

Analisis Kapasitas Mitigasi Karbon Ekosistem Mangrove di Provinsi Sulawesi Utara

Martina Langi dan Wawan Nurmawan

Program Studi Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Sam Ratulangi Manado, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: martina_langi@unsrat.ac.id

Abstrak. Perubahan iklim global ditandai oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Ekosistem mangrove memainkan peran penting dalam menyerap dan menyimpan karbon biru, yang menjadikannya komponen strategis dalam mitigasi perubahan iklim. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas mitigasi karbon pada ekosistem mangrove di tiga lokasi berbeda di Provinsi Sulawesi Utara: Bunaken, Sondaken, dan Bitung. Pengukuran dilakukan terhadap stok karbon biomassa (atas dan bawah tanah) serta karbon tanah. Hasil menunjukkan bahwa total stok karbon tertinggi terdapat di Bunaken (781 ± 140 Mg C/ha), diikuti Sondaken (772 ± 131 Mg C/ha), dan terendah di Bitung (486 ± 81 Mg C/ha). Uji statistik Kruskal–Wallis mengindikasikan perbedaan signifikan antar lokasi ($p = 0.0001$). Faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi stok karbon meliputi umur tegakan, indeks genangan, tingkat gangguan, dan salinitas. Studi ini menegaskan pentingnya menjaga integritas ekologis mangrove dalam strategi mitigasi berbasis ekosistem.

Kata Kunci: Mangrove; karbon biru; mitigasi iklim; Sulawesi Utara; stok karbon; faktor ekologis

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global menjadi tantangan lingkungan utama abad ke-21, ditandai oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) seperti karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan dinitrogen oksida (N_2O). Gas-gas ini menyebabkan pemanasan global dan meningkatkan frekuensi serta intensitas bencana iklim seperti banjir, kekeringan, dan kenaikan muka air laut (IPCC, 2021). Salah satu strategi mitigasi yang diakui secara global adalah peningkatan penyerapan karbon oleh ekosistem alami, termasuk ekosistem pesisir seperti mangrove.

Mangrove memiliki kapasitas tinggi dalam menyimpan karbon baik dalam bentuk biomassa di atas dan bawah tanah, maupun di dalam sedimen jenuh air yang kaya bahan organik. Karbon yang tersimpan dalam ekosistem pesisir ini dikenal sebagai blue carbon. Penelitian oleh Donato *et al.* (2011) menunjukkan bahwa mangrove menyimpan karbon hingga empat kali lebih banyak dibandingkan hutan tropis daratan. Di Indonesia, ekosistem mangrove menyimpan sekitar 3,14 petagram karbon (Pg C) atau setara dengan 10% cadangan karbon mangrove dunia (Murdiyarso *et al.*, 2015; Alongi, 2020).

Namun, laju deforestasi dan degradasi mangrove di Indonesia masih tinggi akibat konversi lahan untuk tambak, pemukiman, dan infrastruktur pesisir. Menurut BPS (2023), lebih dari 40% kawasan mangrove di beberapa wilayah pesisir Indonesia berada dalam kondisi terdegradasi. Hal ini bukan hanya menurunkan fungsi ekosistem, tetapi juga melepaskan karbon yang tersimpan ke atmosfer, memperburuk krisis iklim (Goldberg *et al.*, 2020).

Ekosistem mangrove merupakan salah satu penyimpan karbon terbesar di antara semua ekosistem hutan pesisir. Mangrove mampu menyimpan karbon 3–5 kali lebih banyak dibandingkan hutan daratan tropis, terutama karena kemampuan mereka menyimpan karbon dalam sedimen jenuh air yang anaerobik (Donato *et al.*, 2011). Sebagian besar karbon tersebut tersimpan dalam tanah, mencapai lebih dari 70% total stok karbon ekosistem mangrove (Alongi, 2014).

Stok karbon mangrove sangat dipengaruhi oleh faktor biotik dan abiotik, termasuk jenis vegetasi, umur tegakan, struktur tegakan, serta kondisi lingkungan seperti salinitas, tekstur tanah, dan tingkat gangguan antropogenik (Komiya *et al.*, 2018; Kauffman *et al.*, 2020). *Rhizophora* spp., misalnya, cenderung menyimpan biomassa lebih tinggi dibandingkan dengan *Avicennia* spp. karena arsitektur akar dan pertumbuhan vertikalnya yang dominan.

Penelitian lokal di kawasan Indonesia timur seperti Maluku dan Gorontalo menunjukkan bahwa stok karbon mangrove sangat bervariasi antar lokasi, mulai dari 80 hingga lebih dari 400 Mg C/ha, tergantung kondisi ekologis dan riwayat gangguannya (Tambunan *et al.*, 2021). Sementara itu, penelitian di Papua menunjukkan nilai stok karbon yang bahkan dapat melebihi 1000 Mg C/ha pada kawasan yang tidak terganggu (Murdiyarso *et al.*, 2020).

Dalam konteks global, hilangnya 1 hektare mangrove dapat melepaskan lebih dari 1000 ton CO₂ ekuivalen ke atmosfer, sehingga menjaga mangrove bukan hanya berdampak lokal, tetapi juga berkontribusi pada target mitigasi emisi global (Herr *et al.*, 2017). Oleh karena itu, strategi konservasi dan restorasi mangrove semakin diprioritaskan dalam agenda perubahan iklim, terutama dalam skema *Nationally Determined Contributions* (NDC) dan mekanisme *carbon offset* berbasis ekosistem (Langi & Nurmawan, 2023; Langi *et al.*, 2025).

Provinsi Sulawesi Utara memiliki ekosistem mangrove yang tersebar luas dan beragam secara ekologis, mulai dari kawasan konservasi di Bunaken hingga kawasan tertekan oleh pembangunan di Bitung. Potensi besar dalam mitigasi iklim ini terancam oleh degradasi dan perubahan tata guna lahan yang belum terkendali. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengukur kapasitas mitigasi karbon pada ekosistem mangrove di tiga lokasi berbeda (Bunaken, Sondaken, dan Bitung) serta menganalisis faktor lingkungan yang memengaruhinya. Tujuan penelitian ini adalah mengukur stok karbon atas tanah, bawah tanah, dan tanah pada mangrove di Bunaken, Sondaken, dan Bitung; menganalisis variasi kapasitas mitigasi karbon antar lokasi berdasarkan kondisi ekologis; dan mengidentifikasi faktor lingkungan yang memengaruhi perbedaan stok karbon antar lokasi.

METODE

1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Maret 2025 di tiga lokasi ekosistem mangrove yang memiliki karakteristik ekologis berbeda di Provinsi Sulawesi Utara. Ketiga lokasi dipilih untuk mewakili gradasi tekanan ekosistem dan perbedaan kondisi ekologis.

- Bunaken: Kawasan konservasi dengan kondisi mangrove yang masih relatif alami dan tertutup rapat.
- Sondaken: Wilayah mangrove yang sedang mengalami regenerasi alami, menunjukkan kondisi semi-alami.
- Bitung: Lokasi yang mengalami tekanan antropogenik tinggi, seperti alih fungsi lahan menjadi pelabuhan, tambak, dan pemukiman.

2. Desain Plot dan Pengukuran Vegetasi

Pada masing-masing lokasi, ditetapkan beberapa plot berukuran 10 × 10 meter secara sistematis untuk pengambilan data vegetasi. Di dalam setiap plot dilakukan:

- Pengukuran diameter batang pohon setinggi dada (DBH) menggunakan pita ukur.
- Pengukuran tinggi pohon menggunakan klinometer atau aplikasi digital berbasis laser rangefinder.
- Identifikasi jenis pohon mangrove yang dominan.

Estimasi biomassa di atas dan bawah tanah dilakukan menggunakan persamaan alometrik yang dikembangkan oleh Komiyama et al. (2015), yang mempertimbangkan DBH dan tinggi pohon untuk jenis-jenis mangrove di kawasan Asia Tenggara.

3. Pengambilan dan Analisis Sampel Tanah

Sampel tanah diambil secara vertikal menggunakan corer hingga kedalaman 100 cm, kemudian dibagi menjadi beberapa lapisan (misalnya: 0–15 cm, 15–50 cm, 50–100 cm) untuk mendapatkan data yang lebih akurat. Setiap sampel dianalisis di laboratorium untuk:

- Kandungan karbon organik menggunakan metode pembakaran kering (loss-on-ignition/LOI) atau metode Walkley-Black.
- Bulk density (kerapatan massa tanah) menggunakan silinder volume tetap.
- Karbon tanah dihitung dengan rumus:

$$\text{Stok karbon tanah} = \%C \times \text{Bulk density} \times \text{Kedalaman} \times \text{Konversi satuan}$$

4. Perhitungan Stok Karbon Total

Total stok karbon pada masing-masing lokasi dihitung dengan menjumlahkan:

- Karbon biomassa di atas dan bawah tanah
- Karbon tanah per satuan luas (Mg C/ha)
- Selanjutnya, total karbon dikonversi ke CO₂ ekuivalen menggunakan faktor konversi 3.67 (IPCC, 2006).

5. Analisis Statistik

- Uji Kruskal–Wallis digunakan untuk menguji signifikansi perbedaan stok karbon antar lokasi penelitian karena data tidak memenuhi asumsi normalitas.
- Uji Korelasi Pearson digunakan untuk mengetahui hubungan antara stok karbon dengan beberapa variabel lingkungan, seperti:
 - Umur tegakan (tahun)
 - Indeks genangan (skor kuantitatif berdasarkan durasi dan frekuensi genangan)
 - Salinitas tanah (diukur menggunakan refraktometer atau sensor)
 - Tingkat gangguan (berdasarkan skor skala Likert hasil observasi lapangan)
- Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak statistik seperti SPSS atau R.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran total stok karbon pada ekosistem mangrove di tiga lokasi penelitian menunjukkan adanya variasi yang signifikan (**Gambar 1**). Hasil perhitungan mencakup stok karbon dari biomassa di atas tanah, biomassa akar bawah tanah, serta karbon yang tersimpan dalam lapisan tanah sedimen hingga kedalaman satu meter.

Lokasi Bunaken, yang merupakan kawasan konservasi dengan vegetasi lebat dan gangguan minimal, mencatat stok karbon tertinggi dengan nilai rata-rata 781 ± 140 Mg C/ha (**Tabel 1**). Lokasi ini didominasi oleh spesies *Rhizophora apiculata*, *Avicennia marina*, dan *Sonneratia alba*, yang secara struktural memiliki biomassa besar dan sistem akar yang kompleks, berkontribusi terhadap akumulasi karbon yang tinggi di tanah.

Lokasi Sondaken, yang tergolong semi-alami dengan tingkat regenerasi cukup baik, mencatat stok karbon rata-rata sebesar 772 ± 131 Mg C/ha (**Tabel 1**). Vegetasi di lokasi ini lebih beragam, termasuk *Rhizophora mucronata*, *Bruguiera gymnorhiza*, dan *Avicennia officinalis*. Walau nilai total karbon sedikit lebih rendah dari Bunaken, perbedaan ini tidak signifikan secara

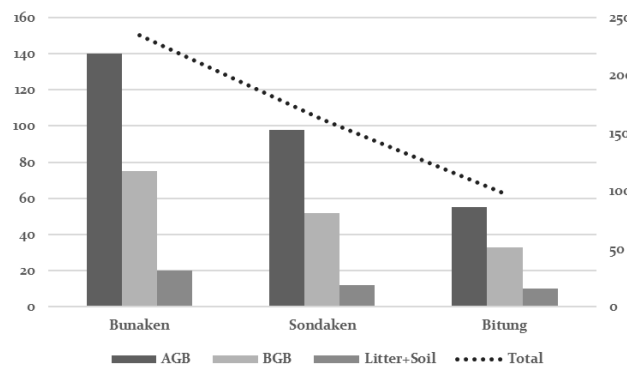
ekologis, menunjukkan bahwa kawasan yang sedang mengalami pemulihan dapat menyimpan karbon dalam jumlah besar jika dikelola dengan baik.

Sebaliknya, lokasi Bitung menunjukkan nilai stok karbon terendah, yaitu 486 ± 81 Mg C/ha (Tabel 1). Lokasi ini mengalami tekanan antropogenik tinggi, seperti konversi lahan menjadi pelabuhan dan tambak, serta degradasi ekosistem. Vegetasi yang tersisa terutama terdiri dari *Avicennia marina* dan *Sonneratia caseolaris* yang tumbuh secara sporadis di sepanjang tepi perairan.

Analisis statistik menggunakan uji Kruskal–Wallis menunjukkan bahwa perbedaan stok karbon antar lokasi adalah signifikan secara statistik ($H = 17,59$; $p = 0,0001$), mengindikasikan bahwa kondisi ekologis memiliki pengaruh nyata terhadap kapasitas penyimpanan karbon. Lebih lanjut, analisis korelasi Pearson dilakukan untuk mengidentifikasi hubungan antara total stok karbon dengan beberapa faktor lingkungan. Hasilnya menunjukkan:

- Umur tegakan memiliki korelasi positif yang kuat ($r = 0,73$)
- Indeks genangan berkorelasi positif ($r = 0,52$)
- Tingkat gangguan berkorelasi negatif ($r = -0,68$)
- Salinitas juga menunjukkan korelasi negatif ($r = -0,41$)

Temuan ini memberikan gambaran kuantitatif bahwa kondisi ekologis yang lebih utuh dan minim gangguan secara langsung meningkatkan kapasitas mitigasi karbon dari ekosistem mangrove.



Gambar 1. Rata-rata Total Stok Karbon (Mg C/ha) di Tiga Lokasi Penelitian

Tabel 1. Rangkuman Stok Karbon Rata-Rata di Tiga Lokasi Penelitian

Lokasi	Stok Karbon (Mg C/ha)	Standar Deviasi	Keterangan
Bunaken	781	± 140	Kawasan konservasi, vegetasi lebat
Sondaken	772	± 131	Semi-alami, sedang mengalami regenerasi
Bitung	486	± 81	Terfragmentasi, tertekan aktivitas industri

Perbedaan kapasitas mitigasi karbon antara lokasi mencerminkan kondisi ekologis masing-masing ekosistem mangrove. Lokasi Bunaken dan Sondaken yang relatif alami dan minim gangguan antropogenik memiliki stok karbon yang jauh lebih tinggi dibandingkan Bitung. Hal ini konsisten dengan temuan Donato *et al.* (2011) dan Murdiyarso *et al.* (2015) yang menyatakan

bahwa mangrove dengan tekanan rendah memiliki kemampuan penyimpanan karbon yang lebih besar.

Umur tegakan yang lebih tua cenderung memiliki biomassa lebih besar, sementara genangan yang stabil menjaga akumulasi karbon tanah. Sebaliknya, gangguan akibat konversi lahan, pembangunan pelabuhan, dan fragmentasi habitat menurunkan kapasitas penyimpanan karbon di Bitung. Pengaruh negatif salinitas juga menunjukkan bahwa lingkungan ekstrem menghambat pertumbuhan vegetasi mangrove secara optimal.

KESIMPULAN

Total stok karbon pada ekosistem mangrove di Sulawesi Utara berkisar antara 486 hingga 781 Mg C/ha. Bunaken memiliki kapasitas mitigasi tertinggi, diikuti oleh Sondaken dan Bitung. Terdapat perbedaan signifikan kapasitas mitigasi karbon antar lokasi, dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti umur tegakan, tingkat genangan, dan gangguan antropogenik. Hasil ini mempertegas pentingnya menjaga kondisi ekologis mangrove untuk strategi mitigasi iklim yang efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6, 195–219.
- Alongi, D. M. (2020). Blue carbon: Coastal sequestration for climate change mitigation. Springer.
- BPS. (2023). Statistik Lingkungan Hidup Indonesia 2023.
- Donato, D. C., *et al.* (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297.
- Goldberg, L., Lagomasino, D., Thomas, N., & Fatoyinbo, T. (2020). Global declines in human-driven mangrove loss. *Global Change Biology*, 26(10), 5844–5855.
- Herr, D., von Unger, M., & Laffoley, D. (2017). Blue Carbon Policy Framework 2.0: Unlocking the mitigation potential of the ocean. *UNEP and Conservation International*.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kauffman, J. B., Trejo, H. H., Heider, C., & Contreras, W. M. (2020). Carbon stocks of intact mangroves and carbon emissions arising from their conversion in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Ecological Applications*, 30(4), e02043.
- Komiyama, A., *et al.* (2018). Factors affecting carbon stock in mangrove ecosystems. *Journal of Tropical Ecology*.
- Komiyama, A., Ong, J. E., & Pongpan, S. (2015). Allometric models for estimating root biomass in mangrove forests. *Aquatic Botany*, 92(1), 56–66.
- Langi, M. A., & Nurmawan, W. (2023). Hubungan faktor lingkungan terhadap produksi serasah mangrove Teling Tombariri, Taman Nasional Bunaken. *Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan*, 10(3), 125–132. <https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v10i3.48394>
- Langi, M., Nurmawan, W., Saroinsong, F., & Walangitan, H. (2025). Comparative economic valuation of mangrove ecosystems in conservation and non-conservation zones in North Sulawesi. *Jurnal Agroekoteknologi Terapan*, 6(1), 161–167. <https://doi.org/10.35791/jat.v6i1.62743>
- Murdiyarso, D., *et al.* (2015). The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 5, 1089–1092.

- Murdiyarso, D., *et al.* (2020). Measuring and monitoring carbon stocks and emissions in mangrove forests: A manual. CIFOR.
- Tambunan, M., *et al.* (2021). Estimasi karbon biru di ekosistem mangrove Indonesia Timur. *Jurnal Kehutanan Tropika*, 9(2), 88–97.