

Kuantifikasi Cadangan Karbon Hutan Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung

Syafiqatul Fuady¹, Muhammad Arsyad^{1*}, Vistarani Arini Tiwow², Sulistiawaty¹, Fahmiady Arsyad³, dan Adi Prasetyo⁴

¹Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia; e-mail: m_arsyad288@unm.ac.id

²Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Manado, Minahasa, Indonesia

³Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung, Maros, Indonesia

⁴Stasiun Meteorologi Kelas I Sultan Hasanuddin, Maros, Indonesia

ABSTRAK

Perubahan iklim global memerlukan upaya mitigasi berbasis ekosistem. Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung, memiliki potensi sebagai penyimpan karbon. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik iklim dan mengkuantifikasi cadangan karbon hutan di Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung. Karakteristik iklim dianalisis menggunakan data curah hujan dan suhu udara 31 tahun (1993-2023) yang diperoleh dari data citra satelit ERA-5. Sedangkan estimasi cadangan karbon hutan digunakan data biomassa, nekromassa, dan %C organik tanah yang diperoleh dari pengukuran langsung di lapangan dan uji laboratorium. Pengambilan data dilakukan pada bagian hutan daerah datar bertanah sebanyak 30 plot berukuran 20 x 20m (400 m²). Penentuan lokasi plot pengukuran melalui metode *purposive sampling*. Analisis data menggunakan metode allometrik. Berdasarkan hasil analisis data diperoleh rata-rata suhu udara 26,4°C dan jumlah curah hujan tahunan 2.864,13 mm/tahun, hal ini mengindikasikan bahwa zona iklim di kawasan penelitian menurut Chave, *et al* (2005) termasuk dalam zona iklim Humid/Lembab. Cadangan karbon sebesar 223,366 tonC/ha, dengan luas wilayah 9.610,71 ha diperoleh cadangan karbon total sebesar 2.146.705,850 tonC, sehingga berdasarkan harga jual kredit karbon senilai US\$ 5/ton di pasar karbon, nilai ekonomi karbon dapat mencapai sekitar Rp.167.099.583.353. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung memiliki kontribusi signifikan dalam menyimpan karbon, sekaligus memiliki potensi ekonomi melalui program kompensasi karbon khususnya skema *Reducing Emission from Deforestation and Forest Degradation* (REDD+). Oleh karena itu hasil penelitian dapat dijadikan dasar ilmiah dalam perumusan strategi mitigasi perubahan iklim serta pengelolaan kawasan karst secara berkelanjutan.

Kata Kunci: Biomassa, Cadangan Karbon, Hutan, Karbondioksida, Perubahan Iklim, TN Babul

ABSTRACT

Global climate change requires ecosystem-based mitigation efforts. The Maros Karst Area of Bantimurung Bulusaraung National Park has the potential to serve as a carbon sink. This study aims to analyze climate characteristics and quantify forest carbon stocks in the Maros Karst Area of Bantimurung Bulusaraung National Park. Climate characteristics were analyzed using 31 years of rainfall and air temperature data (1993-2023) obtained from ERA-5 satellite imagery. Forest carbon stock estimates were based on biomass, necromass, and soil organic carbon percentage data obtained from direct field measurements and laboratory tests. Data collection was carried out in 30 plots measuring 20 x 20m (400 m²) in flat, soil-covered forest areas. The measurement plot locations were determined using the purposive sampling method. Data analysis using allometric methods. Based on the results of data analysis, the average air temperature was 26.4°C and the annual rainfall was 2,864.13 mm/year, indicating that the climate zone in the study area according to Chave, *et al* (2005) was classified as Humid. Carbon reserves of 223,366 tonsC/ha, with an area of 9,610.71 ha, resulted in total carbon reserves of 2,146,705.850 tonsC. Based on the selling price of carbon credits at US\$ 5/ton on the carbon market, the economic value of carbon could reach around Rp. 167,099,583,353. The results of the study show that the Maros Karst Area of Bantimurung Bulusaraung National Park has a significant contribution to carbon storage, as well as economic potential through carbon compensation programs, particularly the Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD+) scheme. Therefore, the results of this study can be used as a scientific basis for formulating climate change mitigation strategies and sustainable karst area management.

Keywords: Biomass, Carbon Reserve, Forest, Carbon dioxide, Climate Change, Babul National Park

Citation: Fuady, S., Arsyad, M., Tiwow, V. A., Sulistiawaty., Arsyad, F., dan Prasetyo, A. (2025). Kuantifikasi Cadangan Karbon Hutan Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(5), 1333-1342, doi:10.14710/jil.23.5.1333-1342

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim global sejak pertengahan abad ke-20 akibat peningkatan CO₂ di atmosfer, memicu dampak serius seperti perubahan ekosistem, banjir, kekeringan, dan kenaikan muka laut (Santos & Bakhshoodeh, 2021; Ainurrohman & Sudarti, 2022). Indonesia sebagai negara beriklim tropis yang sebagian besar wilayahnya terdiri dari lautan memiliki pengaruh signifikan terhadap kondisi cuaca dan iklim global (Arsyad, *et al.*, 2022). Menurut *Fifth Assessment Report 2014* dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) berbagai aktivitas manusia telah menyebabkan peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi sekitar 1,1°C dari akhir 1800-an hingga 2020, dan diproyeksikan akan meningkat 1,1 - 5,4°C lebih panas jika tidak dilakukan mitigasi.

Annual Greenhouse Gas Index (AGGI) *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) mencatat sejak tahun 1990, pemanasan global oleh gas rumah kaca antropogenik meningkat 1,1 W/m², dengan kontribusi gas CO₂ (80%), N₂O (8%), CH₄ (6%), dan gas berfluorinasi lainnya (16%). Menurut data dari *Global Carbon Project*, Indonesia berada di peringkat sepuluh penghasil emisi karbon terbesar di dunia, yakni 1,69% dari total emisi dunia atau sekitar 589,5 juta ton pada tahun 2020.

Hutan tropis berperan penting sebagai penyerap CO₂ melalui fotosintesis dengan cadangan karbon tersimpan pada biomassa, nekromassa, dan bahan organik tanah, sehingga menjadi mekanisme utama pengendalian emisi gas rumah kaca (Hairiah, Ekadinata, Sari dan Rahayu, 2011; Karang, Faiqoh, Indraiswari, & Purba, 2015; Aprianto, Wulandari, & Masruri, 2016).

Ekosistem karst mencakup sekitar 15% dari total luas daratan di bumi (Arsyad, Mukarramah, dan Susanto, 2023). Kawasan karst memiliki keanekaragaman hayati tinggi namun rentan terhadap penambangan batu kapur dan perubahan tutupan lahan yang merupakan akibat dari masifnya deforestasi hutan, dan menjadi penyumbang emisi GRK tertinggi di Indonesia (*Global Carbon Project*, 2020; Bakri, Laupe, & Salam, 2023).

Kawasan Karst Maros Pangkep di Sulawesi Selatan memiliki luas ±46.200 ha sekitar ±22.800 ha masuk dalam Taman Nasional Bantimurung-Bulusaraung (Ahmad & Hamzah, 2016), seluas 10.332,33 ha berada di Pangkep dan 9.610,71 ha berada di Maros. Kawasan ini menghadapi tekanan ekologis berupa ekstraksi batu kapur untuk industri semen, degradasi serta pemecahan habitat akibat aktivitas wisata dan pembangunan infrastruktur, serta konversi lahan di wilayah penyangga taman nasional. Hasil survei lapangan menunjukkan Balai Taman Nasional Bantimurung-Bulusaraung menekankan urgensi ketersediaan data terkini dan akurat mengenai cadangan karbon untuk keperluan inventarisasi sumber daya, pemantauan tren perubahan iklim, dan mendukung mekanisme perdagangan karbon. Oleh karena itu penelitian ini difokuskan pada kuantifikasi cadangan karbon dan karakteristik iklim sebagai

dasar ilmiah bagi pengelolaan kawasan serta perumusan strategi mitigasi perubahan iklim.

Penelitian serupa telah dilakukan oleh Muluneh & Worku (2022) di Ethiopia Utara memperoleh nilai biomassa atas permukaan tanah sebesar 2059,13 ton/ha, dan menegaskan bahwa peningkatan penyimpanan karbon hutan melalui restorasi lahan terganggu, perluasan kawasan hutan, pengelolaan berkelanjutan, dan konservasi merupakan strategi efektif untuk mengurangi dampak peningkatan CO₂.

Potensi simpanan karbon hutan Kawasan Karst Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung juga pernah dilakukan oleh Shagir, Paembonan & Achmad (2016) dan memperoleh hasil rerata total simpanan karbon hutan primer datar sebesar 44,90 ± 8,20 ton/ha, pada hutan primer lorong patahan sebesar 20,10 ± 3,03 ton/ha, pada hutan primer lereng sedikit batu sebesar 40,84 ± 6,20 ton/ha, pada hutan primer lereng banyak batu sebesar 63,55 ± 9,63 ton/ha, dan pada hutan primer punggung bukit sebesar 46,08 ± 9,09 ton/ha. Penelitian ini menunjukkan heterogenitas morfologi karst memengaruhi kapasitas penyimpanan karbon sehingga menimbulkan variasi spasial stok karbon, sedangkan data kuantitatif pada tutupan lahan datar bertanah masih terbatas.

Carbon accounting adalah perhitungan cadangan karbon pengukuran langsung di lapangan (*Ground Based forest carbon Accounting*). Jumlah karbon yang dihitung mengikuti standar SNI 7724: 2011 dimana kandungan karbon diperkirakan sebesar 47% dari biomassa. Biomassa atas permukaan tanah (AGB) dan stok C pohon dihitung berdasarkan model allometrik yang dikembangkan oleh (Chave, *et al.*, 2005) dan juga digunakan oleh Muluneh & Worku (2022), berdasarkan variasi curah hujan, sehingga tepat digunakan pada hutan tropis dengan kondisi iklim yang beragam. Faktor iklim sendiri didefinisikan sebagai rata-rata keadaan cuaca pada periode tertentu berdasarkan pengukuran elemen-elemen meteorologis (Febrianti, 2008), sedangkan penentuan zona iklim suatu daerah dapat ditentukan melalui jumlah curah hujan yang diterima (Diah *et al.*, 2023), di mana perubahan suhu permukaan laut berpotensi memengaruhi intensitas curah hujan di Indonesia (Arsyad *et al.*, 2022).

Mitigasi perubahan iklim merupakan komitmen global yang menuntut partisipasi seluruh negara, termasuk Indonesia sebagai salah satu pemilik hutan tropis terbesar di dunia yang berperan penting dalam mengurangi emisi akibat deforestasi dan degradasi hutan serta meningkatkan penyerapan karbon. Konsep *Reducing Emission from Deforestation and Forest Degradation* (REDD+) menjanjikan insentif berupa aliran dana bagi negara pemilik hutan yang berhasil menjaga kelestarian hutan sebagai penyerap dan penyimpan karbon (Wibowo, Samsudin, Nurtjahjawilasa, Subarudi, & Muttaqin, 2013), sedangkan pasar karbon mengacu pada perdagangan unit kredit karbon sebagai representasi pengurangan emisi, dengan harga bervariasi antara US\$3-100 per

ton dan Indonesia menetapkan harga karbon sebesar US\$5 per ton. Penetapan nilai ekonomi karbon memberikan manfaat ekologi, sosial, dan ekonomi, sehingga mendukung upaya konservasi hutan dan pengelolaan berkelanjutan. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk menganalisis karakteristik iklim dan cadangan karbon di Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berlangsung selama 5 (lima) bulan terhitung dari bulan November 2023-Maret 2024 di Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung dapat dilihat pada Gambar 1.

Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data primer dan data sekunder.

Data primer langsung diambil di lapangan yang terdiri dari :

- 1) Data biomassa pohon berupa nama pohon, tinggi, dan diameter pohon setinggi dada dalam setiap plot pengamatan
- 2) Data Nekromassa berupa data diameter dan tinggi untuk pohon yang sudah mati.

Sedangkan untuk pengukuran di laboratorium yaitu:

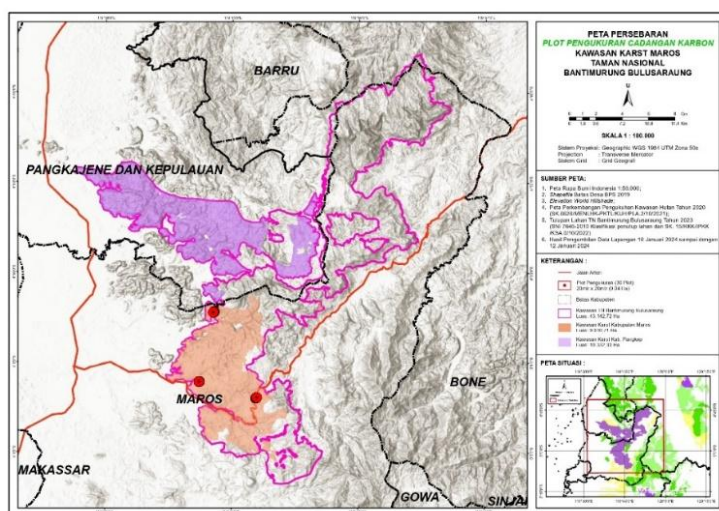
- 1) Data berat basah dan berat kering daun dan batang dari tumbuhan berdiameter <5 cm, yang dilakukan di Ruang Sintesis It.3 Jurusan Fisika, FMIPA UNM
- 2) Data berat basah dan berat kering daun dan batang dari serasah, yang dilakukan di Ruang Sintesis It.3 Jurusan Fisika, FMIPA UNM
- 3) Kandungan %C organik tanah, yang diperoleh dari pengujian sampel di Laboratorium Badan Standarisasi Instrumen Pertanian (BSIP) Sulawesi Selatan

Data sekunder yakni data citra satelit ERA-5 (cds.climate.copernicus.eu):

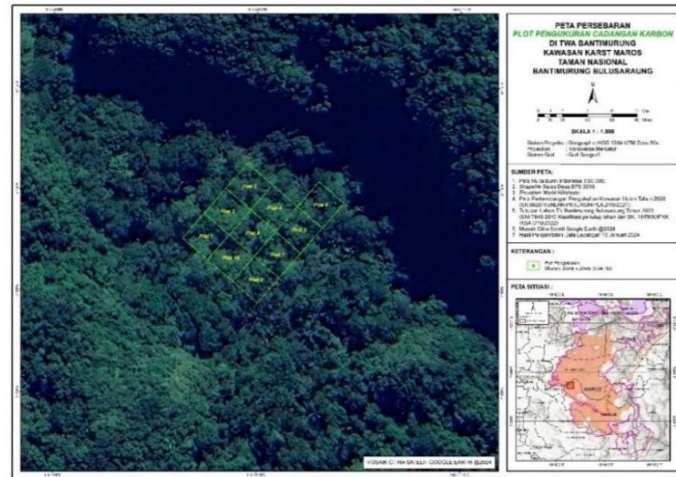
- 1) Data curah hujan Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung skala bulanan tahun 1993 s.d 2023
- 2) Data suhu udara Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung skala bulanan tahun 1993 s.d 2023

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah GPS, roll meter, tali rafia, tally sheet, plastik, parang, wadah plastik, neraca digital, oven, alat tulis, microsoft excel, dan ArcGIS. Adapun langkah-langkah dalam penelitian ini yaitu persiapan seperti studi pustaka, penyiapan perizinan, alat-alat yang dibutuhkan dan observasi lapangan untuk mendapatkan gambaran yang jelas tentang daerah penelitian.

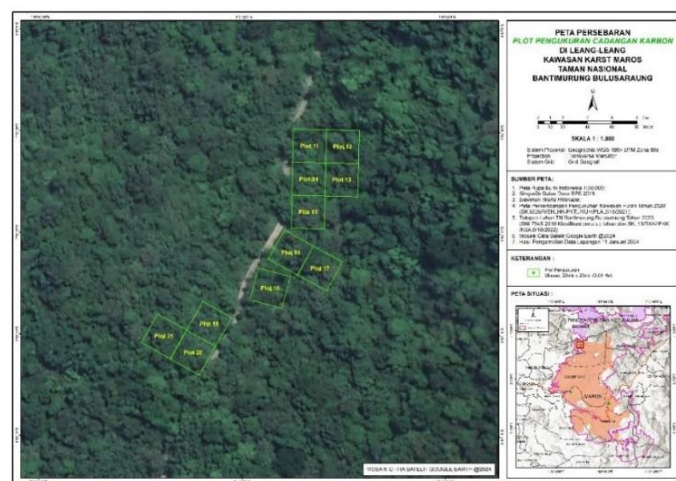
Pada tahap lapangan dilakukan dengan membuat titik plot sampel. Penentuan letak plot pengukuran simpanan karbon dilakukan dengan metode *purposive sampling* pada hutan daerah datar bertanah dianggap mewakili seluruh Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung. Jumlah plot contoh sebanyak 30 plot dengan ukuran masing-masing plot 20 x 20m (400 m²) yang tersebar dalam 3 lokasi yaitu lokasi pertama di Kawasan Wisata Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung yang terdiri dari 10 plot (Gambar 2), lokasi kedua di Leang-leang Kecamatan Bantimurung yang terdiri dari 11 plot (Gambar 3), lokasi ketiga terletak di Desa Labuaja Kecamatan Cenrana yang terdiri dari 9 plot (Gambar 4), dengan variasi jumlah plot didasarkan pada luas area representatif, heterogenitas vegetasi, dan ketersediaan lahan bertanah. Kemudian pada masing-masing plot dilakukan pengukuran lingkaran batang pohon setinggi dada (DBH) atau sekitar 1,3 m dari tanah (Manuri, Putra & Saputra, 2011). selain itu juga mengukur lingkaran batang dan tinggi pohon mati yang ada dalam plot dan mengambil sampel tanah yang berada didekat titik plot sedalam 10 cm.



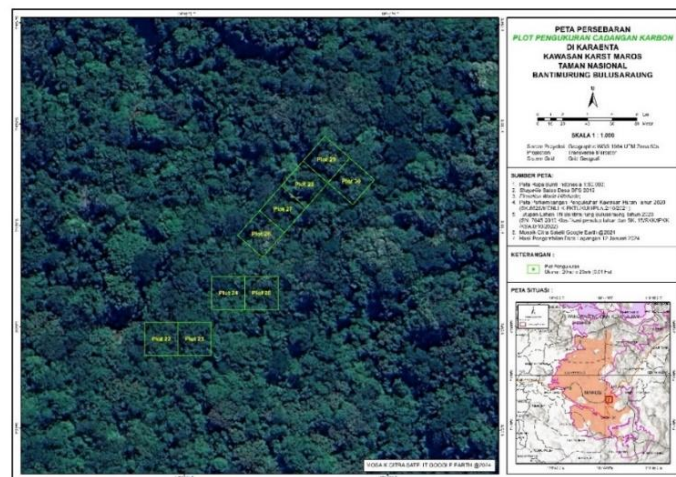
Gambar 1. Lokasi Penelitian



Gambar 2. Proyeksi Plot Pengambilan Data di Kawasan Wisata TN BaBul



Gambar 3. Proyeksi Plot Pengambilan Data di Leang-leang, Kec. Bantimurung



Gambar 4. Proyeksi Plot Pengambilan Data di Desa Labuaja, Kec. Cenrana

Pengambilan sampel tumbuhan bawah dan serasah dilakukan di daerah yang mendominasi dalam plot, pada subplot pengukuran 0,5m × 0,5m. Kemudian menimbang berat total sampel tumbuhan bawah dan serasah dan mengambilnya sebanyak ±100 gram. Lalu dilakukan pengeringan dengan menggunakan oven terhadap conto sampel tumbuhan

bawah dan serasah pada kisaran suhu 85°C hingga mencapai berat konstan.

Data curah hujan dan suhu udara diperoleh dari data citra satelit ERA-5 skala bulanan selama 31 tahun (1993-2023). Analisis data curah hujan dan suhu udara Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung Bulusaraung dilakukan dengan cara merata-ratakan data curah hujan dan

suhu udara skala bulanan yang diperoleh dari 3 titik lokasi koordinat dengan persamaan sebagai berikut.

a. Curah Hujan

$$x_i = \frac{\sum p_i}{n}$$

Dengan x_i adalah rata-rata curah hujan tahunan (mm/tahun), p_i adalah jumlah curah hujan selama satu tahun (mm/tahun), dan n adalah jumlah tahun.

b. Suhu Udara

$$x_i = \frac{\sum s_i}{n}$$

Dengan x_i adalah rata-rata suhu udara tahunan ($^{\circ}\text{C}$), s_i adalah rata-rata suhu udara selama satu tahun ($^{\circ}\text{C}$), dan n adalah jumlah tahun.

Biomassa di atas permukaan tanah (AGB) dan stok C pohon dihitung berdasarkan model allometrik yang dikembangkan oleh Chave, *et al.*, 2005. Persamaan allometrik yang digunakan mengacu pada Tabel 1 dimana akan disesuaikan dengan curah hujan di Kawasan taman Nasional Bantimurung Bulusaraung, D yaitu DBH (diameter batang setinggi dada) (cm), H merupakan tinggi pohon (m), dan π berat jenis kayu (g/cm^3) yang diperoleh dari database berat jenis kayu jenis pohon tropis. Untuk spesies kayu yang kerapatan kayunya tidak diketahui, nilai menengah ($0,612 \text{ g}/\text{cm}^3$) dari famili spesies atau genus spesies pohon tropis.

Untuk menghitung total biomassa tumbuhan bawah dan serasah digunakan persamaan berikut

$$\text{Total BK} = \frac{\text{BK sub contoh (g)}}{\text{BB sub contoh (g)}} \times \text{Total BB (g)}$$

dimana BK adalah berat kering (g) dan BB merupakan berat basah (g)

Perhitungan total biomassa nekromassa berkayu dilakukan dengan menggunakan persamaan

$$\text{BK} = \frac{\pi H D^2}{40} \times f$$

dimana BK adalah biomassa (g), π adalah berat jenis nekromassa berkayu (g/cm^3), H adalah panjang/tinggi nekromassa (cm), D^2 adalah diameter nekromassa (cm), dan f adalah faktor koreksi.

Perhitungan total karbon karbon pada tumbuhan dapat dihitung dengan menambahkan total biomassa pohon dengan total biomassa nekromassa menggunakan persamaan

$$\begin{aligned} & (\text{Total biomassa pohon} \\ & + \text{total biomassa nekromassa}) \\ & \times 0,47 \end{aligned}$$

dimana 0,47 merupakan nilai persentase kandungan karbon pada tumbuhan.

Perhitungan kandungan karbon organik tanah menggunakan metode Standar Nasional Indonesia (SNI 7724, 2011). Metode ini menggunakan perhitungan karbon organik tanah per hektar dapat menggunakan persamaan

$$C_t = \text{Kedalaman tanah} \times \text{BD} \times \%C \text{ organik tanah}$$

dimana C_t adalah kandungan karbon tanah (g/cm^2), dan BD adalah berat jenis tanah (g/cm^3)

Total cadangan karbon pada plot dapat dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus sebagai berikut, (SNI 7724, 2011):

$$C_{\text{plot}} = C_{\text{tumbuhan}} + C_{\text{tanah}}$$

dimana C_{plot} merupakan total karbon pada setiap plot sampel (ton C/ha).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis karakteristik iklim Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung

Analisis iklim Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung-Bulusaraung dilakukan untuk menghitung biomassa pohon menggunakan persamaan allometrik berdasarkan zona iklim (Chave, *et al.*, 2005). Data suhu udara dan curah hujan tahunan periode 1993–2023 diperoleh dari citra satelit ERA-5 pada ketinggian 85–350 m dari tiga titik koordinat penelitian berikut $05^{\circ}01'08,7''$ LS dan $119^{\circ}41'17,4''$ BT, $04^{\circ}57'19,0''$ LS dan $119^{\circ}42'01,6''$ BT dan $5^{\circ}02'00,0''$ LS dan $119^{\circ}44'32,0''$ BT.

Hasil analisis menunjukkan suhu tertinggi $27,3^{\circ}\text{C}$ (2019), terendah $25,6^{\circ}\text{C}$ (2000), dengan rata-rata $26,4^{\circ}\text{C}$ selama 31 tahun. Curah hujan tertinggi tercatat $4.057 \text{ mm}/\text{tahun}$ (2010), terendah $1.746 \text{ mm}/\text{tahun}$ (1997), dengan rata-rata $2.864,13 \text{ mm}/\text{tahun}$. Sehingga diketahui zona iklim Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung merupakan zona iklim Humid/Lembab dengan jumlah curah hujan tahun berada diantara $1.500\text{--}4.000 \text{ mm}/\text{tahun}$, sehingga untuk menghitung biomassa pohon menggunakan persamaan allometrik berdasarkan zona iklim yang dikembangkan oleh Chave, *et al.*, 2005 digunakan persamaan Humid/Lembab no.2 pada Tabel 1.

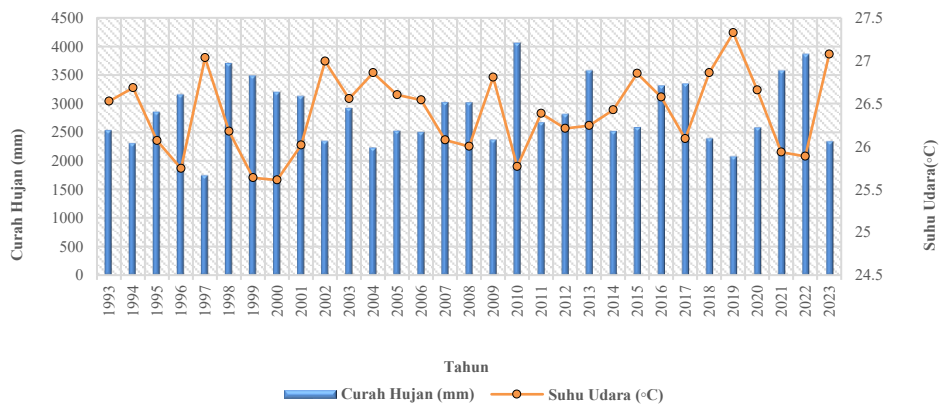
Tabel 1. Persamaan Allometrik untuk Menaksir Biomassa Pohon di Hutan Berdasarkan Zona Iklimnya (Chave, *et al.*, 2005)

Curah Hujan (mm/tahun)	Rumus allometrik
Kering (<1500)	1. $(AGB)_{est} = 0.112 (\pi D^2 H)^{0.916}$
	2. $(AGB)_{est} = \pi \times \exp(-0.667 + 1.784 \ln(D) + 0.207(\ln(D))^2 - 0.0281 (\ln(D))^3)$
Humid/Lembab (1500-4000)	1. $(AGB)_{est} = 0.0509 (\pi D^2 H)$
	2. $(AGB)_{est} = \pi \times \exp(-1.499 + 2.148 \ln(D) + 0.207(\ln(D))^2 - 0.0281 (\ln(D))^3)$
Basah (>4000)	4. $(AGB)_{est} = 0.0776 (\pi D^2 H)^{0.94}$
	5. $(AGB)_{est} = \pi \times \exp(-1.239 + 1.980 \ln(D) + 0.207(\ln(D))^2 - 0.0281 (\ln(D))^3)$

Keterangan:

Persamaan no.1 digunakan apabila memiliki data tinggi dan diameter pohon;

Persamaan no.2 digunakan apabila hanya memiliki data diameter pohon.



Gambar 5. Grafik Curah Hujan dan Suhu Udara Tahunan Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung tahun 1993-2023 menggunakan data citra satelit ERA-5
(Sumber: Data Primer Terolah, 2024)

3.2. Cadangan Karbon Hutan Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung

Perhitungan cadangan karbon pada penelitian ini terdiri dari 5 *carbon pool* yaitu pohon, tumbuhan bawah, nekromassa berkayu, serasah, dan bahan organik tanah, pada 30 plot berukuran 20 × 20 m dengan subplot 0,5 × 0,5 m untuk tumbuhan bawah dan serasah. Hal ini dikarenakan pengambilan data dilakukan di Kawasan Karst, dimana terdapat banyak bebatuan karst, sedangkan untuk pengambilan data tidak efektif apabila terdapat penghalang berupa batuan, jalan, sungai, dan lain sebagainya. Sehingga berdasarkan survei lapangan ukuran plot yang paling sesuai dengan lokasi penelitian yaitu 20 m × 20 m. Jumlah plot pengambilan data sebanyak 30 plot dilakukan agar distribusi sampel data cenderung mendekati distribusi normal dan kesalahan dalam penelitian dapat diminimalisir. Pengambilan data sebanyak 30 plot dengan total luasan 1,2 ha dianggap telah mewakili seluruh Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung karena seluruh Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung bersifat homogen.

Berdasarkan pengamatan dan perhitungan pada tutupan lahan berupa hutan daerah datar bertanah Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung, diperoleh rata-rata biomassa berupa pohon sebesar 366,828 ton/ha, tumbuhan bawah sebesar 8,229 ton/ha, nekromassa berkayu sebesar 0,370 ton/ha, dan serasah sebesar 32,015 ton/ha sehingga total rata-rata biomassa sebesar 407,443 ton/ha.

Biomassa pohon terbesar terletak pada plot 19 sebesar 1.055,905 ton/ha, akibat keberadaan pohon berdiameter besar yaitu pohon kajuara (*Ficus sp.*) dengan diameter 151,136 cm. Sedangkan terkecil terletak pada plot 16 sebesar 95,120 ton/ha, karena sebaran pohon agak jarang dengan diameter pohon yang tergolong kecil yaitu 5-30 cm yang didominasi oleh pohon berdiameter 5-15 cm. Biomassa dan jumlah cadangan karbon berbanding lurus, dimana semakin besar jumlah biomassa semakin besar pula

cadangan karbonnya. Semakin banyak tumbuhan maka akan semakin banyak cadangan carbon yang tersimpan, dan semakin besar ukuran diameter pohon maka semakin banyak pula jumlah karbon tersimpannya (Lubis & Putri, 2023; Amanda, Chairul, Solfiyeni, & Mukhtar, 2024).

Biomassa tumbuhan bawah dan serasah diambil secara destruktif pada subplot 0,5 × 0,5 m, ditimbang total berat per plot, dan diambil subcontoh 100 g untuk dikeringkan pada suhu 85 °C selama ±24 jam hingga berat konstan guna memperoleh berat kering. Hasil penelitian menunjukkan biomassa tumbuhan bawah tertinggi pada plot 1 sebesar 27,504 ton/ha, karena kerapatan semai yang tinggi, dengan tinggi semai berkisar 50-100 cm. Sedangkan terkecil terletak pada plot 22 sebesar 1,12 ton/ha, karena tingkat kerapatan semai rendah dan jumlahnya terbatas, serta memiliki tinggi hanya berkisar 10 cm. Kandungan karbon serasah terbesar terletak pada plot 9 sebesar 85,118 ton/ha dan terkecil terletak pada plot 15 sebesar 2,4 ton/ha. Vegetasi yang lebat, iklim yang lembab, tanah yang subur, serta minimnya intervensi manusia cenderung menghasilkan lebih banyak serasah (Zhao, Hu, & Wang, 2022). Plot 9 berada pada lokasi 1 yaitu di Kawasan Wisata Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung, sedangkan plot 15 berada pada lokasi 2 yaitu Leang-leang Kecamatan Bantimurung. Dimana jika ditinjau dari kerapatan vegetasi lokasi 1 memiliki vegetasi yang jauh lebih rapat dibanding lokasi 2. Nekromassa berkayu terbesar terletak pada plot 22 sebesar 5,682 ton/ha, akibat keberadaan pohon mati berukuran besar yang memiliki lingkaran pohon 530 cm dan tinggi 11,4 m. Sedangkan terkecil terletak pada plot 15 sebesar 0,002 ton/ha.

Kandungan karbon tanah dilakukan dengan mengambil sampel sedalam 10 cm pada setiap plot, karena sebagian besar akumulasi karbon organik terdapat dilapisan tanah atas mencakup lapisan humus dan akar tempat utama penimbunan karbon organik, pengukuran pada kedalaman ini memberikan gambaran yang cukup representatif tentang jumlah karbon organik dalam tanah, kemudian dianalisis di

Laboratorium Tanah BSIP Sulawesi Selatan. Berdasarkan hasil penelitian kandungan karbon tanah terbesar terletak pada plot 29 sebesar 58,05 tonC/ha, sedangkan yang terkecil terletak pada plot 18 sebesar 14,1 tonC/ha.

Hasil penelitian dan pengambilan serta analisis perhitungan data karbon pada masing-masing *carbon pool* dapat dilihat pada Tabel 3. Total cadangan karbon pada sebesar 223,366 tonC/ha, kandungan karbon terbesar terdapat pada vegetasi pohon yaitu sebesar 172,409 tonC/ha atau sebesar 77,19%, Pohon merupakan penyimpan karbon terbesar, oleh karena itu jika pohon ditebang kemampuannya sebagai penyerap karbon (*sequestrasion*) akan menurun secara signifikan, dan karbon yang tersimpan akan terlepas dan menjadi emisi di udara (Azham, 2015).

Kandungan karbon pada tumbuhan bawah sebesar 3,868 tonC/ha atau sebesar 1,73%, kandungan karbon pada nekromassa berkayu sebesar 0,174 tonC/ha atau sebesar 0,08%, kandungan karbon pada serasah sebesar 15,047 tonC/ha atau sebesar 6,74%, dan kandungan karbon pada tanah sebesar 31,868 tonC/ha atau sebesar 14,27%.

Keadaan penyusun komponen karbon pada tutupan lahan berupa hutan Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung lebih jelasnya digambarkan dalam bentuk diagram pie yang tertera pada Gambar 6.

Berdasarkan hasil penelitian kuantifikasi cadangan karbon hutan menggunakan metode persamaan allomerik diperoleh cadangan karbon Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung sebesar 223,366 tonC/ha. Sehingga dengan luas Kawasan Karst Kabupaten Maros 9.610,71 ha, jumlah total cadangan karbon sebesar 2.146.705,850 tonC. Jumlah cadangan karbon yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian ini cukup besar menurut klasifikasi cadangan karbon oleh Purwanto (2012) dalam (Marianingsih, et al., 2023) cadangan karbon dibagi menjadi 3, yaitu cadangan karbon rendah (35 ton/ha), sedang (35-100 ton/ha), dan cadangan karbon tinggi (>100 ton/ha).

Menurut perhitungan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) pada 2020, potensi ekonomi dari perdagangan karbon mencapai Rp 350 triliun pada lima tahun mendatang, bahkan berpotensi hingga Rp8.000 triliun dengan skenario harga US\$5 per ton (*Indonesia Carbon Trading Handbook*, 2022). Berdasarkan harga jual kredit karbon senilai US\$ 5 per ton di pasar karbon, nilai ekonomi karbon di Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung yang memiliki luasan areal 9.610,71 ha dengan rata-rata cadangan karbon sebesar 223,366 tonC/ha adalah US\$ 10,7 juta atau jika dirupiahkan dengan nilai tukar dolar ke rupiah saat ini yaitu Rp.15.568,35 sekitar Rp.167.099.583.353.

Tabel 2. Biomassa pada Tutupan Lahan berupa Hutan Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung (ton/ha)

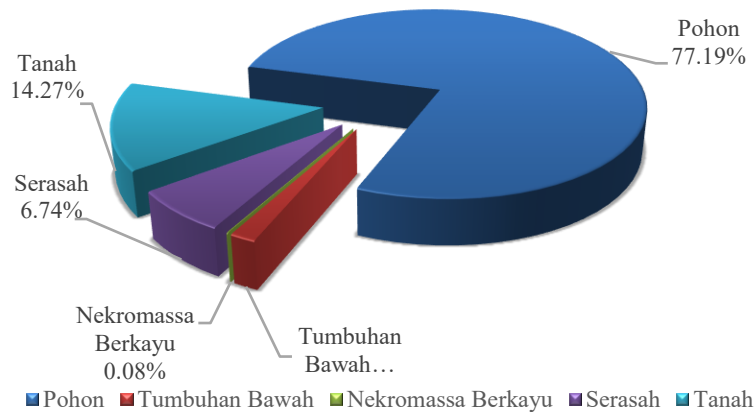
Plot	Pohon DBH >5cm	Tumbuhan Bawah	Nekromassa Berkayu	Serasah	Jumlah
1	498,114	27,504	0,016	47,360	572,995
2	508,218	3,520	0,019	38,259	550,016
3	407,054	12,438	0,052	43,200	462,744
4	418,244	19,402	0,004	61,962	499,611
5	433,755	14,933	0,005	55,411	504,104
6	295,703	15,266	0,227	46,594	357,790
7	385,410	21,672	0,180	36,941	444,202
8	600,962	11,424	0,065	33,267	645,719
9	432,542	6,720	0,013	85,118	524,394
10	731,729	9,229	0,037	18,355	759,350
11	948,492	11,194	0,035	31,334	991,055
12	131,935	9,498	0,005	21,638	163,076
13	227,356	3,840	0,014	6,080	237,290
14	360,403	10,024	0,011	37,869	408,307
15	117,757	3,840	0,002	2,400	123,999
16	95,120	1,760	0,044	23,856	120,780
17	342,598	3,360	0,020	24,891	370,870
18	235,004	6,275	0,017	24,461	265,758
19	1,055,905	8,736	0,021	39,014	1.103,677
20	116,256	1,280	0,018	8,784	126,339
21	123,543	4,640	0,014	11,677	139,874
22	315,089	1,120	5,682	22,824	344,716
23	236,660	3,040	0,045	38,259	278,004
24	173,351	5,440	0,104	57,568	236,462
25	185,365	6,560	0,034	23,962	215,920
26	285,981	6,080	1,248	29,131	322,440
27	203,829	3,840	0,026	17,013	224,708
28	476,321	5,920	0,109	10,893	493,243
29	233,398	1,920	0,053	21,878	257,249
30	428,754	6,400	2,973	40,464	478,592
Rata-Rata	366,828	8,229	0,370	32,015	407,443

Sumber: Data Primer Terolah, 2024

Tabel 3. Cadangan Karbon Hutan Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung (tonC/ha)

Plot	Pohon DBH >5cm	Tumbuhan Bawah	Nekromassa Berkayu	Serasah	Tanah	Jumlah
1	234,114	12,927	0,008	22,259	25,05	294,358
2	238,863	1,654	0,009	17,982	33,15	291,657
3	191,315	5,846	0,024	20,304	24,3	241,790
4	196,575	9,119	0,002	29,122	29,4	264,217
5	203,865	7,018	0,002	26,043	23,85	260,779
6	138,981	7,175	0,107	21,899	31,05	199,211
7	181,143	10,186	0,084	17,362	34,2	242,975
8	282,452	5,369	0,031	15,636	31,65	335,138
9	203,295	3,158	0,006	40,006	28,2	274,665
10	343,912	4,338	0,018	8,627	15,6	372,494
11	445,791	5,261	0,017	14,727	30,75	496,546
12	62,010	4,464	0,002	10,170	28,8	105,446
13	106,857	1,805	0,006	2,858	23,55	135,076
14	169,389	4,711	0,005	17,798	15,45	207,354
15	55,346	1,805	0,001	1,128	23,7	81,979
16	44,706	0,827	0,020	11,212	29,7	86,466
17	161,021	1,579	0,009	11,699	33,3	207,609
18	110,452	2,949	0,008	11,497	14,1	139,006
19	496,275	4,106	0,010	18,337	3,375	522,103
20	54,640	0,602	0,009	4,128	15,45	74,829
21	58,065	2,181	0,007	5,488	48,6	114,341
22	148,092	0,526	2,671	10,727	49,5	211,516
23	111,230	1,429	0,021	17,982	40,5	171,162
24	81,475	2,557	0,049	27,057	43,8	154,937
25	87,121	3,083	0,016	11,262	40,95	142,432
26	134,411	2,858	0,587	13,692	46,95	198,497
27	95,800	1,805	0,012	7,996	48	153,613
28	223,871	2,782	0,051	5,120	54,3	286,124
29	109,697	0,902	0,025	10,283	58,05	178,957
30	201,514	3,008	1,397	19,018	30,75	255,688
Rata-rata	172,409	3,868	0,174	15,047	31,868	223,366
Perse-ntase	77,19%	1,73%	0,08%	6,74%	14,27%	100%

Sumber: Data Primer Terolah, 2024



Gambar 6. Estimasi Cadangan Karbon Hutan Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung
(Sumber: Data Primer Terolah, 2024)

Perhitungan cadangan karbon dapat digunakan dalam konteks upaya mitigasi perubahan iklim, dimana jumlah cadangan karbon dapat dimanfaatkan sebagai dasar untuk program-program kompensasi karbon atau skema lainnya yang mendorong pelestarian atau restorasi ekosistem yang mampu menyimpan karbon. Adapun faktor-faktor yang mengancam cadangan karbon hutan, seperti deforestasi, konversi lahan, kebakaran hutan, dan aktivitas manusia lainnya. Berdasarkan hasil perhitungan cadangan karbon hutan Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung

tergolong besar sehingga upaya mitigasi perubahan iklim yang cocok untuk dilakukan di wilayah tersebut yaitu pelestarian hutan untuk mempertahankan cadangan karbon, restorasi ekosistem yang rusak, penggunaan energi terbarukan untuk mengurangi emisi karbon seperti panel surya, serta edukasi dan partisipasi masyarakat dalam upaya pelestarian lingkungan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa Kawasan Karst Maros Taman

Nasional Bantimurung-Bulusaraung memiliki karakteristik iklim humid/lembab dengan rata-rata suhu udara 26,4 °C dan curah hujan tahunan 2.864,13 mm selama periode 1993–2023. Kondisi iklim ini mendukung tingginya kapasitas serapan karbon pada hutan datar bertanah, yang ditunjukkan oleh cadangan karbon rata-rata sebesar 223,366 tonC/ha atau total 2.146.705,850 tonC pada luas 9.610,71 ha. Besarnya cadangan karbon ini tidak hanya mencerminkan pentingnya peran kawasan karst sebagai penyimpan karbon, tetapi juga membuka peluang ekonomi melalui mekanisme perdagangan karbon dengan potensi nilai sekitar Rp.167.099.583.353 pada harga US\$5/ton. Hasil penelitian ini menegaskan relevansi Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung-Bulusaraung dalam strategi mitigasi perubahan iklim dan menyediakan dasar ilmiah bagi perencanaan konservasi, inventarisasi karbon, serta pengelolaan kawasan yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A., & Hamzah, A. S. (2016). *Database Karst Sulawesi Selatan*. Makassar: Badan Lingkungan Hidup Daerah Provinsi Sulawesi Selatan.
- Abbas, M., Rasyid, B., & Achmad, M. (2022). Potensi Ketersediaan Air Tanah dan Neraca Air Wilayah Karst di Kabupaten Maros. *Jurnal Ecosolum*, 95-104.
- Ahmad, A., & Hamzah, A. S. (2016). *Database Karst Sulawesi Selatan*. Makassar: Badan Lingkungan Hidup Daerah Provinsi Sulawesi Selatan.
- Ainurrohman, S., & Sudarti, S. (2022). Analisis Perubahan Iklim dan Global Warming yang Terjadi sebagai Fase Kritis. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Fisika Terapan*, 1-10.
- Amanda, F. M., Chairul, Solfiyeni, & Mukhtar, E. (2024). Estimated Tree Carbon Reserves and Saplings in the Nagari Sumpur Kudus Social Forestry Area, Sijunjung Regency. *Jurnal Biologi Tropis*, 659-668.
- Aprianto, D., Wulandari, C., & Masruri, N. W. (2016). Karbon Tersimpan pada Kawasan Sistem Agroforestry di Register 39 Datar Setuju KHPL Batutegi Kabupaten Tanggamus. *Jurnal Syiva Lestari*.
- Arsyad, M. (2016). *Ilmu Kebumihan*. Makassar: Badan Penerbit UNM.
- Arsyad, M., Fitriani, F., Tiwow, V. A., Palloan, P., Sulistiawaty, S., & Susanto, A. (2022). The Effects of El Nino Southern Oscillation on Rainfall in the Karst Area of Maros, National Park Bantimurung Bulusaraung South Sulawesi and its Impact on Flood Disasters. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 772-778.
- Arsyad, M., Ihsan, N., & Tiwow, V. A. (2016). Estimation of underground river water availability based on rainfall in the Maros karst region, South Sulawesi. *AIP Conference Proceedings*.
- Arsyad, M., Pawitan, H., Sidauruk, P., & Putri, E. I. (2014). Analisis Ketersediaan Air Sungai Bawah Tanah dan Pemanfaatan Berkelanjutan di Kawasan Karst Maros Sulawesi Selatan. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 8-14.
- Azham, Z. (2015). Estimasi Cadangan Karbon pada Tutupan Lahan Hutan Sekunder, Semak dan Belukar di Kota Samarinda. *Jurnal AGRIFOR*, 325-338.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., . . . Yamakura, T. (2005). Tree Allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*.
- Dahlan, D., Jaya, I. S., & Istomo. (2005). Estimasi Karbon Tegakan Acacia mangium Wild Menggunakan Citra Landsat ETM+ dan Spot-5: Studi Kasus di BKPH Parung Panjang KPH Bogor. *Pertemuan Ilmiah Tahunan MAPIN XIV*.
- Daryanto, A., & Oktariadi, O. (2009). Klasifikasi Kawasan Karst Maros Sulawesi Selatan untuk Menentukan Kawasan Lindung dan Budidaya. *Buletin Geologi Tata Lingkungan*, 67-81.
- Derajat, R. M., Sopariah, Y., Aprilianti, S., Taruna, A. C., Tisna, H. R., Ridwana, R., & Sugandi, D. (2020). Klasifikasi Tutupan Lahan menggunakan Citra Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) di Kecamatan Pangandaran. *Jurnal Kajian Ilmu dan Pendidikan Geografi*.
- Diah, H., Rajiatul, C. V., Yulianti, F., Azizah, D. R., Nurmaliah, & Fathiya, N. (2023). Penerapan Klasifikasi Iklim Schmidt Ferguson untuk Kesesuaian Tanaman Kurma di Daerah Lembah Barbate Kabupaten Aceh Besar. *Jurnal Biologi Edukasi*, 29-36.
- Febrianti, N. (2008). Perubahan Zona Iklim di Indonesia dengan menggunakan Sistem Klasifikasi Koppen. *Pusat Pemanfaatan Sains Atmosfer dan Iklim, LAPAN*, 252-259.
- Guslinda, T. (2016). Studi Cadangan Karbon Tersimpan pada Lahan Perkebunan Karet Nagari Lubuk Tarok Kecamatan Lubuk Tarok Kabupaten Sijunjung. *Skripsi*.
- Hairiah, K., Ekadinata, A., Sari, R. R., & Rahayu, S. (2011). *Pengukuran Cadangan Karbon dari Tingkat Lahan ke Bentang Lahan. Petunjuk Praktis. Edisi ke-2*. Bogor: World Agroforestry Centre.
- Haryono, E., & Adji, T. N. (2004). *Pengantar Geomorfologi dan Hidrologi Karst*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Hasibuan, A. Z. (2015). Pemanfaatan Bahan Organik dalam Perbaikan Beberapa Sifat Tanah Pasir Pantai Selatan Kulon Progo. *Planta Tropika Journal*.
- Hidayati, N., Reza, M., Juhaeti, T., & Mansur, M. (2011). Serapan Karbondioksida (CO₂) Jenis-Jenis Pohon di Taman Buah "Mekar Sari" Bogor, Kaitannya dengan Potensi Mitigasi Gas Rumah Kaca. *Jurnal Biologi Indonesia*.
- Indonesia Carbon Trading Handbook. (2022). Katadata Insight Center.
- Junaedi, A. (2008). Kontribusi Hutan Sebagai Rosot Karbondioksida (Contribution of Forest as Carbondioxide Sink). *Info Hutan*.
- Karang, I. W., Faiqoh, E., Indraiswari, I. G., & Purba, A. O. (2015). Pemetaan Cadangan Karbon dan Biomassa Tegakan Tanaman Mangrove di Tahura Ngurah Rai dengan Menggunakan Data Penginderaan Jauh. Bali: Universitas Udayana.
- Lubis, N. S., & Putri, I. L. (2023). Carbon Reserves in The Forest Stand in The Maninjau Natural Reserve Area, Silayang-Malabur Rehabilitation Block, Agam District. *Journal of Climate Society*, 51-59.
- Mandari, D. Z., Gunawan, H., & Isda, M. N. (2016). Penaksiran Biomassa dan Karbon Tersimpan pada Ekosistem Hutan Mangrove di Kawasan Bandar Bakau Dumai. *Jurnal Riau Biologia*.
- Marianingsih, P., Mahrowi, Purnama, D., Oktaviani, H., Amalia, R., Eliyana, S., . . . Febrio, E. P. (2023). Analisis

- Kandungan Karbon di Taman Kehati PT Chandra Asri Cilegon. *Biospecies*, 6-18.
- Maryadi, A., Rafdinal, & Linda, R. (2019). Kajian Biomasa Tegakan Atas Permukaan (Aboveground Biomass) dan Cadangan Karbon di Beberapa Taman Kota Pontianak. *Jurnal Protobiont*, 73-80.
- Muluneh, M. G., & Worku, B. B. (2022). Carbon storages and sequestration potentials in remnant forests of different patch sizes in northern Ethiopia: an implication for climate change mitigation. *Agriculture & Food Security*, 1-38.
- National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H. S., Miwa, K., Srivastava, N., & Tanabe, K. (2008). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – A primer*. Japan: Institute for Global Environmental Strategies.
- Pabalik, I., Ihsan, N., & Arsyad, M. (2015). Analisis Fenomena Perubahan Iklim dan Karakteristik Curah Hujan Ekstrem di Kota Makassar. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika (JSPF)*, 88-92.
- Pengukuran dan Perhitungan Cadangan Karbon-Pengukuran Lapangan untuk Penaksiran Cadangan Karbon Hutan (ground based forest carbon accounting). SNI 7724. (2011). Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Rahmatsyah, Juliani, R., Nusyirwan, & Lubis, R. H. (2021). *Fisika Lingkungan*. Bandung: CV. Media Sains Indonesia.
- (2016). *Rencana Pengelolaan Jangka Panjang Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung Provinsi Sulawesi Selatan Periode Tahun 2016-2025*. Maros: Balai Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung.
- Rusliansyah, Rusdiansyah, Ma'ruf, M. A., & Santoso, M. A. (2018). Sifat Fisik Tanah untuk Perencanaan Kolam Konservasi di Lahan Gambut Kecamatan Liang Anggang. *Prosiding Seminar Nasional Lingkungan Lahan Basah*, 371-374.
- Said, A. P. (2013). Cadangan Karbon Sistem Hutan Rakyat pada Kondisi Landform Vulkanik dan Karst di Kawasan Timur Kabupaten Malang. *Skripsi*.
- Santos, R. M., & Bakhshoodeh, R. (2021). Climate change/global warming/climate emergency versus general climate research: comparative bibliometric trends of publications. *Heliyon*.
- Santoso, B., Jamil, A. H., & Machfud, M. (2015). Manfaat Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) dalam Penyerapan Karbondioksida (CO₂). *Perspektif*.
- Saputra, W., & Prabawayudha, E. (2022). Klimatologi Pertanian. Payakumbuh. *Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh*.
- Setiawan, R., & Purwanto, Y. (2018). Perbandingan Pengukuran Debit Sungai dengan Metode Pelampung dan Current Meter. *Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan*, 67-74.
- Shagir, K. J., Paembonan, S. A., & Achmad, A. (2016). Komposisi Jenis dan Potensi Simpanan Karbon pada Hutan Bukit Kapur (Limestone Forest) di Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung. *Jurnal Ilmu Kehutanan*.
- Sitepu, H., Harisuseno, D., & Fidari, J. S. (2023). Evaluasi Data Curah Hujan Satelit ERA-5 pada Berbagai Periode Data Hujan di Sub DAS Bodor. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 626-636.
- Sujarwo, W., & Darma, I. P. (2011). Analisis Vegetasi dan Pendugaan Karbon Tersimpan pada Pohon Di Kawasan Sekitar Gunung dan Danau Batur Kintamani Bali. *Jurnal Bumi Lestari*.
- Sutaryo, D. (2009). *PENGHITUNGAN BIOMASSA Sebuah pengantar untuk studi karbon dan perdagangan karbon*. Bogor: Wetlands International Indonesia Programme.
- Syachrir, M. (2017). Indeks Nilai Penting dan Pendugaan Karbon Tersimpan pada Hutan Primer Karst di Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung. *Tesis*.
- Wibowo, A., Samsoedin, I., Nurtjahjawilasa, Subarudi, & Muttaqin, Z. (2013). *Petunjuk Praktis*.
- Wibowo, A., Samsoedin, I., Nurtjahjawilasa, Subarudi, S., & Muttaqin, M. Z. (2013). Petunjuk Praktis Menghitung Cadangan Karbon Hutan. *Pusat Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim dan Kebijakan*.
- Yudha, M. P., & Haryono, E. (t.thn.). Kajian Variabilitas CaCO₃ Terlarut Untuk Mengetahui Tingkat Pelarutan dan Penyerapan Karbon Atmosfer Dalam Proses Karstifikasi Kawasan Karst Rembang.
- Zhao, J., Hu, H., & Wang, J. (2022). Forest Carbon Reserve Calculation and Comprehensive Economic Value Evaluation: A Forest Management Model Based on Both Biomass Expansion Factor Method and Total Forest Value. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1-15.