

TOTAL KARBON BERDASARKAN TINGKAT KESEHATAN MANGROVE DAN VALUASI EKONOMI KARBON DI KAWASAN TAHURA BALI

Miftachudin Syaiful Ma'ruf*, Ida Ayu Astarini, Abd. Rahman As-syakur

Program Magister Ilmu Lingkungan, Pascasarjana, Universitas Udayana-Bali

*Email: miftahudin691@gmail.com

ABSTRACT

Carbon Storage Based on Mangrove Health Status and Carbon Economic Valuation in the Tahura Bali Area

Mangrove ecosystems play a crucial role as carbon sinks and key components of blue carbon systems in mitigating global climate change. This study aims to: (1) assess the health condition of mangroves in Tahura Ngurah Rai; (2) analyze the total carbon storage capacity across three different locations; and (3) estimate the economic valuation of stored carbon within the mangrove ecosystem. Data were collected through vegetation surveys at three observation stations with a total of 30 plots. The analysis involved calculating the Mangrove Health Index (MHI), above- and below-ground biomass, and carbon content, including soil carbon. A Two-Way ANOVA was employed to examine the effects of mangrove health status and dominant genus (*Rhizophora* and *Sonneratia*) on carbon storage. Additionally, carbon economic valuation was calculated using two approaches: the voluntary carbon market (Rp 80.000 per ton CO_{2e}) and the compliance market (Rp 211.680 per ton CO_{2e}). The results indicate a variation in mangrove health conditions ranging from Poor to Excellent. The highest total carbon stock was found at Station 1 (314 tons/ha), while Station 3 had the lowest (204.52 tons/ha). The genus *Sonneratia* contributed more significantly to carbon accumulation than *Rhizophora*. The carbon valuation ranged from Rp 227.93 million/ha (voluntary market) to Rp 583.39 million/ha (compliance market). These findings highlight the substantial potential of the Tahura Ngurah Rai mangrove ecosystem to support blue carbon initiatives and carbon-based conservation programs

Keywords: blue carbon, economic valuation, Tahura Ngurah Rai, *Sonneratia* spp, *Rhizophora* spp

1. PENDAHULUAN

Mangrove merupakan tumbuhan yang hidup di daerah antara level pasang naik tertinggi sampai level di sekitar atau di atas permukaan laut rata-rata. Komunitas hutan mangrove hidup di daerah pantai terlindung daerah tropis dan subtropis. Hampir 75% tumbuhan mangrove hidup antara 35° LU - 35° LS dan terbanyak terdapat di kawasan Asia

Tenggara, seperti Malaysia dan Indonesia yang mempunyai curah hujan tinggi dan bukan musiman (Supriharyono, 2009). Luasan mangrove di Indonesia sendiri adalah 3,22 juta ha atau sekitar 22,4% dari luasan mangrove dunia, dimana proporsi terbesar mangrove di Indonesia berada di wilayah Papua (Wahyudi et al., 2018). Besarnya potensi komunitas mangrove di Indonesia tentunya akan memberikan manfaat yang besar secara ekologis, fisik,

maupun ekonomi, serta manfaat secara langsung maupun tidak langsung bagi manusia.

Hutan mangrove menjadi salah satu habitat penting karena menjadi tempat mencari makan (*feeding ground*) dan memijah (*nursery ground*) bagi berbagai biota, selain itu kadar bahan organik yang tinggi juga menjadikan hutan mangrove berperan penting dalam rantai makanan di lingkungan pesisir (Harefa et al., 2022). Hutan mangrove juga menjadi elemen penting dalam meminimalisir dampak perubahan iklim dan pemanasan global. Hal tersebut tidak terlepas dari kemampuan hutan mangrove dalam menyerap emisi rumah kaca. Menurut Wahyudi et al., (2018) di Indonesia sendiri memiliki cadangan karbon mangrove mencapai 891,70 ton C/ha dengan total cadangan mangrove nasional sebesar 2,89 Tt C. Berdasarkan Uhib (2022) penyerapan karbon yang dilakukan oleh ekosistem mangrove berkisar 10 – 31% emisi tahunan dari sektor penggunaan lahan. Karbon yang tersimpan di ekosistem mangrove dikenal dengan istilah "karbon biru" atau *blue carbon*. Istilah ini merujuk pada penyimpanan karbon dalam ekosistem perairan, khususnya yang tersimpan di tanah dan sedimen. Saat ini, konsep karbon biru kerap dimanfaatkan dalam berbagai inisiatif untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan karbon di kawasan mangrove (Alongi, 2014).

Optimalisasi fungsi krusial ekosistem mangrove dalam suatu kawasan sangat bergantung pada kondisi kesehatan komunitas mangrove di kawasan tersebut. Semakin sehat kondisi sebuah komunitas mangrove maka fungsi yang didapat lingkungan sekitarnya akan semakin baik pula (Nurdiansah & Dharmawan, 2018; Maulidiyah et al., 2019). Kualitas kesehatan mangrove dapat ditentukan dengan melakukan analisis lapangan terhadap struktur komunitas, dan analisis

menggunakan data penginderaan jauh, maupun kombinasi antara keduanya. Analisis lapangan pada struktur komunitas dapat dilakukan dengan melakukan pengukuran terhadap kerapatan pohon, indeks keanekaragaman, indeks keseragaman, dan jumlah spesies (Prasetya et al., 2017). Perubahan kondisi kesehatan mangrove memiliki dampak yang signifikan pada fungsi ekosistem dan simpanan karbon. Dengan adanya degradasi dan kerusakan pada ekosistem mangrove maka akan melepaskan kembali karbon yang sudah terserap ke atmosfer, sehingga akan berpengaruh terhadap perubahan iklim (Donato et al, 2011).

Bali selain sebagai salah satu destinasi wisata favorit di Indonesia, juga memiliki ekosistem mangrove yang cukup besar. Hutan mangrove di Bali tersebar di berbagai wilayah dengan total luas sekitar 3.067,71 hektar. Kawasan dengan tutupan mangrove terbesar berada di tiga lokasi utama, yakni Taman Hutan Raya (Tahura) Ngurah Rai seluas 1.373,5 hektar, Nusa Lembongan seluas 202 hektar, dan Taman Nasional Bali Barat yang mencakup area seluas 602 hektar (Prameswari et al., 2015). Hutan mangrove di Bali tidak hanya penting secara ekologis, tetapi juga memiliki nilai ekonomi sebagai destinasi wisata berbasis alam dan edukasi. Kawasan seperti Tahura Ngurah Rai, Nusa Lembongan, Pejarakan, dan Perancak telah dikembangkan menjadi objek wisata yang melibatkan masyarakat lokal melalui berbagai aktivitas seperti tur perahu, edukasi lingkungan, hingga wisata konservasi (Ginantara, 2023). Akan tetapi, penurunan kondisi mangrove akibat tekanan pembangunan dan degradasi lingkungan dapat mengancam keberlanjutan fungsi-fungsi tersebut. Kerusakan ekosistem mangrove tidak hanya berdampak pada kehilangan biodiversitas, tetapi juga menurunkan daya tarik wisata, mengurangi pendapatan masyarakat, dan melemahkan peran

mangrove sebagai pelindung pesisir serta menyimpan karbon biru.

Salah satu kawasan paling signifikan adalah Teluk Benoa yang berada di bawah pengelolaan Taman Hutan Raya (Tahura) Ngurah Rai. Dalam kurun waktu 2013 hingga 2023, Berdasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh As-Syakur et al., (2025) menunjukkan bahwa luas tutupan mangrove di kawasan Teluk Benoa mengalami sedikit penurunan sekitar 3,97 hektar, tetapi indeks kehijauan (NDVI) yang menunjukkan kepadatan kanopi justru meningkat. Hal ini menunjukkan adanya dampak positif dari program rehabilitasi mangrove yang disertai kebijakan proteksi kawasan konservasi, meskipun kawasan tersebut tertekan oleh urbanisasi dan pembangunan pesisir yang masif. Rinika et al., (2023) mengatakan bahwa dalam 34 tahun terakhir laju deforestasi hutan mangrove di Indonesia mengakibatkan penurunan luasan sekitar 30%, sehingga Indonesia dianggap sebagai penyumbang terbesar dalam terjadinya penurunan hutan mangrove di dunia.

Penelitian ini dilakukan secara khusus di kawasan Taman Hutan Raya (Tahura) Ngurah Rai karena kawasan ini merupakan ekosistem mangrove terluas di Bali yang memiliki potensi signifikan dalam menyimpan karbon serta menjadi lokasi strategis untuk kajian valuasi ekonomi karbon. Dengan luas mencapai 1.373,5 hektar dan berada di tengah-tengah tekanan pembangunan pesisir yang intensif, Tahura tidak hanya menjadi pusat konservasi, tetapi juga menyimpan stok karbon biru yang penting, baik dari biomassa atas, bawah tanah, maupun karbon tanah. Selain itu, Tahura Ngurah Rai telah menjadi lokasi utama berbagai program rehabilitasi dan restorasi mangrove, sehingga kondisi kesehatannya sangat dinamis dan layak dikaji. Kesehatan mangrove merupakan faktor

kunci yang memengaruhi kapasitas ekosistem dalam menyimpan karbon. Mangrove dengan struktur tegakan yang sehat dan kanopi yang rapat cenderung memiliki biomassa yang lebih tinggi dan efisiensi penyerapan karbon yang lebih besar (Murdiyarso et al., 2015).

Oleh karena itu, mengevaluasi hubungan antara tingkat kesehatan mangrove dengan simpanan karbon memberikan informasi yang penting tidak hanya untuk konservasi, tetapi juga untuk mendukung skema valuasi ekonomi karbon yang berbasis pada jasa lingkungan. Nilai ekonomi jasa lingkungan yang dimiliki ekosistem mangrove di Indonesia cukup besar, terutama dengan berkembangnya konsep penilaian ekonomi jasa cadangan emisi karbon atau yang lebih dikenal dengan perdagangan karbon (*carbon emission trading*) (Siagian dan Arifin, 2022). Berdasarkan hal tersebut lokasi ini juga sangat potensial dalam pengembangan perdagangan karbon berbasis komunitas atau lembaga, mengingat posisinya yang dekat dengan kawasan industri dan pariwisata utama di Bali. Dengan memahami besaran simpanan karbon yang ada dan menilai nilai ekonominya, penelitian ini dapat berkontribusi terhadap desain mekanisme insentif lingkungan seperti skema *carbon offset*, serta mendorong kebijakan perlindungan mangrove yang berbasis data ilmiah

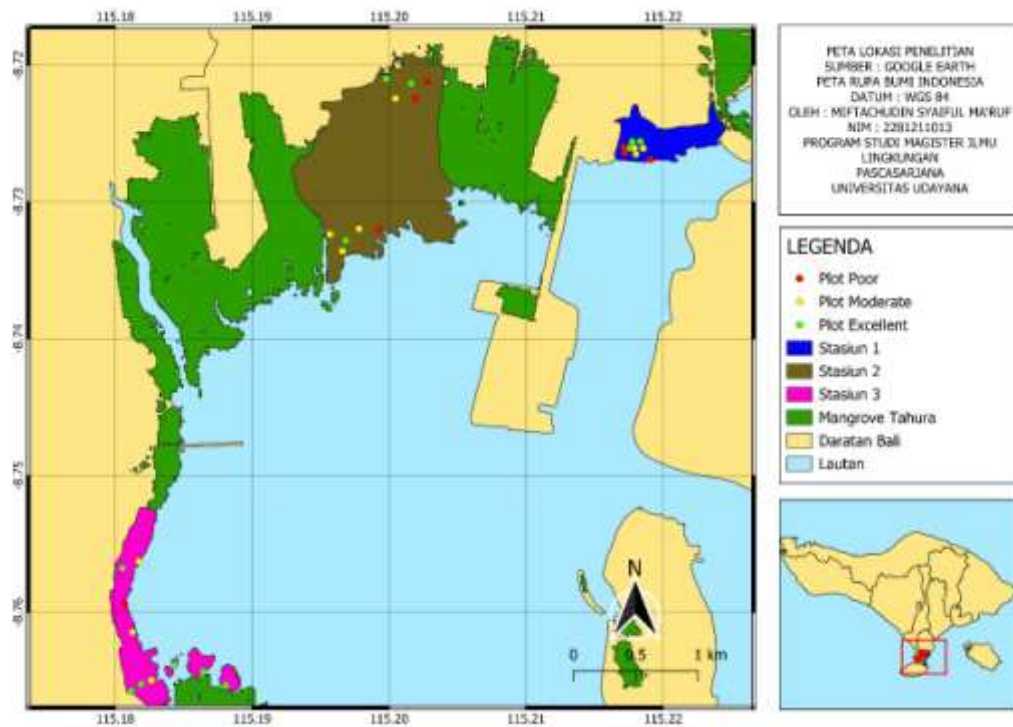
2. METODOLOGI

2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di kawasan mangrove Teluk Benoa yang berada di dalam administrasi Taman Hutan Raya Ngurah Rai Bali pada bulan Agustus 2024. Sebaran titik lokasi penelitian sebagaimana yang tertera pada Gambar 1 dimana terdapat tiga stasiun penelitian yang ditentukan secara *purposive sampling*. Pertimbangan penentuan lokasi

sampling diantaranya akses, dominansi jenis, dan tingkat kesehatan mangrove. Penelitian ini meliputi observasi awal, pengambilan data lapangan, pengolahan data, dan penyusunan hasil serta

pembahasan penelitian. Pada penelitian ini dilakukan pengambilan sampel sedimen untuk melakukan perhitungan karbon tanah, dan kemudian sampel dianalisis di laboratorium.



Gambar 1.
Peta Penelitian

2.2 Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel untuk melakukan perhitungan karbon dilakukan dengan menggunakan plot ukuran 10x10m dengan total plot di masing-masing stasiun berjumlah 10 plot. Klasifikasi kondisi kesehatan mangrove pada tiga stasiun didasarkan atas perbedaan kondisi kesehatan mangrove diprediksi dari formula indeks vegetasi MHI berdasarkan penelitian Nurdiansah & Dharmawan, (2021) yaitu *Excellent*, *Moderate*, dan *Poor*. Pengambilan data struktur komunitas mangrove diawali dengan identifikasi jenis mangrove dan pengukuran berdasarkan DBH (*Diameter Breast Height*) atau 1.3 m, kemudian dilakukan pengambilan diameter batang pohon pada setiap plot yang mana

diameter ≥ 5 cm dengan tinggi tegakan $> 1,5$ m termasuk dalam kategori pohon (Komiyama et al., 2005). Sampel tanah diambil pada kedalaman 50-100 cm dan kemudian dilakukan uji lab untuk mendapatkan nilai C-Organik (Kauffman dan Donato, 2012).

2.3 Analisis Data

2.3.1 Perhitungan Biomassa Atas dan Bawah Permukaan Tanah

Simpanan karbon diestimasi dari biomassa setiap tegakan. Biomassa atas dan bawah permukaan tanah, dihitung dengan metode *non-destructive* menggunakan persamaan alometrik umum (*common allometric equation*) yang melibatkan hubungan antara *diameter at breast height* dan massa jenis kayu (ρ)

(Komiyama et al., 2005). Menurut Sutaryo (2009) dalam studi biomassa hutan atau pohon, persamaan alometrik digunakan untuk mengetahui hubungan antara ukuran pohon (diameter atau tinggi) dengan berat

(kering) pohon secara keseluruhan. Persamaan alometrik untuk menentukan biomassa pohon mangrove disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2 (Suryono et al., 2018).

Tabel 1. Model alometrik *above ground biomass* beberapa jenis mangrove

Jenis spesies	Model alometrik	Sumber
<i>Avicennia alba</i>	$B = 0.079211 * D^{2.470895}$	Tue et al., 2014
<i>Avicennia marina</i>	$B = 0.1848 * D^{2.3524}$	Dharmawan dan Siregar, 2008
<i>Rhizophora mucronata</i>	$B = 0.043 * D^{2.63}$	Amira, 2008
<i>Rhizophora apiculata</i>	$B = 0.1466 * D^{2.3136}$	Dharmawan, 2013
<i>Sonneratia alba</i>	$B = 0.3841 \rho D^{2.101}$	Kauffman dan Cole, 2010
<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	$B = \rho * 0.0754 * D^{2.505}$	Kauffman dan Donato, 2012
<i>Xylocarpus granatum</i>	$B = 0.1832 * D^{2.21}$	Tarlan, 2008
Common equation	$B = 0.251 * \rho * D^{2.46}$	Komiyama et al., 2005

Keterangan : B = Biomassa (kg); D = Diameter at breast height (cm); ρ = wood density (gr/cm³)

Tabel 2. Model alometrik *below ground biomass* beberapa jenis mangrove

Jenis spesies	Model alometrik	Sumber
<i>Avicennia marina</i>	$B = 1.28 * D^{1.17}$	Komiyama et al., 2008
<i>Rhizophora apiculata</i>	$B = 0.00698 * D^{2.15}$	Ong et al., 2004
<i>Xylocarpus granatum</i>	$B = 0.145 * D^{2.55}$	Komiyama et al., 2008
Common equation	$B = 0.199 \rho^{0.899} D^{2.22}$	Komiyama et al., 2005

Keterangan : B = Biomassa (kg); D = Diameter at breast height (cm); ρ = wood density (gr/cm³)

2.3.2 Perhitungan Estimasi Cadangan Karbon

Potensi cadangan karbon dalam biomassa bagian atas (*above ground*) dan bawah (*below ground*) permukaan tanah adalah berdasarkan pada gram berat basah (gbb), gram berat kering (gbk) dikonversi dalam gram karbon per satuan luas (gbb m⁻², gbk m⁻² dan gC m⁻²). Konsentrasi karbon dalam bahan organik sekitar 47% (IPCC, 2006). Konversi dilakukan dengan rumus berikut:

$$\text{Cadangan Karbon} = \text{Biomassa persatuan luas} \times 0,47 \quad (1)$$

Estimasi jumlah karbon tersimpan per komponen dihitung dengan mengalikan total berat biomasanya dengan konsentrasi karbon.

2.3.3 Perhitungan Karbon Tanah

Metode untuk menghitung kandungan karbon organik tanah per hektar menurut Badan Standardisasi Nasional (2011) adalah sebagai berikut:

$$Ct = Kd \times \rho \times \%C - \text{organik} \quad (2)$$

Keterangan: Ct = kandungan karbon organik tanah, dinyatakan dalam gram (g/cm²); Kd = kedalaman contoh tanah / kedalaman tanah, dinyatakan dalam sentimeter (cm); ρ = kerapatan lindak (*bulk density*), dinyatakan dalam gram (g/cm³); % Corganik = nilai persentase karbon organik yang diperoleh dari hasil pengukuran di laboratorium.

2.3.4 Simpanan Karbon Total

Perhitungan simpanan karbon total menurut Lugina et al. (2011) yaitu:

$$C_t = C_n + C_{org\ tanah} \tag{3}$$

Keterangan: C total = simpanan karbon total, dinyatakan dalam (ton/ha); Cn = kandungan karbon per hektar pada masing-masing carbon pool (ton/ha); Corg tanah = kandungan karbon organik tanah per hektar (ton/ha)

2.3.5 Valuasi Ekonomi Karbon

Penilaian ekonomi karbon yang dilakukan dalam penelitian ini hanya meliputi perhitungan ekonomi pada nilai karbon yang tersimpan pada ekosistem mangrove di wilayah Tahura Ngurah Rai pada tiga lokasi yang berbeda. Pada penelitian ini harga karbon yang digunakan adalah dua harga karbon yaitu harga karbon yang berlaku di pasar

sukarela (*voluntary market*) dan pasar wajib (*regulated market*) *Clean Development Mechanism* (CDM) yang mana masing-masing memiliki harga Rp. 81.000/tCO₂e dan Rp. 211.680/tCO₂e (Kepel et al., 2017).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Struktur Vegetasi Mangrove

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada ketiga stasiun ditemukan bahwa ketiga stasiun tersebut didominasi oleh genus *Rhizophora* dan *Sonneratia*. Secara keseluruhan, dalam penelitian ini ditemukan 7 spesies mangrove yang sebarannya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Sebaran Jenis Mangrove

No	Jenis Mangrove	Lokasi		
		Stasiun 1	Stasiun 2	Stasiun 3
1	<i>Sonneratia alba</i>	+	+	+
2	<i>Rhizophora mucronata</i>	+	+	+
3	<i>Rhizophora apiculata</i>	+	+	+
4	<i>Excoecaria agallocha</i>	-	+	-
5	<i>Xylocarpus granatum</i>	-	+	-
6	<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	+	+	-
7	<i>Avicennia marina</i>	+	-	-
Total Spesies		5	6	3

Berdasarkan data Tabel 3. dari ke-7 jenis mangrove yang ditemukan, jenis yang ditemukan di semua stasiun lokasi penelitian adalah jenis *Sonneratia alba*, *Rhizophora mucronata*, dan *Rhizophora apiculata*. Sedangkan dari ketiga stasiun penelitian, stasiun 2 memiliki keanekaragaman jenis mangrove yang paling tinggi dibanding dengan stasiun lainnya dengan jumlah jenis mangrove yang teridentifikasi adalah 6 jenis. Keberadaan jenis mangrove *Sonneratia alba*, *Rhizophora mucronata*, dan *Rhizophora apiculata* yang melimpah di Teluk Benoa disebabkan oleh kemampuan adaptasi mereka terhadap lingkungan intertidal yang berlumpur dan bersalinitas

tinggi. *Sonneratia alba* biasanya tumbuh di zona depan karena toleran terhadap salinitas ekstrem dan substrat terbuka, sehingga berperan sebagai spesies pionir (Liu et al., 2024). Sementara itu, *Rhizophora mucronata* dan *Rhizophora apiculata* mendominasi zona tengah-belakang karena memiliki akar tunjang dan struktur daun yang mendukung toleransi terhadap genangan dan garam (Madhavally et al., 2025).

Tingginya keanekaragaman pada Stasiun 2 dapat mencerminkan kondisi ekosistem yang relatif stabil dan mendukung bagi pertumbuhan berbagai jenis mangrove. Keanekaragaman jenis pada ekosistem mangrove menjadi salah

satu indikator penting dalam menilai resiliensi ekosistem terhadap tekanan eksternal seperti perubahan iklim, intrusi air laut, dan aktivitas antropogenik. Menurut Sitthi et al., (2025), ekosistem mangrove dengan komposisi jenis yang lebih beragam terutama pada kawasan hutan alami dibandingkan dengan area rehabilitasi yang bersifat monokultur menunjukkan struktur biomassa dan kompleksitas vegetasi yang lebih tinggi. Keanekaragaman ini berkontribusi pada kemampuan adaptasi ekosistem yang lebih baik terhadap perubahan lingkungan, seperti fluktuasi salinitas dan pasang surut.

Dominasi genus *Sonneratia* dan *Rhizophora* di kawasan Taman Hutan Raya (Tahura) Ngurah Rai mencerminkan kemampuan adaptasi ekologis kedua kelompok ini terhadap kondisi pesisir yang dinamis dan berfluktuasi. *Sonneratia alba*, sebagai spesies pionir, umumnya tumbuh di zona terdepan yang berbatasan langsung dengan laut. Spesies ini memiliki sistem akar napas (pneumatophore) yang memungkinkan pertukaran gas di tanah yang tergenang dan minim oksigen. Selain itu, *Sonneratia alba* juga menunjukkan toleransi yang tinggi terhadap perubahan salinitas dan kondisi substrat yang tidak stabil. Hal ini menjadikan *Sonneratia alba* sebagai spesies yang efektif dalam menjajah lahan baru dan memulai proses pembentukan ekosistem mangrove yang lebih kompleks (Pillai & Harilal, 2016).

Sementara itu, *Rhizophora spp.* seperti *Rhizophora mucronata* dan *Rhizophora apiculata* cenderung mendominasi zona tengah setelah terbentuk substrat yang lebih stabil.

Sistem akar tunjang yang dimiliki oleh genus ini berfungsi tidak hanya untuk menopang batang di tanah lunak, tetapi juga efektif dalam menjebak sedimen dan meredam energi gelombang. Studi oleh Yoshikai et al. (2021) menunjukkan bahwa struktur akar *Rhizophora* mampu meningkatkan laju akresi sedimen secara signifikan, sehingga memperkuat proses pembentukan daratan dan menjaga kestabilan garis pantai.

Kombinasi antara kemampuan kolonisasi awal oleh *Sonneratia* dan fungsi stabilisasi oleh *Rhizophora* menjadi kunci utama dalam dinamika suksesi vegetasi mangrove di Tahura. Dominasi kedua genus ini juga mengindikasikan bahwa sebagian area di kawasan tersebut masih aktif mengalami pertumbuhan dan pemulihan alami pasca gangguan, baik secara alami maupun akibat tekanan antropogenik. Nutrisi yang terdapat pada sedimen dimana mangrove tumbuh juga turut mempengaruhi pengkolonisasian mangrove, mengingat dahulu kawasan Mangrove Tahura Ngurah Rai adalah lokasi bekas tambak hal ini menjadi salah satu keuntungan bagi kawasan tersebut karena memungkinkan memiliki nutrisi sedimen yang tinggi (Wijaya et al., 2024).

3.2 Total Karbon

Dalam melakukan perhitungan total karbon, sebelumnya dilakukan pengukuran terlebih dahulu terhadap biomassa pohon. Dalam pengukuran tersebut diperlukan data massa jenis kayu (*Wood density*). Berikut merupakan nilai dari *wood density* yang digunakan dalam penelitian ini tertera pada tabel 4.

Tabel 4. *Wood density mangrove*

Spesies	Wood density (g cm ⁻³)	Sumber
<i>Sonneratia alba</i>	0.53	Malik et al., (2022), Malabrigo et al., (2017), Ardhana et al., (2018), Purwiyanto dan Agustriani (2017)
<i>Rhizophora mucronata</i>	0.82	Malik et al., (2022) Malabrigo et al., (2017), Ardhana et al., (2018), Indrayani et al., (2021)
<i>Rhizophora apiculata</i>	0.87	Malik et al., (2022) Malabrigo et al., (2017), Ardhana et al., (2018), Indrayani et al., (2021), Purwiyanto dan Agustriani (2017)
<i>Excoecaria agallocha</i>	0.52	Malabrigo et al., (2017), Ardhana et al., (2018), Purwiyanto dan Agustriani (2017)
<i>Xylocarpus granatum</i>	0.65	Malik et al., (2022) Malabrigo et al., (2017), Purwiyanto dan Agustriani (2017)
<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	0.76	Malik et al., (2022) Malabrigo et al., (2017), Ardhana et al., (2018), Indrayani et al., (2021), Purwiyanto dan Agustriani (2017)
<i>Avicennia marina</i>	0.70	Malabrigo et al., (2017), Indrayani et al., (2021), Purwiyanto dan Agustriani (2017)

Ket* : Nilai massa jenis kayu (*Wood density*) yang digunakan pada penelitian ini merupakan nilai rata-rata

Penentuan biomassa tersebut dilakukan dengan menggunakan persamaan alometrik yang dikembangkan oleh Komiyama et al., (2005, 2008) untuk menentukan nilai biomassa atas permukaan (ABG) dan nilai biomassa bawah permukaan (BGB), berikut merupakan hasil nilai biomassa mangrove di kawasan tahura :

Tabel 5. Nilai biomassa atas permukaan (ABG) dan biomassa bawah permukaan (BGB)

Stasiun	Kategori Kesehatan mangrove	Biomassa atas permukaan (kg)	Biomassa bawah permukaan (kg)
1	<i>Excellent</i>	1.422,13	965,67
	<i>Moderate</i>	460,73	330,71
	<i>Poor</i>	221,15	170,69
2	<i>Excellent</i>	5.454,67	3.472,13
	<i>Moderate</i>	13.168,01	7.313,80
	<i>Poor</i>	210,84	151,64
3	<i>Excellent</i>	13.361,35	7.768,83
	<i>Moderate</i>	7.783,31	4.322,61
	<i>Poor</i>	1.083,38	638,39

Berdasarkan hasil perhitungan nilai biomassa pohon berdasarkan kategori kesehatan yang tertera pada Tabel 5, didapatkan bahwa pada Stasiun 1, kategori kesehatan mangrove yang memiliki nilai biomassa atas dan bawah permukaan

tertinggi adalah *Excellent*, dengan nilai biomassa atas permukaan (AGB) sebesar 1.422,13 kg dan biomassa bawah permukaan (BGB) sebesar 965,67 kg. Sementara itu, pada Stasiun 2, nilai biomassa tertinggi terdapat pada kategori *Moderate*, yaitu dengan AGB sebesar 13.168,01 kg dan BGB sebesar 7.313,80 kg. Sedangkan pada Stasiun 3, nilai biomassa tertinggi juga tercatat pada kategori *Excellent*, dengan nilai AGB sebesar 13.361,35 kg dan BGB sebesar 7.768,83 kg. Perbedaan nilai biomassa ini mencerminkan variasi kondisi ekologi antar lokasi serta karakteristik pertumbuhan spesies. *Sonneratia alba* dikenal memiliki pertumbuhan cepat dan sistem akar yang kuat, sehingga menghasilkan akumulasi biomassa yang tinggi dalam waktu relatif singkat (Kauffman dan Donato, 2012).

Biomassa pohon yang telah diperoleh kemudian dikonversi menjadi nilai karbon dengan mengalikan koefisien

standar sebesar 0,47 (IPCC, 2006). Data lengkap hasil perhitungan nilai karbon dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan hasil perhitungan nilai cadangan karbon berdasarkan kategori kesehatan pada Tabel 5, diketahui bahwa pada Stasiun 1, kategori kesehatan mangrove yang memiliki nilai karbon tertinggi adalah *Excellent*, dengan nilai karbon atas permukaan (AGC) sebesar 0,668 ton/ha dan karbon bawah permukaan (BGC) sebesar 0,454 ton/ha, sehingga total cadangan karbon sebesar 1,68 ton/ha. Pada Stasiun 2, nilai total cadangan karbon tertinggi terdapat pada kategori *Excellent* dengan nilai AGC sebesar 2,564 ton/ha dan BGC sebesar 1,632 ton/ha, serta total cadangan karbon mencapai 13,99 ton/ha. Sementara itu, pada Stasiun 3, nilai karbon tertinggi juga berada pada kategori *Excellent*, yaitu dengan AGC sebesar 6,280 ton/ha, BGC sebesar 3,651 ton/ha, dan total cadangan karbon sebesar 16,43 ton/ha.

Tabel 6. Nilai karbon atas permukaan (AGC) dan karbon bawah permukaan (BGC) pada setiap kategori kondisi kesehatan mangrove

Stasiun	Kategori Kesehatan mangrove	Karbon atas permukaan (ton/ha)	Karbon bawah permukaan (ton/ha)	Total cadangan karbon (ton/ha)
1	<i>Excellent</i>	0,668	0,454	1,68
	<i>Moderate</i>	0,216	0,155	
	<i>Poor</i>	0,104	0,080	
2	<i>Excellent</i>	2,564	1,632	13,99
	<i>Moderate</i>	6,189	3,437	
	<i>Poor</i>	0,099	0,071	
3	<i>Excellent</i>	6,280	3,651	16,43
	<i>Moderate</i>	3,658	2,032	
	<i>Poor</i>	0,509	0,300	

Hasil konversi menunjukkan bahwa Stasiun 3 memiliki total cadangan karbon vegetasi tertinggi, yaitu 16,43 ton/ha, diikuti oleh Stasiun 2 (13,99 ton/ha), dan Stasiun 1 (1,68 ton/ha). Nilai tersebut terdiri dari gabungan karbon atas dan bawah permukaan. Dominasi nilai cadangan karbon oleh Stasiun 3

mengindikasikan kondisi ekosistem yang lebih baik dan struktur vegetasi yang lebih kompleks. Selain itu, keberadaan spesies *Sonneratia alba* sebagai kontributor utama menunjukkan bahwa spesies ini berperan penting dalam akumulasi karbon, terutama di area yang lebih terbuka dan memiliki paparan sinar matahari tinggi (Fatoyinbo

dan Simard, 2013). Cadangan karbon di bawah permukaan juga memberikan kontribusi signifikan terhadap total stok karbon ekosistem. Menurut Donato et al., (2011), bagian bawah permukaan dapat menyimpan lebih dari 50% total karbon pada ekosistem mangrove tropis, menjadikannya salah satu komponen penting dalam mitigasi perubahan iklim.

Nilai karbon organik tanah atau c-organik yang telah dianalisis menunjukkan hasil karbon tanah yang ada di lokasi penelitian sebagaimana yang tertera pada tabel 7. Pada Stasiun 1, total

karbon tanah tertinggi tercatat sebesar 312,32 ton/ha. Nilai karbon tanah masing-masing kategori adalah: *Poor* sebesar 110,03 ton/ha, *Moderate* sebesar 101,27 ton/ha, dan *Excellent* sebesar 101,01 ton/ha. Pada Stasiun 2, total karbon tanah sebesar 217,76 ton/ha, dengan nilai tertinggi pada kategori *Moderate* (78,01 ton/ha), diikuti *Poor* (72,01 ton/ha) dan *Excellent* (67,73 ton/ha). Sementara itu, Stasiun 3 memiliki total karbon tanah sebesar 188,09 ton/ha. Kategori *Excellent* mencatat 72,06 ton/ha, *Moderate* 68,20 ton/ha, dan *Poor* 47,82 ton/ha.

Tabel 7. Nilai karbon organik tanah

Stasiun	Kategori	C-Organik (%C)	Bulk Density (g/cm ³)	Karbon Tanah (ton/ha)	Total karbon setiap stasiun (ton/ha)
1	Excellent	7,8943	1,2796	101,01	312,32
	Moderate	5,8475	1,7319	101,27	
	Poor	6,6358	1,6582	110,03	
2	Excellent	4,3269	1,5654	67,73	217,76
	Moderate	5,7067	1,367	78,01	
	Poor	4,8673	1,4795	72,01	
3	Excellent	3,9415	1,8283	72,06	188,09
	Moderate	3,3763	2,02	68,20	
	Poor	2,4694	1,9366	47,82	

Berdasarkan hasil karbon yang didapat menunjukkan bahwa hubungan antara tingkat kesehatan vegetasi mangrove dengan simpanan karbon tanah tidak menunjukkan pola yang konsisten di seluruh lokasi. Pada Stasiun 1, kategori *Poor* justru memiliki nilai karbon tanah tertinggi (110,03 ton/ha), sementara pada Stasiun 3, pola sebaliknya terjadi: kategori *Excellent* mencatat nilai tertinggi (72,06 ton/ha) dan *Poor* yang terendah (47,82 ton/ha). Kondisi ini memperlihatkan bahwa kualitas vegetasi tidak selalu menjadi indikator langsung dari besarnya simpanan karbon tanah. Hal ini menunjukkan bahwa akumulasi karbon tanah tidak semata-mata dipengaruhi oleh kualitas tegakan mangrove, melainkan juga oleh faktor lain. Penelitian Donato et al., (2011) menyatakan bahwa karbon

tanah merupakan fraksi terbesar dari total cadangan karbon ekosistem mangrove, dan penyimpanannya sangat dipengaruhi oleh stabilitas substrat dan ketebalan tanah organik yang terbentuk dari hasil akumulasi serasah dan akar bawah tanah.

Sebaliknya, pola yang lebih linier di Stasiun 3 menunjukkan bahwa vegetasi mangrove yang lebih sehat memang dapat mendukung peningkatan simpanan karbon tanah, terutama melalui produksi serasah dan akar yang lebih tinggi, serta perlindungan tanah dari erosi. Hal ini diperkuat oleh temuan Siddiq et al. (2020) yang menunjukkan korelasi positif antara tutupan kanopi dengan stok karbon tanah di Teluk Benoa. Pada Stasiun 2, nilai karbon tanah tertinggi terdapat pada kategori *Moderate* (78,01 ton/ha), diikuti *Poor* (72,01 ton/ha) dan *Excellent* (67,73

ton/ha). Fenomena ini mengindikasikan bahwa pada lokasi ini, tidak terdapat hubungan linier antara kualitas vegetasi dan kandungan karbon tanah. Murdiyarso et al., (2015) menjelaskan bahwa perbedaan kandungan karbon tanah pada ekosistem mangrove juga dipengaruhi oleh faktor edafik seperti salinitas, tekstur tanah, serta tingkat genangan air.

Nilai total simpanan karbon didapatkan dari hasil menjumlahkan secara keseluruhan nilai karbon yang di dapatkan mulai dari total nilai karbon atas dan bawah permukaan hingga total nilai karbon tanah, berikut merupakan hasil dari nilai total karbon yang di dapatkan pada ketiga stasiun disajikan pada tabel 8.

Tabel 8. Nilai total keseluruhan karbon mangrove pada setiap stasiun

Stasiun	Total Karbon Biomassa (ton/ha)	Total Karbon Tanah (ton/ha)	Total Karbon Keseluruhan (ton/ha)
1	1,68	312,32	314
2	13,99	217,76	231,75
3	16,43	188,09	204,52

Hasil pengukuran total karbon menunjukkan bahwa Stasiun 1 memiliki nilai total karbon keseluruhan tertinggi, yaitu sebesar 314 ton/ha, yang hampir seluruhnya berasal dari karbon tanah sebesar 312,32 ton/ha, sementara karbon dari biomassa hanya menyumbang 1,68 ton/ha. Hal ini menandakan bahwa pada Stasiun 1, peran karbon tanah sangat dominan terhadap total cadangan karbon yang tersimpan. Berbeda dengan Stasiun 1, Stasiun 2 memiliki total karbon keseluruhan sebesar 231,75 ton/ha, terdiri atas karbon tanah sebesar 217,76 ton/ha dan karbon biomassa sebesar 13,99 ton/ha. Jumlah karbon tanah di stasiun ini lebih rendah dibanding Stasiun 1, namun nilai biomassa jauh lebih tinggi, sehingga menyumbang porsi yang lebih signifikan terhadap total karbon. Sementara itu, Stasiun 3 mencatat karbon biomassa tertinggi di antara ketiga stasiun, yaitu sebesar 16,43 ton/ha, namun memiliki karbon tanah terendah sebesar 188,09 ton/ha, sehingga menghasilkan total karbon keseluruhan sebesar 204,52 ton/ha, yang merupakan nilai terendah dari ketiga stasiun. Menurut Murdiyarso et al., (2015), karakteristik tanah mangrove yang tergenang secara periodik dan miskin oksigen memperlambat laju dekomposisi

dan menyebabkan akumulasi karbon jangka panjang. Dengan demikian, ekosistem mangrove tidak hanya berperan sebagai penyerap karbon aktif dari atmosfer, tetapi juga sebagai penyimpan karbon jangka panjang (*long-term carbon sink*), terutama di lapisan sedimen. Fakta ini menjadikan mangrove sebagai salah satu ekosistem kunci dalam upaya mitigasi perubahan iklim global.

3.3 Valuasi Ekonomi Karbon

Hasil valuasi menunjukkan bahwa berdasarkan pasar sukarela, total nilai ekonomi karbon (Tabel 9 dan Tabel 10.) dari ketiga stasiun mencapai Rp 227.934.000 per hektar, sedangkan dengan pendekatan CDM mencapai Rp 583.390.080 per hektar. Perbandingan ini menunjukkan bahwa pendekatan valuasi dengan harga pasar wajib (CDM) menghasilkan nilai hampir 2,5 kali lebih tinggi dibandingkan pasar sukarela. Hal ini mencerminkan bahwa pasar CDM memiliki mekanisme yang lebih terstandarisasi dan terikat regulasi ketat, sedangkan pasar sukarela cenderung lebih fleksibel dan digunakan dalam konteks lokal atau proyek berbasis komunitas (Donato et al., 2011)

Tabel 9. Harga pasar karbon sukarela (*Voluntary market*)

Stasiun	Total Karbon (ton/ha)	Total Karbon Equivalen (ton CO ₂ e/ha)	Valuasi Harga Karbon (Rp.80.000/tonCO ₂ e)
1	314	1.154	Rp. 92.320.000.-
2	231,75	851	Rp. 68.080.000.-
3	204,52	751	Rp. 60.831.000.-
Total (Rp)			Rp. 227.934.000.-

Tabel 10. Harga pasar karbon wajib (*regulated market*) *Clean Development Mechanism (CDM)*

Stasiun	Total Karbon (ton/ha)	Total Karbon Equivalen (ton CO ₂ e/ha)	Valuasi Harga Karbon (Rp. 211.680/tCO ₂ e)
1	314	1.154	Rp. 244.278.720.-
2	231,75	851	Rp. 180.139.680.-
3	204,52	751	Rp. 158.971.680.-
Total (Rp)			Rp. 583.390.080.-

Secara ekologis, tingginya nilai ekonomi yang dihasilkan dari simpanan karbon menunjukkan bahwa mangrove tidak hanya berfungsi sebagai penyerap karbon (carbon sink), tetapi juga memiliki potensi besar dalam mendukung ekonomi hijau, terutama dalam skema perdagangan karbon, REDD+, dan target nasional seperti FOLU Net Sink 2030 (KLHK, 2022). Adanya perbedaan nilai ini menjadi peluang strategis dalam penyusunan kebijakan konservasi. Untuk kawasan dengan potensi simpanan karbon tinggi, integrasi ke skema CDM dapat memberikan insentif finansial yang signifikan. Sebaliknya, pasar sukarela tetap menjadi pendekatan yang relevan untuk proyek konservasi berskala kecil yang berorientasi pada pemberdayaan masyarakat (Friess et al., 2022).

4. SIMPULAN DAN SARAN

4.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Nilai karbon total tertinggi berada pada Stasiun 1 yang memiliki nilai total karbon keseluruhan tertinggi, yaitu

sebesar 314 ton/ha dengan nilai karbon biomassa 1,68 ton/ha dan total nilai karbon tanah sebesar 312,32 ton/ha, sementara nilai total karbon terendah terdapat pada Stasiun 3 dengan nilai total karbon 204,52 ton/ha, dengan nilai karbon biomassa sebesar 16,43 ton/ha dan nilai karbon tanah sebesar 188,09 ton/ha.

2. Nilai valuasi ekonomi karbon menunjukkan bahwa berdasarkan pasar sukarela, total nilai ekonomi karbon dari ketiga stasiun mencapai Rp 227.934.000 per hektar, sedangkan dengan pendekatan CDM mencapai Rp 583.390.080 per hektar. Perbandingan ini menunjukkan bahwa pendekatan valuasi dengan harga pasar wajib (CDM) menghasilkan nilai hampir 2,5 kali lebih tinggi dibandingkan pasar sukarela. Hal ini mencerminkan bahwa pasar CDM memiliki mekanisme yang lebih terstandarisasi dan terikat regulasi ketat, sedangkan pasar sukarela cenderung lebih fleksibel dan digunakan dalam konteks lokal atau proyek berbasis komunitas.

DAFTAR PUSTAKA

- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6(1), 195–219.
- Amira. 2008. Pendugaan Biomassa Jenis *Rhizophora apiculata* di Hutan Mangrove Batu Ampar, Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat. Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor.
- Ardhana, I. P. G., Rimbawan, I. M. G. S., Cahyo, P. N., Fitriani, Y., & Rohani, S. (2018). *The distribution of vertical leaves and leaves biomass on ten mangrove species at Ngurah Rai Forest Park, Denpasar, Bali, Indonesia*. *Biodiversitas*, 19(3), 918–926.
- As-Syakur, A. R., Setiawati, M. D., Novanda, I. G. A., Rachman, H. A., Wirayuda, I. K. A. K., Aryunisha, P. E. P., Saifulloh, M., & Pratama, R. T. (2025). Spatio-temporal variation trends of mangrove canopy cover in urban areas using Landsat 8 imagery and implications of management policies: A case study of the Benoa Bay mangrove area, Bali, Indonesia. *Wild*, 2(1), 8.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 7724:2011 – Pengukuran dan penghitungan cadangan karbon (carbon pools: AGB, BGB, dead wood, litter, soil)*. Jakarta: BSN.
- Dharmawan, I. W. S., & Siregar, C. H. (2008). *Soil carbon and carbon estimation of Avicennia marina (Forsk.) Vierh. in Ciasem, Purwakarta. Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 5(4), 317–328.
- Dharmawan, I.W.S. 2013. Pendugaan Biomasa Karbon di Atas Tanah Pada Tegakan *Rhizophora mucronata* di Ciasem, Purwakarta. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 15(1):50-56.
- 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.
- Fatoyinbo, T. E., & Simard, M. (2013). *Height and biomass of mangroves in Africa from ICESat/GLAS and SRTM*. *International Journal of Remote Sensing*, 34(2), 668–681.
- Friess, D.A., Howard, J., Huxham, M., Macreadie, P.I., & Ross, F. (2022). Capitalizing on the global financial interest in blue carbon. *PLOS Climate*, 1(8).
- Harefa, M.S., Nasution, Z., Mulya, M.B., Maksum, A. (2022). Mangrove species diversity and carbon stocks in silvofishery ponds in Deli Serdang District, North Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas* 23(2): 655-662.
- Indrayani, E., Kalor, J. D., Warpur, M., & Hamuna, B. (2021). *Using allometric equations to estimate mangrove biomass and carbon stock in Demta Bay, Papua Province, Indonesia*. *Journal of Ecological Engineering*, 22(5), 263–271.
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. Hayama, Japan: IGES.
- Kauffman, J. B., & Cole, T. G. (2010). *Micronesian mangrove forest structure and tree responses to a severe typhoon*. *Wetlands*, 30(6), 1077–1084.
- Kauffman, J. B., & Donato, D. C. (2012). *Protocols for the measurement*,

- monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests* (CIFOR Working Paper No. 86). Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [KLHK]. (2022). *The State of Indonesia's Forests: Towards FOLU Net Sink 2030*. Jakarta: KLHK.
- Kepel, T. L., Suryono, D. D., Ati, R. N. A., Salim, H. L., & Hutahean, A. (2017). *Importance and economic value estimation of mangrove vegetation carbon stocks in Kema, North Sulawesi*. *Jurnal Kelautan Nasional*, 12(1), 19–26.
- Ketut Ginantra, I. (2023). *Perspective Chapter: Mangrove Conservation – An Ecotourism Approach*. IntechOpen.
- Komiyama, A., Ong, J. E., & Pongparn, S. (2008). *Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: a review*. *Aquatic Botany*, 89(2), 128–137.
- Komiyama, A., Pongparn, S., & Kato, S. (2005). *Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves*. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4), 471–477.
- Liu, C., Zhang, Y., Wang, J., Li, X., Huang, D., & Chen, Z. (2024). *Element contents changes during propagule development of two Sonneratia species*. *Frontiers in Marine Science*, 11.
- Madhavally, S., Fernando, M. T. N., & Jayasuriya, D. M. (2025). *Adaptive leaf structure and anatomy in Rhizophora mucronata Lam.: The effects of salinity and pollution on foliar characteristics*. *Journal of Plant Physiology and Ecology*, 28(2), 113–125.
- Malabrigo, P. L., Galang, M. A., Urriza, R. C., Umali, A. G. A., Replan, E. L., Tobias, A. B., et al. (2017). *Mangrove Forest Inventory and Estimation of Carbon Storage and Sedimentation in Pagbilao*. Technical Report, Philippine Statistics Authority & World Bank.
- Malik, A., Sideng, U., & Jaelani, J. (2022). *Biomass carbon stock assessment of mangrove ecosystem in Pannikiang Island, South Sulawesi, Indonesia*. *Indonesian Journal of Geography*, 54(1).
- Maulidiyah, R., Cahyono, B. E., & Nugroho, A. T. (2019). *Analisis Kesehatan Mangrove Di Probolinggo Menggunakan Data Sentinel-2A*. *Natural B: Journal Of Health Adn Environmental Science*, 5(2), Hal. 41-47.
- 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 Climate Change*, 5(12), 1089–1092.
- Nurdiansah, D., & Dharmawan, I. W. E. (2018). *Komunitas mangrove di wilayah pesisir Pulau Tidore dan sekitarnya*. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 3(1), 1–9.
- Nurdiansah, D., & Dharmawan, I. W. E. (2021). *Analisis indeks kesehatan mangrove, struktur komunitas, dan tutupan kanopi di kawasan mangrove pesisir Kabupaten Maluku Tenggara*. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 13(1), 81–96.

- Ong, J. E., Gong, W. K., & Wong, C. H. (2004). *Allometry and partitioning of the mangrove, Rhizophora apiculata*. *Forest Ecology and Management*, 188(1–3), 395–400.
- Pillai, N. G., & Harilal, C. C. (2016). *Surveillance of the tolerance limit of *Sonn-earia alba* Sm. to certain hydrogeochemical parameters from heteroge-nous natural habitats of Kerala, South India*. *International Research Journal of Biological Sciences*, 5(12), 28–37
- Prameswari, A. A. S. R., Hariyanto, T., & Sidik, F. (2015). Analisis indeks vegetasi mangrove menggunakan citra satelit ALOS AVNIR-2 (Studi kasus: Estuari Perancak, Bali). *Geoid*, 11(1), 40–45.
- Prasetya, J. D., Ambariyanto, Supriharyono, & Purwanti, F. (2017). Mangrove health index as part of sustainable management in mangrove ecosystem at Karimunjawa National Marine Park, Indonesia. *Advanced Science Letters*, 23(4), 3277–3282.
- Purwiyanto, A. I. S., and Agustriani, F. 2017. Estimasi Stok Karbon Mangrove (Aboveground) di Tanjung Api-API, Sumatera Selatan. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis* 9(2): 761–770.
- Rinika, Y., Ras, A. R., Yulianto, B. A., Widodo, P., dan Saragih, H. J. R. (2023). Pemetaan Dampak Kerusakan Ekosistem Mangrove Terhadap Lingkungan Keamanan Maritim. *Equilibrium: Jurnal Pendidikan*, 11(2), 170–176.
- Siagian, A. W., & Arifin, A. H. (2022). Mangrove forest protection through economic valuation of carbon services as an effort to increase state revenue. *Jurnal Kajian*, 19(1), 111–125.
- Siddiq, A., Dimyati, M., & Damayanti, A. (2020). *Analysis of Carbon Stock Distribution of Mangrove Forests in The Coastal City of Benoa, Bali with Combination Vegetation Index, and Statistics Approach*. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(6)
- Sitthi, A., Pimple, U., Piponiot, C. *et al.* Assessing the effectiveness of mangrove rehabilitation using above-ground biomass and structural diversity. *Sci Rep* 15, 7839 (2025).
- Supriharyono, M. S. (2009). *Konservasi ekosistem sumberdaya hayati dan wilayah pesisir dan laut tropis* (Cetakan pertama, Edisi kedua). Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- 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.
- Sutaryo, D. (2009). *Penghitungan biomassa: Sebuah pengantar untuk studi karbon dan perdagangan karbon*. Wetlands International Indonesia Programme.
- Tarlan, M.A. 2008. Biomass estimation of nyirih (*Xylocarpus granatum* Koenig. 1784) in primary mangrove forest in Batu Ampar, West Kalimantan. Bogor Agricultural University, Indonesia.
- Tue, N. T., Dung, L. V., Nhuan, M. T., & Omori, K. (2014). Carbon storage of a tropical mangrove forest in Mui Ca Mau National Park, Vietnam. *Catena*, 121:119–126.
- Uhib, Faridh. A. (2022). *Kebutuhan standarisasi Pengelolaan Hutan Mangrove di Indonesia*.

STANDAR: Better Standard Better Living, 1(5), 21–24.

- Wahyudi, A.J., Rahmawati, S., Irawan, A., Hadiyanto, H., Prayudha, B., Hafizt, M., Afdal, A.N.S., Rustam, A., Hernawan, U.E., Rahayu, Y.P., Iswari, M.Y., Supriyadi, I.H., Solihudin, T., Ati, R.N.A., Kepel, T.L., Kusumaningtyas, M.A., Daulat, A., Salim, H.L., Sudirman, N., Suryono, D.D., & Kiswara, W., 2020. Assessing Carbon Stock and Sequestration of the Tropical Seagrass Meadows in Indonesia. *Ocean Science Journal*, 55(1):85–97.
- Yoshikai, M., Nakamura, T., Suwa, R., Argamosa, R., Okamoto, T., Rollon, R., et al. (2021). *Scaling relations and substrate conditions controlling the complexity of Rhizophora prop root system*. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 248, 107014.