

EKOSISTEM PESISIR SEBAGAI PENGHASIL KARBON BIRU

Ayunda Annisa Putri^{1*}, Aji Ali Akbar², Romiyanto³

^{1,2}Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura

³Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura

ayundaannsptr@gmail.com; aji.ali.akbar.2011@gmail.com; romi_yanto23@yahoo.com

*E-mail Corresponding Author : ayundaannsptr@gmail.com

ABSTRAK

Abstrak: Indonesia memiliki wilayah pesisir dan laut yang terdiri dari ekosistem mangrove, padang lamun, dan terumbu karang yang memiliki jenis, karakteristik dan luas yang berbeda-beda pada setiap regional akibat kondisi lingkungan dan aktivitas antropogenik. Kajian ini dilakukan dengan mengintegrasikan berbagai sumber terkini terkait keberadaan ekosistem mangrove, padang lamun, dan terumbu karang di Indonesia dan kontribusinya sebagai upaya mitigasi perubahan iklim. Atas kemampuannya dalam fiksasi dan penyimpanan karbon serta proses kalsifikasi, habitat pesisir dianggap sebagai sumber karbon biru sehingga dapat berkontribusi menurunkan emisi gas rumah kaca berdasarkan *Nationally Determined Contribution* (NDC) tahun 2030 sebesar 834 juta ton CO_{2e} dengan target 29% dengan upaya sendiri dan 41% dengan bantuan internasional dalam kondisi tanpa ada aksi (*business as usual*).

Kata Kunci: *Ekosistem mangrove; ekosistem padang lamun; ekosistem terumbu karang; karbon biru; mitigasi perubahan iklim.*

Abstract: *Indonesia has coastal and marine areas consisting of mangrove ecosystems, seagrass beds, and coral reefs which have different types, characteristics and coverage areas in each region due to environmental conditions and anthropogenic activities. This study was conducted by integrating various current sources regarding the existence of mangrove, seagrass, and coral reefs and their contribution to climate change mitigation. Due to their ability to fix and store carbon as well as the calcification process, coastal habitats are considered a source of blue carbon that can contribute to reducing greenhouse gases (GHG) based on the Nationally Determined Contribution (NDC) in 2030 of 834 million tonnes CO_{2e} with a target of 29% self-effort and 41% with international assistance in business as usual.*

Keywords: *Mangrove ecosystems; seagrass beds; coral reefs; blue carbon; climate change mitigation.*

Article History:

Received: 15-11-2022

Revised : 30-11-2022

Accepted: 07-12-2022

Online : 14-12-2022

LATAR BELAKANG

Indonesia merupakan produsen gas rumah kaca terbesar keenam di dunia pada tahun 2011 dengan kumulatif gas rumah kaca dari tahun 1990-2011 sebesar

4% dari total emisi dunia (Ge et al., 2014), kemudian menjadi kedelapan dunia di tahun 2018 dengan kontribusi sebesar 2,03% dari total emisi dunia (Friedrich et al., 2020). Hal ini didukung oleh Ritchie et al., (2020) produksi emisi terbesar di Indonesia tahun 1990-2020 berasal dari alih fungsi lahan, penggunaan energi dan pertanian. Pengurangan laju emisi di atmosfer dapat dikurangi dengan dua prinsip dasar yaitu, mengurangi aktivitas penghasil emisi dan menghapus serta menyerap emisi dari atmosfer (Le Quéré et al., 2020; Mulligan et al., 2020). Beberapa cara yang dapat digunakan untuk menerapkan prinsip tersebut ialah, regenerasi hutan (Lewis et al., 2019), pemanfaatan sumber energi terbarukan (Erickson, 2017), pertanian, pencegahan kebakaran hutan, perlindungan laut dan pesisir (Schuiling & de Boer, 2013) serta mineralisasi karbon (Gadikota, 2021).

Diantara solusi tersebut, penerapan yang paling umum di Indonesia ialah penyerapan karbon oleh hutan. Akan tetapi, berdasarkan globalforestwatch.org (2022) pada tahun 2001-2021 Indonesia telah kehilangan sekitar 28,6 Mha yang dominan terjadi di Riau, Kalimantan Barat, Kalimantan Timur, Kalimantan Tengah, dan Sumatera Selatan yang 96% diakibatkan oleh deforestasi. Sehingga dibutuhkan alternatif penyerapan karbon melalui konsep karbon biru (*blue carbon*). Hal ini berkaitan dengan Indonesia memiliki garis pantai terpanjang kedua di dunia (Alfahmi et al., 2019) yaitu 99.083 km atau 61.567 mil (Nag, 2020) sehingga meningkatkan potensi laut dan pesisir yang dapat digunakan sebagai penyimpanan karbon (*carbon sinks*). Ekosistem pesisir membantu dalam mitigasi perubahan iklim dengan menyerap karbon secara aktif untuk disimpan dalam bentuk biomassa maupun sedimen (Sari, 2016). Pesisir didominasi ekosistem mangrove, lamun dan terumbu karang yang dapat menyerap karbon yang sekitar 50% dari total penyimpanannya berada di lapisan sedimen (IUCN, 2017). Karbon yang tersimpan di pesisir, terutama mangrove lebih besar daripada karbon di hutan terrestrial dari luas yang sama (Alongi, 2014) sehingga dianggap sebagai salah satu upaya mitigasi iklim. Sementara itu, laut berpotensi menyerap hingga 40 % dari total emisi yang dihasilkan (DeVries et al., 2019). Namun, kerusakan habitat pesisir kian meningkat terutama dari peningkatan aktivitas manusia, antara lain pertanian, tambak, pemanenan kayu, eksploitasi berlebihan terhadap ikan, pariwisata, dan pembangunan di wilayah pesisir (Murray et al., 2011). Penelitian ini bertujuan untuk memperkaya pengetahuan tentang pentingnya laut dan pesisir bagi kehidupan dan kerusakan pesisir yang dapat berujung pada terganggunya keseimbangan kehidupan makhluk hidup lain terutama manusia dan percepatan perubahan iklim.

METODE PENELITIAN

Kajian ini dilakukan dengan melalui studi literatur terkait ekosistem pesisir yang mendominasi di Indonesia, yaitu hutan mangrove, padang lamun, dan terumbu karang sebagai penghasil karbon biru dan peranannya dalam mitigasi iklim. Secara global vegetasi pesisir memiliki peranan penting dalam fiksasi karbon, mitigasi bencana alam, habitat biota laut dan akumulasi limbah (Zhou et al., 2018). Perannya dalam menyerap dan menahan karbon berpotensi menjadikan vegetasi pesisir sebagai upaya dalam mitigasi iklim. Duarte et al., (2013) menyatakan bahwa habitat vegetasi laut (bakau, lamun, makroalga, dan rawa asin) hanya meliputi 0,2% dari total luas permukaan laut namun berkontribusi terhadap 50% penyimpanan karbon di sedimen, sehingga degradasi luasan vegetasi menjadi sumber emisi CO₂ yang dapat menghasilkan 1 Pg CO₂/tahun. Kajian ini berasal dari integrasi berbagai macam sumber terkini untuk memperkaya informasi dengan kata kunci mangrove, padang lamun, terumbu karang, karbon biru, perubahan iklim.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Wilayah Pesisir

Berdasarkan Undang-Undang (UU) Nomor 27 Tahun 2007 yang diamandemen menjadi Undang-Undang (UU) Nomor 1 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil mendefinisikan wilayah pesisir sebagai daerah peralihan antara ekosistem darat dan laut yang dipengaruhi oleh perubahan-perubahan yang terjadi di darat dan laut. Ekosistem pesisir berhubungan dengan laut dan menerima masukan air tawar dari daratan (Rangkuti et al., 2017). Ruang lingkup pengaturan wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil dalam konteks ini adalah daerah peralihan ekosistem darat dan laut yang dipengaruhi oleh daerah darat dan laut, ke arah darat mencakup wilayah administrasi dan ke arah laut sejauh 12 mil batas yuridiksi suatu negara. Ekosistem pesisir merupakan habitat yang terdiri dari tumbuhan dan organisme lain yang berada di wilayah peralihan yang dipengaruhi oleh proses-proses kelautan seperti; pasang surut, percikan air, gelombang, intrusi air laut, dan angin laut serta kegiatan manusia di daratan, termasuk air sungai dan aliran air permukaan (*run off*), sedimentasi, dan pencemaran (Asyiwati and Akliyah, 2017)

2. Jenis Ekosistem Pesisir

2.1. Ekosistem Mangrove

Indonesia memiliki ekosistem mangrove terbesar di dunia, sebesar 19% dari luas ekosistem mangrove dunia (Schaduw, 2018). Mangrove umumnya tumbuh pada daerah yang selalu tergenang, daerah yang tergenang saat pasang tertinggi, dan terendam saat banjir yang dipengaruhi oleh pergerakan pasang surut (White et al., 1989). Umumnya, mangrove di Asia Tenggara tumbuh di lima zona berdasarkan pengaruh pasang surut dan salinitas, yaitu (Giesen et al., 2006):

- Zona 1) wilayah sangat terbuka yang selalu terendam, hanya dapat ditumbuhi *Rhizophora mucronata*. Namun zona ini tidak selalu ada.
- Zona 2) wilayah terbuka yang terendam saat pasang sedang yang ditumbuhi kelompok *Sonneratia* dan *Avicennia*
- Zona 3) wilayah tengah yang didominasi kelompok *Rhizophora*
- Zona 4) wilayah asosiasi yang hanya terendam saat pasang tertinggi didominasi kelompok *Excoecaria*, *Lumnitzera*, *Nypa*, dan *Xylocarpus*
- Zona 5) wilayah air payau-tawar yang dapat ditumbuhi oleh *Nypa* dan *Sonneratia*

Keberadaan zonasi mangrove dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sekitar sehingga berbeda-beda setiap wilayah. Indonesia memiliki 202 jenis tumbuhan mangrove yang terdiri dari 43 jenis mangrove sejati dan sisanya adalah mangrove asosiasi, yang dibagi menjadi 89 jenis pohon, 5 jenis palma, 19 jenis pemanjat, 44 jenis herba tanah, 44 jenis epifit dan 1 jenis paku (Noor et al., 1999). Beberapa mangrove di Indonesia berasal dari Genus *Acanthus*, *Acrostichum*, *Aegialitis*, *Aegiceras*, *Avicennia*, *Bruguiera*, *Ceriops*, *Excoecaria*, *Kandelia*, *Heriteria*, *Lumnitzera*, *Nypa*, *Rhizophora*, *Sonneratia*, dan *Xylocarpus* (Honculada-Primavera, 2000). Berdasarkan Peta Mangrove Nasional 2021, sebanyak 93% mangrove di Indonesia masuk dalam kategori lebat sedangkan sisanya berada pada kategori sedang dan jarang. Zonasi ekosistem mangrove ditentukan oleh keadaan tanah, salinitas, penggenangan,

kerasnya pasang surut, laju pengendapan dan pengikisan, serta ketinggian nisbi darat dan air (Hilmi et al., 2015).

2.2. Ekosistem Padang Lamun

Ekosistem padang lamun merupakan suatu ekosistem yang kompleks yang umumnya hidup di perairan dangkal wilayah pesisir. Umumnya, lamun di perairan Indonesia tumbuh di daerah pasang surut dan sekitar pulau-pulau karang Nienhuis et al., (1989). Pertumbuhan ekosistem padang lamun dapat dipengaruhi berbagai faktor, antara lain suhu, cahaya, dan ketersediaan nutrisi, termasuk kolom air dan nutrisi sedimen (Lee et al., 2007). Berdasarkan Yunitha et al., (2014), bahwa padang lamun di Indonesia dikelompokkan dalam 6 kategori berdasarkan tipe substratnya, antara lain lamun yang hidup pada substrat lumpur, lumpur pasir, pasir, pasir lumpuran, puing karang dan batu karang.

Secara umum, pada perairan di Indonesia terdapat 15 spesies, yang terdiri atas 2 suku dan 7 marga. Jenis lamun yang dapat dijumpai terdiri dari 12 jenis, yaitu *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, *Cymodocea rotundata*, *Cymodocea serrulata*, *Haludole pinifolia*, *Haludole uninervis*, *Halophila decipiens*, *Halophila ovalis*, *Halophila minor*, *Haliphila spinulosa*, *Syringodium isetifolium*, dan *Thalassodendron ciliatum* (Sjafrie et al., 2018). Kondisi lamun di Indonesia berdasarkan Kepmen LH 200 tahun 2004 berada dalam status kurang sehat diakibatkan karena adanya faktor eksternal, yaitu kegiatan manusia, antara lain reklamasi pantai sebagai lahan pembangunan, sedimentasi, dan pencemaran.

2.3. Ekosistem Terumbu Karang

Terumbu karang merupakan substansial kapur hasil dari proses kalsifikasi yang tahan terhadap gelombang yang bersimbiosis dengan alga (Done, 2011). Sebaran karang tertinggi dijumpai di bagian tengah dan timur Indonesia, yaitu perairan Sulawesi, Maluku, bagian barat Papua, dan Nusa Tenggara. Sebaliknya, daerah Pulau Sumatera, Kalimantan dan Jawa cenderung memiliki keanekaragaman karang yang rendah karena pengaruh aliran sungai dan hempasan gelombang yang kuat (Hadi et al., 2018). Indonesia memiliki jenis karang keras (ordo Scleractinia) mencapai 569 jenis atau sekitar 67% dari 845 total spesies karang di dunia (Giyanto et al., 2017). Jenis terumbu karang di Indonesia terdiri dari kelompok *Acroporidae*, *Agariciidae*, *Astrocoeniidae*, *Caryophylliidae*, *Dendrophylliidae*, *Pocilloporidae*, *Favidae*, *Fungidae*, *Merulinidae*, *Mussidae*, *Oculinidae*, *Pectiniidae*, *Poritidae*, *Siderastreidae*, dan *Trachyphyllidae* (Suharsono, 2008).

3. Luas Ekosistem Pesisir di Indonesia

Luas mangrove, lamun, dan terumbu karang berbeda-beda setiap provinsi. Hal ini disebabkan oleh perbedaan kondisi lingkungan dan aktivitas manusia disekitarnya.

Tabel 1. Luas Ekosistem Pesisir di Indonesia

No	Regional	Luas Ekosistem (Ha)		
		*)Mangrove	**)Padang Lamun	***)Terumbu Karang
1	Sumatera	651.090	32.348,08	478.587
2	Jawa	56.499	2.736,86	67.869
3	Kalimantan	688.025	14.357,82	119.304
4	Sulawesi	137.185	43.015,75	862.627
5	Bali	2.145	90,88	8.837
6	Maluku	224.046	54.335,97	439.110

7	Nusa Tenggara	32.829	6.819,09	272.123
8	Papua	1.562.906	36.841,83	269.402
Total		3.364.080	190.546,28	2.517.858

Sumber: *) Peta Mangrove Nasional (PMN) (2021)

**)Kementerian Kelautan dan Perikanan (2015)

***) Giyanto et al., (2017)

Berdasarkan Tabel 1. dapat diketahui bahwa mangrove terluas berada di Papua, Indonesia memiliki mangrove terluas di dunia yaitu sekitar 22,6% total mangrove dunia (Giri et al., 2011). Umumnya pertumbuhan mangrove dipengaruhi oleh frekuensi pasang surut, salinitas, kandungan air tawar dan suhu (Irsadi et al., 2019). Papua memiliki mangrove terluas di Indonesia karena pengaruh panjang garis pantai yang mencapai 1.170 mil, kemampuan regenerasi mangrove yang sangat baik yang dapat meningkatkan komposisi spesies (Dharmawan & Widayastuti, 2017) serta kemampuan adaptasi yang baik (Irsadi et al., 2019) sehingga mendukung kemampuan pertumbuhan mangrove. Kekayaan mangrove terbesar berada di sepanjang Selat Makassar di antara Pulau Kalimantan dan Sulawesi karena faktor biogeografi, curah hujan tinggi serta salinitas rendah (Saenger et al., 2019).

Sementara, padang lamun terluas berada di Maluku dan terumbu karang terluas terdapat di Sulawesi. Indonesia memiliki 18% dari total luas terumbu karang dunia (Meinita, 2007). Sekitar 55% terumbu karang di Bunaken dalam kondisi yang baik, dan sisanya berada dalam kondisi sedang dan miskin (Kusen & Tioho, 2009). Pertumbuhan lamun terluas berada di Maluku dan terumbu karang terluas berada di Sulawesi. Pertumbuhan lamun dan terumbu karang dipengaruhi oleh pergerakan arus, sedimentasi, kemampuan tumbuh, dan kompetisi antar spesies (Carlson et al., 2021; Irawan & Nganro, 2016). Sedimentasi menutupi karang menyebabkan kerusakan hingga kematian karena arus gelombang yang lemah (Victor et al., 2006). Sementara, lamun membantu dalam pengendapan sedimen sebagai upaya perlindungan pantai (Donatelli et al., 2018). Namun, sedimentasi yang berlebihan akibat aktivitas antropogenik berpotensi mengurangi kemampuan lamun dalam berkolonisasi (Zabarte-Maeztu et al., 2020). Berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004 bahwa baku mutu air laut untuk biota laut, yaitu suhu 28-32°C, kecerahan 3-5 meter, kekeruhan <5 NTU, padatan tersuspensi total 20-80 mg/l, pH 7-8, dengan salinitas 33-34⁰/∞. Ancaman terhadap terumbu karang di Indonesia berasal dari faktor antropogenik seperti, penangkapan ikan yang merusak, polusi, pembangunan pesisir dan pariwisata serta faktor alam yaitu angin puting beliung, letusan gunung berapi, gempa bumi, dan tsunami (Meinita, 2007).

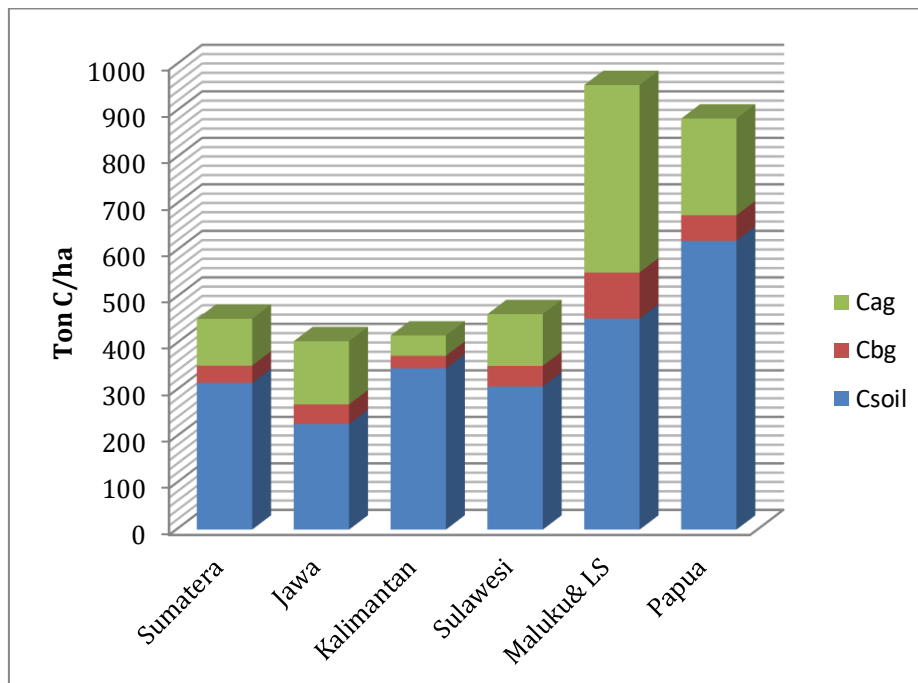
4. Analisis Karbon Biru

Karbon biru merupakan karbon yang terserap di wilayah pesisir, yaitu mangrove, padang lamu, dan rawa payau (McLeod et al., 2011). Proses penyerapan dan penyimpanan karbon yang terjadi pada ekosistem mangrove dan padang lamun memiliki proses yang sama seperti hutan terrestrial pada umumnya. Mangrove dan padang lamun akan melakukan sekuestrasi karbondioksida (CO₂) di atmosfer melalui proses fotosintesis, kemudian disimpan di bagian-bagian tumbuhan dalam bentuk biomassa (Ulqodry et al., 2020) Sementara pada terumbu karang, ion karbonat yang ada di laut akan berikatan dengan kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) di dasar perairan. Pembentukan kalsium karbonat (CaCO₃) akan digunakan oleh terumbu karang dalam proses kalsifikasi guna pembentukan cangkangnya (Afdal, 2017). Sumber

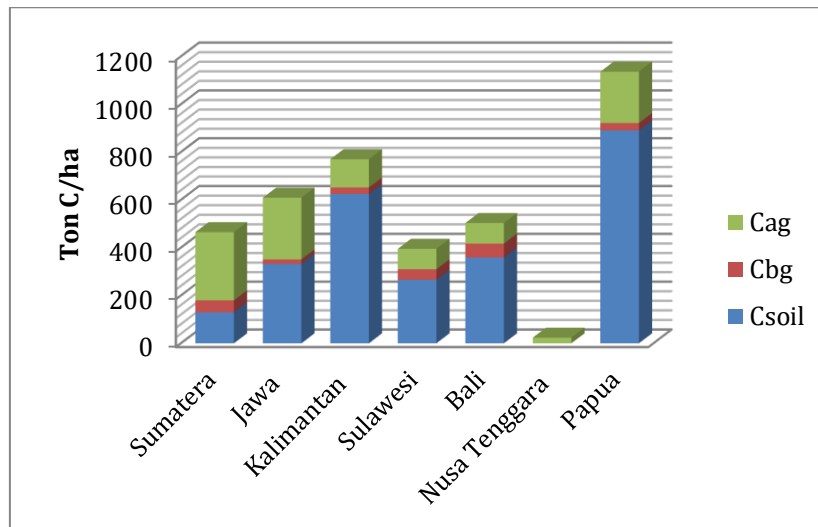
karbon pada ekosistem pesisir dapat diklasifikasikan menjadi 2 jenis yaitu autochthonous carbon dan allochthonous carbon (Fourqurean et al., 2019). Autochthonous carbon merupakan Karbon ini diproduksi oleh proses fotosintesis yang mengubah karbon anorganik menjadi karbon organik yang disimpan di bagian-bagian tumbuhan seperti daun, batang, dan akar/rizoma (He et al., 2021). Sementara, allochthonous carbon diproduksi dan disimpan di tempat yang berbeda. Akumulasi karbon dipengaruhi oleh proses transport sedimen karena pengaruh pasang-surut (Saintilan et al., 2013).

Secara global, mangrove dapat menyerap karbon hingga 937-1.023 MgC yang 49-98% karbonnya berada di sedimen atau rata-rata sekitar 174 gC/m²/tahun (Alongi, 2012; Donato et al., 2011) sedangkan lamun dapat menyimpan karbon hingga 19,9 PgC (Fourqurean et al., 2012). Selain itu NPP (*net primary production*) mangrove mencapai 7,67-11,87 MgC/ha/tahun di China (Gu et al., 2022). Sementara, secara global NPP mangrove bagian atas (above ground) rata-rata mencapai 11,1 t DW/ha/tahun (Alongi, 2012). NPP (*net primary production*) menggambarkan kemampuan vegetasi dalam menangkap karbon (B. Zhou et al., 2022). NPP merupakan hasil selisih antara hasil energy fotosintesis dan respirasi yang dikenal sebagai biomassa tegakan yang dipengaruhi jenis dan umur vegetasi (Alongi, 2012; Díaz, 2013). Sementara itu, secara keseluruhan mangrove di Indonesia dapat menyerap karbondioksida sebesar 170,18 Mt CO₂/tahun atau setara 52, 85 ton CO₂/ha/tahun, lamun dapat menyerap karbondioksida sebesar 3,64 Mt CO₂/tahun atau setara 24,13 CO₂/ha/tahun (Wahyudi et al., 2018).

Berdasarkan Gambar 1. dapat diketahui bahwa simpanan karbon tertinggi berada di Papua Sementara itu, yang terkecil berada di regional Jawa dan Nusa Tenggara. sesuai dengan luas mangrovenya berdasarkan Tabel 1. Hal ini dikarenakan Papua memiliki kerapatan mangrove yang tinggi. Namun, simpanan karbon kedua tertinggi berbeda yaitu antara Maluku dan LS (*Lesser Sunda* yang meliputi Bali, Nusa Tenggara dan sekitarnya).



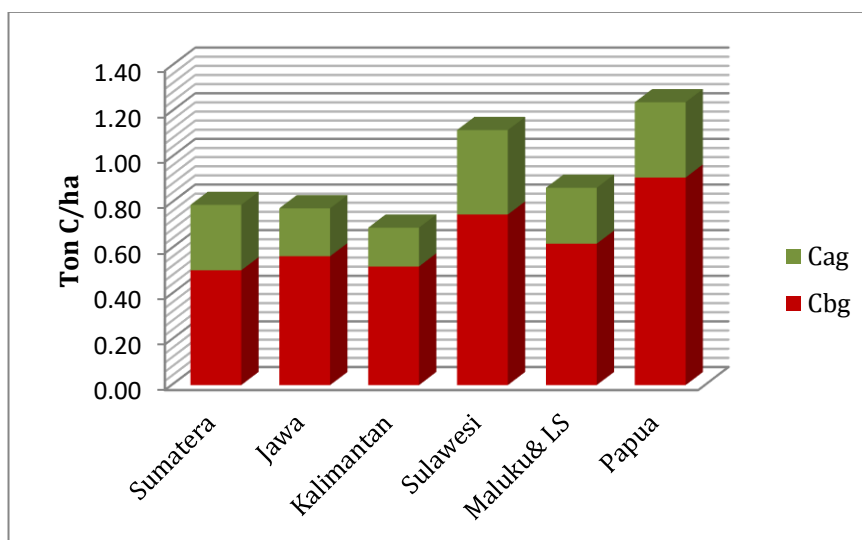
(a)



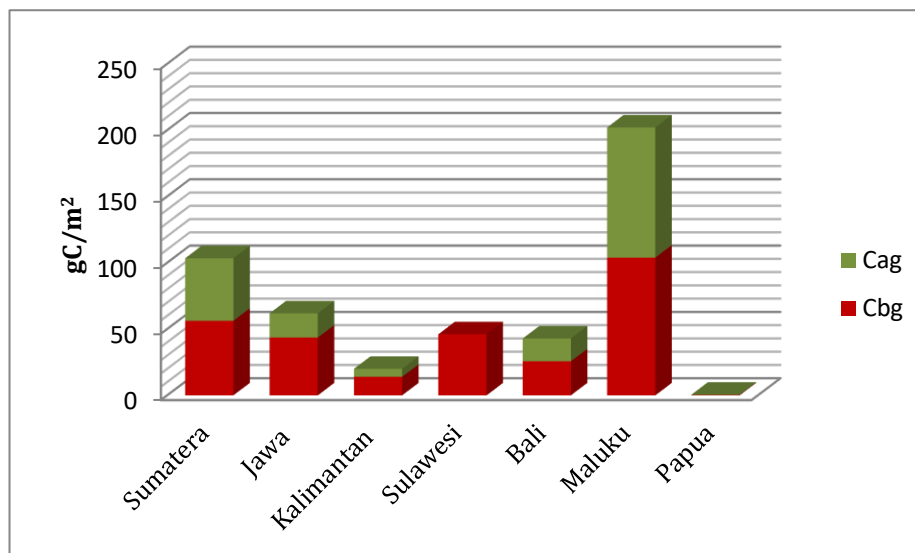
(b)

Gambar 1. Perbandingan Simpanan Karbon di Hutan Mangrove (*Cag. Carbon aboveground, Cbg Carbon belowground*) berdasarkan (a) (Wahyudi et al., 2018) (b) (Amanda et al., 2021; Arifanti et al., 2019; Dinas Lingkungan Hidup Surabaya, 2018; Heriyanto et al., 2020; Kepel et al., 2019; Ledheng et al., 2020; Rudiyanto, 2019; Sidik, Supriyanto, et al., 2017; Suryono et al., 2018; Taberima et al., 2014; Widagti, Sidik, et al., 2021)

Hal ini dikarenakan kurangnya data dan informasi mengenai luas mangrove serta simpanan karbon di wilayah Kalimantan. Jika disesuaikan dengan Tabel 1. berdasarkan luas mangrove, maka regional dengan simpanan karbon tertinggi berturut-turut adalah Papua, Kalimantan, Sumatera, Maluku, Sulawesi, Jawa, Nusa Tenggara, dan Bali. Namun, selain luas habitat, simpanan karbon dipengaruhi oleh faktor lainnya, yaitu salinitas sedimen, keberagaman spesies, kerapatan, tinggi tajuk, dan dekomposisi serasah berkontrobusi terhadap 69%, 69%, 26%, dan 21% dari biomassa di atas dan dibawah permukaan tanah, karbon sedimen dan total penyimpanan karbon (Rahman et al., 2021). Aktivitas manusia seperti pemanfaatan tanpa memperhatikan daya dukung lingkungan serta alih fungsi lahan yang terus meluas menjadi faktor penyebab kerusakan lingkungan pesisir (Akbar et al., 2017).



(a)



(b)

Gambar 2. Perbandingan Simpanan Karbon oleh Padang Lamun oleh (a)(Wahyudi et al., 2018) (b)(Ganefiani et al., 2019; Maharani et al., 2018; Namoua et al., 2022; Rahadiarta et al., 2019; Runtuboi et al., 2018; Rustam et al., 2015; Wawo et al., 2014)

Pada Gambar 2 (a) dapat diketahui bahwa simpanan karbon tertinggi berada di regional Papua dan Sulawesi sementara yang terkecil berada di Kalimantan. Namun, berdasarkan Tabel 1. luas padang lamun terbesar berada di Maluku dan Papua dan yang terkecil berada di Bali dan Nusa Tenggara. Perairan Maluku memiliki multispecies lamun dengan jenis sedimen berupa pasir halus, kerikil dan pecahan koral (Irawan & Nganro, 2016). Ukuran substrat mempengaruhi penyimpanan karbon, semakin besar ukuran butiran substrat maka semakin rendah kemampuan tanaman dalam menyerap bahan organik (Vernianda et al., 2022). Kondisi lingkungan yang baik juga mempengaruhi pertumbuhan lamun. Perairan Maluku memiliki pH 7,78-8,34, salinitas 34-40,8 ‰, suhu 29-31,3°C, DO 4,5-9,0 mg/l, dan kecerahan 0,5-1,8 meter sehingga lamun dapat tumbuh dengan optimal (Saputro et al., 2018). Kondisi yang sama juga terjadi di Papua, sehingga status lamun di Papua tergolong sedang hingga baik yang didominasi oleh jenis *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, dan *Cymodocea rotund*, *Halodule uninervis*, *Syringodium isoetifolium*, dan *Halophila ovalis* (Supriyadi et al., 2017). Kondisi lamun di pesisir Bali utara tergolong buruk hingga baik karena dipengaruhi oleh tutupan epifit dan material halus sedimen yang menghambat fotosintesis (Widagti, Setiabudi, et al., 2021). Namun di Pantai Sanur, Bali mengalami penurunan luas lamun sebesar 15% karena perubahan salinitas dan kecerahan akibat aktivitas pariwisata dan penambatan perahu (Pamungkas & Jaelani, 2016). Sementara pada Gambar 2(b) karbon tertinggi tercatat berada di Maluku dan yang terendah berada di Papua. Hal ini dikarenakan kurangnya penelitian terhadap simpanan karbon pada lamun di masing-masing wilayah sehingga sumber tinjauan yang digunakan masih sangat minim. Maka, dapat disimpulkan bahwa selain luas ekosistem, faktor lingkungan keanekaragaman jenis, dan aktivitas antropogenik dapat mempengaruhi kandungan karbon.

Gabungan karbon tersimpan pada ekosistem mangrove dan lamun lebih besar dibandingkan hutan hujan tropis dan lahan gambut (Alongi, 2014). Penyimpanan karbon terbesar terjadi di sedimen sekitar 42%-99% dari seluruh total karbon yang tersimpan pada ekosistem rawa payau dan padang lamun (Lawrence, 2013; Tuntiprapas et al., 2019), sedangkan pada ekosistem hutan

bakau sebesar 80% total karbon tersimpan di sedimen, sedangkan sisanya 18% berada pada tegakan vegetasi dan 2% berada pada akar (biomassa) (Sidik et al., 2017). Sebagian besar biomassa dialokasikan di akar untuk didekomposisi secara lambat dalam keadaan anaerobik untuk disimpan sebagai cadangan karbon. Vegetasi pesisir menyerap karbon lebih banyak dan lama karena pengaruh pasang surut (McLeod et al., 2011). Faktor hidro-geografis seperti arus, gelombang, dan pasang surut mempengaruhi kandungan karbon karena berkaitan dengan distribusi sedimen dan kandungan organik dari ekosistem berdekatan (Vernianda et al., 2022).

Terdapat perdebatan mengenai fungsi terumbu karang sebagai penyerap karbon atau penyumbang karbon di laut. Terumbu karang dapat menyerap karbondioksida melalui proses kalsifikasi (Kinsey & Hopley, 1991). Produksi primer saat kalsifikasi pada terumbu karang berkisar antara 1-3 kg $\text{CaCO}_3/\text{m}^2/\text{tahun}$ sehingga terumbu karang mampu menyerap 111 juta ton C/tahun atau setara dengan 2% CO_2 dari aktivitas antropogenik (Kinsey & Hopley, 1991). Terumbu karang dapat menyerap 70-90 jutan ton C/tahun (Frankignoulle & Gattuso, 1993). Namun terumbu karang ditetapkan sebagai sumber minor dari CO_2 dan bukan sebagai penyerap karbondioksida (Allemand, 2017). Walaupun dianggap sebagai *net carbon* karena mengurangi invansi CO_2 di atmosfer untuk membentuk CaCO_3 , proses kalsifikasi tetap menghasilkan CO_2 (Frankignoulle & Canon, 1994). Hal ini dikarenakan produksi CaCO_3 mengubah pH menjadi lebih rendah sehingga melepaskan konsentrasi CO_2 ke permukaan laut (Kinsey & Hopley, 1991). Proses kalsifikasi menghasilkan 0,02Gt C-0,08 GtC/tahun atau setara dengan 0,4-1,4% dari total CO_2 akibat aktivitas antropogenik (Ware et al., 1992). Selain itu, karang sangat sensitive terhadap kenaikan suhu permukaan laut dan asidifikasi yang berpotensi menyebabkan pemutihan karang dan dapat menurunkan produksi karbonat hingga 76-156% pada 2100 (Cornwall et al., 2021). Sehingga pada sebagian kasus, karbon yang diserap terumbu karang sama atau hanya sedikit lebih besar dari karbon yang dilepaskan (Howard et al., 2017). Sehingga berdasarkan Dirhamsyah (Kepala Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)) melalui trubus.id (2018) konsep terumbu karang menjadi penyerap karbon belum tepat sasaran karena sensitif terhadap perubahan kondisi laut dan kalsium karbonat (CaCO_3) yang dihasilkan bukan bagian dari karbon organik. Namun masih termasuk dalam variabel Nationally Determined Contribution (NDC) dan Rencana Aksi Nasional Gas Rumah Kaca (RAN-GRK) dalam bentuk *preserving avoided* atau *unintended emission*, yang dapat menjadi *emitter* (sumber karbon) ketika terjadi kerusakan.

5. Karbon Biru Sebagai Upaya Mitigasi Iklim

Mangrove, lamun, dan rawa asin dapat menyerap karbon sebagai upaya penurunan gas rumah kaca (*greenhouse gases*), namun sebaliknya untuk karang, rumput laut dan biota laut tidak dapat menyerap karbon (Howard et al., 2017). Vegetasi pesisir dapat menyerap karbon 15 kali lebih besar dan lebih lama dari hutan terrestrial dengan luas yang sama (Copertino, 2011). Sekitar 40% biomassa mangrove diubah menjadi karbon organik (Dinilhuda et al., 2018) dan 50% dari total karbon disimpan pada sedimen (Donato et al., 2011) sementara lamun rata-rata memiliki karbon lebih besar pada bagian sedimen (Fourqurean et al., 2012). Sehingga mangrove dan lamun berfungsi sebagai upaya mitigasi perubahan iklim dengan melakukan sekuestrasi karbon sehingga mengurangi konsentrasi karbondioksida yang berada di atmosfer akibat aktivitas manusia (Nyanga, 2016; Vernianda et al., 2022).

Namun, berkurangnya keberadaan ekosistem pesisir terus terjadi hingga saat ini. Kerusakan mangrove akibat deforestasi dan reklamasi menyebabkan abrasi, banjir rob, hingga menghasilkan emisi (Akbar et al., 2008; Arifanti et al., 2021; Hidayat & Dessy, 2021). Secara global, kerusakan mangrove menghasilkan 0,02-0,12 PgC/tahun atau setara dengan 10% dari total emisi global akibat deforestasi (Donato et al., 2011). Arifanti et al., (2021) melaporkan deforestasi mangrove di Indonesia dalam 10 tahun mencapai 182,091 ha yang menghasilkan emisi 182,6 MtonCO₂e. Hal ini didukung oleh Sidik et al., (2017) bahwa deforestasi mangrove menjadi tambak dapat melepaskan emisi sebanyak 52 Gg CO₂/tahun. Sementara itu, kerusakan lamun di Indonesia umumnya diakibatkan oleh badai dan eutrofikasi (Rahmawati, 2011) yang dapat menghasilkan emisi 6-24 Tg C/tahun (Fourqurean et al., 2012). Kematian terumbu karang dipengaruhi oleh badai, sedimentasi akibat *run-off* karena curah hujan tinggi dan deforestasi di darat dan kenaikan suhu permukaan laut (Hernández-delgado et al., 2014). Kerusakan terumbu karang juga melepaskan emisi ke atmosfer (Allemand, 2017). Peningkatan suhu dan asidifikasi mengurangi proses kalsifikasi hingga 20% ketika konsentrasi *pCO₂* mencapai 700 ppm dengan peningkatan suhu hingga 3°C (Kornder et al., 2018). Kombinasi kerusakan mangrove, lamun dan rawa asin dapat melepaskan emisi yang setara dengan total emisi dari konsumsi energi dan industri per tahun di Jerman atau setara dengan 10-20% total emisi deforestasi atau 2% dari total gas rumah kaca antropogenik (Copertino, 2011).

Pengelolaan pesisir melalui KKL (Kawasan Konservasi Laut) yang diimplementasikan melalui penetapan Rencana Pengelolaan dan Zonasi (RPZ) serta Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (RZWP3K) di Indonesia untuk menjaga kelestarian sumber daya alam dan peningkatan kesejahteraan masyarakat yang membantu menjaga ekosistem terumbu karang (Burke et al., 2002) dan meningkatkan potensi mangrove sebagai upaya mitigasi iklim melalui peningkatan penyimpanan karbon (Rahman et al., 2021). Pemulihan mangrove di Delta Mahakam 1.546 ha/tahun dari tahun 2001-2011 berpotensi menyerap karbon sebanyak 0,67-4,7 TgCO₂e/tahun (Sidik et al., 2017). Sementara pemulihan lamun 1,5% dari total kerusakan/tahun dapat merestorasi karbon sebesar 11,3-22,7 TgC/tahun (Fourqurean et al., 2012). Sehingga habitat pesisir dapat berkontribusi menurunkan emisi gas rumah kaca berdasarkan *Nationally Determined Contribution* (NDC) tahun 2030 sebesar 834 juta ton CO₂e dengan target 29% dengan upaya sendiri dan 41% dengan bantuan internasional dalam kondisi tanpa ada aksi (*business as usual*).

SIMPULAN DAN SARAN

Keberadaan habitat mangrove, padang lamun, dan terumbu karang dari berbagai spesies merupakan bentuk dari keanekaragaman hayati laut dan pesisir Indonesia sebagai bagian dari *coral triangle* dengan jenis, karakteristik, dan luas yang berbeda-beda sesuai dengan kondisi alam dan aktivitas manusia di wilayah tersebut. Sehingga vegetasi pesisir di Indonesia berpotensi sebagai alternatif penyerap karbon dalam rangka mitigasi perubahan iklim. Kemampuan ini bersifat dinamis karena dapat berkurang akibat faktor alam seperti badai dan faktor antropogenik melalui pemanfaatan tidak berkelanjutan serta deforestasi atau dapat terjaga dan cenderung bertambah karena adanya MPA (*Marine Protected Areas*) yang diimplementasikan dalam Rencana Pengelolaan dan Zonasi (RPZ) serta Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (RZWP3K) di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Ir. Aji Ali Akbar, S. Hut., M.Si., IPU dan Romiyanto, S.P., M.Si. selaku dosen pembimbing yang berkontribusi dalam penulisan ini. Artikel ini diharapkan dapat memperkaya pengetahuan bagi pembaca.

DAFTAR RUJUKAN

- Afdal. (2017). Siklus Karbon Di Atmosfer Dan Samudera. *Oseana*, XXXII(2), 29–41.
- Akbar, A. A., Djohan, T. S., & Sartohadi, J. (2008). EKOSISTEM MANGROVE DAN ABRASI DI PESISIR KALIMANTAN BARAT. *Forum Geografi*, 22(1), 60–71.
- Akbar, A. A., Sartohadi, J., Djohan, T. S., & Ritohardoyo, S. (2017). Erosi Pantai, Ekosistem Hutan Bakau dan Adaptasi Masyarakat Terhadap Bencana Kerusakan Pantai Di negara Tropis (Coastal Erosion, Mangrove Ecosystems and Community Adaptation to Coastal Disasters in Tropical Countries). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 15(1), 1. <https://doi.org/10.14710/jil.15.1.1-10>
- Alfahmi, F., Boer, R., Hidayat, R., Perdinan, & Sopaheluwakan, A. (2019). The Impact of Concave Coastline on Rainfall Offshore Distribution over Indonesian Maritime Continent. *Scientific World Journal*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6839012>
- Allemand, D. (2017). Coral reefs and climate change. *Ocean-Climate.Org*. <https://doi.org/10.2307/4017846>
- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3), 313–322. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6(May), 195–219. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Amanda, Y., Mulyadi, A., & Siregar, Y. I. (2021). Estimasi Stok Karbon Tersimpan pada Hutan Mangrove di Muara Sungai Batang Apar Kecamatan Pariaman Utara Kota Pariaman Provinsi Sumatera Barat. *Jurnal Ilmu Perairan (Aquatic Science)*, 9(1), 38–48.
- Arifanti, V. B., Kauffman, J. B., Hadriyanto, D., Murdiyarso, D., & Diana, R. (2019). Carbon dynamics and land use carbon footprints in mangrove-converted aquaculture: The case of the Mahakam Delta, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 432(August 2018), 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.047>
- Arifanti, V. B., Novita, N., Subarno, & Tosiani, A. (2021). Mangrove deforestation and CO2emissions in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 874(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/874/1/012006>
- Asyiwati, Y., & Akliyah, L. S. (2017). Identifikasi Dampak Perubahan Fungsi Ekosistem Pesisir Terhadap Lingkungan Di Wilayah Pesisir Kecamatan Muaragembong. *Jurnal Perencanaan Wilayah Dan Kota*, 14(1), 1–13. <https://doi.org/10.29313/jpwwk.v14i1.2551>
- Burke, L., Selig, E., & Spalding, M. (2002). Terumbu karang yang terancam di Asia Tenggara (ringkasan untuk Indonesia). In *World Resources Institute, Amerika Serikat*. World Resources Institute.
- Carlson, R. R., Evans, L. J., Foo, S. A., Grady, B. W., Li, J., Seeley, M., Xu, Y., & Asner, G. P. (2021). Synergistic benefits of conserving land-sea ecosystems. *Global Ecology and Conservation*, 28(November 2020), e01684. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01684>
- Copertino, M. da S. (2011). Add coastal vegetation to the climate critical list. *Nature*, 473, 255.
- Cornwall, C. E., Comeau, S., Kornder, N. A., Perry, C. T., Hooidek, R. Van, DeCarlo, T. M., Pratchett, M. S., Anderson, K. D., Browne, N., Carpenter, R., Diaz-Pulido, G., D’Olivo, J. P., Doo, S. S., Figueiredo, J., Fortunato, S. A. V., Kennedy, E., Lantz, C. A., McCulloch, M. T., Gonzalez-Rivero, M., ... Lowe, R. J. (2021). Global declines in coral reef calcium carbonate production under ocean acidification and warming. *PNAS*, 118(21), 1–10.

- <https://doi.org/10.1073/pnas.2015265118>
- DeVries, T., Le Quéré, C., Andrews, O., Berthet, S., Hauck, J., Ilyina, T., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I. D., Nowicki, M., Schwinger, J., & Séférian, R. (2019). Decadal trends in the ocean carbon sink. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(24), 11646–11651. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900371116>
- Dharmawan, I. W. E., & Widyastuti, A. (2017). Pristine Mangrove Community in Wondama Gulf, West Papua, Indonesia. *Marine Research in Indonesia*, 42(2), 73–82. <https://doi.org/10.14203/mri.v42i2.175>
- Díaz, S. (2013). Ecosystem Function Measurement, Terrestrial Communities. *Encyclopedia of Biodiversity: Second Edition*, 3, 72–89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00042-3>
- Dinas Lingkungan Hidup Surabaya. (2018). Estimasi Stok Karbon di Kawasan Mangrove Pantai Utara Surabaya. In *Pemerintah Kota Surabaya Dinas Lingkungan Hidup*.
- Dinilhuda, A., Akbar, A. A., & Jumiati, J. (2018). Peran Ekosistem Mangrove Bagi Mitigasi Pemanasan Global. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(2). <https://doi.org/10.26418/jtsft.v18i2.31233>
- Donatelli, C., Ganju, N. K., Fagherazzi, S., & Leonardi, N. (2018). Seagrass Impact on Sediment Exchange Between Tidal Flats and Salt Marsh, and The Sediment Budget of Shallow Bays. *Geophysical Research Letters*, 45(10), 4933–4943. <https://doi.org/10.1029/2018GL078056>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Done, T. (2011). Corals: Environmental controls on growth. In *Encyclopedia of Earth Sciences Series: Vol. Part 2*. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2639-2_10
- Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., & Marbà, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(11), 961–968. <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>
- Erickson, L. E. (2017). Reducing Greenhouse Gas Emissions and Improving Air Quality: Two Global Challenges. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(4). <https://doi.org/10.1002/ep>
- Fourqurean, J. W., Duarte, C. M., Kennedy, H., Marbà, N., Holmer, M., Mateo, M. A., Apostolaki, E. T., Kendrick, G. A., Krause-Jensen, D., McGlathery, K. J., & Serrano, O. (2012). Seagrass Ecosystems as a Globally Significant Carbon Stock. *Nature Geoscience*, 5(7), 505–509. <https://doi.org/10.1038/ngeo1477>
- Fourqurean, J. W., Johnson, B., Kauffman, J. B., Kennedy, H., Lovelock, C. E., Megonigal, J. P., Rahman, A., Saintilan, N., & Simard, M. (2019). Coastal Blue Carbon. *Habitat Conservation, Ci*, 860. <http://www.habitat.noaa.gov/coastalbluecarbon.html>
- Frankignoulle, M., & Canon, C. (1994). Marine calcification as a source of carbon dioxide: Positive feedback of increasing atmospheric CO₂. *Limnol Oceanography*, 39(2), 458–462.
- Frankignoulle, M., & Gattuso, J. P. (1993). AIR-SEA CO₂ EXCHANGE IN COASTAL ECOSYSTEM. *Interactions of C, N, P and S Biogeochemical Cycles and Global Change*, 14, 233–248. [10.1007/978-3-642-76064-8_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-76064-8_9)
- Friedrich, J., Ge, M., & Pickens, A. (2020). This Interactive Chart Shows Changes in The World's Top 10 Emitters. Publish online at wri.org. Retrieved from: <https://www.wri.org/insights/interactive-chart-shows-changes-worlds-top-10-emitters> [Online Resource]
- Gadikota, G. (2021). Carbon mineralization pathways for carbon capture, storage and utilization. *Communications Chemistry*, 4(1), 1–5. <https://doi.org/10.1038/s42004-021-00461-x>
- Ganefiani, A., Suryanti, S., & Latifah, N. (2019). Potensi Padang Lamun Sebagai Penyerap Karbon Di Perairan Pulau Karimunjawa, Taman Nasional Karimunjawa. *Saintek Perikanan*, 14(2), 115–122.

- Ge, M., Friedrich, J., & Damassa, T. (2014). 6 Graphs Explain the World's Top 10 Emitters. Publish online at wri.org. Retrieved from: '<https://www.wri.org/insights/6-graphs-explain-worlds-top-10-emitters>' [Online Resource]
- Giesen, W., Wulffraat, S., Zieren, M., & Scholten, L. (2006). *Mangrove Guidebook for Southeast Asia*.
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J., & Duke, N. (2011). *Status and distribution of mangrove forests of the world using earth*. 154–159. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>
- Giyanto, Abrar, M., Hadi, T. A., Budiyo, A., Hafizt, M., Salatalohy, A., & Iswari, M. Y. (2017). *Status terumbu karang di Indonesia 2017*. COREMAP-CTI Pusat Penelitian Oseanografi-LIPI.
- [Global Forest Watch. 2022.](https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/IDN/?category=forestchange&location=Wyjib3VudHJ5IiwSUROII0%3D&map=eyJjZW50ZXIiOmsibGF0IjotMi41Nz) Retrieved from: '<https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/IDN/?category=forestchange&location=Wyjib3VudHJ5IiwSUROII0%3D&map=eyJjZW50ZXIiOmsibGF0IjotMi41Nz>' [Online Resource]
- Hadi, T. A., Giyanto, Prayudha, B., Hafizt, M., Budiyo, A., & Suharsono. (2018). *Terumbu Karang Indonesia. November*, 39. http://oseanografi.lipi.go.id/haspen/buku_status_karang_2018_digital.pdf
- He, Q., Xiao, Q., Fan, J., Zhao, H., Cao, M., Zhang, C., & Jiang, Y. (2021). Excitation-emission matrix fluorescence spectra of chromophoric dissolved organic matter reflected the composition and origination of dissolved organic carbon in Lijiang River, Southwest China. *Journal of Hydrology*, 598(December 2020), 126240. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126240>
- Heriyanto, T., Amin, B., Rahimah, I., & Ariani, F. (2020). Analisis Biomassa dan Cadangan Karbon pada Ekosistem Mangrove di Kawasan Pantai Berpasir Desa Kawal Kabupaten Bintan. *Jurnal Manajemen Riset Dan Teknologi*, 2(1), 31–41.
- Hernández-delgado, E. A., Mercado-molina, A. E., Alejandro-camis, P. J., Candelas-sánchez, F., Fonseca-miranda, J. S., González-ramos, C. M., Guzmán-rodríguez, R., Mège, P., Montañez-acuña, A. A., Maldonado, I. O., Otaño-cruz, A., & Suleimán-ramos, S. E. (2014). *Community-Based Coral Reef Rehabilitation in a Changing Climate: Lessons Learned from Hurricanes, Extreme Rainfall, and Changing Land Use Impacts*. October, 918–944.
- Hidayat, A., & Dessy, D. R. (2021). Deforestasi Ekosistem Mangrove Di Pulau Tanakeke, Sulawesi Selatan, Indonesia. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 13(3), 441–456. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v13i3.38502>
- Hilmi, E., Siregar, A. S., & Febryanni, L. (2015). Struktur Komunitas, Zonasi Dan Keanekaragaman Hayati Vegetasi Mangrove Di Segara Anakan Cilacap. *Omni-Akuatika*, 11(2), 20–32. <https://doi.org/10.20884/1.oa.2015.11.2.36>
- Honculada-Primavera, J. (2000). *Mangroves of Southeast Asia In J. H. Primavera, L. M. B. Garcia, M. T. Castaños, & M. B. Surtida (Eds.), Mangrove-Friendly Aquaculture: Proceedings of the Workshop on Mangrove-Friendly Aquaculture organized by the SEAFDEC Aquaculture Department, January 1. 1–12.* <https://doi.org/10.1201/9780367812423-1>
- Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E., Mcleod, E., Pidgeon, E., & Simpson, S. (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(1), 42–50. <https://doi.org/10.1002/fee.1451>
- Irawan, A., & Nganro, N. R. (2016). Sebaran Lamun Di Teluk Ambon Dalam. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 8(1), 99–114. <https://media.neliti.com/media/publications/99400-ID-distribution-of-seagrasses-in-inner-ambo.pdf>
- Irsadi, A., Anggoro, S., & Soeprobawati, T. R. (2019). Environmental Factors Supporting Mangrove Ecosystem in Semarang-Demak Coastal Area. *E3S Web of Conferences*, 125. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912501021>
- IUCN. (2017). *IUCN Issue Brief: Blue Carbon*. November, 2.

- Kepel, T., Ati, restu N. A., Rustam, A., Rahayu, Y. P., Kusumaningtyas, M. A., Daulat, A., Suryono, D. D., Sudirman, N., Adi, N. S., Mantiri, D. M. H., & Hutahaean, A. A. (2019). Cadangan Karbon Ekosistem Mangrove di Sulawesi Utara dan Implikasinya Pada Aksi Mitigasi Perubahan Iklim. *Jurnal Kelautan Nasional*, 14(2), 87–94.
- Kinsey, D. W., & Hopley, D. (1991). The significance of coral reefs as global carbon sinks-response to Greenhouse. *Global and Planetary Change*, 3(4), 363–377. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(91\)90117-F](https://doi.org/10.1016/0921-8181(91)90117-F)
- Kornder, N. A., Riegl, B. M., & Figueiredo, J. (2018). Thresholds and drivers of coral calcification responses to climate change. *Journal of Global Change Biology*, 24, 5084–5095. <https://doi.org/10.1111/gcb.14431>
- Kusen, J. D., & Tioho, H. (2009). The present status of coral reef condition in Bunaken National Park and Manado Bay, North Sulawesi, Indonesia. *Journal of Coral Reef Studies*, 11, 219–222.
- Lawrence, A. (2013). Karbon Biru. *WWf Report*.
- Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J. P., Abernethy, S., Andrew, R. M., De-Gol, A. J., Willis, D. R., Shan, Y., Canadell, J. G., Friedlingstein, P., Creutzig, F., & Peters, G. P. (2020). Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, 10(7), 647–653. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>
- Ledheng, L., Naisumu, Y. G., & Binsasi, R. (2020). Kajian Biomassa Dan Cadangan Karbon Pada Hutan Mangrove Pantai Utara Kabupaten Timor Tengah Utara Provinsi Nusa Tenggara Timur. *Prosiding Seminar Nasional SMIPT 2020*, 3(1), 217–229.
- Lee, K. S., Park, S. R., & Kim, Y. K. (2007). Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: A review. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350(1–2), 144–175. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.06.016>
- Lewis, S. L., Wheeler, C. E., Mitchard, E. T. A., & Koch, A. (2019). Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature*, 568(7750), 25–28. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01026-8>
- Maharani, S., Zulkifli, & Amiin, B. (2018). Potensi Penyimpanan Karbon pada Lamun *Thalassia hemprichii* di Perairan Pantai Nirwana Kota Padang. https://www.fairportlibrary.org/images/files/RenovationProject/Concept_cost_estimate_accepted_031914.pdf
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., & Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552–560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Meinita, M. S. N. (2007). Coral Reefs in Indonesia: A Review on Anthropogenic and Natural Disturbances. *Journal of Marine Bioscience and Biotechnology*, 2(1), 1–10.
- Murray, B., Pendleton, L., Jenkins, W., & Sifleet, S. (2011). Green payments for blue carbon: Economic incentives for protecting threatened coastal habitats. *Nicholas Institute for Environmental ... April*, 52. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Green+Payments+for+Blue+Carbon+Economic+Incentives+for+Protecting+Threatened+Coastal+Habitats#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Green+payments+for+blue+carbon:+>
- Mulligan, J., Ellison G., Levin, K., Lebling, K., & Rudee, A. (2020). 6 Ways to Remove Carbon Pollution from the Sky. Publish online at wri.org. Retrieved from: <https://www.wri.org/insights/6-ways-remove-carbon-pollution-sky> [Online Resource]
- Nag, O. S. (2020). [Publish online at worldatlas.com Retrieved from: https://www.worldatlas.com/articles/countries-with-the-most-coastline.html#:~:text=Indonesia%20has%20the%20second%20longest,at%2099%2C083%20km%2F61%2C567%20miles.](https://www.worldatlas.com/articles/countries-with-the-most-coastline.html#:~:text=Indonesia%20has%20the%20second%20longest,at%2099%2C083%20km%2F61%2C567%20miles.) [Online Resource]
- Namoua, D. J., Wantasen, A. S., Kondoy, K. I. F., Kepel, R. C., Menajang, F. S. I., & Pelle, W. (2022). Serapan Karbon pada Lamun di Perairan Pantai Tongkaina Kecamatan

- Bunaken Kota Manado Provinsi Sulawesi Utara. *Jurnal Ilmiah PLATAX*, 10(2), 433–440.
- Nienhuis, P. H., Coosen, J., & Kiswara, W. (1989). Community structure and biomass distribution of seagrasses and macrofauna in the flores sea, Indonesia. *Netherlands Journal of Sea Research*, 23(2), 197–214. [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(89\)90014-8](https://doi.org/10.1016/0077-7579(89)90014-8)
- Noor, Y. R., Khazali, M., & Suryadiputra, I. N. N. (1999). *Pengenalan Mangrove di Indonesia*.
- Nyanga, C. (2016). The Role of Mangroves Forest in Decarbonizing the Atmosphere. *Intech*, 225–240. <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- Pamungkas, M. W. T., & Jaelani, L. M. (2016). Pemodelan Persamaan Hubungan Kualitas Perairan Menggunakan Citra Landsat 8 untuk Pendugaan Habitat Padang Lamun (Studi Kasus: Pantai Sanur, Bali). *Jurnal Teknik ITS*, 5(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.17184>
- Rahadiarta, I. K. V. S., Putra, I. D. N. N., & Suteja, Y. (2019). Simpanan Karbon Pada Padang Lamun di Kawasan Pantai Mengiat, Nusa Dua Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.24843/jmas.2019.v05.i01.p01>
- Rahman, M. M., Zimmer, M., Ahmed, I., Donato, D., Kanzaki, M., & Xu, M. (2021). Co-benefits of protecting mangroves for biodiversity conservation and carbon storage. *Nature Communications*, 12(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24207-4>
- Rahmawati, S. (2011). Ancaman Terhadap Komunitas Padang Lamun (The threat to seagrass meadow community). *Oseana*, 36(2), 49–58.
- Rangkuti, A. M., Cordova, M. R., Rahmawati, A., Yulma, & Adimu, H. E. 2017. Ekosistem Pesisir dan Laut Indonesia. Jakarta: Bumi Aksara.
- Ritchie, H., Roser, M. & Rosado, P. 2020. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>' [Online Resource]
- Rudiyanto, D. A. (2019). *Analisis Stok Karbon dalam Sedimen pada Ekosistem Mangrove di Resort Bama Kabupaten Situbondo, Jawa Timur*. Universitas Brawijaya.
- Runtuboi, F., Nugroho, J., & Rahakratat, Y. (2018). Biomassa dan Penyerapan Karbon oleh Lamun *Enhalus acoroides* di Pesisir Teluk Gunung Botak Papua Barat. *Sumberdaya Akuatik Indopasifik*, 2(2), 91–102. www.ejournalpikunipa.ac.id
- Rustam, A., Adi, N. S., Ati, R. N. A., Kepel, T. L., Daulat, A., Kusumaningtyas, M. A., Suryono, D. D., Sudirman, N., Heriati, A., Mangindaan, P., & Salim, H. L. (2015). Program Inisiatif Blue Carbon Indonesia Kep. Derawan-Berau, Kalimantan Timur. In *Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Laut dan Pesisir*.
- Saenger, P., Ragavan, P., Sheue, C.-R., López-Portillo, J., Yong, J. W. H., & Mageswaran, T. (2019). *Mangrove Biogeography of the Indo-Pacific*. *August*, 379–400. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04417-6_23
- Saintilan, N., Rogers, K., Mazumder, D., & Woodroffe, C. (2013). Allochthonous and autochthonous contributions to carbon accumulation and carbon store in southeastern Australian coastal wetlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 128, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.05.010>
- Saputro, M. A., Ario, R., & Riniatsih, I. (2018). Sebaran Jenis Lamun di Perairan Pulau Lirang Maluku Barat Daya Provinsi Maluku. *Marine Research*, 7(2), 97–105.
- Sari, N. W. P. (2016). Coral Reef, Penyerap atau Penghasil Karbon? *Oseana*, XLI(2), 32–40.
- Schaduw, J. N. W. (2018). Struktur Komunitas Dan Keberlanjutan Pengelolaan Ekosistem Mangrove Pulau-Pulau Kecil (Kasus Pada Pulau Nain Kabupaten Minahasa Utara Provinsi Sulawesi Utara). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 16(2), 120. <https://doi.org/10.14710/jil.16.2.120-129>
- Schuiling, R. D., & de Boer, P. L. (2013). Six commercially viable ways to remove CO₂ from the atmosphere and/or reduce CO₂ emissions. *Environmental Sciences Europe*, 25(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/2190-4715-25-35>
- Sidik, F., Arifanti, V. B., & Krisnawati, H. (2017). *INFO BRIEF: Perhitungan Karbon Tanah Mangrove (Soil Pool) dalam Inventarisasi Gas Rumah Kaca*. www.puspijak.org

- Sidik, F., Supriyanto, B., & Lugina, M. (2017). Tingkat Rujukan Emisi Hutan Mangrove Delta Mahakam. *Jurnal Analisis Kebijakan Kehutanan*, 14(2), 93–104. <https://doi.org/10.20886/jakk.2017.14.2.93-104>
- Sjafrie, N. D. M., Hernawan, U. E., Prayudha, B., Rahmat, R., Supriyadi, I. H., Iswari, M. Y., Suyarso, S., Anggraini, K., & Rahmawati, S. (2018). Status padang lamun Indonesia 2018. In *Pusat Penelitian Oseanografi-LIPI* (Vol. 53, Issue 9).
- Suharsono. (2008). *Jenis-Jenis Karang di Indonesia*. Pusat Penelitian Oseanografi-LIPI.
- Supriyadi, I. H., Cappenberg, H. A. W., Souhoka, J., Makatipu, C., & Hafizt, M. (2017). Condition of the Coral, Seagrass and Mangrove At the Natural Sanctuary in the Waters of Raja Ampat Regency West Papua Province. *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*, 23(4), 241–252. <http://ejournal-balitbang.kkp.go.id/index.php/jppi>
- 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. <https://doi.org/10.14710/buloma.v7i1.19036>
- Taberima, S., Nugroho, Y. D., & Murdiyarto, D. (2014). The Distribution of Carbon Stock in Selected Mangrove Ecosystem of Wetlands Papua: Bintuni, Teminabuan, and Timika - Eastern Indonesia. *International Conference on Chemical, Environment & Biological Sciences, September*, 7–10. <https://doi.org/10.15242/iicbe.c914072>
- Tuntiprapas, P., Hayashizaki, K. I., Ogawa, H., Panyawai, J., Tamada, S., Stankovic, M., & Prathep, A. (2019). The contributions of allochthonous and autochthonous materials to organic carbon in coastal sediment: A case study from Tangkhen Bay, Phuket, Thailand. *Ecological Research*, 34(6), 718–729. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12040>
- Ulqodry, T. Z., Suganda, A., Agussalim, A., Aryawati, R., & Absori, A. (2020). Estimasi Serapan Karbon Mangrove Melalui Proses Fotosintesis Di Taman Nasional Berbak-Sembilang. *Jurnal Kelautan Nasional*, 15(2), 77–84. <https://doi.org/10.15578/jkn.v15i2.9157>
- Vernianda, C., Watiniasih, N. L., Faiqoh, E., & Giri Putra, I. N. (2022). Analisis Karbon dalam Sedimen pada Ekosistem Lamun di Teluk Gilimanuk, Bali. *Journal of Marine Research and Technology*, 5(2), 105–113. <https://doi.org/10.24843/jmrt.2022.v05.i02.p09>
- Victor, S., Neth, L., Golbuu, Y., Wolanski, E., & Richmond, R. H. (2006). Sedimentation in mangroves and coral reefs in a wet tropical island, Pohnpei, Micronesia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66(3–4), 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.07.025>
- Wahyudi, A. J., Afdal, Adi, N. S., Rustam, A., Hadiyanto, H., Rahmawati, S., Irawan, A., Dharmawan, I. W., Prayudha, B., Hafizt, M., Prayitno, H. B., Rahayu, Y. P., Solihudin, T., Ati, R. N. A., Kepel, T. L., Astrid, M. K., Daulat, A., Salim, H. L., Sudirman, N., ... Supriyadi, I. H. (2018). Intisari bagi pengambil kebijakan: Potensi cadangan dan serapan karbon ekosistem mangrove dan padang lamun Indonesia. *Pusat Penelitian Oseanografi-LIPI*, 12.
- Ware, J. R., Smith, S. V., & Reaka-kudla, M. L. (1992). Coral reefs: sources or sinks of atmospheric CO₂? *Coral Reefs*, 11, 127–130. <https://doi.org/10.1007/BF00255465>
- Wawo, M., Wardiatno, Y., Adrianto, L., & Bengen, D. G. (2014). Carbon stored on seagrass community in marine nature tourism park of kotania bay, Western Seram, Indonesia. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 20(1), 51–57. <https://doi.org/10.7226/jtfm.20.1.51>
- White, A. T., Martosubroto, P., & Sadorra, M. S. M. (1989). The coastal environmental profile of Segara Anakan-Cilacap, South Java, Indonesia. In *ICLARM Technical Reports* (Vol. 25).
- Widagti, N., Setiabudi, G. I., Ampou, E. E., & Surana, I. N. (2021). Kondisi Padang Lamun Di Pesisir Bali Utara: Sumberkima, Lovina, Panimbang, dan Pacung. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 5(2), 452–458.
- Widagti, N., Sidik, F., & Pradisty, N. A. (2021). Monitoring Mangrove untuk Estimasi Potensi Karbon Biru di Dumai, Riau. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 5(2), 459–469.
- Yunitha, A., Wardiatno, Y., & Yulianda, F. (2014). Diameter Substrat dan Jenis Lamun di

- Pesisir Bahoi Minahasa Utara : Sebuah Analisis Korelasi (Substrates Diameter and Seagrasses Species in Bahoi Coastal North Minahasa : a Correlation Analysis). *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia (JIPI)*, 19(3), 130–135.
- Zabarte-Maeztu, I., Matheson, F. E., Manley-Harris, M., Davies-Colley, R. J., Oliver, M., & Hawes, I. (2020). Effects of fine sediment on seagrass meadows: A case study of *Zostera muelleri* in pāuatahanui inlet, New Zealand. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/JMSE8090645>
- Zhou, B., Liao, Z., Chen, S., Jia, H., Zhu, J., & Fei, X. (2022). Net Primary Productivity of Forest Ecosystems in the Southwest Karst Region from the Perspective of Carbon Neutralization. *Forests*, 13(9), 1–21. <https://doi.org/10.3390/f13091367>
- Zhou, C., Wong, K., & Zhao, J. (2018). Coastal Wetland Vegetation in Response to Global Warming and Climate Change. *Intech*, 62–81. <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>