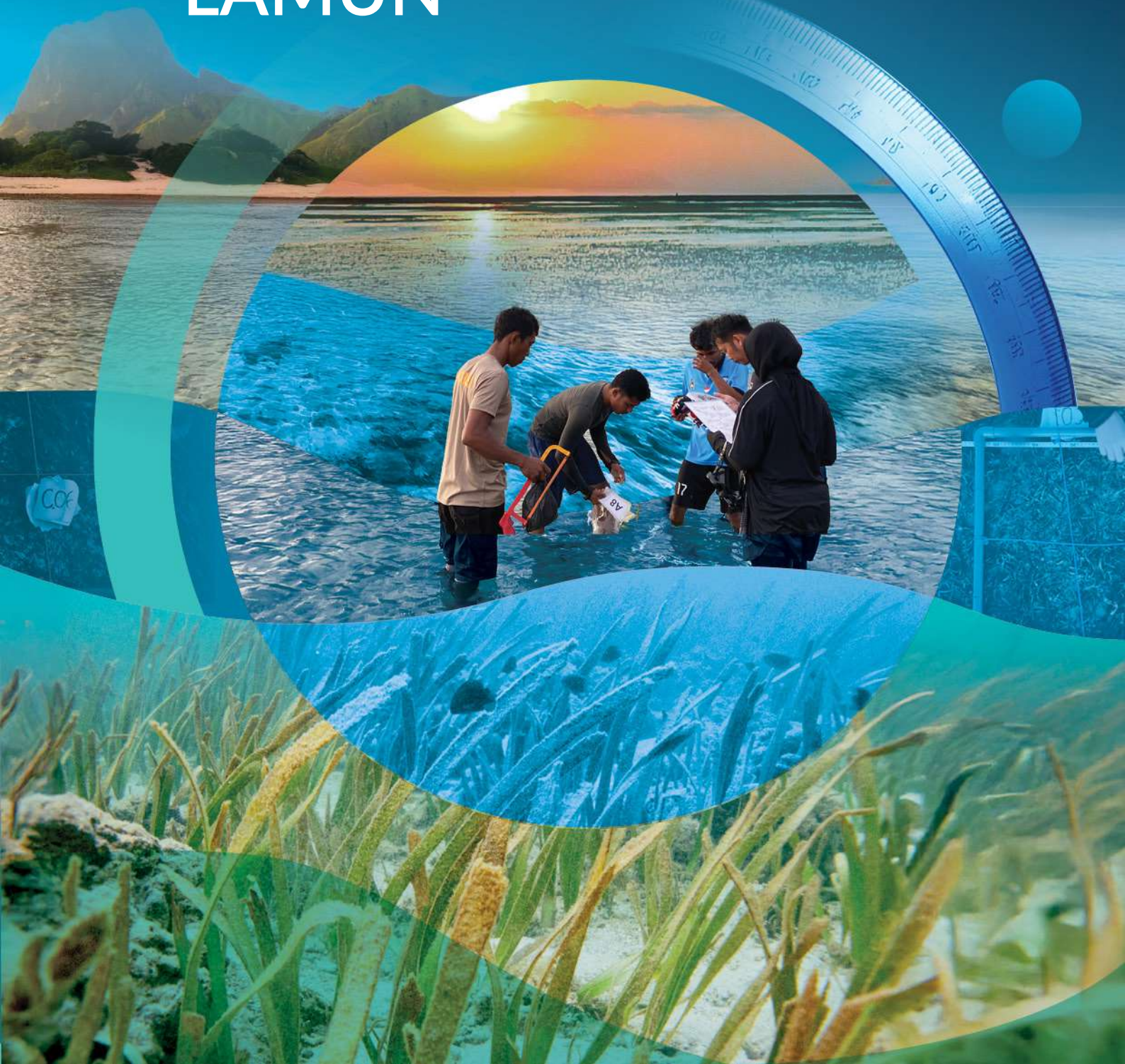




MANUAL PENGUKURAN KARBON BIRU PADA EKOSISTEM PADANG LAMUN



MANUAL PENGUKURAN KARBON BIRU PADA EKOSISTEM PADANG LAMUN



PENERBIT:

KEMENTERIAN KELAUTAN DAN PERIKANAN

TAHUN TERBIT

2025

ISBN 978-602-1278-47-5



PENGUKURAN KARBON BIRU PADA EKOSISTEM PADANG LAMUN

PENGARAH:

Direktur Jenderal Pengelolaan Kelautan

PENANGGUNG JAWAB:

Direktur Konservasi Ekosistem

PENYUNTING:

Udhi Eko Hernawan
Fery Kurniawan
Rizaldi Boer
Agustin Rustam
Yusmiana Puspitaningsih Rahayu
Andri Irawan
Leny Dwiastuty
Rini Widayanti

TERIMA KASIH DAN APRESIASI KEPADA:

Kementerian Kelautan dan Perikanan
Badan Riset dan Inovasi Nasional
Institut Pertanian Bogor
Universitas Gadjah Mada
Universitas Hasanuddin
Universitas Diponegoro
Global Green Growth Institute
Yayasan Rekam Nusantara
Yayasan Konservasi Alam Nusantara
Konservasi Indonesia
World Resource Institute Indonesia
World Wildlife Fund Indonesia
Yayasan Lamun Indonesia

DIDUKUNG OLEH:



In partnership with
Canada



PENULIS:

Udhi Eko Hernawan
Fery Kurniawan
Rizaldi Boer
Agustin Rustam
Yusmiana Puspitaningsih Rahayu
Andri Irawan
Leny Dwiastuty
Rini Widayanti
Wawan Kiswara
Novi Susetyo Adi
Pramaditya Wicaksono
Rohani Ambo Rappe
Ita Ritniasih
Anter Parulian Situmorang
Anwar Rizal
Fitrian Dwi Cahyo
Wiyudha Pandu Laksana
Kattia Setiyani Widiastuti
Dimas Muhammad Arsyad
Abdul Sukur
Julham MS. Pelupessy
Taswien Munier
Abdul Mukti
Yusuf Fajaryanto
Susan Lusiana
Panji Mahyatar
Citra Septiani
Jessica Pingkan
Aditya Benyamin

DESAIN ISI DAN LAYOUT:

Kireina Aisyah Zameira Medrilzam
Muhammad Luthfi Ramadhansyah

DOKUMENTASI:

© Kementerian Kelautan dan Perikanan
© GGGI Indonesia
© Yayasan Konservasi Alam Nusantara

SITASI:

Kementerian Kelautan dan Perikanan. (2025). Manual pengukuran karbon biru pada ekosistem padang lamun. Kementerian Kelautan dan Perikanan.

DITERBITKAN OLEH:

Kementerian Kelautan dan Perikanan
Jalan Medan Merdeka Timur 16, Jakarta Pusat

DIKELUARKAN OLEH:

Direktorat Jenderal Pengelolaan Kelautan



KATA SAMBUTAN

Menteri Kelautan dan Perikanan

Sakti Wahyu Trenggono

Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, Indonesia dikaruniai potensi kelautan yang sangat besar, termasuk ekosistem pesisir yang menjadi penopang kehidupan dan kesejahteraan. Di antara kekayaan tersebut, padang lamun hadir sebagai salah satu pahlawan iklim yang sering terlupakan. Ekosistem ini tidak hanya menjadi *nursery ground* bagi biota laut dan penjaga keseimbangan pesisir, tetapi lebih dari itu, ia merupakan penyimpan karbon (*blue carbon*) yang sangat efisien dan berdaya tahan lama. Kemampuannya menyimpan karbon dalam sedimen hingga ribuan tahun menempatkan lamun sebagai aset strategis dalam upaya global memitigasi dampak perubahan iklim.

Dalam kerangka mewujudkan komitmen Indonesia sebagaimana tercantum dalam *Nationally Determined Contribution* (NDC) dan strategi jangka panjang pembangunan rendah karbon, pengelolaan Karbon Biru menjadi keniscayaan. Namun, potensi yang besar ini hanya dapat dioptimalkan apabila didukung oleh data yang kredibel, metodologi yang terstandarisasi, dan tata kelola yang akuntabel. Kehadiran Manual Pengukuran Karbon Biru pada Ekosistem Padang Lamun ini merupakan langkah fundamental dan momentum yang berharga.. Manual ini menjadi penanda dimulainya era pendataan karbon biru yang seragam, ilmiah, dan dapat dipercaya, yang menjadi prasyarat utama untuk integrasinya

ke dalam Nilai Ekonomi Karbon (NEK) dan sebagai tindak lanjut kongkrit amanah dalam Perpres 110 Tahun 2025 tentang Penyelenggaraan Instrumen Nilai Ekonomi Karbon dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca Nasional..

Dokumen ini tidak hanya sekadar manual, melainkan sebuah instrumen kebijakan yang akan menggerakkan aksi kolektif. Ia menjadi dasar bagi terciptanya skema insentif yang tepat, membuka peluang pendanaan berkelanjutan, dan pada akhirnya menghubungkan upaya konservasi dengan peningkatan kesejahteraan masyarakat pesisir. Dengan demikian, pelestarian lamun tidak lagi dipandang sebagai beban, melainkan sebagai investasi berharga untuk ketahanan ekologi dan ekonomi bangsa.

Pada kesempatan ini, saya menyampaikan penghargaan dan apresiasi yang tulus kepada seluruh jajaran Kementerian Kelautan dan Perikanan, para ahli, mitra pembangunan, serta setiap pihak yang telah mendedikasikan pikiran dan tenaga untuk mewujudkan manual yang sangat penting ini. Semoga karya monumental ini dapat menjadi pemandu bagi seluruh pemangku kepentingan dalam mewujudkan pengelolaan ekosistem lamun yang berkelanjutan serta memperkuat posisi Indonesia sebagai pemimpin global dalam aksi iklim berbasis laut.

Jakarta, Desember 2025

Menteri Kelautan dan Perikanan

Sakti Wahyu Trenggono



KATA PENGANTAR

Direktur Jenderal Pengelolaan Kelautan

A. Koswara

Ekosistem padang lamun merupakan aset nasional yang memiliki peran strategis, tidak hanya sebagai penopang keanekaragaman hayati dan produktivitas perikanan, tetapi juga sebagai penyimpan karbon yang signifikan. Potensi ini menempatkan lamun sebagai salah satu pilar utama dalam agenda mitigasi dan adaptasi perubahan iklim Indonesia.

Sebagai bentuk komitmen nyata dalam mengimplementasikan Peraturan Presiden Nomor 110 Tahun 2025 tentang Penyelenggaraan Instrumen Nilai Ekonomi Karbon serta Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan No. 1 Tahun 2025 tentang Nilai Ekonomi Karbon Sektor Kelautan dan Perikanan, penyusunan Manual Pengukuran Karbon Biru pada Ekosistem Padang Lamun ini menjadi langkah krusial. Manual ini hadir untuk menjawab kebutuhan mendesak akan adanya acuan teknis nasional yang seragam, kredibel, dan dapat diverifikasi. Keberadaannya akan memastikan keseragaman metodologi, meningkatkan kapasitas nasional, dan menjadi fondasi bagi tata kelola data karbon biru yang andal.

Lebih dari sekadar manual teknis, dokumen ini merupakan instrumen kebijakan yang akan mendorong terciptanya nilai ekonomi dari ekosistem lamun. Dengan adanya data karbon yang akurat dan terstandarisasi, peluang untuk mengembangkan proyek karbon biru, baik dalam skema pasar karbon domestik maupun internasional, akan semakin terbuka.

Hal ini sejalan dengan tujuan untuk menghubungkan hasil konservasi dan rehabilitasi dengan pembiayaan berkelanjutan yang pada akhirnya meningkatkan kesejahteraan masyarakat pesisir.

Penyusunan manual ini merupakan buah dari kolaborasi dan sinergi yang konstruktif antara berbagai pemangku kepentingan, baik Kementerian Kelautan dan Perikanan, lembaga

riset, akademisi, serta mitra pembangunan. Kolaborasi ini mencerminkan komitmen kolektif kita untuk mewujudkan tata kelola sumber daya kelautan yang berkelanjutan, berbasis ilmu pengetahuan, dan berkeadilan.

Pada kesempatan ini, saya menyampaikan penghargaan dan apresiasi setinggi-tingginya kepada Direktorat Konservasi Ekosistem beserta seluruh tim penyusun dan para ahli yang telah mencurahkan pemikiran, waktu, dan dedikasinya untuk menyelesaikan dokumen yang sangat penting ini.

Semoga kehadiran manual ini dapat memperkuat kontribusi sektor kelautan terhadap pencapaian target *Nationally Determined Contribution (NDC)* Indonesia serta mempertegas kepemimpinan Indonesia dalam aksi iklim global.

Jakarta, Desember 2025

Direktur Jenderal Pengelolaan Kelautan

A. Koswara



PRAKATA

Direktur Konservasi Ekosistem

M. Firdaus Agung Kunto Kurniawan

Manual Pengukuran Karbon Biru pada Ekosistem Padang Lamun ini disusun sebagai respons atas tantangan teknis yang dihadapi di lapangan. Ketiadaan standar nasional yang seragam telah mengakibatkan variasi metodologi, ketidakpastian data, dan hambatan dalam mengintegrasikan kontribusi lamun ke dalam sistem Nilai Ekonomi Karbon (NEK) dan pelaporan internasional. Oleh karena itu, manual ini hadir untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menyajikan protokol baku yang bersifat ilmiah, terperinci, dan dapat diverifikasi.

Sebagai sebuah dokumen operasional, manual ini dirancang untuk menjadi panduan langkah-demi-langkah—mulai dari persiapan survei, pemetaan area, pengambilan sampel biomassa dan sedimen, analisis laboratorium, pengolahan data, hingga perhitungan cadangan karbon dan emisi. Setiap prosedur disusun dengan mengacu pada kaidah saintifik dan praktik terbaik global, yang telah diadaptasi dengan karakteristik biofisik dan kelembagaan Indonesia. Penekanan pada prinsip *Quality Assurance/Quality Control* (QA/QC) di seluruh tahapan diharapkan dapat menjamin akurasi, konsistensi, dan kredibilitas data yang dihasilkan, sehingga memenuhi standar *Measurement, Reporting, and Verification* (MRV) yang dipersyaratkan.

Keberhasilan implementasi manual ini di lapangan sangat bergantung pada kolaborasi dan komitmen semua pihak. Kami mendorong agar manual ini tidak hanya menjadi acuan teknis bagi para peneliti dan praktisi, tetapi juga menjadi alat peningkatan kapasitas bagi pemerintah daerah, lembaga riset, serta masyarakat lokal. Partisipasi aktif semua pemangku kepentingan merupakan kunci untuk memastikan bahwa pengukuran karbon biru dapat mendukung kebijakan konservasi, rehabilitasi, dan tata kelola ekosistem lamun secara berkelanjutan.

Penghargaan dan ucapan terima kasih kami sampaikan kepada seluruh tim penyusun, para ahli, mitra teknis, dan para pihak yang telah memberikan masukan berharga selama proses penyusunan, uji coba, dan finalisasi manual ini. Semoga kehadiran dokumen ini dapat menjadi landasan operasional yang kokoh bagi pengelolaan karbon biru di Indonesia, sekaligus berkontribusi nyata terhadap aksi iklim dan peningkatan kesejahteraan masyarakat pesisir.

Jakarta, Desember 2025

Direktur Konservasi Ekosistem

M. Firdaus Agung Kunto Kurniawan

DAFTAR ISI

Kata Sambutan	II
Kata Pengantar	III
Prakata	IV
Daftar Isi	V
Daftar Tabel	VII
Daftar Gambar	VII
Daftar Istilah dan Singkatan	VIII

1 PENDAHULUAN 1

1.1	Latar Belakang	2
1.2	Tujuan	3
1.3	Ruang Lingkup	3

2 PERSIAPAN SURVEI 4

2.1	Pembuatan peta kerja sementara	5
2.2	Informasi pasang surut	5
2.3	Persiapan peralatan dan perlengkapan	6
2.4	Penentuan lokasi sampling	6
2.5	Pembentukan tim survei	7

3 PEMETAAN AREA PADANG LAMUN 4

3.1	Survei <i>ground-truth</i> (lapangan)	5
3.2	Akuisisi data citra	5

3.3	Pra-pengolahan	11
3.4	Pengolahan citra	13
3.5	Validasi dan Akurasi	13
3.6	Perhitungan Luas Padang Lamun	14

4 PENGUKURAN KONDISI EKOLOGI DAN LINGKUNGAN 15

4.1	Kondisi Ekologis Lamun	16
4.1.1	Akuisisi data citra	17
4.1.2	Langkah Kerja	19
4.1.3	Analisis Data	21
4.2	Kondisi Lingkungan Lamun	23
4.2.1	Alat dan Bahan	23
4.2.2	Langkah Kerja	25
4.2.3	Analisis data	26

5 PENGAMBILAN SAMPEL BIOMASSA 27

5.1	Alat dan Bahan	28
5.2	Langkah Kerja	30
5.2.1	Metode <i>Coring</i>	30
5.2.2	Metode Ekstrapolasi Tegakan	31
5.3	Penanganan Sampel	31
5.4	Pengiriman Sampel	32

6 PENGAMBILAN SAMPEL SEDIMEN 33

6.1	Alat dan Bahan	34
6.2	Langkah Kerja	36
6.3	Penanganan Sampel	39
6.4	Pengiriman Sampel	39

7 ANALISIS LABORATORIUM DAN DATA 40

7.1	Alat dan Bahan	41
7.2	Analisis Kandungan Karbon dalam Biomassa Lamun	43
7.2.1	Langkah Kerja	43
7.2.2	Contoh Perhitungan Cadangan Karbon pada Biomassa	44
7.3	Analisis Kandungan Karbon dalam Sedimen Lamun	45
7.3.1	Langkah Kerja	45
7.3.2	Contoh Perhitungan Cadangan Karbon di Sedimen Lamun	47

8 PERHITUNGAN CADANGAN KARBON DAN EMISI 49

8.1	Perhitungan Cadangan Karbon	50
8.1.1	Perhitungan Cadangan Karbon Biomassa	50
8.1.2	Perhitungan Cadangan Karbon Sedimen	51
8.1.3	Perhitungan Cadangan Karbon Total Kawasan	52
8.2	Perhitungan Emisi	53
8.2.1	EmisiCO ₂ dari Ekstraksi (ekskavasi)	53
8.2.2	EmisiCO ₂ dari padang lamun terdegradasi	54

8.2.3	Perhitungan SerapanCO ₂ dari Pemulihan	54
8.2.4	Perhitungan Emisi N ₂ O dari Marikultur (Akuakultur)	54

9 PENDUGAAN BASELINE, PRINSIP ADDITIONALITY DAN SAFEGUARD 56

9.1	Baseline	57
9.2	Additionality	58
9.2.1	Analisis Regulatory Additionality	58
9.2.2	Analisis Financial Additionality	58
9.2.3	Pendekatan Berbasis Kinerja/ Performance-based Approaches	59
9.3	Safeguard	60
9.3.1	Kebocoran Emisi (Leakage)	60
9.3.2	Risiko Balik (Reversal)	60
9.3.3	Ketidapastian (Uncertainty)	61

10 PENGELOLAAN DATA DAN PELAPORAN 62

10.1	Macam Data	63
10.2	Penyimpanan dan Mekanisme berbagi Data	63
10.3	Pelaporan	64

DAFTAR PUSTAKA 67

LAMPIRAN 69



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Konsep umum <i>Confusion matrix</i>	13	Tabel 4.5	Alat dan bahan untuk pengambilan data lingkungan pendukung	23
Tabel 4.1	Kondisi padang lamun dan metode pengambilan data yang disarankan	17	Tabel 5.1	Alat dan bahan untuk pengambilan sampel biomassa lamun	28
Tabel 4.2	Alat dan bahan untuk pengambilan data kondisi lamun	17	Tabel 6.1	Alat dan bahan untuk pengambilan sampel sedimen	34
Tabel 4.3	Contoh format tabel hasil analisis tutupan lamun	22	Tabel 7.1	Alat dan bahan untuk analisis sampel di laboratorium	41
Tabel 4.4	Contoh format tabel hasil analisis kerapatan lamun	22	Tabel 7.2	Faktor konversi kandungan karbon organik dari berat kering per jenis lamun di Indonesia	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Prosedur pemetaan padang lamun	9	Gambar 6.4	Pipa PVC dipotong untuk membuang air yang ada di bagian atas sampel, kemudian pipa ditutup kembali	38
Gambar 4.1	Alur pemilihan metode pengukuran kondisi ekologi lamun	16	Gambar 6.5	Pipa dibelah dengan gerinda	38
Gambar 4.2	Contoh estimasi tutupan daun saat posisi rebah ke posisi tegak	19	Gambar 6.6	Sampel inti sedimen dipotong setiap 5 cm menggunakan pisau keramik	38
Gambar 4.3	Contoh format kertas kerja kondisi lamun	20	Gambar 7.1	Alur analisis sampel biomassa untuk pengukuran karbon organik	43
Gambar 4.4	Penetapan lokasi transek lamun	25	Gambar 7.2	Sampel sedimen kering yang sudah dihaluskan disimpan dalam wadah berlabel	45
Gambar 4.5	Contoh format kertas kerja kondisi lingkungan	26	Gambar 7.3	Alur analisis sampel sedimen untuk pengukuran karbon organik	47
Gambar 4.6	Contoh analisis kondisi lingkungan	36	Gambar 9.1	Konsep <i>baseline</i> (garis AB), <i>leakage</i> /kebocoran (garis AC), dan perolehan (garis AD), dalam proyek karbon biru selama periode waktu t1 hingga t2. <i>Additionality</i> adalah luas bidang “abef” dikurangi bidang “abcd” (Murdiyarso dan Suryadiputra. 2003)	57
Gambar 6.2	Alat dan bahan untuk pengambilan sampel sedimen	36			
Gambar 6.3	Bagian atas pipa ditutup dan dibungkus dengan lakban	37			

DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN

Alat coring	Alat yang digunakan untuk mengambil sampel <i>core</i> (inti) sedimen atau biomassa. Alat ini berbentuk pipa/silinder panjang dengan salah satu ujung terbuka dan ujung lainnya terdapat pegangan.
Atenuasi	Penurunan tingkat atau intensitas besaran fisik (misalnya energi), seperti gelombang cahaya, suara, atau sinyal elektromagnetik, ketika bergerak melalui medium tertentu
Bentik	Berada di dasar perairan
Biomassa	Bahan organik yang berasal dari organisme hidup
DO	<i>Dissolved Oxygen</i> , yaitu kadar oksigen yang terlarut dalam perairan
DOI	<i>Digital Object Identifier</i> , yaitu kode unik dan permanen yang mengidentifikasi konten digital seperti artikel jurnal, ebook, atau data. Kode ini berfungsi sebagai tautan persisten ke objek tersebut, sehingga dapat selalu ditemukan meskipun lokasi daringnya (URL) berubah. DOI mempermudah pelacakan, pengelolaan, dan sitasi karya ilmiah, serta meningkatkan kredibilitasnya.
Double counting	Situasi ketika satu unit pengurangan emisi atau kredit karbon diklaim oleh lebih dari satu pihak (misalnya, oleh negara dan perusahaan sekaligus), atau satu unit emisi diterbitkan lebih dari sekali oleh dua sistem registri, atau satu unit digunakan untuk memenuhi target yang berbeda (misalnya NDC dan offset perusahaan)
Epifit	Organisme kecil (umumnya berukuran mikroskopis, seperti mikroalga dan bakteri) yang hidup menempel pada permukaan daun lamun
Faktor emisi	Nilai rata-rata jumlah gas rumah kaca yang dilepaskan ke atmosfer per satuan aktivitas atau kondisi tertentu
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> , adalah badan ilmiah internasional yang dibentuk oleh PBB untuk menilai informasi ilmiah, teknis, dan sosio-ekonomi terkait perubahan iklim.
Kompaksi sedimen	Proses pemadatan atau penyusutan volume sedimen yang terjadi saat pengambilan inti sedimen (<i>sediment core</i>), biasanya karena tekanan mekanis selama penetrasi alat <i>corer</i> ke dalam substrat dan saat ekstraksi inti sedimen ke permukaan.

Komposit citra	Penggabungan kanal warna (misalnya merah, hijau, biru) untuk membentuk gambar penuh warna.
LOI	<i>Loss on Ignition</i> , yaitu metode kimia analitik yang mengukur persentase berat sampel yang hilang saat dipanaskan pada suhu tinggi untuk menguapkan atau membakar komponen volatil, seperti air dan bahan organik. Perbedaan berat sebelum dan sesudah pemanasan digunakan untuk menentukan kadar zat-zat yang diukur
MRV	<i>Measurement, Reporting, and Verification</i> (Pengukuran, Pelaporan, dan Verifikasi), yaitu proses sistematis untuk memastikan klaim pengurangan atau penyerapan emisi karbon benar-benar akurat, terukur, dan transparan
MSDS	<i>Material Safety Data Sheet</i> , yaitu dokumen yang berisi informasi rinci tentang sifat kimia, potensi bahaya, penanganan aman, penyimpanan, dan prosedur darurat terkait suatu bahan kimia.
Piksel	Elemen terkecil dari gambar digital yang merepresentasikan satu titik warna atau intensitas cahaya dalam bidang dua dimensi. Setiap citra digital terdiri dari kumpulan piksel yang tersusun dalam baris dan kolom.
Raster	Salah satu bentuk representasi data spasial dengan menggunakan grid piksel
RGB	<i>Red, Green, Blue</i> , yaitu sistem kanal warna yang terdiri dari komponen warna merah, biru, dan hijau
RF	Random Forest, yaitu metode machine learning, dengan menggabungkan banyak model sederhana (decision tree) untuk membentuk model yang lebih kuat.
Rhizoma	Bagian rimpang lamun
Transek	Garis atau jalur lurus (bisa imajiner atau nyata) yang digunakan sebagai dasar pengambilan data dalam survei lapangan, terutama dalam studi ekologi dan lingkungan. Sepanjang garis ini, pengamat mencatat keberadaan, jumlah, atau kondisi objek yang diamati, seperti tumbuhan, hewan, atau substrat.



PENDAHULUAN

Indonesia memiliki salah satu keanekaragaman lamun tertinggi dengan 17 spesies yang tersebar di hampir seluruh wilayah pesisir dengan potensi cadangan karbon yang sangat besar (Unsworth *et al.*, 2018; Kurniawan *et al.* 2024). Dari sisi iklim, lamun menyerap karbon dioksida melalui fotosintesis, menyimpannya dalam biomassa daun, batang, dan akar, serta mengendapkan materi organik ke dalam sedimen. Sebagian besar cadangan karbon lamun berada di sedimen, yang dapat bertahan ribuan tahun bila ekosistem terjaga (Fourqurean *et al.*, 2012; Duarte *et al.*, 2013).

Secara global, padang lamun menyimpan cadangan karbon sebesar 4,2–8,4 Pg C, dengan rata-rata akumulasi karbon sedimen di daerah Indo-Pasifik sebesar 3.7 - 161 kg C ha⁻² tahun⁻¹ (Fourqurean *et al.*, 2012; Miyajima *et al.* 2022). Walaupun hanya menutupi <0,2% dari dasar laut dunia, kontribusinya terhadap total cadangan karbon laut dangkal mencapai 10–18% (McLeod *et al.*, 2011). Angka ini menempatkan lamun setara dengan hutan hujan tropis dalam hal kepadatan karbon, meski dengan mekanisme penyimpanan berbeda.

Namun, kondisi ekosistem lamun di Indonesia menghadapi tantangan serius. Kajian menunjukkan 30–40% padang lamun nasional berada dalam kondisi rusak akibat konversi lahan pesisir, reklamasi, pencemaran, penangkapan ikan destruktif, hingga dampak perubahan iklim (UNEP-WCMC, 2020; Unsworth *et al.*, 2018; Hernawan *et al.* 2021). Degradasi ini tidak hanya menurunkan produktivitas pesisir, tetapi juga berpotensi melepas kembali cadangan karbon sedimen ke atmosfer, sehingga berkontribusi pada peningkatan emisi gas rumah kaca. Dengan demikian, keberlanjutan padang lamun memiliki konsekuensi langsung pada pencapaian target iklim nasional sekaligus kesejahteraan masyarakat pesisir.

Menyadari pentingnya peran karbon biru, Indonesia telah menegaskan komitmen mitigasi perubahan iklim melalui berbagai instrumen kebijakan. Pada tataran operasional, berbagai regulasi nasional memperkuat posisi karbon biru dalam kebijakan iklim. Peraturan Presiden No. 110 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon (NEK) menjadi

tonggak penting integrasi karbon biru dalam mekanisme berbasis pasar dan non-pasar. Regulasi ini diikuti oleh Permen KP No. 1 Tahun 2025 tentang Tata Cara Penyelenggaraan NEK Sektor Kelautan, yang memasukkan padang lamun sebagai ekosistem yang dapat menghasilkan kredit karbon melalui konservasi dan restorasi. Kepmen KP No. 52 Tahun 2024 menetapkan Peta Jalan Mitigasi Perubahan Iklim Sektor Kelautan dan Perikanan, yang secara eksplisit mencantumkan perlindungan, rehabilitasi, dan pengelolaan berkelanjutan lamun sebagai strategi mitigasi prioritas.

Meskipun kesadaran akan pentingnya lamun terus meningkat, terdapat tantangan besar dalam pengukuran, pelaporan, dan verifikasi (*Measurement, Reporting and Verification/MRV*) karbon biru. Metodologi yang digunakan masih bervariasi, keterbatasan kapasitas teknis di lapangan, serta kurangnya data spasial dan biofisik skala nasional menyebabkan ketidakpastian dalam estimasi cadangan karbon. Padahal, keakuratan data sangat penting untuk memastikan kredibilitas laporan nasional, menarik investasi karbon, dan mengurangi risiko double counting dalam perdagangan karbon internasional (Macreadie *et al.*, 2019).

Dalam konteks ini, penyusunan manual pengukuran karbon biru pada ekosistem padang lamun menjadi krusial. Manual ini akan menyediakan rujukan teknis yang terstandar, mulai dari persiapan survei, penyiapan peta, kondisi ekologi dan lingkungan lamun, pengambilan sampel biomassa dan sedimen, analisis laboratorium dan data, perhitungan cadangan karbon dan emisi, penentuan *baseline* dan *Additionality*, hingga pengelolaan data dan pelaporan. Manual ini dikembangkan berdasarkan praktik-praktik baik terkini yang umumnya dirujuk dalam pengembangan proyek karbon sampai pada waktu penulisannya. Rujukan tersebut termasuk, tapi tidak terbatas pada *Clean Development Mechanism* (CDM), *Paris Agreement Crediting Mechanism* (PACM), *Verra-Verified Carbon Standard* (VCS), *Plan Vivo-PV Nature*, *Kerangka Metodologi* dan *Panduan Pengukuran Karbon Biru* (KLHK), dan jurnal ilmiah.

1.2

Tujuan

Manual Pengukuran Karbon Biru Lamun disusun untuk menjawab kebutuhan mendesak mengenai pedoman teknis yang seragam, akurat, dan dapat diterapkan secara luas di Indonesia. Lebih dari sekadar panduan teknis, manual ini dirancang untuk membekali pengguna dengan pemahaman konseptual, prosedur lapangan, serta tahapan analisis laboratorium yang jelas.

Selain itu, manual ini disusun sebagai instrumen pendukung kebijakan dalam pengelolaan pesisir dan laut. Dengan tersedianya data karbon lamun yang akurat dan terverifikasi, Kementerian Kelautan dan Perikanan dapat menggunakannya sebagai dasar penyusunan kebijakan konservasi, rehabilitasi, dan tata kelola kawasan, sekaligus sebagai instrumen untuk mengintegrasikan ekosistem lamun dalam perhitungan nilai ekonomi karbon.

1.3

Ruang Lingkup

Manual ini mencakup seluruh aspek pengukuran karbon biru pada padang lamun di Indonesia. Dari sisi ekosistem, pedoman ini berlaku untuk seluruh hamparan lamun, baik yang berada di kawasan konservasi perairan maupun di luar kawasan, dengan mempertimbangkan kondisi biofisik, sosial, dan pemanfaatannya. Dari sisi komponen karbon, manual ini menguraikan metode pengukuran cadangan karbon pada biomassa dan cadangan karbon sedimen.

Ruang lingkup metodologi mencakup tahap

persiapan survei, penyiapan peta, kondisi ekologi dan lingkungan lamun, pengambilan sampel biomassa dan sedimen, analisis laboratorium dan data, perhitungan cadangan karbon dan emisi, penentuan *baseline* dan *Additionality*, hingga pengelolaan data dan pelaporan.



PERSIAPAN SURVEI

2.1

Pembuatan peta kerja sementara

Peta kerja diperlukan sebagai acuan lokasi padang lamun dimana survei akan dilakukan. Peta tersebut setidaknya menampilkan informasi dimana area padang lamun berada dan kedalamannya. Peta ini membantu dalam penentuan lokasi survei dan memastikan bahwa sampel yang diambil benar-benar representatif dari populasi yang ada, serta keamanan dan aksesibilitas tim survei saat menuju stasiun pengambilan sampel. Hal ini bertujuan agar sampel didapatkan yang representatif, memiliki kekuatan statistik, efektif dan efisien secara biaya dan waktu.

Peta kerja sederhana disiapkan mengacu pada Peta Padang Lamun Nasional yang dikeluarkan oleh Wali Data Lamun Nasional. Jika sumber peta tersebut tidak memungkinkan diperoleh, maka peta kerja sementara dapat diolah dari sumber lainnya seperti Google Earth. Dari peta tersebut bisa dilihat lokasi yang mau kita kunjungi dan titik-titik mana saja yang diperkirakan ditumbuhi oleh lamun.

2.2

Informasi pasang surut

Ekosistem lamun hidup di daerah perairan pasang surut, sehingga ketinggian air baik pada saat pasang maupun surut sangat penting diperhatikan agar tidak menjadi kendala di lapangan. Oleh karena itu prediksi pasang surut air laut sangat penting dilakukan sebelum pengukuran dilakukan untuk kelancaran kegiatan dan keselamatan kerja. Pengambilan biomassa dan sedimen paling baik adalah saat surut.

Sumber informasi terkait kondisi pasang surut dapat diperoleh antara lain dari:



Tabel pasang surut dari Pusat Hidro-Oseanografi TNI-AL



Informasi masyarakat lokal



Jejaring data pengukuran pasang surut air laut dari Badan Informasi Geospasial (BIG) yang dapat diakses melalui tautan <https://srgi.big.go.id/tides>;



Sumber aplikasi lainnya

2.3

Persiapan peralatan dan perlengkapan

Peralatan dan perlengkapan yang diperlukan dalam survei adalah sebagai berikut:

Peralatan dasar pribadi



Baju lapangan (celana dan baju lengan panjang) yang mampu melindungi paparan sinar matahari, topi lebar, sarung tangan berbahan katun, sepatu untuk berjalan di padang lamun (sepatu plastik/ karet, sepatu karang), peralatan selam dasar (masker/ google, snorkle, dan fin), perlengkapan P3K, dan obat2an pribadi/vitamin.

Perbekalan makanan dan minuman



Makanan dan minuman yang cukup untuk memenuhi kebutuhan energi dan air selama pelaksanaan survei per hari.

Peralatan dan perlengkapan sampling



Daftar peralatan dan perlengkapan yang diperlukan pada bagian ini dijelaskan pada Bab selanjutnya sesuai prosedur masing-masing.

2.4

Penentuan Lokasi sampling

Penentuan lokasi sampling bertujuan untuk menentukan tempat pengambilan sampel/data yang paling sesuai atau representatif, sehingga data yang diperoleh relevan, bernilai, dan dapat dipercaya.

Dalam konteks pengumpulan data karbon, proses ini memastikan bahwa lokasi yang dipilih memenuhi tujuan spesifik, mencakup keberagaman kondisi (terutama jika karakteristik lokasi bervariasi), meminimalkan bias dalam pengambilan data, serta mengoptimalkan waktu dan sumber daya selama survei.

Berikut ini langkah yang harus dilakukan untuk penentuan lokasi pengambilan sampel:

1. Identifikasi lokasi potensial berdasarkan peta kerja sementara.
2. Gunakan data lokal terkait tutupan lamun apabila informasi dari peta atau citra satelit tidak tersedia.
3. Berdasarkan pengamatan pada peta kerja sementara yang ada atau gambar citra dari Google Earth, tentukan kawasan padang lamun yang akan dilakukan pengambilan sampel/data.
4. Dari kawasan tersebut, lokasi pengambilan data untuk pengukuran kondisi ekologi dijelaskan di Bab 4, sedangkan untuk pengukuran cadangan karbon dijelaskan di Bab 5 dan 6.



Pembentukan Tim Survei

Pembentukan tim survei karbon biru lamun dimulai dengan identifikasi kebutuhan teknis dan logistik sesuai dengan tujuan kegiatan, lokasi, serta metodologi yang akan digunakan. Idealnya, tim mencakup anggota yang menguasai keahlian setidaknya tentang:

1. ekologi dasar padang lamun,
2. karbon biru di padang lamun,
3. teknis pengambilan sampel lamun dan sedimen di lapangan,
4. teknis pemetaan habitat lamun dengan pendekatan remote sensing,
5. analisa karbon di laboratorium,
6. perhitungan cadangan dan emisi,
7. perhitungan *baseline*, *Additionality*, dan pengembangan kerangka pengaman/*safeguard* (opsional).

Proses rekrutmen mesti dilakukan secara terbuka dan transparan, dengan mempertimbangkan keterampilan teknis, pengalaman kerja lapangan dan kesiapan fisik untuk bekerja di lapangan, serta kemampuan bekerja dalam tim. Calon anggota juga diharapkan memiliki komitmen terhadap konservasi padang lamun dan mampu bekerja secara kolaboratif dalam tim multidisiplin. Selain keterampilan teknis, kemampuan komunikasi dan adaptasi sosial sangat penting, terutama dalam interaksi dengan masyarakat lokal dan pemangku kepentingan. Tim juga perlu memiliki struktur koordinasi yang jelas, termasuk penanggung jawab teknis, dokumentasi, dan komunikasi eksternal.

Dalam proses pembentukan tim, prinsip Kesetaraan Gender, Disabilitas, dan Inklusi Sosial (*Gender Equality, Disability and Social Inclusion/GEDSI*) harus diintegrasikan secara aktif. Ini mencakup upaya untuk melibatkan perempuan, pemuda, penyandang disabilitas, dan komunitas lokal yang sering terabaikan dalam kegiatan survei. Perekrutan harus mempertimbangkan hambatan partisipasi seperti akses informasi, mobilitas, dan norma sosial, serta menyediakan dukungan yang memungkinkan keterlibatan setara, seperti pelatihan inklusif dan penyesuaian tugas lapangan. Dengan mengintegrasikan prinsip tersebut, tim survei tidak hanya memperkuat legitimasi dan keberlanjutan kegiatan lapangan, tetapi juga mendorong pemberdayaan dan keadilan sosial dalam upaya konservasi ekosistem lamun.





PEMETAAN AREA PADANG LAMUN

Pemetaan area padang lamun dilakukan untuk mendapatkan data luasan kawasan padang lamun yang diukur cadangan karbonnya. Dengan mengetahui luas padang lamun, maka jumlah total cadangan karbon yang terkandung di dalam satu kawasan padang lamun dapat diketahui.

Secara umum, proses pemetaan ekosistem padang lamun mengacu pada Keputusan Direktur Jenderal Pengelolaan Kelautan dan Ruang Laut Nomor 45 Tahun 2024 Tentang Pedoman Teknis Penyusunan Informasi Geospasial Habitat Bentik Laut Dangkal. Pada prinsipnya, pemetaan padang lamun adalah pemetaan habitat bentik yang di dalamnya terdapat kelas padang lamun. Pada manual ini, metode pemetaannya adalah dengan pendekatan penginderaan jauh, dengan langkah kerja sesuai Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Prosedur pemetaan padang lamun



3.1

Survei ground-truth (lapangan)

Manual ini menggunakan metode “*stop and go*”, yaitu cara survei di mana pengamat bergerak dari satu titik ke titik lain di area studi. Saat berhenti di suatu titik, pengamat mengambil foto, mencatat titik koordinat, dan mencatat jenis habitat yang ditemukan di titik tersebut.

Manual ini menggunakan skema klasifikasi ekologis yang mencakup **empat tipe habitat utama**, yaitu:



karang



lamun



makroalga



substrat dasar

Secara umum prosedurnya adalah sebagai berikut:

1. Siapkan peralatan sebagai berikut:
 - a. Perangkat genggam sistem posisi global (*GPS handheld*)
 - b. Form perekaman data yang dicetak di kertas tahan air
 - c. Pensil 2B
 - d. Kamera spesifikasi bawah air (*underwater*)
 - e. Alat selam dasar
2. Siapkan peta kerja sementara (dijelaskan di Bab 2)
3. Pada peta kerja sementara, tentukan area pengambilan data dan rencana alur pergerakan pengambilan data. Ini dapat dilakukan dengan dua pilihan pendekatan atau kombinasi keduanya:
 - a. *Purposive sampling*: Area dipilih secara sengaja berdasarkan variasi jenis habitat dan kondisi fisik area studi.
 - b. *Random sampling*: Area dipilih secara acak di lokasi yang telah ditentukan.
4. Lakukan pengambilan data dengan bergerak mengikuti alur pergerakan pengambilan data, bisa dengan berjalan kaki, snorkeling, atau berperahu.
5. Secara periodik atau setiap berpindah beberapa meter dari satu titik ke titik lainnya, catat koordinat geografis menggunakan perangkat GPS;
6. Setelah lokasi koordinat geografis dicatat, tentukan dan catat tipe habitat dan kedalaman air di titik tersebut.
7. Ambil foto dengan kamera.

3.2

Akuisisi data citra

Untuk keperluan pemetaan ini, manual merekomendasikan citra dari Sentinel-2. Dengan resolusi spasial 10 meter, citra ini cukup efektif digunakan hingga skala 1:25.000. Citra dengan resolusi lebih tinggi dapat digunakan dalam pemetaan tergantung ketersediaan citra, luas wilayah yang dipetakan, dan kedetailan informasi yang diinginkan.

Data Sentinel-2 juga dapat diakses melalui beberapa tautan berikut:

1. Copernicus Open Access Hub

Ini adalah portal utama untuk mengakses data Sentinel secara gratis. Data yang tersedia meliputi Sentinel-1, Sentinel-2, dan Sentinel-3. Situs ini menyediakan berbagai produk yang bisa diunduh secara langsung. Websitenya adalah :
<https://scihub.copernicus.eu/>

2. Google Earth Engine (GEE)

Platform ini memungkinkan akses ke berbagai set data satelit, termasuk Sentinel-1 dan Sentinel-2. GEE memungkinkan pengguna untuk memproses dan menganalisis data tanpa perlu mengunduhnya. Alamat websitenya adalah :
<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel/>

3. Amazon Web Services (AWS)

Data Sentinel-1 dan Sentinel-2 juga tersedia di AWS Public Datasets. Ini memungkinkan akses cepat ke data melalui cloud tanpa harus menunggu proses download yang lama. Alamat websitenya adalah :
<https://registry.opendata.aws/sentinel-2/>

4. Sentinel Hub

Layanan ini menawarkan akses ke data Sentinel dengan alat visualisasi online dan API yang memungkinkan integrasi ke dalam aplikasi pengguna. Alamat websitenya adalah :
sentinel-hub.com

5. Earthdata Search by NASA

Platform ini menyediakan akses ke berbagai data penginderaan jauh, termasuk data Sentinel. Alamat websitenya adalah:
<https://www.earthdata.nasa.gov/technology/harmonized-landsat-sentinel-2-hls-data>

3.3

Pra-Pengolahan

Tahap ini dilakukan untuk menghasilkan data citra yang telah dikoreksi dari distorsi citra, *noise*, *subset/cropping*, dan kondisi air. Umumnya, beberapa data citra telah dikoreksi secara sistematis oleh penyedia data, baik untuk kualitas radiometrik maupun geometrik, sehingga tahap ini bersifat opsional. Bila diperlukan, data citra tersebut masih memerlukan koreksi dari kesalahan non-sistematis yang umumnya disebabkan oleh pergerakan satelit.

Secara umum, langkah untuk pra-pengolahan adalah sebagai berikut:

1. Koreksi radiometrik

Koreksi ini dilakukan untuk meningkatkan kualitas gambar dari gangguan kondisi atmosfer, *scene illumination*, geometri, dan karakteristik respon instrumen. Prosedur umum untuk koreksi tahap ini adalah dengan metode *Dark Object Subtraction* (DOS).

2. Koreksi geometrik

Beberapa faktor dapat menyebabkan distorsi geometrik pada citra, seperti ketinggian, kecepatan sensor, kelengkungan bumi, bias di atmosfer, perbedaan relief permukaan, dan sebagainya. Untuk mengatasi distorsi tersebut, citra perlu melalui proses koreksi geometrik. Koreksi ini dilakukan dengan menyesuaikan posisi koordinat citra agar sesuai dengan koordinat referensi di permukaan bumi.

3. Masking

Masking adalah proses untuk memilih dan memotong bagian citra yang ingin dianalisis, berdasarkan batas tertentu. Dalam pemetaan padang lamun, bagian yang dipilih biasanya hanya wilayah perairan dangkal, karena lamun tumbuh di area tersebut. Tujuan *Masking* adalah menghilangkan bagian citra yang tidak relevan, seperti daratan dan laut dalam, agar analisis lebih fokus dan akurat.

Untuk membedakan antara daratan dan perairan, biasanya digunakan teknik transformasi spektral seperti *Normalized Difference Water Index* (NDWI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), atau penggunaan panjang gelombang inframerah.

Selain itu, dapat dilakukan secara manual, yaitu dengan menggambar langsung batas wilayah di layar menggunakan citra komposit. Dalam panduan ini, digunakan cara manual karena lebih mudah dan tidak membutuhkan pengetahuan teknis yang rumit.

Berikut adalah langkah-langkahnya:

1. Buka citra yang sudah dikoreksi dan tampilkan dalam bentuk citra komposit.
2. Cari dan kenali area perairan dangkal tempat padang lamun berada.
3. Gambar batas area tersebut menggunakan alat poligon.
4. Simpan hasil gambar batas sebagai berkas vektor di folder kerja.
5. Gunakan berkas vektor tersebut untuk menutupi bagian citra yang tidak diperlukan.
6. Simpan citra hasil *Masking* ke dalam folder kerja.

4) Komposit citra

Tahap ini digunakan untuk menampilkan citra dengan kombinasi warna tertentu. Dalam penginderaan jauh, sistem warna RGB (*Red, Green, Blue*) sering dipakai untuk menyajikan data citra. Proses komposit dilakukan dengan menggabungkan beberapa pita citra agar menghasilkan citra berwarna penuh, sehingga memudahkan interpretasi objek. Citra berwarna penting karena mata manusia lebih terbiasa membedakan objek berdasarkan warna.

Untuk studi pesisir, komposit warna sejati biasanya digunakan. Komposit ini memanfaatkan spektrum visual merah, hijau, dan biru. Cahaya hijau dan biru mampu menembus kolom air dengan baik, sehingga dapat membantu mendeteksi objek di bawah permukaan hingga beberapa meter kedalaman.

5) Image enhancement

Dalam proses pemetaan padang lamun menggunakan penginderaan jauh, sering kali terjadi gangguan yang dapat mempengaruhi akurasi hasil pemetaan akibat kondisi air, terutama atenuasi dan *glint* (kilau permukaan). Ini dapat menurunkan kualitas citra dan perlu dikoreksi agar fitur dasar perairan lebih terlihat. Prosedur untuk image enhancement yang dilakukan ada 2 yaitu *glint removal* dan koreksi kolom air.

Glint removal dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$R_{vis\ x}^x = R_{vis} - b_i \times (R_{NIR\ x}^x - R_{minNIR})$$

Keterangan:

$R_{vis\ x}^x$: Saluran hasil *de-glint*

R_{vis} : Saluran visible yang digunakan

b_i : Gradien regresi hasil hubungan sampel pelatihan saluran inframerah dekat dengan saluran saluran tampak

R_{NIR} : Saluran inframerah dekat

R_{minNIR} : Nilai piksel minimum saluran inframerah dekat

Untuk koreksi kolom air, metode yang dipakai adalah *Depth-Invariant Index* (DII) yang dikembangkan oleh Lyzenga (1978). Metode ini memungkinkan untuk mengoreksi efek kedalaman air pada citra sehingga informasi yang diperoleh lebih relevan. Namun, jika citra direkam saat kondisi surut atau pada wilayah yang sangat dangkal dengan variasi kedalaman yang rendah, koreksi kolom air tidak perlu dilakukan, karena efek kedalaman yang minimal tidak akan berdampak signifikan pada hasil pemetaan.

Rumus koreksi DII adalah sebagai berikut:

$$a = (\sigma_i - \sigma_j) / (2 \times \sigma_{ij})$$

$$K_i / K_j = a + \sqrt{a^2 + 1}$$

$$DII_{ij} = \ln(L_i) - [(K_i / K_j) \times \ln(L_j)]$$

Keterangan:

a : Perhitungan perbedaan variansi saluran dengan julat gelombang yang lebih rendah dan tinggi

σ_i : Variansi saluran dengan julat gelombang yang lebih rendah

σ_j : Variansi saluran dengan julat gelombang yang lebih tinggi

σ_{ij} : Kovarian antara saluran ij

DII_{ij} : *Depth invariant bottom index* dari saluran i dan saluran j

$\ln(L_i)$: Log saluran hasil koreksi *sunglint* dengan panjang gelombang yang lebih pendek

K_i / K_j : Rasio koefisien atenuasi kolom air saluran i dan saluran j

$\ln(L_j)$: Log saluran hasil koreksi *sunglint* dengan panjang gelombang yang lebih panjang

3.4

Pengolahan citra

Pengolahan/klasifikasi citra adalah proses interpretasi data citra untuk menghasilkan informasi baru. Interpretasi citra mencakup tiga tahapan utama, yaitu deteksi, identifikasi, dan analisis terhadap objek yang terdapat dalam citra penginderaan jauh. Proses interpretasi citra dapat dilakukan dengan pendekatan klasifikasi berbasis piksel secara terarah (*supervised*). Algoritma yang disarankan adalah *Random Forest* (RF). Data piksel untuk training menggunakan data dari survei *ground-truth*.

Namun, penting untuk dicatat bahwa ilmu pengetahuan dan teknologi terus berkembang, dan metode klasifikasi juga terus mengalami inovasi berkelanjutan. Oleh karena itu, meskipun RF saat ini merupakan pilihan yang kuat, penggunaannya tidak harus bersifat tetap. Adaptasi dan eksplorasi teknologi terbaru dalam *Artificial Intelligence* (AI/Kecerdasan Buatan) dapat membuka peluang untuk peningkatan metode klasifikasi dalam pemetaan habitat bentik di masa depan. Jika di kemudian hari ditemukan metode yang lebih akurat, maka disarankan untuk dilakukan perhitungan ulang (rekalkulasi) luasan area padang lamun.

3.5

Validasi dan Akurasi

Validasi adalah proses untuk memastikan hasil interpretasi sesuai dengan kondisi nyata. Sedangkan akurasi menunjukkan kualitas hasil interpretasi. Proses ini dilakukan menggunakan data lapangan (*ground truth*). Uji akurasi dilakukan melalui matriks sampel yang membandingkan hasil klasifikasi citra

dengan data *ground truth*. Matriks yang umum digunakan dalam proses ini adalah *confusion matrix*, yang menghubungkan piksel hasil klasifikasi dengan data referensi dari survei lapangan atau peta acuan (Tabel 3.1).

Tabel 3.1. Konsep umum *Confusion matrix*

Kondisi di Lapangan	Prediksi Positif (Lamun)	Prediksi Negatif (Bukan Lamun)
Positif (Lamun)	True Positive (TP): jumlah sampel yang benar-benar kelas positif (lamun) dan diklasifikasikan sebagai positif.	False Negatives (FN): jumlah sampel yang benar-benar kelas negatif (bukan lamun) tetapi diklasifikasikan sebagai positif.
Negatif (Bukan Lamun)	False Positive (FP): jumlah sampel yang benar-benar kelas positif (lamun) tetapi diklasifikasikan sebagai negatif.	True Negatives (TN): jumlah sampel yang benar-benar kelas negatif (bukan lamun) dan diklasifikasikan sebagai negatif.

Dari matriks ini, dapat diperoleh informasi seperti *overall accuracy*, *producer accuracy*, *user accuracy*, dan indeks Kappa.

	Akurasi	Rumusan Keseluruhan
a	Akurasi Keseluruhan (<i>Overall Accuracy</i>) adalah metode untuk mengukur persentase prediksi yang benar dari total pengamatan.	$Akurasi\ Keseluruhan = (TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)$
b	Akurasi Produsen (<i>Producer's Accuracy</i>) , adalah metode untuk mengukur kemampuan model dalam mengidentifikasi kelas positif dari keseluruhan jumlah kelas positif yang sebenarnya.	$Akurasi\ Produsen = TP/(TP+FN)$
c	Akurasi Pengguna (<i>User's Accuracy</i>) adalah metode untuk mengukur keandalan prediksi kelas positif (presisi).	$Akurasi\ Pengguna = TP/(TP+FP)$

3.6 Perhitungan Luas Padang Lamun

Informasi tentang luasan area padang lamun diperoleh dengan menghitung jumlah piksel yang termasuk dalam kelas lamun pada hasil klasifikasi, lalu dikalikan dengan ukuran tiap piksel. Ukuran piksel dapat dilihat dari properti citra atau file header. Nilai luasan tersebut dilengkapi dengan ukuran ketidakpastian (*uncertainty*) berupa nilai *Confidence Interval* dengan tingkat kepercayaan 95%. Perhitungan nilai ketidakpastian ini mengikuti Olofsson (2018). Satuan yang digunakan dalam pedoman ini adalah kilometer persegi (km²).

Proses klasifikasi menghasilkan data raster yang terdiri dari piksel-piksel dengan atribut yang menunjukkan kelas-kelas habitat tertentu (misalnya kelas lamun). Untuk analisis dan pemetaan lebih lanjut, data ini perlu dikonversi ke dalam format vektor. Konversi dari data raster ke vektor dan isi dan

struktur data peta padang lamun yang dihasilkan mengacu pada Keputusan Direktur Jenderal Pengelolaan Kelautan dan Ruang Laut Nomor 45 Tahun 2024 tentang Pedoman Teknis Penyusunan Informasi Geospasial Habitat Bentik Laut Dangkal. Keputusan ini memberikan panduan mengenai struktur, isi, dan spesifikasi teknis yang harus dipenuhi dalam pembuatan peta habitat bentik yang mencakup padang lamun, sehingga hasilnya standar dan dapat digunakan secara efektif dalam pengelolaan dan pelestarian ekosistem pesisir dan laut.

Untuk pemantauan dinamika habitat padang lamun, manual ini merekomendasikan kegiatan pemetaan area padang lamun dilakukan setiap dua tahun sekali, dengan waktu pengambilan data lapangan (*ground-truth*) dilakukan pada bulan yang sama.



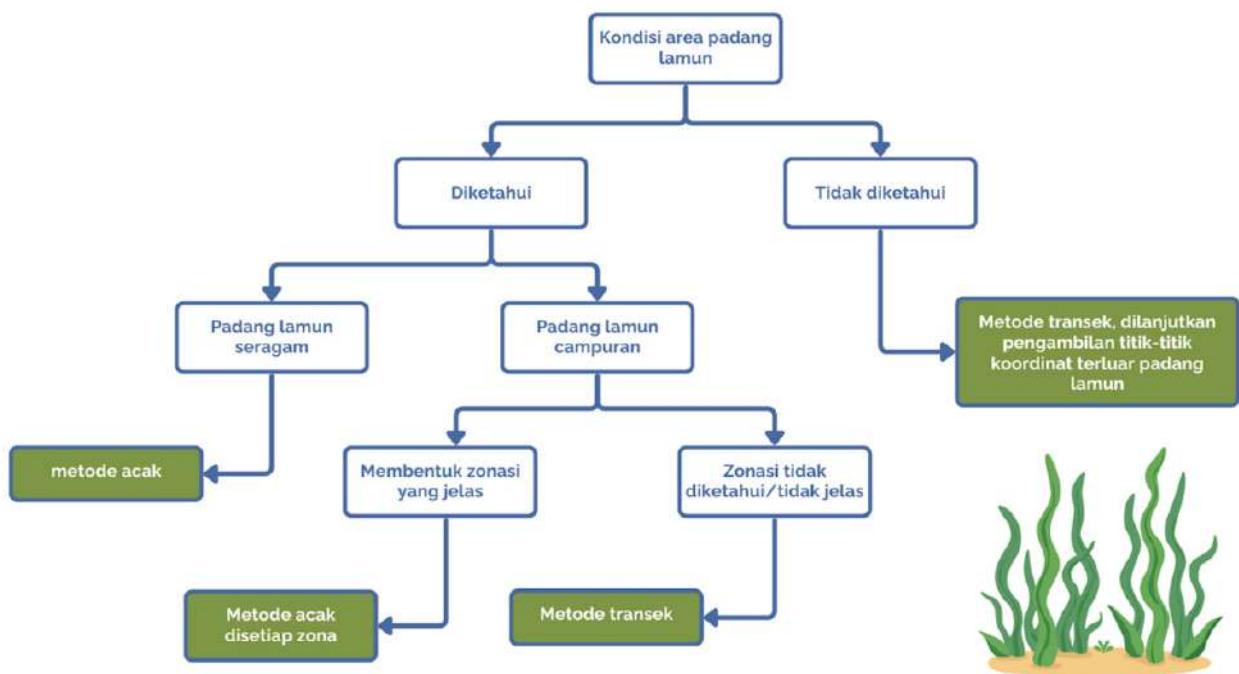
PENGUKURAN KONDISI EKOLOGI DAN LINGKUNGAN

Pengambilan data kondisi ekologis lamun diperlukan sebagai data dukung dalam perhitungan cadangan karbon. Dalam pengukuran jangka panjang, data kondisi lamun dapat digunakan untuk menginterpretasikan jumlah cadangan karbon, sejauh mana pengaruh kondisi lamun dapat mempengaruhi jumlah karbon yang dapat diserap dan disimpan, baik di dalam jaringan lamun (biomassa) maupun di dalam material dasar laut (sedimen). Untuk pemantauan kondisi ekologi dan lingkungan lamun, pengukuran yang sama pada titik sampling yang permanen dilakukan 1 tahun sekali pada musim/bulan yang sama.

Jumlah personil dalam pengambilan data kondisi ekologis lamun dapat disesuaikan, sebagai contoh satu orang dapat melaksanakan tugas lebih dari satu peran. Dalam pelaksanaan di lapangan, tim pelaksana akan berbagi peran

dalam: koordinasi tim, menentukan titik pemasangan transek, memasang patok, memasang meteran transek, meletakkan kuadrat, mengamati parameter lamun, mencatat hasil pengamatan, mendokumentasi, dan mengolah data.

Terdapat beberapa pendekatan dalam pengumpulan dan pengambilan sampel untuk karbon biru. Aspek yang menjadi perhatian dalam penentuannya berupa ketersediaan data luas area dan bentuk padang lamunnya, baik itu padang lamun yang seragam, campuran maupun berzona. Ketersediaan data dapat merujuk pada hasil pengolahan citra satelit, informasi dari penduduk lokal, hasil monitoring sebelumnya, hasil penelitian di area tersebut, dll. Pemilihan metode dapat merujuk pada Gambar 4.1. Sedangkan konsekuensi untuk pemilihan tiap metode dapat dilihat di Tabel 4.1.



Gambar 4.1

Alur pemilihan metode pengukuran kondisi ekologi lamun

Tabel 4.1 Kondisi padang lamun dan metode pengambilan data yang disarankan

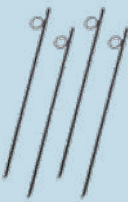
Kondisi lamun	Metode yang disarankan	Keterangan
Seragam (dari komposisi jenis, tutupan, dan tanpa zonasi)	Acak	proses lebih mudah
Ada zonasi, namun seragam (komposisi jenis dan tutupan pada tiap zona-nya)	Stratifikasi-acak	harus sudah ada informasi awal tentang batas zonasi
Tidak seragam	Stratifikasi-transek	proses lebih lama

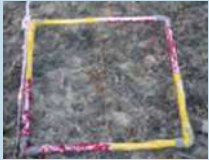
4.1.1

Alat dan Bahan

Sebelum melaksanakan pengambilan data kondisi lamun, alat dan bahan yang perlu dipersiapkan sedikitnya antara lain (Tabel 4.2):

Tabel 4.2. Alat dan bahan untuk pengambilan data kondisi lamun

No	Alat dan Bahan	Keterangan
1.	Meteran gulung sepanjang 100 meter yang digunakan sebagai transek. Jumlah meteran gulung disesuaikan dengan panjang transek yang telah ditentukan pada penjelasan sub-bab 2.1.	
2.	Meteran gulung sepanjang 100 meter yang digunakan untuk mengukur jarak interval antar transek sebagai pengulangan dengan jarak interval yang telah ditentukan pada penjelasan sub-bab 2.1.	
3.	Patok dengan panjang sekitar 30 cm atau dapat disesuaikan, minimal sebanyak 6 buah yang terbuat dari bahan yang dapat disesuaikan dengan karakter substrat dapat berbahan kayu, bambu, atau besi behel dengan fungsi sebagai patok penanda dan penahan di titik awal dan akhir transek garis.	
4.	Palu yang digunakan untuk menancapkan patok ke dalam substrat	

5.	Bingkai kuadrat dengan ukuran antar sisi dalam (inner) 50 x 50 cm. Untuk membantu penghitungan, bingkai tersebut dapat dibuat menjadi 4 ruang sub-kuadrat berukuran 25 x 25 cm dengan menggunakan tali	
6.	Perangkat genggam sistem posisi global (<i>GPS handheld</i>) untuk memperoleh koordinat titik awal dan akhir transek serta titik setiap plot bingkai kuadrat.	
7.	Kamera spesifikasi bawah air (<i>underwater</i>) untuk dokumentasi kegiatan dan data dalam air.	
8.	Peralatan tulis tahan air seperti papan jalan (sabak), kertas <i>newtop</i> kasar, pensil 2B, dan kertas kerja untuk mencatat data kondisi lamun di lokasi pengambilan data.	
9.	Panduan identifikasi spesies lamun yang digunakan sebagai panduan dalam menentukan spesies lamun yang ditemukan.	
10.	Peralatan pengolahan data seperti kertas HVS, pulpen, spidol, laptop, dan printer untuk menyimpan kompilasi data dari lapangan dan mencetak lembar data sebagai backup.	
11.	Perahu atau sampan yang digunakan untuk aksesibilitas menuju titik stasiun pengamatan apabila memang diharuskan melalui tengah laut dan tidak dapat melalui pantai.	
12.	Tas anti air (<i>dry bag</i>) yang digunakan untuk menyimpan peralatan tidak anti air.	
13.	Peralatan dasar pribadi (lihat Bab 2. Persiapan Survei)	
14.	Perbekalan makanan dan minuman (lihat Bab 2. Persiapan Survei)	

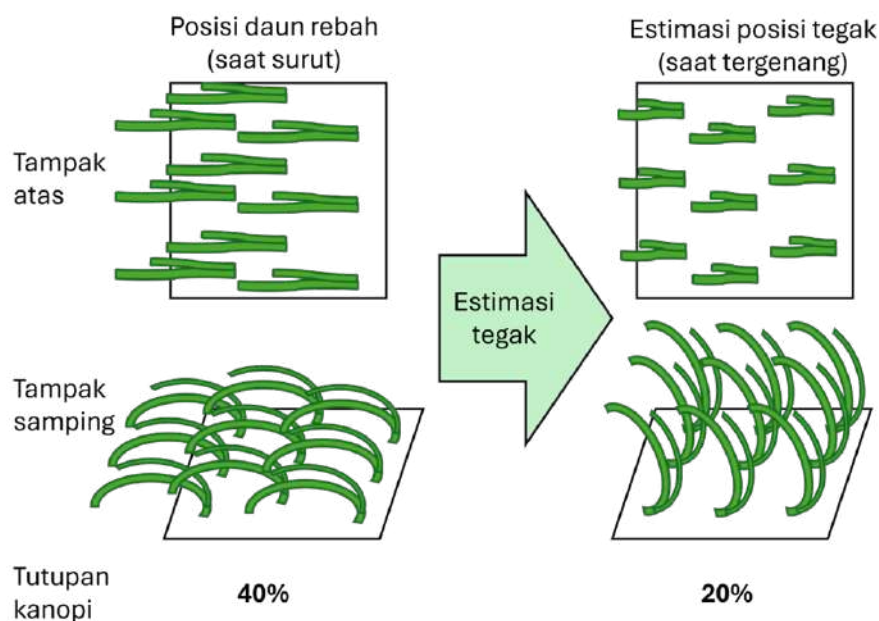
4.1.2 Langkah Kerja

4.1.2.1 Metode Acak

Metode pengambilan secara acak dilakukan apabila luas padang lamun dan zonasi lamunnya sudah diketahui. Dalam pelaksanaannya, minimal 10% dari luas padang lamun ataupun luas tiap zonasi harus diambil contohnya. Besaran 10% ini berdasarkan pengalaman lapangan dari banyak ahli di Indonesia yang menyarankan bahwa 10% adalah jumlah observasi yang memungkinkan diambil dari satu area padang lamun dalam satu kali periode pasang atau surut.

Langkah-langkah pelaksanaan adalah sebagai berikut:

1. Pada peta luas lamun/luas tiap zona lamun yang tersedia, bagi area tersebut menjadi 100 area yang lebih kecil
2. Beri nomor untuk setiap area kecil tersebut
3. Pilih minimal 11 nomor yang akan dijadikan target (bisa menggunakan fungsi random di kalkulator, kertas undian, ataupun teknik pemilihan lain)
4. Catat koordinat bagian tengah area kecil yang terpilih, masukan ke dalam perangkat GPS
5. Pada pelaksanaan di lapangan, datangi setiap koordinat target
6. Gunakan bingkai kuadrat 50 x 50 cm (ukuran bagian dalam) untuk pengamatan kondisi lamun di titik tersebut
7. Pada tiap plot, rekam atau catat koordinatnya, setelah itu, ambil gambar/fotonya
8. Amati kejernihan air tiap plot, apakah jernih, agak keruh atau keruh.
9. Setelah itu, amati dan catat tutupan (total) lamun. Contoh estimasi tutupan lamun bisa dilihat di Lampiran 4.1.
10. Setelah itu, amati dan catat jenis-jenis lamun yang ada di dalam plot, perkirakan tutupan (estimasi daun lamun tegak; Gambar 4.2), dan (bila perlu) hitung jumlah tegakan tiap jenisnya (bisa langsung dikonversi ke tegakan dalam 1 m² dengan dikali 4). Untuk identifikasi jenis, bisa lihat di Lampiran 4.2. Total penjumlahan persentase dari setiap spesies harus sama dengan persentase total lamun pada Langkah 8.



Gambar 4.2 Contoh estimasi tutupan daun saat posisi rebah ke posisi tegak

2. Pasang patok di awal dan akhir transek
3. Bingkai kuadrat 50 x 50 cm (ukuran bagian dalam) diletakkan tepat di sisi kanan transek dari titik awal hingga titik akhir dengan jarak interval maksimal sebesar 10% dari panjang transek. Misalnya tiap 10 m untuk transek 100 m, dan tiap 30 m untuk transek 300 m. Sehingga pada setiap transek didapatkan 11 plot bingkai kuadrat.
4. Pada tiap plot, rekam atau catat koordinatnya, setelah itu, ambil gambar/fotonya.
5. Amati kejernihan air tiap plot, apakah jernih, agak keruh atau keruh.
6. Setelah itu, amati dan catat tutupan (total) lamun. Contoh estimasi tutupan lamun bisa dilihat di Lampiran 4.1.
7. Setelah itu, amati dan catat jenis-jenis lamun yang ada di dalam plot, perkirakan tutupan dan (bila perlu) hitung jumlah tegakan tiap jenisnya. Untuk identifikasi jenis, bisa lihat di Lampiran 4.2. Total penjumlahan persentase dari setiap spesies harus sama dengan persentase total lamun pada Langkah 6
8. Selain itu, amati juga tutupan kompetitor lamun yaitu makroalga dan epifit.
9. Ulangi langkah kerja 1-8 untuk dua transek lainnya sehingga diperoleh 3 transek pengamatan. Jarak interval antar transek menyesuaikan lebar padang lamun atau sesuai yang telah ditentukan pada pemetaan awal.
10. Cek hasil catatan pengamatan di kertas kerja lapangan (Gambar 4.3) untuk melihat apakah ada hal-hal yang belum teramati dan tercatat.

4.1.3

Analisis data

Pada tahap ini, data yang sudah diperoleh di lapangan diolah untuk mendapatkan informasi mengenai struktur komunitas lamun dan kondisi lingkungannya. Langkah yang perlu dilakukan dalam analisis data adalah:

- 1 Hitung nilai persen tutupan total lamun, makroalga dan epifit per lokasi/stasiun dengan menghitung rata-rata tutupan lamun dari semua plot (pada penggunaan perangkat lunak pengolah data, pastikan semua sel memiliki angka atau cantumkan angka nol pada sel yang tidak ada datanya), atau hasil penjumlahan semua plot dibagi banyaknya plot pengamatan (baik yang ada lamunnya maupun tidak).

$$\text{rata - rata tutupan} = \frac{\text{jumlah semua nilai tutupan}}{\text{jumlah plot pengamatan}}$$

- 2 Hitung juga rata-rata persen tutupan tiap jenis lamun dengan cara yang sama dengan poin 1.

$$\text{rata - rata tutupan} = \frac{\text{jumlah semua nilai tutupan jenis } i}{\text{jumlah plot pengamatan}}$$

- 3 Kerapatan per jenis lamun juga dihitung dengan cara yang sama dengan poin 1, namun bila hasil observasi tiap plot belum dikonversi ke luas 1 m², maka perhitungan perlu dikali 4 untuk memperoleh nilai kerapatan tegakan per meter persegi (tegakan/m²), karena bingkai kuadrat yang digunakan adalah 50 x 50 cm.

$$\text{kerapatan jenis } i = 4 \times \frac{\text{jumlah semua nilai tutupan jenis } i}{\text{jumlah plot pengamatan}}$$

- 4 Jangan lupa hitung standar deviasinya. Selain itu, dihitung juga dengan nilai *Confidence Interval* pada tingkat 95%. Contoh format hasil analisis bisa dilihat pada Tabel 4.3 dan 4.4 serta Lampiran 4.3.

- 5 Nilai desimal ditunjukkan hingga 2 atau 4 angka dibelakang koma.

Tabel 4.3. Contoh format tabel hasil analisis tutupan lamun

Tanggal	Lokasi	Transek atau Zona	Tutupan total	Persen tutupan per jenis						Tutupan makroalga	Tutupan epifit
				Sp. A	Sp. B	Sp. C	...		dst.		
		1									
		2									
		3									
		rata-rata									
		SD									

Tabel 4.4. Contoh format tabel hasil analisis kerapatan lamun

Tanggal	Lokasi	Transek atau Zona	Persen tutupan per jenis					
			Sp. A	Sp. B	Sp. C	...		dst.
		1						
		2						
		3						
		rata-rata						
		SD						



Pengambilan data lingkungan pendukung dilakukan untuk mengetahui kondisi sekitar seperti data kualitas air, aktivitas manusia, dan kondisi alam lainnya sebagai data dukung tambahan untuk menunjang proses analisis cadangan karbon serta dapat menjadi rekomendasi pengelolaan dalam jangka panjang. Data yang diambil yaitu kondisi umum (cuaca, pasang surut, potensi pendukung, potensi gangguan dan biota yang ada), jenis substrat dan parameter kualitas air diambil secara in-situ terdiri dari suhu, DO (*Dissolved Oxygen*), pH, dan kejernihan. Untuk parameter kejernihan, dilakukan pengamatan visual dengan kategori jernih (substrat terlihat), sedang/agak keruh (daun lamun terlihat, namun substrat tidak terlihat), dan keruh (kanopi lamun tidak terlihat).

Sebagaimana pengamatan ekologis lamun, jumlah personil dalam pengambilan data lingkungan pendukung dapat disesuaikan, misalnya satu orang dapat melaksanakan tugas lebih dari satu peran. Dalam pelaksanaan di lapangan, tim pelaksana akan berbagi peran dalam: mengkoordinasikan tim, mengukur kualitas air, mencatat, mendokumentasikan, dan menganalisis data. Pekerjaan ini juga bisa dilakukan oleh tim ekologis lamun, misalnya saat surut kerjakan pengamatan ekologis dahulu, kemudian ketika pasang lanjut dengan pengambilan data kondisi lingkungan.

4.2.1 Alat dan Bahan

Tabel 4.5. Daftar alat dan bahan untuk pengambilan data lingkungan pendukung

No	Alat dan Bahan	Keterangan
1.	Termometer air raksa atau digital untuk mengukur suhu perairan dengan satuan dan ketelitian minimal 1 °C.	
2.	DO meter untuk mengukur kadar oksigen terlarut (<i>Dissolved Oxygen</i>) dalam suatu perairan dengan satuan dan ketelitian minimal 1 mg/Liter.	
3.	pH meter untuk mengukur kadar pH dalam suatu perairan.	

4.	Refraktometer untuk mengukur kadar salinitas dalam suatu perairan.	
5.	<i>Handheld GPS (Global Positioning System)</i> untuk memperoleh koordinat titik pengambilan data kualitas air.	
6.	Kamera spesifikasi bawah air (<i>underwater</i>) untuk dokumentasi lingkungan sekitar, aktivitas manusia, dan data dalam air.	
7.	Peralatan tulis tahan air seperti papan jalan (sabak), kertas <i>newtop</i> kasar, pensil 2B, dan kertas kerja untuk mencatat data kondisi lamun di lokasi pengambilan data.	
8.	Aquades atau air tawar untuk membilas sensor alat pengukur kualitas air.	
9.	Perahu atau sampan yang digunakan untuk aksesibilitas menuju titik stasiun pengamatan apabila memang diharuskan melalui tengah laut dan tidak dapat melalui pantai.	
10.	Tas anti air (<i>dry bag</i>) yang digunakan untuk menyimpan peralatan tidak anti air.	
11.	Peralatan dasar pribadi (lihat Bab 2. Persiapan Survei)	
12.	Perbekalan makanan dan minuman (lihat Bab 2. Persiapan Survei)	

Catatan:

beberapa alat bisa diganti dengan yang fungsinya sama. Misalnya multiparameter quality checker yang bisa mengukur beberapa parameter sekaligus.

4.2.2 Langkah Kerja

Pengambilan data kualitas air sebaiknya dilakukan saat padang lamun tergenang atau pasang, agar alat bisa bekerja. Selain itu, pastikan alat pengukur kualitas air sudah terkalibrasi serta kondisi persediaan baterai tercukupi.



Adapun langkah kerjanya adalah sebagai berikut:

1. Amati dan catat kondisi lingkungan umum di padang lamun
2. Amati jenis substrat (lumpur, pasir, pecahan karang, atau kombinasi ketiganya) dan ukur parameter kualitas air pada bagian awal, tengah dan akhir transek, atau tiga titik di setiap zona
3. Catat/rekam koordinat pengamatan substrat dan pengukuran kualitas air
4. Ulangi Langkah 2 dan 3 untuk transek atau zona lainnya
5. Periksa kembali kertas kerja (Gambar 4.5) kondisi lingkungan untuk melihat apakah ada yang belum tercatat. Contoh format kertas kerja dan cara analisis data bisa diperoleh di <https://s.id/48sxB>

KERTAS KERJA LAPANGAN: KONDISI LINGKUNGAN

Provinsi-Kabupaten: _____ Waktu Mulai - Waktu Selesai: _____
 Tanggal: _____ Stasiun: _____
 Site: _____ Nama Surveyor: _____

KONDISI LINGKUNGAN UMUM

(1) Cuaca	 ☐ Cerah	 ☐ Berawan	 ☐ Hujan	 ☐ Badai
(2) Kondisi pasut	☐ menuju pasang	☐ pasang	☐ menuju surut	☐ surut
(3) Potensi pendukung				
(4) Potensi gangguan				
(5) Biota yang ditemukan				

KUALITAS AIR

(6)		(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Transek atau Zona		Tinggi air (cm)	Suhu air (°C)	Salinitas (ppt atau ‰)	pH	DO (mg/L)	Kecerahan air	Jenis Substrat
Nomor	Bagian							
1	awal (koordinat _____)							
	tengah (koordinat _____)							
	akhir (koordinat _____)							
2	awal (koordinat _____)							
	tengah (koordinat _____)							
	akhir (koordinat _____)							
3	awal (koordinat _____)							
	tengah (koordinat _____)							
	akhir (koordinat _____)							

Gambar 4.5

Contoh format kertas kerja kondisi lingkungan

4.2.3 Analisis data

Bila diperlukan, nilai tiap parameter bisa dihitung rata-rata dan standar deviasinya (Gambar 4.6). Nilai rata-rata dilengkapi dengan *Confidence Interval* pada tingkat 95%. Pada penggunaan perangkat lunak pengolah data, pastikan semua sel memiliki angka atau cantumkan angka nol pada sel yang tidak ada datanya. Penghitungan bisa dilakukan untuk nilai total per transek maupun per lokasi. Nilai desimal ditunjukkan hingga 2 atau 4 angka dibelakang koma.

$$\text{rata - rata parameter x} = \frac{\text{jumlah semua nilai parameter x}}{\text{jumlah plot pengamatan}}$$

ANALISIS KONDISI LINGKUNGAN

Provinsi-Kabupaten:	Maluku - Maluku Tengah	Tanggal	21 Maret 2015
Site:	Waii	Waktu Mulai-Waktu Selesai	12-00 - 15.00
Stasiun:	1	Nama Surveyor:	Wawan, Andri, Caleb

KONDISI LINGKUNGAN UMUM

(1) Cuaca	 ☐ Cerah	 ☒ Berawan	 ☐ Hujan	 ☐ Badai
(2) Kondisi pasut	☒ menuju pasang	☐ pasang	☐ menuju surut	☐ surut
(3) Potensi pendukung	Ada sedikit mangrove di awal padang lamun dan terumbu karang di ujung padang lamun, air jernih, jarang ada aktivitas penduduk.			
(4) Potensi gangguan	Perahu kadang lewat di area ini, duyung sering makan di awal padang lamun.			
(5) Biota yang ditemukan	Ikan, teripang, bekas makan duyung.			

KUALITAS AIR

(6)		(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Transek atau Zona		Tinggi air (cm)	Suhu air (°C)	Salinitas (ppt atau ‰)	pH	DO (mg/L)	Kecerahan air	Jenis Substrat
Nomor	Bagian							
1	awal (koordinat _____)	30.0	27.5	32.0	7.5	6.3	jernih	Pasir
	tengah (koordinat _____)	90.0	28.0	32.0	7.5	6.3	jernih	Pasir + pec. karang
	akhir (koordinat _____)	150.0	26.5	32.0	7.8	6.2	jernih	Pasir
	rata-rata transek/zona 1	90.00	27.33	32.00	7.60	6.27		
2	awal (koordinat _____)	32.0	27.5	32.0	7.5	6.3	jernih	Pasir
	tengah (koordinat _____)	85.0	27.7	32.0	7.5	6.3	jernih	Pasir + pec. karang
	akhir (koordinat _____)	160.0	27.0	32.0	7.7	6.3	jernih	Pasir
	rata-rata transek/zona 2	92.33	27.40	32.00	7.57	6.30		
3	awal (koordinat _____)	38.0	26.5	32.0	7.5	6.3	jernih	Pasir
	tengah (koordinat _____)	90.0	26.5	32.0	7.5	6.3	jernih	Pasir + pec. karang
	akhir (koordinat _____)	160.0	25.5	32.0	7.7	6.2	jernih	Pasir
	rata-rata transek/zona 3	96.00	26.17	32.00	7.57	6.27		
	rata-rata lokasi/stasiun	92.78	26.97	32.00	7.58	6.28	jernih	pasir
	SD	3.02	0.69	0.00	0.02	0.02		

Gambar 4.6

Contoh analisis kondisi lingkungan



PENGAMBILAN SAMPEL BIOMASSA



Karbon organik di padang lamun tersimpan di 2 bagian, yaitu di bagian biomassa dan sedimen. Pengambilan sampel biomassa lamun diperlukan khususnya untuk mengukur cadangan karbon dan produktivitas ekosistem lamun. Meskipun proporsinya jauh lebih kecil dibanding karbon organik di sedimen, karbon di biomassa lamun mencerminkan produktivitas primer yang juga berperan penting dalam mengubah karbon dioksida menjadi karbon organik, yang selanjutnya dapat terperangkap dan disimpan dalam sedimen. Prosedur yang dijelaskan di Bab ini bertujuan untuk memperoleh sampel biomassa lamun yang selanjutnya akan dianalisis untuk menghasilkan data kuantitatif mengenai karbon organik lamun, baik bagian di atas substrat (daun dan seludang) maupun bagian di bawah substrat (rhizoma dan akar).

Jumlah personel minimal 2 (dua) orang (bisa sekaligus personel untuk pengambilan data ekologi lamun). Agar pengambilan sampel berjalan dengan lancar, 2 (dua) personel ini diharapkan memiliki keterampilan teknis pengambilan sampel Biomassa lamun di lapangan.

5.1

Alat dan Bahan

Sebelum melaksanakan pengambilan sampel biomassa lamun, persiapkan alat dan bahan yang diperlukan, sedikitnya antara lain:

Tabel 5.1. Alat dan bahan untuk pengambilan sampel biomassa lamun

No	Alat dan Bahan	Keterangan
1.	Perangkat genggam sistem posisi global (<i>GPS handheld</i>)	
2.	Alat <i>coring</i> biomassa	
3.	Sendok semen untuk mengambil biomassa	

4.	Kantong jaring untuk memisahkan biomassa dan substrat di lapangan	
5.	Kantong jaring lipat untuk mengangin-anginkan sampel biomassa	
6.	Kantong kertas samson untuk biomassa yang sudah dibersihkan	
7.	Kantong plastik untuk sampel biomassa besar	-
8.	Kantong plastik ukuran 500gr	-
9.	Kertas anti air + sabak	-
10.	Spidol permanen	-
11.	Pensil 2B	-
12.	Sarung tangan	-
13.	Baki atau ember	-
14.	Kanebo/tisu untuk mengeringkan lamun	-
15.	<i>Silica gel</i>	-
16.	<i>Ice box</i> (kotak pendingin) dengan ice gel	-
17.	Timbangan kecil untuk menimbang berat basah sampel (opsional)	-

Pengambilan sampel biomassa lamun dapat dilakukan menggunakan dua metode, yaitu metode *coring* dan metode ekstrapolasi tegakan, tergantung pada situasi dan kondisi di lapangan.

5.2.1

Metode *Coring*

Secara umum, metode ini dilakukan dengan menggunakan alat *coring* untuk mengambil bagian biomassa lamun. Berikut tahapan-tahapan yang perlu dilakukan:

1. Masukkan alat *coring* biomassa ke area yang ditentukan dengan cara menekan dan memutar alat ke dalam area lamun sampai diperkirakan biomassa bawah (rhizoma dan akar) ikut terbawa, kira-kira berkisar antara 20 – 30 cm tergantung jenis lamun.
2. Tutup katup alat *coring*, angkat dengan diputar dan di bagian bawah dijaga agar sampel tidak lolos, biasanya agak diangkat serta agak dimiringkan.
3. Pindahkan sampel dari dalam alat *coring* ke kantong jaring dan dibersihkan dari sedimen kemudian dipindahkan ke dalam kantong plastik dan diberi label.
4. Penting untuk memperhatikan keterwakilan kondisi lamun yang ada di lokasi. Jika di satu titik sampling terdapat variasi kondisi kerapatan lamun dari jarang hingga padat, pengambilan sampel biomassa perlu mewakili kondisi tersebut, sehingga bisa diambil satu *core* di lamun padat, satu di lamun sedang, dan satu di lamun jarang. Perhatikan juga dominansi jenis lamun di lokasi, pengambilan sampel biomassa di lokasi lamun dominan juga perlu dilakukan. Jika perlu ada pengulangan di masing-masing kondisi sehingga jumlah *core* yang diperlukan dapat mencapai 3 - 9 *core* per titik sampling.¹
5. Jika titik sampling merupakan lokasi monitoring permanen, maka pengambilan sampel biomassa dilakukan di luar plot sampling ekologi. Jika titik sampling bukan merupakan plot permanen, pengambilan sampel bisa mengikuti transek garis pemantauan ekologi dengan pemilihan lokasi *core* biomassa di titik awal, tengah dan akhir transek atau berselang dari plot sampling kondisi ekologi.
6. Di *basecamp*, biomassa yang ada dalam kantong plastik dibersihkan dari pasir/epifit dengan air tawar menggunakan ember atau baki.
7. Pisahkan antara biomassa bagian atas (daun dan seludang) serta biomassa bagian bawah (rimpang dan akar).
8. Timbang berat basah dari masing – masing sampel dalam hal memerlukan data kandungan air.
9. Keringkan sampel menggunakan kanebo/tissue, lalu masukkan sampel ke dalam kantong kertas samson. Sampel dikering-anginkan sambil menunggu transportasi ke laboratorium untuk menghindari tumbuhnya jamur. Bisa ditambahkan *Silica gel* ke dalam kantong kertas samson berisi sampel.
10. Berikan label di kantong kertas samson dengan informasi seperti tanggal, lokasi, transek/titik sampling, jenis lamun, biomassa bagian atas atau biomassa bagian bawah.

¹Jumlah sampel menentukan besaran angka ketidakpastian (*uncertainty*). Kebutuhan sampel umumnya dihitung dengan tingkat kepercayaan 95% (margin kesalahan 5%).

5.2.2

Metode Ekstrapolasi Tegakan

Secara umum, metode ini mengukur berat dari sejumlah tegakan (termasuk akar dan rhizoma) lamun per jenis (satuan gr/tegakan). Dari berat tersebut, kemudian dikalikan dengan nilai kerapatan (satuan tegakan/m²) dari hasil pengukuran di Bab 4, sehingga diperoleh nilai berat biomassa per satuan luas (gr/m²).

Prosedur pengambilan sampelnya adalah sebagai berikut:

1. Sampel biomassa diambil di dalam kuadrat atau di luar plot kuadrat yang terdekat dan diperkirakan mewakili jenis yang ada dalam area titik sampling
2. Ambil tegakan lamun termasuk rimpang dan akar dari tiap jenis yang ada di dalam transek (dijelaskan di Bab 4) sejumlah kurang lebih seukuran plastik 500 gr dan diberi label sesuai jenis lamunnya. Untuk lamun ukuran besar (misalnya *Enhalus acoroides*), mungkin diperlukan kantong plastik sampel yang besar.
3. Di *basecamp*, biomassa yang ada dalam kantong plastik dibersihkan dari pasir/epifit dengan air tawar menggunakan ember atau baki.
4. Hitung tegakan setiap jenis, kemudian dipisahkan antara biomassa bagian atas (daun dan seludang) serta biomassa bagian bawah (rimpang dan akar).
5. Timbang berat basah dari masing – masing sampel (opsional).
6. Keringkan sampel menggunakan kanebo/tisu, lalu masukkan sampel ke dalam kantong kertas samson. Sampel dikering-anginkan sambil menunggu transportasi ke laboratorium untuk menghindari tumbuhnya jamur. Bisa ditambahkan *Silica gel* ke dalam kantong kertas samson berisi sampel.
7. Berikan label di kantong kertas samson dengan informasi seperti tanggal, lokasi, transek/titik sampling, jenis lamun, biomassa bagian atas atau biomassa bagian bawah.
8. Sampel siap dibawa ke laboratorium.

5.3

Penanganan Sampel

Sebelum sampel tiba di laboratorium, kondisi sampel perlu diperhatikan untuk mencegah pembusukan dan kerusakan sampel selama di lapangan. Hal ini penting terutama jika tidak memungkinkan untuk melakukan preparasi sampel di lapangan, dan sampel diambil dari lokasi yang terpencil (jauh dari laboratorium).

Tergantung pada situasi dan kondisi di lapangan, ada dua metode yang disarankan, yaitu metode pengeringan dan metode pembekuan. Untuk metode pengeringan, berikut ini adalah hal-hal yang perlu dilakukan:

1. Setelah sampel dimasukkan ke kantong kertas samson, penting untuk dikering-anginkan (dijemur) di tempat yang aman dari gangguan, termasuk hewan (misalnya kucing, ayam, dan lain-lain).
2. Selanjutnya ketika berpindah lokasi di lapangan, sampel biomassa dirapikan dalam satu kantong dan diberi *Silica gel*.

Untuk metode pembekuan, sampel biomassa yang sudah dimasukkan ke dalam kertas samson dan diberi label dapat langsung dimasukkan ke dalam lemari pembeku (*freezer*). Jika fasilitas *freezer* tidak tersedia, sampel dapat disimpan dalam kotak pendingin (ice box) yang didalamnya diberi ice gel. Hal yang sama juga berlaku untuk pengiriman sampel, yaitu dengan mengemas sampel biomassa beku menggunakan kotak styrofoam yang di dalamnya diberi ice gel.

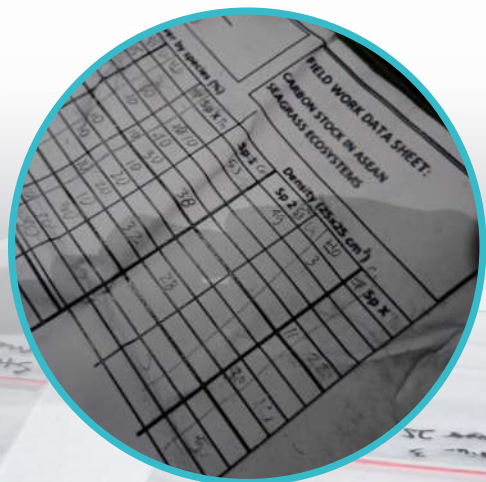
5.4

Pengiriman Sampel

Proses pengiriman sampel dapat menggunakan jasa pengiriman kargo maskapai penerbangan yang umumnya tiba di tujuan lebih cepat dibandingkan menggunakan jasa pengiriman biasa.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan antara lain:

1. Sampel yang diambil berupa biomassa tumbuhan mati, maka perlu mengurus izin ke pihak berwenang antara lain ke Balai Karantina Tumbuhan. Hubungi balai karantina terdekat untuk menanyakan persyaratan dokumen yang diperlukan.
2. Siapkan beberapa dokumen seperti: formulir pengajuan ke Balai Karantina, identitas pengirim dan penerima, detail sampel (jenis, jumlah, tujuan penggunaan, asal sampel), surat permohonan dari instansi, dokumen pendukung lainnya (surat izin penelitian, dan lain-lain).
3. Serahkan seluruh dokumen ke pihak yang berwenang antara lain Balai Karantina dengan membawa sampel yang akan dikirim. Pihak Balai Karantina akan memeriksa sampel secara fisik beserta kelengkapan dokumennya. Setelah pemeriksaan selesai akan diterbitkan Surat Keterangan Karantina.
4. Penting untuk memastikan aturan jasa ekspedisi dalam pengiriman sampel, karena mungkin ada perbedaan antara jasa ekspedisi satu dengan yang lain. Beberapa dokumen yang umum diperlukan antara lain Surat Keterangan Karantina, dokumen kargo, dan surat keterangan *Material Safety Data Sheet* (MSDS).





PENGAMBILAN SAMPSEL SEDIMEN



Pengambilan sampel sedimen sangat krusial dalam pengukuran karbon biru lamun karena proporsi terbesar (lebih dari 90%) penyimpanan karbon berada di sedimen padang lamun. Prosedur yang dijelaskan di Bab ini bertujuan untuk memperoleh sampel sedimen lamun yang selanjutnya akan dianalisis untuk menghasilkan data kuantitatif mengenai karbon organik di sedimen padang lamun.

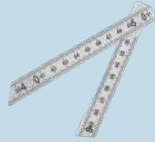
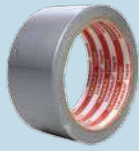
Jumlah personel minimal 2 (dua) orang dan dapat menggunakan personel yang melakukan pengambilan sampel biomassa. Agar pengambilan sampel berjalan dengan lancar, personel diharapkan memiliki keterampilan teknis pengambilan sampel sedimen di lapangan.

6.1 Alat dan Bahan

Sebelum melaksanakan pengambilan sampel sedimen, persiapkan alat dan bahan yang diperlukan, sedikitnya antara lain:

Tabel 6.1. Alat dan bahan untuk pengambilan sampel sedimen

No	Alat dan Bahan	Keterangan
1	Perangkat genggam sistem posisi global (<i>GPS handheld</i>)	
2	Batang silinder stainless ukuran 4 atau 6 mm sepanjang 1 - 2 m untuk mengukur kedalaman sedimen	
3	Pipa PVC tipe AW ukuran 2 inci dengan panjang 1,3 m untuk <i>core</i> sedimen (jumlah minimalnya adalah 3 <i>core</i> di setiap titik sampling) *bisa menggunakan alat sampling sedimen lain, seperti stainless steel <i>core</i> .	
4	Tutup pipa PVC, sejumlah pipa <i>core</i> -nya	
5	Palu 5 kg	

6	Meteran lipat	
7	Lakban	
8	Gergaji tangan untuk memotong pipa PVC di lapangan	
9	Gerinda untuk membelah pipa PVC di basecamp	
10	Pisau dari bahan keramik untuk membelah sedimen	
11	Sendok/spatula untuk mengambil sedimen	-
13	Kantong plastik untuk sampel sedimen, ukuran kecil, sedang dan besar	-
14	Spidol permanen	-
15	Kertas anti air + sabak	-
16	Pensil 2 B	-
17	Sarung tangan	-
18	Ember besar	-
19	Tali untuk membantu mengangkat pipa	-
20	Ice box (kotak pendingin) dengan ice gel	-
21	Kuas dan tisu untuk membersihkan	-

6.2

Langkah Kerja

Sebelum melakukan pengambilan sampel sedimen, penting untuk memperhatikan keterwakilan kondisi lamun yang ada di lokasi. Jika di satu titik sampling terdapat variasi kondisi lamun dari jarang hingga padat, pengambilan sampel sedimen perlu mewakili kondisi tersebut, sehingga bisa diambil satu *core* di lamun padat, satu di lamun jarang, dan satu di sedimen yang hampir tidak terdapat lamun. Jika perlu ada pengulangan di masing-masing kondisi sehingga jumlah pipa PVC yang diperlukan dapat mencapai 3 - 9 *core* per titik sampling.

Untuk melakukan pengambilan sampel, tahapannya adalah sebagai berikut:

1

Cek dan catat kedalaman/ketebalan sedimen menggunakan batang silinder stainless steel (alat nomor 2, Sub Bab 6.1.).



2

Masukkan pipa PVC ke dalam sedimen dengan cara dipalu (bagian atas pipa dialasi oleh papan atau kayu) hingga pipa tidak dapat turun lagi.



Gambar 6.1. Pipa PVC dipalu hingga tidak bisa turun masuk ke sedimen lebih dalam lagi

3

Untuk koreksi kompaksi yang terjadi, catat panjang awal pipa (L), lalu ukur jarak antara ujung atas pipa bagian luar dengan permukaan sedimen di luar pipa (a) dan jarak dari ujung pipa bagian dalam ke permukaan sedimen di dalam pipa (b). Catat hasil pengukuran di kertas anti air. Pastikan posisi pipa PVC tetap tegak lurus (Gambar 6.2). Perhitungan faktor kompaksi sedimen dapat dilihat di Lampiran 6.2.



Gambar 6.2. Skema pengukuran bagian pipa untuk koreksi kompaksi sedimen

Contoh perhitungan kompaksi sedimen

Keterangan:

- L** panjang awal pipa
- b** jarak antara ujung atas pipa bagian luar dengan permukaan sedimen di luar pipa
- a** jarak dari ujung pipa bagian dalam ke permukaan sedimen di dalam pipa

Diketahui:

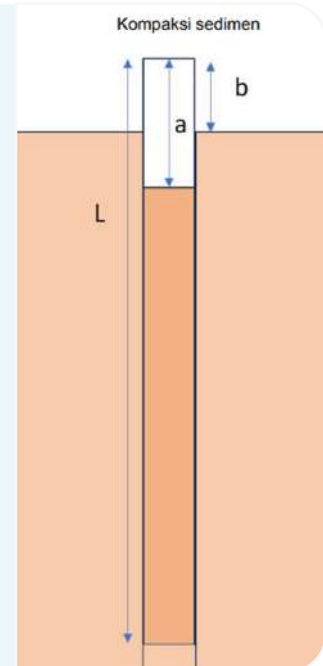
L = 130 cm

b = 90 cm

a = 98 cm

$$\begin{aligned}\text{Faktor kompaksi} &= (\mathbf{L-a})/(\mathbf{L-b}) \\ &= (130-98)/(130-90) \\ &= 0,80\end{aligned}$$

Jika sampel dipotong tiap 5 cm, maka panjang sampel sebenarnya adalah = panjang sampel yang dipotong dibagi faktor kompaksi = $5/0,80 = 6,25$ cm.



4

Tutup pipa bagian atas menggunakan penutup pipa, lalu dibungkus dengan lakban untuk menciptakan kondisi kedap di dalam pipa (Gambar 6.3).

5

Angkat pipa sambil diputar secara perlahan agar sedimen di dalam pipa tidak jatuh, dan segera tutup bagian bawah dengan tutup PVC dan di lakban. Pastikan posisi pipa tetap tegak lurus untuk mencegah terjadinya pencampuran sampel di dalam pipa, karena masih terdapat air di bagian atas pipa.

6

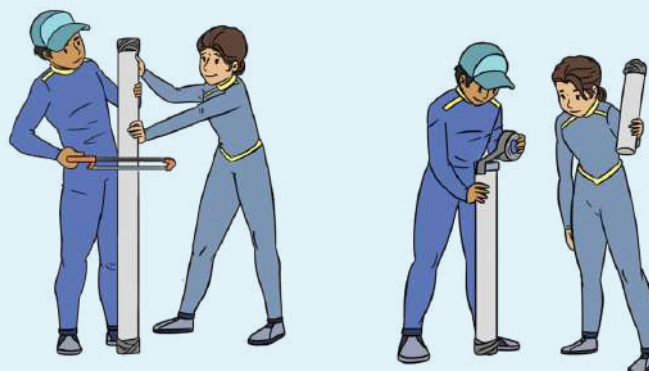
Sampel dibawa ke darat atau kapal (jika menggunakan kapal) dengan posisi tetap tegak lurus, beri tanda pada pipa bagian atas untuk dipotong sesuai ketinggian sampel yang diperoleh.



Gambar 6.3. Bagian atas pipa ditutup dan dibungkus dengan lakban

7

Pipa PVC dipotong dengan gergaji tangan untuk membuang air yang ada di bagian atas sampel secara hati-hati. Setelah air terbuang semua, tutup kembali pipa menggunakan tutup pipa dan lakban. Usahakan tetap membawa pipa berisi sampel dalam posisi tegak lurus, bisa disimpan dalam ember besar (Gambar 6.4).



Gambar 6.4 Pipa PVC dipotong untuk membuang air yang ada di bagian

8

Di *basecamp*, pipa berisi sampel dibuka menggunakan gerinda listrik. Bersihkan sampel dari serbuk pipa menggunakan kuas dan tisu (Gambar 6.5).



Gambar 6.5 Pipa dibelah dengan gerinda

9

Potong sampel setiap 5 cm menggunakan pisau keramik dan simpan dalam kantong plastik yang telah diberi label (lokasi, tanggal, kode sampel, kedalaman lapisan sampel) (Gambar 6.6.).

10

Timbang berat basah sampel dalam hal diperlukan data kandungan air.

11

Jika sampel tidak langsung dikeringkan maka direkomendasikan untuk menyimpan sampel di dalam lemari pembeku. Jika lemari pembeku tidak ada, disarankan untuk menggunakan kotak pendingin dengan ice gel yang diganti setiap hari.

12

Selanjutnya sampel dibawa ke laboratorium untuk dikeringkan dan dianalisis.



Gambar 6.6. Sampel inti sedimen dipotong setiap 5 cm menggunakan pisau keramik

6.3

Penanganan Sampel

Sebelum sampel tiba di laboratorium, kondisi sampel perlu diperhatikan untuk mencegah pembusukan dan kerusakan sampel selama di lapangan. Hal ini penting terutama jika tidak memungkinkan untuk melakukan preparasi sampel di lapangan dan sampel diambil dari lokasi yang terpencil (jauh dari laboratorium).

Dalam hal tidak terdapat lemari pembeku, disarankan untuk menggunakan kotak pendingin dengan ice gel yang diganti setiap hari. Hal yang sama juga berlaku untuk pengiriman sampel, yaitu dengan mengemas sampel Sedimen beku menggunakan kotak pendingin yang di dalamnya diberi *ice gel*.

6.4

Pengiriman Sampel

Penting untuk memastikan aturan jasa ekspedisi dalam pengiriman sampel, karena mungkin ada perbedaan antara maskapai satu dengan yang lain. Beberapa dokumen yang umum diperlukan antara lain surat ijin penelitian, dokumen kargo, dan surat keterangan *Material Safety Data Sheet* (MSDS).





ANALISIS LABORATORIUM DAN DATA



Setelah sampel diambil dan dipreparasi awal di lapangan, proses selanjutnya adalah analisis di laboratorium. Pada tahap ini, sampel biomassa dan sedimen akan melalui beberapa proses di laboratorium untuk mendapatkan hasil akhir berupa data kandungan karbon organik.

7.1

Alat dan Bahan

Sebelum melaksanakan analisis sampel di laboratorium, alat dan bahan yang diperlukan, sedikitnya antara lain (Tabel 7.1/Gambar 7.1):

Tabel 7.1. Alat dan bahan untuk analisis sampel di laboratorium

	1	2	3
Gambar			
Alat dan Bahan	Cawan petri atau aluminium foil yang berbentuk persegi atau lingkaran atau sampel yang sudah tersimpan di wadah yang sesuai ketika dipreparasi awal di lapangan (kantong kertas untuk biomassa dan plastik klip untuk sedimen)	Oven laboratorium untuk mengeringkan sampel	Furnace atau oven pengabuan

	4	5	6
Gambar			
Alat dan Bahan	Cawan keramik untuk proses LOI (Loss on Ignition)	Timbangan analitik	Ayakan sampel (ukuran mesh 2mm dan 0,125mm)



	7	8	9
Gambar			
Alat dan Bahan	Lumpang dan alu untuk menghaluskan sampel	Desiccator	Mesin penghalus sedimen

	10	11	12
Gambar			
Alat dan Bahan	Aseton/alkohol 70%	Buku untuk mencatat proses preparasi dan alat tulis	Sarung tangan laboratorium

7.2.1 Langkah Kerja

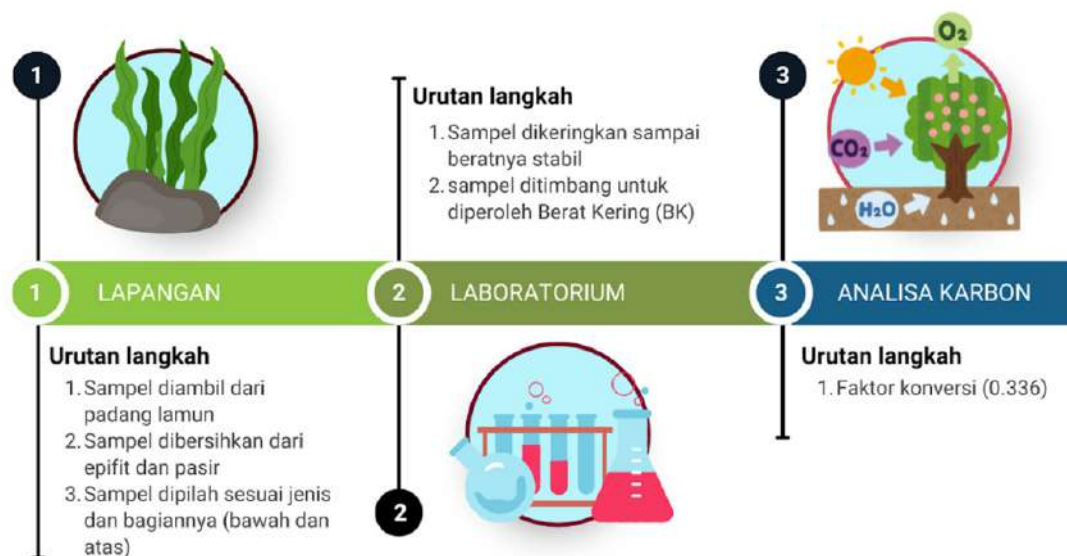
Tahapan-tahapan yang harus dilakukan adalah:

1. Masukkan kantong kertas samson berisi sampel biomassa lamun ke dalam oven bersuhu 60°C sampai sampel kering dan tercapai berat stabil. Umumnya sampel mencapai kering stabil setelah 3 – 7 hari tergantung besar atau kecil ukuran biomassa. Berat stabil adalah berat konstan yang didapat dari beberapa kali penimbangan sampel kering. Catatan: jika ingin mendapat nilai berat basah biomassa, penimbangan dapat dilakukan di lapangan sebelum sampel disimpan dalam kantong kertas samson.
2. Setelah sampel kering, bersihkan dari pasir-pasir yang masih melekat di akar atau di rimpang, pastikan sampel bersih sebelum ditimbang.
3. Timbang sampel dan catat berat kering (BK) dengan timbangan analitik.
4. Hitung nilai karbon organik biomassa lamun per tegakan dengan cara mengalikan berat kering masing-masing bagian biomassa dengan faktor konversi karbon sebesar 0,336 (Rahmawati *et al.*, 2019). Jika di satu lokasi hanya ditemukan satu spesies lamun, nilai konversi bisa menggunakan faktor konversi spesifik per spesies sesuai Rahmawati *et al.* (2019) (Tabel 7.2).

Tabel 7.2. Faktor konversi kandungan karbon organik dari berat kering per jenis lamun di Indonesia (dari Rahmawati *et al.*, 2019)

No	Jenis	Faktor konversi*
1	<i>Enhalus acoroides</i>	0.35
2	<i>Thalassia hemprichii</i>	0.33
3	<i>Cymodocea serrulata</i>	0.32
4	<i>Cymodocea rotundata</i>	0.38
5	<i>Halodule uninervis</i>	0.32
6	<i>Halodule pinifolia</i>	0.40
7	<i>Halophila ovalis</i>	0.27
8	<i>Syringodium isoetifolium</i>	0.31
9	<i>Halophila minor</i>	0.24
10	<i>Thalassodendron ciliatum</i>	0.39

*faktor konversi diperoleh dari rata-rata proporsi kandungan karbon organik per berat kering



Gambar 7.1. Alur analisis sampel biomassa untuk pengukuran karbon organik

7.2.2

Contoh perhitungan cadangan karbon pada biomassa

Pengambilan sampel biomassa dilakukan pada garis transek sebanyak 4 kali di setiap transek dengan pengambilan pada titik 0 m, 25 m, 50 m dan 100 m menggunakan pipa core berdiameter 4 inci. Perhitungan cadangan karbon dilakukan pada dua komponen yaitu biomassa bagian atas (*aboveground biomass*) dan biomassa bagian bawah (*belowground biomass*).

Perhitungan dilakukan sebagai berikut:

1 Hitung luas permukaan *core*.

Dalam hal ini,
diameter *core* adalah 4 inci = 0,102 m
maka luas *core* (m²) = $3,14 \times (0,102/2) \times (0,102/2)$
= 0,0082 m²

2 Hitung kandungan karbon biomassa dengan mengalikan berat kering dan faktor konversi (Tabel 7.1) untuk biomassa bagian atas dan bawah.

Sebagai contoh, pada sampel dari *core* pertama terdapat 2 jenis lamun dan sudah dicatat berat keringnya (BK) masing-masing, maka nilai karbon biomasnya adalah:

Nilai karbon x1 (gC) =
(BK jenis 1 x faktor konversi karbon jenis 1) + (BK jenis 2 x nilai karbon jenis 2)

Atau

Nilai karbon *core*1 (gC) =
(BK jenis 1 x 0,336) + (BK jenis 2 x 0,336)

Atau

Nilai karbon *core*1 (gC) =
(BK *Biomass atas* x 0,336) + (BK *Biomass bawah* x 0,336)

3 Agar mendapat satuan gC/m², maka nilai x1 dibagi dengan luasan *core* (0,0082 m²).

4 Setelah itu, hal yang sama dilakukan untuk sampel biomassa dari ketiga *core* lainnya.

5 Kemudian hitung nilai rata-rata, dilengkapi dengan nilai *Confidence Interval* pada tingkat 95%.



7.3.1

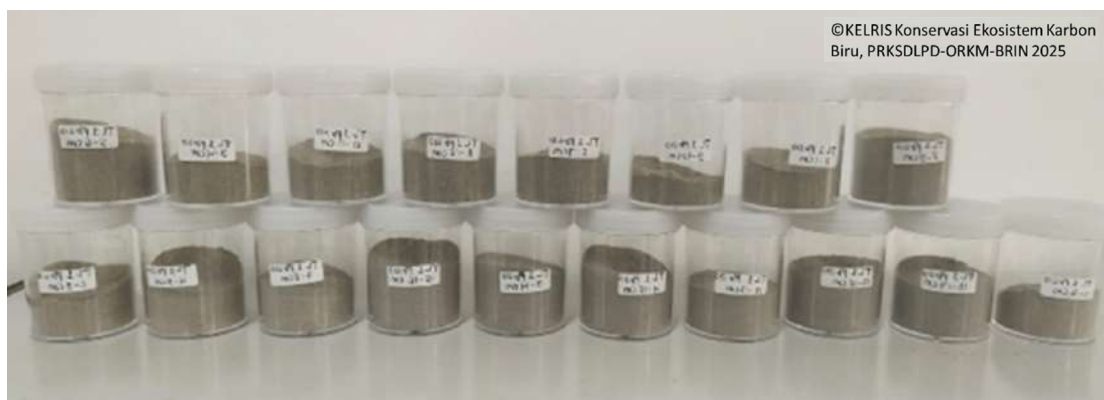
Langkah Kerja

Tahapan-tahapan yang perlu dilakukan adalah:

1. Jika sampel dalam keadaan beku, sampel dibiarkan dalam suhu ruang terlebih dahulu hingga sampel kembali ke kondisi normal (tidak beku).
2. Jika memerlukan data berat basah, sampel bisa ditimbang menggunakan timbangan.
3. Sampel dalam wadah plastik yang terbuka dapat langsung dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 60°C sampai berat stabil, umumnya berkisar 5 -7 hari, bisa lebih dari 7 hari tergantung berat sampel dan kondisi sampel (berpasir kasar, pasir halus, atau berlumpur). Berat wadah plastik bisa didapatkan dari penimbangan 10 plastik kosong dan diambil rata-rata beratnya. Sampel juga bisa dipindahkan dari dalam plastik klip ke dalam cawan petri atau wadah aluminium yang sebelumnya ditimbang terlebih dahulu berat kosongnya. Pastikan seluruh sampel di plastik klip dipindahkan ke cawan petri/wadah aluminium dan tidak ada sampel yang terbuang.
4. Timbang berat sampel kering dan wadahnya, catat dalam buku
5. Berat kering sampel diperoleh dari nilai berat kering sampel beserta wadahnya (poin 4), dikurangi dengan berat kosong wadah.
6. Hitung nilai *Dry Bulk Density* (DBD) sampel, dengan rumus:

$$\text{Dry Bulk Density (DBD)} = \frac{(\text{berat kering sampel (g)})}{(\text{volume sampel (cm}^3\text{)})}$$

Volume sampel diperoleh dari luas lingkaran permukaan pipa PVC yang digunakan dikalikan tinggi potongan sampel yang telah dikoreksi dengan faktor kompaksi (Faktor kompaksi dijelaskan di Bab 6).
7. Ayak sampel yang telah kering dengan mesh berukuran 2 mm untuk memisahkan bagian-bagian lamun dan karang.
8. Ambil sampel yang lolos dari ayakan 2 mm sebanyak kurang lebih 20 gram (atau disesuaikan dengan kebutuhan) untuk dihaluskan. Proses penghalusan dapat menggunakan lumpang dan alu, atau mesin penghalus (*grinder*). Setiap pergantian sampel, bersihkan alat dengan menggunakan alkohol 70% atau aseton.
9. Ayak sampel yang telah dihaluskan dengan ayakan berukuran 0,125 mm agar mendapat besar butir yang seragam. Masukkan sampel yang lolos dari ayakan ke dalam wadah berlabel (Gambar 7.2).



Gambar 7.2. Sampel sedimen kering yang sudah dihaluskan disimpan dalam wadah berlabel

10. Lakukan proses pengabuan/*Loss on Ignition* (LOI) untuk mendapatkan nilai %C. Prosedur pengabuan adalah sebagai berikut:
- Timbang berat kosong cawan keramik dan catat di buku
 - Timbang 5 gram sampel halus menggunakan timbangan analitik
 - Masukkan cawan keramik berisi 5 gram sampel sedimen ke dalam *furnace* bersuhu 450 °C selama 5-8 jam (Heiri *et al.*, 2001)³. Catatan: pilih waktu yang konsisten antara satu sampel dengan yang lain.
 - Matikan *furnace* dan buka penutupnya agar suhu menurun.
 - Jika suhu *furnace* sudah turun, keluarkan sampel dan simpan ke dalam *Desiccator* untuk mencegah kembalinya uap air ke dalam sampel.
 - Timbang cawan berisi sampel untuk mendapatkan berat sampel setelah pengabuan, catat di dalam buku.
 - Hitung nilai LOI (*Loss on Ignition*) dengan menggunakan rumus berikut :

$$\%LOI = \frac{(\text{berat sampel sebelum pengabuan (g)} - \text{berat sampel sesudah pengabuan (g)})}{(\text{berat sampel sebelum pengabuan (g)})} \times 100$$

11. Karbon organik dalam sampel sedimen (% Corg) dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Fourqurean *et al.*, 2012)

Jika %LOI < 20% ($r^2 = 0,87$)
 $\%C \text{ org} = (0,4 \times \%LOI) - 0,21$

Jika %LOI > 20% ($r^2 = 0,96$)
 $\%Corg = (0,43 \times \%LOI) - 0,33$

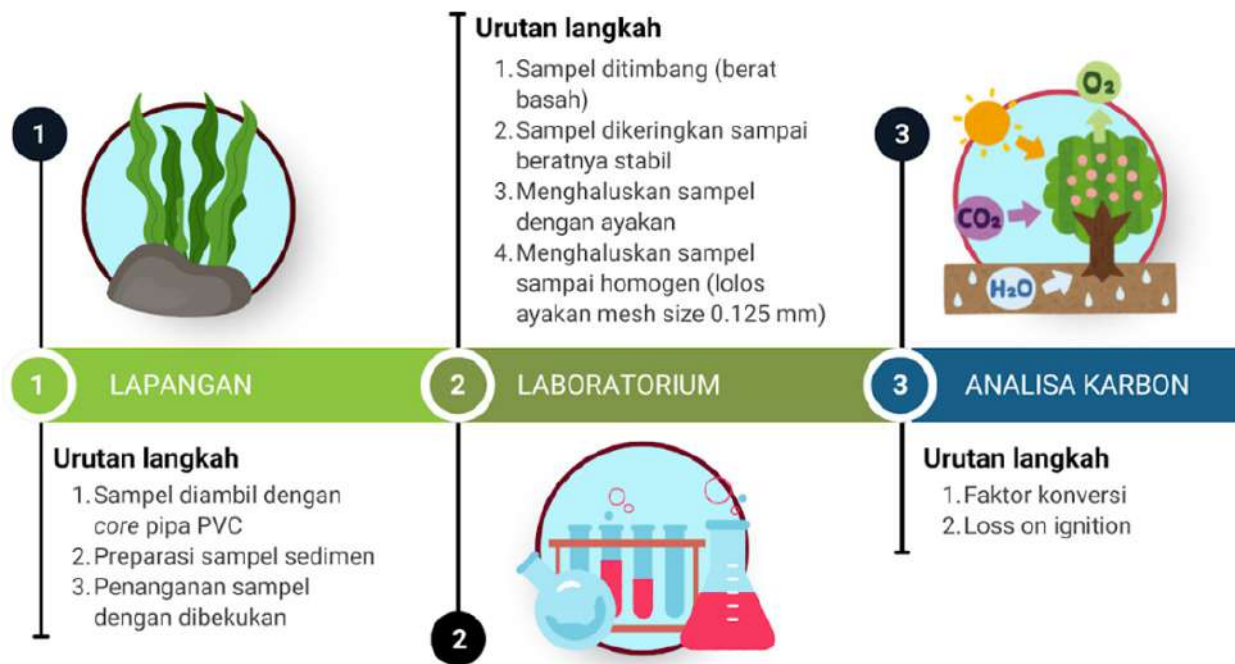
12. Hitung karbon sedimen pada tiap lapisan sampel dengan menggunakan rumus berikut:

$$\text{Karbon sedimen (Mg C/ha)} = \text{DBD (g/cm}^3\text{)} \times \text{interval kedalaman koreksi (cm)} \times \%Corg \times \frac{\text{Mg 1}}{1000000\text{g}} \times 100000000 \text{ cm}^2/\text{ha}$$

Jika dalam satu *core* yang panjang sedimen terambil adalah 32 cm dan dibagi dengan interval kedalaman 5 maka jumlah nilai karbon sedimen (KS) dalam satu pipa adalah penjumlahan dari karbon sedimen pada tiap lapisan sampel:

$$\text{Karbon sedimen (Mg C/ha)} = KS 1 + KS 2 + KS 3 + KS 4 + \dots + KS 6$$

³ Penggunaan suhu 450 °C dianjurkan agar hanya karbon organik yang teroksidasi, bukan karbon anorganik dalam sampel (Howard *et al.*, 2014)..



Gambar 7.3. Alur analisis sampel sedimen untuk pengukuran karbon organik

7.3.2

Contoh perhitungan cadangan karbon di sedimen lamun

Pengambilan sampel dilakukan di lokasi lamun yang memiliki karakteristik beragam (kondisi padat, sedang, jarang). Sampel sedimen diambil sejumlah 3 core pada masing-masing kondisi menggunakan pipa PVC berdiameter 6 cm dan diperoleh sampel dengan panjang sampel 25 cm (panjang sampel sebenarnya setelah dikoreksi kompaksi = 32 cm), kemudian sampel dipotong tiap 5 cm.

Lokasi X, Kondisi #1 (jarang), Core #1, Sampel A

Sampel A, tinggi sampel = 5 cm,
faktor kompaksi = 0,80
tinggi sampel sebenarnya = 6,25 cm

1 Dry Bulk Density (DBD)

Volume sampel = $3,14 \times 32 \times 6,25 = 194,73 \text{ cm}^3$
Berat kering sampel = 119,14 g
DBD = $119,14 \text{ g} / 194,73 \text{ cm}^3$
= $0,61 \text{ g/cm}^3$

2 % LOI = 3 → %LOI <20%

Faktor konversi dari %LOI ke %C ($r^2 = 0,87$)

%C = $0,40 \times \% \text{LOI} - 0,21$
= $0,40 \times 3 - 0,21$
= $0,99 \%$

3 Cadangan karbon sedimen per sampel

Dry Bulk Density = $0,61 \text{ g/cm}^3$
%C = $0,99 \%$
Tinggi sampel sebenarnya = $6,25 \text{ cm}$

Cadangan karbon sedimen per sampel
= $0,61 \text{ g/cm}^3 \times 0,99 / 100 \times 6,25 \text{ cm}$
= $0,037 \text{ g/cm}^3$

Ulangi tahap 1) sampai 3) untuk tiap sampel di core #1.

Nilai cadangan karbon di core #1

Sampel	Tinggi sampel terkoreksi (cm)	DBD (g/cm ³)	%C	Cadangan karbon (g/cm ²)
A	6,25	0,61	0,99	0,04
B	6,25	0,48	2,25	0,06
C	6,25	0,51	2,68	0,08
D	6,25	0,47	1,39	0,04
E	6,25	0,22	0,96	0,02
F	8,75	0,20	1,65	0,03
Total				0,27

Cadangan karbon di core #1 dengan kedalaman 32 cm yaitu **0,27 g/cm²**

Konversi dari g cm-2 ke Mg C/ha

1 Mega gram (Mg) = 1.000.000 g

1 hektar (ha) = 100.000.000 cm²

Konversi dari g/cm² ke Mg C/ha

= 0,27 g/cm² * (Mg/1.000.000 g) * (100.000.000 cm²/ha) = 27 Mg C/ha

cadangan karbon di core #1 dengan panjang sampel 32 cm yaitu 27 Mg C/ha

Ulangi untuk semua core

Nilai rata-rata dilengkapi dengan *Confidence Interval* pada tingkat 95%.





PERHITUNGAN CADANGAN KARBON DAN EMISI

Padang lamun menyimpan cadangan karbon (C) yang besar dalam biomassa lamun dan terutama pada sedimen tempat tumbuhnya lamun. Karbon pada sedimen sebagiannya berasal dari biomassa akar, rimpang, serasah, dan material organik lainnya, dan dapat menghasilkan simpanan karbon yang signifikan di perairan pesisir. Setelah mendapatkan nilai karbon organik pada biomassa dan sedimen ekosistem lamun, selanjutnya dilakukan analisis perhitungan total cadangan karbon pada tingkat kawasan.

8.1.1

Perhitungan Cadangan Karbon Biomassa

Perhitungan cadangan karbon pada biomassa lamun menggunakan data yang sudah didapatkan dari pengukuran dan perhitungan sebelumnya, yaitu cadangan karbon per luas area pengambilan sampel (gC/cm^2) atau untuk yang menggunakan data per tegakan membutuhkan data kerapatan lamun ($\text{tegakan}/\text{m}^2$) dan cadangan karbon per tegakan ($\text{gC}/\text{tegakan}$). Sehingga, tahapan-tahapan perhitungan cadangan karbon biomassa lamun adalah sebagai berikut:

1. Untuk perhitungan menggunakan nilai karbon per tegakan, hitung nilai cadangan karbon biomassa dalam satuan area kuadrat (gC/m^2) terlebih dahulu. Untuk pengambilan sampel yang menggunakan *core* atau skop, perhitungan tidak dibutuhkan karena sudah memiliki nilai dengan satuan gC/m^2 . Nilai cadangan karbon biomassa tegakan dalam satuan area dihitung menggunakan persamaan berikut:
3. Jika nilai simpanan karbon biomassa per area sudah didapatkan, hitung nilai minimum, maksimum, rata-rata, standar deviasi, standar error, dan *Confidence Interval* 95%
4. Konversi nilai rata-rata kandungan karbon untuk ukuran kuadrat atau stasiun menjadi satuan area yang digunakan dalam penilaian cadangan karbon ($\text{ton C}/\text{ha}$) menggunakan faktor konversi satuan berikut:

$$KB_i = KL_i \times KT_i$$

Keterangan:

KB_i = karbon biomassa per kuadrat ke-i (gC/m^2),
 KL_i = kerapatan lamun per kuadrat ke-i ($\text{tegakan}/\text{m}^2$)
 KT_i = cadangan karbon per tegakan ($\text{gC}/\text{tegakan}$).

2. Hitung nilai KB_i untuk semua kuadrat, transek, dan stasiun pengamatan.

$$KB_R = KB_i \times 1 \text{ ton} / 1.000.000 \text{ g} \times 10.000 \text{ m}^2 / \text{ha}$$

Keterangan:

KB_R = kandungan karbon biomassa rata-rata ($\text{ton C}/\text{ha}$), 1.000.000 g per ton C, dan 10.000 m^2 per ha.

- Perhitungan ini dilakukan baik untuk biomassa atas dan biomassa bawah.
- Total karbon biomassa didapatkan dengan menjumlah nilai karbon biomassa atas dan bawah.
- Hitung karbon biomassa total untuk satu kawasan. Nilai karbon untuk satu kawasan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$KB_T = KB_R \times LA$$

Keterangan:

KB_T = kandungan karbon Biomassa total (tC)

KB_R = kandungan karbon Biomassa rata-rata (ton C/ha),

LA = luas area (ha).

Contoh:

Pengukuran karbon biomassa di area lamun seluas 100 ha. Hasil pengukuran per area sampel adalah 15 gC/m² untuk biomassa atas dan 203 gC/m² untuk biomassa bawah. Jadi total biomassa adalah 218 gC/m². Sehingga, nilai kandungan karbon biomassa adalah:

Konversi nilai rata-rata kandungan karbon

$$KB_R = 218 \times 1000000 \times 10000$$

$$KB_R = 2,18 \text{ ton C/ha}$$

Hitung karbon biomassa total untuk satu kawasan

$$KB_T = 2,18 \text{ ton C/ha} \times 100\text{ha}$$

$$KB_T = 218 \text{ ton C}$$

8.1.2

Perhitungan Cadangan Karbon Sedimen

Tahapan-tahapan perhitungan cadangan karbon sedimen lamun adalah sebagai berikut:

- Hitung *Dry Bulk Density* (DBD) (g/cm³). DBD dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$DBD_i = \frac{BK_i}{VS_i}$$

Keterangan:

BK_i = berat kering sampel (g)

VS_i = volume sub sampel (cm³).

- Hitung kandungan karbon sedimen per sampel (gC/cm³). Nilai kandungan karbon pada sedimen dihitung dengan persamaan berikut (Kauffman dan Donato 2012):

$$KS_i = DBD_i \times IK_i \times \%C_i$$

Keterangan:

KS_i = karbon Sedimen subsampel ke-i (gC/ha)

DBD_i = *dry bulk density* ke-i (g/cm³)

IK_i = interval kedalaman (cm) yang sudah dikoreksi dengan kompaksi.

$\%C_i$ = nilai persen kandungan karbon organik hasil pengukuran untuk setiap subsampel. Nilai %C yang digunakan adalah nilai asli dengan dua desimal, misalnya nilai %C adalah 4,06% maka yang dipakai 4,06 (bukan 4,1).

- Nilai %C yang digunakan adalah nilai asli dengan dua desimal, misal nilai %C adalah 4,06% maka yang dipakai 4,06 (bukan 4,1).

Selanjutnya, jumlahkan semua nilai karbon sedimen untuk semua interval menggunakan persamaan berikut:

$$KS_s = \sum_{i=0}^n x KS_i$$

Atau misalnya, jika dalam satu *core* yang panjang sedimen terambil adalah 80 cm dan dibagi dengan interval kedalaman 5 maka jumlah nilai karbon sedimen (KS) ada 16 dalam satu *core* adalah:

$$KS_s = KS_1 + KS_2 + \dots + KS_{16}$$

- Ulangi langkah 1-3 untuk perhitungan semua sampel. Hitung juga nilai minimum, maksimum, rata-rata, standar deviasi, standar error, dan nilai *Confidence Interval* 95%.

- Konversi nilai rata-rata kandungan karbon untuk ukuran sampel atau stasiun menjadi satuan area yang digunakan dalam penilaian cadangan karbon (tC/ha) menggunakan faktor konversi satuan berikut:
- Hitung karbon sedimen untuk satu kawasan. Nilai karbon untuk satu kawasan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$KS_R = KS_s \times 1 \text{ ton} / 1000000 \text{ g} \times 100000000 \text{ cm}^2/\text{ha}$$

$$KS_T = KS_R \times LA$$

Keterangan:

KS_s = jumlah nilai karbon Sedimen dalam satu core

KS_R = kandungan karbon Sedimen rata-rata (tC ha⁻¹)

1000000 g per ton C

100000000 cm² per ha.

Contoh:

Pengukuran karbon sedimen di area lamun seluas 100 ha. Hasil pengukuran per area sampel adalah berat kering = 119,14 g, volume sub sampel = 194,73 cm³, dan %C = 0,99. Pengukuran sub sampel diambil per 5 cm dengan kedalaman 30 cm. Sehingga, nilai kandungan karbon sedimen adalah:

- Hitung *Dry Bulk Density* (DBD) (g/cm³) per sub sampel

$$DBD_i = \frac{119,14}{194,73}$$

$$DBD_i = 0,6$$

- Hitung cadangan karbon sedimen per sub sampel

$$KS_i = 0,61 \times 5 \times 0,99$$

$$KS_i = 3,02 \text{ gC/cm}^2$$

- Hitung semua untuk per sub sampel

- Jumlahkan semua hasil perhitungan

$$KS_i = 3,02+6,79+8,51+4,06+1,32+2,92 \text{ (gC/cm}^2\text{)}$$

$$KS_i = 26,54 \text{ gC/cm}^2$$

- Konversi nilai rata-rata kandungan karbon menjadi satuan area

$$KS_R = 26,54 \times 1 \text{ ton}/1.000.000 \text{ g} \times 100.000.000 \text{ cm}^2/\text{ha}$$

$$KS_R = 2.654 \text{ gC/cm}^2$$

- Hitung karbon sedimen total untuk satu kawasan

$$KS_T = 2.654 \text{ ton C/ha} \times 100 \text{ ha}$$

$$KS_T = 265.400 \text{ ton C}$$

8.1.3

Perhitungan Cadangan Karbon Total Kawasan

Cadangan karbon total untuk satu kawasan dilakukan dengan menjumlahkan nilai total cadangan karbon kawasan untuk biomassa dan sedimen.

Contoh:

Berdasarkan hasil perhitungan karbon biomassa dan sedimen total, maka total kawasan adalah

$$218 \text{ ton C} + 265400 \text{ ton C} = 265618 \text{ ton C}$$

Pada ekosistem lamun, IPCC membagi tiga aktivitas utama, yaitu 1) ekstraksi, yang mencakup ekskavasi untuk pembangunan pelabuhan, dermaga dan marina, dan reklamasi atau pengerukan untuk memfasilitasi peningkatan elevasi tanah, 2) pembasahan dan penanaman yang mencakup pemulihan vegetasi pada tanah yang tidak terdrainase, dan 3) akuakultur, atau lebih spesifik untuk lamun. Aktivitas akuakultur termasuk pada aktivitas emisi nonCO₂, yaitu emisi N₂O dari pemanfaatan akuakultur.

Emisi aktual dalam ekosistem karbon biru padang lamun dihitung menggunakan stock *difference approach* (pendekatan perbedaan cadangan) atau *gain-loss approach* (pendekatan

penambahan atau pengurangan). Pendekatan perbedaan cadangan menghitung perbedaan cadangan karbon di ekosistem lamun dari waktu ke waktu untuk menentukan perubahan total karbon yang disimpan atau dilepaskan. Sementara itu, pendekatan penambahan atau pengurangan fokus pada penghitungan serapan karbon (*gain*) dari proses akumulasi biomassa dan sedimen, serta pelepasan karbon (*loss*) akibat degradasi ekosistem atau aktivitas manusia. Hasil perhitungan emisi aktual kemudian dibandingkan dengan *baseline* emisi untuk mengidentifikasi dampak aksi mitigasi yang dilakukan, baik dalam bentuk pengurangan emisi maupun peningkatan serapan karbon bersih. Dua pendekatan ini digunakan untuk Tier 3.

8.2.1 Emisi CO₂ dari Ekstraksi (ekskavasi)

EmisiCO₂ terjadi karena adanya ekstraksi. Kegiatan ekstraksi adalah kegiatan yang mengakibatkan kehilangan biomassa, bahan organik mati dan bahan organik tanah sehingga membuat ekosistem lamun mengalami kerusakan dan menghasilkan emisi. Tingkat kerusakan padang lamun akibat kegiatan yang telah memperoleh izin diasumsikan bervariasi, tergantung pada data aktivitasnya. Sebagian kegiatan yang melibatkan ekstraksi sedimen dan vegetasi lamun secara keseluruhan atau mengakibatkan konversi lahan menjadi area terbangun seperti dermaga dan reklamasi. Setiap aktivitas memiliki tingkat dampak yang berbeda. Oleh karena itu, faktor emisi untuk lamun yang terekstraksi harus diukur pada masing-masing aktivitas.

Metode perhitungan emisiCO₂ dari ekstraksi menggunakan rumus berikut:

$$E_x = A_x \times fx \times (FE_{KBT} + FE_{KST}) \times FK_{CO_2}$$

Keterangan:

- E** = emisi terkait kegiatan ekstraksi (tonCO₂e)
- A** = area terpengaruh kegiatan ekstraksi
- fx** = faktor ekstraksi,
- FE_{KBT}** = faktor emisi Biomassa lamun terekstraksi (ton C/ha)
- FE_{KST}** = faktor emisi sedimen lamun terekstraksi (ton C/ha)
- FK_{CO₂}** = faktor konversi dari rasio berat molekulCO₂ (44) karbon (12), yaitu 3,67.

Nilai FE dapat menggunakan nilai dari IPCC atau nilai nasional atau pengukuran langsung.

Nilai faktor ekstraksi tergantung pada kegiatan pemanfaatan di area padang lamun yang menyebabkan konversi secara menyeluruh menjadi pemanfaatan lainnya yang menyebabkan terjadinya ekstraksi lamun dan sedimen (seperti pembangunan pelabuhan, pemukiman, dll.) maka nilai f_x yang digunakan 100% (hilang semua). Apabila kegiatan pemanfaatan lamun tidak menyebabkan terjadinya ekstraksi secara menyeluruh atau tersisa sebagian, maka nilai f_x -nya sesuai dengan persentase karbon yang diekstrak.

Contoh:

Terdapat kegiatan ekskavasi padang lamun seluas 10 ha. Kegiatan ini merubah semua area lamun menjadi penggunaan lain atau merubah keseluruhan ($f_x = 100\%$ atau sama dengan 1). Diketahui bahwa nilai FE untuk biomassa lamun sebesar 4,98 ton C/ha dan untuk sedimen sebesar 170,67 ton C/ha. Sehingga, nilai emisi yang terjadi adalah:

$$E_x = 10 \text{ ha} \times 1 \times (4,98 \text{ ton C/ha} + 170,67 \text{ ton C/ha}) \times 3,67 \text{ CO}_2\text{e}$$

$$E_x = 10 \text{ ha} \times (175,65 \text{ ton C/ha}) \times 3,67 \text{ CO}_2\text{e}$$

$$E_x = 6446,36 \text{ ton CO}_2\text{e}$$

8.2.2 Emisi CO₂ dari padang lamun terdegradasi

Metode untuk mengukur emisi dari ekosistem padang lamun yang terdegradasi belum tersedia. Padang lamun yang terdegradasi adalah padang lamun yang mengalami penurunan kondisi ekologi (misalnya tutupan kanopi) akibat adanya gangguan manusia (lalu lintas kapal, pencemaran, wisata, dll.) tetapi tidak menyebabkan hilangnya padang lamun. Padang lamun yang terdegradasi melepaskan emisi CO₂ karena mineralisasi sedimen.

Adapun formula untuk menghitung emisi dari degradasi tersebut sebagai berikut:

$$D_E = A_x \times \text{CO}_2\text{e} \times f_x \times \text{FE}_{\text{DE}} \times \text{FK}_{\text{CO}_2}$$

Keterangan:

- D_E = emisi degradasi lamun terkait kegiatan di area kegiatan (tonCO₂e),
- A = area terpengaruh kegiatan ekstraksi kategori rendah (ha)
- f_x = faktor ekstraksi
- FE_{DE} = faktor emisi degradasi lamun (ton C/ha)
- FK_{CO_2} = faktor konversi dari rasio berat molekul CO₂ (44) dan karbon (12), yaitu 3,67.

Nilai FE tergantung padang tingkat degradasi yang terjadi yang lajunya dipengaruhi oleh intensitas dari gangguan, hidrodinamika dan kondisi biofisik.

8.2.3 Perhitungan Serapan CO₂ dari Pemulihan

Kegiatan pemulihan dilakukan dengan regenerasi dan revegetasi. Regenerasi dapat berlangsung secara alami, ketika gangguan menurun atau tidak ada dan kondisi ekologi lamun meningkat. Waktu regenerasi tergantung pada kesehatan lamun, kondisi lingkungan, dan karakteristik kerusakan. O'Brien *et al.* (2018) merangkum jika untuk skala ekosistem, waktu yang dibutuhkan untuk pulih sepenuhnya membutuhkan waktu sedikitnya lima tahun, tetapi untuk skala kecil, waktu yang dibutuhkan relatif lebih cepat, tergantung pada jenis lamun.

Revegetasi dilakukan dengan penanaman lamun kembali pada area yang sebelumnya mengalami kerusakan atau ekskavasi. Kegiatan pemulihan ini dapat meningkatkan cadangan karbon di ekosistem padang lamun.

Metode penghitungan serapan CO₂ dari kegiatan revegetasi padang lamun menggunakan rumus berikut:

$$S_R = A_R \times FE_R \times FK_{CO_2}$$

Keterangan:

- S_R** = serapan CO₂ yang terkait dengan kegiatan regenerasi atau revegetasi (tonCO₂e)
A_R = area terpengaruh kegiatan pemulihan (ha)
FE_R = emisi CO₂ dari agregat tanah mineral dan organik yang telah dipengaruhi oleh kegiatan revegetasi (ton C/ha/tahun)

Nilai default IPCC untuk FE revegetasi padang lamun daerah tropis ialah antara 0,2 dan 0,7 ton C/ha/tahun dengan rata-rata 0,47 ton C/ha/tahun. Meskipun demikian, nilai FE beragam

antar spesies lamun, jenis tanah dan iklim. Nilai FE untuk wilayah tropis, khususnya Indonesia

Contoh:

Terdapat kegiatan rehabilitasi padang lamun seluas 10 ha. Kegiatan ini merupakan revegetasi area padang lamun yang hilang karena adanya aktivitas pembangunan. Kegiatan ini baru berjalan selama satu tahun. Sehingga, nilai serapan CO₂ yang terjadi adalah:

$$S_R = 10 \text{ ha} \times 0,43 \text{ ton C/ha/tahun} \times 3,67 \text{ CO}_2\text{e} \\ S_R = 15,78 \text{ ton CO}_2\text{e}$$

8.2.4

Perhitungan Emisi N₂O dari Marikultur (Akuakultur)

Pengukuran emisi N₂O mengacu pada IPCC 2013, yang mana fokus pada emisi selama penggunaan tambak. Hal ini karena aktivitas paling signifikan yang berkontribusi terhadap emisi N₂O dari lahan basah pesisir yang dikelola adalah akuakultur. Budidaya udang dan ikan meningkatkan beban nutrisi di tambak budidaya.

Emisi N₂O tidak langsung yang berasal dari aktivitas di lahan terestrial atau sebagai pengolahan air limbah, akuakultur lahan basah pesisir terjadi sebagai sumber langsung N₂O dari lahan basah pesisir. Di padang lamun, sumber N₂O langsung ini berasal dari N yang ditambahkan ke keramba ikan (misalnya, instalasi lepas pantai). Oleh karena itu, harus dipastikan tidak ada penghitungan ganda. Dengan demikian, aktivitas ini mencakup sumber langsung dan tidak langsung emisi N₂O. Sehingga, emisi N₂O dari estimasi yang terjadi selama kegiatan akuakultur di mana tidak terdapat di padang lamun dapat dikecualikan. Selain itu, Pada fase konstruksi dan tidak produksi, emisi non-CO₂ diasumsikan dapat diabaikan dengan EF = 0.

Metode penghitungan emisi N₂O dari kegiatan akuakultur di padang lamun menggunakan persamaan berikut:

$$E_{AQ} = \frac{P_{AQ} \times FE_{AQ} \times NK \times GWP}{1000}$$

- E_{AQ}** = emisi marikultur (tonCO₂e),
P_{AQ} = produksi ikan marikultur (kg),
FE_{AQ} = faktor emisi untuk emisi N₂O dari ikan yang diproduksi; kg N₂O-N per kg ikan. Nilai default IPCC berkisar antara 0 dan 0,0038 dengan rata-rata 0,00169 kg N₂O-N/kg ikan (Hu *et al.*, 2012; IPCC 2013),
NK = Nilai konversi N₂O-N ke N₂O sebesar 0,76, dan
GWP = *Global Warming Potential* sebesar 289.

Contoh:

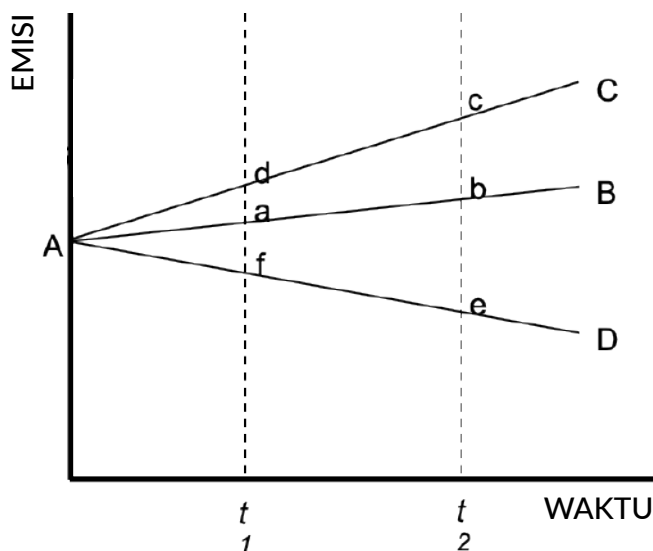
Suatu kegiatan keramba jaring tancap (KJT) dibangun di atas area padang lamun. Dalam satu tahun, KJT mampu memproduksi ikan sebesar 1.000 kg. Sehingga, nilai emisi yang terjadi adalah:

$$E_{AQ} = \frac{(1000 \text{ kg} \times 0,00169 \text{ kg N}_2\text{O-N/kg} \times 0,76 \times 289)}{1000} \\ E_{AQ} = \frac{371,19}{1000} \\ E_{AQ} = 0,37 \text{ ton CO}_2\text{e}$$



PENDUGAAN BASELINE, PRINSIP ADDITIONALITY DAN SAFEGUARD

Baseline adalah titik rujukan cadangan dan emisi karbon di padang lamun yang dihitung sebagai kondisi dasar dalam batas spasial dan temporal sebelum proyek karbon dimulai dengan asumsi tidak ada intervensi proyek (Gambar 9.1). *Additionality* menjelaskan pembuktian pengurangan emisi yang memang tidak akan terjadi tanpa adanya intervensi, dengan mempertimbangkan regulasi, sumber daya finansial, dan praktik umum yang terjadi. *Safeguard* mencakup *leakage* (kebocoran emisi yang terjadi di lokasi lain akibat proyek), *reversal* (dampak pengurangan emisi tidak permanen), dan *uncertainty* (kemungkinan pengurangan emisi tidak tercapai dengan mempertimbangkan berbagai faktor). Pendugaan yang dilakukan berdasarkan bab ini dilakukan berdasarkan data yang dikembangkan dari Bab 2 hingga 8 yang selanjutnya dikembangkan sesuai kebutuhan dan kondisi tingkat proyek. Pendugaan ini juga bisa disesuaikan dengan metodologi yang dipilih sesuai ketentuan *Mutual Recognition Agreement* (MRA) serta dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi terkini saat proyek mulai dikembangkan.



Gambar 9.1

Konsep *baseline* (garis AB), *leakage*/kebocoran (garis AC), dan perolehan (garis AD), dalam proyek karbon biru selama periode waktu t_1 hingga t_2 . *Additionality* adalah luas bidang "abef" dikurangi bidang "abcd" (Murdiyarso dan Suryadiputra. 2003).

9.1

Baseline

Penentuan *baseline* proyek karbon padang lamun dilakukan melalui beberapa tahap. Pertama, identifikasi berbagai kemungkinan skenario tanpa proyek, misalnya lamun dibiarkan rusak, area dimanfaatkan untuk reklamasi, atau direstorasi dengan dana pemerintah. Berikutnya, masing-masing kemungkinan tersebut diteliti sisi legalitas, hambatan teknis dan finansialnya. Pada sebagian besar kasus, opsi *baseline* yang paling realistis adalah business as usual, dimana lamun dibiarkan rusak, dan kondisi inilah yang digunakan sebagai pembanding untuk menghitung manfaat tambahan dari proyek karbon.

Perhitungan *baseline* emisi dilakukan pada tiga komponen, yaitu emisi karbon historis, skenario karbon, dan non-karbon sebagai *co-benefits*. Penyusunan *baseline* didasarkan pada data historis yang mencakup tingkat emisi masa lampau, serta proyeksi masa depan berdasarkan tren aktivitas manusia atau

perubahan lingkungan yang relevan. Pemodelan *baseline* dapat dilakukan dengan beberapa pendekatan. Pendekatan umum bisa digunakan apabila proyek tidak memiliki karakteristik khusus, atau pendekatan khusus apabila ada ciri, jenis, atau metode tertentu. Pendekatan tetap (*fixed*) atau statik bisa dilakukan untuk satu periode kredit, sedangkan pendekatan *baseline* terkoreksi (*adjusted*) atau dinamik dapat digunakan untuk beberapa periode kredit dimana koreksi dilakukan setiap dimulainya periode kredit baru.

Baseline idealnya tidak bersifat statis; ia harus diperbarui setiap 5–10 tahun mengikuti data terbaru, perkembangan metodologi, serta kondisi lapangan. Dengan *baseline* yang diperbarui, dapat menyajikan data secara kredibel dan transparan serta memenuhi standar verifikasi yang ditetapkan dalam IPCC Guideline for National GHG Inventories Wetlands 2013.

9.2

Additionality

Dalam proyek karbon, kita perlu membuktikan bahwa manfaat penyerapan karbon atau pengurangan emisi benar-benar tambahan (*additional*), bukan sesuatu yang akan terjadi meskipun proyek tidak dilakukan. Secara sederhana, suatu proyek karbon dikatakan *additional* jika proyek tersebut menghasilkan pengurangan atau penghilangan emisi gas rumah kaca yang tidak akan terjadi tanpa adanya intervensi dari proyek tersebut (Houston *et al.* 2024). Dalam konteks kebijakan skema sertifikasi penurunan emisi, suatu proyek diakui memiliki *Additionality* jika memenuhi persyaratan: 1) proyek tersebut dilaksanakan tidak karena diwajibkan secara hukum, 2) menghadapi hambatan (misalnya pendanaan atau kelembagaan), dan 3) menjadi mungkin dilaksanakan karena adanya pendanaan karbon. Secara umum, daftar pertanyaan untuk menguji *Additionality* dapat dilihat di Lampiran 9.1.

Additionality diukur dengan membandingkan emisi atau penyerapan karbon dalam skenario proyek dengan skenario *baseline*. Skenario proyek dikembangkan berdasarkan aksi mitigasi yang dilakukan seperti tapi tidak terbatas pada konservasi, restorasi, mengubah pasokan atau aliran sedimen,

meningkatkan kualitas air, *improved management practice* seperti menghilangkan spesies invasif atau gangguan lainnya.

Salah satu isu dalam perhitungan *Additionality* adalah mempertimbangkan jumlah karbon organik (OC) yang terakumulasi di dalam tanah berasal dari ekosistem lamun itu sendiri (*Autochthonous Carbon*), serta jumlah karbon organik yang awalnya diproduksi di luar ekosistem lamun, kemudian masuk dan terakumulasi di sedimen lamun (*Allochthonous Carbon*). Peningkatan cadangan karbon yang *autochthonous* adalah yang dapat diperhitungkan dalam perhitungan *Additionality* dengan asumsi memang diakibatkan aksi mitigasi yang dilakukan, bukan hanya terbawa dari luar ekosistem lamun tersebut seperti oleh arus laut. Penentuan kandungan karbon *autochthonous* di sedimen dilakukan dengan analisis isotop stabil dan analisis stratigrafi.

Selain perlu membuktikan dari sisi cadangan dan emisi karbon, pengembang proyek perlu melakukan Analisis *Regulatory Additionality*, Analisis *Financial Additionality*, dan Pendekatan Berbasis Kinerja/*Performance-based Approaches*.

9.2.1 Analisis *Regulatory Additionality*

Analisis ini dilakukan untuk menilai apakah kegiatan proyek sudah diwajibkan oleh hukum atau peraturan yang berlaku, sehingga kegiatan tersebut akan tetap dilaksanakan tanpa adanya insentif kredit karbon. Langkah-langkahnya mencakup penelaahan peraturan perundang-undangan di tingkat lokal, nasional, dan internasional untuk memastikan bahwa kegiatan proyek tidak termasuk kewajiban hukum yang diberlakukan. Proses ini juga mempertimbangkan regulasi yang telah diumumkan dan dapat berlaku selama periode kredit. Analisis juga perlu dilakukan untuk melihat seberapa efektif regulasi sudah diimplementasikan. Hasil yang diharapkan adalah dokumentasi yang menyatakan bahwa kegiatan proyek melampaui kepatuhan hukum (*non-kompulsif*) sehingga memenuhi kriteria *Additionality*. Keahlian yang diperlukan adalah analisis hukum dan kebijakan dengan fokus pada bidang lingkungan, energi, dan iklim. Analisis regulasi merupakan langkah awal penting dalam kerangka kerja *Additionality*, termasuk dalam alat penilaian *Additionality* di bawah Paris Agreement Article 6 dan CDM TOOL01.

9.2.2 Analisis *Financial Additionality*

Analisis *Financial Additionality* bertujuan membuktikan bahwa proyek tidak layak secara finansial jika dilakukan tanpa pendapatan dari kredit karbon, sehingga pendanaan karbon menjadi elemen penting untuk pelaksanaan proyek.

- **Analisis Investasi**

Analisis investasi membandingkan daya tarik finansial proyek karbon dengan alternatif bisnis seperti biasa (*business-as-usual*). Pertanyaan utama yang perlu dijawab untuk melakukan *Financial Additionality* dan khususnya analisis investasi adalah: Apakah proyek ini layak secara finansial tanpa kredit karbon?

Langkah-langkahnya meliputi perhitungan indikator keuangan seperti *internal rate of return* (IRR), *net present value* (NPV), *cost-benefit ratio*, *levelized cost*, dan periode pengembalian modal, dengan memperhitungkan semua pendapatan, biaya, subsidi, dan faktor pasar tanpa memasukkan pendapatan

- **Analisis Hambatan (*Barrier Analysis*)**

Analisis ini diterapkan apabila analisis investasi tidak sesuai atau tidak memberikan hasil yang jelas. Metode ini mengidentifikasi hambatan non-finansial seperti hambatan informasi, institusional, teknologi, pasar, atau kapasitas yang mencegah pelaksanaan proyek tanpa pendanaan karbon. Langkah-langkah meliputi pendataan dan pembuktian adanya hambatan tersebut serta bagaimana pendapatan kredit karbon mengatasi hambatan tersebut. Hasilnya berupa laporan terstruktur yang menjelaskan hambatan dan peran pendanaan karbon dalam mengatasinya sebagai bukti *Additionality*.

- **Analisis Praktik Umum (*Common Practice Analysis*)**

Analisis praktik umum bertujuan menunjukkan bahwa jenis proyek dan teknologi yang diajukan tidak lazim atau jarang diterapkan dalam konteks geografis dan sektoral terkait. Langkahnya adalah mengumpulkan data proyek dan teknologi yang ada untuk menunjukkan bahwa proyek yang diusulkan merupakan sesuatu yang baru atau tidak umum. Apabila praktik tersebut sudah umum terjadi tanpa pendapatan kredit

kredit karbon. Analisis sensitivitas dengan membandingkan beberapa skenario perlu dilakukan. Proyek dianggap tambahan secara finansial apabila kurang menarik secara ekonomi tanpa pendapatan kredit karbon. Hasil yang diharapkan adalah laporan kelayakan finansial yang menunjukkan bahwa proyek tidak akan dilaksanakan tanpa pendanaan karbon. Keahlian yang dibutuhkan adalah pemodelan keuangan, penilaian investasi, dan pemahaman konteks ekonomi proyek. Metode ini distandarkan dalam CDM TOOL01, Verra VT0008, dan Paris Agreement Article 6.

Keahlian yang diperlukan meliputi analisis institusional, penilaian risiko, dan pemahaman sektor terkait. Analisis hambatan banyak digunakan dalam metodologi CDM dan Verra sebagai alternatif atau pelengkap analisis investasi.

[Pertanyaan-pertanyaan yang perlu dijawab untuk melakukan barrier analysis adalah](#)

1. Apakah ada hambatan nyata di lapangan? dan
2. Apakah kredit karbon dapat mengatasi hambatan tersebut?

karbon, maka proyek tidak memenuhi syarat *Additionality*. Hasil yang diharapkan adalah studi perbandingan yang mendokumentasikan keunikan atau inovasi teknologi proyek. Keahlian yang diperlukan meliputi riset pasar dan analisis sektoral. Analisis ini mendukung hasil analisis investasi dan hambatan untuk memperkuat keyakinan atas *Additionality*.

9.2.3

Pendekatan Berbasis Kinerja/*Performance-based Approaches*

Pendekatan berbasis kinerja menilai apakah kinerja proyek (misalnya intensitas pengurangan emisi) melampaui ambang batas atau *baseline* yang telah ditetapkan oleh program. Metode ini menggunakan tolok ukur standar atau tingkat pengurangan emisi yang melebihi efisiensi bisnis seperti biasa. Langkah-langkahnya meliputi penetapan ambang batas kinerja berdasarkan data historis atau rata-rata sektoral, pemantauan kinerja aktual, dan penerbitan kredit hanya untuk pengurangan yang melebihi ambang tersebut. Hasil yang diharapkan adalah laporan kinerja yang sesuai dengan metodologi yang disetujui, yang membuktikan pengurangan emisi akibat kinerja proyek di atas standar. Keahlian yang diperlukan mencakup analisis data,

akuntansi emisi, dan pemahaman tolok ukur kinerja sektoral. Pendekatan ini semakin banyak digunakan pada standar terkini dan dalam penyelarasan aturan nasional dengan Paris Agreement.

Metodologi-metodologi di atas secara kolektif menjamin bahwa proyek karbon memenuhi prinsip *Additionality* utama sesuai PACM dan regulasi nilai ekonomi karbon Indonesia sehingga kredibilitas dan integritas lingkungan dari kredit karbon dapat terjaga dan mendukung aksi iklim yang nyata dan berbasis bukti.

9.3

Safeguard

Proyek karbon lamun harus mematuhi *safeguard* yang mengacu pada pedoman yang dikembangkan oleh otoritas yang berwenang (Kementerian Lingkungan Hidup). Kerangka ini bertujuan untuk memastikan bahwa proyek memberikan manfaat maksimal dengan meminimalkan risiko sosial, ekonomi, dan lingkungan. Kerangka Pengaman mencakup mekanisme perlindungan terhadap hak-hak masyarakat, pembagian manfaat ekonomi yang adil, dan perlindungan terhadap ekosistem lamun dari aktivitas yang dapat menyebabkan kerusakan atau degradasi. Ada tiga risiko utama yang harus ditangani, yaitu kebocoran emisi (*leakage*), risiko balik (*reversal*), dan ketidakpastian (*uncertainty*).

9.3.1

Kebocoran Emisi (*Leakage*)

Risiko kebocoran terjadi ketika upaya pengurangan emisi di wilayah proyek justru menyebabkan peningkatan emisi di luar batas wilayah proyek. Misalnya, perlindungan kawasan lamun dalam proyek dapat memindahkan aktivitas destruktif seperti reklamasi atau perikanan intensif ke wilayah lain di luar area proyek. Untuk mengatasi hal ini, ditetapkan penyisihan wilayah penyangga (*buffer*), yang merupakan persentase dari kredit karbon yang disisihkan sebagai cadangan dan tidak dapat diklaim atau dijual. *Buffer*

memastikan bahwa proyek karbon tetap memenuhi standar mitigasi dan dapat dipertanggungjawabkan secara transparan. Penerapan kerangka pengaman dan penyisihan *buffer* yang efektif tidak hanya melindungi keberlanjutan proyek, tetapi juga memberikan kepercayaan kepada investor, mitra, dan pemangku kepentingan lainnya. Dalam hal risiko kebocoran emisi, penyisihan *buffer* ditetapkan sebesar 10% dari kredit karbon untuk risiko tinggi dan 3% untuk risiko rendah.

9.3.2

Risiko Balik (*Reversal*)

Risiko balik terjadi ketika pengurangan emisi yang telah dicapai hilang akibat perubahan kondisi, seperti bencana alam, perubahan kebijakan, atau kurangnya dukungan masyarakat. Sebagai contoh, jika proyek karbon biru berbasis lamun terpengaruh oleh sedimentasi berlebihan atau kebijakan reklamasi pesisir, manfaat mitigasi dapat terancam. Untuk mengelola risiko ini, penyisihan *buffer* antara 5% hingga 10% wajib dibuat berdasarkan tingkat risiko yang diidentifikasi. Proyek dengan ancaman risiko balik yang tinggi harus menyediakan *buffer* lebih besar untuk memastikan keberlanjutan pengurangan emisi yang telah dicapai. Penilaian risiko balik mencakup beberapa langkah kunci, yaitu: mengidentifikasi faktor risiko potensial yang dapat menyebabkan pembalikan, mengevaluasi kemungkinan dan besaran risiko tersebut, serta menerapkan

langkah mitigasi seperti penyesuaian desain proyek, dan pemantauan berkelanjutan untuk mengkompensasi potensi kerugian.

Faktor yang dipertimbangkan mencakup variabel ekologis, manajemen proyek, dan gangguan eksternal. Proyek juga harus menetapkan protokol pemantauan, pelaporan, dan verifikasi yang kuat untuk mendeteksi dan mengukur setiap kejadian pembalikan. Identifikasi dan kuantifikasi risiko perlu dibuat secara transparan dengan asumsi konservatif, dan manajemen risiko proaktif dibuat untuk memastikan hasil proyek tetap tahan lama dan bermakna dalam jangka panjang. Pendekatan ini tidak hanya menjaga manfaat iklim tetapi juga memelihara kepercayaan pasar terhadap mekanisme *offset* karbon.

9.3.3

Ketidakpastian (*Uncertainty*)

Tingkat kualitas data, kelemahan metodologi, atau variasi alamiah dalam ekosistem dapat memunculkan risiko ketidakpastian, yang berpengaruh pada akurasi perhitungan cadangan dan emisi. Untuk menjamin akurasi, kredibilitas dan transparansi, estimasi ketidakpastian perlu dilakukan, sehingga penyesuaian (*buffer*) bisa dibuat sesuai dengan tingkat ketidakpastiannya.

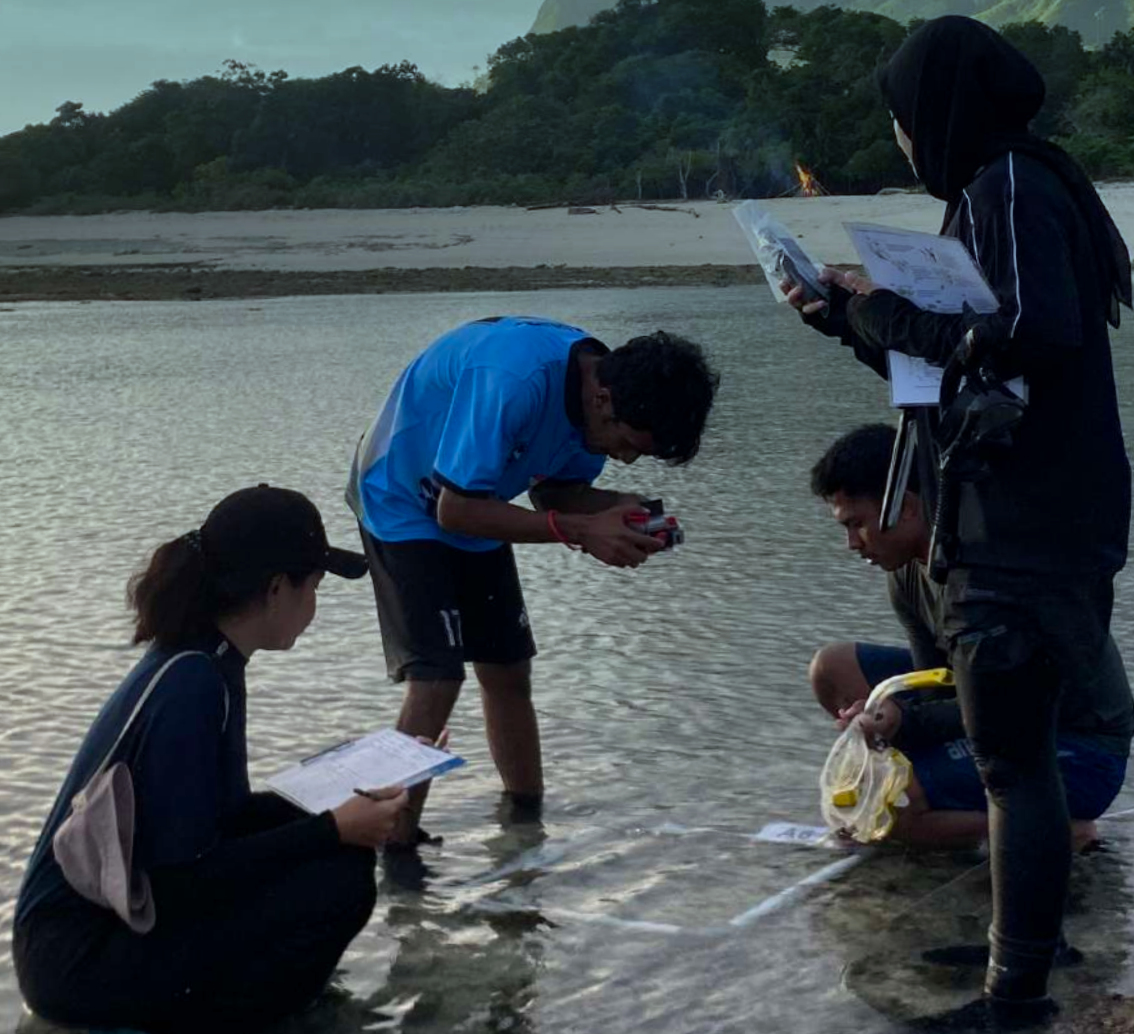
Estimasi ketidakpastian dalam perhitungan manfaat karbon didefinisikan sebagai ukuran kepercayaan atas pengurangan atau penghilangan emisi gas rumah kaca yang dilaporkan akibat aktivitas proyek. Analisis ini melibatkan beberapa langkah utama: pertama, mengidentifikasi semua potensi sumber ketidakpastian seperti kesalahan pengukuran, variabilitas pengambilan sampel, asumsi model, dan variabilitas alami

ekosistem; kedua, mengkuantifikasi ketidakpastian untuk setiap parameter yang relevan menggunakan metode statistik atau pendekatan sampling, dengan tingkat kepercayaan 95%; dan ketiga, menggabungkan ketidakpastian individu tersebut menjadi ukuran ketidakpastian keseluruhan atas manfaat karbon total. Variabel penting yang harus dipertimbangkan meliputi pertumbuhan biomassa, perubahan karbon tanah, emisi metana/nitrogen oksida, kondisi hidrologi, salinitas, serta faktor spesifik proyek seperti suplai sedimen dan pemulihan vegetasi.

Sumber ketidakpastian yang sulit diukur secara tepat dikelola melalui praktik terbaik seperti mengurangi kesalahan pengukuran, menggunakan nilai *default* atau proksi yang sesuai, dan menerapkan asumsi konservatif.



PENGELOLAAN DATA DAN PELAPORAN



Pengelolaan data dan pelaporan dalam pengukuran karbon biru di ekosistem lamun harus dilakukan secara sistematis, tanpa memandang skala atau lingkup kegiatan. Tujuan utamanya adalah memastikan dokumentasi yang jelas, datanya dapat digunakan kembali, serta pengakuan yang tepat terhadap sumber dan penulis. Selain itu, pengelolaan data mendukung pemenuhan persyaratan pelaporan dalam berbagai skema sertifikasi dan pendanaan, yang penting untuk menjaga integritas kegiatan secara ilmiah, upaya konservasi, maupun penyusunan kebijakan.

10.1 Macam data

Pada pengukuran karbon biru di padang lamun ini, macam data yang dikumpulkan adalah sebagai berikut:

1. **Data ekologis lamun**, yang meliputi: komposisi jenis lamun, tutupan kanopi lamun, kerapatan tegakan (jika dilakukan), tutupan makroalga, epifit, dan kejernihan air. Datanya berupa numerik yang disimpan dalam program pengolah kata (misalnya MS Word) atau pengolah data (MS. Excel).
2. **Data karbon**, berupa biomassa lamun (bagian atas, bagian bawah, daun, rimpang, dan akar), simpanan karbon di sedimen, dan potensi emisi karbon. Datanya berupa numerik yang disimpan dalam program pengolah kata (misalnya MS Word) atau pengolah data (MS. Excel).
3. **Data hasil pemetaan** yang meliputi: sebaran dan luasan padang lamun. Datanya berbentuk data spasial, misalnya shapefile (.shp), GeoTIFF (.tif), KML/KMZ, dan raster. Selain itu, data lapangan dapat berupa data visual berupa citra dan foto kondisi lamun.
4. **Data kualitas lingkungan perairan**, yang meliputi: jenis substrat, salinitas, suhu, DO (*Dissolved Oxygen*), dan pH. Datanya berupa numerik yang disimpan dalam program pengolah kata (misalnya MS Word) atau pengolah data (MS. Excel).
5. **Data kondisi umum lingkungan**, yang meliputi: cuaca, pasang surut, potensi pendukung, potensi gangguan dan biota yang ada). Datanya berupa numerik yang disimpan dalam program pengolah kata (misalnya MS Word) atau pengolah data (MS. Excel).

Metode pencatatan data telah dijelaskan pada Bab-bab sebelumnya.

10.2 Penyimpanan dan mekanisme berbagi data

Secara umum, data yang diperoleh dari kegiatan ini disimpan dalam mengikuti format dan prosedur yang ditetapkan oleh Walidata yang mengelola data lamun Indonesia. Hal yang sama juga berlaku untuk mekanisme berbagi data. Data diunggah dan disimpan di portal data yang dikelola oleh Walidata segera setelah kegiatan selesai dan hasil dipublikasikan. Semua file disimpan di folder proyek dengan struktur rapi (sesuai lokasi dan waktu), dengan penamaan file yang konsisten, dengan format “namadata_namalokasi_bulan_tahun” (contoh: biomassa_SiteA_Maret_2025.csv).

Sebagai tambahan, data kegiatan dianjurkan juga untuk disimpan di fasilitas repositori ilmiah nasional/RIN (<https://rin.brin.go.id/>). Data yang disimpan RIN akan mendapatkan DOI (*Digital Object Identifier*) yang menjamin sitasi, kepemilikan data, dan penyimpanan sepanjang waktu.

Berbagai pemangku kepentingan, mulai dari pemerintah, peneliti, hingga organisasi masyarakat sipil, menggunakan data dan informasi tentang karbon di padang lamun untuk berbagai kepentingan. Para pemangku kepentingan tersebut dapat memperoleh informasi tentang karbon di padang lamun melalui dokumen laporan disusun secara sistematis, transparan, dan mudah dipahami. Di dalam dokumen laporan tersebut, tercakup penjelasan tentang metode pengumpulan data, cakupan hasil, serta interpretasi terhadap temuan yang diperoleh.

Dalam praktiknya, terdapat variasi yang cukup besar antar kegiatan, lokasi, dan lembaga pelaksana. Perbedaan ini dapat memengaruhi kualitas, kedalaman, dan keselarasan informasi yang disampaikan, sehingga menyulitkan proses komparasi, sintesis, maupun pengambilan keputusan lintas wilayah. Selain itu, skala spasial kegiatan juga beragam. Ada yang bersifat lokal (misalnya satu kawasan pesisir atau desa), regional (antar kabupaten atau provinsi), hingga nasional. Perbedaan skala ini menuntut adanya standar pelaporan yang fleksibel namun tetap konsisten, agar hasil dari berbagai proyek dapat dikompilasi dan dianalisis secara terpadu.

Untuk menjawab tantangan tersebut, laporan karbon biru idealnya memuat informasi minimum yang meliputi:

1. Kondisi ekologi lamun, seperti jenis, kepadatan, dan kesehatan padang lamun.
2. Kondisi umum lingkungan dan kualitas perairan, termasuk parameter fisik dan kimia yang relevan.
3. Sebaran dan luasan padang lamun, hasil dari analisis citra atau survei lapangan.
4. Cadangan dan emisi karbon, baik dalam bentuk estimasi maupun hasil pengukuran langsung.

Laporan kegiatan dibuat mengikuti kerangka berikut ini:

1. Latar Belakang dan Tujuan
2. Alat dan Bahan, dan Metode
3. Hasil
4. Pembahasan
5. Kesimpulan
6. Daftar Pustaka
7. Lampiran

Bagian lain seperti sampul, daftar isi, ringkasan eksekutif, dll, dapat ditambahkan tanpa mengubah kerangka umum di atas (Rahmawati *et al.*, 2019). Secara lebih detail, informasi yang disajikan dalam laporan mencakup hal-hal berikut ini:

- | | |
|---|--|
| <p>1. Latar Belakang dan Tujuan</p> <ul style="list-style-type: none"> • Deskripsi singkat ekosistem padang lamun, karbon biru, dan perannya. • Kondisi pengetahuan terkini tentang karbon biru (lamun) di wilayah kegiatan. • Deskripsi singkat kegiatan dan relevansinya. • Informasi umum lokasi dalam konteks karbon biru. • Deskripsi mengenai tujuan kegiatan <p>2. Alat dan Bahan, dan Metode</p> <ul style="list-style-type: none"> • Menjelaskan pelaksanaan kegiatan sesuai pedoman, • Memuat alat, bahan, dan metode. • Memuat peta dan deskripsi lokasi pengambilan sampel, misalnya tipe padang lamun dan kondisinya (terlindung atau terbuka, dsb). <p>3. Hasil</p> <ul style="list-style-type: none"> • Deskripsi kondisi/parameter lingkungan di lokasi studi: suhu (°C), salinitas (psu), oksigen terlarut (mg/l), pH, serta kejernihan air (m), termasuk narasi mengenai kondisi lingkungan secara umum dan sumber gangguan, • Komposisi jenis lamun dan kondisi ekologiannya, • Rata-rata cadangan karbon dari biomassa dan sedimen per lokasi (tonC/ha). • Rata-rata emisi karbon (tonCO₂e/ha). • Luas padang lamun (ha). • Total cadangan dan emisi karbon lamun di lokasi kegiatan | <p>4. Pembahasan</p> <ul style="list-style-type: none"> • Interpretasi atas hasil dan pola data yang ditemukan. • Implikasi hasil, yang dapat mencakup perbandingan dengan lokasi/proyek lain, kontribusi pada agenda nasional, dan sebagainya. <p>5. Kesimpulan</p> <p>Memuat ringkasan hasil dan implikasinya.</p> <p>6. Daftar Pustaka</p> <p>Memuat seluruh referensi yang dikutip dalam laporan.</p> <p>7. Lampiran</p> <p>Berisi data dan informasi penting yang tidak disajikan pada bagian utama laporan, seperti raw data dan hasil analisis survei lapangan dan laboratorium, foto dokumentasi kegiatan lapangan, sampel, dll, serta peta pendukung.</p> |
|---|--|

Bagian lain seperti sampul, daftar isi, ringkasan eksekutif, dapat ditambahkan tanpa mengubah kerangka umum di atas. Mengingat laporan ini ditujukan bagi pembaca dengan latar belakang yang beragam mulai dari teknis hingga non-teknis sehingga penggunaan bahasa yang jelas dan sederhana sangat dianjurkan. Penulisan yang komunikatif akan membantu memperluas pemahaman dan meningkatkan partisipasi publik dalam upaya konservasi karbon biru.

DAFTAR PUSTAKA & LAMPIRAN



DAFTAR PUSTAKA

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>

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>

Hernawan, U. E., Rahmawati, S., Ambo-Rappe, R., Sjafrie, N. D. M., Hadiyanto, H., Yusup, D. S., Nugraha, A. H., La Nafie, Y. A., Adi, W., Prayudha, B., Irawan, A., Rahayu, Y. P., Ningsih, E., Riniatsih, I., Supriyadi, I. H., & McMahon, K. (2021). The first nation-wide assessment identifies valuable blue-carbon seagrass habitat in Indonesia is in moderate condition. *Science of the Total Environment*, 782, 146818. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146818>

Houston, A., M. H. Garnett, and W. E. N. Austin. 2024. Blue Carbon Additionality: New Insights From the Radiocarbon Content of Saltmarsh Soils and Their Respired CO₂. *Limnology and Oceanography* 69, no. 3: 548–561.

Houston, A., H. Kennedy, W. E. N. Austin. 2024. Additionality in Blue Carbon Ecosystems: Recommendations for a Universally Applicable Accounting Methodology. Wiley. *Global Change Biology*.

Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., Telszewski, M. (eds.), 2014. *Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows*. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA.

Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Kim, S., Khanal, S. K., 2012. Nitrous Oxide (N₂O) Emission from Aquaculture: A Review. *Environmental Science & Technology* 46(12): 6470-6480.

IPCC 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland.

Kauffman, J.B. and Donato, D.C. 2012 Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. Working Paper 86. CIFOR, Bogor, Indonesia.

KKP. 2024. Pedoman Pengukuran Karbon Biru di Kawasan Konservasi. KKP, Jakarta. 104 hlm.

Kuo, J. (2007). New monoecious seagrass of *Halophila sulawesii* (Hydrocharitaceae) from Indonesia. *Aquatic Botany*, 87(2), 171–175. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.04.006>

Kurniawan, F., Digdo, A. A., Darus, R. F., Anggraini, N. P., Ismet, M. S., Wicaksono, P., & Kiswara, W. (2024). First record of *Ruppia brevipedunculata* in Indonesia. *Aquatic Botany*, 195, 103806. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2024.103806>

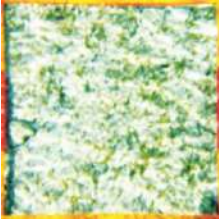
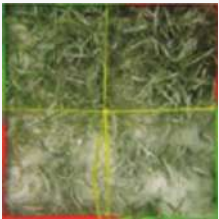
Kurniawan, F., Imran, Z., Darus, R. F., Anggraeni, F., Damar, A., Sunuddin, A., Kamal, M. M., Murti Pratiwi, N. T., Ayu, I. P., & Iswantari, A. (2020). Rediscovering *Halophila major* (Zollinger) Miquel (1855) in Indonesia. *Aquatic Botany*, 161, 103171. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2019.103171>

Lyzenga, D. R. (1978). Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, 17(3), 379. <https://doi.org/10.1364/AO.17.000379>

- Macreadie, P. I., Anton, A., Raven, J. A., Beaumont, N., Connolly, R. M., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Kuwae, T., Lavery, P. S., Lovelock, C. E., Smale, D. A., Apostolaki, E. T., Atwood, T. B., Baldock, J., Bianchi, T. S., Chmura, G. L., Eyre, B. D., Fourqurean, J. W., ... Duarte, C. M. (2019). The future of Blue Carbon science. *Nature Communications*, 10(1), 3998. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>
- McKenzie L, Campbell SJ & Roder CA. 2003. *Seagrass-Watch: Manual for Mapping and Monitoring Seagrass Resources by Community (citizen) Volunteers*. (QFS, NFC, Cairns). 100pp
- 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>
- Miyajima, T., Hamaguchi, M., & Hori, M. (2022). Evaluation of the baseline carbon sequestration rates of Indo-Pacific temperate and tropical seagrass meadow sediments. *Ecological Research*, 37(1), 9–20. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12263>
- O'Brien, K.R., Waycott, M., Maxwell, P., Kendrick, G.A., Udy, J.W., Ferguson, A.J.P., Kilminster, K., Scanes, P., McKenzie, L.J., McMahon, K., Adams, M.P., Samper-Villarreal, J., Collier, C., Lyons, M., Mumby, P.J., Radke, L., Christianen, M.J.A., Dennison, W.C., 2018. Seagrass ecosystem trajectory depends on the relative timescales of resistance, recovery and disturbance. *Marine Pollution Bulletin*, 134, 166-176.
- Olofsson, P. (2018) Accuracy and Area Estimation. In S. Liang (Ed.), *Comprehensive Remote Sensing*, vol. 6, pp. 128–135. Oxford: Elsevier.
- zRustam, A., Adi, N.S., Daulat, A., Kiswara, W., Yusup, D.S., Rappe, R.A., 2019. *Pedoman Pengukuran Karbon di Ekosistem Padang Lamun*. ITB Press: Bandung, Indonesia.
- 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>
- Waycott M, McMahon K, Mellors J, Calladine A, & Kleine D. 2004. *A Guide to Tropical Seagrasses of the Indo-West Pacific*. James Cook University, Townsville. 72pp.

LAMPIRAN

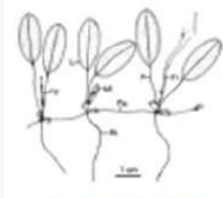
Lampiran 4.1. Contoh Estimasi Persentase Tutupan Lamun. Sumber: KKP (2024)

			
5%	10%	20%	30%
			
40%	50%	60%	70%
			
80%	90%	100%	

Identifikasi lamun secara cepat:
Sering dijumpai

(Th) <i>Thalassia hemprichii</i>	(Ea) <i>Enhalus acoroides</i>
 • Rimpang beruas-ruas dan memiliki "sisik" di tiap ruas • Daun melengkung dan memiliki bercak coklat/ hitam	 • Daun seperti sabuk panjang • Rimpang tebal dan memiliki rambut hitam kasar • Akar seperti tali
(Cs) <i>Cymodocea serrulata</i>	(Cr) <i>Cymodocea rotundata</i>
 • Daun berbentuk pita • Ujung daun bulat bergerigi • Seludang daun tidak menutup sempurna, membentuk segitiga	 • Daun berbentuk pita • Seludang daun menutup sempurna • Ujung daun mulus, tidak bergerigi
(Hu) <i>Halodule uninervis</i>	(Hp) <i>Halodule pinifolia</i>
 • Daun menyerupai pita tipis dengan tiga urat daun paralel • Urat daun tengah jelas • Ujung daun seperti trisula	 • Daun menyerupai pita tipis dengan tiga urat daun paralel • Urat daun tengah jelas • Ujung daun membulat, tidak membentuk trisula
(Tc) <i>Thalassodendron ciliatum</i>	(Si) <i>Syringodium isoetifolium</i>
 • Bentuk daun silindris dengan ujung daun mengecil (seperti jarum suntik)	 • Daun oval, memiliki tangkai daun, berpasangan dari tiap ruas • Tulang daun melintang > 8 pasang • Permukaan daun tidak berambut
(Ho) <i>Halophila ovalis</i>	(Hm) <i>Halophila minor</i>
 • Daun oval, memiliki tangkai daun, berpasangan dari tiap ruas • Tulang daun melintang > 8 pasang • Permukaan daun tidak berambut	 • Daun oval kecil • Daun memiliki tangkai daun yang keluar berpasangan dari tiap buku • Tulang daun menyilang < 8 pasang • Permukaan daun tidak berambut

Identifikasi lamun secara cepat:
Jarang dijumpai

(Hmaj) <i>Halophila major</i>	(Hs) <i>Halophila sulawesii</i>
Sumber: Kurniawan et al. 2024  • Mirip dengan <i>H. ovalis</i> namun ukurannya lebih besar dan berdegradasi tepi dengan bentuk runcing pada tepi (lebih besar) • Biasanya urat daun menjulang lebih banyak (13–18 pasang) dan bercabang	Sumber: Kuo 2007  • Mirip <i>H. ovalis</i> namun monoecious
(Hd) <i>Halophila decipiens</i>	(Hs) <i>Halophila spinulosa</i>
 • Daun oval lonjong • Kedua permukaan daun berambut • Tepi daun bergerigi	 • Satu tangkai daun keluar dari tiap buku rimpang • Tiap tangkai memiliki beberapa pasang daun yang tersusun berseri
(Rm) <i>Ruppia maritima</i>	(Rb) <i>Ruppia brevipedunculata</i>
Sumber: Waycott et al. 2004  • Daun seperti benang, ujung runcing • Rimpang rapuh dengan banyak akar • Bunga memiliki tangkai panjang yang rapuh, kadang spiral • Biasanya ada di air tawar atau sangat asin	Sumber: Kurniawan et al. 2024  • Tangkai bunga lebih pendek dari <i>R. maritima</i>

Seluruh gambar merujuk pada McKenzie et al. 2001, kecuali beberapa gambar dengan rujukan tersendiri.

Referensi:

- Kuo, J. 2007. *Halophila sulawesii*. Aquatic Botany 87: 145–148.
- Kurniawan, A., et al. 2024. Status Padang Lamun Indonesia.
- McKenzie, L.J., Campbell, S.J., & Roder, C.A. 2001. Seagrass-Watch: Manual for Mapping & Monitoring Seagrass Resources by Community (Citizen) Volunteers. QDPI, Cairns, 100 pp.
- Waycott, M., McMahon, K., Mellors, J., Calladine, A., & Kleine, D. 2004. A Guide to Tropical Seagrasses of the Indo-West Pacific. James Cook University, Townsville, 72 pp.

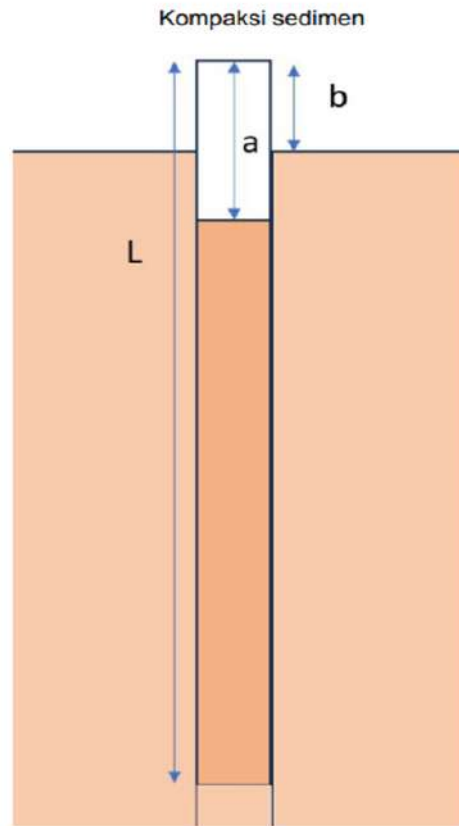
Lampiran 4.3. Contoh hasil analisis kondisi lamun

ANALISIS KONDISI LAMUN

Provinsi - Kabupaten : Maluku - Maluku Tengah
 Lokasi - Stasiun : Wae
 Tanggal : 21 Maret 2015
 Waktu Mulai - Waktu Selesai : 09.00 - 12.00
 Survei : Wawan, Andi, Caleb

		Kondisi Ekologi Lamun																					
Plot	Koordinat metrik (m)	Koordinat		Tutupan lamun (%)	Saluran (%) / ind	Persentase Tutupan (%) dan Jumlah Tegakan (individu) per Species													Tutupan maksud (%)	Tutupan efektif (%)	Ketersihan air		
		Latitude	Longitude			Cs	Cr	Ea	Hd	Hu	Ha	Ha	Hm	Rb	Rm	Si	Tc	Th					
I.01	5			25	% tegakan	0	20	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	Jernih
I.02	25			50	% tegakan	0	190	0	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
I.03	50			0	% tegakan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	Jernih
I.04	75			0	% tegakan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Jernih
I.05	100			5	% tegakan	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	Jernih
I.06	125			60	% tegakan	0	5	5	0	25	0	20	0	0	0	0	0	0	0	5	10	20	Jernih
I.07	150			60	% tegakan	0	12	19	0	150	0	794	0	0	0	0	0	0	0	12			
I.08	175			60	% tegakan	0	0	50	0	5	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5	20	Jernih
I.09	200			20	% tegakan	0	0	62	0	19	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
I.10	225			30	% tegakan	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
I.11	250			15	% tegakan	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	Jernih
II.01	5			25	% tegakan	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
II.02	25			50	% tegakan	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
II.03	50			0	% tegakan	0	0	20	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	Jernih
II.04	75			0	% tegakan	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
II.05	100			5	% tegakan	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
II.06	125			60	% tegakan	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	Jernih
II.07	150			60	% tegakan	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	Jernih
II.08	175			60	% tegakan	0	0	50	0	5	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
II.09	200			20	% tegakan	0	0	62	0	19	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
II.10	225			30	% tegakan	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	Jernih
II.11	250			0	% tegakan	0	0	10	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
III.01	5			25	% tegakan	0	0	5	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
III.02	25			50	% tegakan	0	0	6	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
III.03	50			0	% tegakan	0	0	20	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	Jernih
III.04	75			0	% tegakan	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
III.05	100			5	% tegakan	0	0	375	0	0	125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	Jernih
III.06	125			60	% tegakan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	Jernih
III.07	150			60	% tegakan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Jernih
III.08	175			60	% tegakan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Jernih
III.09	200			20	% tegakan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Jernih
III.10	225			30	% tegakan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Jernih
III.11	250			0	% tegakan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Jernih
rata-rata % 28.63536364						Cs	Cr	Ea	Hd	Hu	Ha	Ha	Hm	Rb	Rm	Si	Tc	Th	3.94			10.45	
SD % 24.31154327						0.00	12.28	18.83	0.00	7.33	0.00	7.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.48	3.81			7.06
rata-rata tegakan						0.00	55.18	15.73	0.00	34.82	0.00	88.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.09				
SD tegakan						0.00	113.11	23.62	0.00	53.40	0.00	227.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.50				
kerapatan						0.00	320.73	62.91	0.00	138.27	0.00	353.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.38				
SD kerapatan						0.00	452.45	92.58	0.00	213.58	0.00	911.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.01				

Lampiran 6.1. Contoh perhitungan faktor kompaksi sedimen



L = Panjang pipa PVC

a = tinggi sedimen dalam pipa PVC

b = tinggi sedimen permukaan sampai pipa PVC

Laju kompaksi = faktor koreksi = $(a - L) / b$

Diketahui:

- panjang awal pipa (L) = 130 cm
- jarak antara ujung atas pipa bagian luar dengan permukaan sedimen di luar pipa (b) = 90 cm
- jarak dari ujung pipa bagian dalam ke permukaan sedimen di dalam pipa (a) = 98 cm

$$\begin{aligned}\text{Faktor kompaksi} &= (L-a)/(L-b) \\ &= (130-98)/(130-90) \\ &= 0,80\end{aligned}$$

Jika sampel dipotong tiap 5 cm,

maka panjang sampel sebenarnya adalah = panjang sampel yang dipotong: faktor kompaksi = $5/0,80 = 6,25$ cm.

Lampiran 9.1. Referensi Daftar Pertanyaan untuk menguji Additionality

No	Pertanyaan Uji Additionality	Jawaban	Interpretasi
1	Apakah aktivitas proyek termasuk dalam kategori restorasi lamun/tidak <i>wetland</i> yang masuk positive list Verra? Restorasi Lamun - Transplantasi lamun menggunakan metode manual (penanaman bibit, plug, atau sod) - Restorasi melalui perbaikan kondisi substrat (misalnya, stabilitasi sedimen, penambahan pasir/ organik agar cocok untuk penumbuhan lamun) - Restorasi melalui perlindungan area dari aktivitas perusak (misalnya pengerukan, aktivitas perahu, reklamasi), sehingga memungkinkan regenerasi alami lamun Konservasi dan Perlindungan Ekosistem Pesisir - Perlindungan padang lamun yang terancam konversi atau degradasi (misalnya reklamasi, konstruksi pelabuhan, atau pariwisata tidak terkendali)	Ya Tidak	Jika Ya → Lanjut ke kriteria selanjutnya Jika tidak → Proyek tidak <i>eligible</i>
2	Apakah tingkat penetrasi restorasi lamun di wilayah/ nasional <5%?	Ya Tidak	Jika Ya → memenuhi syarat Activity Method Jika Tidak → Tidak <i>Additional</i>
3	Apakah Proyek dilakukan karena kewajiban hukum/ regulasi	Ya Tidak	Jika Ya → Proyek tidak <i>Additional</i> Jika Tidak → memenuhi syarat <i>regulatory</i> Surplus
4	Apakah proyek dilakukan secara sukarela (misalnya kredit karbon?)	Ya Tidak	Jika Ya → Proyek <i>Additional</i> Jika Tidak → Perlu bukti tambahan
5	Apakah ada hambatan (finansial, teknis, kelembagaan) yang membuat proyek sulit dilakukan tanpa insentif karbon?	Ya Tidak	Jika Ya → Memperkuat klaim <i>additionality</i>



MANUAL
**PENGUKURAN
KARBON BIRU PADA
EKOSISTEM PADANG
LAMUN**



In partnership with
Canada



ISBN 978-602-1278-47-5

