

ESTIMASI STOK KARBON MANGROVE REHABILITASI DI PULAU HARAPAN DAN KELAPA, TAMAN NASIONAL KEPULAUAN SERIBU, JAKARTA

CARBON STOCK ESTIMATION OF REHABILITATED MANGROVE IN HARAPAN AND KELAPA ISLAND, SERIBU ISLAND NATIONAL PARK, JAKARTA

Grace Easteria¹, Zulhamsyah Imran^{1,2*}, & Gatot Yulianto¹

¹Departemen Manajemen Sumberdaya Pesisir dan Laut, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University, Bogor 16680, Indonesia

²Laboratorium Akuatik, SEAMEO BIOTROP, Bogor 16134, Indonesia

*E-mail: zulhamsyahim@apps.ipb.ac.id

ABSTRACT

Restoration of blue carbon ecosystems, such as mangroves, is increasingly being used as a management for climate change mitigation by removing and sequestering carbon in the atmosphere. Mangrove rehabilitation activity held by the National Park since 2005, is one of the efforts to reduce green house gas (GHG) emissions. However, the growth and distribution of mangroves are non-optimal due to unfavorable environmental conditions. This certainly has an impact on the amount of carbon stock stored in mangroves. Therefore, this research aims 1) to estimate the potential carbon stock in restored mangroves on above ground (ABG), below ground (BGB), and soil carbon, and 2) to estimate the economic valuation of mangrove services as carbon storage. We calculate the carbon stock in ABG and BGB mangrove using a non-destructive method (allometric formula), while the calculation of soil carbon is carried out by analyzing the C-Organic content using mangrove rehabilitation (ABG+BGB+soil carbon) is 634.54 tonC/ha and CO₂ sequestration is 2328.75 tCO₂/ha. The economic value of mangrove rehabilitation for environmental services in storing carbon reached 375,202,308 IDR for the voluntary market and 980,528,697 IDR for the regulatory compliance (Clean Development Mechanism). The results can be used as initial information on mangrove ecosystem management policies, specifically as carbon storage for sustainable mangrove rehabilitation.

Keywords: carbon stock, economic valuation, mangrove rehabilitation, small island

ABSTRAK

Restorasi ekosistem karbon biru, seperti mangrove, semakin banyak digunakan untuk mitigasi perubahan iklim dengan menghilangkan dan menyerap karbon di atmosfer. Rehabilitasi penanaman mangrove yang dilakukan oleh Balai Taman Nasional Kepulauan Seribu (TNKpS) sejak tahun 2005 di Kepulauan Seribu merupakan salah satu upaya penurunan emisi secara nasional. Namun, pertumbuhan mangrove dan persebaran mangrove cenderung tidak optimal dikarenakan kondisi lingkungan yang tidak mendukung. Hal ini tentu berdampak pada jumlah stok karbon yang tersimpan dalam mangrove. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk 1) mengestimasi potensi stok karbon pada mangrove rehabilitasi baik tegakan dan substrat, dan 2) menghitung valuasi ekonomi mangrove sebagai penyimpan karbon. Perhitungan stok karbon mangrove pada tegakan dan bawah permukaan menggunakan metode non destruktif (rumus alometrik), sedangkan perhitungan karbon tanah dilakukan menggunakan perhitungan kadar C-Organik dengan metode Walkley & Black. Cadangan total karbon (*aboveground*, *belowground*, dan karbon tanah) pada mangrove *Rhizophora stylosa* adalah 634,54 tonC/ha dan serapan CO₂ 2328,75 tCO₂/ha dengan nilai ekonomi jasa lingkungan dari mangrove rehabilitasi di Pulau Harapan dan Kelapa mencapai Rp375.202.308 untuk pasar bebas dan Rp980.528.697 untuk pasar wajib (*Clean Development Mechanism*). Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai informasi awal perumusan kebijakan pengelolaan ekosistem mangrove sebagai penyimpan karbon agar ekosistem mangrove dapat berkelanjutan.

Kata kunci: mangrove, rehabilitasi, stok karbon, valuasi ekonomi

I. PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove tersebar di 105 negara dan merupakan salah satu ekosistem paling produktif dan bermanfaat untuk melindungi daerah pesisir (Eddy *et al.*, 2016). Disamping itu, ekosistem mangrove juga bermanfaat secara ekonomi, sosial, dan juga dari sisi budaya bagi masyarakat pesisir. Indonesia, Brazil, Malaysia, dan Papua Nugini diketahui menyusun 50% area ekosistem mangrove di dunia global (Jakovac *et al.*, 2020). Namun, seluas 137-636 km² ekosistem mangrove hilang setiap tahun secara global, mewakili 0,16–0,39% ekosistem yang hilang per tahun (Hamilton & Casey, 2016). Kerusakan ekosistem mangrove di Indonesia tergolong tinggi dan mengakibatkan stok karbon terancam selama enam dekade terakhir (Ilman *et al.*, 2016). Penyebab utama deforestasi mangrove diantaranya adalah pembangunan perkotaan, budidaya, pertambangan, dan eksploitasi berlebihan pada kayu, ikan, krustasea dan kerang (Alongi, 2014).

Jasa lingkungan mangrove dalam menyerap karbon sangat efektif dibandingkan tipe hutan tropis lainnya di Indonesia (Kauffman & Donato, 2012). Cadangan karbon mangrove di Indonesia mencapai 891,70 tonC/ha dengan total cadangan karbon mangrove nasional sebesar 2,89 Tt C (Wahyudi *et al.*, 2018). Tingginya laju kerusakan mangrove di Indonesia berdampak pada besarnya emisi karbon yang lepas ke atmosfer sebesar 42% dari emisi global yang diperkirakan mencapai 0,15-1,02 Pg CO_{2e} setiap tahun, sedangkan emisi karbon biru secara global setara dengan 3-19% dari total emisi global (Murdiyarso *et al.*, 2015). Oleh karena tingginya ancaman ekosistem mangrove pada pesisir yang turut menyebabkan terlepasnya emisi karbon ke atmosfer, maka perlu untuk dilakukan upaya mitigasi berupa penanaman pohon mangrove (rehabilitasi) terutama pada daerah yang rentan yaitu pulau-pulau kecil.

Terdapat tiga alasan untuk melakukan rehabilitasi mangrove, yaitu 1) konservasi, 2) pemanfaatan produksi yang berkelanjutan, dan 3) perlindungan area pesisir (APN, 2019). Menurut Kepala Balai Pulau Kelapa, Kepulauan Seribu, bahwa alasan yang ketiga merupakan alasan utama rehabilitasi yang dilakukan di Pulau Harapan dan Kelapa, Kepulauan Seribu. Ekosistem mangrove di pulau-pulau kecil memiliki karakteristik unik karena kondisi lokal dan lingkungannya (Suyadi *et al.*, 2021). Perlindungan pulau-pulau kecil perlu untuk dilakukan dikarenakan bersifat “rentan” baik secara ekonomi, sosial, dan fisik. Pulau-pulau kecil yang bersifat *remoteness* and insularitas menyebabkan daerah pulau kecil rentan terhadap tsunami, perubahan iklim, kenaikan permukaan laut, gempa bumi, gelombang tinggi, dan badai siklon. Rehabilitasi mangrove merupakan salah satu upaya untuk meminimalisir dampak negatif tersebut secara alami (Akbar, 2016). Selain itu, rehabilitasi penanaman mangrove juga bertujuan sebagai sarana edukasi dan salah satu upaya penurunan emisi secara nasional.

Rehabilitasi mangrove di pulau kecil menjadi salah satu potensi penyimpanan karbon. Karbon biru merupakan karbon organik yang diserap dan disimpan oleh ekosistem laut dan pesisir yang bervegetasi, termasuk rawa-rawa pasang surut, padang lamun, dan mangrove (McHarg *et al.*, 2022). Meskipun menempati area yang lebih kecil, ekosistem mangrove dapat menyimpan karbon pada tingkat yang sebanding dengan hutan terrestrial, juga memiliki potensi untuk mengurangi perubahan iklim, peningkatan perikanan, dan manfaat tambahan lainnya (McLeod *et al.*, 2011). Mangrove di Pulau Harapan dan Kelapa di Kepulauan Seribu merupakan mangrove rehabilitasi dan hanya 1-2 buah mangrove alami yang dijumpai di lokasi tersebut (Haryanto, 2013). Penanaman mangrove homogen (*Rhizophora* sp.) yang selama ini dilakukan oleh TNKpS berada pada zona *reef flat* (*limestone reef*) yang memiliki substrat dominan pasir dengan

hamparan lamun yang bukan merupakan habitat asli ekosistem mangrove alami (Wolanski & Elliott, 2015). Hal ini menyebabkan biomassa pohon kerdil (*thinning*) karena densitas pohon yang tinggi, rendahnya diversitas pohon dan fauna, dan hilangnya zonasi mangrove yang menjadi karakteristik alami lanskap hutan mangrove (Asaeda *et al.*, 2016). Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dihitung nilai stok karbon pada tegakan (*aboveground*), bawah permukaan (*belowground*), dan tanah (*soil*) pada zona flat area di kawasan mangrove rehabilitasi dilakukan. Berdasarkan rumusan permasalahan di atas, maka penelitian ini bertujuan untuk 1) mengestimasi potensi stok karbon pada mangrove rehabilitasi baik tegakan dan substrat; dan 2) menghitung valuasi ekonomi mangrove sebagai penyimpan karbon. Data perhitungan stok karbon dan valuasi ekonomi mangrove mampu memberikan informasi mengenai kemampuan ekosistem mangrove rehabilitasi dalam menyerap karbon sehingga upaya rehabilitasi mangrove di Kepulauan Seribu dapat berkontribusi dalam upaya penurunan gas rumah kaca (GRK) secara nasional, dan menyusun rencana rehabilitasi yang tepat dan terukur sehingga dapat menciptakan pengelolaan rehabilitasi ekosistem mangrove yang berkelanjutan.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Tempat

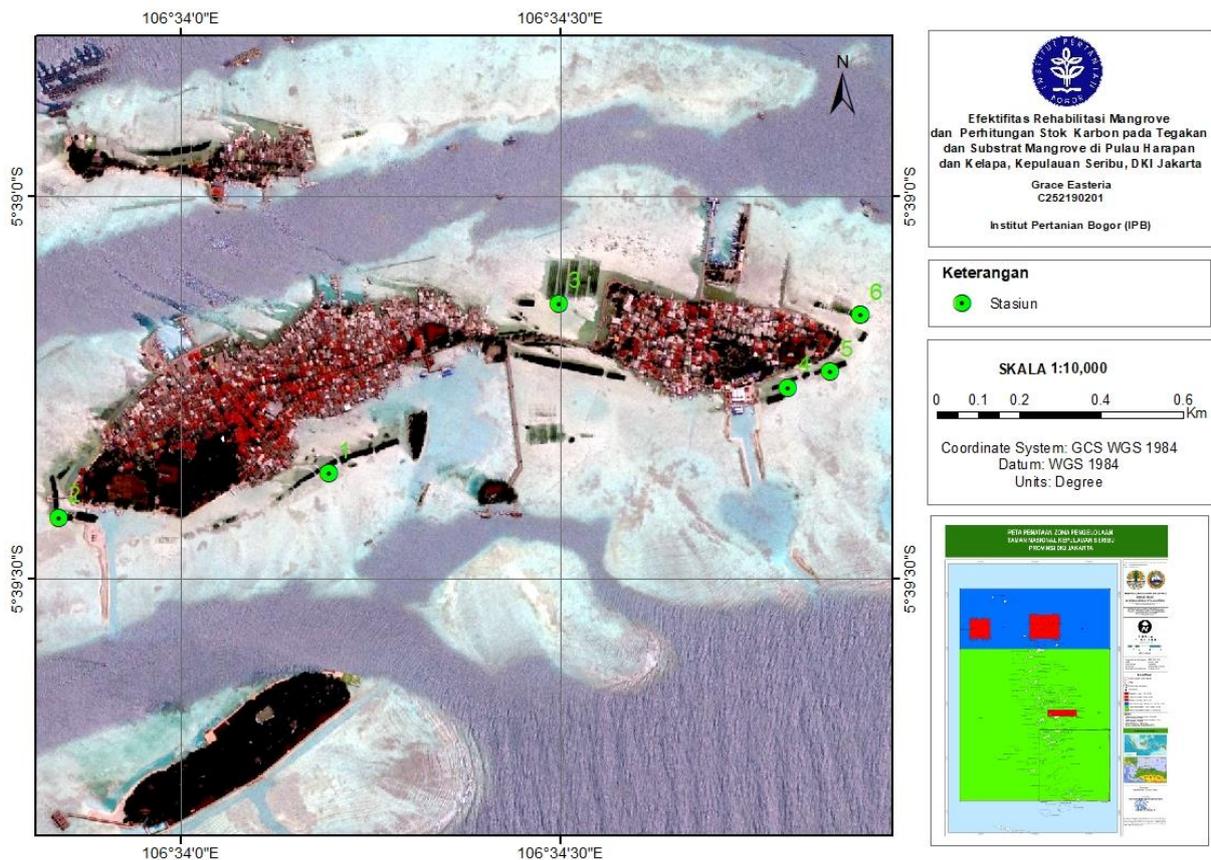
Penelitian dilaksanakan selama bulan September 2021. Lokasi penelitian berada di ekosistem mangrove Pulau Harapan dan Kelapa, Kepulauan Seribu, Provinsi DKI Jakarta (Gambar 1). Secara umum, kondisi fisik, kimia, dan biologi Kelurahan Pulau Harapan dan Kelapa tidak jauh berbeda dengan kondisi Kepulauan Seribu. Kondisi perairan Kepulauan Seribu dipengaruhi musim, pada musim timur dengan tinggi gelombang lebih rendah dibandingkan musim barat yaitu masing-masing berkisar antara 0,5 – 1 m dan 2 – 3 m. Kondisi angin

di Kepulauan Seribu sangat dipengaruhi angin *monsoon* yaitu Angin Musim Barat (Desember-Maret) dan Angin Musim Timur (Juni-September). Musim Pancaroba terjadi antara bulan April-Mei dan Oktober-November. Kecepatan angin pada musim Barat bervariasi antara 7-20 knot/jam dan bertiup dari barat daya sampai barat laut. Angin kencang dengan kecepatan 20 knot/jam biasanya terjadi antara bulan Desember-Februari. Tipe iklim di Kepulauan Seribu termasuk tropika panas dengan suhu maksimum 32,3 °C, suhu minimum 21,6 °C dan suhu rata-rata 27 °C serta kelembaban udara 80 mm Hg (Sachoemar, 2008).

Tipe substrat di lokasi sekitar Pulau Harapan merupakan tempat tumbuhnya lamun dan mangrove, karena substrat tersebut berupa pasir yang ditumbuhi oleh alga pada beberapa daerah. Mangrove yang berada di pulau ini hampir semuanya sengaja ditanam dan hanya ada beberapa pohon saja yang merupakan mangrove alami. Aktivitas pengelolaan sumberdaya kelautan dan perikanan yang ada di Pulau Harapan meliputi perikanan tangkap, perikanan budidaya, konservasi terumbu karang, dan restorasi mangrove. Stasiun pengamatan didasarkan pada umur penanaman, jenis substrat, tinggi pohon, dan kondisi fisika dan kimia perairan (Haryanto, 2013). Berikut adalah lokasi stasiun pengamatan mangrove di Pulau Harapan dan Kelapa (Gambar 1).

2.2. Pengukuran Struktur Tegakan Mangrove

Perhitungan stok karbon dilakukan pada 18 plot (10 x 10 m) melalui pengukuran lingkaran batang, kerapatan vegetasi, ketinggian tegakan mangrove, dan diameter batang pohon utama. Pengukuran diameter dilakukan pada daerah batang dengan jarak 1,37 m dari permukaan tanah atau pengukuran setinggi dada (dbh) (Kauffman & Donato, 2012). Kerapatan pohon dan anakan dihitung dengan menggunakan metode analisis vegetasi. Penentuan kriteria pohon, anakan, dan semai didasarkan pada



Gambar 1. Lokasi Pengambilan Data di Pulau Kelapa dan Harapan.

keliling batang, diameter batang, dan tinggi pohon yaitu pohon dengan diameter ≥ 5 cm atau keliling batang ≥ 16 cm, semai dengan diameter < 5 cm dan keliling batang < 16 cm, dan anakan tinggi $< 1,5$ m dan belum bercabang.

Pengukuran kerapatan tajuk mangrove dilakukan menggunakan *Hemispherical Photography* untuk mengestimasi radiasi sinar matahari dari kanopi pohon menggunakan lensa *wide-angle* (Dharmawan, 2014). Sebanyak 72 foto diambil menggunakan kamera ponsel dan lensa tambahan *fisheye* dengan sudut pandang 180° dan rasio akhir foto 1:1. Persentase tutupan mangrove didapatkan dari persentase perbandingan dari jumlah piksel (P_{255}) dengan jumlah keseluruhan piksel ($\sum P$) yang tercantum pada Persamaan 1 (Dharmawan, 2014).

Tinggi pohon didapatkan dengan menggunakan perbandingan trigonometri antara jarak pengukuran (d) yaitu 10 m dengan tinggi mata pengamat (H_0) yaitu 163 cm pada kasus ini dan sudut pada puncak tertinggi pada pengamatan pohon (θ) (Andiani *et al.*, 2021). Pengambilan data sudut puncak pohon dilakukan menggunakan aplikasi *Protractor* pada ponsel. Persamaan dan perhitungan tinggi tegakan mengikuti persamaan 2 dan 3. Tutupan tajuk mangrove, tinggi pohon, dan analisis data stok karbon ABG dan BGB dianalisis menggunakan aplikasi *MonMang 2.0* (Khoir & Dharmawan, 2021).

$$\% \text{ tutupan mangrove} = \frac{P_{255}}{\sum P} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

$$H_1 = d \times \tan\theta \dots\dots\dots (2)$$

$$H = H_0 + H_1 \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan: $P255$ = Jumlah pixel yang berjumlah 255; SP = Jumlah seluruh pixel; H = Tinggi pohon mangrove; θ = Sudut sorot puncak tertinggi; D_x = Jarak horizontal antara observer dengan pohon; H_0 = Tinggi badan observer; H_l = Tinggi antara badan observer dengan puncak pohon.

2.3. Pengukuran Simpanan Karbon Aboveground (ABG) dan Belowground (BGB)

Pengukuran karbon diukur menggunakan metode non destruktif menggunakan persamaan alometrik umum (*common allometric equation*) yang melibatkan hubungan antara diameter pohon yang tingginya 1,37 m (setara dengan tinggi dada pengamatan) dengan massa jenis kayu (ρ) yang tercantum pada persamaan 4 (Komiyama *et al.*, 2005). Nilai jenis densitas kayu mangrove spesies *Rhizophora stylosa* mengacu pada ICRAF yaitu sebesar 1,04 g/cm³. Stok karbon pada tegakan mangrove (ABG) (tonC/ha) diestimasi dari 46,82% nilai biomassa tegakan (persamaan 5) (Andiani *et al.*, 2021). Perhitungan simpanan karbon *belowground* digunakan rumus allometrik pada berat akar (persamaan 6).

$$W_{top} = 0,251 \rho D^{2,46} \dots\dots\dots(4)$$

$$C_{top} = 46,82\% \times W_{top} \dots\dots\dots(5)$$

$$W_R = 0,199 \rho^{0,899} D^{2,22} \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan: C_{top} = Stok karbon *aboveground*; W_{top} = biomassa *aboveground* (kg); D = diameter (cm); W_R = biomassa *belowground* (kg); ρ = Jenis kayu (g/cm³).

2.4. Pengukuran Karbon Tanah Mangrove

Pengukuran tampungan karbon tanah dilakukan secara akurat dengan memperhatikan tiga parameter, yaitu a) kedalaman tanah, b) berat massa tanah (*bulk density*), dan c) konsentrasi karbon organik (Kauffman & Donato, 2012). Sampel tanah

diambil sedalam 30 cm karena merupakan lapisan tanah tersebut paling rentan terhadap perubahan penggunaan lahan. Ukuran subsampel diambil sekitar 5 cm dari inti yang kemudian diekstraksi sebanyak 30-50 g massa sampel. Sub sampel diambil pada perkiraan titik tengah dari setiap kedalaman sampel (Kauffman & Donato, 2012). Perhitungan karbon tanah dilakukan menggunakan analisis laboratorium perhitungan kadar C-Organik dengan metode Walkley & Black. Perhitungan massa karbon tanah sesuai dengan persamaan 7 yang melibatkan antara berat jenis (ρ), interval kedalaman tanah (h), dan konsentrasi karbon C organik (%C).

$$\text{Karbon tanah (mg/ha)} = \rho \text{ (g/cm}^3\text{)} \times h \text{ (cm)} \times \% C \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan: % C = konsentrasi karbon yang dinyatakan dalam bilangan bulat (%); ρ = jenis kayu (g/cm³); h = interval kedalaman tanah (cm).

2.5. Valuasi Ekonomi Mangrove sebagai Penyimpan Karbon

Valuasi ekonomi mangrove sebagai penyimpan karbon dihitung berdasarkan pada harga yang berada pada pasar sukarela dan pasar wajib (*Clean Development Mechanism*) dengan masing-masing sebesar Rp81.000/tCO₂e dan Rp211.680/tCO₂e (Kepel *et al.*, 2017). Nilai ekonomi karbon pada pasar sukarela (*voluntary market*) merupakan pasar karbon yang terbentuk karena adanya keinginan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca tanpa adanya kewajiban, sebagai contoh seperti keinginan suatu lembaga swadaya masyarakat yang melakukan sertifikasi *carbon offset* dalam rangka berpartisipasi untuk menjaga lingkungan. Sementara itu, pasar wajib terbentuk karena adanya kebijakan yang mewajibkan pengurangan dan pembatasan jumlah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan

oleh perusahaan dan pemerintah (Dicky *et al.*, 2018).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Struktur Komunitas Mangrove

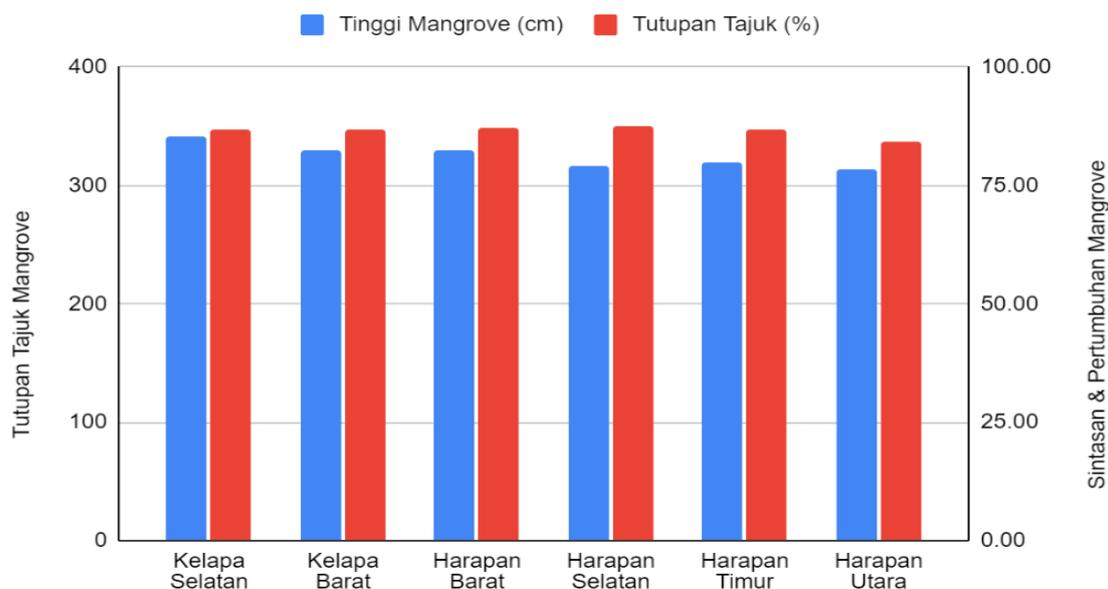
Rehabilitasi mangrove dilakukan sejak tahun 2005 pada saat periode GERHAN dan sejauh ini metode yang dianggap berhasil. Untuk pertumbuhan mangrove di Kepulauan Seribu adalah metode rumpun berjarak. Mangrove di Pulau Harapan dan Kelapa mayoritas berupa pohon, sedangkan untuk anakan hanya berada pada beberapa lokasi di bagian barat, utara, dan selatan Pulau Harapan. Umumnya seluruh ekosistem mangrove di lokasi

penelitian merupakan hasil rehabilitasi dan hanya ada beberapa yang dianggap sebagai mangrove alami dengan jenis *Rhizophora mucronata* yang berjumlah 1-2 pohon dan berlokasi di bagian utara Pulau Harapan. Sampai saat ini, mangrove rehabilitasi yang ditanam didominasi oleh satu jenis yaitu *Rhizophora stylosa*.

Menurut Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 201 Tahun 2004 bahwa kriteria baku mutu kerapatan mangrove tergolong menjadi tiga yaitu kerapatan padat ≥ 1.500 ind/ha, sedang $\geq 1.000 - 1.500$ ind/ha dan jarang < 1.000 ind/ha. Hasil analisis vegetasi pada semua stasiun menunjukkan bahwa kerapatan mangrove rata-rata hasil rehabilitasi

Table 1. Hasil analisis vegetasi mangrove di Pulau Harapan dan Kelapa.

Stasiun	Luas Mangrove (ha)	Estimasi jumlah tegakan mangrove per hektar (ind)	Rata-rata diameter tegakan (cm)	Densitas (ind/ha)
Harapan Barat	3,72	461.672	2,18	4.617
Harapan Utara	0,48	142.075	1,94	1.421
Harapan Timur	0,3	464.648	2,1	4.646
Harapan Selatan	0,3	202.777	3,1	2.028
Kelapa Barat	0,7	98.815	2,32	988
Kelapa Selatan	1,8	149.860	2,04	1.499



Gambar 2. Tinggi danutupan tajuk mangrove di Pulau Harapan dan Kelapa.

merupakan 2533 ind/ha yang termasuk kategori tinggi (≥ 1.500 ind/ha) (Tabel 1). Hal ini menunjukkan dampak positif karena semakin tinggi kerapatan mangrove maka semakin baik kemampuannya untuk memecah gelombang air laut.

Tinggi merupakan faktor yang diamati dalam pertumbuhan mangrove. Umumnya mangrove yang ditanam di Pulau Harapan dan Kelapa berasal dari rata-rata tinggi propagul mangrove yang mencapai 43 cm dan rata-rata tinggi pohon mangrove mencapai tinggi 3,25 m, namun uniknya memiliki diameter batang yang kurang dari 10 cm. Pertumbuhan mangrove yang lambat disebabkan kompetisi intraspesifik akibat jarak penanaman antar individu yang terlalu rapat. Selain itu, adanya indikasi miskinnya nutrisi yang ditunjukkan oleh dominasi pasir pada substrat dasar juga diperkirakan menjadi faktor lambatnya pertumbuhan mangrove (Alongi, 2018). Menurut Permatasari *et al.* (2019), substrat tanah yang didominasi pasir memiliki luas permukaan yang kecil sehingga lebih sulit dalam menahan air dan unsur hara.

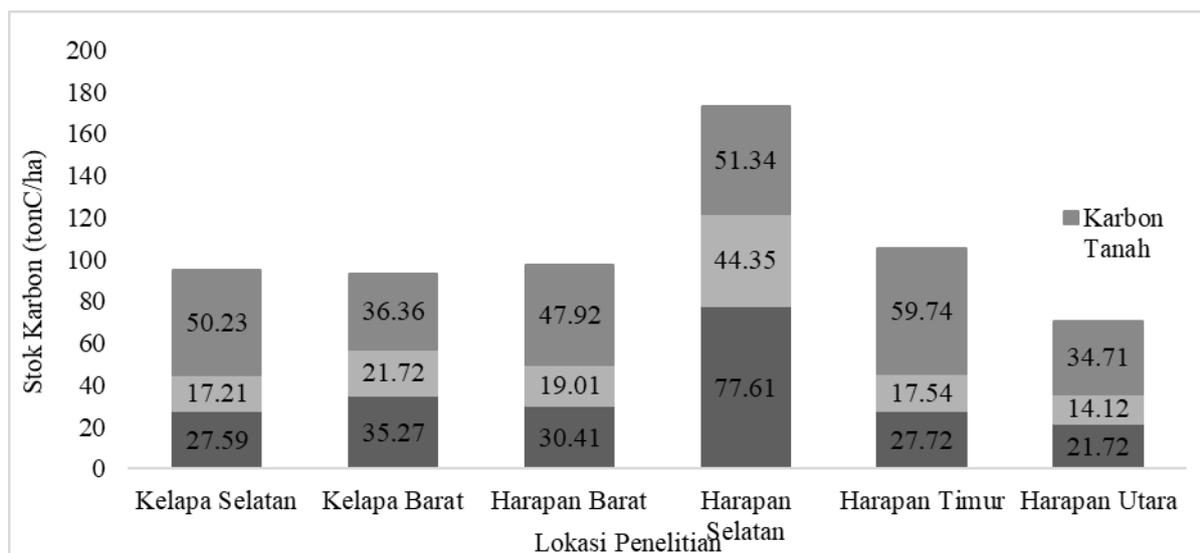
Tutupan relatif merupakan tingkat kepadatan mangrove pada suatu ekosistem yang merupakan indikator keberhasilan proses regenerasi alami tanaman dan kesuburan mangrove. Tutupan tajuk mangrove di setiap stasiun rata-rata mencapai 86,57% (Gambar 2). Hal ini menunjukkan nilai yang sangat baik karena tingginya kerapatan mangrove yang dipengaruhi oleh metode penanaman rumpun berjarak. Tutupan tajuk mangrove tertinggi berada pada stasiun Harapan Selatan mencapai 87,59%, sedangkan tutupan tajuk mangrove terendah berada pada stasiun Harapan Utara yaitu 84,37%.

3.2. Nilai Karbon ABG, BGB, dan Tanah pada Mangrove Rehabilitasi

Perhitungan stok karbon tegakan (*aboveground*) bawah permukaan (*belowground*) dilakukan pada enam stasiun yang berada pada Pulau Harapan dan Kelapa.

Hasil penelitian mendapatkan bahwa total stok karbon (*aboveground+belowground+soil*) pada Pulau Harapan dan Kelapa adalah 634,53 tonC/ha dengan nilai *aboveground* karbon sebesar 220,31 tonC/ha (nilai karbon organik biomassa 46,88 tonC/ha), *belowground* sebesar 113,94 tonC/ha (nilai karbon organik biomassa 28,5 tonC/ha), dan karbon tanah sebesar 280,28 tonC/ha. Nilai total simpanan karbon ini relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan mangrove rehabilitasi yang berlokasi di Pulau Tanakeke, Sulawesi Selatan dengan nilai karbon organik pada biomassa *aboveground* sebesar 50,2 tonC/ha, karbon organik pada biomassa *belowground* sebesar 15,7 tonC/ha, dan karbon tanah sebesar 391,6 tonC/ha (Cameron *et al.*, 2018). Nilai karbon pada lokasi penelitian jauh lebih rendah diduga karena berbeda dengan kondisi kawasan mangrove rehabilitasi di Pulau Tanakeke yang merupakan mangrove *Rhizophora* alami yang tinggal di tepi pantai dan berada pada karang atoll. Hasil penelitian ini ditemukan bahwa nilai tertinggi berada pada Stasiun Harapan Selatan dengan nilai 173,29 tonC/ha, sedangkan total stok karbon terendah terdapat pada Stasiun Harapan Utara sebesar 70,54 tonC/ha. Besar jumlah karbon dalam bentuk biomassa dipengaruhi oleh jenis tanah, keragaman jenis pohon, umur pohon, dan produksi serasah, sedangkan besarnya jumlah karbon bergantung pada kesuburan tanah, kerapatan dan keragaman tumbuhan, serta cara pengelolaannya (Uthbah *et al.*, 2017).

Hasil pengamatan ditemukan bahwa substrat tanah mangrove pada lokasi penelitian merupakan *sandy mud* atau pasir berlumpur sehingga diduga kandungan nutrisi yang lebih sedikit dibandingkan dengan substrat *muddy sand* atau lumpur berpasir. Menurut Permatasari *et al.* (2019) bahwa substrat tanah yang dominan pasir memiliki luas permukaan kecil sehingga sulit untuk menahan air dan unsur hara sehingga memengaruhi jumlah karbon dalam mangrove. Adapun nilai stok karbon pada



Gambar 3. Data stok karbon tegakan (*aboveground*), bawah permukaan (*belowground*), dan karbon tanah pada mangrove rehabilitasi di Pulau Harapan dan Kelapa.

substrat berpasir memiliki nilai yang lebih sedikit dibandingkan dengan substrat tanah yang berlumpur. Hasil pengamatan substrat pada Harapan Utara memiliki banyak *rubble* dibandingkan dengan substrat di Harapan Selatan, hal ini diduga menjadi salah satu alasan stok karbon di Harapan Utara jauh lebih sedikit. Kurangnya zat hara dan bahan organik juga menjadi salah satu faktor kecilnya nilai karbon. Menurut Supriyantini *et al.* (2018), semakin besar ukuran substrat sedimen, maka akan semakin kecil ketersediaan nitrogen dan fosfat yang merupakan nutrisi utama dalam pertumbuhan vegetasi mangrove. Tekstur tanah ini menyebabkan kurangnya kemampuan untuk menahan air dan nutrisi yang memengaruhi tinggi dan diameter pohon. Oleh karena itu, semakin tinggi unsur N maka semakin bertambahnya tinggi dan diameter pohon *Rhizophora sp.*

Tegakan mangrove rehabilitasi di Pulau Harapan dan Kelapa memiliki kondisi unik yang dilihat dari tinggi rata-rata mencapai 3,25 m yang sudah termasuk kategori pohon, akan tetapi memiliki diameter rata-rata hanya mencapai 2,3 cm yang termasuk kategori sapling. Metode penanaman mangrove menggunakan metode rumpun berjarak menyebabkan kerapatan

mangrove menjadi sangat tinggi. Hal ini sesuai yang diungkapkan Nedhisa & Tjahjaningrum (2019) bahwa tingginya kerapatan pohon akan menyebabkan berkurangnya intensitas cahaya yang akan menghambat pertumbuhan biomassa tegakan, karena unsur hara, air, cahaya dan CO₂ yang diperoleh masing-masing individu berkurang. Ukuran diameter dan biomassa yang kecil ini akan memengaruhi nilai karbon tegakan (*aboveground*) pada mangrove. Stasiun Harapan Selatan memiliki nilai karbon tegakan tertinggi karena memiliki rata-rata keliling batang mencapai 11 cm dan diameter mencapai 3-4 cm. Berbeda dengan stasiun Harapan Utara yang memiliki rata-rata keliling batang yang lebih kecil yaitu 5-7 cm dan diameter mencapai 1-2 cm.

Sementara itu, nilai karbon pada bawah permukaan (*belowground*) dan karbon tanah berpengaruh terbalik dengan pernyataan sebelumnya. Kerapatan tegakan mangrove dapat memengaruhi stok karbon dan laju akumulasi karbon ketika semakin banyak tegakan pohon mangrove maka semakin tinggi karbon yang dapat diserap dan disimpan di kawasan tersebut (Priscillia *et al.*, 2021). Diluar kawasan mangrove rehabilitasi merupakan sedimen yang

ditumbuhi oleh ekosistem lamun yang pendek. Jika dibandingkan hasil karbon tanah yang berada dibawah permukaan mangrove dengan wilayah diluar kawasan mangrove yaitu pada sedimen yang ditumbuhi lamun, terlihat perbedaan yang nilai stok karbon yang signifikan. Penelitian Rifai *et al.* (2021) menyebutkan bahwa nilai stok karbon yang berada pada ekosistem lamun di Kepulauan Seribu berada di antara 5,5-17,2 tonC/ha, sedangkan nilai stok karbon tanah pada mangrove rehabilitasi mencapai antara 21,72-77,61 tonC/ha. Menurut Supriyantini *et al.* (2018), disaat ketersediaan nutrien (rasio N:P) tinggi, maka bibit mangrove akan memaksimalkan penyerapan karbon lebih banyak pada *aboveground* dibandingkan pada akar, sedangkan sebaliknya saat ketersediaan nutrien rendah, maka bibit mangrove akan mengalihkan sumbernya untuk meningkatkan biomassa akar (*belowground*). Oleh karena itu, perlu penelitian lebih lanjut meninjau bahan total organik, nitrat, dan fosfat dalam sedimen untuk melihat keterkaitannya dengan nilai karbon *aboveground*, *belowground*, dan *soil*.

Umur pohon mangrove memengaruhi nilai karbon karena umur tegakan mangrove akan berbanding lurus dengan kandungan biomasnya (Kohl *et al.*, 2017). Bertambahnya umur pohon berbanding lurus dengan penambahan diameter, semakin bertambah umur tanaman, maka semakin besar kandungan biomassa tegakan (Manafe *et al.*, 2016). Oleh karena itu, setiap

peningkatan umur tegakan maka jumlah CO₂ yang diserap dan disimpan oleh tegakan pohon akan bertambah (Uthbah *et al.*, 2019). Rata-rata umur pohon mangrove pada lokasi penelitian adalah 13 tahun yang ditanam pada tahun 2008, sehingga nilai hasil stok karbon tidak jauh berbeda satu sama lain kecuali pada stasiun Harapan Selatan. Mangrove pada stasiun Harapan Selatan memiliki nilai tegakan tertinggi yang diduga merupakan salah satu pohon alami atau induk yang berada di wilayah Pulau Harapan. Menurut penelitian Carnel *et al.* (2022), umur tegakan mangrove berpengaruh signifikan pada penambahan jumlah karbon dan laju penambahannya. Tegakan mangrove berumur 17 dan 35 tahun mengandung dua kali lipat jumlah cadangan karbon total dan tingkat penyerapan tanah dari tegakan berumur 13 tahun. Meskipun stok karbon tanah meningkat seiring dengan umur mangrove, stok tanaman di atas permukaan tanah paling tinggi pada tegakan berumur 17 tahun. Umur mangrove juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap fluks karbon tanah, dengan mangrove yang lebih tua (≥ 17 tahun) melepaskan seperempat dari emisi metana (CH₄), tetapi menggandakan fluks CO₂ dibandingkan dengan tegakan muda. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kapasitas penyerapan karbon dari mangrove rehabilitasi meningkat seiring bertambahnya usia, tetapi menjadi stabil setelah dewasa yaitu sekitar >17 tahun.

Tabel 2. Data stok karbon sekuestrasi tegakan (*aboveground*), karbon bawah permukaan (*belowground*), dan karbon tanah pada mangrove rehabilitasi di Pulau Harapan dan Kelapa.

Stasiun	Umur (tahun)	<i>Aboveground</i> (tonCO ₂ /ha)	<i>Belowground</i> (tonCO ₂ /ha)	<i>Soil</i> (tonCO ₂ /ha)	Total (tonCO ₂ /ha)
Kelapa Selatan	13	101,25	63,18	184,33	348,75
Kelapa Barat	14	129,45	79,70	133,43	342,58
Harapan Barat	13	111,59	69,76	175,85	357,20
Harapan Selatan	13	284,82	162,76	188,40	635,98
Harapan Timur	13	108,05	170,63	219,26	497,94
Harapan Utara	13	79,71	51,81	127,37	258,89

Tabel 2 menunjukkan bahwa potensi penyerapan karbon pada mangrove rehabilitasi di Pulau Harapan dan Kelapa sebesar 2328,75 tCO₂/ha. Sekuestrasi karbon merupakan proses pemindahan karbon dari atmosfer ke dalam wadah penampung, seperti ekosistem laut atau darat, melalui proses-proses fisika maupun biologi, seperti fotosintesis (Angelsen & Atmadja, 2008). Kemampuan pohon mangrove dalam menyerap karbon dioksida dari atmosfer bergantung pada spesies, fase perkembangan pohon, jenis tanah, dan faktor iklim, sedangkan intensitas pengambilan CO₂ dari ekosistem pohon mangrove sangat bergantung pada faktor iklim, temperatur, kelembapan, dan kesuburan tanah (Kowalsaka, *et al.* 2020). Diperlukan adanya penelitian lebih lanjut untuk melihat keterkaitan antara faktor-faktor tersebut dengan nilai sekuestrasi karbon pada mangrove rehabilitasi.

3.3. Valuasi Ekonomi Karbon

Valuasi ekonomi adalah sebuah upaya untuk memberikan penilaian kuantitatif terhadap barang dan jasa yang disediakan oleh ekosistem dan kontribusinya terhadap kesejahteraan manusia (Lahjie *et al.*, 2019). Valuasi ekonomi sumber daya alam berperan penting untuk membantu proses pengambilan keputusan terkait dengan kebijakan publik dengan harapan mengurangi dampak dari degradasi lingkungan yang disebabkan adanya *undervalue* terhadap nilai yang sebenarnya (Fauzi, 2014). Salah satu jasa lingkungan ekosistem mangrove sebagai pengatur atau *provisioning* adalah penyimpanan karbon. Mangrove memiliki kemampuannya yang sangat efektif dalam menyimpan karbon dibandingkan tipe hutan tropis lainnya di Indonesia yang mencapai 891,70 tonC/ha dengan total cadangan karbon mangrove nasional sebesar 2,89 Tt C (Wahyudi *et al.*, 2018).

Salah satu jasa lingkungan mangrove *regulating* adalah penyerapan karbon yang pada penelitian ini mencapai rata-rata 489,9

tCO₂/ha. Jika dikonversi dengan luasan mangrove sebesar ± 7,3 ha, serapan CO₂ mangrove rehabilitasi di Pulau Harapan dan Kelapa mencapai 3576,27 tCO₂/ha. Nilai serapan CO₂ yang diperoleh dapat juga diestimasi secara ekonomi berdasarkan nilai ekonomi karbon (NEK) pada pasar bebas dan *clean development mechanism* (CDM). Nilai ekonomi karbon mangrove rehabilitasi di Pulau Harapan dan Kelapa adalah Rp375.202.308 (pasar bebas) dan Rp980.528.697 (CDM).

IV. KESIMPULAN

Kawasan mangrove rehabilitasi di Pulau Harapan dan Kelapa menunjukkan kondisi kerapatan pohon yang baik dengan kategori sangat padat dan didominasi oleh jenis mangrove *Rhizophora stylosa*. Rehabilitasi ekosistem mangrove menggunakan metode rumpun berjarak menyebabkan kerapatan mangrove tinggi. Ekosistem mangrove yang padat berpengaruh terhadap kandungan stok karbon yaitu berkorelasi negatif pada karbon tegakan (*aboveground*) dan berkorelasi positif pada karbon bawah permukaan (*belowground*). Hal ini disebabkan oleh rendahnya kandungan biomassa akibat ukuran diameter yang kecil dan banyaknya jumlah tegakan dalam rumpun. Estimasi potensi stok karbon pada ekosistem mangrove rehabilitasi di Pulau Harapan dan Kelapa sebesar 634,54 tonC/ha dengan kemampuan daya serap karbon CO₂ sebesar 2328,75 tCO₂/ha pada tipe sedimen pasir berlumpur. Potensi stok karbon mangrove rehabilitasi di kawasan pulau kecil menyerap lebih rendah dibandingkan ekosistem mangrove alami. Disamping itu, potensi jasa lingkungan dari ekosistem mangrove sebagai penyimpan karbon juga berdampak pada aspek ekonomi. Valuasi ekonomi mangrove sebagai penyimpan karbon di Pulau Harapan dan Kelapa mencapai Rp375.202.308 untuk pasar bebas dan Rp980.528.697 untuk pasar wajib CDM. Nilai ekonomi karbon bermanfaat

secara ekonomi dalam rangka mengurangi emisi gas rumah kaca, mendorong investasi hijau, dan mendorong pertumbuhan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur saya panjatkan kepada para dosen pembimbing yang telah membimbing dan banyak memberi saran dalam penyusunan artikel ilmiah ini, serta rekan Yayasan Carbon Ethics Indonesia yang telah membantu dalam pengambilan data lapangan. Terimakasih juga saya panjatkan kepada SEAMEO Biotrop dan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University atas fasilitas yang telah diberikan termasuk analisis laboratorium selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, M. 2016. Analisis kerentanan pulau-pulau kecil di Kecamatan Togeana Kabupaten Tojo Una Una Provinsi Sulawesi Tengah. *Omni-Akuatika*, 12(3): 59-70. <https://doi.org/10.20884/1.oa.2016.12.3.126>
- Alongi, D.M. 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forest. *Annual Review of Marine Science*, 5: 195-210. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Alongi, D.M. 2018. Impact of global change on nutrient dynamics in mangrove forests. *Forest*, 9(10): 596-608. <https://doi.org/10.3390/f9100596>
- Andiani, A.A.E., I.W.G.A. Karang, I.N.G. Putra, & I. W. E. Dharmawan. 2021. Hubungan antar parameter struktur tegakan mangrove dalam estimasi simpanan karbon *aboveground* pada skala komunitas. *Jurnal Ilmu Kelautan Tropis*, 13(3): 485-498. <https://doi.org/10.29244/jitkl.v13i3.36363>
- Angelsen, A. & S. Atmadja. 2008. Melangkah maju dengan REDD: isu, pilihan, dan implikasi. Bogor: CIFOR. 158 p.
- Asaeda, T., A. Barnuevo, K. Sanjaya, M.D. Fortes, & Y. Kanesaka. 2016. Mangrove plantation over a limestone reef – Good for the ecology?. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 173: 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.02.017>
- Asia Pacific Network (APN). 2019. Final technical report: sustainable mangrove rehabilitation for global and local benefits. Asian-pacific network for global research. Philippines. 9-10 p.
- Cameron, C., L.B. Hutley, D.A. Friess, & B. Brown. 2018. Community structure dynamics and carbon stock change of rehabilitated mangrove forests in Sulawesi, Indonesia. *Ecological Applications*, 0(0): 1-18. <https://doi.org/10.1002/eap.1810>
- Carnel, P.E., M.M. Palacios, P. Waryszak, S.M. Trevathan-Tackett, P. Masque, & P.I. Macreadie. 2022. Blue carbon drawdown by restored mangrove forests improves with age. *Journal of Environment Management*, 306: 14301. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114301>
- Dicky, E.H., A. Samyanugraha, & D. Nathalia. 2018. Pengantar pasar karbon untuk pengendalian perubahan iklim. PMR Indonesia. Jakarta. 26 p.
- Dharmawan, I.W.E. 2014. *Panduan Monitoring Status Ekosistem Mangrove*. CRITC COREMAP II LIPI. Jakarta. 13-21 p.
- Eddy, S., A. Dharmawan, M.R. Ridho, & I. Iskandar. 2016. Dampak aktivitas antropogenik terhadap degradasi hutan mangrove di Indonesia. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*, 2(2):

- 292-306.
<https://doi.org/10.31219/osf.io/xd9cb>
- Fauzi, A. 2014. *Valuasi ekonomi dan penilaian kerusakan sumber daya alam dan lingkungan*. PT Penerbit IPB Press. Bogor. 11 p.
- Hamilton, S.E. & D. Casey. 2016. Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 25(6): 729-738.
<https://doi.org/10.1111/geb.12449>
- Haryanto, A. 2013. Efektivitas rehabilitasi mangrove di Pulau Pramuka, Kepulauan Seribu. Bogor: Institut Pertanian Bogor (Unpublished).
- Ilman, M., D. Paul, D. Peter, & Onrizal. 2016. A historical analysis of the drivers of loss and degradation of Indonesia's mangroves. *Land Use Policy*, 54: 448-459.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.03.010>
- Khoir, A.F. & I.W.E. Dhamarawan. 2021. MonMang, Vers 2.0. Android Play Store,
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.amsi.monmang2&hl=en&gl=US>.
- Komiyama, A., S. Pongparn, & S. Kato. 2005. Common allometric equation for estimating the tree weight of mangroves. *J. of Tropical Ecology*, 21: 471-477.
<https://doi.org/10.1017/S0266467405002476>
- Kowalsaka, A., A. Pawlewicz, M. Dusza, M. Jaskulak, & A. Grobelak. 2020. Climate change and soil interactions. *Elsevier*, 663-688.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00023-0>
- Jakovac, C.C., A.E Latawiec, E. Lacerda, I.L. Lucas, K.A. Korys, & B.B.N. Strassburg. 2020. Costs and carbon benefits of mangrove conservation and restoration: a global analysis. *Ecological Economics*, 176: 106758.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106758>
- Kauffman, J.B. & D.C. Donato. 2012. Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. CIFOR Working Paper 86. Bogor. 2 p.
- Kepel, T.L., D.D. Suryono, & R.N. Ati. 2017. Nilai penting dan estimasi nilai ekonomi simpanan karbon vegetasi mangrove di Kema, Sulawesi Utara. *Jurnal Kelautan Nasional*, 12(1): 19-26.
<http://dx.doi.org/10.15578/jkn.v12i1.6170>
- Kohl, M., P.R. Neupane, & N. Lotfiomran. 2017. The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity: A retrospective analysis using tree ring data of three tropical tree species grown in natural forests of Suriname. *Plos One*, 1-17.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181187>
- Lahjie, A.M., B. Nouval, Y. Ruslim, & R. Kristiningrum. 2019. Economic valuation from direct use of mangrove forest restoration in Balikpapan Bay, East Kalimantan, Indonesia. *F1000Research*, 8(9): 1-13.
<https://doi.org/10.12688/f1000research.17012.1>
- Manafe, G., M.R. Kaho, & F. Risamasu. 2016. Estimasi biomassa permukaan dan stok karbon pada tegakan pohon *Avicennia marina* dan *Rhizophora mucronata* di perairan pesisir oebelo Kabupaten Kupang. *Jurnal Bumi Lestari*, 16(2): 163-173.
<https://doi.org/10.24843/blje.2016.v16.i02.p09>
- McHarg, E., E. Mengo, L. Benson, J. Daniel, & A. J. Witzig. 2022. Valuing the contribution of blue carbon to small

- island developing states' climate change commitments and Covid-19 recovery. *Environmental Science & Policy*, 132: 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.02.009>
- McLeod, E., G.L. Chmura, S. Bouillon, R. Salm, & M. Bjork. 2011. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Front Ecol Environ*, 9(10): 552-560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Murdiyarmo, D., J. Purbopuspito, J.B. Kauffman, M.W. Warren, S.D. Sasmito, & S. Kurnianto. 2015. The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature*, 5: 1089-1092. <https://doi.org/10.1038/nclimate2734>
- Nedhisa, P.I. & T. Tjahjaningrum. 2019. Estimasi biomassa, stok karbon dan sekuestrasi karbon mangrove pada *Rhizophora mucronata* di Wonorejo Surabaya dengan persamaan allometrik. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 8(2): 2337-3520. <https://doi.org/10.12962/j23373520.v8i2.45838>
- Permatasari, I.R., B.S. Barus, & G. Diansyah. 2019. Analisis nitrat dan fosfat pada sedimen di Muara Sungai Banyuasin, Kabupaten Banyuasin, Provinsi Sumatera Selatan. *Jurnal Penelitian Sains*, 21(3): 140-150. <https://doi.org/10.26554/jps.v21i3.545>
- Priscillia, C.C., M.P. Patria, & H. Herdiansyah. 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): 3304-3314. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220636>
- Rifai, H., S. Rahmawati, D. Nurdiansah, & Afdal. 2021. Estimation of soil carbon storage under mono-specific *Enhalus acoroides* meadows in Pari Island, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 944 012065. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/944/1/012065>
- Sachoemar, S.I. 2008. Karakteristik lingkungan perairan Kepulauan Seribu. *JAI*, 4(2): 109-114. <https://doi.org/10.29122/jai.v4i2.2408>
- Supriyantini, E., A. Santoso, & N. Soenardjo. 2018. Nitrate and phosphate contents on sediments related to the density levels of mangrove *Rhizophora* sp. in mangrove park waters of Pekalongan, Central Java. *Earth and Environmental Science*, 116: 1-13. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/116/1/012013>
- Suyadi, I. Naroли, & A. Betmanto Sitepu. 2021. Karakteristik vegetasi mangrove dan pemanfaatannya: studi kasus di Seram Timur, Maluku. *Jurnal Kelautan dan Perikanan Terapan*, 4(1): 37-45. <https://doi.org/10.15578/jkpt.v4i1.9502>
- Uthbah, Z., S. Eming, & Y. Edy. 2017. Analisis biomasa dan cadangan karbon pada berbagai umur tegakan damar (*Agathis dammara* (Lamb.) Rich.) di KPH Banyumas Timur. *Scripta Biologica*, 4(2): 119-124. <https://doi.org/10.20884/1.sb.2017.4.2.404>
- Wahyudi, A.J., Afdal, N.S. Adi, A. Rustam, Hadiyanto, & I.H. Supriyadi. 2018. *Potensi Cadangan dan Serapan Karbon Ekosistem Mangrove dan Padang Lamun Indonesia*. Jakarta: Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2O-LIPI), Pusat Riset Kelautan, Badan Riset dan Sumber Daya Manusia, Kementerian Kelautan dan Perikanan (PUSRIKEL-BRSDM-KKP), Pusat Penelitian Laut Dalam,

Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (P2LD-LIPI). 7 p. Submitted : 07 February 2022
Reviewed : 22 April 2022
Wolanski, E. & M. Elliott. 2015. *Estuarine Ecohydrology: an introduction* (2nd Ed). Elsevier, Amsterdam. 315 p. Accepted : 26 August 2022

FIGURE AND TABLE TITLES

Figure 1. Location of data collection in Kelapa and Harapan Islands.

Figure 2. Mangrove height and canopy cover on Harapan and Kelapa Islands.

Figure 3. Data on aboveground, belowground, and soil carbon stocks in restored mangrove on Harapan and Kelapa Islands.

Table 1. Mangrove vegetation analysis on Harapan and Kelapa Islands.

Table 2. Carbon stock sequestration on aboveground, belowground, and soil carbon in the restored mangrove in Harapan and Kelapa Islands.