

Profil Stok Karbon dan Valuasi Ekonomi Ekosistem Mangrove di Kabupaten Tapanuli Tengah, Provinsi Sumatera Utara

Raja Diddin Mifdhol Hafli^{1*)}, Joko Samiaji dan Windarti²⁾

Master Program of Marine Science, Faculty of Fisheries and Marine, University of Riau, Pekanbaru.

*) Corresponding author: r.diddin7055@grad.unri.ac.id

Abstract

Mangrove forests play an important role in coastal ecosystem dynamics with their ability to absorb carbon. Environmental degradation and uncontrolled land use change in Indonesia threaten the existence of the mangrove ecosystem. Carbon sequestration and storage in mangroves is an essential coastal 'blue carbon' ecosystem service for climate change mitigation. This research aims to assess the condition of the mangrove ecosystem and the potential of carbon storage in order to determine its economic valuation on the coast of Central Tapanuli Regency, North Sumatera Province. Data were collected from three different sites of mangrove areas from January to April 2024. A non-destructive method using allometric equations for biomass estimation was used in this research. The results showed that the average of biomass and stored carbon were 264,49 ton/ha and 124,31 ton C/ha, respectively. Meanwhile, the average potential of carbon sequestered was 7.95 ton CO₂/ha. With a total mangrove ecosystem area of ± 6,931 ha, the economic value of carbon generated from mangrove in Central Tapanuli Regency is estimated at the value of Rp. 3,804,131,272 (Indonesia Economic Value of Carbon in Emissions Trading Scheme) and Rp. 42,743,048,000 (Global Social Cost of Carbon).

Abstrak

Hutan mangrove memegang peranan penting pada ekosistem pesisir dengan fungsinya sebagai penyerap karbon. Degradasi lingkungan dan alih guna lahan di Indonesia yang tidak terkendali mengancam eksistensi ekosistem mangrove. Penyerapan dan penyimpanan karbon di ekosistem mangrove merupakan jasa ekosistem 'karbon biru' pesisir yang penting bagi mitigasi perubahan iklim. Riset ini bertujuan untuk menilai kondisi ekosistem mangrove dan potensi cadangan karbon yang tersimpan guna menentukan valuasi ekonominya di Pesisir Kabupaten Tapanuli Tengah, Provinsi Sumatera Utara. Pengambilan data mangrove dilakukan pada 3 stasiun. Metode non-destruktif dengan menggunakan persamaan alometrik untuk pendugaan biomassa digunakan pada riset ini. Hasil riset menunjukkan bahwa rata-rata biomassa dan karbon yang tersimpan pada ekosistem mangrove adalah sebesar 264,49 ton/ha dan 124,31 ton C/ha. Sedangkan rata-rata potensi serapan karbon adalah sebesar 7,95 ton CO₂/ha. Dengan total luas ekosistem mangrove sebesar ± 6.931 ha, maka estimasi nilai ekonomi karbon mangrove di Kabupaten Tapanuli Tengah adalah sebesar Rp. 3.804.131.272 (Nilai Ekonomi Karbon Indonesia pada *Emissions Trading Scheme*) dan Rp. 42.743.048.000 (*Global Social Cost of Carbon*).

Kata kunci: *Blue carbon, carbon stock, Central Tapanuli Regency, economic valuation, mangrov*

PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove merupakan elemen utama yang berada di antara ekosistem lautan dan daratan yang berperan penting untuk mendukung kesehatan lingkungan, sumber makanan dan keanekaragaman hayati [1]. Saat ini, salah satu potensi menjadi perhatian dunia adalah kemampuan ekosistem mangrove dalam menyerap dan menyimpan karbon dalam jumlah yang besar. Emisi karbon telah menjadi perhatian utama di seluruh dunia karena peningkatannya yang cepat di atmosfer yang memicu pemanasan global.

Ekosistem mangrove merupakan kawasan hutan dengan potensi simpanan karbon yang paling tinggi di kawasan tropis. 25 lokasi hutan mangrove di kawasan Indo-Pasifik diketahui menyimpan hingga empat kali lebih banyak karbon per hektar dari pada kebanyakan hutan tropis lainnya di seluruh dunia. Mangrove melakukan penyerapan karbon (*carbon sequestration*) di atmosfer yang kemudian disimpan dalam bentuk biomassa dan sedimen melalui proses fotosintesis [2]. Kemampuan hutan mangrove di Indonesia rata-rata menyerap karbon sebesar 52,85 ton CO₂/ha [3]. Fungsi ekologis ekosistem mangrove sebagai penyerap dan penyimpan karbon yang sangat baik tersebut menjadi aspek penting dalam upaya mitigasi perubahan iklim dunia.

Di Indonesia, tingkat degradasi dan hilangnya hutan mangrove cukup tinggi yaitu hampir 50-60% yang disebabkan oleh aktivitas antropogenik, seperti penebangan, pemukiman, pertambangan, budidaya perikanan, dan proyek industri lainnya [4]. Permasalahan tersebut menyebabkan pengelolaan mangrove untuk konservasi wilayah pesisir menjadi sangat rumit.

Mengetahui stok karbon mangrove merupakan hal penting dalam menyelamatkan dan melestarikan ekosistem mangrove secara berkelanjutan dan melindungi area ini dari berbagai aktivitas antropogenik berupa deforestasi dan degradasi dalam beberapa dekade terakhir. Selain itu urbanisasi yang cepat, tata kelola yang lemah, dan ekspansi kegiatan marikultur yang berlebihan juga mengancam eksistensi hutan mangrove [5]. Potensi hutan mangrove dalam menyerap karbon merupakan layanan ekosistem yang esensial di tengah-tengah era perubahan iklim global. Data dan informasi mengenai cadangan dan serapan karbon ekosistem mangrove dapat digunakan untuk penghitungan target penurunan emisi gas rumah kaca (GRK). Hingga saat ini target penurunan emisi nasional masih dititikberatkan pada sektor daratan (*land base sector*), sedangkan sektor pesisir dan laut belum mendapat perhatian yang serius.

Penentuan nilai penting terhadap ekosistem tidak hanya dilakukan melalui pendekatan ekologi saja tetapi juga melalui valuasi ekonomi. Nilai simpanan karbon sebagai salah satu jasa ekosistem dari mangrove, diperhitungkan dengan skema pembayaran jasa ekosistem (*Payment for Ecosystem Services*) sebagai karbon kredit [6]. Di Indonesia sendiri belum banyak dilakukan penilaian estimasi nilai ekonomi terhadap ekosistem mangrove

Salah satu kawasan yang telah melakukan pengelolaan terhadap ekosistem mangrove adalah Kabupaten Tapanuli Tengah, Provinsi Sumatera Utara. Melalui Surat Keputusan Bupati Tapanuli Tengah Nomor 1421/DKP/Th 2007, Keputusan Gubernur Sumatera Utara No. 188.44/629/KPTS/2017 serta dalam Peraturan Daerah Provinsi Sumatera Utara No. 4 Tahun 2019 Kawasan Konservasi Perairan Daerah Kabupaten Tapanuli Tengah (KKPD Kabupaten Tapanuli Tengah) menjadi salah satu kawasan konservasi perairan daerah yang ada di Provinsi Sumatera Utara. Sebagian besar wilayah kecamatan di Kabupaten Tapanuli Tengah berbatasan dengan lautan. Luas keseluruhan hutan mangrove Kabupaten Tapanuli Tengah mencapai 6.931 Ha, namun luasannya di kawasan konservasi perairan daerah di Kabupaten Tapanuli Tengah sebesar ± 1.011 ha dengan kondisi tutupan kanopi berkisar 75%, dikategorikan dalam kondisi baik [7].

Kabupaten Tapanuli Tengah yang berada di pesisir barat Pulau Sumatera merupakan daerah yang mengalami tekanan antropogenik yang secara signifikan memberi dampak terhadap ekosistem pesisir, salah satunya ialah ekosistem mangrove. Industri perikanan skala kecil dan menengah, ekspansi usaha marikultur, limbah domestik dan alih guna lahan mangrove merupakan berbagai tekanan yang teridentifikasi di sana. Oleh karena itu, riset ini bertujuan untuk mengevaluasi stok karbon dan menghitung valuasi ekonomi ekosistem mangrove di Kabupaten Tapanuli Tengah Provinsi Sumatera Utara.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode survei dengan menggunakan teknik *purposive sampling*. Penelitian dilakukan pada bulan Januari hingga Mei Tahun 2024. Lokasi penelitian ditetapkan pada 3 stasiun dimana setiap stasiun terdiri atas 3 karakteristik hutan mangrove yang berbeda. Masing-masing stasiun terdiri dari 3 plot atau petakan kuadran berukuran 10 x 10 m². Parameter yang diukur adalah data ekosistem mangrove meliputi data kerapatan dan biomassa mangrove. Metode pengambilan data tegakan mangrove yang digunakan adalah metode *non-destructive*, kemudian perhitungan biomassa untuk analisis stok dan serapan karbon mangrove dilakukan menggunakan persamaan alometrik (Tabel 1).

Kerapatan (*density*) memberikan gambaran jumlah individu per meter persegi dihitung menggunakan rumus yang mengacu pada Badan Standarisasi Nasional No. 7724 sebagai berikut:

$$K = \frac{ni}{A} \quad (1)$$

Keterangan:

- K : Kerapatan suatu jenis (individu/m²)
 ni : Jumlah individu
 A : Luas seluruh plot (m²)

Kriteria baku kerusakan mangrove yaitu: 1) Mangrove dengan kerapatan < 1000 dikategorikan pada kondisi rusak dengan kerapatan jarang; 2) Mangrove dengan kerapatan ≥ 1000 - < 1500 dikategorikan pada kondisi baik dengan kerapatan sedang; dan 3) Mangrove dengan kerapatan ≥ 1500 dikategorikan pada kondisi baik dengan kerapatan sangat padat [8].

Pengambilan data biomassa tegakan mangrove dilakukan dengan mengukur diameter setinggi dada (*diameter at breast height, DBH*), dimana data tersebut digunakan pada perhitungan biomassa tegakan mangrove. Berikut ini merupakan tahapan pengukuran biomassa tegakan mangrove, yaitu:

- (a) Jenis mangrove yang berada dalam sampling plot diidentifikasi, karena setiap jenis pohon memiliki kemampuan berbeda dalam menyerap karbon;
- (b) Posisi tegakan pohon diestimasi yang dianggap masuk ke dalam batas plot ataupun di luar plot;
- (c) Pohon yang berdiameter ≥ 5 cm diukur dengan menggunakan pita meter pada bagian setinggi dada;
- (d) Data yang telah didapat lalu dicatat berdasarkan jenis pohon ke dalam *tally sheet*.

Tabel 1. Persamaan Alometrik yang Digunakan untuk Perhitungan Biomassa Mangrove

No	Jenis	Model Alometrik		Sumber
		<i>Aboveground</i>	<i>Belowground</i>	
1	<i>Rhizophora apiculata</i>	$B = 0,043 * D^{2,63}$	$B = 0,0698 * D^{2,61}$	[9]
2	<i>Rhizophora mucronata</i>	$B = 0,1466 * D^{2,3136}$	$B = 0,00974 * D^2 * H^{1,05}$	[10]
3	<i>Xylocarpus granatum</i>	$B = 0,1832 * D^{2,21}$	$B = 0,145 * D^{2,55}$	[11]
4	<i>Sonneratia alba</i>	$B = 0,3841 * D^{2,10} * \rho$	$B = 0,199 * \rho^{0,899} * D^{2,22}$	[12]
5	<i>Thespesia populnea</i>	$B = 0,251 * \rho * D^{2,46}$	$B = 0,199 * \rho^{0,899} * D^{2,22}$	[13]

Keterangan:

B : Biomassa pohon (kg)

D : Diameter setinggi dada (cm)

H : Tinggi pohon (cm)

ρ : Densitas batang (g/cm²)

Perhitungan karbon pada tegakan menggunakan persamaan sebagai berikut (SNI 7724:2011):

$$C_b = B \times \% C_{organik} \quad (2)$$

Keterangan:

C_b : Kandungan karbon dari biomassa tegakan mangrove (kg)

B : Total biomassa (kg)

$\% C_{organik}$: Nilai persentase kandungan karbon, sebesar 0,47 atau menggunakan nilai $\% C$ yang diperoleh dari hasil pengukuran di laboratorium.

Perhitungan cadangan karbon per hektare untuk tegakan mangrove dapat menggunakan persamaan sebagai berikut (SNI 7724:2011):

$$C_{tegakan} = \frac{C_{btotall}}{1.000} \times \frac{10.000}{I_{plot}} \quad (3)$$

Keterangan:

$C_{tegakan}$: Kandungan karbon per hektare pada masing-masing carbon pool pada tiap plot (ton/ha)

$C_{btotall}$: Kandungan karbon pada masing-masing carbon pool pada tiap plot (kg)

I_{plot} : Luas plot pada masing-masing carbon pool (m²).

Perhitungan serapan gas karbondioksida (CO₂) dapat mengacu pada rumus [14] dan konversi serapan CO₂ dilakukan mengacu pada persamaan 3.

$$S_{CO_2} = \frac{Mr_{CO_2}}{Ar_C} \times Kc$$

Keterangan :

S_{CO_2} : Serapan gas karbondioksida (kg)

Mr_{CO_2} : Massa molekul relatif atom C sebesar 44.

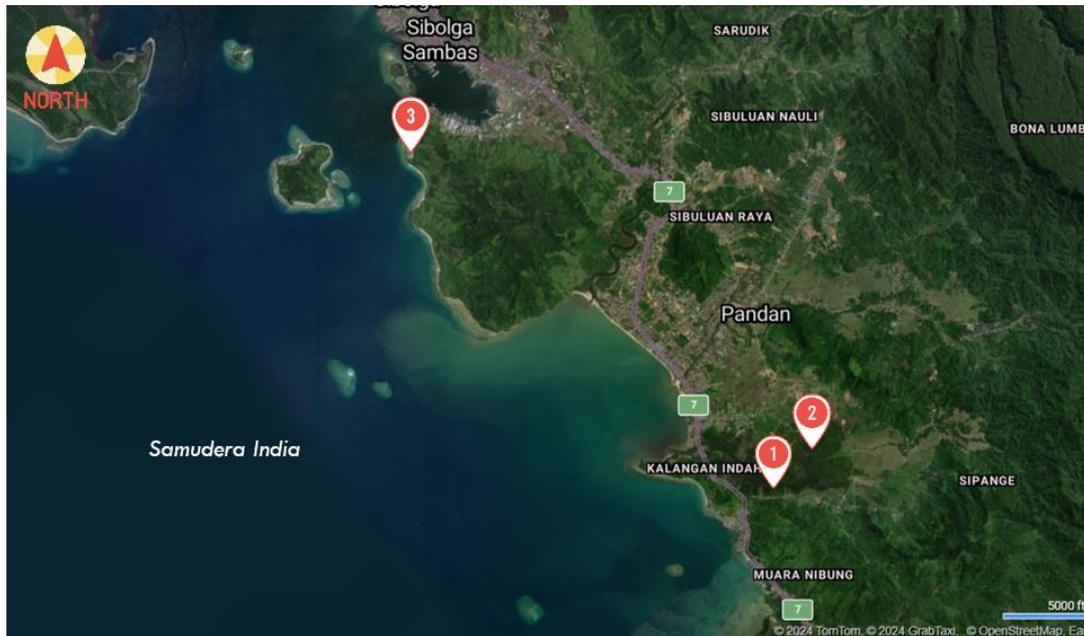
Ar_C : Atom relatif atom C sebesar 12.

Kc : Kandungan karbon(kg)

Estimasi harga karbon yang digunakan dalam menentukan valuasi ekonomi mangrove mengacu pada *Global Social Cost of Carbon*. Harga yang ditetapkan yaitu sebesar 50 USD per ton karbon. Jika dikonversikan 1 USD saat ini adalah sebesar Rp.15.500. Selain itu estimasi harga karbon juga mengacu pada Nilai Ekonomi Karbon Indonesia pada *Emissions Trading Scheme* sebesar 4,45 USD per ton karbon.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan di ekosistem mangrove Kabupaten Tapanuli Tengah menggunakan 3 stasiun pengamatan dengan masing-masing stasiun memiliki karakteristik lokasi yang berbeda (Gambar 1).



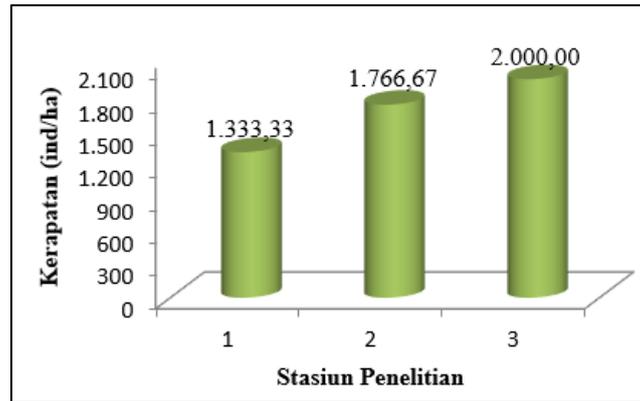
Gambar 1. Lokasi Stasiun Penelitian

Perbedaan karakteristik masing-masing lokasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Masing-masing Stasiun Penelitian

Stasiun	Karakteristik Lokasi
1 Kelurahan Hajoran	Kawasan pemukiman dan ekspansi usaha marikultur
2 Kelurahan Kalangan	Jauh dari pemukiman dan aktivitas antropogenik
3 Pantai Pandaratan Kelurahan Pondok Batu	Kawasan wisata dan industri perikanan dan kelautan

Berdasarkan hasil penelitian ditemukan 5 spesies mangrove dari seluruh stasiun yaitu *Rhizophora mucronata*, *Rhizophora apiculata*, *Xylocarpus granatum*, *Sonneratia alba* dan *Thespesia populnea*. Adapun hasil dari perhitungan data tingkat kerapatan masing-masing stasiun penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

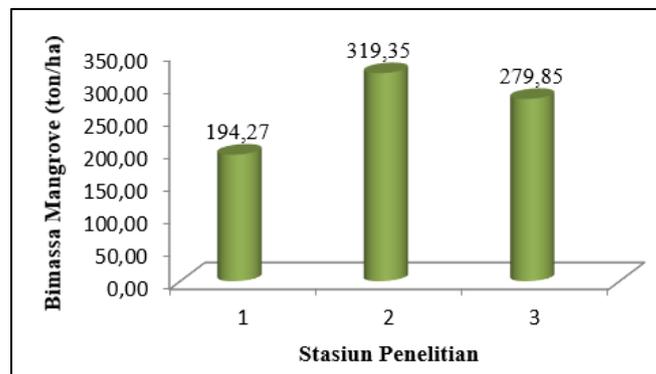


Gambar 2. Tingkat Kerapatan Mangrove (ind/ha) pada Setiap Stasiun

Berdasarkan perhitungan kerapatan yang telah dilakukan pada ketiga stasiun di lokasi penelitian diketahui bahwa rata-rata kerapatan mangrove adalah sebesar $1.700,00 \pm 338,29$ ind/ha. Kerapatan mangrove pada stasiun 3 lebih tinggi dibandingkan dengan stasiun 1 dan stasiun 2 dikarenakan karakteristik yang berbeda pada ketiga wilayah tersebut. Stasiun 3 merupakan mangrove yang berada di kawasan ekowisata bahari Pantai Pandaratan namun berada dekat dengan kawasan industri Kota Sibolga. Pemanfaatan hutan mangrove tergolong minim serta habitatnya tertutup dari pengaruh langsung gelombang menyebabkan semai dapat tumbuh dengan dengan baik, sedangkan stasiun 1 yang berada sangat dekat dengan pemukiman penduduk dan mengalami tekanan yang tinggi dari ekspansi tambak udang di area tersebut. Habitatnya yang berada di dekat muara sungai juga mempengaruhi kondisi arus pada kawasan tersebut, kondisi arus yang lebih kuat menyebabkan keberhasilan semai tumbuh menjadi rendah dan tidak optimal.

Rendahnya kerapatan mangrove pada suatu kawasan disebabkan besarnya pengaruh antropogenik yang mengubah habitat mangrove untuk kepentingan lain seperti pembukaan lahan untuk pemukiman dan pertambakan sehingga ekosistem mangrove mengalami tekanan dan kondisinya mengalami penurunan. Selain itu jenis mangrove yang lebih bervariasi juga menentukan tinggi atau rendahnya nilai kerapatan suatu ekosistem mangrove [15].

Selanjutnya hasil perhitungan biomassa mangrove pada masing-masing stasiun penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.

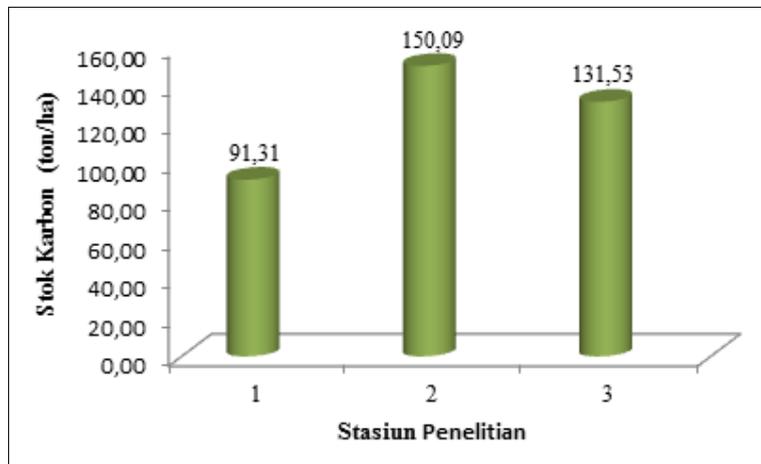


Gambar 3. Biomassa mangrove (ton/ha) pada Setiap Stasiun

Berdasarkan hasil perhitungan biomassa pada ketiga stasiun penelitian, diketahui bahwa rata-rata biomassa mangrove pada semua stasiun adalah sebesar 264,49 ton/ha. Perbedaan jumlah biomassa tersebut dikarenakan tingkat kerapatan mangrove di stasiun 3 lebih tinggi dari pada stasiun 1 dan stasiun 2, serta berdasarkan ukuran diameter pohon di

stasiun 3 secara umum memiliki ukuran diameter lebih besar dibandingkan dengan ukuran diameter pohon di stasiun 1. Nilai biomassa selain dipengaruhi oleh kerapatan pohon juga dipengaruhi oleh besarnya diameter pohon itu sendiri, hal ini dikarenakan semakin besar diameter suatu pohon maka nilai biomasanya juga akan semakin besar [16].

Selanjutnya, hasil perhitungan total stok karbon pada tegakan mangrove (*aboveground* dan *belowground biomass*) dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Total Stok Karbon (ton/ha) pada Setiap Stasiun

Berdasarkan hasil perhitungan stok karbon pada tegakan mangrove menggunakan persamaan alomterik *aboveground* dan *belowground biomass* pada setiap bagiannya, pada ketiga stasiun penelitian diketahui bahwa stok karbon tegakan mangrove di pesisir Kabupaten Tapanuli Tengah rata-rata sebesar 124,31 ton/ha. Hasil ini membuktikan bahwa kerapatan mangrove dan jumlah biomassa menentukan tinggi atau rendahnya kandungan stok karbon ekosistem mangrove.

Penambahan kandungan biomassa akan diikuti oleh penambahan kandungan stok karbon. Hal ini menjelaskan bahwa karbon dan biomassa memiliki hubungan yang positif sehingga apapun yang menyebabkan peningkatan ataupun penurunan biomassa maka akan menyebabkan peningkatan atau penurunan kandungan stok karbon. Potensi stok karbon dapat dilihat dari biomassa tegakan yang ada. Besarnya stok karbon tiap bagian pohon dipengaruhi oleh biomassa [17].

Berdasarkan temuan hasil penelitian tersebut, stok karbon mangrove di pesisir Kabupaten Tapanuli Tengah tersebut lebih rendah dibandingkan dengan stok karbon hutan mangrove Dukuh Tapak Kelurahan Tugurejo Kota Semarang dengan rata-rata stok karbon yaitu sebesar 141,64 ton/ha dan hutan mangrove di Muara Sungai Batang Apar Kota Pariaman Provinsi Sumatera Barat dengan rata-rata sebesar 313,51 ton/ha [18] [19]. Rendahnya potensi karbon tersimpan pada tegakan mangrove di lokasi penelitian bukan menunjukkan kemampuan mangrove menyerap dan menyimpan karbon rendah, ini tentu saja dipengaruhi oleh kandungan biomassa mangrovenya. Salah satu faktor penentunya adalah umur mangrove dan ukuran diameter batang atau DBH, dimana masing-masing ekosistem mangrove tentunya memiliki karakteristik mangrove yang berbeda. Total stok karbon ekosistem mangrove juga ditentukan oleh potensi simpanan karbon pada sedimen mangrove tersebut.

Selanjutnya, penyerapan gas CO₂ dapat diestimasi berdasarkan hasil stok karbon pada masing-masing stasiun. Penyerapan CO₂ terjadi secara alami pada ekosistem mangrove dan biasanya mengacu pada penyimpanan karbon yang berpotensi menjadi gas karbondioksida.

Nilai rata-rata potensi serapan CO₂ hutan mangrove di lokasi penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Potensi Rata-rata Serapan CO₂ Hutan Mangrove pada Setiap Stasiun

Stasiun	Rata-rata Serapan CO ₂ (ton CO ₂ /ha)
1	8,38 ± 9,96
2	10,39 ± 19,13
3	6,11 ± 5,73

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa rata-rata potensi serapan CO₂ mangrove di lokasi penelitian yaitu 7,95 ton/ha. Ini sesuai dengan hasil penelitian stok karbon pada hutan mangrove di pesisir India, bahwa kemampuan rata-rata ekosistem mangrove menyerap CO₂ adalah berkisar antara 6-8 ton CO₂/ha [20]. Perbedaan potensi serapan CO₂ pada masing-masing stasiun tersebut salah satunya disebabkan oleh nilai biomassa mangrove pada stasiun 2 lebih tinggi dibandingkan dengan stasiun 1 dan stasiun 3. Stasiun 2 juga memiliki kerapatan yang lebih tinggi sehingga nilai biomassa dan stok karbon yang tersimpan lebih banyak dibandingkan dengan stasiun lainnya. Faktor lain yang juga menentukan adalah jenis mangrove, dimana masing-masing jenis memiliki kemampuan menyerap CO₂ yang berbeda-beda.

Ekosistem mangrove di Kabupaten Tapanuli Tengah Provinsi Sumatera Utara memiliki luasan sebesar ± 6.931 ha. Estimasi valuasi ekonomi ekosistem mangrove dilakukan berdasarkan luasan tersebut. Maka estimasi nilai ekonomi karbon mangrove di Kabupaten Tapanuli Tengah adalah sebesar Rp. 3.804.131.272 berdasarkan Nilai Ekonomi Karbon Indonesia pada *Emissions Trading Scheme* serta berdasarkan harga *Global Social Cost of Carbon* adalah sebesar Rp. 42.743.048.000. Harga ini telah dikonversikan ke dalam rupiah berdasarkan kurs yang berlaku pada awal ahun 2024 (US\$ 1 = Rp 15.500). Nilai ekonomi karbon ini dapat menjadi acuan besarnya nilai kehilangan akibat berkurang atau hilangnya suatu kawasan ekosistem mangrove.

Perhitungan valuasi ekonomi ekosistem mangrove ini akan makin bertambah bila jasa ekosistem lainnya juga diperhitungkan seperti karbon sedimen, penangkapan biota bernilai ekonomis, pemanfaatan mangrove sebagai kayu bakar, penahan abrasi dan biodiversitas. Penilaian ekonomi terhadap hutan mangrove merupakan salah satu cara untuk mengetahui seberapa besar nilai kegunaan sumber daya alam hutan mangrove dalam perspektif ekonomi [21]. Selain itu, dengan mengukur valuasi ekonomi hutan mangrove dapat diketahui pula seberapa besar kerugian ekonomi yang ditimbulkan dari kerusakan dan deforestasi hutan mangrove tersebut. Antusiasme yang besar untuk solusi sebagai bentuk *win-win solution* dalam debat konservasi dan pembangunan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini didapatkan bahwa rata-rata biomassa dan stok karbon pada mangrove adalah sebesar 264,49 ton/ha dan 124,31 ton C/ha. Sedangkan rata-rata potensi serapan karbon adalah sebesar 7,95 ton CO₂/ha. Dengan total luas ekosistem mangrove sebesar ± 6.931 ha, maka estimasi nilai ekonomi karbon mangrove di Kabupaten Tapanuli Tengah adalah sebesar Rp. 3.804.131.272 (Nilai Ekonomi Karbon Indonesia pada *Emissions Trading Scheme*) dan Rp. 42.743.048.000 (*Global Social Cost of Carbon*).

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih peneliti sampaikan kepada Dr. Ir. Joko Samiaji, M.Sc dan Dr. Windarti, M.Sc selaku dosen pembimbing pada penelitian ini. Kemudian rekan-rekan peneliti dari STPK Matauli yang telah berkontribusi dalam terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Azmat, A., Kazmi, J.H., Shahzad, A. & Shaikh, S. Mapping change in spatial extent and density of mangrove forest at Karachi Coast using object-based image analysis. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, 11(1):118-122. DOI: <https://doi.org/10.46660/ijeeg>. 2020.
- [2] Baderan, D. W. K. Serapan Karbon Hutan Mangrove Gorontalo Ed.1. Deepublish, Yogyakarta. 2017.
- [3] Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Potensi Cadangan dan Serapan Karbon Ekosistem Mangrove dan Padang Lamun Indonesia. Versi a 1.0. Juli 2018.
- [4] Malik, A., Fensholt R, dan Mertz O. Mangrove exploitation effects on biodiversity and ecosystem services. *Biodiv Conserv* 24 (14): 3543-3557. 2015.
- [5] Friess, D. A., R. Kerry Lee, C. E. Lovelock, K. W. Krauss, S. E. Hamilton, S. Y. Lee, R. Lucas, J. Primavera, A. Rajkaran, dan S. Shi. "The State of the World's Mangrove Forests: Past, Present, and Future." *Annual Review of Environment and Resources* 44 (1): 89–115. 2019.
- [6] Hidayah, F.N., Subagiyo., Adi, S. Nilai Simpanan dan Harga Karbon Ekosistem Mangrove Desa Pasar Banggi, Rembang, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research*. Vol 12(2): 187-195. 2023.
- [7] Pemerintah Kabupaten Tapanuli Tengah. Profil Potensi Pulau-pulau Kecil. 2020.
- [8] Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut. 2004.
- [9] Amira, S. Pendugaan Biomassa Jenis *Rhizophora apiculata* di Hutan Mangrove Batu Ampar Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat. Skripsi. Fakultas Kehutanan. Institut Pertanian Bogor. 2008.
- [10] Dharmawan IWS, Siregar CA. Karbon tanah dan pendugaan karbon tegakan *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. di Ciasem, Purwakarta. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam* 5 (4): 317-328. DOI:10.20886/jphka.2008.5.4.317-328. 2008.
- [11] Pongpan S, Komiyama A, Jintana V, Piriyaota S, Sangtuan T, Tanapernpool P, Patanaponpaiboon P, Kato S. A quantitative analysis on the root system of a mangrove, *Xylocarpus granatum* Koenig. *Tropics* 12: 35 – 42. 2002.
- [12] Kauffman, J.B. and Cole. T. 2010 Micronesian mangrove forest structure and tree response to a severe typhoon. *Wetlands* 30: 1077-1084

- [13] Komiyama, A., Pongpam, S., & Karto, S. Common Allometric Equations for Estimating The Tree Weight of Mangroves. *Journal of Tropical Ecology*. 21(4):471-477. DOI: 10.1017/S0266467405002476. 2005.
- [14] Bismark, M, E. Subiandono, N. M. Herianto. Keragaman Dan Potensi Jenis Serta Kandungan Karbon Hutan Mangrove Di Sungai Subelen Siberut, Sumatera Barat. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 5(3): 297-306. 2008.
- [15] Kharisma, G. N., La Ode, A.F.H., Iradaf, M., Azwar, S.,Harsanto, M., dan Arif, P. Studi Kerapatan dan Perubahan Tutupan Mangrove Menggunakan Citra Satelit di Kecamatan Lasalepa, Kabupaten Muna. *Majalah Ilmiah Globe*, Vol. 25(1): 13-20. 2023.
- [16] Mandari, D.Z., Gunawan H., dan Isda, M. N. Penaksiran Biomassa dan Karbon Tersimpan pada Ekosistem Hutan Mangrove di Kawasan Bandar Bakau Dumai. *Jurnal Riau Biologia*, 1(3): 17-23. 2016.
- [17] Martuti, N. K. T., Soesilowati, E. & Na'am, M. F. Pemberdayaan Masyarakat Pesisir Melalui Penciptaan Batik Mangrove. *Jurnal Abdimas*, 21, 65-74. 2017.
- [18] Irsadi, A., N.K.R. Martuti., dan S.B. Nugraha. Estimasi Stok Karbon Mangrove di Dukuh Tapak Kelurahan Tugurejo Kota Semarang. *Jurnal Sains dan Teknologi*. 15(2): 122. 2017.
- [19] Amanda, Y., Aras, M., Yusni, I. S. Estimasi Stok Karbon Tersimpan pada Hutan Mangrove di Muara Sungai Batang Apar Kecamatan Pariaman Utara Kota Pariaman Provinsi Sumatera Barat. *Jurnal Ilmu Perairan*, 9(1): 38-48. 2020.
- [20] Harishma, K.M., Sandeep, S, Sreekumar V. B. Biomass and Carbon Stocks in Mangrove Ecosystems of Kerala, Southwest Coast of India. *Ecol Proc*. 9(1): 1-9. DOI: 10.1186/s13717-020-00227-8. 2020.
- [21] Daily GC and Matson PA, "Ecosystem services: From theory to implementation," United States: *Proc Natl Acad Sci USA*, hlm. 37-39. 2008.