Plot 3 sebesar 86,3 ton ha<sup>-1</sup>, dengan rata-rata keseluruhan biomassa mencapai 174,76 ton ha<sup>-1</sup>. Variasi ini mencerminkan adanya perbedaan struktur tegakan, ukuran pohon, dan kondisi lingkungan di setiap plot.

Berdasarkan jenis mangrove (Tabel 2), *Sonneratia alba* menunjukkan biomassa tertinggi sebesar 947,64 ton ha<sup>-1</sup>, jauh melebihi *Rhizophora apiculata* yang hanya mencapai 127,21 ton ha<sup>-1</sup>. Perbedaan ini terutama disebabkan oleh karakteristik morfologis *S. alba* yang memiliki diameter batang lebih besar, laju fotosintesis yang lebih tinggi, serta kemampuan adaptasi yang baik terhadap substrat berlumpur kaya nutrisi. Faktor-faktor tersebut mendukung akumulasi biomassa yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan kapasitas penyimpanan karbonnya. Kondisi ini menjelaskan mengapa *S. alba* berkontribusi signifikan terhadap total stok karbon ekosistem dibandingkan spesies lainnya. Plot 4, yang memiliki nilai biomassa tertinggi, kemungkinan besar dipengaruhi oleh kondisi ekologis yang lebih optimal, seperti frekuensi pasang surut yang sesuai, ketersediaan nutrisi yang tinggi, dan substrat yang stabil. Faktor-faktor tersebut mendukung pertumbuhan vegetasi yang lebih produktif dan akumulasi biomassa yang lebih besar. Sebaliknya, rendahnya biomassa di Plot 3 menunjukkan perlunya intervensi ekologi, seperti rehabilitasi vegetasi atau penanaman spesies berbiomassa tinggi, untuk meningkatkan potensi sequestrasi karbon.

Keterkaitan antara biomassa, stok karbon, dan sequestrasi CO<sub>2</sub> mencerminkan satu alur ekologis yang saling berhubungan. Biomassa mencerminkan akumulasi hasil fotosintesis yang menentukan besarnya karbon tersimpan dalam jaringan tanaman, sedangkan stok karbon yang tinggi secara langsung meningkatkan kapasitas sequestrasi CO<sub>2</sub> dari atmosfer. Hal ini menegaskan peran penting ekosistem mangrove – terutama *S. alba* – dalam mitigasi perubahan iklim global dan kontribusinya terhadap pencapaian Nationally Determined Contribution (NDC) Indonesia. Selain itu, perbedaan biomassa antarplot juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan utama seperti ketersediaan nitrogen (TN) dan fosfor (TP) yang berkorelasi positif dengan peningkatan biomassa, sedangkan salinitas ekstrem dapat menekan pertumbuhannya (Shaltout *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2024; Lugo & Medina, 2020). Pasang surut memegang peranan penting dalam transportasi hara dan proses sedimentasi, di mana frekuensi genangan yang moderat menjadi kondisi paling optimal bagi pertumbuhan mangrove (Twilley *et al.*, 2019; Lugo & Medina, 2020). Selain itu, kondisi substrat

seperti komposisi tanah, elevasi, dan stabilitas sedimen juga memengaruhi perkembangan akar dan kapasitas retensi nutrisi (Wang *et al.*, 2024; Ellison, 2021).

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan pentingnya pendekatan pengelolaan yang memperhatikan kondisi ekologis lokal serta struktur komunitas vegetasi. Upaya rehabilitasi dan pengayaan spesies berbiomassa tinggi pada plot dengan nilai karbon rendah menjadi langkah strategis untuk meningkatkan kapasitas sekuestrasi karbon ekosistem dan mendukung agenda mitigasi perubahan iklim nasional maupun global.

### Sekuestrasi Karbon Mangrove

Jumlah Sekuestrasi karbon berdasarkan jenis mangrove di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe dapat dilihat pada **Tabel 4**.

**Tabel 4.** Potensi Sekuestrasi Karbon (CO<sub>2</sub> Equivalent) Berdasarkan Jenis Mangrove di Desa Waworaha, Kecamatan Soropia, Kabupaten Konawe

| Jenis Mangrove              | Sekuestrasi Karbon<br>(kg plot <sup>-1</sup> ) | Sekuestrasi Karbon<br>(ton plot <sup>-1</sup> ) | Sekuestrasi Karbon<br>(ton ha <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <i>Rhizophora apiculata</i> | 2148                                           | 2,15                                            | 214,75                                        |
| <i>Bruguiera gymnorhiza</i> | 5457                                           | 5,46                                            | 545,69                                        |
| <i>Sonneratia alba</i>      | 15998                                          | 16,0                                            | 1599,81                                       |
| <b>Rata-Rata</b>            | <b>7868</b>                                    | <b>7,87</b>                                     | <b>786,75</b>                                 |

Sumber : Data Primer (Diolah), 2025.

**Tabel 4.** Menunjukkan bahwa jumlah Sekuestrasi karbon berdasarkan jenis mangrove yang terdapat pada masing-masing plot di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe. Jumlah Sekuestrasi karbon tertinggi ada pada jenis mangrove *Sonneratia alba* yaitu sebesar 1599,81 ton ha<sup>-1</sup>, sedangkan jumlah Sekuestrasi karbon terendah berada pada jenis mangrove *Rhizophora apiculata* yaitu sebesar 214,75 ton ha<sup>-1</sup>, sehingga rata-rata jumlah Sekuestrasi karbon berdasarkan jenis mangrove yaitu sebesar 786,75 ton ha<sup>-1</sup>. Sedangkan jumlah Sekuestrasi karbon berdasarkan jumlah plot mangrove di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe dapat dilihat pada Tabel 4. berikut.

**Tabel 5.** Jumlah Sekuestrasi Karbon (CO<sub>2</sub> Equivalent) berdasarkan Plot pada Hutan Mangrove di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe

| Plot             | Sekuestrasi Karbon<br>(kg plot <sup>-1</sup> ) | Sekuestrasi Karbon<br>(ton plot <sup>-1</sup> ) | Sekuestrasi Karbon<br>(ton ha <sup>-1</sup> ) |
|------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1                | 2442                                           | 2,44                                            | 244,2                                         |
| 2                | 2085                                           | 2,09                                            | 208,5                                         |
| 3                | 1457                                           | 1,46                                            | 145,7                                         |
| 4                | 4701                                           | 4,70                                            | 470,1                                         |
| 5                | 3491                                           | 3,49                                            | 349,1                                         |
| 6                | 2944                                           | 2,94                                            | 294,4                                         |
| 7                | 2636                                           | 2,64                                            | 263,6                                         |
| 8                | 3848                                           | 3,85                                            | 384,8                                         |
| <b>Rata-Rata</b> | <b>2951</b>                                    | <b>2,95</b>                                     | <b>295,05</b>                                 |

Sumber : Data Primer (Diolah), 2025.

**Tabel 5.** Menunjukkan bahwa terdapat jumlah Sekuestrasi karbon yang berbeda-beda pada setiap plot di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe. Jumlah Sekuestrasi karbon tertinggi berada pada plot empat (4) yaitu sebesar 470,1 ton ha<sup>-1</sup>, sedangkan jumlah Sekuestrasi karbon terendah berada pada plot tiga (3) yaitu sebesar 145,7 ton ha<sup>-1</sup>, sehingga rata-rata jumlah

Sequestrasi karbon berdasarkan jumlah plot mangrove yaitu sebesar 295,05 ton ha<sup>-1</sup>. Perbedaan nilai Sequestrasi karbon antar plot penelitian disebabkan oleh variasi spesies, kerapatan pohon, dan umur tegakan. Sequestrasi karbon mangrove sejalan dengan hasil biomassa, karena karbon diserap dan tersimpan dalam jaringan biomassa pohon. Berdasarkan jenis (**Tabel 4**), *Sonneratia alba* juga menunjukkan nilai tertinggi dengan 1599,81 ton ha<sup>-1</sup>, sementara *Rhizophora apiculata* hanya 214,75 ton ha<sup>-1</sup>. Rata-rata Sequestrasi karbon pada tiga jenis utama adalah 786,75 ton ha<sup>-1</sup>. Jika ditinjau per plot (**Tabel 5**), Sequestrasi karbon tertinggi terdapat pada Plot 4 (470,1 ton ha<sup>-1</sup>) dan terendah di Plot 3 (145,7 ton ha<sup>-1</sup>), dengan rata-rata 295,05 ton ha<sup>-1</sup>. Perbedaan ini erat kaitannya dengan variasi spesies dominan, diameter batang, dan umur tegakan. Plot dengan dominasi *Sonneratia alba* umumnya memiliki kontribusi Sequestrasi karbon yang lebih tinggi.

### Stok Karbon Mangrove

Stok karbon dalam ekosistem mangrove meliputi karbon yang tersimpan dalam biomassa di atas permukaan tanah (batang, cabang, dan daun) serta di bawah permukaan tanah (akar dan tanah). Jumlah Stok karbon berdasarkan jenis mangrove di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe dapat dilihat pada **Tabel 6**. berikut.

**Tabel 6.** Jumlah Stok Karbon berdasarkan Jenis Mangrove di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe

| Jenis Mangrove              | Stok Karbon<br>(kg plot <sup>-1</sup> ) | Stok Karbon<br>(ton plot <sup>-1</sup> ) | Stok Karbon<br>(ton ha <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| <i>Rhizophora apiculata</i> | 585                                     | 0,59                                     | 58,52                                  |
| <i>Bruguiera gymnorhiza</i> | 1487                                    | 1,49                                     | 148,69                                 |
| <i>Sonneratia alba</i>      | 4359                                    | 4,36                                     | 435,92                                 |
| <b>Rata-Rata</b>            | <b>2144</b>                             | <b>2,14</b>                              | <b>214,37</b>                          |

Sumber : Data Primer (Diolah), 2025.

**Tabel 6** menunjukkan bahwa jumlah stok karbon berdasarkan jenis mangrove di Desa Waworaha, Kecamatan Soropia, Kabupaten Konawe, bervariasi cukup signifikan. Nilai tertinggi tercatat pada *Sonneratia alba* sebesar 435,92 ton ha, sedangkan nilai terendah ditemukan pada *Rhizophora apiculata* sebesar 58,52 ton ha, dengan rata-rata total stok karbon mencapai 214,37 ton ha. Variasi ini menunjukkan bahwa kontribusi tiap spesies terhadap total cadangan karbon berbeda secara signifikan tergantung pada morfologi, ukuran biomassa, dan kerapatan vegetasi.

Temuan ini memiliki implikasi penting bagi strategi mitigasi perubahan iklim dan pencapaian target Nationally Determined Contribution (NDC) Indonesia, yang menekankan peran ekosistem pesisir, termasuk mangrove, dalam pengurangan emisi gas rumah kaca. Spesies seperti *Sonneratia alba* yang memiliki kapasitas penyimpanan karbon tinggi perlu menjadi prioritas dalam program perlindungan dan konservasi, mengingat kontribusinya yang signifikan terhadap penyerapan karbon atmosfer. Sebaliknya, spesies seperti *Rhizophora apiculata*, meskipun memiliki stok karbon lebih rendah, tetap penting dalam menjaga stabilitas substrat, menahan sedimen, dan melindungi garis pantai dari abrasi, sehingga perannya dalam mendukung fungsi ekosistem tetap vital. Integrasi hasil penelitian ini ke dalam kebijakan pengelolaan mangrove sangat relevan untuk konservasi karbon biru (*blue carbon*) sebagai bagian dari strategi adaptasi dan mitigasi perubahan

iklim. Pendekatan berbasis spesies, yang memadukan perlindungan spesies berkontribusi tinggi dengan rehabilitasi spesies penopang fungsi ekosistem, dapat meningkatkan efektivitas program konservasi dan mendukung pencapaian komitmen iklim nasional secara berkelanjutan. Sedangkan jumlah Stok karbon berdasarkan jumlah plot mangrove di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe dapat dilihat pada **Tabel 7**.

**Tabel 7.** Jumlah Sequestrasi Karbon berdasarkan Plot pada Hutan Mangrove di Desa Waworaha Kecamatan Soropia Kabupaten Konawe

| Plot             | Stok Karbon<br>(kg/plot <sup>-1</sup> ) | Stok Karbon<br>(ton/plot <sup>-1</sup> ) | Stok Karbon<br>(ton ha <sup>-1</sup> ) |
|------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1                | 665                                     | 0,67                                     | 66,50                                  |
| 2                | 568                                     | 0,57                                     | 56,80                                  |
| 3                | 397                                     | 0,40                                     | 39,70                                  |
| 4                | 1281                                    | 1,28                                     | 128,10                                 |
| 5                | 951                                     | 0,95                                     | 95,10                                  |
| 6                | 802                                     | 0,80                                     | 80,20                                  |
| 7                | 718                                     | 0,72                                     | 71,80                                  |
| 8                | 1048                                    | 1,05                                     | 104,80                                 |
| <b>Rata-Rata</b> | <b>804</b>                              | <b>0,80</b>                              | <b>80,38</b>                           |

Sumber : Data Primer (Diolah), 2025.

**Tabel 7** menunjukkan adanya variasi yang cukup signifikan dalam jumlah stok karbon pada setiap plot hutan mangrove di Desa Waworaha, Kecamatan Soropia, Kabupaten Konawe. Nilai tertinggi tercatat pada plot 4 sebesar 128,10 ton ha, sedangkan nilai terendah berada pada plot 3 dengan 39,70 ton ha, sehingga rata-rata total stok karbon di seluruh plot mencapai 80,38 ton ha. Variasi ini mencerminkan adanya perbedaan struktur tegakan, kerapatan vegetasi, dan komposisi spesies antarplot, yang secara langsung memengaruhi kapasitas penyimpanan karbon ekosistem mangrove.

Temuan ini menegaskan kembali peran penting hutan mangrove dalam mitigasi perubahan iklim melalui kemampuannya menyerap CO<sub>2</sub> dari atmosfer dan menyimpannya dalam bentuk biomassa. Nilai stok karbon yang tinggi pada beberapa plot menunjukkan potensi besar ekosistem mangrove dalam mendukung pencapaian Nationally Determined Contribution (NDC) Indonesia, yang menargetkan penurunan emisi melalui konservasi dan rehabilitasi ekosistem karbon biru (*blue carbon*). Sebaliknya, nilai karbon yang relatif rendah pada plot tertentu, seperti plot 3, menunjukkan perlunya rehabilitasi ekosistem secara terarah melalui penanaman kembali spesies berkarbon tinggi seperti *Sonneratia alba* dan peningkatan kerapatan vegetasi. Upaya tersebut diharapkan dapat meningkatkan total cadangan karbon di tingkat ekosistem, memperkuat fungsi ekologis hutan mangrove, serta berkontribusi lebih signifikan terhadap strategi mitigasi perubahan iklim nasional.

Stok karbon dalam ekosistem mangrove tidak hanya mencakup biomassa di atas permukaan (batang, cabang, daun), tetapi juga biomassa bawah tanah (akar) serta cadangan karbon dalam tanah. Berdasarkan jenis (Tabel 6), *Sonneratia alba* kembali mendominasi dengan Stok karbon sebesar 435,92 ton ha<sup>-1</sup>, jauh lebih tinggi dibandingkan *Rhizophora apiculata* dengan 58,52 ton ha<sup>-1</sup>. Rata-rata Stok karbon antarspesies adalah 214,37 ton ha<sup>-1</sup>. Jika ditinjau dari jumlah plot (Tabel 8), nilai Stok karbon tertinggi terdapat pada Plot 4 (128,10 ton ha<sup>-1</sup>) dan terendah pada Plot 3 (39,70 ton

ha<sup>-1</sup>). Rata-rata Stok karbon di seluruh plot adalah 80,38 ton ha<sup>-1</sup>. Hal ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa variasi spesies dan kondisi tegakan memegang peran penting dalam menentukan besarnya cadangan karbon.

### Kondisi Ekosistem Mangrove di Desa Waworaha

Ekosistem hutan mangrove di Desa Waworaha, Kecamatan Soropia, Kabupaten Konawe, didominasi oleh tiga spesies utama, yaitu *Rhizophora apiculata*, *Bruguiera gymnorhiza*, dan *Sonneratia alba*. Dengan kerapatan pohon berkisar antara 1.500–2.300 individu per hektar dan diameter batang rata-rata 15–30 cm, ekosistem ini menunjukkan kondisi yang relatif sehat dengan struktur tegakan yang produktif dan masih berfungsi optimal. Keberadaan mangrove yang sehat ini berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem pesisir, melindungi garis pantai dari erosi, serta mendukung kehidupan berbagai biota laut maupun darat.

Secara ekologis, hutan mangrove memiliki peran strategis yang berlapis. Sebagai penyerap karbon, mangrove mampu menyimpan hingga lima kali lebih banyak karbon dibandingkan hutan hujan tropis melalui mekanisme penyerapan dan pengendapan karbon dalam sedimen. Hal ini menjadikan mangrove sebagai salah satu ekosistem kunci dalam mitigasi perubahan iklim global. Namun, ketika terjadi degradasi, cadangan karbon yang tersimpan dapat terlepas kembali ke atmosfer dan memperburuk emisi gas rumah kaca (Kumari *et al.*, 2020; Choudhary *et al.*, 2024; Cuenca-Ocay, 2024). Selain itu, sistem akar mangrove yang rapat berfungsi efektif dalam meredam energi gelombang, mencegah abrasi, serta melindungi garis pantai dari dampak badai dan kenaikan muka air laut (Kathiresan, 2012; Cuenca-Ocay, 2024). Dari sisi keanekaragaman hayati, hutan mangrove juga menjadi habitat penting dan daerah pemijahan bagi berbagai organisme akuatik maupun terestrial, sehingga mendukung produktivitas perikanan serta menjaga keseimbangan rantai makanan di wilayah pesisir (Kathiresan, 2012; Choudhary *et al.*, 2024). Dengan demikian, hutan mangrove di Desa Waworaha tidak hanya berfungsi sebagai penyerap dan penyimpan cadangan karbon dalam jumlah besar, tetapi juga sebagai benteng alami pesisir sekaligus penyangga keanekaragaman hayati.

## KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa hutan mangrove di Desa Waworaha memiliki kapasitas tinggi dalam sequestrasi karbon (786,75 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>) dan stok karbon (214,37 ton C ha<sup>-1</sup>), dengan *Sonneratia alba* sebagai kontributor utama. Tingginya biomassa dan karbon mencerminkan peran ekologis penting mangrove dalam mitigasi perubahan iklim global melalui penyerapan CO<sub>2</sub> atmosferik dan penyimpanan karbon jangka panjang. Implikasinya, ekosistem ini berpotensi mendukung pencapaian Nationally Determined Contribution (NDC) Indonesia dan implementasi Paris Agreement, sekaligus membuka peluang pengembangan ekowisata berbasis jasa lingkungan dan pembayaran jasa ekosistem (PES) yang dapat meningkatkan kesejahteraan masyarakat.

Kawasan dengan stok karbon rendah perlu menjadi prioritas rehabilitasi, misalnya melalui penanaman *S. alba* pada lokasi yang sesuai secara ekologis. Keterbatasan penelitian ini adalah hanya mencakup karbon biomassa atas tanah, sehingga estimasi total karbon ekosistem kemungkinan lebih besar jika karbon tanah dan biomassa bawah tanah diperhitungkan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk menghasilkan estimasi yang lebih komprehensif dan mendukung strategi pengelolaan mangrove lestari. Adapun saran yang penulis sampaikan pada penelitian ini adalah perlunya menjaga ekosistem mangrove dengan menerapkan kebijakan konservasi yang ketat guna mempertahankan kemampuan mangrove dalam menyerap karbon, Masyarakat, terutama nelayan dan petani sekitar, perlu mendapatkan edukasi mengenai pentingnya hutan mangrove dalam mitigasi perubahan iklim dan perlindungan ekosistem pesisir dan Wilayah dengan kerapatan mangrove rendah perlu mendapatkan upaya rehabilitasi dengan penanaman kembali spesies mangrove yang berkontribusi besar terhadap Stok karbon, seperti *Sonneratia alba* dan *Bruguiera gymnorhiza*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amira, S. 2008. Pendugaan Biomassa Jenis *Rhizophora apiculata* Bl di Hutan Mangrove Batu Ampar Kabupaten Kubu Raya Kalimantan Barat [Skripsi]. Fakultas Kehutanan IPB. Bogor.
- Bachmid, F., C.F.A. Sondak, dan J.D. Kusen. 2018. Estimasi penyerapan karbon hutan mangrove Bahowo Kelurahan Tongkaina Kecamatan Bunaken. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*. 1(1):8-13. <https://doi.org/10.35800/jplt.6.1.2018.19463>
- Basyiran, T. B. 2014. Konsumsi Energi Listrik, Pertumbuhan Ekonomi dan Penduduk terhadap Emisi Gas Rumah Kaca Pembangkit Listrik di Indonesia (Skripsi Sarjana, Fakultas Ekonomi, Universitas Syiah Kuala). Banda Aceh
- Choudhary, B., Dhar, V., & Pawase, A. S. (2024). Blue carbon and the role of mangroves in carbon sequestration: Its mechanisms, estimation, human impacts and conservation strategies for economic incentives. *Journal of Sea Research*. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102504>
- Cuenca-Ocay, G. (2024). Mangrove ecosystems' role in climate change mitigation. <https://doi.org/10.59120/drj.v12i2.168>
- Dharmawan, I.W.E., Suyarso., U.I. Yaya., P. Bayu, dan Pramudji. 2020. Panduan Mentoring Struktur Komunitas Mangrove di Indonesia. PT Media Sains Nasional. Bogor.
- Dharmawan, I.W.S. 2010. Pendugaan biomassa karbon di atas tanah pada tegakan *Rhizophora mucronata* di Ciasem Purwakarta. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*. 15(1): 50-56.
- Dharmawan, I.W.S. dan C.A. Siregar. 2008. Karbon tanah dan pendugaan karbon tegakan *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh di Ciasem Purwakarta. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*. 5(4): 317-328. <https://doi.org/10.20886/jphka.2008.5.4.317-328>
- Ellison, J. C. (2021). Factors Influencing Mangrove Ecosystems (pp. 97-115). Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2494-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2494-0_4)
- Januar, H.I. 2023. Dinamika Ekologi Lahan "Blue Carbon" di Pesisir. Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). 3(1): 20- 23.
- Kathiresan, K. (2012). Importance of Mangrove Ecosystem. *The International Journal of Marine Science*, 2(1). <https://doi.org/10.5376/ijms.2012.02.0010>
- Kauffman, J. B., Heider, C., Cole, T. G., Dwire, K. A., dan Donato, D. C. 2011. Ecosystem carbon stocks of micronesian mangrove forests. *Wetlands*. 31(2): 343-352. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0148-9>

- Komiyama, A., S. Pongpan, dan S. Kato. 2005. Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of Tropical Ecology*. 21(4): 471-477. <https://doi.org/10.1017/S0266467405002476>
- Kumari, P., Singh, J. K., & Pathak, B. (2020). Potential contribution of multifunctional mangrove resources and its conservation (pp. 1-26). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819532-1.00001-9>
- Lugo, A. E., & Medina, E. (2020). Mangrove forests. In *Coastal and marine environments* (2nd ed., p. 17). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429441004>
- Mandari, D.Z., H. Gunawan, dan M.N. Isda. 2016. Penaksiran biomassa dan karbon tersimpan pada ekosistem mangrove di Kawasan Bandar Bakau Dumai. *Jurnal Riau Biologia*. 1(3): 17-23.
- Manuri, S., Putra C.A.S. dan Saputra, A. D. 2011. Teknik pendugaan cadangan karbon hutan. *Merang redd pilot project-german international cooperation*. 9(1): 118-123.
- Mardiatmoko, G., J.H. Pietersz, dan A. Boreel. 2014. Ilmu Ukur Kayu dan Inventarisasi Hutan. Badan Penerbit Fakultas Pertanian Universitas Pattimura (BPFP - UNPATTI). Ambon.
- Sahami, F. 2018. Penilaian kondisi mangrove berdasarkan tingkat kerapatan jenis. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*. 6(2): 33-40.
- Shaltout, K. H., Ahmed, M. T., Alrumman, S. A., Ahmed, D. A., & Eid, E. M. (n.d.). Standing Crop Biomass and Carbon Content of Mangrove *Avicennia Marina* (forssk.) Vierh. along the Red Sea Coast of Saudi Arabia. <https://doi.org/10.3390/su132413996>
- Sondak, F.A.C. 2015. Estimasi potensi penyerapan karbon biru (blue carbon) oleh hutan mangrove Sulawesi Utara. *Journal of Asean Studies on Maritime Issue*. 1(1): 24-29.
- Twilley, R. R., Rivera-Monroy, V. H., Rovai, A. S., Rovai, A. S., Castañeda-Moya, E., & Davis, S. E. (2019). Mangrove Biogeochemistry at Local to Global Scales Using Ecogeomorphic Approaches (pp. 717-785). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63893-9.00021-6>
- Uthbah, Z., E. Sudiana, dan E. Yani. 2017. Analisis biomassa dan cadangan karbon pada berbagai umur tegakan damar (*Agathis dammara* (Lamb.) Rich.) di KPH Banyumas Timur. *Journal Scripta Biologica*. 4(2): 119-124. <https://doi.org/10.20884/1.sb.2017.4.2.404>
- Wang, K., Jiang, M., Li, Y., Kong, S., Gao, Y., Huang, Y., Qiu, P., Yang, Y., & Wan, S. (2024). Spatial Differentiation of Mangrove Aboveground Biomass and Identification of Its Main Environmental Drivers in Qinglan Harbor Mangrove Nature Reserve. *Sustainability*, 16(19), 8408. <https://doi.org/10.3390/su16198408>
- Widyastuti, A., E. Yani., E.K. Nasution, dan Rochmatino. 2018. Diversity of mangrove vegetation and carbon sink estimation of segara anakan mangrove forest Cilacap Central Java Indonesia. *Jurnal Biodiversitas*. 19(1): 246-252. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d190133>
- Yuniawati, Budiaman A. dan Elias. 2011. Estimasi Potensi Biomassa dan Massa Karbon Hutan Tanaman *Acacia crassiparpa* di Lahan Gambut. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 29(4): 343-355 <https://doi.org/10.20886/jphh.2011.29.4.343-355>.