



Estimasi Kandungan Karbon pada Sedimen Mangrove di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Pulau Bali

Moh Rezasyah Falevi^{a*}, IGB Sila Dharma^{a,b}, and I Gusti Ngurah Putra Dirgayusa^a

^aProgram Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Udayana, Bali, Indonesia

^bProgram Studi Magister Ilmu Kelautan, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Udayana, Bali, Indonesia

*Corresponding author, email: falevixx@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: July 3, 2025

Received in revised form: July 10, 2025

Accepted: August 27, 2025

Available online: February 28, 2026

ABSTRACT

Mangrove ecosystems play a crucial role in climate change mitigation due to their exceptional ability to store carbon, particularly in sediment layers that can retain carbon for thousands of years. This study aimed to estimate vertical sediment carbon stocks in the mangrove ecosystem of Ngurah Rai Grand Forest Park (Tahura), Bali Island. Sampling was conducted at four stations using a purposive sampling method, with each station comprising three zones (front, middle, back) and four replicates per zone, resulting in 48 sediment samples. Each sample was sectioned into four depth intervals: 0–25 cm, 25–50 cm, 50–75 cm, and 75–100 cm. Environmental parameters such as pH, temperature, and salinity were measured, and sediment samples were analyzed using the Loss on Ignition (LOI) method. Carbon content was calculated by converting LOI to organic carbon, and combining it with bulk density values to estimate total carbon stock (in tons/ha). The results indicated variations in environmental parameters: pH ranged from 5.48 to 7.23, salinity from 2.06‰ to 5.90‰, and temperature from 30.45°C to 31.58°C. Organic carbon content ranged from 3.66% to 5.64%, with the highest average found in the 50–75 cm depth layer. The central zone had the highest average carbon stock at 707.33 tons/ha, followed by the back (681.23 tons/ha) and front (543.63 tons/ha).

Keywords:

Carbon Estimation

Sediment

Mangrove

Taman Hutan Raya Bali

Kata Kunci:

Carbon Estimation

Sedimen

Mangrove

Taman Hutan Raya Bali

ABSTRAK

Ekosistem mangrove memiliki peran penting dalam mitigasi perubahan iklim karena kemampuannya menyimpan karbon, khususnya pada lapisan sedimen yang dapat mengikat karbon hingga ribuan tahun. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi simpanan karbon sedimen secara vertikal pada ekosistem mangrove di Taman Hutan Raya (Tahura) Ngurah Rai, Pulau Bali. Pengambilan sampel dilakukan di empat stasiun menggunakan metode *purposive sampling*, di mana setiap stasiun terdiri atas tiga zona (depan, tengah, belakang) dengan empat kali replikasi, menghasilkan total 48 sampel sedimen. Setiap sampel dibagi ke dalam empat lapisan kedalaman: 0–25 cm, 25–50 cm, 50–75 cm, dan 75–100 cm. Parameter lingkungan seperti pH, suhu, dan salinitas diukur, sedangkan kandungan karbon dianalisis menggunakan metode *Loss on Ignition* (LOI). Kandungan karbon organik dihitung dari LOI dan dikalikan dengan nilai *bulk density* untuk mendapatkan estimasi total karbon (dalam ton/ha). Hasil penelitian menunjukkan variasi parameter lingkungan, dengan pH berkisar antara 5,48–7,23, salinitas 2,06–5,90‰, dan suhu 30,45–31,58°C. Kandungan karbon organik berkisar antara 3,66–5,64%, dengan rata-rata tertinggi pada lapisan 50–75 cm. Zona tengah memiliki simpanan karbon tertinggi (707,33 ton/ha), diikuti zona belakang (681,23 ton/ha), dan zona depan (543,63 ton/ha).

2026 JMRT. All rights reserved.

1. Pendahuluan

Ekosistem mangrove merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki peranan penting dalam stabilisasi lingkungan global. Mangrove dikenal sebagai salah satu penyerap karbon (CO₂) yang sangat efisien melalui proses sekuestrasi karbon yang melibatkan fotosintesis dan pengendapan bahan organik dalam tanah. Bahkan, mangrove tergolong dalam kategori ekosistem

“karbon biru” karena kemampuannya menyimpan karbon dalam jumlah besar pada struktur vegetasi dan terutama di lapisan sedimen (Alongi, 2012). Keberadaan mangrove menjadi strategi alami mitigasi perubahan iklim yang semakin krusial dalam konteks meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer.

Indonesia memiliki ekosistem mangrove terluas di dunia, mencakup sekitar 3,39 juta hektare atau sekitar 21 dari total mangrove global yang tersebar diberbagai wilayah di Indonesia

(Badan Restorasi Gambut dan Mangrove, 2021). Luas ini menjadikan Indonesia sebagai negara yang memiliki peran strategis dalam konservasi karbon global. Namun, mangrove juga menjadi ekosistem yang rentan terhadap eksploitasi lahan, konversi tambak, dan pembangunan pesisir yang tidak terkendali (Friess et al., 2019). Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap fungsi ekologis mangrove, khususnya dalam penyimpanan karbon, menjadi sangat penting untuk mendukung kebijakan restorasi dan mitigasi iklim nasional.

Salah satu aspek vital dalam fungsi ekosistem mangrove adalah kemampuannya menyimpan karbon di lapisan sedimen. Penelitian menunjukkan bahwa lebih dari 50% simpanan karbon dalam ekosistem mangrove tidak terdapat pada vegetasi, melainkan pada sedimen bawah tanah yang mampu menyimpan karbon hingga kedalaman lebih dari 1 meter dan bertahan selama ribuan tahun (Donato et al., 2011; Murdiyarso et al., 2015). Karbon ini berasal dari akumulasi bahan organik seperti serasah daun, akar, dan ranting yang terdekomposisi secara lambat di lingkungan anaerobik. Oleh karena itu, sedimen mangrove tidak hanya menjadi media tumbuh, tetapi juga sebagai “gudang karbon” alami.

Distribusi karbon dalam sedimen tidak bersifat homogen, melainkan sangat dipengaruhi oleh kedalaman. Secara umum, kandungan karbon organik menurun seiring bertambahnya kedalaman akibat proses dekomposisi dan berkurangnya input bahan organik baru (Schlesinger & Bernhardt, 2013). Namun, pola ini juga dapat bervariasi tergantung kondisi lingkungan seperti oksigenasi, tekstur tanah, dan aktivitas biota. Oleh karena itu, analisis vertikal karbon dalam sedimen menjadi penting untuk memahami dinamika penyimpanan karbon jangka panjang.

Selain kedalaman, parameter lingkungan seperti suhu, pH, dan salinitas diketahui memiliki pengaruh terhadap proses akumulasi dan stabilisasi karbon dalam sedimen. Suhu tinggi dapat meningkatkan aktivitas mikroba dan mempercepat dekomposisi bahan organik, sementara pH memengaruhi stabilitas senyawa karbon dalam tanah. Salinitas tinggi cenderung menurunkan aktivitas mikroba pengurai, sehingga mendukung akumulasi bahan organik (Lovelock et al., 2017; Wang et al., 2019). Oleh karena itu, penting untuk mengukur parameter-parameter ini dalam penelitian karbon sedimen.

Jenis vegetasi mangrove juga berperan besar dalam menentukan jumlah karbon yang tersimpan di sedimen. Setiap spesies mangrove memiliki laju pertumbuhan, jenis serasah, dan sistem perakaran yang berbeda-beda, yang memengaruhi input bahan organik ke sedimen. Misalnya, spesies *Rhizophora stylosa* dilaporkan berkontribusi positif terhadap peningkatan karbon sedimen, sedangkan *Sonneratia alba* justru memiliki korelasi negatif (Irawati et al., 2021). Oleh karena itu, identifikasi spesies mangrove sangat relevan dalam kajian karbon sedimen.

Taman Hutan Raya (Tahura) Ngurah Rai di Bali merupakan kawasan mangrove terbesar di Pulau Bali, dengan luas mencapai ±1.373,5 ha, di mana sekitar 1.002,22 ha merupakan tutupan vegetasi mangrove (Pratama et al., 2019). Kawasan ini terbagi menjadi hutan alam yang didominasi oleh *Sonneratia alba* dan hutan rehabilitasi dengan dominasi *Rhizophora mucronata*, *R.*

stylosa, dan *R. apiculata*. Sejak 2022, kawasan ini menjadi model restorasi dalam proyek nasional dan mendapat perhatian dalam *World Water Forum 2024*, menjadikannya lokasi penting untuk kajian ekologis dan konservasi karbon.

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan di Tahura Ngurah Rai. Penelitian mengenai simpanan karbon dalam ekosistem mangrove telah banyak dilakukan, baik di tingkat lokal maupun global. Salah satu studi penting dilakukan oleh Donato et al. (2011), yang menegaskan bahwa mangrove merupakan salah satu hutan tropis paling kaya karbon, terutama karena akumulasi karbon di dalam sedimen. Studi ini menjadi rujukan internasional dalam kajian karbon biru dan digunakan oleh IPCC dalam merumuskan panduan mitigasi iklim berbasis ekosistem pesisir. Di Indonesia, penelitian Irawati et al. (2021) di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali, menjadi salah satu yang relevan karena lokasinya sama dengan penelitian ini. Studi tersebut membandingkan simpanan karbon antara hutan alam dan hutan rehabilitasi. Hasilnya menunjukkan bahwa jenis vegetasi memengaruhi kandungan karbon sedimen, di mana *Rhizophora stylosa* memiliki pengaruh positif terhadap akumulasi karbon. Namun, penelitian tersebut belum mengkaji distribusi karbon secara vertikal per lapisan kedalaman.

Penelitian lain oleh Razaan et al. (2024) dilakukan di kawasan Karangsewu, Bali, dengan fokus khusus pada variasi kandungan karbon sedimen secara vertikal dari kedalaman 0-25 cm hingga kedalaman 75-100 cm. Keunggulan studi ini adalah pada struktur sampling berdasarkan kedalaman dan pengukuran parameter lingkungan seperti pH, suhu, dan salinitas. Namun, studi tersebut tidak dilakukan di Tahura Ngurah Rai dan tidak menekankan aspek spesies vegetasi.

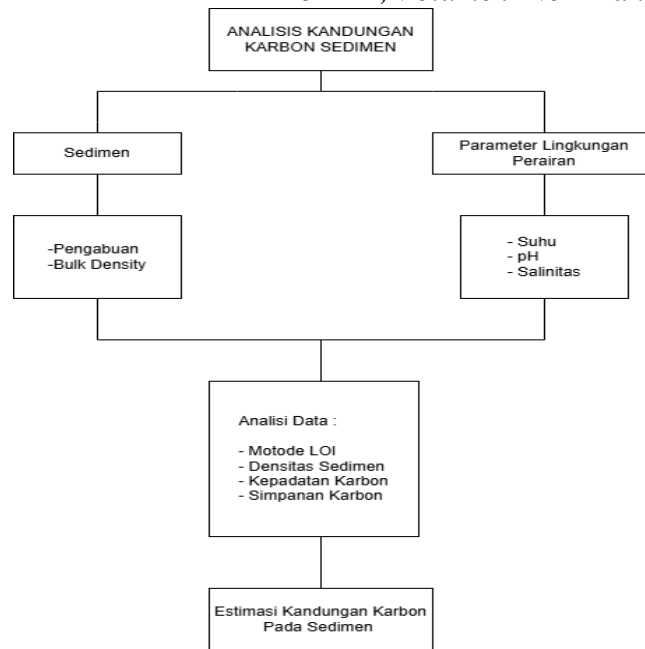
Studi oleh Prihandana et al. (2021) menambahkan dimensi penting mengenai keterkaitan antara substrat, jenis vegetasi, dan kandungan karbon. Penelitian ini memperlihatkan bahwa tekstur substrat halus serta dominasi spesies tertentu dapat meningkatkan kandungan karbon sedimen. Meskipun informatif, penelitian tersebut menggunakan pendekatan spasial horizontal, bukan vertikal, dan tidak sampai pada estimasi total karbon per kedalaman. Hal ini akan memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap dinamika penyimpanan karbon dalam ekosistem mangrove.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengelolaan ekosistem mangrove berbasis sains, mendukung strategi mitigasi perubahan iklim, serta menjadi dasar dalam perencanaan konservasi dan restorasi mangrove di masa mendatang. Data simpanan karbon sedimen yang terukur secara vertikal juga dapat digunakan sebagai indikator monitoring perubahan ekosistem akibat aktivitas antropogenik atau perubahan iklim.

2. Metode Penelitian

2.1 Kerangka Penelitian

Adapun kerangka penelitian atau alur dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



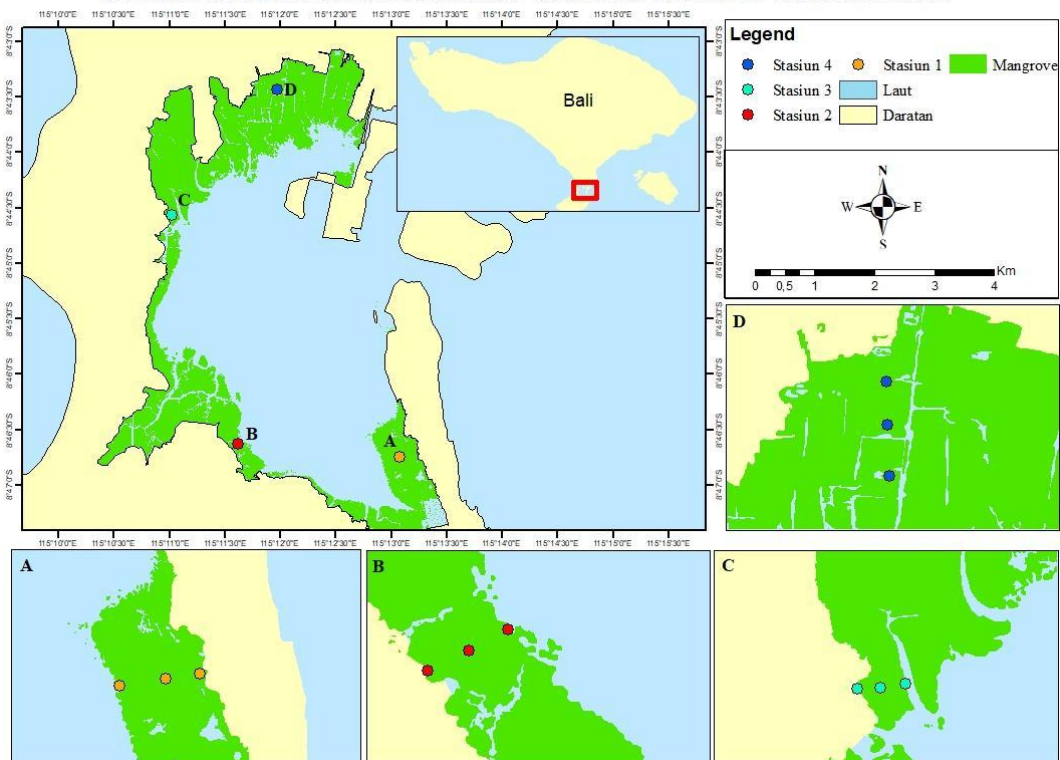
Gambar 1. Kerangka Penelitian

2.2 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan di wilayah Kawasan Hutan Mangrove Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali (Gambar 2), tepatnya pada sedimen ekosistem mangrove pada bulan september 2024. Penelitian ini dilakukan di wilayah ekosistem mangrove yang ada di Kawasan Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. Penentuan lokasi (stasiun) penelitian menggunakan metode *purposive*

sampling, yang ditentukan berdasarkan aksesibilitas di lokasi dan keberadaan vegetasi mangrove di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. Terdapat 4 stasiun yang dimana 1 stasiun memiliki 3 (Belakang, tengah, depan) titik dan setiap titik dilakukan 4 kali pengambilan sampel menggunakan metode *puposeive sampling* sehingga total keseluruhan sampel sebanyak 48 sampel. Setiap titik mewakili lokasi ekosistem mangrove yang ada di lokasi stasiun.

PETA LOKASI PENELITIAN TAMAN HUTAN RAYA BALI



Gambar 2. Peta Lokasi Penelitian

2.3 Alat dan Bahan

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi sediment core, kantong sampel, meteran, kamera, alat tulis, oven,

neraca analitik, dan muffle furnace. Sedangkan bahan yang digunakan dalam pengambilan data adalah kantong plastik (ziplock bag), aluminium foil, dan kertas label.

2.4 Metode Penelitian

2.4.1 Pengambilan Data Sedimen

Sampel sedimen diambil menggunakan sediment corer ke dalam sedimen, diikuti dengan proses pembelahan horizontal seperti Prasetyo (2021). Terdapat 4 stasiun yang dimana 1 stasiun memiliki 3 titik dan setiap titik dilakukan 4 kali pengambilan sampel. Zona yang telah ditentukan ini didasarkan pada karakteristik substrat yang terdapat di dalam vegetasi mangrove, seperti tekstur tanah (pasir, liat, atau campuran keduanya) yang bertujuan untuk memfasilitasi perbandingan komprehensif perkiraan karbon di tiga zona yang berbeda yaitu depan, tengah, belakang (Prihandana et al., 2021). Setelah pengumpulan sampel sedimen yang berhasil, langkah selanjutnya melibatkan pembagian sampel ini menjadi empat subsampel berbeda yang dikategorikan menurut interval kedalaman: 0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm, dan 75-100 cm. Pembagian ini didasarkan pada karakteristik sedimen mangrove yang sering memiliki lapisan dengan kandungan karbon dan bahan organik yang bervariasi tergantung pada kedalamannya. Lapisan lebih dangkal (0-25 cm) umumnya mengandung lebih banyak bahan organik yang belum terdekomposisi dan lebih banyak karbon yang dapat disimpan, sementara lapisan yang lebih dalam (75-100 cm) cenderung mengandung karbon yang sudah lebih stabil dan terdekomposisi (Cahoon et al., 2003; Alongi, 2012). Selanjutnya, sampel sedimen yang dipisahkan dipindahkan ke wadah sampel yang diberi label berdasarkan masing-masing stasiun pengambilan).

2.4.2 Karbon pada Sampel Sedimen

Analisis laboratorium sampel sedimen melibatkan penentuan kandungan karbon organik melalui penerapan metode *loss on ignage* (LOI). Proses ini mencakup pemindahan sampel sedimen dari wadah plastik ke piring aluminium foil, diikuti dengan prosedur pengeringan yang cermat dalam oven yang diatur pada suhu 60°C selama 48 jam. Selanjutnya, sampel kering dihancurkan dan diukur secara tepat untuk mengekstrak sekitar 5 gram, yang kemudian ditimbang dengan cermat menggunakan timbangan analitik. Langkah selanjutnya adalah menempatkan sampel dalam wadah untuk menjalani pembakaran dalam tungku peredam yang dipertahankan pada suhu 550°C selama 4 jam (Razaan et al., 2024).

2.4.3 Pengambilan Data Kualitas Perairan

Parameter lingkungan yang diukur dalam penelitian ini adalah PH, suhu dan salinitas menggunakan *multimeter com 600 water quality tester*, sedangkan untuk tipe substrat akan dicatat sesuai dengan analisis langsung di lapangan. Nilai parameter lingkungan dalam satu stasiun akan didapatkan dengan cara mencari rata-rata dari tiap zona di masing-masing stasiun yang ada.

2.5 Analisis Data

2.5.1 Metode LOI

Metode LOI (*loss on ignition*) merupakan pengukuran massa sampel yang hilang setelah dipanaskan pada suhu yang tinggi. Suhu yang tinggi ini digunakan untuk memastikan hanya karbon organik yang teroksidasi (Suryono et al., 2018). Untuk menentukan persentase LOI dapat menggunakan Persamaan 1:

$$\%LOI = \frac{(mi - mt)}{mi} \times 100 \quad (1)$$

Keterangan:

mi : massa kering sebelum pembakaran (g)

mt : massa kering setelah pembakaran (g)

Karena metode LOI hanya mewakili materi organik secara umum dan tidak langsung menunjukkan kehilangan karbon organik, maka perlu dilakukan penghitungan antara persentase LOI dan persentase karbon organik (% Corg). Hal ini dilakukan melalui persamaan korelasi antara % LOI dan % Corg berdasarkan penelitian di lokasi dengan iklim yang paling mirip dengan lokasi penelitian, seperti yang dilakukan oleh Kaufman et al., (2012).

$$\%C_{org} = 0,415 \times \%Loi + 2,89 \quad (2)$$

Keterangan:

% Corg : Persentase kandungan karbon

0,415 : Konstanta untuk mengkonversi % bahan organik menjadi % C organik

% LOI : Persentase bahan organik sedimen

2,89 : Konstanta untuk mengkonversi % bahan organik menjadi % C organik

Untuk membandingkan nilai karbon organik sedimen dari setiap zona, dihitung rata-rata dari setiap kedalaman di masing-masing stasiun

2.5.2 Densitas Sedimen (Bulk Density)

Bulk density tanah adalah massa partikel per satuan volume sedimen disertai porinya. *Bulk density* (BD) dapat diperoleh melalui Persamaan 3 (Howard et al., 2014):

$$BD = \frac{m}{v} \quad (3)$$

Keterangan:

BD : Bulk density (g/cm³)

m : massa kering (g)

v : volume sampel (cm³)

Untuk memperoleh perbandingan nilai bulk density dari setiap zona, dilakukan penghitungan rata-rata dari setiap kedalaman di masing-masing stasiun.

2.5.3 Kepadatan Karbon

Dari hasil perhitungan BD, maka dapat diperoleh kepadatan karbon sedimen (C) yang dapat diperoleh dengan Persamaan 4 berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Howard et al., 2014):

$$pC = \%C_{org} \times BD \quad (4)$$

Keterangan:

pC : kepadatan karbon (Mg/ha)

%C_{org} : Persentase kandungan karbon organik

Bd : Bulk density (g/cm³)

Untuk mendapatkan perbandingan nilai kepadatan karbon sedimen dari masing-masing zona, maka dilakukan perhitungan dan statistik perbandingan rata-rata dari setiap kedalaman pada masing-masing stasiun.

2.5.4 Simpanan Karbon

Hasil simpanan karbon sedimen dapat diperkirakan melalui Persamaan 5 yang didasarkan pada penelitian Howard et al., (2014)):

$$SC = BD \times SDI \times \% C_{org} \quad (5)$$

Keterangan:

H	: kelimpahan sampah laut berdasarkan massa
SC	: simpanan karbon sedimen (Mg/ha)
BD	: Bulk density (g/cm ³)
SDI	: Interval kedalaman sampel (cm)
%C _{org}	: Persentase kandungan karbon
*1 Mg (mega gram) : 1 Ton	

Dengan demikian simpanan karbon organik dapat dituliskan dalam bentuk satuan (ton/ha). Nilai simpanan karbon juga diukur secara vertikal dengan keempat kedalaman yang berbeda adapun kedalaman yang diukur yaitu 0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm, 50-100 cm (Mahasani, 2015). Untuk mendapatkan variasi secara vertikal dari masing-masing zona, maka dilakukan perhitungan rata-rata dari setiap kedalaman pada masing-masing stasiun dan dilakukan penghitungan secara total karbon dengan luas Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Parameter Lingkungan

Pada penelitian ini, pengukuran parameter lingkungan seperti pH Tanah, Salinitas, dan Suhu dilakukan pada empat stasiun yang terletak di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. Pengukuran ini bertujuan untuk mendapatkan gambaran mengenai kondisi lingkungan yang dapat memengaruhi kandungan karbon dalam sedimen mangrove. Pengukuran dilakukan pada tiga area yang berbeda di setiap stasiun: Belakang, Depan, dan Tengah. Tabel 1 di bawah ini menyajikan hasil pengukuran rata-rata untuk setiap parameter lingkungan yang dianalisis pada masing-masing stasiun dan area.

Tabel 1. Rata Rata Hasil Pengukuran Parameter Lingkungan

Stasiun	Area	pH Tanah	Salinitas (%)	Suhu (°C)
1	Depan	7.1725 ± 0.0665	3.844 ± 1.0300	31.125 ± 1.6520
	Tengah	7.1400 ± 0.2905	3.5443 ± 0.5422	30.875 ± 1.1529
	Belakang	7.2300 ± 0.1930	3.855 ± 0.7495	31.075 ± 1.4408
2	Depan	6.7450 ± 0.4101	3.4845 ± 0.6935	30.450 ± 1.1619
	Tengah	7.1525 ± 0.1072	3.0458 ± 0.4929	31.475 ± 1.4408
	Belakang	7.1100 ± 0.0469	2.5145 ± 0.4756	31.225 ± 1.6070
3	Depan	6.9675 ± 0.1495	2.6695 ± 0.1199	30.800 ± 1.2623
	Tengah	5.4800 ± 0.1598	2.0648 ± 0.1586	30.950 ± 1.0279
	Belakang	6.7625 ± 0.1179	2.2200 ± 0.7528	31.050 ± 1.3964
4	Depan	6.2625 ± 0.8195	5.8963 ± 2.2683	31.325 ± 1.6112
	Tengah	6.5675 ± 0.8008	4.9615 ± 1.1503	30.875 ± 1.0145
	Belakang	6.3700 ± 0.4070	5.5715 ± 1.7174	31.575 ± 1.1786

Berdasarkan hasil pengukuran, nilai pH tanah pada semua stasiun penelitian terdapat perbedaan yang signifikan berkisar antara 5.48 hingga 7.23. Pada stasiun 1 di area belakang, pH tanah tercatat sebesar 7.23, sedangkan pada stasiun 3 di area tengah tercatat pH tanah terendah yaitu 5.48. Stasiun 2 di area depan memiliki pH sebesar 6.75, yang merupakan nilai pH terendah di antara area lainnya pada stasiun tersebut, sementara stasiun 4 di area belakang mencatatkan pH sebesar 6.37, yang juga tergolong rendah dibandingkan dengan stasiun lainnya. Secara keseluruhan, pH tanah pada stasiun 1, stasiun 2, dan stasiun 4 cenderung memiliki nilai pH yang lebih tinggi pada area belakang dan sedikit menurun pada area tengah dan depan.

Pada parameter suhu, hasil pengukuran menunjukkan rentang nilai antara 30.45°C hingga 31.58°C. Suhu tertinggi tercatat pada stasiun 4 di area belakang dengan 31.58°C, diikuti oleh stasiun 2 di area tengah yang memiliki suhu 31.48°C. Sementara itu, suhu terendah tercatat pada stasiun 2 di area depan dengan 30.45°C,

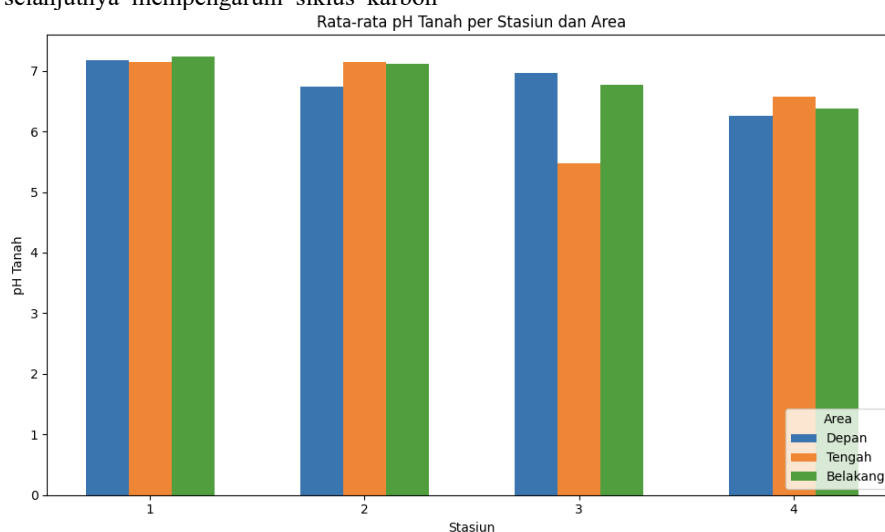
yang merupakan suhu terendah di antara seluruh stasiun dan area. Secara umum, suhu tanah di setiap stasiun tidak menunjukkan fluktuasi yang signifikan antar area, dengan perbedaan suhu yang relatif kecil antara area depan, tengah, dan belakang di setiap stasiun.

Untuk parameter salinitas, hasil pengukuran berkisar antara 2.06% hingga 5.90%. Nilai salinitas tertinggi tercatat pada stasiun 4 di area depan dengan 5.90%, sedangkan nilai salinitas terendah terdapat pada stasiun 3 di area tengah dengan 2.06%. Stasiun 1 di area belakang tercatat memiliki salinitas sebesar 3.855%, yang merupakan nilai salinitas tertinggi di antara area pada stasiun tersebut. Stasiun 2 di area depan memiliki salinitas 3.485%, sedangkan pada stasiun 3, nilai salinitas yang tercatat adalah 2.67% di area depan dan 2.22% di area belakang.

Pada penelitian ini, parameter lingkungan yang diukur untuk menilai kondisi ekosistem mangrove di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali, terdiri dari pH tanah, suhu, dan salinitas. Parameter ini

memiliki pengaruh yang signifikan terhadap proses biogeokimia yang terjadi di sedimen mangrove, terutama dalam hal penyimpanan karbon. Sebagai contoh, pH tanah dan salinitas merupakan faktor kunci yang mempengaruhi kegiatan mikroorganisme pengurai dan proses biogeokimia lainnya dalam ekosistem mangrove (Hutchings et al., 2008). Suhu juga mempengaruhi laju dekomposisi dan aktivitas mikroorganisme di dalam sedimen, yang selanjutnya mempengaruhi siklus karbon

dalam ekosistem tersebut (Alongi, 2012). Sebagai ekosistem yang berperan dalam siklus karbon global, pemahaman tentang kondisi lingkungan di sekitar mangrove sangat penting untuk estimasi kandungan karbon pada sedimen. Hal ini karena mangrove memiliki kapasitas besar dalam menyimpan karbon, yang dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungan seperti pH, salinitas, dan suhu (Donato et al., 2011).



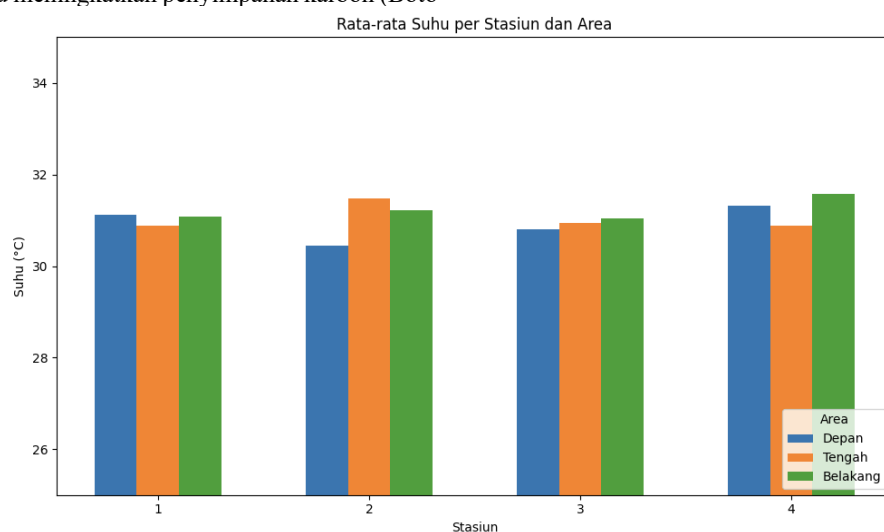
Gambar 3. Grafik pH Sedimen Mangrove

Nilai pH tanah yang optimal untuk ekosistem mangrove biasanya berkisar antara 6,5 hingga 8,5. Hasil pengukuran di Taman Hutan Raya Ngurah Rai menunjukkan terdapat perbedaan yang signifikan bahwa nilai pH tanah di berbagai stasiun penelitian bervariasi antara 5,48 hingga 7,23. Rata-rata pH tanah di area belakang mangrove menunjukkan nilai pH 7,23, yang masih dalam rentang pH yang dapat ditoleransi oleh ekosistem mangrove. Namun, beberapa stasiun di area tengah menunjukkan pH yang lebih rendah, seperti di stasiun 3 dengan nilai pH 5,48 (Gambar 3).

Penelitian yang dilakukan oleh Feller et al. (2010) menunjukkan bahwa pH yang lebih rendah dapat memperlambat proses dekomposisi bahan organik, sehingga berpotensi meningkatkan akumulasi karbon dalam sedimen. Proses dekomposisi yang lambat dapat mengurangi pelepasan CO₂ ke atmosfer dan membantu meningkatkan penyimpanan karbon (Boto

et al., 1989). Sebaliknya, pH yang lebih tinggi dapat mempercepat dekomposisi bahan organik dan meningkatkan emisi karbon ke atmosfer, yang mengurangi simpanan karbon dalam sedimen. Hal ini sejalan dengan temuan yang dipaparkan oleh Alongi (2008), yang mencatat bahwa ekosistem mangrove dengan pH lebih tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak gas CO₂.

Selain itu, kondisi pH yang lebih rendah juga mempengaruhi ketersediaan unsur hara di tanah, yang berperan dalam proses pembentukan humus dan akumulasi karbon organik dalam sedimen. Penelitian oleh Schimel (2007) mengindikasikan bahwa tanah dengan pH lebih rendah umumnya memiliki kandungan karbon organik yang lebih tinggi dibandingkan tanah yang lebih basa, asalkan faktor-faktor lain, seperti kelembaban dan suhu, dalam kondisi yang mendukung.



Gambar 4. Grafik Suhu Sedimen Mangrove

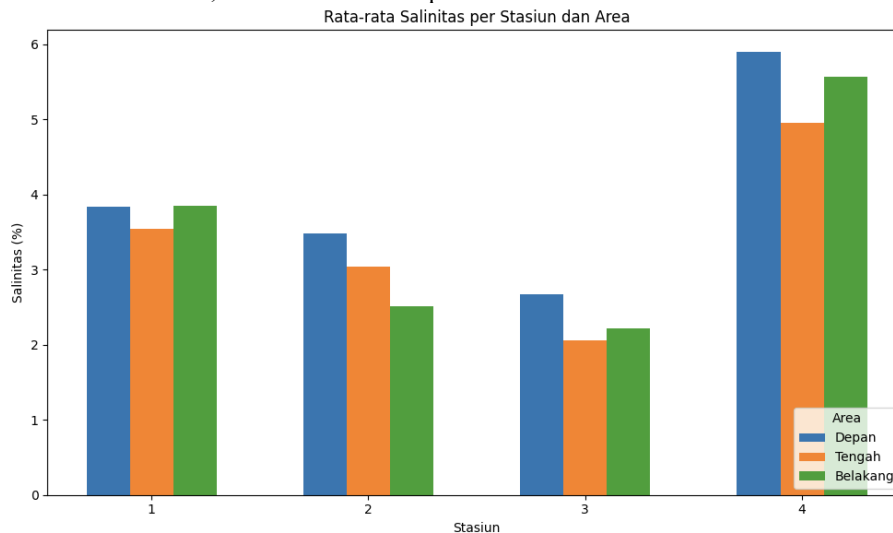
Suhu tanah memiliki pengaruh langsung terhadap aktivitas mikroorganisme dalam proses dekomposisi bahan organik. Hasil pengukuran suhu tanah di Taman Hutan Raya Ngurah Rai

menunjukkan fluktuasi antara 30,45°C hingga 31,58°C. Berdasarkan pedoman Kepmen LH (2004), suhu optimal untuk ekosistem mangrove adalah antara 28°C hingga 30°C, yang berarti

suhu di kawasan ini masih berada dalam batas toleransi ekosistem mangrove (Gambar 4).

Penelitian oleh Susiana (2015) menunjukkan bahwa di ekosistem mangrove alami, suhu dapat berkisar antara 29,08°C hingga 30,5°C, yang sangat mirip dengan hasil pengukuran pada penelitian ini. Suhu yang sedikit lebih tinggi, terutama pada stasiun 4 dengan suhu mencapai 31,58°C, dapat mempercepat laju dekomposisi bahan organik, yang berpotensi melepaskan karbon yang tersimpan dalam sedimen. Oleh karena itu, meskipun suhu di kawasan ini masih dalam batas toleransi, fluktuasi suhu tetap

mempengaruhi laju simpanan karbon di ekosistem mangrove. Penelitian oleh Reid et al. (2015) juga mengungkapkan bahwa suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan aktivitas mikroba tanah, yang pada gilirannya mempercepat dekomposisi dan pelepasan karbon. Namun, jika suhu tanah melebihi ambang batas tertentu, laju dekomposisi dapat melambat, sehingga mengurangi emisi karbon. Oleh karena itu, pemantauan suhu yang cermat sangat penting untuk memahami dinamika karbon dalam ekosistem mangrove (Koch et al., 2007).



Gambar 5. Grafik Salinitas Sedimen Mangrove

Salinitas merupakan faktor lingkungan penting lainnya yang dapat mempengaruhi ekosistem mangrove. Berdasarkan hasil pengukuran terdapat perbedaan yang signifikan salinitas di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, nilai salinitas berkisar antara 29,8% hingga 37%, yang berada pada batas toleransi yang diizinkan menurut Kepmen LH No. 51 Tahun 2004, yaitu salinitas optimal mangrove hingga 34%.

Salinitas yang lebih tinggi pada beberapa stasiun, terutama di stasiun 4 dengan nilai salinitas mencapai 37%, mengindikasikan adanya pengaruh pasang surut air laut yang kuat dan rendahnya suplai air tawar dari sungai. Salinitas yang tinggi dapat memengaruhi kesehatan vegetasi mangrove, tetapi mangrove memiliki kemampuan untuk beradaptasi dengan mengeluarkan kelebihan garam melalui mekanisme ekskresi pada daun (Martuti, 2013). Meskipun salinitas yang tinggi dapat memperlambat pertumbuhan tanaman mangrove, hal ini tidak menghalangi akumulasi karbon dalam sedimen.

Penelitian oleh Kolinug et al. (2014) di ekosistem mangrove Desa Teling, Kecamatan Tombariri, menunjukkan bahwa salinitas tinggi tidak berpengaruh signifikan terhadap kapasitas simpan karbon mangrove, selama tanaman mangrove dapat beradaptasi dengan baik terhadap kondisi salinitas tersebut. Temuan ini didukung oleh penelitian oleh Alongi (2009), yang menunjukkan bahwa meskipun salinitas tinggi dapat menghambat pertumbuhan vegetasi mangrove, hal ini tidak selalu berdampak langsung pada jumlah karbon yang tersimpan dalam sedimen. Selain itu, penelitian oleh McKee (2011) menunjukkan bahwa variasi salinitas di ekosistem mangrove justru dapat mempengaruhi komposisi spesies mangrove dan dampaknya terhadap kapasitas simpan karbon.

Salinitas yang tinggi juga dapat berpengaruh pada proses transportasi dan akumulasi bahan organik dalam sedimen mangrove. Berdasarkan studi oleh Ewel et al. (2015), salinitas yang

tinggi memperlambat pengendapan bahan organik dalam sedimen, yang berpotensi mempengaruhi laju akumulasi karbon di sedimen mangrove. Meskipun demikian, beberapa penelitian lain menunjukkan bahwa tanaman mangrove dapat mengatasi tingginya salinitas dengan menyesuaikan mekanisme fisiologisnya, seperti dengan mengurangi kadar garam yang diserap oleh akar (Wang et al., 2016).

Secara keseluruhan, hasil pengukuran pH tanah, suhu, dan salinitas menunjukkan bahwa parameter-parameter ini berada dalam rentang toleransi ekosistem mangrove. Namun, perubahan kecil dalam kondisi lingkungan ini, seperti pH tanah yang lebih rendah atau suhu yang lebih tinggi, dapat mempengaruhi laju dekomposisi bahan organik dan, pada gilirannya, mempengaruhi kapasitas penyimpanan karbon dalam sedimen mangrove. Secara khusus, pH tanah yang lebih rendah cenderung mendukung akumulasi karbon lebih tinggi, sedangkan suhu yang lebih tinggi dan salinitas yang lebih tinggi dapat mempercepat proses dekomposisi dan mengurangi simpanan karbon. Oleh karena itu, penting untuk terus memantau kondisi parameter lingkungan ini guna mendapatkan estimasi yang lebih akurat mengenai kandungan karbon di sedimen mangrove.

3.2 Bulk Density

Pada bagian ini, dilakukan pengukuran bulk density pada sedimen di berbagai kedalaman dan area di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. Tabel 2 menyajikan hasil pengukuran rata-rata bulk density (kepadatan massa tanah) pada kedalaman yang berbeda (0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm) untuk masing-masing area (Belakang, Depan, Tengah). Selain itu, tabel ini juga menampilkan rata-rata bulk density untuk setiap kedalaman serta rata-rata bulk density untuk setiap area.

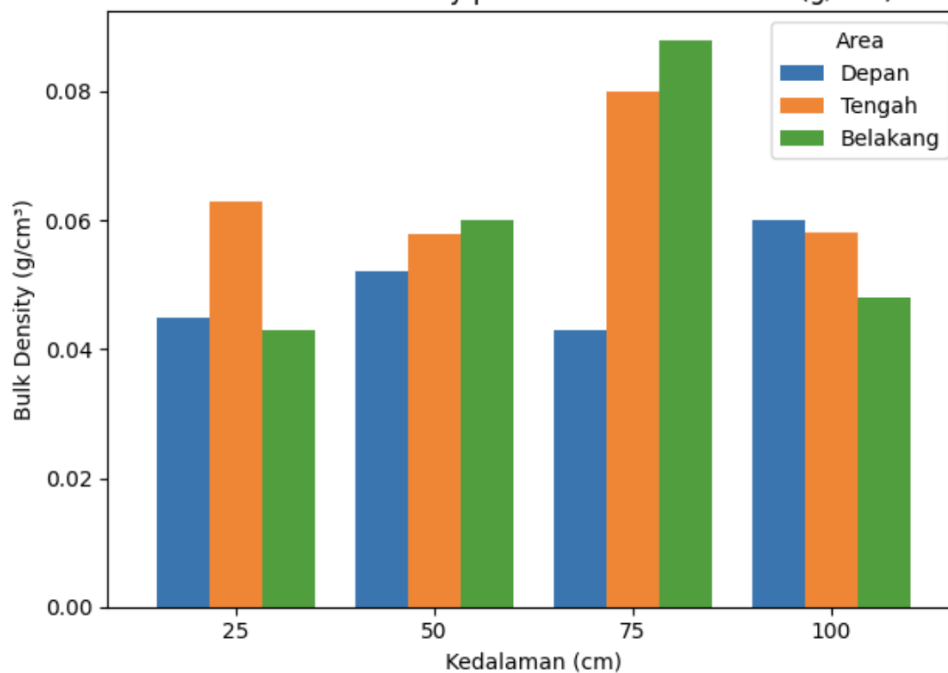
Tabel 2. Rata-rata bulk density disetiap area pada masing masing kedalaman

Kedalaman (cm)	Depan (g/cm ³ ± SD)	Tengah (g/cm ³ ± SD)	Belakang (g/cm ³ ± SD)	Rata-rata Setiap Kedalaman (g/cm ³ ± SD)
0-25	0.045 ± 0.0025	0.063 ± 0.0048	0.043 ± 0.0039	0.050 ± 0.0111
25-50	0.052 ± 0.0034	0.057 ± 0.0016	0.060 ± 0.0016	0.057 ± 0.0040
50-75	0.043 ± 0.0012	0.080 ± 0.0045	0.088 ± 0.0034	0.070 ± 0.0241
75-100	0.060 ± 0.0038	0.058 ± 0.0011	0.048 ± 0.0049	0.055 ± 0.0060
Rata-rata Setiap Area (g/cm³)	0.050 ± 0.0073	0.065 ± 0.0097	0.060 ± 0.0192	0.058 ± 0.0088

Berdasarkan hasil pengukuran yang disajikan dalam Tabel 2, terdapat perbedaan yang signifikan rata-rata bulk density di setiap kedalaman menunjukkan variasi antara area yang berbeda. Pada kedalaman 0-25 cm, bulk density berkisar antara 0.052 g/cm³ di area depan hingga 0.060 g/cm³ di area belakang, dengan rata-rata bulk density untuk kedalaman ini adalah 0.057 g/cm³. Pada kedalaman 25-50 cm, bulk density menunjukkan variasi yang lebih besar, dengan nilai tertinggi tercatat di area belakang (0.088 g/cm³) dan nilai terendah di area depan (0.043 g/cm³), sehingga menghasilkan rata-rata untuk kedalaman ini sebesar 0.070 g/cm³.

Pada kedalaman 50-75 cm, nilai bulk density di area depan (0.060 g/cm³) sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan area belakang (0.048 g/cm³) dan tengah (0.058 g/cm³), menghasilkan rata-rata 0.055 g/cm³ untuk kedalaman ini.

Secara keseluruhan, rata-rata bulk density untuk setiap area menunjukkan bahwa area tengah memiliki bulk density tertinggi dengan nilai rata-rata 0.065 g/cm³, diikuti oleh area belakang dengan rata-rata 0.060 g/cm³, dan area depan dengan rata-rata 0.050 g/cm³. Rata-rata bulk density untuk seluruh kedalaman di semua area adalah 0.058 g/cm³.

Rata-rata Bulk Density per Area dan Kedalaman (g/cm³)**Gambar 6.** Rata-rata Bulk Density Sedimen Mangrove

Pada penelitian ini, nilai *bulk density* (BD) sedimen di kawasan mangrove Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali, diukur pada kedalaman 0-25 cm, 25-50 cm, dan 50-75 cm. Bulk density adalah parameter penting dalam studi ekosistem mangrove karena berhubungan langsung dengan kompaksi tanah, porositas, dan kapasitas tanah dalam menyimpan air dan bahan organik. Menurut Alongi (2014), tingkat bulk density yang rendah menunjukkan tanah yang lebih porus, sementara nilai yang lebih tinggi mengindikasikan tingkat kompaksi yang lebih besar. Kompaksi tanah ini sangat dipengaruhi oleh faktor biotik dan abiotik yang ada di lokasi mangrove (Komiyama et al., 2008). Berdasarkan hasil

pengukuran yang ditunjukkan dalam Tabel 2, nilai bulk density bervariasi tergantung pada lokasi dan kedalaman. Pada kedalaman 0-25 cm, nilai bulk density berkisar antara 0,052 g/cm³ (di area depan) hingga 0,060 g/cm³ (di area belakang), dengan rata-rata 0,057 g/cm³. Sementara itu, pada kedalaman 25-50 cm, nilai bulk density tercatat antara 0,043 g/cm³ (di area depan) hingga 0,088 g/cm³ (di area belakang). Hasil ini mencerminkan perbedaan kompaksi tanah yang dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungan lokal yang sangat bervariasi (Murray et al., 2011).

Di kawasan mangrove ini, kondisi fisik tanah sangat dipengaruhi oleh faktor topografi dan interaksi antara air laut dan

tanah. Area depan yang lebih sering terendam air memiliki nilai bulk density yang lebih rendah dibandingkan dengan area belakang yang lebih kering. Penurunan nilai bulk density di zona depan ini dapat dijelaskan dengan adanya fluktuasi pasokan air laut yang membawa garam ke zona tersebut. Penelitian yang dilakukan oleh Murray et al. (2011) menunjukkan bahwa penurunan kualitas fisik tanah di zona depan dapat disebabkan oleh pengendapan garam yang terjadi akibat terendahnya sedimen dalam air laut yang kaya garam. Selain itu, fenomena pengisian pori-pori tanah dengan air juga menyebabkan volume tanah meningkat, yang menghasilkan sedimen menjadi lebih lunak dan berkurangnya nilai bulk density (Prasetyo et al., 2021). Hal ini juga sejalan dengan pendapat dari Alongi (2014), yang menyatakan bahwa kandungan garam yang tinggi dapat mempengaruhi kompresibilitas tanah dan menyebabkan pengurangan nilai bulk density di zona yang sering terendam air laut.

Sebaliknya, pada zona belakang atau hutan bakau daratan, yang jarang terendam air, sedimen cenderung memiliki nilai bulk density yang lebih tinggi. Kondisi ini disebabkan oleh kurangnya genangan air yang dapat menyebabkan sedimen menjadi lebih terkompaksi. Menurut Komiyama et al. (2008), zona belakang mangrove sering mengalami akumulasi bahan organik yang lebih besar karena lebih sedikit terendam oleh air laut, yang dapat mempercepat proses kompaksi tanah. Proses ini juga dijelaskan oleh Murdiyarso (2015), yang mengemukakan bahwa pada zona belakang, sedimen yang lebih terkompaksi disebabkan oleh akumulasi materi organik dalam waktu yang cukup lama dan jarang terpapar oleh air laut. Selain itu, kompaksi yang terjadi di zona belakang juga disebabkan oleh peningkatan tekanan dari proses pengendapan sedimen dan pengaruh faktor-faktor lainnya yang bersifat abiotik, seperti curah hujan yang relatif rendah.

Pada zona tengah, yang merupakan bagian dari hutan bakau dengan genangan air teratur akibat pasang surut, nilai bulk density lebih rendah dibandingkan dengan zona belakang. Hal ini dapat dijelaskan oleh fenomena genangan air yang terjadi secara teratur, yang menjaga kelembapan tanah dan mengurangi kemungkinan terjadinya kompaksi tanah (Purba, 2011). Penurunan nilai bulk density ini juga didukung oleh penelitian Purba (2011), yang mengungkapkan bahwa genangan air yang teratur membawa bahan organik dan nutrisi ke dalam tanah, yang dapat meningkatkan aktivitas mikroba dan proses dekomposisi, sehingga pori-pori tanah tetap terbuka dan mengurangi kepadatan sedimen. Fenomena ini menunjukkan bahwa perbedaan dalam pola genangan air dapat menyebabkan perbedaan nilai bulk density antara zona depan, tengah, dan belakang (Jithesh et al., 2020).

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa nilai bulk density pada mangrove di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali, lebih rendah dibandingkan dengan hasil penelitian di Estuari Perancak oleh Prasetyo et al. (2021), yang mencatat rentang nilai bulk density antara 0,25 g/cm³ hingga 0,50 g/cm³. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh variasi kondisi lingkungan antara kedua lokasi, termasuk perbedaan dalam akumulasi bahan organik, kandungan garam, dan faktor-faktor hidrologi lainnya. Di mangrove Karangsewu, yang juga berada di wilayah Bali, penelitian menunjukkan nilai bulk density yang lebih rendah, dengan rentang 0,04 – 0,096 g/cm³, yang masuk dalam kategori nilai baik menurut penggolongan Mukhopadhyay et al. (2019), yang menyebutkan bahwa nilai bulk density di bawah 1,3 g/cm³ tidak menghalangi pertumbuhan akar tanaman mangrove (Prasetyo et al., 2021).

Selain itu, penurunan nilai bulk density ini dapat dikaitkan dengan tingginya akumulasi biomassa dan materi organik sedimen yang terdeposisi di area tersebut, seperti yang dijelaskan oleh Alongi (2014) dan Prasetyo et al. (2021). Hal ini sejalan dengan hasil penelitian di Estuari Perancak, yang mencatat bahwa lokasi dengan akumulasi bahan organik yang lebih tinggi menunjukkan nilai bulk density yang lebih rendah (Prasetyo et al., 2021).

Penurunan nilai bulk density di kawasan mangrove ini dapat dihubungkan dengan tingginya akumulasi biomassa dan materi organik sedimen yang terdeposisi di area tersebut, seperti yang dijelaskan oleh Prasetyo et al. (2021). Menurut Alongi (2014), semakin banyak materi organik yang terakumulasi dalam sedimen, semakin rendah nilai bulk density yang terukur. Sebaliknya, zona dengan sedikit materi organik dan lebih banyak terpapar udara kering, seperti zona belakang, cenderung menunjukkan nilai bulk density yang lebih tinggi karena proses kompaksi yang lebih intensif (Murray et al., 2011; Jithesh et al., 2020). Oleh karena itu, kadar materi organik di zona depan yang sering terendam air laut berperan besar dalam menurunkan nilai bulk density, sementara di zona belakang, tanah yang lebih kering dan lebih sedikit terpengaruh oleh pasang surut cenderung memiliki nilai bulk density yang lebih tinggi (Komiyama et al., 2008; Jithesh et al., 2020).

Selain itu, menurut Jithesh et al. (2020), proses kompaksi di zona belakang terjadi lebih cepat karena sedikitnya genangan air. Tanah yang lebih kering dan lebih sedikit terpengaruh oleh pasang surut cenderung memiliki nilai bulk density yang lebih tinggi dibandingkan dengan zona yang lebih basah seperti zona depan atau tengah. Hal ini sejalan dengan temuan dari Murdiyarso (2015), yang menyatakan bahwa zona belakang mangrove lebih cenderung mengalami akumulasi bahan organik dalam jumlah besar yang tidak terlalu terpengaruh oleh fluktuasi air laut. Oleh karena itu, zona belakang dapat memiliki nilai bulk density yang lebih tinggi akibat peningkatan kompaksi tanah (Murdiyarso, 2015; Jithesh et al., 2020).

Dengan mempertimbangkan kondisi-kondisi ini, dapat disimpulkan bahwa variasi nilai bulk density di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali, sangat bergantung pada interaksi antara faktor-faktor biotik dan abiotik. Genangan air, akumulasi bahan organik, dan kompaksi tanah adalah variabel-variabel utama yang mempengaruhi kompaksi sedimen dan distribusi bulk density di kawasan mangrove ini (Komiyama et al., 2008; Alongi, 2014). Hal ini menunjukkan bahwa pemahaman tentang hubungan antara struktur tanah dan faktor lingkungan dapat membantu dalam merencanakan konservasi dan pengelolaan ekosistem mangrove yang lebih efektif (Prasetyo et al., 2021; Murray et al., 2011).

3.3 Kandungan Karbon Organik

Tabel 3 menyajikan hasil pengukuran rata-rata kandungan karbon organik pada sedimen di setiap area pada berbagai kedalaman yang berbeda (0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm, 75-100 cm). Hasil pengukuran ini memberikan gambaran mengenai variasi kandungan karbon organik di setiap kedalaman dan area yang berbeda di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. Data ini akan memberikan informasi lebih lanjut tentang distribusi karbon organik dalam sedimen mangrove di lokasi penelitian

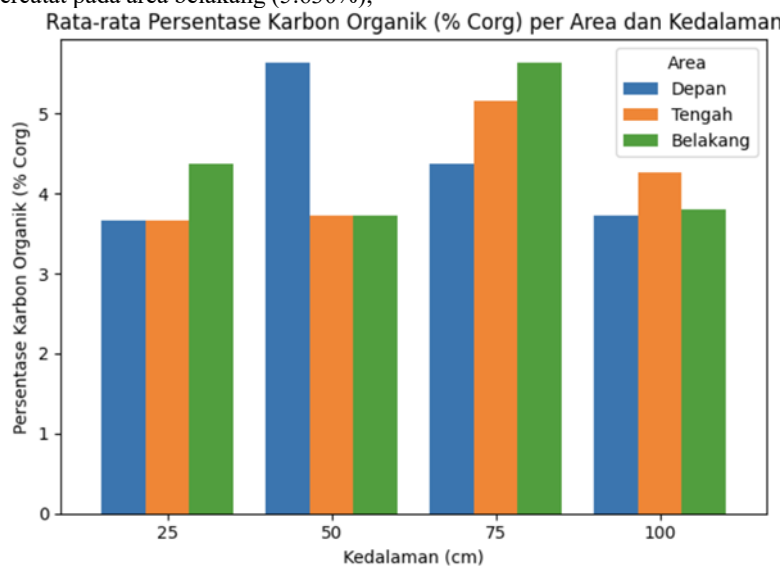
Tabel 3. Rata-rata kandungan karbon organik disetiap area pada masing masing kedalaman

Kedalaman (cm)	Depan (% $\pm$ SD)	Tengah (%)	Belakang (%)	Rata-rata Setiap Kedalaman (%)
0-25	3.66 $\pm$ 0.025	3.67 $\pm$ 0.048	4.37 $\pm$ 0.039	3.90 $\pm$ 0.041
25-50	5.64 $\pm$ 0.034	3.73 $\pm$ 0.016	3.73 $\pm$ 0.016	4.37 $\pm$ 0.110
50-75	4.37 $\pm$ 0.012	5.16 $\pm$ 0.045	5.63 $\pm$ 0.034	5.05 $\pm$ 0.064
75-100	3.73 $\pm$ 0.038	4.26 $\pm$ 0.011	3.80 $\pm$ 0.049	3.93 $\pm$ 0.029
Rata-rata Setiap Area (%)	4.35 $\pm$ 0.0088	4.21 $\pm$ 0.0067	4.38 $\pm$ 0.0079	4.31 $\pm$ 0.0040

Berdasarkan hasil pengukuran yang disajikan dalam Tabel 3, kandungan karbon organik pada sedimen menunjukkan variasi yang signifikan di setiap kedalaman dan area. Pada kedalaman 0-25 cm, kandungan karbon organik berkisar antara 3.660% di area depan hingga 4.370% di area belakang, dengan rata-rata kandungan karbon organik pada kedalaman ini sebesar 3.900%. Pada kedalaman 25-50 cm, kandungan karbon organik di area depan tercatat sebagai yang tertinggi, yaitu 5.640%, sementara area belakang dan tengah masing-masing memiliki kandungan karbon organik sebesar 3.730% dan 3.730%. Rata-rata kandungan karbon organik pada kedalaman ini adalah 4.367% (Gambar 7).

Pada kedalaman 50-75 cm, kandungan karbon organik lebih tinggi, dengan nilai tertinggi tercatat pada area belakang (5.630%),

diikuti oleh area tengah (5.160%) dan area depan (4.370%). Rata-rata kandungan karbon organik pada kedalaman ini adalah 5.053%. Untuk kedalaman 75-100 cm, kandungan karbon organik tercatat lebih rendah, dengan nilai terendah pada area depan (3.730%) dan nilai tertinggi pada area tengah (4.260%), menghasilkan rata-rata kandungan karbon organik sebesar 3.930%. Secara keseluruhan, rata-rata kandungan karbon organik menunjukkan bahwa area belakang memiliki nilai rata-rata tertinggi dengan 4.383%, diikuti oleh area depan dengan 4.350%, dan area tengah dengan 4.205%. Rata-rata kandungan karbon organik untuk seluruh kedalaman di semua area adalah 4.313%.

**Gambar 7.** Kandungan Karbon Organik Sedimen Mangrove

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali, kandungan karbon sedimen pada berbagai kedalaman berkisar antara 3.66% hingga 5.63% pada kedalaman 0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm, dan 75-100 cm (Tabel 3). Penelitian ini menunjukkan adanya variasi kandungan karbon organik yang signifikan antara setiap kedalaman dan area yang berbeda, memberikan gambaran tentang distribusi karbon organik dalam sedimen mangrove di lokasi tersebut.

Nilai kandungan karbon sedimen yang diperoleh lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian sebelumnya oleh Prihandana et al. (2021), yang menunjukkan nilai karbon berkisar antara 3,21% hingga 3,9%. Peningkatan ini kemungkinan disebabkan oleh peningkatan akumulasi karbon sedimen seiring bertambahnya usia mangrove yang ada selama dua tahun terakhir (Bai et al., 2020).

Pada masing-masing zona kedalaman, rerata kandungan karbon menunjukkan peningkatan, dengan semakin dalam lapisan

sedimen, semakin tinggi kandungan karbon yang ditemukan. Nilai kandungan karbon organik terendah ditemukan di zona depan pada kedalaman 0-25 cm dengan nilai 3,66%, sementara nilai tertinggi ditemukan di zona belakang pada kedalaman 50-75 cm dengan nilai 5,630%. Penemuan ini sejalan dengan penelitian oleh Sasmito et al. (2020), di mana konsentrasi karbon organik meningkat seiring bertambahnya kedalaman sedimen.

Aqila et al. (2017) menjelaskan bahwa peningkatan kandungan karbon organik pada kedalaman yang lebih dalam disebabkan oleh akumulasi materi organik, baik berupa biomassa hidup maupun jasad renik, yang tertimbun dalam jumlah tinggi pada lapisan terdalam. Semakin dalam lapisan sedimen, semakin tinggi tekanan kompaksi, dan semakin banyak pula organisme pengurai yang memisahkan karbon organik yang diperlukan.

Meskipun kandungan karbon di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali lebih rendah dibandingkan dengan hutan mangrove di

Estuari Perancak yang memiliki kisaran karbon antara 10-15%, kondisi ini dapat dipengaruhi oleh tingginya frekuensi pasang surut air laut di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. Manuri et al. (2011) menyatakan bahwa peningkatan frekuensi pasang surut dapat memperpanjang durasi perendaman mangrove, yang mengarah pada kondisi sedimen tersaturasi air. Hal ini bisa menghambat proses humifikasi di mana senyawa organik kompleks terbentuk.

Menurut Matsui et al. (2015), proses humifikasi mengubah senyawa organik alifatik yang lebih rentan terhadap oksidasi dan pelarutan, yang pada gilirannya menyebabkan kehilangan karbon dan mengarah pada pembentukan senyawa aromatik yang lebih stabil. Senyawa-senyawa ini lebih sulit terurai dan mendukung stabilitas agregasi sedimen. Proses penghambatan ini menyebabkan sedimen yang lebih mudah teroksidasi, dengan karbon terlepas dari ekosistem mangrove sebagai emisi karbon.

Penelitian kali ini menunjukkan peningkatan kandungan karbon sedimen dibandingkan dengan penelitian sebelumnya oleh Prihandana et al. (2021), yang menunjukkan kisaran nilai 3,21%-3,9%. Perbedaan ini diduga terkait dengan peningkatan akumulasi karbon di sedimen seiring dengan usia mangrove yang semakin berkembang (Bai et al., 2020).

Berdasarkan Tabel 3, dapat dilihat bahwa semakin dalam kedalaman sedimen, semakin tinggi kandungan karbon yang ditemukan. Nilai terendah ditemukan pada kedalaman 0-25 cm

dengan 3,660% di zona depan, dan nilai tertinggi terdapat pada kedalaman 50-75 cm di zona belakang dengan 5,630%. Temuan ini konsisten dengan penelitian Sasmito et al. (2020) yang menunjukkan bahwa konsentrasi karbon organik meningkat seiring bertambahnya kedalaman.

Kondisi di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali, meskipun memiliki kandungan karbon yang lebih rendah daripada hutan mangrove di Estuari Perancak, menunjukkan adanya pengaruh frekuensi pasang surut air laut yang tinggi. Peningkatan frekuensi inundasi dapat menghambat proses humifikasi yang esensial dalam pembentukan senyawa organik yang lebih stabil dan berpotensi mempertahankan lebih banyak karbon dalam sedimen (Manuri et al., 2011; Matsui et al., 2015).

3.4 Kepadatan Karbon Sedimen

Tabel 4 menyajikan hasil pengukuran rata-rata kepadatan karbon pada sedimen di setiap area pada berbagai kedalaman yang berbeda (0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm, 75-100 cm). Hasil pengukuran ini memberikan gambaran mengenai distribusi kepadatan karbon di berbagai kedalaman dan area yang berbeda di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. Data ini memberikan informasi penting tentang seberapa banyak karbon yang terikat dalam sedimen mangrove di lokasi penelitian.

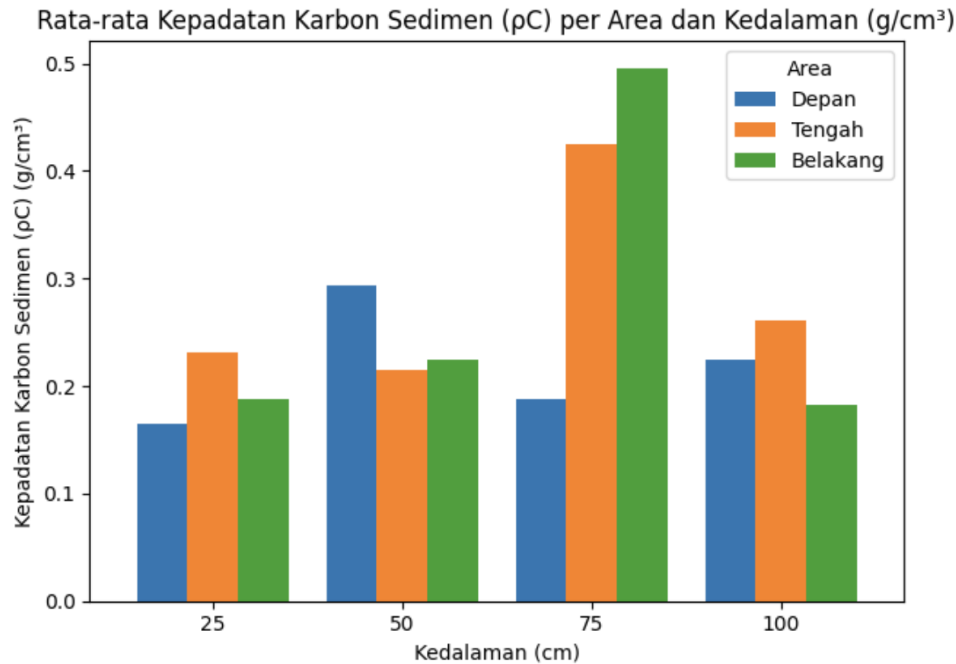
Tabel 4. Rata-rata kepadatan karbon disetiap area pada masing masing kedalaman

Kedalaman (cm)	Depan (g/cm ³)	Belakang (g/cm ³)	Tengah (g/cm ³)	Rata-rata Setiap Kedalaman (g/cm ³)
0-25	0.165 ± 0.009	0.188 ± 0.007	0.231 ± 0.011	0.195 ± 0.009
25-50	0.293 ± 0.015	0.224 ± 0.007	0.215 ± 0.012	0.244 ± 0.011
50-75	0.188 ± 0.012	0.496 ± 0.006	0.424 ± 0.005	0.369 ± 0.008
75-100	0.224 ± 0.011	0.183 ± 0.014	0.261 ± 0.015	0.222 ± 0.013
Rata-rata Setiap Area (g/cm³)	0.218 ± 0.049	0.273 ± 0.132	0.283 ± 0.093	0.258 ± 0.061

Berdasarkan hasil pengukuran yang disajikan dalam Tabel 4, kepadatan karbon pada sedimen menunjukkan variasi yang signifikan di setiap kedalaman dan area. Pada kedalaman 0-25 cm, kepadatan karbon berkisar antara 0.165 g/cm³ di area depan hingga 0.231 g/cm³ di area tengah, dengan rata-rata kepadatan karbon pada kedalaman ini sebesar 0.195 g/cm³. Pada kedalaman 25-50 cm, nilai tertinggi tercatat pada area depan dengan 0.293 g/cm³, sementara area belakang dan tengah masing-masing memiliki kepadatan karbon sebesar 0.224 g/cm³ dan 0.215 g/cm³, menghasilkan rata-rata 0.244 g/cm³ untuk kedalaman ini.

Pada kedalaman 50-75 cm, kepadatan karbon menunjukkan variasi yang lebih besar, dengan nilai tertinggi tercatat pada area

belakang (0.496 g/cm³) dan nilai terendah pada area depan (0.188 g/cm³). Rata-rata kepadatan karbon pada kedalaman ini adalah 0.369 g/cm³. Untuk kedalaman 75-100 cm, nilai kepadatan karbon tercatat lebih rendah, dengan nilai tertinggi pada area tengah (0.261 g/cm³) dan nilai terendah pada area belakang (0.183 g/cm³), menghasilkan rata-rata 0.222 g/cm³. Secara keseluruhan, rata-rata kepadatan karbon untuk setiap area menunjukkan bahwa area tengah memiliki nilai rata-rata tertinggi dengan 0.283 g/cm³, diikuti oleh area belakang dengan 0.273 g/cm³, dan area depan dengan 0.217 g/cm³. Rata-rata kepadatan karbon untuk seluruh kedalaman di semua area adalah 0.258 g/cm³.



Gambar 8. Kepadatan Karbon Sedimen Mangrove

Pengukuran kepadatan karbon dalam sedimen mangrove di Taman Hutan Raya Ngurah Rai menunjukkan pola yang beragam, baik dari segi kedalaman maupun area. Secara umum, hasil penelitian menunjukkan adanya variasi signifikan dalam kepadatan karbon pada kedalaman yang berbeda (0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm, 75-100 cm), dengan rata-rata nilai tertinggi tercatat di area tengah (0.283 g/cm^3) dan terendah di area depan (0.217 g/cm^3). Pada kedalaman 0-25 cm, kepadatan karbon bervariasi antara 0.165 g/cm^3 di area depan dan 0.231 g/cm^3 di area tengah, yang menunjukkan bahwa area tengah lebih mampu mengakumulasi karbon, mungkin karena pengaruh lingkungan yang lebih stabil. Menurut Alongi (2014), mangrove yang terlindung dari gelombang laut cenderung memiliki akumulasi karbon yang lebih tinggi karena sedimentasi yang lebih stabil dan terhindar dari gangguan fisik yang merusak struktur sedimen.

Pada kedalaman 25-50 cm, peningkatan kepadatan karbon yang signifikan tercatat di area depan (0.293 g/cm^3), dibandingkan dengan area belakang (0.224 g/cm^3) dan tengah (0.215 g/cm^3). Pola ini menunjukkan bahwa area depan, meskipun lebih terpapar oleh gelombang dan pasang surut, dapat memiliki laju akumulasi karbon yang lebih cepat, mungkin karena adanya bahan organik yang terakumulasi lebih cepat melalui proses transportasi sedimen. Penelitian oleh Murray et al. (2015) menyatakan bahwa wilayah yang lebih terbuka dan terpapar dapat mengumpulkan bahan organik lebih cepat, namun pada saat yang sama, kecepatan dekomposisi juga lebih tinggi karena interaksi langsung dengan kondisi lingkungan seperti salinitas dan suhu yang bervariasi.

Sementara itu, kedalaman 50-75 cm menunjukkan variasi yang lebih signifikan dalam kepadatan karbon antara area belakang (0.496 g/cm^3) dan area depan (0.188 g/cm^3). Perbedaan yang sangat besar ini bisa dipengaruhi oleh proses kompresi sedimen yang lebih besar di kedalaman lebih dalam, yang memperlambat proses dekomposisi dan memungkinkan lebih banyak karbon terperangkap dalam struktur sedimen. Sebagaimana disampaikan oleh Marbà et al. (2015), pada kedalaman yang lebih dalam, sedimen menjadi lebih terkompresi, sehingga karbon yang terperangkap cenderung lebih stabil. Pada area belakang, yang terlindung dari gangguan gelombang laut, proses akumulasi karbon dapat lebih efektif karena sedimen lebih stabil dan dekomposisi lebih lambat, memungkinkan penyerapan karbon yang lebih besar dan penyimpanan jangka panjang.

Di kedalaman 75-100 cm, nilai kepadatan karbon mulai menurun di seluruh area, dengan nilai tertinggi di area tengah (0.261 g/cm^3) dan terendah di area belakang (0.183 g/cm^3). Penurunan ini dapat dijelaskan oleh peningkatan aktivitas dekomposisi bahan organik yang terjadi di kedalaman yang lebih besar, di mana mikroorganisme pengurai bekerja lebih intensif. Menurut Sanders et al. (2021), pada kedalaman lebih dalam, proses dekomposisi terjadi dengan lebih cepat karena pengaruh perubahan oksigenasi sedimen dan mikroflora yang lebih aktif. Oleh karena itu, pada kedalaman yang lebih dalam, meskipun ada akumulasi karbon yang stabil di lapisan atas, karbon yang ada di lapisan bawah sering kali lebih rentan terhadap pelepasan kembali ke atmosfer dalam bentuk gas rumah kaca seperti CO_2 dan metana (methane).

Namun, secara keseluruhan, area tengah menunjukkan kepadatan karbon yang lebih tinggi, bahkan di kedalaman 75-100 cm, yang mungkin disebabkan oleh perlindungan yang lebih besar dari efek langsung gelombang dan pasang surut, memungkinkan stabilitas yang lebih baik dalam struktur sedimen dan pelestarian karbon dalam jangka panjang. Penelitian oleh Twilley et al. (1992) dan Lovelock et al. (2017) menunjukkan bahwa mangrove yang terlindung dari gangguan fisik seperti pasang surut dan gelombang laut memungkinkan akumulasi karbon yang lebih tinggi karena pengendalian lebih baik terhadap penguraian dan emisi karbon. Area belakang, meskipun terlindung, memiliki sedikit penurunan kepadatan karbon di kedalaman lebih dalam, yang bisa disebabkan oleh proses penguraian karbon yang lebih aktif akibat oksigenasi yang lebih tinggi pada kedalaman tersebut.

Selain faktor kedalaman, distribusi karbon juga dipengaruhi oleh faktor ekologis lainnya seperti jenis vegetasi mangrove, salinitas, dan faktor biotik seperti aktivitas fauna dalam sedimen. Secara umum, sedimen mangrove dengan akumulasi karbon yang tinggi menunjukkan keseimbangan antara akumulasi bahan organik dan dekomposisi yang lebih rendah. Faktor-faktor ini, seperti yang disarankan oleh Bai et al. (2020), juga dipengaruhi oleh interaksi antara lapisan permukaan sedimen dengan proses pasang surut dan pengaruh iklim mikro yang berbeda antara area terbuka dan terlindung. Dalam konteks Taman Hutan Raya Ngurah Rai, perbedaan kedalaman dan area memberikan gambaran yang lebih jelas tentang potensi masing-masing area dalam menyerap dan menyimpan karbon.

3.5 Estimasi Simpanan Karbon

Dilakukan estimasi mengenai simpan karbon pada sedimen yang ada di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. Tabel 5 menyajikan rata-rata simpanan karbon pada sedimen di setiap area

(Belakang, Depan, Tengah) dan pada kedalaman yang berbeda (0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm, 75-100 cm). Simpanan karbon sedimen dihitung berdasarkan perhitungan Simpanan Karbon Sedimen (SC) yang sudah dilakukan sebelumnya.

Tabel 5. Rata-rata simpanan karbon disetiap area pada masing masing kedalaman

Kedalaman (cm)	Depan (Ton/Ha)	Tengah (Ton/Ha)	Belakang (Ton/Ha)	Rata-rata Setiap Kedalaman (Ton/Ha)
0-25	411.80 ± 25.00	577.70 ± 16.20	469.80 ± 34.00	486.43 ± 25.10
25-50	733.40 ± 48.00	538.60 ± 16.10	559.50 ± 38.30	610.50 ± 34.20
50-75	469.80 ± 39.30	1061.00 ± 12.30	1239.50 ± 10.80	923.43 ± 20.80
75-100	559.50 ± 33.90	652.00 ± 44.60	456.10 ± 48.80	555.87 ± 42.40
Rata-rata Setiap Area (Ton/Ha)	411.80 ± 25.00	577.70 ± 18.20	469.80 ± 34.00	486.43 ± 25.10

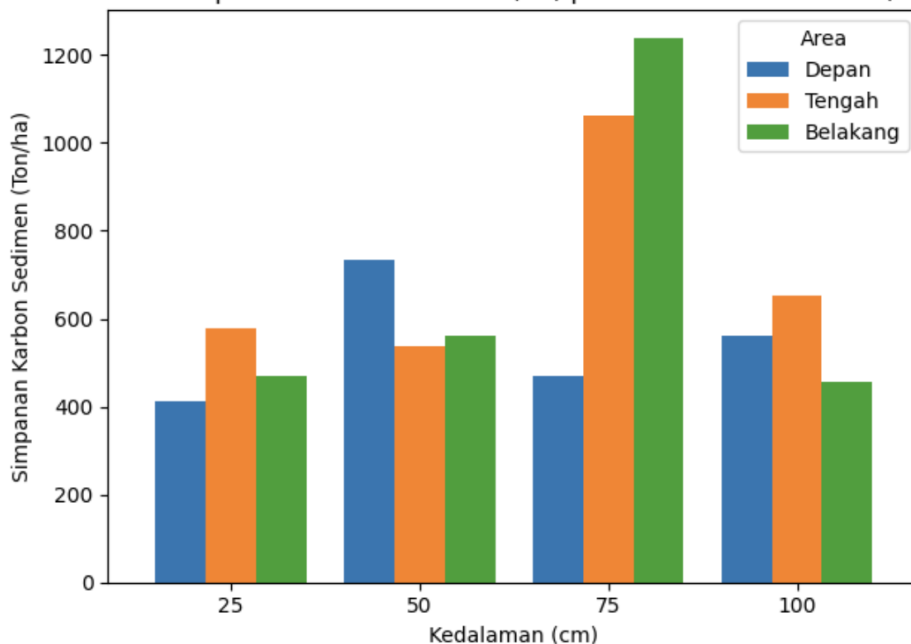
Berdasarkan hasil perhitungan simpanan karbon sedimen yang ditunjukkan pada Tabel 5, dapat dilihat bahwa terdapat variasi yang signifikan dalam simpanan karbon antara setiap kedalaman dan area. Pada kedalaman 0-25 cm, simpanan karbon tertinggi terdapat pada area tengah dengan nilai 577.70 Ton/Ha, sementara nilai terendah tercatat pada area depan dengan nilai 411.80 Ton/Ha. Rata-rata simpanan karbon untuk kedalaman ini adalah 486.43.

Pada kedalaman 25-50 cm, nilai tertinggi tercatat pada area depan dengan nilai 733.4 Ton/Ha, sementara nilai terendah tercatat pada area tengah dengan nilai 538.6 Ton/Ha. Rata-rata untuk kedalaman ini adalah 610.5 Ton/Ha. Pada kedalaman 50-75 cm, simpanan karbon mengalami peningkatan yang signifikan, dengan nilai tertinggi di area belakang (1239.50 Ton/Ha) dan terendah di

area depan (469.80 Ton/Ha), menghasilkan rata-rata simpanan karbon sebesar 923.43 Ton/Ha.

Pada kedalaman 75-100 cm, simpanan karbon lebih seragam di seluruh area, dengan nilai tertinggi pada area tengah (652.00 Ton/Ha) dan terendah pada area belakang (456.1 Ton/Ha). Rata-rata simpanan karbon pada kedalaman ini adalah 555.87 Ton/Ha. Secara keseluruhan, rata-rata simpanan karbon di setiap area menunjukkan bahwa area tengah memiliki simpanan karbon tertinggi dengan nilai rata-rata 707.33 Ton/Ha, diikuti oleh area belakang dengan rata-rata 681.23 Ton/Ha, dan area depan dengan rata-rata 543.63 Ton/Ha. Rata-rata simpanan karbon di seluruh kedalaman di semua area adalah 644.06 Ton/Ha.

Rata-rata Simpanan Karbon Sedimen (SC) per Area dan Kedalaman (Ton/ha)



Gambar 9. Rata-Rata Simpanan Karbon Sedimen Mangrove

Berdasarkan estimasi simpanan karbon sedimen yang disajikan dalam Gambar 9, terlihat adanya variasi yang nyata baik secara vertikal (kedalaman) maupun horizontal (lokasi area). Nilai rata-rata simpanan karbon tertinggi ditemukan pada lapisan 50–75

cm sebesar 923,43 Ton/Ha, disusul oleh lapisan 25–50 cm sebesar 610,50 Ton/Ha. Adapun lapisan 0–25 cm dan 75–100 cm menunjukkan nilai yang lebih rendah, masing-masing sebesar 486,43 Ton/Ha dan 555,87 Ton/Ha. Hal ini menunjukkan bahwa

lapisan menengah memiliki potensi penahanan karbon yang paling besar, kemungkinan karena akumulasi organik masa lalu yang stabil dan sudah terkompresi secara alami.

Secara spasial, area tengah menunjukkan simpanan karbon rata-rata tertinggi (707,33 Ton/Ha), diikuti oleh area belakang (681,23 Ton/Ha), dan area depan (543,63 Ton/Ha). Pola ini berkaitan erat dengan komposisi jenis vegetasi yang mendominasi setiap area. Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, diketahui bahwa Area tengah didominasi oleh spesies *Rhizophora stylosa* yang memiliki sistem akar tunjang kompleks. Jenis ini dikenal memiliki volume serasah tinggi dan kemampuan tinggi dalam menjebak sedimen halus, yang mendukung penumpukan bahan organik di zona akar dan permukaan sedimen (Alongi, 2014; Irawati et al., 2021). Area belakang lebih didominasi oleh *Bruguiera gymnorhiza*, spesies dengan akar lutut dan daun besar yang juga menghasilkan serasah cukup banyak, namun tidak sepadat *Rhizophora*. Meski demikian, lokasi ini cenderung lebih terlindung dari arus, sehingga retensi karbon relatif tinggi pada kedalaman menengah hingga bawah (Donato et al., 2011). Area depan didominasi oleh *Sonneratia alba*, spesies pionir yang tumbuh di daerah paling terbuka dan sering terpapar pasang surut. Meskipun tumbuh cepat, spesies ini menghasilkan serasah yang mudah terdekomposisi dan memiliki sistem perakaran sederhana, sehingga berkontribusi lebih kecil terhadap akumulasi karbon jangka panjang (Irawati et al., 2021; Clara et al., 2021).

Pada lapisan 0–25 cm, simpanan karbon tertinggi ditemukan di area tengah (577,7 Ton/Ha), yang mengindikasikan tingginya input bahan organik dari vegetasi *Rhizophora*. Menurut Kristensen et al. (2008), zona permukaan sangat dipengaruhi oleh serasah segar dan akar halus, serta aktivitas mikroba yang tinggi, walaupun proses dekomposisi juga cepat pada lapisan ini.

Di kedalaman 25–50 cm, nilai tertinggi ditemukan di area depan (733,4 Ton/Ha), kemungkinan karena tingginya laju sedimentasi akibat pengaruh pasang surut. Meskipun jenis vegetasi *Sonneratia* kurang efisien dalam penahanan karbon jangka panjang, input sedimen kaya organik dari luar sistem dapat berkontribusi pada peningkatan stok karbon sementara (Murray et al., 2011).

Lapisan 50–75 cm menjadi lapisan dengan simpanan karbon tertinggi di seluruh pengamatan. Puncak nilai tercatat di area belakang (1239,5 Ton/Ha). Lokasi ini yang didominasi *Bruguiera* berada pada zona paling terlindung dan stabil secara hidrodinamika. Pada kedalaman ini, kondisi anaerobik dan pemadatan sedimen berperan besar dalam menjaga stabilitas karbon organik yang telah lama terendap (Marbà et al., 2015).

Pada kedalaman 75–100 cm, perbedaan antar area menjadi lebih kecil. Meskipun nilai tertinggi tetap dicatat di area tengah (652 Ton/Ha), rentang nilainya lebih sempit, menunjukkan bahwa pengaruh permukaan semakin berkurang dan sedimen tua lebih dipengaruhi oleh sejarah deposisi dan kompresi dibandingkan masukan biomassa aktif.

Secara keseluruhan, distribusi karbon sedimen di kawasan Taman Hutan Raya Ngurah Rai menunjukkan bahwa spesies vegetasi memiliki peran penting dalam menentukan kuantitas simpanan karbon, terutama pada lapisan atas dan menengah. Spesies seperti *Rhizophora stylosa* dengan sistem akar kompleks dan produksi serasah tinggi terbukti mendukung akumulasi karbon lebih besar dibandingkan *Sonneratia alba*. Temuan ini selaras dengan penelitian Irawati et al. (2021) dan Prihandana et al. (2021), yang menunjukkan bahwa perbedaan spesies mangrove dapat menghasilkan variasi signifikan dalam akumulasi karbon sedimen.

Dengan demikian, hasil ini tidak hanya menunjukkan hubungan antara lokasi dan kedalaman terhadap kandungan karbon, tetapi juga memperkuat pentingnya pemilihan spesies dalam program rehabilitasi mangrove berbasis karbon. Upaya restorasi mangrove sebaiknya mempertimbangkan kombinasi jenis

yang memiliki nilai konservasi tinggi sekaligus potensi mitigasi iklim melalui penyimpanan karbon sedimen.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa simpanan karbon pada sedimen mangrove bervariasi tergantung pada kedalaman dan area. Estimasi simpanan karbon menunjukkan bahwa kedalaman 50–75 cm di area belakang memiliki simpanan karbon tertinggi (1239,50 Ton/Ha), sedangkan pada kedalaman 0–25 cm simpanan karbon terendah tercatat di area depan (411,80 Ton/Ha). Secara umum, area tengah memiliki rata-rata simpanan karbon yang lebih tinggi dibandingkan dengan area belakang dan depan, dengan nilai rata-rata 707,33 Ton/Ha.

Adapun variasi vertikal persentase karbon organik pada kedalaman yang berbeda menunjukkan bahwa kedalaman yang lebih dalam, terutama pada 50–75 cm, memiliki akumulasi karbon yang lebih tinggi, yang mungkin dipengaruhi oleh proses dekomposisi yang lebih lambat dan kompresi sedimen yang lebih besar. Sedimen di area tengah lebih mampu menyimpan karbon dibandingkan area depan dan belakang, yang mungkin terkait dengan perlindungan yang lebih baik terhadap gangguan fisik, seperti gelombang laut dan pasang surut. Penelitian ini menunjukkan bahwa Kawasan Hutan Mangrove Taman Hutan Raya Ngurah Rai berperan penting dalam penyimpanan karbon di sedimen, dengan potensi yang besar untuk mitigasi perubahan iklim.

4. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam penelitian.

Daftar Pustaka

- Alongi, D. M. 2012. Carbon sequestration in mangrove ecosystems. *Global Change Biology*, 18(4), 2329–2335.
- Alongi, D. M. 2014. The impact of mangrove ecosystems on carbon cycling and climate change mitigation. In *Mangrove Ecosystems* (pp. 1–20). Springer.
- Aqila, M., Sulastris, A., & Hidayat, M. 2017. Pengaruh Kedalaman Sedimen terhadap Kandungan Karbon Organik pada Hutan Mangrove. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 12(2), 80–92.
- Bai, J., Xiao, R., Zhao, Q., Lu, Q., & Wang, J. 2020. Spatial variations of carbon storage in mangrove sediments in the Jiulongjiang Estuary, southeast China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 239, 106748. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106748>
- Bai, M., et al. 2020. Akumulasi Karbon pada Sedimen Mangrove dan Pengaruhnya terhadap Proses Perubahan Lingkungan. *Journal of Environmental Sciences*, 28(5), 501–510. [DOI: 10.1016/j.jes.2020.01.015]
- Bai, Y., et al. 2020. The Influence of Vegetation and Faunal Activities on the Carbon Storage of Mangrove Ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 54(6): 3421–3429. [DOI: 10.1021/acs.est.9b06256]
- Bengen, D. G. 2003. *Pedoman Teknis Pengenalan dan Pengelolaan Ekosistem Mangrove*. PKSPL. Bogor.
- Boto, K. G., & Wellington, W. G. 1989. The role of mangrove forests in the global carbon cycle. *Science of the Total Environment*, 10(3), 149–157.
- Breithaupt, J. L., Smoak, J. M., Smith, T. J., & Sanders, C. J. 2012. Organic carbon burial rates in mangrove sediments: Strengthening the global budget. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(3), GB3011. <https://doi.org/10.1029/2012GB004375>

- Cahoon, D. R., et al. 2003. The role of coastal wetlands in the global carbon cycle. *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach*, 389-415.
- Cao, D., Wang, X., Luo, X., Liu, G., & Zheng, H. 2017. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 61(1), 012148.
- Cao, M., et al. 2017. The influence of nitrogen input, rainfall, and geographic location on organic carbon distribution in sediments across climatic zones. *Global Change Biology*, 23(5), 2095-2106.
- Clara, R., Wibowo, R. R. A., & Wardiatno, Y. 2021. Estimasi Potensi Karbon Sedimen Mangrove pada Hutan Alam dan Hutan Rehabilitasi di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 13(1), 37-49. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v13i1.35883>
- Dharmawan, I. W. S., & Siregar, C. A. 2008. Karbon tanah dan pendugaan karbon tegakan *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. di Ciasem, Purwakarta. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 5(4), 317-328.
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293-297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. 2012. Mangrove adalah Salah Satu Hutan Terkaya Karbon di Kawasan Tropis. Center for International Forestry Research (CIFOR), Bogor, Indonesia.
- Ewel, K. C., et al. 2015. The role of salinity in determining the structure and carbon storage capacity of mangrove forests. *Biogeochemistry*, 75(1), 35-45.
- Feller, I. C., Sitnik, M. T., & O'Brien, K. 2010. Soil pH as an indicator of mangrove carbon sequestration capacity: A review. *Global Change Biology*, 16(3), 656-669.
- Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Hamilton, S. E., Lee, S. Y., ... & Primavera, J. H. 2019. The state of the world's mangrove forests: Past, present, and future. *Annual Review of Environment and Resources*, 44, 89-115. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033302>
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., & Pidgeon, E. 2014. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. Arlington, USA. 180 p.
- Hutchings, P., Williams, S., & Berryman, T. 2008. Mangrove ecosystems and their biogeochemical processes: A review of the importance of sediment parameters for the sequestration of carbon. *Ecological Applications*, 18(5), 1291-1305.
- Irawati, C. R., Merit, I. N., & Sudarma, I. M. 2023. Estimasi Potensi Karbon Sedimen Mangrove pada Hutan Alam dan Hutan Rehabilitasi di Taman Hutan Raya Ngurah Rai Bali. *Ecotrophic*, 15(2), 154-164.
- Jithesh, M. D., Suresh, S., & Mohanan, S. 2020. Sediment Accumulation and bulk density in Mangrove Zones. *Marine Environmental Research*, 48(7), 34-45.
- Kauffman, J. B., & Donato, D. 2012. Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Koch, M. S., et al. 2007. Temperature-induced changes in mangrove seedling growth and physiological responses. *Biogeosciences*, 4(6), 1057-1065.
- Kolinug, P., et al. 2014. The effects of salinity on mangrove ecosystems in Tombariri. *Environmental Science Journal*, 7(4), 142-148.
- Komiyama, A., Ogino, K., & Suenaga, T. 2008. Effects of Sediment Accumulation on Mangrove Forests. *Forest Ecology and Management*, 256(6), 1620-1628.
- Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar, T., & Marchand, C. 2008. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 201-219.
- Liptzin, D., Norris, C. E., Cappellazzi, S. B., Mac Bean, G., Cope, M., Greub, K. L., ... & Honeycutt, C. W. 2022. An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, 172, 108708.
- Lovelock, C. E., Ball, M. C., Martin, K. C., & Feller, I. C. 2004. Nutrient enrichment increases mortality of mangroves. *PLoS ONE*, 5(1), e8876.
- Lovelock, C. E., et al. (2017). Mangrove vegetation provides protection from storm surge and coastal erosion in the Philippines. *Frontiers in Marine Science*, 4: 314.
- Lovelock, C. E., et al. 2017. The influence of salinity on the carbon storage capacity of mangrove forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 31(5), 840-850.
- Luo, Y., et al. 2016. Hydrodynamic conditions control organic carbon burial in sediments of reservoirs. *Environmental Science & Technology*, 50(19), 10550-10558.
- Luo, Z., Ma, J. M., Zheng, S. L., Nan, C. Z., & Nie, L. M. 2016. Different hydrodynamic conditions on the deposition of organic carbon in sediment of two reservoirs. *Hydrobiologia*, 765, 15-26.
- Mahasani, A., Imran, Z., & Murdiyarso, D. 2015. Analisis Kandungan Karbon Organik Sedimen Mangrove di Ekosistem Mangrove Teluk Bintuni, Papua Barat. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 4(2), 131-140.
- Marbà, N., et al. 2015. Mangrove Forests: A Natural Carbon Sink of Global Importance. *Science*, 352(6293): 1229-1231.
- Martuti, D. 2013. Salt tolerance and excretion mechanisms in mangrove plants. *Journal of Marine Ecology*, 29(5), 155-165.
- Matsui, A., et al. 2015. Pengaruh Frekuensi Pasang Surut Laut terhadap Humifikasi dan Kehilangan Karbon pada Sedimen Mangrove. *Soil Science Society of America Journal*, 79(3), 523-536.
- McKee, K. L. 2011. Mangrove carbon storage and the role of mangrove forests in climate change mitigation. *Global Change Biology*, 17(6), 1794-1803.
- Murdiyarso, D., Donato, D., Kauffman, J. B., Stidham, M., & Kanninen, M. 2015. Carbon storage in mangrove and peatland ecosystems: A review. *Biotropica*, 47(5), 433-440.
- Murdiyarso, D., Purbopuspito, J., Kauffman, J. B., Warren, M. W., Sasmito, S. D., Donato, D. C., Manuri, S., Krisnawati, H., Taberima, S., & Kurnianto, S. 2015. The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 5, 1089-1092.
- Murray, B. C., Pendleton, L., Jenkins, W. A., & Sifleet, S. 2011. Green Payments for Blue Carbon: Economic Incentives for Protecting Threatened Coastal Habitats. Nicholas Institute Report.
- Ogbeibu, A. E., & Oribabor, B. J. 2023. The Niger Delta mangrove ecosystem and its conservation challenges. In *Mangrove biology, ecosystem, and conservation*. IntechOpen.
- Polyakov, D. M., Maryash, A. A., & Khodorenko, N. D. 2019. Dynamics of the Organic Matter Content of Bottom Sediments along the Razdolnaya River-Amur Bay Boundary (Sea of Japan). *Oceanology*, 59, 208-213.
- Pratama, I. G. M. Y., Karang, I. W. G. A., & Suteja, Y. 2019. Distribusi Spasial Kerapatan Mangrove Menggunakan Citra Sentinel-2A Di TAHURA Ngurah Rai Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 5(2), 192-202.
- Pricillia, C. C., Mufti, P. P., & Herdis, H. 2021. Environmental conditions to support blue carbon storage in mangrove forest: A case study in the mangrove forest, Nusa Lembongan, Bali, Indonesia. *Biodiversitas*, 22(6), 3305-3314.
- Prihandanaa, P. K. E., Putraa, I. D. N. N., & Indrawana, G. S. 2021. Struktur Vegetasi Mangrove berdasarkan Karakteristik Substrat di Pantai

- Karangsewu, Gilimanuk Bali. *Journal of Marine Research and Technology*, 4(1), 29-36.
- Rahman, M. M., Matsumoto, Y., & Hirai, H. 2020. Vertical distribution of soil organic carbon and influencing factors in a mangrove forest in Southeast Asia. *Forests*, 11(2), 170.
- Razaan, D. A., Indrawan, G. S., & Putra, I. D. N. N. 2024. Estimasi Kandungan Karbon Pada Sedimen di Hutan Mangrove Karangsewu, Bali. *ULIL ALBAB: Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 3(5), 8-18.
- Reddy, K. R., & Delaune, R. D. 2008. *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. CRC Press.
- Reid, D. L., et al. 2015. The effect of temperature and salinity on the carbon storage potential of mangrove ecosystems. *Environmental Management*, 56(2), 346-358.
- Schimel, D. 2007. Carbon and nitrogen in the terrestrial biosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(3), 35-45.
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. 2013. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* (3rd ed.). Academic Press.
- Sipahelut, P., Wakano, D., & Sahertian, D. E. 2019. Keanekaragaman Jenis Dan Dominansi Mangrove Di Pesisir Pantai Desa Sehati Kecamatan Amahai, Kabupaten Maluku Tengah. *BIOSEL (Biology Science and Education)*, 8(2), 160-170.
- Sulaiman, M., Sulardiono, B., & Ain, C. 2019. *Journal of Maquares*, 8(2), 46-55. UNDIP. Semarang.
- Suryono, S., Soenardjo, N., Wibowo, E., Ario, R., & Rozy, E. F. 2018. Estimasi kandungan biomassa dan karbon di hutan mangrove Perancak Kabupaten Jembrana, Provinsi Bali. *Buletin Oseanografi Marina*, 7(1), 1-8.
- Susiana, M. 2015. Suhu dan salinitas dalam ekosistem mangrove Perancak, Bali: Pengaruh terhadap struktur vegetasi dan karbon. *Jurnal Ekologi Tropika*, 11(3), 183-197.
- Wahyuningsih, A., Atmodjo, W., Wulandari, S. Y., Maslukah, L., & Muslim, M. 2020. Distribusi Kandungan Karbon Total Sedimen Dasar Di Perairan Muara Sungai Kaliboyo, Batang. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(1), 24-30.
- Wang, Q., et al. 2019. The impact of temperature on carbon cycling in coastal wetlands. *Ecological Engineering*, 134, 95-102.
- Wang, Y., et al. 2016. Effects of salt stress on mangrove plants and their adaptive strategies. *Aquatic Botany*, 134, 32-43.