

**POTENSI EKOSISTEM PADANG LAMUN DALAM Mendukung  
IMPLEMENTASI STRATEGI KARBON BIRU DI TELUK PALU, SULAWESI  
TENGAH**

**THE POTENTIAL OF SEAGRASS ECOSYSTEMS TO SUPPORT THE  
IMPLEMENTATION OF THE BLUE CARBON STRATEGY IN PALU BAY,  
CENTRAL SULAWESI**



**MUSAYYADAH TIS'IN**

**L013201002**



**PROGRAM STUDI ILMU PERIKANAN  
FAKULTAS ILMU KELAUTAN DAN PERIKANAN  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**POTENSI EKOSISTEM PADANG LAMUN DALAM MENDUKUNG  
IMPLEMENTASI STRATEGI KARBON BIRU DI TELUK PALU, SULAWESI  
TENGAH**

MUSAYYADAH TIS'IN

L013201002



**PROGRAM STUDI ILMU PERIKANAN  
FAKULTAS ILMU KELAUTAN DAN PERIKANAN  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**POTENSI EKOSISTEM PADANG LAMUN DALAM MENDUKUNG  
IMPLEMENTASI STRATEGI KARBON BIRU DI TELUK PALU, SULAWESI  
TENGAH**

Disertasi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar doktor

Program studi Ilmu Perikanan

Disusun dan diajukan oleh

MUSAYYADAH TIS'IN

L013201002

Kepada

**PROGRAM STUDI ILMU PERIKANAN  
FAKULTAS ILMU KELAUTAN DAN PERIKANAN  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**DISERTASI**  
**POTENSI EKOSISTEM PADANG LAMUN DALAM Mendukung**  
**IMPLEMENTASI STRATEGI KARBON BIRU DI TELUK PALU, SULAWESI**  
**TENGAH**

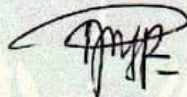
**MUSAYYADAH TIS'IN**  
**L013201002**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Doktor pada tanggal 17 Mei 2024  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

pada

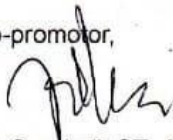
Program Studi Ilmu Perikanan  
Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan  
Universitas Hasanuddin  
Makassar

Mengesahkan:  
Promotor,



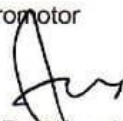
Prof. Dr. Ir. Rohani Ambo Rappe, M.Si.  
NIP. 196909131993032004

Ko-promotor,



Dr. Supriadi, ST., M.Si.  
NIP. 196912011995031002

Ko-promotor



Prof. Dr. Ahmad Faizal, ST., M.Si.  
NIP. 197507272001121003

Ketua Program Studi



Prof. Dr. Ir. Musbir, M.Sc.  
NIP. 196508101989111001

Dekan Fakultas Ilmu Kelautan dan  
Perikanan



Prof. Saifuddin S.Pi., M.P., Ph.D.  
NIP. 197506112003121003

## PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN KELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Potensi ekosistem Padang Lamun dalam Mendukung Implementasi Karbon Biru di Teluk Palu, Sulawesi Tengah” adalah benar karya saya dengan arahan dan tim pembimbing (Prof. Dr. Ir. Rohani Ambo Rappe, M.Si. sebagai Promotor dan Dr. Supriadi, ST., M.Si. sebagai co-promotor-1 serta Prof. Dr. Ahmad Faizal, ST., M.Si. sebagai co-promotor-2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di jurnal (Indonesian Journal of Geography, Volume 55, Nomor. 2, Halaman 289-299, DOI:10.22146/ijg.78701 website: <https://jurnal.ugm.ac.id/ijg> sebagai artikel dengan judul “Decadal Remote Sensing Analysis of Seagrass Changes in Palu Bay, Central Sulawesi”. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 27 Mei 2024



Handwritten signature in black ink, appearing to read "Musayyadah Tisin".

MUSAYYADAH TISIN  
NIM. L013201002

## UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, Tuhan yang Maha Pengasih dan Penyayang, pemilik alam semesta dan seluruh isinya, yang telah menganugerahi kesehatan, senantiasa menuntun dan memberi arahan dalam perjalanan pengembangan diri melalui kegiatan akademis ini.

Saya ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Ir Rohani Ambo Rappe, M.Si. selaku promotor saya yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi dan kebijaksanaan yang sangat berharga. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Dr. Supriadi, ST., M.Si. selaku ko-promotor-1 dan Prof. Dr. Ahmad Faizal, ST., M.Si. selaku ko-promotor-2 atas segala masukan dan kesempatan memperoleh ilmu dan wawasan yang sangat bermanfaat dalam proses akademis ini. Selanjutnya ucapan terima kasih saya sampaikan pula kepada tim penguji saya yaitu Dr. Ir. Nadiarti Nurdin, M.Sc., Dr. Yuyu A. La Nafie, S.T., M.Sc., Prof. Dr. Mahatma Lanuru, ST., M.Sc. dan Dr. Ir. Muh. Farid Samawi, M.Si., yang telah memberikan arahan, kritikan yang sangat membangun dalam meningkatkan kualitas karya tulis ini serta mendedikasikan waktu dan keahlian untuk memberi penilaiannya. Selanjutnya saya ingin mengucapkan terima kasih kepada penguji eksternal yaitu Prof. Dr. Ir. Rachman Syah, MS. yang telah meluangkan waktunya dan memberikan penilaian terhadap karya tulis saya ini.

Kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi (Kemdikbudristek), saya mengucapkan terima kasih atas dana hibah penelitian (Skema Penelitian Disertasi Doktor) tahun ajaran 2022-2023. Ucapan terima kasih juga saya tujukan kepada Pimpinan Universitas Hasanuddin dan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya dalam menempuh program doktor serta menyediakan lingkungan akademik yang memadai dan kondusif. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para dosen yang telah berdedikasi dalam mentransfer ilmu sesuai dengan keahliannya, kepada rekan-rekan selama masa studi atas inspirasi, wawasan dan pengalaman yang telah dibagikan. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada rekan-rekan dalam tim penelitian atas semangat, ketangguhan dan kerjasama yang apik selama proses penelitian. Kepada Ibu Isyanita, saya ucapkan terima kasih atas bantuan, persahabatan dan keramahannya selama proses penelitian di laboratorium hingga saat ini.

Teruntuk orang tua tercinta, saya mengucapkan terima kasih yang berlimpah atas doa yang senantiasa dipanjatkan kepada Tuhan Yang Mahakuasa selama seumur hidup saya, serta motivasi yang senantiasa di berikan hingga saat ini, saya juga berterima kasih karena kalian telah menjaga kesehatan dengan baik. Penghargaan yang besar dan tulus serta ucapan terima kasih yang sangat mendalam saya tujukan kepada suami dan anak-anak saya atas dukungan, kesabaran dan keikhlasan selama saya dalam proses pendidikan dan pengembangan diri. Kepada seluruh keluarga besar, saya mengucapkan terima kasih atas doa dan dukungan dalam berbagai bentuk yang sangat berharga bagi saya.

Penulis

Musayyadah Tis'in

## ABSTRAK

Musayyadah Tis'in. **Potensi ekosistem padang lamun dalam mendukung implementasi strategi karbon biru di Teluk Palu, Sulawesi Tengah** (dibimbing oleh Rohani Ambo Rappe, Supriadi dan Ahmad Faizal).

**Latar belakang.** Peningkatan konsentrasi karbondioksida yang terjadi sejak dimulainya era revolusi industri menjadi salah penyebab fenomena perubahan iklim. Berbagai upaya mitigasi dilakukan untuk mengurangi emisi dan meningkatkan penyerapan Gas Rumah Kaca (GRK). Salah satu alternatif yang diyakini banyak ahli mampu mengurangi karbondioksida di atmosfer adalah memaksimalkan peranan ekosistem pesisir sebagai "karbon biru". Padang lamun merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki kemampuan menyerap karbondioksida di lingkungan dan menyimpannya dalam sistem dalam jangka waktu yang sangat lama, sehingga berpotensi besar sebagai solusi efektif dalam mitigasi perubahan iklim. Oleh karena itu, upaya konservasi dan rehabilitasi sangat diperlukan untuk menjaga kelestarian ekosistem padang lamun. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi karbon biru lamun serta berbagai parameter dan faktor-faktor yang berkaitan erat dengan potensi lamun sebagai penyerap karbon. **Metode.** Penggunaan citra satelit dilakukan untuk menganalisis luasan lamun dan dampak reklamasi pantai terhadap habitat lamun. Survey lapangan dilakukan untuk mengamati kondisi lamun, pengambilan sampel air, sedimen dan sampel lamun serta untuk mengumpulkan informasi tipe habitat dasar perairan (*Ground truthing*). Analisis di laboratorium dilakukan untuk memperoleh data kualitas air dan sedimen serta data yang menjadi acuan dalam perhitungan stok karbon. **Hasil.** Luas padang lamun Teluk Palu tahun 2022 sekitar 83,78 ha, terjadi penurunan luasan sebesar 43,29 ha dalam kurun waktu satu dekade. Reklamasi pantai memberikan dampak terhadap habitat lamun berupa penurunan habitat sebesar sekitar 6,48 ha dan penurunan kualitas air diantaranya kekeruhan dan *Total Suspended Solid* (TSS) yang melebihi batas normal. Ditemukan 6 jenis lamun di Teluk Palu. Jenis *Enhalus acoroides* memiliki persentase penutupan tertinggi ( $19,67 \pm 21,50\%$ ), diikuti *Thalassia hemprichii* ( $15,50 \pm 12,7\%$ ), terendah pada jenis *Syringodium isotifolium* ( $1,16 \pm 2,35\%$ ). Estimasi stok karbon organik di biomassa lamun di Teluk Palu sebesar  $0,58 \text{ Mg C}_{\text{org}} \text{ ha}^{-1}$ , tertinggi pada jenis *Enhalus acoroides*. Sementara stok karbon organik di sedimen lebih tinggi secara signifikan yaitu sebesar  $47,51 \text{ Mg C}_{\text{org}} \text{ ha}^{-1}$  ( $98,79\%$ ). Total stok karbon di Teluk Palu adalah  $178,22 \text{ Mg C}_{\text{org}} \text{ ha}^{-1}$  atau sekitar  $14.933,05 \text{ Mg C}_{\text{org}}$ . **Kesimpulan.** Padang lamun Teluk Palu sebagai karbon biru cukup potensial dalam mendukung upaya mitigasi perubahan iklim. Jenis lamun *Enhalus acoroides* dan *Thalassia hemprichii* berperan penting dalam komunitas lamun di Teluk Palu. Pengelolaan kawasan pesisir yang terpadu diperlukan untuk menjaga kelestarian dan meningkatkan peranan ekosistem di Teluk Palu demi kesejahteraan masyarakat dan kemaslahatan umat manusia.

Kata kunci: Perubahan iklim, kondisi lamun; stok karbon; citra satelit Landsat; penginderaan jauh

## ABSTRACT

Musayyadah Tis'in. **The potential of seagrass ecosystems to support the implementation of blue carbon strategies in Palu Bay, Central Sulawesi** (Supervised by Rohani Ambo Rappe, Supriadi and Ahmad Faizal).

**Background.** The increase in carbon dioxide concentration that has occurred since the start of the industrial revolution era is one of the causes of the climate change phenomenon. Various mitigation efforts have been made to reduce emissions and increase the absorption of greenhouse gases (GHG). One alternative that many experts believe can reduce carbon dioxide in the atmosphere is to maximize the role of coastal ecosystems as "blue carbon". Seagrass beds are one of the coastal ecosystems that have the ability to absorb carbon dioxide in the environment and store it in the system for a very long time, so they have great potential as an effective solution in mitigating climate change. Conservation and rehabilitation efforts are needed to maintain the sustainability of seagrass ecosystems. **Aims.** This study aims to analyze the blue carbon potential of seagrasses as well as various parameters and factors that are closely related to the potential of seagrasses as carbon sinks. **Methods.** Satellite imagery was used to analyze seagrass extent and the impact of coastal reclamation on seagrass habitat. Field surveys were conducted to observe seagrass conditions, take water samples, sediment and seagrass samples and to collect information on the type of water bottom habitat (Ground truthing). Laboratory analysis was conducted to obtain water and sediment quality data as well as data that became a reference in the calculation of carbon stocks. **Results.** The seagrass area of Palu Bay in 2022 was around 83.78 ha, a decrease of 43.29 ha within a decade. Coastal reclamation has an impact on seagrass habitat in the form of a decrease in habitat by about 6.48 ha and a decrease in water quality including turbidity and Total Suspended Solid (TSS) which exceeds normal limits. Six seagrass species were found in Palu Bay. *Enhalus acoroides* species had the highest percentage of closure ( $19.67 \pm 21.50\%$ ), followed by *Thalassia hemprichii* ( $15.50 \pm 12.7\%$ ), the lowest was *Syringodium isotifolium* ( $1.16 \pm 2.35\%$ ). The estimated organic carbon stock in seagrass biomass in Palu Bay was  $0.58 \text{ Mg C}_{\text{org}} \text{ ha}^{-1}$ , the highest in *Enhalus acoroides*. While the organic carbon stock in sediment was significantly higher at  $47.51 \text{ Mg C}_{\text{org}} \text{ ha}^{-1}$  (98.79%). The total carbon stock in Palu Bay was  $178.22 \text{ Mg C}_{\text{org}} \text{ ha}^{-1}$  or about 14.933,05 Mg C<sub>org</sub>. **Conclusions.** Seagrass beds of Palu Bay as blue carbon have potential to support climate change mitigation efforts. Seagrass species *Enhalus acoroides* and *Thalassia hemprichii* play an important role in seagrass communities in Palu Bay. Integrated coastal Sarea management is needed to preserve and enhance the role of ecosystems in Palu Bay for the welfare of the community and the benefit of mankind.

Keywords: Climate change; seagrass condition; carbon stock; landsat satellite imagery; remote sensing



## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PENGANTAR .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI .....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR TABEL .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR LAMPIRAN .....	xi
BAB I. PENDAHULUAN UMUM .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	4
1.3. Tujuan Penelitian .....	5
1.4. Kebaruan Penelitian .....	5
BAB II. ANALISIS PENGINDERAAN JAUH TERHADAP PERUBAHAN PADANG LAMUN DI TELUK PALU .....	10
2.1. Abstrak .....	10
2.2. Pendahuluan .....	11
2.3. Metode dan Bahan .....	13
2.3.1. Lokasi penelitian .....	13
2.3.2. Pengolahan citra .....	15
2.3.3. Survey lapangan .....	15
2.3.4. Analisis data .....	17
2.4. Hasil dan Pembahasan .....	17
2.4.1. Sebaran padang lamun di Teluk Palu .....	17
2.4.2. Perubahan luasan padang lamun di Teluk Palu .....	21
2.4.3. Uji akurasi .....	25
2.5. Kesimpulan dan Saran .....	26
2.6. Daftar Pustaka .....	26

2.7. Lampiran .....	31
<b>BAB III. DAMPAK REKLAMASI PESISIR TERHADAP HABITAT LAMUN DI TELUK PALU.....</b>	<b>38</b>
3.1. Abstrak.....	38
3.2. Pendahuluan .....	39
3.3. Metode dan Bahan.....	40
3.4. Hasil dan Pembahasan.....	41
3.4.1. Perubahan luasan perairan Teluk Palu .....	41
3.4.2. Kualitas perairan Teluk Palu.....	47
3.5. Kesimpulan dan Saran.....	48
3.6. Daftar Pustaka .....	48
3.7. Lampiran .....	51
<b>BAB IV KONDISI PADANG LAMUN DAN ESTIMASI STOK KARBON ORGANIK PADANG LAMUN DI TELUK PALU.....</b>	<b>52</b>
4.1. Abstrak .....	52
4.2. Pendahuluan .....	53
4.3. Metode dan Bahan.....	55
4.3.1. Lokasi penelitian.....	55
4.3.2. Pengukuran kondisi lamun .....	59
4.3.3. Pengambilan sampel lamun dan sampel sedimen padang lamun .....	59
4.3.4. Analisis biomassa dan kandungan karbon organik lamun .....	60
4.3.5. Analisis kandungan karbon organik di sedimen .....	61
4.3.4. Analisis data .....	61
4.4. Hasil .....	63
4.4.1. Kondisi eksisting padang lamun di Teluk Palu.....	63
4.4.2. Kondisi lingkungan padang lamun di Teluk palu.....	66
4.4.3. Biomassa lamun .....	67
4.4.4. Kandungan karbon organik lamun.....	68
4.4.5. Stok karbon organik di biomassa lamun.....	69
4.4.6. Stok karbon organik di sedimen padang lamun .....	73
4.5. Pembahasan .....	75
4.5.1. Kondisi eksisting padang lamun di Teluk Palu.....	75
4.5.2. Estimasi stok karbon organik di biomassa lamun.....	77
4.5.3. Estimasi stok karbon organik di sedimen padang lamun .....	79

4.5.4. Potensi stok karbon organik di padang lamun Teluk Palu .....	83
4.6. Kesimpulan .....	85
4.7. Daftar Pustaka .....	85
4.8. Lampiran .....	91
BAB V PEMBAHASAN UMUM .....	94
5.1. Potensi Karbon Biru Padang Lamun di Teluk Palu .....	94
5.2. Rekomendasi dalam Upaya Menjaga Kelestarian Ekosistem Padang Lamun	97
5.3. Daftar Pustaka.....	98
LAMPIRAN.....	99

## DAFTAR TABEL

Nomor urut	Halaman
2.1. Deskripsi citra satelit .....	15
2.2. Uji akurasi hasil klasifikasi citra satelit tahun 2022 .....	25
3.1. Data kualitas air Teluk Palu .....	47
4.1. Komposisi jenis lamun di Teluk Palu .....	63
4.2. Kategori persentase penutupan lamun .....	63
4.3. Kualitas air dan sedimen di padang lamun Teluk Palu .....	66
4.4. Biomassa lamun per spesies .....	67
4.5. Perbandingan stok karbon biomassa lamun di zona barat dan zona timur Teluk Palu .....	70
4.6. Indeks Nilai Penting (INP) lamun di lokasi penelitian .....	71
4.7. Stok karbon organik di sedimen padang lamun berdasarkan kategori persentase penutupan lamun.....	73
4.8. Variasi stok karbon di berbagai wilayah pesisir Indonesia.....	79
4.9. Variasi stok karbon organik sedimen di beberapa lokasi yang (ekstrapolasi 100 cm).....	82
4.10. Stok karbon organik di padang lamun lamun (biomassa dan sedimen) Teluk Palu .....	83

## DAFTAR GAMBAR

Nomor urut	Halaman
1.1. Kerangka pikir penelitian .....	6
2.1. Diagram alir penelitian .....	13
2.2. Lokasi <i>ground truthing</i> .....	14
2.3. Distribusi padang lamun di Teluk Palu berdasarkan klasifikasi data citra satelit tahun 2012 (Landsat 7) dan 2022 (Landsat 8).....	18
2.4. Hasil <i>overlay</i> padang lamun di Teluk Palu tahun 2012 dan 2022.....	22
2.5. Peta penggunaan lahan sekitar Teluk Palu: a. 2010 (Sumber: European Space Agency (ESA) GlobCover Land Cover Map repository ( <a href="http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php">http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php</a> ), b. 2021 (Source: Copernicus Sentinel-2 2021 Mission via The ESRI ARCGIS portal ( <a href="https://www.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=fc92d38533d440078f17678ebc20e8e2">https://www.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=fc92d38533d440078f17678ebc20e8e2</a> )).....	23
3.1. Diagram alir analisis perubahan garis pantai di lokasi penelitian.....	41
3.2. Komposit citra satelit: (a) Komposit Landsat 7 band 432 tahun 2012, (b) Komposit Landsat 8 band 543 tahun 2022.....	42
3.3. Perbandingan garis pesisir Teluk Palu tahun 2012 dan 2022 .....	43
3.4. Beberapa lokasi pelabuhan dan terminal industri di pesisir Teluk Palu tahun 2022 (Sumber: <i>Google maps</i> dan survei tahun 2022 (a.b. Terminal industri di pesisir Desa Loli Pesua dan Loli Saluran; c. Pelabuhan pertamina di Desa Loli Saluran, Kab. Donggala); d. Pelabuhan peti kemas di Desa Loli Pesua, Kab. Donggala.....	45
3.5. Lokasi degradasi dan hilangnya padang lamun: (a) Desa Loli Saluran, Kab. Donggala; (b) Desa Loli Dondo, Kab. Donggala; (c) Desa Buluri, Kota Palu; (d) Kelurahan Watusampu, Kota Palu; (e) Desa Labuan, Kab. Donggala; (f) Kelurahan Talise, Kota Palu; (g) Kelurahan Pantoloan, Kota Palu.....	46
4.1. Lokasi penelitian di Teluk Palu: Zona barat Teluk Palu (Stasiun 1 dan 2, Kelurahan Kabonga Kecil; Stasiun 3. Pulau Levotu, Kelurahan Kabonga	

Besar; Stasiun 4, Kelurahan Kabonga Besar) dan zona timur Teluk Palu (Stasiun 5. Kelurahan Baiya; Stasiun 6, Kelurahan Mamboro) .....	56
4.2. Persentase penutupan lamun di lokasi penelitian .....	64
4.3. Peta sebaran lamun berdasarkan kategori penutupan lamun.....	65
4.4. Komposisi tipe sedimen di lokasi penelitian .....	67
4.5. Biomassa lamun per kategori per kategori persentase penutupan lamun ....	68
4.6. Kandungan karbon organik per spesies lamun .....	68
4.7. Stok karbon organik per spesies lamun .....	69
4.8. Stok karbon organik biomassa lamun berdasarkan kategori persentase penutupan lamun .....	70
4.9. Peta distribusi stok karbon biomassa lamun berdasarkan kategori persentase penutupan lamun .....	72
4.10. Peta sebaran stok karbon sedimen pada setiap kategori lamun .....	74
4.11. Stok karbon organik sedimen per lapisan .....	75

**DAFTAR LAMPIRAN**

Nomor urut	Halaman
2.1. Kegiatan <i>Participatory Rural Appraisal</i> (PRA) .....	31
2.2. Penurunan permukaan tanah akibat gempa bumi tahun 2018.....	32
2.3. Contoh aktivitas penambangan Galian C di lokasi yang berbatasan dengan Teluk Palu serta perubahan kawasan secara temporal ( <i>Google earth</i> ).....	33
2.4. Lokasi penambangan emas di kelurahan Poboya, kota Palu .....	35
2.5. Berbagai aktivitas antropogenik berupa penambangan bebatuan dan penimbunan pantai di pesisir Teluk Palu (Zona barat Teluk Palu) .....	36
2.6. Nilai Ki/Kj pada algoritma Lyzenga.....	37
3.1. Aktivitas pertambangan Galian C di perbukitan dan pegunungan kabupaten Donggola (Sumber: <i>Google earth</i> ) .....	51
4.1. Nilai <i>Dry Bulk Density</i> (DBD) dan kandungan karbon organik sedimen (KO) ..	92

# BAB I

## PENDAHULUAN UMUM

### 1.1. Latar belakang

Isu fenomena perubahan iklim menjadi isu global yang semakin hari semakin mengemuka dan menjadi perbincangan di berbagai forum internasional. Emisi gas rumah kaca terutama karbondioksida berkontribusi secara signifikan terhadap fenomena ini (Nellemann et al., 2009). Secara global, emisi gas rumah kaca terus meningkat setiap dekadanya. Emisi karbondioksida antropogenik dari penggunaan bahan bakar fosil dan kegiatan industri merupakan penyumbang emisi terbesar yaitu 59% pada tahun 1990 dan 64% pada tahun 2019, sebesar 75% (tahun 2019) bersama dengan emisi karbon yang bersumber dari penggunaan lahan (Puthalpet, 2022). Konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer masa sebelum revolusi industri sebesar 280 ppm, meningkat signifikan menjadi 418,64 ppm tahun 2023 (NOAA, 2023). Diperkirakan konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer akan mencapai 500 ppm pada tahun 2100, menimbulkan konsekuensi peningkatan suhu global sebesar 2 °C (IPCC, 2014).

Upaya penanganan perubahan iklim harus menjadi perhatian masyarakat internasional, dengan mengeksplorasi dan mengevaluasi secara ilmiah setiap potensi yang ada untuk mengurangi dampaknya. Salah satunya adalah meningkatkan perlindungan dan pengelolaan ekosistem laut terutama ekosistem vegetasi pesisir seperti ekosistem lamun, mangrove dan rawa asin sebagai penyerap karbon biru (*blue carbon sink*) (Nellemann et al., 2009). Karbon biru mengacu pada karbon yang tersimpan di ekosistem laut dan pesisir khususnya ekosistem lamun, mangrove dan rawa asin (Nellemann et al., 2009; McLeod et al. 2011; Geraldi et al. 2019), melalui mekanisme fotosintesis organisme autotrofik (lamun, mangrove, fitoplankton dan makroalga) yang dapat tersimpan dalam biomassa dan sedimen (Rustam, 2019). Upaya mitigasi perubahan iklim dapat dilakukan dengan mengimplementasikan strategi *blue carbon*. Strategi ini bertujuan meningkatkan penyerapan karbondioksida sekaligus menghindari emisi karbondioksida melalui pengelolaan ekosistem vegetasi pesisir (Nelleman et al. 2009; Wylie et al., 2016; Mazarrasa et al., 2018).

Ekosistem pesisir hanya mencakup 0,5% dari lautan, namun dapat berperan penting dalam mengatasi perubahan iklim (Nellemann et al., 2009), diantaranya adalah ekosistem padang lamun dengan kemampuan vegetasinya dalam menyerap karbon dari lingkungan dan menyimpan dalam sedimen (Herr & Landis, 2016; Gullstrom et al., 2018; Serrano et al. 2018; Potouroglou et al., 2021) dalam rentang waktu yang sangat lama (Nellemann et al., 2009; Fourqurean et al., 2014; Geraldi et al., 2019). Padang lamun bahkan memiliki potensi penyerapan karbon yang tinggi (Lavery et al., 2013; Marbà et al., 2015), sekitar 10% dari semua karbon organik yang diserap oleh lautan setiap tahunnya yang tersimpan di dalam sedimen padang lamun (Venegas et al., 2019). Selain itu, diperkirakan berkontribusi besar terhadap stok karbon organik global karena menyimpan sekitar 9,8 – 19,9 Pg C di sedimen lamun, jumlah yang kurang lebih sama dengan gabungan stok karbon organik di sedimen



mangrove dan rawa pasang surut yaitu sekitar 10 Pg C (Fourqurean et al., 2012). Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa sedimen lamun memiliki stok karbon organik yang lebih tinggi dibandingkan dengan sedimen tak bervegetasi yang berdekatan (Potoroglou et al., 2021). Indonesia memiliki luas padang lamun sekitar 293.464 ha (Sjafrie et al., 2018), terluas kedua di dunia setelah Australia Timur, sehingga salah satu sumberdaya pesisir ini dimungkinkan memiliki kapasitas besar dalam menangkap dan menyimpan karbon (Lubis & Wahyudi, 2018).

Jasa lingkungan ekosistem padang lamun sangat besar termasuk sebagai penyerap karbon, namun ekosistem ini merupakan salah satu ekosistem yang paling terancam di bumi (Waycott et al., 2009; Mazarrasa et al., 2018), bersama dengan ekosistem pesisir lainnya mengalami degradasi 5 – 10 kali lebih cepat dibanding hutan hujan (Nellemann et al., 2009). Pola iklim dan cuaca, badai tropis dan banjir merupakan bagian dari gangguan alami, sementara gangguan antropogenik berupa konversi habitat, polusi limbah, eksploitasi yang berlebihan (McKenzie et al., 2021), eutrofikasi (McKenzie & Yoshida, 2020; Artika et al., 2020), sedimentasi (Singh, 2019; McKenzie et al. 2021), pembangunan wilayah pesisir (Macreadie et al., 2013; Serrano et al., 2020). Ancaman utama terhadap ekosistem lamun juga mencakup pengelolaan daerah tangkapan yang tidak tepat serta kurangnya informasi ilmiah terkait potensinya (Singh, 2019). Pencemaran logam berat seperti Timbal (Pb) bahkan dapat merusak lapisan epidermis dan endodermis lamun (Rosalina et al., 2019). Di Indonesia, penyebab utama hilangnya padang lamun adalah pembangunan pesisir, reklamasi lahan, sedimentasi, penambangan karang dan pasir, budidaya rumput laut, pemanfaatan yang berlebihan terhadap organisme asosiasi, serta aktivitas kapal (Unsworth et al., 2018), sementara faktor alami diantaranya disebabkan oleh gempa bumi, arus yang kuat, gelombang besar, badai dan tsunami (Rahmawati et al., 2017).

Degradasi ekosistem vegetasi pesisir secara global mengancam kapasitasnya sebagai penyerap karbon jangka panjang. Perubahan penggunaan lahan dan gangguan antropogenik ekosistem pesisir dapat berdampak besar pada penyerapan karbon dan stok karbon yang ada dalam sistem ini (McLeod et al., 2011). Ekosistem karbon biru termasuk padang lamun dapat berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbondioksida (Wylie et al., 2016; Geraldi et al. 2019), serta menimbulkan konsekuensi pelepasan karbon yang telah terakumulasi di dalam sedimen selama ribuan tahun ke atmosfer (Nellemann et al., 2009; Fourqurean et al., 2012; Pendleton et al., 2012). Hilangnya penyerap karbon jangka panjang meningkatkan kekhawatiran bahwa padang lamun yang terdegradasi dapat membocorkan sejumlah besar karbon kuno kembali ke atmosfer, sehingga menggeser peran lamun sebagai penyerap karbon menjadi pelepas karbon, bahkan berpotensi mempercepat perubahan iklim (Macreadie et al., 2013; Stankovic et al. 2021). Fourqurean et al. (2012) memperkirakan bahwa tingkat kehilangan lamun saat ini dapat mengakibatkan pelepasan karbon sebesar 299 Tg C per tahun, dengan asumsi bahwa semua karbon organik dalam biomassa lamun dan dalam lapisan atas sedimen mengalami remineralisasi. Degradasi yang terjadi saat ini dan masih terus

berlanjut akan berdampak buruk terhadap perekonomian dan mengurangi kapasitas lamun untuk menjebak dan menyimpan karbon (Rahmawati et al., 2019).

Mitigasi perubahan iklim dapat diupayakan dengan meningkatkan penyerapan karbon melalui pengelolaan wilayah pesisir termasuk ekosistem padang lamun (Fourqurean et al. 2014). Konservasi dan restorasi padang lamun merupakan strategi yang efektif dalam upaya mitigasi perubahan iklim (McLeod et al., 2011; Marba et al., 2015; Herr & Landis, 2016; Mazarrasa et al. 2018; Serrano et al., 2020). Upaya dari berbagai pihak diperlukan dalam melestarikan dan meningkatkan layanan ekosistem pesisir, sehingga diperlukan data dan informasi yang akurat dan memadai sebagai acuan dalam penetapan kebijakan pengelolaan wilayah pesisir.

Wilayah pesisir Teluk Palu yang dipilih sebagai lokasi penelitian masuk dalam wilayah administratif Kota Palu dan Kabupaten Donggala, Provinsi Sulawesi Tengah. Teluk ini menjadi muara Sungai Palu yang relatif besar dan sungai-sungai kecil lainnya yang terdapat di hampir semua kelurahan yang ada di pesisir teluk. Potensi sumberdaya alam Teluk Palu cukup besar, ekosistem pesisirnya terbilang kompleks karena memiliki ekosistem lamun, mangrove dan terumbu karang dan estuaria (Ansar, 2011) serta memiliki garis pantai sepanjang sekitar 82 km. Namun, sebagaimana halnya wilayah pesisir lainnya, ekosistem pesisir Teluk Palu juga tidak lepas dari gangguan antropogenik yang berpotensi menimbulkan ancaman bagi kelestarian ekosistem pesisir Teluk Palu (Muliati, 2015). Faktor alami seperti gempa dan tsunami pada tanggal 28 September 2018 turut berpotensi menyebabkan terjadinya perubahan ekosistem pesisir termasuk ekosistem padang lamun di Teluk Palu.

Berdasarkan uraian tersebut maka penulis menganggap penting untuk mendapatkan informasi ilmiah terkait potensi padang lamun sebagai penyerap karbon dalam mendukung upaya mitigasi pemanasan global dengan mengimplementasikan strategi karbon biru. Sepengetahuan penulis hingga saat ini belum ada publikasi ilmiah terkait kondisi eksisting padang lamun di Teluk Palu dan potensinya sebagai penyerap karbon serta dampak aktivitas antropogenik di pesisir Teluk Palu. Oleh karenanya, rangkaian penelitian ini dianggap sangat penting, dan diharapkan hasilnya dapat menjadi informasi ilmiah dasar yang memadai bagi pihak terkait. Selain itu, diharapkan hasil penelitian ini dapat berkontribusi sebagai *database* dalam mendukung proses pengambilan kebijakan pengelolaan wilayah pesisir, khususnya pengelolaan ekosistem pesisir berupa konservasi dan rehabilitasi di Teluk Palu secara komprehensif. Semua ini bertujuan untuk mengatasi dampak perubahan iklim dan menjaga keberlanjutan jasa ekosistem lainnya.

Perlindungan karbon organik yang tersimpan di dalam ekosistem darat dan pesisir dianggap sebagai metode penting dalam mitigasi perubahan iklim. Lebih lanjut diharapkan berkontribusi terhadap estimasi stok karbon biru pada level nasional dan secara global, mengingat estimasi stok karbon nasional yang dilakukan oleh Wahyudi et al. (2020) dianggap belum cukup memadai karena wilayah penelitian belum mencakup beberapa wilayah pesisir yang potensial lainnya di Indonesia. Rahmawati et al. (2019) menekankan pentingnya penelitian potensi padang lamun yang mencakup stok karbon padang lamun, komunitas dan luasan lamun, dan

penyerapan karbon karena berkaitan erat dengan kewajiban pelaporan pada Konvensi PBB tentang Perubahan Iklim (United Nation Framework Convention on Climate Change/UNFCCC) dan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs) khususnya pasal SDGs nomor 13 dan 14 dalam hal penanganan perubahan iklim dan pengelolaan dan perlindungan ekosistem laut dan pesisir secara berkelanjutan. Secara khusus, penilaian stok karbon lamun nasional, komunitas dan luasan lamun serta penyerapan karbon akan berkontribusi pada inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) yang menjadi materi pelaporan pada UNFCCC.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan pentingnya peranan lamun sebagaimana yang telah yang diuraikan di atas terutama sebagai salah satu solusi efektif dalam mengurangi karbondioksida karena kemampuannya sebagai pengakumulasi karbon, sangat perlu untuk menganalisis secara ilmiah dan lebih rinci mengenai potensi karbon biru lamun di berbagai lokasi pesisir. Setiap lokasi pesisir memiliki potensi dan karakteristik yang berbeda, seperti halnya pesisir Teluk Palu sebagai lokasi penelitian yang memiliki potensi sumberdaya yang cukup besar, namun dikelilingi oleh aktivitas yang berpotensi mengganggu eksistensi sumberdaya tersebut termasuk ekosistem padang lamun.

Potensi padang lamun sebagai karbon biru dapat diidentifikasi dengan mengestimasi stok karbon organik di biomassa dan di dalam sedimen. Dalam upaya inventarisasi data potensi karbon biru lamun dan upaya penanganan perubahan iklim, selain mengestimasi stok karbon, sejumlah komponen penting lain juga perlu untuk dianalisis, diantaranya komponen yang erat kaitannya dengan stok karbon. Variasi stok karbon padang lamun sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kondisi lamun (dinyatakan dengan berbagai parameter ekologi seperti komposisi jenis, kerapatan dan persentase penutupan lamun) dan kondisi lingkungan perairan. Oleh karena itu, penting juga untuk menganalisis dan memahami secara mendalam terhadap faktor-faktor tersebut. Salah satu data dan informasi ilmiah dasar yang paling dibutuhkan dalam menyajikan potensi padang lamun adalah luasan lamun. Sebagaimana disimpulkan oleh Sjafrie et al. (2018), data luasan lamun merupakan informasi yang paling penting dibutuhkan dalam inventarisasi data lamun terutama untuk kepentingan pengelolaan wilayah pesisir. Berdasarkan hal ini, maka dilakukan analisis luasan padang lamun Teluk Palu tahun 2022, sekaligus menganalisis perubahan luasan lamun dan perubahan tata guna lahan dalam kurun waktu satu dekade terakhir. Lebih lanjut, informasi luasan lamun dapat digunakan dalam mengkalkulasi total stok karbon tahun 2022 sekaligus mengestimasi total stok karbon sekitar satu dekade yang lalu, sehingga diperoleh informasi tentang perubahan total stok karbon dalam kurun waktu satu dekade terakhir. Selain itu data yang diperoleh ini dapat digunakan untuk memproyeksikan total stok karbon satu dekade berikutnya. Sementara itu, analisis perubahan tata guna lahan diperlukan untuk mengidentifikasi bentuk perubahan dan menganalisis dampak perubahan penggunaan lahan terhadap ekosistem pesisir khususnya ekosistem padang lamun.

Perairan pesisir Teluk Palu merupakan perairan yang tidak lepas dari gangguan antropogenik dan faktor alami yang berpotensi besar berdampak terhadap eksistensi padang lamun. Faktor alami yang dimaksud terutama berupa gempa dan tsunami yang terjadi tahun 2018, sementara gangguan antropogenik yang marak terjadi selama beberapa tahun terakhir ini berupa reklamasi pantai untuk pengembangan kawasan pesisir, termasuk untuk mendukung aktivitas berbagai industri terutama industri ekstraktif. Berdasarkan fenomena ini, maka penelitian ini juga menyoroti dampak hadirnya reklamasi pantai terhadap habitat padang lamun.

Peranan ekosistem padang lamun dalam mitigasi pemanasan global ini dapat terlaksana secara efektif apabila lamun dalam kondisi baik dan terhindar dari berbagai bentuk gangguan. Olehnya itu, menjaga kelestarian ekosistem haruslah menjadi skala prioritas dalam upaya pembangunan perekonomian. Kebijakan pengelolaan wilayah pesisir secara terpadu dan mengedepankan kelestarian lingkungan sangatlah penting, di mana data dan informasi ilmiah yang akurat dan memadai merupakan kebutuhan dasar dalam mempertimbangkan sebuah kebijakan. Hasil rangkaian penelitian ini diharapkan menghasilkan data dan informasi yang memadai sebagai acuan dalam pengelolaan wilayah pesisir di Teluk Palu.

Beberapa pertanyaan dapat dikemukakan berdasarkan uraian-uraian di atas:

1. Bagaimana perubahan luasan padang lamun secara temporal di Teluk Palu?
2. Bagaimana dampak aktivitas antropogenik di pesisir Teluk Palu, khususnya reklamasi pantai terhadap habitat lamun?
3. Bagaimana kualitas lingkungan lamun dan kondisi lamun di Teluk Palu (komposisi jenis, sebaran jenis, persentase penutupan)?
4. Bagaimana potensi stok karbon organik di ekosistem padang lamun (di vegetasi lamun dan dalam sedimen padang lamun)?

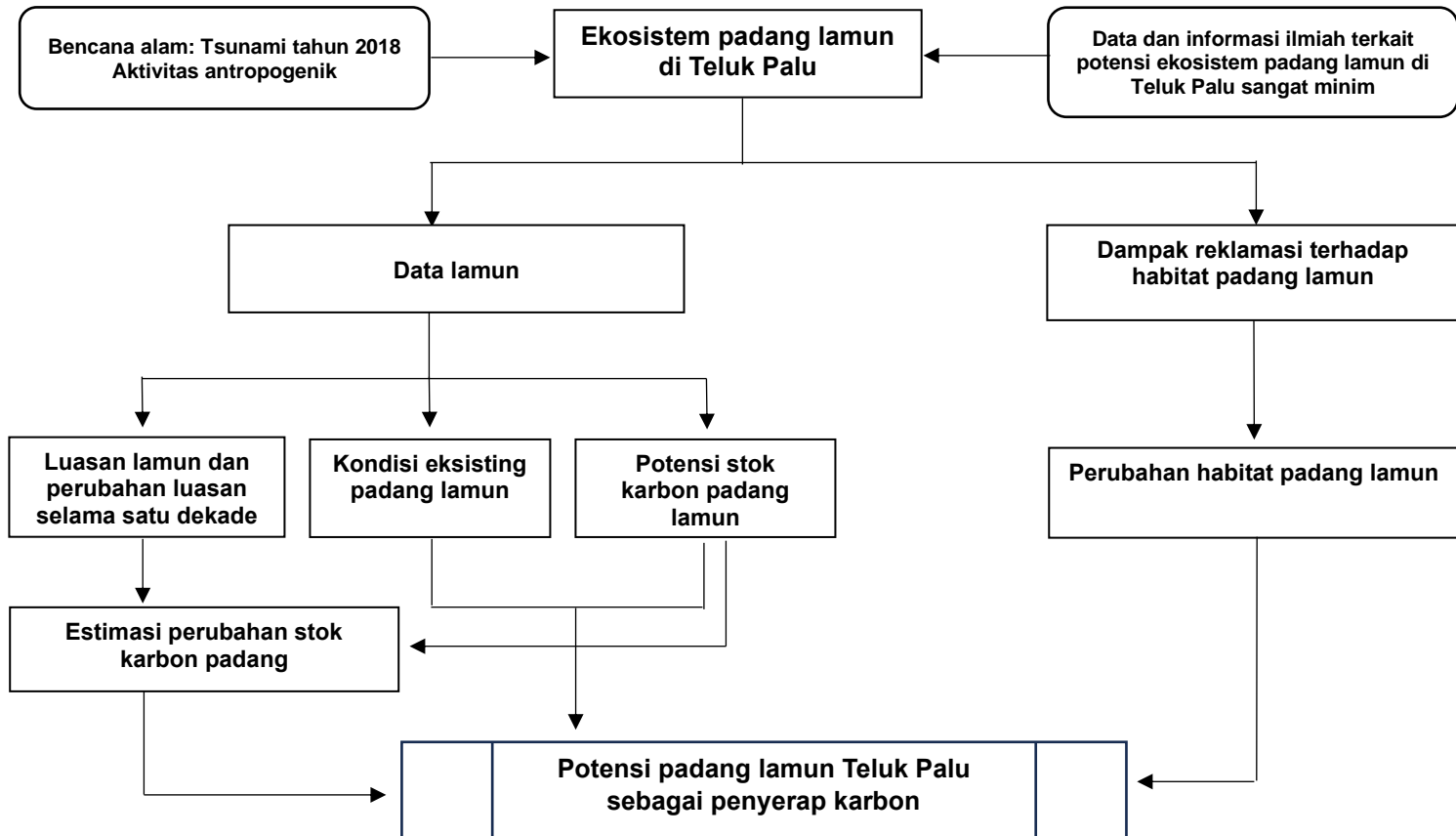
### **1.3. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis perubahan kondisi padang lamun Teluk Palu secara temporal berdasarkan analisis citra satelit.
2. Menganalisis dampak reklamasi terhadap habitat padang lamun Teluk Palu.
3. Menganalisis kualitas lingkungan lamun dan kondisi lamun di Teluk Palu.
4. Menganalisis potensi stok karbon organik lamun dan stok karbon organik dalam sedimen padang lamun di Teluk Palu.

### **1.4. Kebaharuan**

Kebaharuan yang dihasilkan pada penelitian ini yaitu penyediaan *database* potensi karbon biru lamun pada lokasi yang terdampak peristiwa tsunami dan aktivitas reklamasi yang masif.



Gambar 1. 1. Kerangka pikir penelitian

## 1.5. Daftar Pustaka

- Ansar. (2011). Menuju kebijakan pengelolaan Teluk Palu yang harmonis. *Media Litbang Sulteng*, 4(2), 142–148.
- Fourqurean, J., Johnson, B., Kauffman, J. B., Kennedy, H., Emmer, I., Howard, J., Pidgeon, E., & Serrano, O. (2014). Conceptualizing the Project and Developing a Field Measurement Plan. In *Coastal Blue Carbon: Methods for Assessing Carbon Stocks and Emissions Factors in Mangroves, Tidal Salt Marshes, and Seagrass Meadows* (Issue November, pp. 25–38).
- 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>
- Geraldi, N. R., Ortega, A., Serrano, O., Macreadie, P. I., Lovelock, C. E., Krause-Jensen, D., Kennedy, H., Lavery, P. S., Pace, M. L., Kaal, J., & Duarte, C. M. (2019). Fingerprinting blue carbon: Rationale and tools to determine the source of organic carbon in marine depositional environments. *Frontiers in Marine Science*, 6(May), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00263>
- Gullström, M., Lyimo, L. D., Dahl, M., Samuelsson, G. S., Eggertsen, M., Anderberg, E., Rasmusson, L. M., Linderholm, H. W., Knudby, A., Bandeira, S., Nordlund, L. M., & Björk, M. (2018). Blue carbon storage in tropical seagrass meadows relates to carbonate stock dynamics, plant–sediment processes, and landscape context: Insights from the Western Indian Ocean. *Ecosystems*, 21(3), 551–566. <https://doi.org/10.1007/s10021-017-0170-8>
- Herr, D., & Landis, E. (2016). Coastal Blue Carbon Ecosystems. Opportunities for Nationally Determined Contributions. In *Conservation International*. Policy Brief. Gland, Switzerland: IUCN and Washington, DC, USA: TNC. Acknowledgements.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers*.
- Lavery, P. S., Mateo, M. Á., Serrano, O., & Rozaimi, M. (2013). Variability in the carbon storage of seagrass habitats and its implications for global estimates of blue carbon ecosystem service. *PLoS ONE*, 8(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073748>
- Lubis, R. F., & Wahyudi, A. J. (2018). Aksi Lokal dan Nasional untuk Isu Global. In A'an Johan Wahyudi & D. Surinati (Eds.), *Menyerap Karbon: Layanan Ekosistem Pesisir untuk Mitigasi Perubahan Iklim* (pp. xvii–xx). Gadjah Mada University Press.
- Macreadie, P. I., Baird, M. E., Trevathan-Tackett, S. M., Larkum, A. W. D., & Ralph, P. J. (2013). Quantifying and Modelling the Carbon Sequestration Capacity of Seagrass Meadows - A critical Assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 83(2), 430–439. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.038>
- Marbà, N., Arias-Ortiz, A., Masqué, P., Kendrick, G. A., Mazarrasa, I., Bastyan, G. R., Garcia-Orellana, J., & Duarte, C. M. (2015). Impact of seagrass loss and subsequent revegetation on carbon sequestration and stocks. *Journal of Ecology*, 103(2), 296–302. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12370>
- Mazarrasa, I., Samper-Villarreal, J., Serrano, O., Lavery, P. S., Lovelock, C. E., Marbà, N., Duarte, C. M., & Cortés, J. (2018). Habitat characteristics provide insights of carbon storage in seagrass meadows. *Marine Pollution Bulletin*, 134(January), 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.059>
- McKenzie, L. J., & Yoshida, R. L. (2020). Over a Decade Monitoring Fiji's Seagrass

- Condition Demonstrates Resilience to Anthropogenic Pressures and Extreme Climate Events. *Marine Pollution Bulletin*, 160(March), 111636. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111636>
- McKenzie, L. J., Yoshida, R. L., Aini, J. W., Andréfouet, S., Colin, P. L., Cullen-Unsworth, L. C., Hughes, A. T., Payri, C. E., Rota, M., Shaw, C., Tsuda, R. T., Vuki, V. C., & Unsworth, R. K. F. (2021). Seagrass ecosystem contributions to people's quality of life in the Pacific island countries and territories. *Marine Pollution Bulletin*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112307>
- 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 CO<sub>2</sub>. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552–560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Muliati. (2015). Reklamasi kawasan Teluk Palu ditinjau dari aspek hukum tata ruang. *Jurnal Katalogis*, 3(12), 172-187.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (2009). *Blue Carbon Sinks*. <http://maps.grida.no/go/graphic/blue-carbon-sinks>
- NOAA. (2023). *Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases*. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html>
- Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Sifleet, S., Craft, C., Fourqurean, J. W., Kauffman, J. B., Marbà, N., Megonigal, P., Pidgeon, E., Herr, D., Gordon, D., & Baldera, A. (2012). Estimating global “Blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLoS ONE*, 7(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>
- Potouroglou, M., Whitlock, D., Milatovic, L., MacKinnon, G., Kennedy, H., Diele, K., & Huxham, M. (2021). The Sediment Carbon Stocks of Intertidal Seagrass Meadows in Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 258(June 2020), 107442. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107442>
- Puthalpet, J. R. (2022). Mitigation of Climate Change. In *The Daunting Climate Change* (pp. 219–276). <https://doi.org/10.1201/9781003264705-7>
- Rahmawati, S., Hermawan, U. E., McMahan, K., Prayuda, B., Prayitno, H. B., Wahyudi, A. J., & Mat Vanderklift. (2019). *Blue Carbon in Seagrass Ecosystem: Guideline for The Assesment Carbon Stock and Sequestration in Shoutheast Asia* (A. J. W. & M. V. Rahmawati, S., U.E. Hernawan, K. McMahan, B. Prayudha, H.B. Prayitno (ed.)). Gadjah Mada University Press.
- Rahmawati, S., Irawan, A., & Supriyadi, I. H. (2017). *Panduan pemantauan penilaian kondisi padang lamun edisi 2 Pusat Penelitian Oseanografi-LIPI*. January.
- Rosalina, D., Herawati, E. Y., Musa, M., Sofarini, D., Amin, M., & Risjani, Y. (2019). Lead accumulation and its histological impact on *Cymodocea serrulata* seagrass in the laboratory. *Sains Malaysiana*, 48(4), 813–822. <https://doi.org/10.17576/jsm-2019-4804-13>
- Rustam, A., Adi, N. S., Daulat, A., Kiswara, W., Yusuf, D. S., & Ambo-Rappe, R. (2019). *Pedoman Pengukuran Karbon di Ekosistem Padang Lamun* (A. Rustam, N. S. Adi, A. Daulat, W. Kiswara, D. S. Yusuf, & R. Ambo-Rappe (eds)). ITB Press.
- Serrano, O., Almahasheer, H., Duarte, C. M., & Irigoien, X. (2018). Carbon stocks and accumulation rates in Red Sea seagrass meadows. *Scientific Reports*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33182-8>
- Serrano, O., Lavery, P. S., Bongiovanni, J., & Duarte, C. M. (2020). Impact of

- seagrass establishment, industrialization and coastal infrastructure on seagrass biogeochemical sinks. *Marine Environmental Research*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104990>
- Singh, S. (2019). Importance of Seagrass: A REview for Fiji Island. *Pacific Affairs*, 19(2), 587–602. <https://doi.org/10.2307/2752507>
- Sjafrie, N. D. M., Hernawan, U. E., Prayudha, B., Supriyadi, I. H., Iswari, M. Y., Rahmat, Anggraini, K., Rahmawati, S., & Suyarso. (2018). *Status pada lamun Indonesia 2018*. Pusat Penelitian Oseanografi – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Stankovic, M., Ambo-Rappe, R., Carly, F., Dangan-Galon, F., Fortes, M. D., Hossain, M. S., Kiswara, W., Van Luong, C., Minh-Thu, P., Mishra, A. K., Noiraksar, T., Nurdin, N., Panyawai, J., Rattanachot, E., Rozaimi, M., Soe Htun, U., & Prathep, A. (2021). Quantification of lue Carbon in Seagrass Ecosystems of Southeast Asia and Their Potential for Climate Change Mitigation. *Science of the Total Environment*, 783, 146858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146858>
- Unsworth, R. K. F., Ambo-Rappe, R., Jones, B. L., Nafie, Y. A. La, Irawan, A., Hernawan, U. E., Moore, A. M., & Cullen-Unsworth, L. C. (2018). Indonesia's globally significant seagrass meadows are under widespread threat. *Science of the Total Environment*, 634, 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.315>
- Venegas, G. R., Rahman, A. F., Lee, K. M., Ballard, M. S., & Wilson, P. S. (2019). Toward the Ultrasonic Sensing of Organic Carbon in Seagrass-Bearing Sediments. *Geophysical Research Letters*, 46(11), 5968–5977. <https://doi.org/10.1029/2019GL082745>
- Wahyudi, A'an J., Rahmawati, S., Irawan, A., Hadiyanto, H., Prayudha, B., Hafizt, M., Afdal, A., Adi, N. S., Rustam, A., Hernawan, U. E., Rahayu, Y. P., Iswari, M. Y., Supriyadi, I. H., Solihudin, T., Ati, R. N. A., Kepel, T. L., Kusumaningtyas, M. A., Daulat, A., Salim, H. L., ... Kiswara, W. (2020). Assessing carbon stock and sequestration of the tropical seagrass meadows in Indonesia. *Ocean Science Journal*, 55(1). <https://doi.org/10.1007/s12601-020-0003-0>
- Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J. B., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., Calladine, A., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., Short, F. T., & Williams, S. L. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(30), 12377–12381. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106>
- Wylie, L., Sutton-Grier, A. E., & Moore, A. (2016). Keys to Successful Blue Carbon Projects: Lessons Learned from Global Case Studies. *Marine Policy*, 65(March), 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.12.020>