

Konservasi Ekosistem Pesisir

Ekobiologi dan Strategi Pengelolaan Berkelanjutan

Maulinna Kusumo Wardhani

Febi Ayu Pramithasari

Dedi Irawan

Agus Romadhon

Haryo Triajie



PT. GHANI PRESS GROUP

Konservasi Ekosistem Pesisir: Ekobiologi dan Strategi Pengelolaan Berkelanjutan

Penulis:

Maulinna Kusumo Wardhani, Febi Ayu Pramithasari,
Dedi Irawan, Agus Romadhon, Haryo Triajie

Desain Cover:

Umar Khasan

Layouter:

Abu Yazid Al Bustomi

Editor Naskah:

Dyah Ayu Sulistyio Rini, S.Kel., M.T.

14 x 21 cm, v-267

ISBN: 978-634-7999-05-4 (PDF)

Anggota IKAPI: No. 468/JTI/2026

Diterbitkan oleh: PT GHANI PRESS GROUP

Alamat:

Bumi Permata Raya Blok 8 No. 14 Tanjung, Lamongan

HP. 0896-5710-0105

Email: ptghanipress@gmail.com

Website: <https://ghanipress.com/>

© Hak Cipta 2026 pada penulis

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- a. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- b. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- c. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- d. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku dengan judul “Konservasi Ekosistem Pesisir: Ekobiologi dan Strategi Pengelolaan Berkelanjutan” dapat diselesaikan dengan baik. Ekosistem pesisir, khususnya mangrove, padang lamun, dan terumbu karang, memiliki fungsi ekologis, sosial, dan ekonomi yang strategis dalam menopang kehidupan masyarakat, menjaga keseimbangan lingkungan, melindungi wilayah pesisir, serta mendukung ketahanan terhadap perubahan iklim. Di sisi lain, ekosistem tersebut menghadapi berbagai tekanan akibat aktivitas antropogenik dan perubahan lingkungan yang dapat menurunkan fungsi serta kualitasnya.

Buku ini menguraikan landasan konseptual konservasi pesisir, karakteristik dan fungsi ekosistem, keanekaragaman hayati, serta prinsip-prinsip ekobiologi yang relevan dalam pengelolaan sumber daya pesisir. Pembahasan juga menempatkan pendekatan berbasis ekosistem, konektivitas ekologis, dan keterlibatan masyarakat sebagai unsur penting dalam perencanaan dan implementasi konservasi. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memperkuat integrasi antara kepentingan ekologis dan kebutuhan sosial-ekonomi dalam pengelolaan wilayah pesisir.

Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi akademik bagi mahasiswa, akademisi, peneliti, pengelola kawasan pesisir, praktisi, serta pemangku kepentingan lainnya dalam memahami dinamika ekosistem dan merumuskan strategi konservasi yang tepat. Semoga buku ini dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan serta mendukung pengelolaan ekosistem pesisir Indonesia yang ekologis, adaptif, dan berorientasi pada keberlanjutan.

Bangkalan, Oktober 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
BAB I	
LANDASAN KONSEPTUAL	1
BAB II	
EKOLOGI EKOSISTEM PESISIR	47
BAB III	
DINAMIKA DAN INTERAKSI EKOSISTEM	165
BAB IV	
STRATEGI PENGELOLAAN DAN KONSERVASI	199
DAFTAR PUSTAKA.....	217
BIODATA PENULIS	263



PT GHANI PRESS GROUP

Email: ptghanipress@gmail.com

Website: <https://ghanipress.com/>

BAB I

LANDASAN KONSEPTUAL

➤ Urgensi Konservasi Ekosistem Pesisir

Krisis Ekosistem Pesisir di Indonesia

Krisis ekosistem pesisir di Indonesia merupakan persoalan multidimensional yang mengancam keberlanjutan sumber daya hayati, perlindungan wilayah daratan, dan penghidupan masyarakat pesisir. Tekanan antropogenik dan perubahan iklim secara simultan mempercepat degradasi ekosistem mangrove, lamun, dan terumbu karang di berbagai wilayah perairan Indonesia. Pemahaman yang komprehensif terhadap dinamika krisis ini menjadi fondasi krusial bagi perumusan strategi konservasi yang berbasis ekobiologi dan berkelanjutan.

Penurunan tutupan mangrove menjadi indikator paling jelas dari krisis ekosistem pesisir di Indonesia. Indonesia sebagai negara dengan luas mangrove terbesar di dunia berdasarkan data *Global Mangrove Watch* yang diperbarui telah kehilangan sekitar 2.043 Km² atau lebih dari 204.000 Ha mangrove sejak tahun 1985. Sumber-sumber internasional mengonfirmasi bahwa tren penyusutan ini utamanya disebabkan oleh konversi lahan untuk tambak, penebangan ilegal, dan pembangunan infrastruktur pesisir. Degradasi mangrove di pesisir utara Jawa mencapai 70% di area tertentu, dengan perubahan tata guna lahan, sedimentasi, dan pencemaran sebagai

faktor dominan. Meski demikian, sejak 2015 laju kehilangan mangrove di Indonesia mulai menunjukkan tren yang stabil. Hal ini mengindikasikan efektivitas intervensi konservasi yang meningkat. Salah satu Upaya yang dilakukan adalah pemulihan riparian dan teknik *silvofishery*. Pendekatan konservasi yang terintegrasi dalam analisis investasi yang tidak diposisikan sebagai eksternalitas merupakan strategi yang lebih efektif untuk mendorong pembangunan pesisir yang berkelanjutan, karena secara bersamaan meningkatkan ketahanan ekologis, mengurangi risiko degradasi lingkungan, dan mencegah kerugian ekonomi jangka Panjang.

Ekosistem padang lamun juga mengalami tekanan signifikan dengan pola yang berbeda-beda secara spasial. Sebagai contoh uji coba jangka panjang pertama di Indonesia yang mengevaluasi dinamika lamun selama dekade 2015–2025 di Kawasan Konservasi Perairan Bintan Timur menemukan penurunan tutupan lamun sebesar 33,60%. Hasil pemetaan kualitas ekologis lamun (*Seagrass Ecological Quality Index/SEQI*) di Indonesia Tengah dan Timur mengungkapkan variasi spasial yang substansial, dengan nilai SEQI berkisar 0,39 hingga 0,88, di mana lokasi-lokasi tertentu teridentifikasi sebagai "*coldspot*" dengan kondisi terdegradasi yang memerlukan prioritas restorasi. Peta nasional terbaru yang diselesaikan pada 2025 mencatat luas padang lamun Indonesia mencapai 660.000 hektar, namun ekosistem ini sering terabaikan dalam kebijakan konservasi dibandingkan mangrove dan terumbu karang.

Terumbu karang Indonesia menghadapi ancaman ganda dari tekanan lokal dan pemanasan global. Dua dekade data pemantauan karang dari 394 situs permanen di 32 lokasi mengungkapkan bahwa tutupan karang keras relatif stabil di sebagian besar lokasi (26 dari 32), namun stabilitas ini memiliki batas kritis. Tutupan karang turun secara tajam ketika akumulasi stres termal melampaui ambang batas sekitar 12 *degree-heating weeks* (DHW). Peristiwa pemutihan karang yang terkait gelombang panas laut 2023–2025 telah terdokumentasi di berbagai lokasi, termasuk perairan utara Jakarta, Karimunjawa, dan Selat Dampier Raja Ampat. Pencemaran perairan, khususnya di Teluk Jakarta, telah menyebabkan degradasi dramatis terumbu karang selama 30 – 40 tahun terakhir, dengan nitrogen dioksida, fosfat, dan klorofil-a menjelaskan lebih dari 80% variasi kerusakan komunitas karang.

Pola krisis ekosistem pesisir Indonesia menunjukkan keterkaitan yang erat antara tekanan antropogenik, perubahan iklim, dan kelemahan tata kelola. Erosi pantai di pesisir utara Jawa mencapai 65,8% dari total garis pantai, dengan faktor geologis dan morfologi pesisir memperparah kerentanan. Pencemaran dari aktivitas akuakultur intensif, pertanian, dan limbah bahan berbahaya turut memperburuk kualitas perairan pesisir. Sebagai contoh di Kupang mengungkapkan bahwa implementasi kebijakan konservasi masih terfragmentasi akibat lemahnya koordinasi, kurangnya perencanaan adaptif, dan keterbatasan pemanfaatan data ilmiah.

Dengan demikian, krisis ekosistem pesisir Indonesia tidak semata persoalan degradasi lingkungan, melainkan manifestasi dari interaksi kompleks antara eksploitasi sumber daya, perubahan iklim, dan kapasitas kelembagaan yang belum memadai untuk merespons dinamika tersebut secara efektif.

Definisi dan Ruang Lingkup Konservasi Ekosistem Pesisir

Konservasi ekosistem pesisir dapat didefinisikan sebagai upaya terencana untuk melindungi, memelihara, dan memulihkan keutuhan serta fungsi ekologis dari ekosistem-ekosistem yang berada di zona transisi antara daratan dan lautan. Definisi ini tidak hanya mencakup tindakan perlindungan pasif, tetapi juga mencakup strategi pengelolaan aktif yang bertujuan untuk menjamin keberlanjutan jasa ekosistem pesisir bagi generasi sekarang dan mendatang. Dalam kerangka ini, konservasi dipahami sebagai intervensi manusia yang didasarkan pada prinsip-prinsip ekobiologi untuk menjaga keseimbangan antara pemanfaatan sumber daya dan pelestarian fungsi lingkungan.

Secara konseptual, konservasi ekosistem pesisir telah mengalami evolusi dari pendekatan yang semata-mata berfokus pada perlindungan spesies atau habitat tertentu, menuju pendekatan yang lebih holistik dan berbasis ekosistem. Pertimbangan terhadap fungsi dan jasa ekosistem telah mendorong perluasan pendekatan "pengelolaan ekosistem" di kalangan ilmuwan dan otoritas yang bertanggung jawab dalam konservasi,

terutama pada skala regional dalam konteks perubahan global. Pendekatan ini menekankan bahwa konservasi tidak dapat dilakukan secara terisolasi, melainkan harus mempertimbangkan keterkaitan antara ekosistem pesisir dengan sistem daratan dan lautan yang lebih luas.

Ruang lingkup konservasi ekosistem pesisir mencakup beragam tipe ekosistem yang memiliki karakteristik dan fungsi ekologis yang berbeda-beda. Konvensi tentang Keanekaragaman Hayati (*Convention on Biological Diversity/CBD*) menguraikan bahwa lingkungan laut dan pesisir mencakup perairan laut dangkal permanen, teluk, selat, laguna, estuari, dasar laut (termasuk padang alga, padang lamun, dan vegetasi laut tropis), terumbu karang, pantai berlumpur pasang surut, pantai berpasir, dataran garam, rawa pesisir, terumbu karang perairan dalam, ventilasi perairan dalam, dan habitat laut lepas. Ekosistem pesisir utama di Indonesia meliputi mangrove, terumbu karang, padang lamun, hamparan alga, dataran lumpur, estuari, serta vegetasi pantai dan pulau-pulau kecil dengan perairan dangkalnya.

Perspektif hukum dan kebijakan di Indonesia menunjukkan bahwa ruang lingkup konservasi ekosistem pesisir diatur secara eksplisit dalam peraturan perundang-undangan. Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2007 tentang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil mendefinisikan ruang lingkup wilayah pesisir sebagai daerah peralihan antara ekosistem darat dan laut yang dipengaruhi oleh perubahan di darat dan laut,

mencakup wilayah administrasi kecamatan ke arah darat dan 12 mil laut ke arah laut dari garis pantai. Konservasi wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil diselenggarakan untuk menjaga kelestarian ekosistem pesisir, melindungi alur migrasi ikan dan biota laut, melindungi habitat biota laut, serta melindungi situs budaya tradisional.

Kawasan konservasi di wilayah pesisir dan laut di Indonesia terdiri atas tiga jenis yang memiliki dasar hukum dan fungsi yang berbeda. Ketiga jenis tersebut adalah Kawasan Konservasi Laut berdasarkan UU No. 32 Tahun 2014 tentang Kelautan, Kawasan Konservasi Perairan berdasarkan UU No. 31 Tahun 2004 tentang Perikanan beserta perubahannya, dan Kawasan Konservasi di Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (KK-WP3K) berdasarkan UU No. 27 Tahun 2007 beserta perubahannya. Masing-masing kawasan konservasi memiliki fungsi yang berbeda, tetapi pada dasarnya bertujuan untuk melindungi dan mewujudkan pengelolaan ekosistem laut yang berkelanjutan, sekaligus berfungsi untuk adaptasi dan mitigasi perubahan iklim.

Dengan demikian, definisi dan ruang lingkup konservasi ekosistem pesisir bersifat multidimensional, mencakup dimensi ekologis, hukum, sosial, dan ekonomi. Konservasi bukan sekadar kegiatan perlindungan, melainkan suatu proses pengelolaan yang terintegrasi dan berkelanjutan. Selain itu, kawasan perlindungan laut sebagai alat konservasi memiliki potensi dan keterbatasan, sehingga perlu diartikulasikan dalam jaringan berdasarkan prinsip-prinsip operasional yang

jas. Konservasi ekosistem pesisir harus dipahami sebagai bagian integral dari pengelolaan wilayah pesisir secara terpadu yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, akademisi, sektor swasta, dan masyarakat lokal.

Ganesa Tipologi Ekosistem Pesisir

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki garis pantai terpanjang kedua di dunia, dengan keragaman ekosistem pesisir yang luar biasa. Keragaman ini tidak terlepas dari proses pembentukan (geneses) yang berbeda-beda di setiap wilayah. Tipologi pesisir berdasarkan geneses merupakan kerangka klasifikasi yang dikembangkan oleh Shepard (1972) untuk memahami bagaimana proses-proses geologis, oseanografis, dan biologis membentuk karakteristik pesisir yang unik.

Secara konseptual, tipologi pesisir berdasarkan geneses membagi pesisir menjadi dua kategori utama: tipologi primer dan tipologi sekunder. Tipologi primer merujuk pada pesisir yang morfologinya lebih banyak terbentuk oleh proses-proses terestrial seperti erosi, vulkanisme, deposisi, dan aktivitas tektonik, sedangkan tipologi sekunder adalah pesisir yang morfologinya lebih dominan dibentuk oleh aktivitas organisme dan proses marin. Pembagian ini memberikan kerangka analitis yang kuat untuk memahami mengapa suatu pesisir memiliki karakteristik ekologis yang berbeda dari pesisir lainnya. Tipologi primer terdapat empat sub-tipe yang perlu dipahami. Pertama, *Land Erosion Coast* atau pesisir erosi daratan, yang terbentuk oleh proses erosi akibat aksi

gelombang dan arus pada batuan atau sedimen daratan. Kedua, *Sub Aerial Deposition Coast* atau pesisir deposisi *sub-aerial*, yang terbentuk oleh akumulasi material yang diendapkan oleh sungai atau angin sebelum terendam oleh kenaikan muka air laut. Ketiga, *Structurally Shaped Coast* atau pesisir yang dibentuk oleh struktur geologi, seperti patahan atau lipatan yang membentuk garis pantai. Keempat, *Vulcanic Coast* atau pesisir vulkanik, yang terbentuk oleh aktivitas gunung api yang menghasilkan material lava dan piroklastik di zona pesisir.

Sementara itu, tipologi sekunder mencakup tiga sub-tipe yang lebih dipengaruhi oleh proses marin dan biologis. *Marine Deposition Coast* adalah pesisir yang terbentuk oleh pengendapan material yang dibawa oleh gelombang dan arus laut, seperti pembentukan delta atau gosong pantai. *Wave Erosion Coast* adalah pesisir yang terbentuk oleh erosi aktif gelombang laut, menghasilkan tebing-tebing curam atau platform abrasi. Adapun *Coast Built by Organism* adalah pesisir yang terbentuk oleh aktivitas organisme, terutama terumbu karang dan mangrove, yang secara signifikan mengubah morfologi garis pantai.

Pesisir organogenik merupakan salah satu contoh paling menarik dari tipologi sekunder. Pesisir ini terbentuk karena akumulasi materi organik yang berasal dari organisme hidup, baik tumbuhan maupun hewan. Dua contoh utama dari pesisir organogenik adalah pesisir koral dan pesisir mangrove. Pesisir koral terbentuk dari

akumulasi kerangka kalsium karbonat yang dihasilkan oleh koloni karang dan alga berkapur, sedangkan pesisir mangrove terbentuk dari akumulasi sedimen yang terperangkap oleh sistem perakaran mangrove yang rapat.



Gambar 1. Tipologi Pesisir Berdasarkan Ganesa

Tipologi ekosistem pesisir juga dapat diklasifikasikan berdasarkan penggenangan air dan jenis komunitas yang menempatinnya. Secara umum, ekosistem pesisir dapat dikategorikan menjadi dua kelompok besar: ekosistem yang secara permanen atau berkala tergenang air, dan ekosistem yang hampir tidak pernah tergenang air. Kelompok pertama mencakup terumbu karang, hutan mangrove, padang lamun, estuaria, laguna, dan delta, sedangkan kelompok kedua mencakup formasi *Pes-caprae* dan formasi *Barringtonia* yang tumbuh di pantai berpasir.

Pemahaman terhadap genesa tipologi ekosistem pesisir memiliki implikasi penting bagi strategi konservasi. Setiap tipe pesisir memiliki karakteristik proses pembentukan dan dinamika yang berbeda, sehingga memerlukan pendekatan pengelolaan yang disesuaikan. Misalnya, pesisir yang terbentuk oleh proses vulkanik memiliki substrat yang berbeda dengan pesisir yang terbentuk oleh deposisi sedimen sungai, yang pada gilirannya memengaruhi jenis komunitas biologis yang dapat hidup di dalamnya. Oleh karena itu, kerangka tipologi genesa menjadi fondasi penting dalam merancang program konservasi yang efektif dan berbasis pada pemahaman ekobiologi yang mendalam.

Peran Strategis Ekosistem Pesisir bagi Pembangunan Nasional

Ekosistem pesisir Indonesia (mangrove, lamun, dan terumbu karang) bukan sekadar kekayaan alam, melainkan infrastruktur strategis yang menopang ketahanan pangan, ekonomi biru, perlindungan iklim, dan kesejahteraan jutaan masyarakat pesisir. Laut dan ekosistem pesisir Indonesia merupakan fondasi ekonomi biru terbesar di Asia Tenggara, dengan nilai mencapai US\$256 miliar per tahun atau lebih dari seperempat PDB nasional. Sektor perikanan laut dan rumput laut memberikan kontribusi US\$27 miliar dan menyediakan lebih dari tujuh juta lapangan pekerjaan, sekaligus memasok setengah protein yang dikonsumsi masyarakat Indonesia. Pariwisata bahari sendiri bernilai sekitar US\$12 miliar dan menyerap 10,5 % lapangan kerja nasional.

Angka-angka ini menegaskan bahwa kesehatan ekosistem pesisir bukan sekadar isu lingkungan, melainkan prasyarat bagi stabilitas ekonomi makro.

A. Ekosistem Pesisir sebagai Penopang Ketahanan Pangan

a. Mangrove

Menteri Kelautan dan Perikanan menegaskan bahwa mangrove memiliki peran strategis sebagai habitat pembesaran berbagai biota laut dan penopang mata pencaharian masyarakat pesisir. Rehabilitasi mangrove tidak boleh berhenti pada penanaman semata, tetapi harus memulihkan fungsi ekologis agar benar-benar menopang ketahanan pangan. Program revitalisasi tambak Pantai Utara Jawa yang mengintegrasikan restorasi mangrove diproyeksikan menghasilkan sekitar 800 ribu ton produksi per tahun dengan nilai ekonomi mencapai Rp 20 triliun serta menciptakan sekitar 83 ribu lapangan kerja. Fakta bahwa Indonesia memiliki sekitar 23% ekosistem mangrove dunia menjadikan pengelolaan ekosistem ini sebagai tanggung jawab sekaligus peluang strategis bagi pembangunan nasional.

b. Terumbu Karang

Indonesia menjadi rumah bagi 16% terumbu karang dunia, dan ekosistem ini berperan langsung dalam menyediakan ikan konsumsi bernilai gizi tinggi seperti kakap, kerapu, dan ekor kuning. Stok ikan saat ini, Indonesia dapat menyediakan hingga 483,6 juta porsi ikan karang berkelanjutan cukup untuk

memenuhi rekomendasi konsumsi ikan tahunan bagi 4,1 juta orang. Jika terumbu karang dipulihkan dan dikelola lestari, angka ini dapat meningkat menjadi 5,5 juta orang. Sebaliknya, BRIN memperingatkan bahwa kerusakan terumbu karang menyebabkan nelayan harus melaut lebih jauh dengan hasil tangkapan yang tidak sampai setengah dari sebelumnya.

c. Padang Lamun

Ekosistem lamun menyediakan ikan, kepiting, teripang, dan kerang sebagai hasil tangkapan nelayan tradisional. Sebagai contoh ketergantungan nelayan terhadap ekosistem lamun di Kabupaten Bintan mencapai 74-83 %. Selain itu, 60 persen masyarakat pesisir di Kepulauan Wakatobi memperoleh sumber protein dari ekosistem lamun. Keterkaitan yang erat ini menunjukkan bahwa lamun merupakan sistem penyangga pangan bagi masyarakat pulau-pulau kecil yang memiliki keterbatasan akses terhadap sumber pangan alternatif.



Gambar 2. Ekosistem Pesisir Indonesia

B. Potensi Karbon Biru sebagai Instrumen Mitigasi Iklim dan Ekonomi Baru

Indonesia merupakan pusat cadangan karbon biru global dengan kemampuan menyimpan sekitar 17% dari total cadangan karbon biru dunia. Kapasitas penyimpanan karbon mangrove mencapai 800–1.200 ton/Ha CO₂, sedangkan padang lamun sekitar 100–600 ton/Ha CO₂. Potensi ekonomi dari konservasi dan restorasi mangrove saja diperkirakan mencapai Rp16–33 triliun per tahun. Ekosistem karbon biru diposisikan sebagai instrumen penting mitigasi iklim nasional berdasarkan *Forest and Other Land Use (FOLU) Net Sink 2030*.

Blue Coast Project dan pemberdayaan ekonomi pesisir di Indonesia telah diinisiasi oleh KKP bersama *International Fund for Agricultural Development (IFAD)*. Kerjasama ini mengembangkan *Blue Coast Project* untuk memberantas kemiskinan dan meningkatkan pertumbuhan ekonomi masyarakat pesisir melalui pemanfaatan sumber daya laut secara berkelanjutan. Proyek ini direncanakan berlangsung pada 2027–2031 dengan empat komponen utama, yaitu *Marine Spatial Planning & Ecosystem Resilience, Community Empowerment & Livelihood Diversification, Enabling Blue Value Chains & Private Sector Investment, serta Program Management & Institutional Strengthening*. Tujuh lokasi prioritas mencakup Aceh, Kepulauan Riau, Jawa Tengah, Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur, Sulawesi Tengah, dan Papua.

C. Perlindungan Pesisir dan Adaptasi Perubahan Iklim

Mangrove berfungsi sebagai pelindung alami yang mengurangi gelombang badai, banjir, dan erosi. Di Desa Wori, Sulawesi Utara, menunjukkan bahwa 80% rumah tangga yang disurvei mengidentifikasi mangrove sebagai pertahanan utama mereka terhadap laut, dengan spesies *Sonneratia alba* yang memiliki tutupan kanopi 89,02% berperan sebagai pemecah gelombang alami. UNDP mencatat bahwa Indonesia menghadapi peningkatan risiko banjir pesisir hingga 37% pada 2030, dan restorasi mangrove berbasis masyarakat menjadi strategi adaptasi yang terbukti efektif.

Pendekatan *silvofishery* yang merupakan kombinasi konservasi mangrove dengan budidaya ikan menunjukkan hasil positif di Labuhan Bajo, Sumbawa. Area *silvofishery* seluas 5 Ha yang dikelola dengan komposisi 60 persen mangrove dan 40 persen tambak menunjukkan tingkat kelangsungan hidup bibit mangrove mencapai 90 persen. Masyarakat menanam sekitar 3.330 bibit mangrove dan memelihara 5.000 ekor bibit ikan bandeng, menciptakan sumber pendapatan alternatif sekaligus mempertahankan fungsi ekologis mangrove.

D. Sinergi Kebijakan Ekonomi Biru Nasional

Kementerian Lingkungan Hidup menegaskan bahwa ekosistem mangrove, lamun, dan terumbu karang tidak hanya menjaga keseimbangan lingkungan, tetapi juga menjadi penyangga ekonomi masyarakat melalui

perikanan berkelanjutan, pariwisata bahari, serta cadangan karbon biru. Indonesia memiliki garis pantai sepanjang 95.000 Km dan lebih dari 17.000 pulau, dengan 3,44 juta Ha mangrove dan 2,5 juta Ha terumbu karang. Kekayaan ini menempatkan Indonesia sebagai pemilik 70 persen cadangan karbon biru dunia.

Meskipun memiliki potensi yang besar, ekosistem pesisir Indonesia menghadapi ancaman serius. Indonesia kehilangan sekitar 40% kawasan mangrove dalam tiga dekade terakhir dengan laju kerusakan mencapai 52 ribu Ha/tahun, dan sekitar 19,2% mangrove nasional berada dalam kondisi kritis. Sekitar 30-40% terumbu karang nasional berada dalam kondisi rusak. Padang lamun Indonesia berkurang 2,8 persen per tahun selama periode 2015–2021. Degradasi ini berdampak langsung pada produktivitas perikanan, perlindungan pesisir, dan kesejahteraan masyarakat.

Berdasarkan kondisi tersebut, Pemerintah menetapkan agenda konservasi pesisir. Pemerintah menetapkan target perluasan kawasan konservasi laut hingga 97,5 juta Ha pada 2045, dengan fokus pada ekosistem mangrove, padang lamun, dan terumbu karang. Hingga kini, Indonesia telah memiliki 153 kawasan konservasi perairan dengan total cakupan lebih dari 30,9 juta Ha. Badan Restorasi Gambut dan Mangrove menargetkan rehabilitasi 600.000 Ha mangrove sebagai bagian dari agenda nasional mitigasi perubahan iklim.

➤ Prinsip Dasar Ekobiologi dalam Konservasi Pesisir

Konsep Ekosistem dan Tingkat Organisasi Biologi

Ekosistem merupakan satuan fungsional dasar dalam ekologi yang terdiri dari komunitas biologi (komponen biotik) dan lingkungan fisik-kimia (komponen abiotik) yang saling berinteraksi dalam suatu wilayah tertentu. Definisi ini menegaskan bahwa ekosistem bukan sekadar kumpulan organisme, melainkan suatu sistem terintegrasi di mana aliran energi dan siklus materi menghubungkan komponen hidup dan tak hidup menjadi satu kesatuan yang dinamis. Ekosistem pesisir seperti mangrove, padang lamun, dan terumbu karang merupakan contoh konkret bagaimana interaksi antara organisme dan lingkungan fisiknya. Faktor-faktor ekologi seperti alinitas, substrat, paparan gelombang akan menghasilkan struktur dan fungsi ekologis yang khas dan tidak dapat direplikasi di ekosistem lain.

Komponen biotik ekosistem terdiri atas produsen, konsumen, dan pengurai yang masing-masing memainkan peran fungsional dalam aliran energi. Produsen, yang umumnya berupa tumbuhan hijau dan alga, mampu mengubah energi cahaya matahari menjadi energi kimia melalui fotosintesis. Konsumen, yang mencakup herbivora, karnivora, dan omnivora, memperoleh energi dengan memakan organisme lain. Kelompok pengurai, seperti bakteri dan fungi, menguraikan materi organik dari organisme yang telah mati dan mengembalikan unsur hara ke lingkungan abiotik. Ketiga kelompok fungsional ini dalam ekosistem pesisir saling bergantung,

sebagai contoh produktivitas fitoplankton dan lamun menopang komunitas ikan dan invertebrata, sementara dekomposer memastikan siklus nutrisi tetap berjalan.

Komponen abiotik ekosistem mencakup faktor fisik dan kimia yang membentuk kondisi lingkungan tempat organisme hidup. Faktor fisik meliputi cahaya matahari, suhu, air, tanah atau substrat, dan arus, sedangkan faktor kimia mencakup salinitas, pH, kandungan oksigen terlarut, serta konsentrasi nutrisi seperti nitrogen dan fosfor. Di ekosistem pesisir, gradien faktor abiotik sangat tajam: salinitas dapat berfluktuasi drastis antara air tawar dan air laut di estuaria, substrat dapat berupa lumpur, pasir, atau batuan, dan paparan gelombang menciptakan zona-zona dengan tingkat stres yang berbeda. Gradien inilah yang menjadi kekuatan seleksi utama yang membentuk adaptasi dan distribusi organisme pesisir.

Proses utama yang membangun dan mempertahankan ekosistem adalah transformasi energi dan siklus biogeokimia. Energi memasuki sistem ekologi sebagai energi cahaya (*foton*) yang diubah menjadi energi kimia melalui fotosintesis, kemudian diteruskan melalui rantai dan jaring-jaring makanan, dan akhirnya terdisipasi sebagai panas. Berbeda dengan energi yang mengalir satu arah dan tidak dapat didaur ulang, materi berupa karbon, nitrogen, fosfor, dan unsur lainnya yang berputar tanpa henti antara komponen biotik dan abiotik dalam siklus biogeokimia. Siklus nutrisi pada ekosistem pesisir sangat dipengaruhi oleh proses fisik seperti pasang surut,

arus, dan pencampuran air, yang mengangkut nutrisi dari daratan ke laut dan sebaliknya.

Tingkat organisasi biologi menyediakan kerangka hierarkis untuk memahami kompleksitas kehidupan, mulai dari tingkat sub-organisme (molekul, sel, jaringan, organ) hingga tingkat supra-organisme (populasi, komunitas, ekosistem, dan biosfer). Dalam ilmu ekologi, perhatian utama difokuskan pada tingkat organisasi di atas individu: populasi, komunitas, ekosistem, dan biosfer. Setiap tingkat memiliki sifat emergen atau karakteristik yang tidak dapat direduksi menjadi sifat tingkat di bawahnya, sehingga analisis pada satu tingkat tidak dapat sepenuhnya menjelaskan fenomena pada tingkat lainnya.

Populasi, sebagai tingkat organisasi pertama di atas individu, didefinisikan sebagai kelompok individu dari spesies yang sama yang hidup bersama dalam ruang dan waktu tertentu serta membentuk komunitas reproduksi. Populasi bukan hanya unit ekologis, tetapi juga unit genetika dan evolusi. Karakteristik populasi meliputi ukuran (jumlah individu), kepadatan, pola pertumbuhan, distribusi usia, dan laju reproduksi. Populasi dalam ekobiologi pesisir penting dilakukan untuk memahami dinamika spesies kunci, seperti laju pertumbuhan populasi mangrove, tingkat rekrutmen karang, atau fluktuasi populasi ikan ekonomis penting yang bergantung pada ekosistem pesisir sebagai daerah asuhan.



Gambar 3. Tingkat Organisasi Biologi

Komunitas didefinisikan sebagai kumpulan populasi dari berbagai spesies yang hidup bersama dalam suatu wilayah dan waktu tertentu, membentuk suatu kesatuan organisasi yang lebih kompleks. Karakteristik komunitas meliputi komposisi spesies, kekayaan spesies, keanekaragaman hayati, struktur ruang dan waktu, serta hubungan antarspesies yang membentuk apa yang disebut struktur relasional komunitas. Dalam ekosistem pesisir, komunitas dapat berupa komunitas mangrove dengan zonasi spesies yang khas, komunitas *makrozoobentos* di padang lamun, atau komunitas ikan karang yang berasosiasi dengan terumbu. Interaksi seperti predasi, kompetisi, dan mutualisme yang terjadi dalam komunitas inilah yang menentukan pola distribusi dan kelimpahan spesies.

Ekosistem, sebagai tingkat organisasi yang lebih tinggi, merupakan integrasi komunitas biologi dengan lingkungan abiotiknya dalam suatu satuan fungsional. Ekosistem menekankan pada aliran energi dan siklus materi sebagai proses yang menghubungkan komponen biotik dan abiotik. Dalam konteks konservasi pesisir, pendekatan tingkat ekosistem memungkinkan pemahaman menyeluruh tentang bagaimana perubahan pada satu komponen, misalnya hilangnya mangrove dapat memengaruhi fungsi keseluruhan sistem, termasuk produktivitas perikanan, perlindungan pantai, dan penyimpanan karbon. Pemahaman terhadap tingkat organisasi biologi ini menjadi fondasi krusial bagi perumusan strategi konservasi yang tidak hanya berfokus

pada spesies individual, tetapi juga pada pemeliharaan integritas dan fungsi ekosistem pesisir secara keseluruhan.

Definisi dan Ruang Lingkup Ekobiologi Pesisir

Ekologi secara etimologis berasal dari bahasa Yunani *oikos* yang berarti rumah atau tempat tinggal, dan *logos* yang berarti ilmu, sehingga ekologi secara harfiah dapat diartikan sebagai ilmu tentang rumah atau tempat tinggal organisme. Ekologi sendiri didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari hubungan antarorganisme atau antarkelompok organisme (biotik) dengan lingkungannya (abiotik). Cox (1974) mendefinisikan ekologi sebagai ilmu yang mempelajari struktur dan fungsi dalam ekosistem. Dalam kerangka ini, struktur merujuk pada kondisi suatu ekosistem pada satu waktu tertentu, yang dapat diukur melalui kelimpahan spesies, komposisi jenis, dan pola distribusinya. Adapun fungsinya merujuk pada proses-proses ekologis yang berlangsung di dalamnya, seperti aliran energi, siklus nutrisi, dan interaksi trofik. Secara historis, perkembangan ekologi sebagai disiplin ilmu tidak dapat dilepaskan dari kontribusi Ernst Haeckel, yang pertama kali memperkenalkan istilah "*oecologie*" pada tahun 1866. Haeckel mendefinisikan ekologi sebagai ilmu yang mempelajari hubungan organisme dengan lingkungannya, baik yang bersifat organik maupun anorganik. Sejak saat itu, ekologi berkembang pesat, terutama setelah tahun 1960-an ketika pendekatan kuantitatif mulai diterapkan secara luas dalam ekologi laut.

Pembagian ekologi menjadi autekologi dan sinekologi memberikan kerangka yang berguna untuk memahami ruang lingkup ekobiologi pesisir. Autekologi mempelajari hubungan satu spesies dengan lingkungannya, sedangkan sinekologi mencakup populasi, komunitas, dan ekosistem secara keseluruhan. Pendekatan autekologi dalam lingkungan pesisir dapat digunakan untuk memahami, misalnya, bagaimana spesies mangrove tertentu beradaptasi terhadap salinitas tinggi, sedangkan pendekatan sinekologi digunakan untuk menganalisis pola zonasi komunitas mangrove secara keseluruhan atau keterkaitan fungsional antara ekosistem mangrove, lamun, dan terumbu karang. Pembagian ekologi menjadi autekologi dan sinekologi tidak hanya berfungsi sebagai kerangka teoretis dalam ilmu ekologi secara umum, tetapi juga menjadi pondasi metodologis yang kokoh bagi pengembangan ekobiologi pesisir sebagai cabang ilmu yang memadukan prinsip ekologi terhadap organisme di zona transisi daratan dan lautan.



Gambar 4. Ekobiologi Pesisir

Ekobiologi pesisir merupakan cabang ilmu yang memadukan prinsip-prinsip ekologi terhadap organisme yang hidup di zona transisi antara daratan dan lautan. Ekobiologi pesisir tidak hanya mempelajari interaksi organisme dengan lingkungan fisiknya, tetapi juga bagaimana proses biologis, seperti adaptasi, reproduksi, dan interaksi spesies tersebut berlangsung dalam kondisi lingkungan pesisir yang dinamis dan penuh tekanan. Ekobiologi pesisir mengadopsi kerangka struktur-fungsi ini dan menerapkannya secara spesifik pada ekosistem pesisir, dengan penekanan pada bagaimana organisme beradaptasi terhadap gradien lingkungan yang tajam, seperti salinitas, suhu, substrat, dan paparan gelombang yang menjadi ciri khas zona pesisir.

Ruang lingkup ekobiologi pesisir mencakup empat tingkat organisasi biologis yang menjadi fokus ekologi modern, yaitu organisme, populasi, komunitas, dan ekosistem. Pada tingkat organisme, ekobiologi pesisir berfokus pada adaptasi morfologi, fisiologi, dan perilaku yang memungkinkan individu bertahan hidup di lingkungan pesisir. Contoh klasik adalah adaptasi akar napas pada mangrove dan toleransi osmotik pada biota estuaria. Pada tingkat populasi, perhatian diarahkan pada dinamika jumlah individu, pola pertumbuhan, dan faktor-faktor yang memengaruhi kelangsungan hidup serta reproduksi spesies di habitat pesisir. Pada tingkat komunitas, interaksi antarspesies, antara lain predasi, kompetisi, mutualisme, serta struktur komunitas yang terbentuk. Sedangkan pada tingkat ekosistem difokuskan

pada aliran energi dan siklus materi yang menghubungkan komponen biotik dan abiotik dalam suatu kesatuan fungsional.

Ruang lingkup ekobiologi pesisir juga mencakup dimensi manusia sebagai bagian integral dari sistem ekologi pesisir. Konsep ekologi manusia pesisir (*coastal human ecology*) mempelajari interaksi manusia dengan lingkungan pesisir pada skala lokal melalui kerja lapangan intensif, mencakup topik seperti adaptasi manusia terhadap lingkungan pesisir, ekologi historis perikanan, bentuk-bentuk lokal tata kelola laut, keamanan pangan, dan sistem pengetahuan ekologi tradisional. Pendekatan ini mengakui bahwa ekosistem pesisir tidak dapat dipahami secara utuh tanpa mempertimbangkan peran manusia sebagai bagian dari sistem tersebut, baik sebagai pemanfaat sumber daya maupun sebagai aktor yang memengaruhi dinamika ekologis melalui berbagai aktivitasnya.

Ekobiologi dalam pengelolaan pesisir menjadi pondasi ilmiah bagi pendekatan berbasis ekosistem (*ecosystem-based management/EBM*). EBM didefinisikan sebagai strategi pengelolaan terpadu terhadap lahan, air, dan sumber daya hayati yang menyediakan jasa ekosistem secara berkelanjutan dan adil. Pendekatan ini memandang populasi manusia dan sistem ekonomi/sosial sebagai bagian integral dari ekosistem, serta menekankan pentingnya memahami proses perubahan dalam sistem kehidupan dan mempertahankan jasa yang dihasilkan oleh ekosistem yang sehat. Ekobiologi pesisir

menyediakan data dan pemahaman yang diperlukan untuk merancang strategi pengelolaan yang efektif, termasuk identifikasi batas-batas ekologis pemanfaatan sumber daya, pemahaman keterkaitan antar ekosistem, serta prediksi dampak perubahan lingkungan terhadap struktur dan fungsi ekosistem pesisir.

Ekobiologi pesisir memiliki ruang lingkup yang luas dan multidimensional, dari tingkat organisme hingga ekosistem, dari aspek biologis hingga sosial, dan dari teori dasar hingga aplikasi pengelolaan. Ruang lingkup ini menjadikan ekobiologi pesisir sebagai landasan konseptual yang kokoh bagi upaya konservasi ekosistem pesisir. Pemahaman yang mendalam terhadap prinsip-prinsip ekobiologi memungkinkan perumusan strategi konservasi yang tidak hanya berorientasi pada perlindungan spesies atau habitat tertentu, tetapi juga pada pemeliharaan fungsi ekologis secara keseluruhan dan menjadi sebuah prasyarat bagi keberlanjutan ekosistem pesisir dan kesejahteraan masyarakat yang bergantung padanya.

Keanekaragaman Hayati sebagai Indikator Kesehatan Ekosistem Pesisir

Keanekaragaman hayati pesisir merupakan aset biologis yang paling fundamental sekaligus indikator paling sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Ekosistem pesisir seperti mangrove, padang lamun, dan terumbu karang menyimpan kekayaan spesies yang luar biasa, namun sekaligus menjadi sistem yang paling rentan terhadap tekanan antropogenik dan perubahan iklim

global. Kompleksitas hubungan antara keanekaragaman hayati dan kesehatan ekosistem pesisir menjadikannya tidak hanya penting secara ekologis, tetapi juga strategis bagi upaya konservasi dan pengelolaan berkelanjutan.

Hubungan antara keanekaragaman hayati dan kesehatan ekosistem dapat dipahami melalui konsep redundansi fungsional. Kehadiran beberapa spesies dengan fungsi ekologis serupa memastikan bahwa jika satu spesies terganggu oleh penyakit atau perubahan lingkungan ekstrem, fungsi tersebut masih dapat dijalankan oleh spesies lain. Mekanisme ini meningkatkan resiliensi ekosistem terhadap gangguan eksternal, baik yang bersifat alami maupun antropogenik. Pada tingkat genetik, populasi dengan variabilitas tinggi memiliki peluang lebih besar untuk bertahan hidup ketika menghadapi tekanan seleksi baru, seperti kenaikan suhu laut atau peningkatan salinitas akibat intrusi air asin. Dengan demikian, keanekaragaman hayati berfungsi sebagai semacam “asuransi biologis” yang menjaga stabilitas fungsi ekosistem dalam menghadapi ketidakpastian lingkungan.

Pada ekosistem mangrove, keanekaragaman hayati mencerminkan kompleksitas struktur komunitas dan kualitas habitat secara keseluruhan. Misal di Guangdong, China, hutan mangrove dengan nilai indeks keanekaragaman Shannon tertinggi (mencapai 3,13) secara konsisten teridentifikasi sebagai pusat keanekaragaman yang perlu diprioritaskan untuk konservasi. Sebaliknya, stasiun dengan keanekaragaman rendah menandakan

komunitas yang homogen dan memerlukan restorasi ekologis yang terfokus. Sebagai contoh di Teluk Benoa, Bali, menemukan bahwa indeks keanekaragaman *makrozoobentos* pada ekosistem mangrove berkisar antara 2,231-2,596, tergolong sedang, dengan korelasi yang sangat kuat antara salinitas dan kelimpahan *makrozoobentos* dengan koefisien korelasi 0,932. Keanekaragaman hayati tidak hanya men-cerminkan kondisi biologis, tetapi juga terikat erat dengan parameter lingkungan abiotik yang membentuk habitat.

Ekosistem padang lamun menunjukkan pola serupa, di mana keanekaragaman hayati menjadi indikator penting kesehatan ekosistem. Misal di kawasan konservasi perairan Gili Balu, Nusa Tenggara Barat, menemukan hubungan positif antara Indeks Kesehatan Ekosistem Lamun (IKEL) dan indeks keanekaragaman biota asosiasi, meskipun tidak signifikan secara statistik. Stasiun dengan IKEL tertinggi (0,72) juga memiliki indeks keanekaragaman Shannon tertinggi ($H'=3,565$), menunjukkan komunitas yang stabil. Sebaliknya, stasiun dengan IKEL sedang (0,623) memiliki keanekaragaman yang lebih rendah ($H'=1,651$). Meskipun kesehatan lamun dan keanekaragaman hayati saling terkait, faktor lain seperti substrat, kualitas perairan, dan tekanan antropogenik juga memainkan peran penting dalam menentukan pola keanekaragaman.

Terumbu karang, sebagai ekosistem dengan keanekaragaman hayati tertinggi di laut tropis, menyediakan habitat bagi ribuan spesies ikan dan

invertebrata. Kompleksitas struktur fisik terumbu memungkinkan terbentuknya relung ekologis beragam sehingga mendukung interaksi trofik yang stabil. Indikator keanekaragaman seperti tutupan karang hidup, kepadatan karang juvenil, dan kompleksitas struktural (jumlah bentuk pertumbuhan karang) telah digunakan secara luas untuk menilai kesehatan terumbu. Misal di Pulau Perhentian, Malaysia, menggunakan Foraminifera sebagai indikator biologis dan menemukan 28 spesies dengan variasi signifikan antara stasiun yang berbeda. Kehadiran spesies foraminifera pembawa simbiosis yang melimpah (14 spesies) mengindikasikan kualitas air yang masih mendukung pertumbuhan dan pemulihan terumbu.

Indeks keanekaragaman seperti Shannon-Wiener dan Simpson telah menjadi alat standar dalam penilaian kesehatan ekosistem pesisir, namun penggunaannya memerlukan pemahaman yang cermat tentang keterbatasannya. Perbandingan metode penilaian komunitas substrat menunjukkan bahwa estimasi kekayaan spesies, keanekaragaman Shannon, dan keanekaragaman Simpson bervariasi antar metode, dengan foto kuadrat menghasilkan estimasi terendah dan penilaian kuadrat penuh menghasilkan estimasi tertinggi. Perbedaan ini menegaskan perlunya konsistensi metodologis dan penggunaan *multiple indices* dalam pemantauan keanekaragaman hayati. Selain indeks berbasis spesies, pendekatan yang mempertimbangkan komposisi fungsional komunitas, seperti keberadaan

kelompok trofik tertentu atau spesies dengan peran ekologis kunci yang memberikan gambaran yang lebih holistik tentang kesehatan ekosistem.

Keanekaragaman hayati juga berperan sebagai indikator perubahan lingkungan pada skala lanskap. Sebagai contoh di laguna pesisir kondisi hidrodinamika, yang direpresentasikan oleh arus intra-laguna dan daerah tangkapan air, mengatur seluruh distribusi sedimen dan menjelaskan 66% variasi dalam komposisi komunitas bentik. Pola spasial komunitas *makrozoobentos* terutama berupa modifikasi kelimpahan relatif spesies, bukan perubahan komposisi spesies secara keseluruhan. Keanekaragaman hayati tidak hanya merespons perubahan lingkungan lokal, tetapi juga terintegrasi dalam dinamika lanskap pesisir yang lebih luas.

Ancaman terhadap keanekaragaman hayati pesisir sangat beragam dan saling terkait. Konversi lahan mangrove menjadi tambak udang intensif menghilangkan habitat penting bagi banyak spesies estuarin. Penangkapan ikan destruktif merusak struktur fisik terumbu karang sehingga mengurangi kompleksitas habitat yang diperlukan oleh berbagai organisme. Peningkatan sedimentasi dari daratan menurunkan kejernihan air dan menghambat fotosintesis pada lamun maupun alga simbiotik karang. Perubahan iklim global memperburuk tekanan ini melalui kenaikan suhu laut yang memicu pemutihan karang serta pengasaman laut yang menghambat kalsifikasi organisme bercangkang kalsium karbonat. Di ekosistem lamun, kekeringan yang

disebabkan oleh iklim ekstrem dapat memicu keruntuhan mutualisme fakultatif antara lamun dan *bivalvia* pengonsumsi sulfida, yang pada gilirannya memperburuk degradasi ekosistem.

Implikasi dari pemahaman keanekaragaman hayati sebagai indikator kesehatan ekosistem pesisir adalah perlunya pendekatan konservasi yang berbasis ekosistem dan terintegrasi. Penetapan kawasan lindung laut menjadi instrumen utama untuk menjaga populasi induk dan mempertahankan aliran gen antar populasi. Program rehabilitasi harus menggunakan bibit atau fragmen dari populasi lokal untuk mempertahankan kesesuaian adaptif terhadap kondisi setempat sekaligus mencegah erosi genetik akibat introduksi stok asing. Pemantauan berkala terhadap indikator keanekaragaman, seperti jumlah spesies, kelimpahan relatif, indeks keanekaragaman Shannon-Wiener, serta parameter genetika populasi, diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas kebijakan konservasi. Teknologi molekuler seperti DNA *barcoding* dan penanda mikrosatelit dapat digunakan untuk mengidentifikasi variasi genetik intra-spesifik dan mendeteksi penurunan keragaman akibat fragmentasi habitat.

Keanekaragaman hayati pesisir bukan sekadar atribut biologis yang perlu dilestarikan, melainkan indikator fungsional yang mengungkap kesehatan ekosistem secara menyeluruh. Penggunaan keanekaragaman hayati sebagai indikator kesehatan memungkinkan deteksi dini degradasi ekosistem,

identifikasi prioritas konservasi, dan evaluasi efektivitas intervensi pengelolaan. Dalam kerangka ekobiologi pesisir, pemahaman tentang hubungan antara keanekaragaman hayati dan kesehatan ekosistem menjadi fondasi bagi perumusan strategi konservasi yang tidak hanya berorientasi pada perlindungan spesies individual, tetapi juga pada pemeliharaan integritas dan fungsi ekosistem pesisir secara keseluruhan.

Peran Ekobiologi Pesisir dalam merumuskan Strategi Konservasi

Ekobiologi pesisir menyediakan fondasi ilmiah yang esensial bagi perumusan strategi konservasi yang efektif dan berbasis bukti. Tanpa pemahaman mendalam tentang bagaimana organisme berinteraksi dengan lingkungannya, bagaimana spesies merespons gradien salinitas, bagaimana komunitas terbentuk di berbagai tipe substrat, dan bagaimana aliran energi serta siklus materi berlangsung dalam ekosistem pesisir, maka strategi konservasi akan bersifat spekulatif dan berisiko gagal. Ekobiologi mengisi celah ini dengan menyediakan data tentang dinamika populasi, struktur komunitas, dan hubungan fungsional yang menjadi dasar bagi pengambilan keputusan pengelolaan.

Peran ekobiologi pesisir dalam merumuskan strategi konservasi bersifat multifaset, yaitu menyediakan data dasar tentang dinamika populasi dan komunitas, mengungkap interaksi fungsional yang dapat dimanfaatkan untuk restorasi, memetakan konektivitas genetik untuk perencanaan spasial, dan meng-informasikan pendekatan

pengelolaan berbasis ekosistem yang adaptif dan partisipatif. Ekobiologi bukan sekadar disiplin akademis, melainkan alat praktis yang memungkinkan perumusan strategi konservasi yang tidak hanya efektif secara ekologis, tetapi juga dapat diterima secara sosial dan berkelanjutan secara ekonomi. Integrasi prinsip-prinsip ekobiologi ke dalam kebijakan konservasi pesisir Indonesia akan menjadi kunci keberhasilan dalam menjaga integritas ekosistem pesisir bagi generasi mendatang.

Data ekobiologi populasi menjadi instrumen kunci dalam menetapkan kebijakan pemanfaatan sumber daya yang berkelanjutan. Bioekologi kepiting bakau (*Scylla* spp.) di 17 lokasi di tiga Wilayah Pengelolaan Perikanan (WPP 715, 717, dan 718) memberikan contoh konkret bagaimana pemahaman tentang dinamika populasi, berupa komposisi spesies, kepadatan, pola pertumbuhan, rasio jenis kelamin, dan status reproduksi, menjadi dasar bagi implementasi teknologi penangkapan ramah lingkungan dan inisiatif restorasi habitat. Populasi kepiting bakau didominasi oleh jantan di hutan mangrove, sementara betina bermigrasi ke laut untuk memijah, memiliki implikasi langsung terhadap pengaturan musim tangkap dan penetapan zona perlindungan.

Ekobiologi komunitas memberikan pemahaman tentang pola asosiasi antarspesies yang penting untuk perencanaan zonasi konservasi. *Nudibranch* di Kawasan Konservasi Perairan Daerah Selat Dampier, Raja Ampat,

sebaran spesies sangat dipengaruhi oleh struktur mikrohabitat dan faktor lingkungan seperti tutupan substrat, kejernihan air, dan kompleksitas bentik. Sebagian besar asosiasi antarspesies bersifat lemah atau spesifik, mencerminkan tingkat spesialisasi habitat yang tinggi serta sensitivitas komunitas terhadap perubahan lingkungan. Pendekatan berbasis mikrohabitat dalam perencanaan zonasi konservasi, serta penggunaan *nudibranch* sebagai bioindikator dalam sistem pemantauan ekosistem terumbu karang.

Pemahaman ekobiologi tentang interaksi antarspesies membuka peluang baru bagi strategi restorasi yang lebih efektif. Sebagai contoh di ekosistem pesisir interaksi mutualistik antara spesies pembentuk habitat dapat meningkatkan keberhasilan restorasi secara signifikan. Eksperimen lapangan selama 29 bulan di rawa asin Georgia, Amerika Serikat, membuktikan bahwa interaksi timbal balik antara *Spartina alterniflora* dan kerang (*Geukensia demissa*) meningkatkan pertumbuhan dan ketahanan vegetasi yang direstorasi terhadap gangguan. Restorasi konvensional yang berfokus pada penanaman spesies tunggal, dan mengusulkan bahwa memanfaatkan interaksi positif antarspesies dapat menjadi alat yang ampuh untuk meningkatkan keberhasilan restorasi pesisir.

Ekobiologi juga mengungkap pentingnya spesies kunci dan predator puncak dalam menjaga stabilitas ekosistem pesisir. Kembalinya berang-berang laut ke muara Elkhorn Slough, California, menunjukkan bahwa

reintroduksi predator puncak dapat memperlambat erosi tepi sungai dan rawa hingga 90%. Mekanismenya adalah kaskade trofik: berang-berang laut memangsa kepiting pemakan tumbuhan yang, tanpa predasi, akan merusak vegetasi rawa dan menstabilkan sedimen. Hasil ini memberikan pelajaran penting bagi konservasi di Indonesia: memahami dan memanfaatkan interaksi trofik dalam ekosistem pesisir dapat menjadi strategi yang hemat biaya untuk memulihkan fungsi ekosistem yang terdegradasi.

Konsep *bioshield* yang dikembangkan melalui Proyek Seagrass-Mangrove BioShield (SMBP) mendemonstrasikan bagaimana ekobiologi dapat diterjemahkan menjadi kerangka kebijakan yang terintegrasi. Proyek ini mengatasi kesenjangan pengetahuan tentang tutupan area, ambang toleransi terhadap nutrien dan sedimen, sistem pemantauan komprehensif, dan dukungan teknis yang lemah untuk pengelolaan lamun dan mangrove. Hasilnya digunakan sebagai nasihat ilmiah untuk pengambilan keputusan dalam mengelola ekosistem tersebut, dan membantu menyediakan kerangka kerja bagi kebijakan yang diformulasikan melalui Sistem Pendukung Keputusan Terintegrasi.

Pemahaman ekobiologi tentang konektivitas genetik antar populasi menjadi pertimbangan krusial dalam merancang jaringan kawasan konservasi perairan. Uji coba di *Bird's Head Seascape* menunjukkan bahwa pola konektivitas larva, yaitu sejauh mana organisme laut berpindah antar terumbu, dan sangat penting untuk

dipahami oleh pengelola. Misalnya, jika terumbu di satu wilayah bergantung pada larva karang dari wilayah lain untuk pulih setelah kerusakan, maka pengelolaan harus melibatkan kerja sama lintas yurisdiksi. Data konektivitas genetik ini memungkinkan penetapan kawasan konservasi yang tidak hanya melindungi habitat kritis, tetapi juga memastikan aliran gen dan pasokan larva antar populasi tetap terjaga.

Ekobiologi pesisir juga memberikan dasar bagi pendekatan *Ecosystem-Based Management* (EBM) yang komprehensif. EBM bertujuan menciptakan hubungan berkelanjutan antara manusia dan sumber daya laut dengan mempertahankan atau memulihkan struktur, fungsi, resiliensi, keanekaragaman hayati, dan jasa ekosistem. Ilmu yang mendasari EBM adalah pengukuran, evaluasi, dan peramalan dinamika interaksi antara komponen ekosistem dan manusia. EBM di *Bird's Head Seascape* diimplementasikan melalui serangkaian uji coba yang mencakup ekologi historis, penilaian kerangka kelembagaan, pemetaan sistem tenure tradisional, dan pengembangan model ekosistem spasial untuk mengeksplorasi konsekuensi dari berbagai skenario pengelolaan.

Pendekatan partisipatif yang diinformasikan oleh ekobiologi terbukti lebih efektif dalam mencapai tujuan konservasi. Pengalaman Kawasan Konservasi Perairan Chàm Island di Vietnam, keberhasilan konservasi tidak dapat dicapai hanya dengan pendekatan ilmiah dari atas ke bawah. Awalnya, para ilmuwan menghadapi resistensi

kuat dari penduduk lokal yang merasa akses mereka ke laut dibatasi. Namun, setelah mengubah pendekatan menjadi partisipatif yang melibatkan warga dalam pengambilan keputusan zonasi, membentuk tim patroli sukarela, dan mengintegrasikan pengetahuan ekologi tradisional, sehingga Upaya konservasi menjadi lebih efektif. Berikut beberapa contoh keberhasilan konservasi pesisir di Indonesia dengan keterlibatan masyarakat lokal yang memiliki ketergantungan langsung terhadap sumber daya:

A. Seraya Marannu: Transformasi dari Bom Ikan ke Perikanan Berkelanjutan



Sumber gambar: <https://www.wwf.id/id/blog/seraya-marannu-dari-luka-laut-ke-harapan-biru>

Desa di Labuan Bajo ini dulunya dikenal sebagai lokasi marak *destructive fishing* (bom ikan dan potasium). Ketika hasil tangkapan merosot drastis, kesadaran masyarakat tumbuh dari dalam. Mereka sepakat menghentikan praktik merusak dan beralih ke

perikanan berkelanjutan dengan pendampingan WWF-Indonesia. Saat ini, nelayan Seraya Marannu hanya menggunakan pancing sebagai alat tangkap utama, menerapkan zona larang tangkap, dan menghormati musim pemijahan. Hasilnya, hasil tangkapan kembali melimpah dengan rata-rata 250–500 kg/bulan, bahkan bisa mencapai 3–4 ton pada puncak musim. Kawasan ini kini dalam proses diakui sebagai *Other Effective Area-based Conservation Measures* (OECM). Kawasan ini menunjukkan relevansi nyata bagaimana perubahan perilaku berbasis kesadaran ekologis dapat memulihkan ekosistem dan ekonomi.

B. Pulau Pieh: Rehabilitasi Terumbu Karang dengan Tingkat Keberhasilan 97%



Sumber gambar: <https://serikatnews.com/ekowisata-pulau-pieh-sambut-new-normal/>

Program kolaboratif antara KKP, PLN IP UBP Teluk Sirih, dan Yayasan Minang Bahari di Kawasan Konservasi Nasional Pulau Pieh, Sumatera Barat, menunjukkan hasil luar biasa. Tingkat kelangsungan

hidup terumbu karang hasil transplantasi mencapai 97%.

Program ini tidak hanya memulihkan ekosistem, tetapi juga membangun kesadaran kolektif masyarakat pesisir untuk menjaga laut, sekaligus mengembangkan potensi wisata minat khusus penyelaman. Kondisi ini membuktikan bahwa sinergi pemerintah-swasta-masyarakat dapat mempercepat pemulihan ekosistem.

C. Alor: Bayi Dugong sebagai Indikator Keberhasilan Konservasi Lamun



Sumber gambar: https://www.tempo.co/lingkungan/momen-langka-duyung-gendong-bayi-di-perairan-alor-2078390#google_vignette

Kemunculan seekor bayi dugong di Teluk Mali, Alor, Nusa Tenggara Timur, pada Oktober 2025 menjadi bukti keberhasilan konservasi padang lamun selama lebih dari satu dekade. Seekor dugong bernama "Mawar" telah menjadi bagian komunitas selama 27

tahun, menginspirasi warga untuk melindungi padang lamun. Setelah survei WWF 2024, padang lamun di teluk ini tergolong "sangat padat" dengan delapan spesies lamun. Kawasan ini kini terintegrasi dalam Kawasan Konservasi Perairan Kepulauan Alor. Hal ini merupakan contoh indikator biologis (kehadiran spesies karismatik) sebagai bukti keberhasilan pengelolaan ekosistem.

D. Bedono, Jawa Tengah: Keberhasilan Pengelolaan Mangrove Berbasis Masyarakat

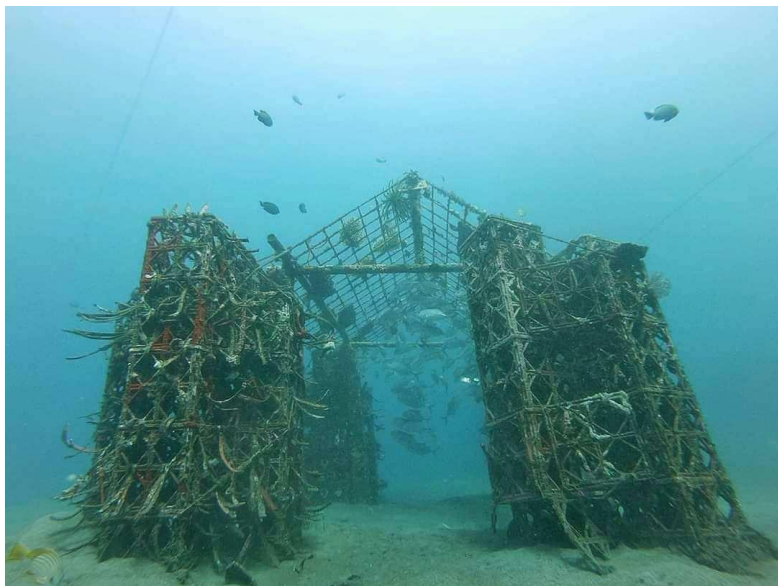
Pembahasan yang membandingkan empat desa pesisir di Jawa Tengah (Sriwulan, Bedono, Timbulsloko, Surodadi) menemukan bahwa Bedono menunjukkan kinerja terbaik dalam pengelolaan mangrove berbasis masyarakat (*Community-Based Mangrove Management/ CBMM*). Faktor keberhasilannya meliputi: pendanaan dan pemeliharaan jangka panjang, penerimaan yang lebih besar terhadap legislasi perlindungan, dukungan publik yang tinggi, penggunaan lebih banyak spesies mangrove, skala restorasi yang lebih luas, serta adanya langkah tambahan untuk mengurangi aksi gelombang di area tererosi. Penjelasan yang kuat untuk menunjukkan faktor-faktor kunci keberhasilan restorasi mangrove.



Sumber gambar: [https:// www.tripadvisor.co.id/Attraction_Review-g3597563-d14891821-Reviews-Bedono_Tourist_Village-Demak_ Central_Java_ Java.html](https://www.tripadvisor.co.id/Attraction_Review-g3597563-d14891821-Reviews-Bedono_Tourist_Village-Demak_Central_Java_Java.html)

E. Bangsring *Underwater*, Banyuwangi: "*Fish Apartment*" dan Pemulihan Ekosistem

Program *Fish Apartment* untuk Jadikan Laut Sehat, Nelayan Hebat dan Mandiri (FUJI LESTARI) di Desa Bangsring berhasil memulihkan ekosistem perairan yang terdegradasi dan meningkatkan hasil tangkapan nelayan hingga 80%. *Fish-apartment* adalah struktur bawah air dari bahan *Polypropylene* yang menjadi habitat buatan bagi ikan. Program ini telah menyebar ke 34 provinsi dengan lebih dari 10.000 modul dan melibatkan lebih dari 8.000 nelayan. Dengan demikian, inovasi teknologi tepat guna yang berdampak ekonomi langsung.



Sumber gambar: <https://wisatamilenial.com/bangsring-underwater-banyuwangi-lokasi-dan-htm-terbaru/>

F. Kepulauan Ay dan Rhun, Maluku: Integrasi Sasi Tradisional dalam Desain MPA Modern



Sumber gambar: <https://konservasilaut.id/lokasi/kkp-ay-rhun/>

Kawasan Konservasi Perairan Ay dan Rhun di Maluku menunjukkan bagaimana kearifan lokal Sasi (sistem larangan adat) diintegrasikan dengan prinsip-prinsip ketahanan iklim dalam desain *Marine Protected Area* (MPA). Pendekatan ini melibatkan penilaian ekologis dan sosial-ekonomi, konsultasi pemangku kepentingan, serta zonasi partisipatif. Desainnya mencakup perlindungan terumbu karang yang resilien, konektivitas habitat, dan sistem *upwelling*. Hal ini merupakan contoh integrasi pengetahuan tradisional dan ilmu konservasi modern.

G. Laut Banda: Menuju Sertifikasi IUCN Green List



Sumber gambar: <https://www.genpi.co/travel/3201/sensasi-ketenangan-twp-di-laut-banda>

Taman Wisata Perairan Laut Banda, dengan luas 2.501,98 Ha, sedang dalam proses menuju sertifikasi IUCN *Green List*, yaitu standar global untuk kawasan konservasi yang efektif dan adil. Kawasan ini menampung 223 spesies karang, populasi ikan yang sehat, serta habitat penting bagi spesies terancam punah. Penilaian awal menunjukkan skor 0,88, dengan roadmap perbaikan untuk mengatasi kesenjangan dalam mekanisme keluhan dan kesetaraan gender. Lokasi ini merupakan contoh kawasan konservasi Indonesia yang diakui secara internasional.

H.Mahakam Hulu: Evaluasi Efektivitas Kawasan Konservasi



Sumber gambar: <https://www.liputan6.com/regional/read/5018735/menilik-upaya-serius-wujudkan-penetapan-konservasi-perairan-mahakam>

Kawasan Konservasi Perairan Mahakam Wilayah Hulu di Kutai Kartanegara memperoleh nilai efektivitas pengelolaan 59,10% dengan status "Perak" (Dikelola Optimum) pada 2025, meningkat dari 52,75% pada 2024. Capaian ini menunjukkan bagaimana evaluasi efektivitas pengelolaan (EVIKA) digunakan untuk perbaikan berkelanjutan.

BAB II

EKOLOGI EKOSISTEM PESISIR

➤ Ekobiologi Mangrove

Mangrove merupakan salah satu ekosistem pesisir paling produktif dan berperan strategis dalam menjaga keseimbangan lingkungan di zona transisi antara daratan dan lautan. Mangrove membentuk habitat unik yang mendukung keanekaragaman hayati luar biasa serta menyediakan jasa ekosistem yang tidak ternilai bagi masyarakat pesisir karena kemampuannya beradaptasi terhadap kondisi ekstrem berupa salinitas tinggi, substrat berlumpur yang anaerob, pasang surut yang dinamis, dan paparan gelombang. Indonesia, sebagai negara dengan luas mangrove terbesar di dunia, memiliki tanggung jawab sekaligus peluang besar untuk mengelola ekosistem ini secara berkelanjutan. Bab ini akan menguraikan secara komprehensif ekobiologi ekosistem mangrove, mulai dari sebaran, zonasi, dan karakteristiknya di Indonesia, adaptasi morfologi dan fisiologi tumbuhan mangrove, keanekaragaman flora dan fauna yang berasosiasi dengannya, interaksi spesies dan jaring-jaring makanan yang terbentuk di dalamnya, hingga fungsi ekologis dan ekonomis yang menjadikannya sebagai fondasi penting bagi konservasi ekosistem pesisir. Pemahaman mendalam terhadap aspek-aspek ekobiologi ini menjadi landasan krusial bagi

perumusan strategi pengelolaan dan konservasi mangrove yang efektif dan berkelanjutan.

Sebaran, Zonasi, dan Karakteristik Mangrove Indonesia

Indonesia merupakan negara dengan ekosistem mangrove terbesar di dunia, dengan luas tutupan mencapai 3,45 juta Ha berdasarkan Peta Mangrove Nasional 2025, atau sekitar 20–25% dari total mangrove global. Luasan ini tersebar di 37 provinsi, dengan hampir seluruh provinsi memiliki kawasan mangrove kecuali Provinsi Papua Pegunungan. Lima provinsi dengan wilayah mangrove terluas adalah Papua Selatan (622.288 ha), diikuti Papua Barat (326.666 ha), Papua Tengah (305.846 ha), Kalimantan Timur (239.805 ha), dan Riau (230.911 ha). Sebaran mangrove Indonesia mencakup 202 spesies, terdiri dari 89 jenis pohon, 5 jenis palem, 19 jenis liana, 44 jenis herba, 44 jenis epifit, dan 1 jenis paku. Dari jumlah tersebut, 43 jenis di antaranya merupakan mangrove sejati, sementara jenis lainnya tergolong mangrove minor atau *mangrove associates*.



Gambar 5. Zonasi Mangrove

Zonasi mangrove Indonesia mengikuti pola yang ditentukan oleh interaksi antara pasang surut, salinitas, dan tipe substrat. Zona terdepan yang paling dekat dengan laut dan paling sering tergenang umumnya didominasi oleh *Avicennia spp.* dan *Sonneratia spp.*, yang memiliki toleransi tinggi terhadap salinitas dan kemampuan menstabilkan sedimen. Zona tengah yang digenangi pada saat pasang normal didominasi oleh *Rhizophora mucronata* dan *Rhizophora apiculata*, yang tumbuh baik pada substrat lumpur lunak dengan salinitas

sedang. Zona yang lebih ke arah darat dan hanya tergenang pada saat pasang perbani dihuni oleh *Bruguiera gymnorrhiza* dan *Bruguiera cylindrica*, sedangkan zona transisi menuju daratan didominasi oleh *Nypa fruticans* serta asosiasi lainnya. Pola zonasi ini bersifat spesifik lokasi dan dapat bervariasi bergantung pada masukan air tawar, kondisi substrat, dan tingkat keterbukaan terhadap gelombang.

Karakteristik lingkungan mangrove Indonesia sangat ditentukan oleh dinamika pasang surut dan salinitas yang tajam. Mangrove tumbuh pada daerah intertidal dengan substrat berlumpur, berpasir, atau berlempung, dan terlindung dari gelombang atau arus pasang surut yang kuat. Salinitas optimum untuk pertumbuhan mangrove berkisar antara 10–30 ppt, meskipun beberapa spesies seperti *Avicennia marina* mampu bertahan hingga salinitas 90 ppt, sementara *Bruguiera gymnorrhiza* umumnya tumbuh pada salinitas rendah 10–25 ppt. Suhu tanah yang mendukung pertumbuhan mangrove berkisar 28–31°C dengan pH air 5,5–8,0 dan pH tanah 6–7. Ketebalan lumpur pada zona depan mencapai 43 cm, zona tengah 31 cm, dan zona belakang 29 cm, dengan kandungan oksigen terlarut (DO) yang baik >5,0 mg/L.

Adaptasi morfologi mangrove Indonesia mencerminkan tekanan seleksi lingkungan intertidal yang ekstrem. Salah satu adaptasi paling khas adalah pembentukan akar napas (*pneumatofora*) yang memungkinkan pengambilan oksigen langsung dari udara pada substrat

anaerob. *Rhizophora spp.* mengembangkan akar tunjang (*stilt roots*) yang memberikan stabilitas pada substrat lumpur lunak, sedangkan *Bruguiera spp.* membentuk akar lutut (*knee roots*) yang efektif menangkap sedimen dan nutrisi. Adaptasi fisiologis meliputi kemampuan mengeluarkan kelebihan garam melalui kelenjar khusus pada daun dan mekanisme ultrafiltrasi pada akar yang mencegah masuknya ion natrium berlebihan ke jaringan. Sistem reproduksi vivipar, di mana biji berkecambah saat masih menempel pada pohon induk, memastikan propagul siap tumbuh segera setelah jatuh ke substrat yang sesuai.

Pasang surut memainkan peran sentral dalam menentukan struktur dan fungsi ekosistem mangrove Indonesia. Frekuensi penggenangan memengaruhi distribusi horizontal spesies serta ketersediaan oksigen, nutrisi, dan salinitas di zona perakaran. Pada area yang selalu tergenang, hanya *Rhizophora mucronata* yang mampu tumbuh optimal, sedangkan *Bruguiera spp.* dan *Xylocarpus spp.* jarang mendominasi zona yang sering tergenang. Pasang surut juga mengontrol pengangkutan oksigen ke sistem akar, pengendapan sedimen, serta penguraian sulfida toksik dan kandungan garam dalam air tanah. Perpindahan massa air tawar dan air laut akibat pasang surut memengaruhi distribusi vertikal organisme mangrove, sehingga pola zonasi yang terbentuk merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor fisik, kimia, dan biologis.

Adaptasi Morfologi dan Fisiologi Tumbuhan Mangrove

Salah satu adaptasi morfologi paling mencolok pada tumbuhan mangrove adalah diferensiasi sistem akar napas, di mana berbagai genus mengembangkan struktur ventilasi yang berbeda bentuk untuk menghadapi substrat lumpur yang kekurangan oksigen. Genus *Rhizophora* mengembangkan akar tunjang (*stilt roots*) yang melengkung, memanjang dari batang atau cabang ke arah bawah, membentuk struktur penopang yang stabil untuk menahan hempasan pasang surut dan gelombang. Sebaliknya, genus *Avicennia* dan *Sonneratia* membentuk akar napas (*pneumatophores*) yang tumbuh dari akar horizontal bawah tanah menuju permukaan lumpur, menjulang vertikal untuk memperoleh oksigen dari atmosfer. Genus *Ceriops* dan *Bruguiera* mengembangkan akar lutut (*knee roots*), yaitu struktur yang membentuk lengkungan periodik ke arah atas pada sistem akar kabel bawah tanah. Diferensiasi morfologi ini mencerminkan strategi adaptasi yang berbeda-beda antarspesies mangrove terhadap frekuensi penggenangan dan stabilitas sedimen di zona intertidal.

Akar napas dan akar tunjang memiliki jaringan ventilasi yang berkembang baik (*aerenchyma*) di bagian dalamnya, membentuk saluran transportasi gas yang kontinu dari atmosfer ke sistem akar bawah tanah. Hubungan langsung gas antara akar napas dan akar radial horizontal pada *Avicennia nitida*, dengan kandungan oksigen dalam gas akar mencapai 15–18% saat surut, dan menurun menjadi sekitar 7% ketika akar napas terendam

saat pasang, yang mengindikasikan bahwa akar napas merupakan pintu masuk utama suplai oksigen bagi sistem perakaran. Gas dalam akar bawah tanah *Rhizophora mangle* juga mempertahankan konsentrasi oksigen 15–18%, yang dipelihara melalui ventilasi lentisel pada akar tunjang. Pembentukan jaringan ventilasi memungkinkan mangrove mempertahankan respirasi aerobik dalam sedimen yang kekurangan oksigen, dan kemampuan ini berbeda antarspesies berdasarkan toleransinya terhadap penggenangan—porositas akar *Avicennia marina* dapat mencapai 32–48%, mampu bertahan terhadap penggenangan 70–90% waktu harian, jauh lebih tinggi dibandingkan spesies yang berdistribusi ke arah daratan seperti *Ceriops tagal*.

Karakteristik morfologi xeromorfik pada struktur daun merupakan adaptasi morfologi penting lainnya pada mangrove untuk menghadapi lingkungan salinitas tinggi dan intensitas cahaya kuat, meliputi penebalan kutikula, lekukan stomata, dan perkembangan jaringan penyimpanan air. Uji coba anatomi daun tujuh spesies *Rhizophora* oleh Stace (1966) seluruh spesies memiliki ciri bersama berupa kutikula tebal, dinding sel epidermis yang lurus, jaringan penyimpanan air, hidatoda (*hydathodes*), dan pori air. Jaringan penyimpanan air pada *Rhizophora* dan *Avicennia* berbentuk hipodermis (*hypodermis*), sedangkan pada *Sonneratia* terletak pada lapisan sel di tengah mesofil. Anatomi daun *Avicennia marina* menunjukkan susunan dari sisi abaksial ke adaksial secara berurutan: kutikula, epidermis atas, kelenjar garam, hipodermis, jaringan

palisade, dan jaringan spons, dengan berkas pembuluh tersebar di antara mesofil, serta epidermis bawah memiliki trikoma non-glandular dan stomata tipe kriptofor (*cryptophore*). Struktur daun ini mengurangi transpirasi dan mengatur keseimbangan garam, mendukung kelangsungan hidup mangrove di lingkungan bersalinitas tinggi.

Pengelolaan garam merupakan inti adaptasi fisiologis mangrove, di mana berbagai spesies mengembangkan tiga strategi utama toleransi garam: penolakan garam, sekresi garam, dan akumulasi garam. Strategi penolakan garam diwakili oleh genus *Rhizophora*, yang sistem membran akarnya mampu mencegah masuknya garam terlarut ke xilem melalui ultrafiltrasi (*ultra-filtration*), sehingga hanya sekitar 1–2% salinitas air laut yang diserap. Strategi sekresi garam diwakili oleh genus *Avicennia*, yang kelenjar garam pada daunnya mampu mensekresikan garam secara aktif, sehingga kristal garam terbentuk di permukaan daun setelah air menguap. Akar napas *Sonneratia* juga memiliki fungsi ultrafiltrasi, mampu menyaring garam dari lingkungan untuk mencegah masuknya ke jaringan tumbuhan. Strategi akumulasi garam melibatkan penyimpanan garam secara terkompartementalisasi dalam vakuola, dengan pengaturan osmotik untuk mempertahankan tekanan turgor sel. *Sonneratia alba* menunjukkan bahwa akumulasi garam daun meningkat pada kondisi salinitas tinggi, sebagai mekanisme adaptif untuk mem-

pertahankan keseimbangan osmotik dan mengurangi toksisitas.

Adaptasi fisiologis mangrove juga tercermin pada plastisitas pengaturan stomata dan kinerja fotosintesis, yang berkaitan erat dengan kondisi salinitas, cahaya, dan penggenangan. *Sonneratia alba* menemukan bahwa pada kondisi salinitas tinggi, kepadatan stomata menurun secara signifikan (28,841 per mm²), sedangkan pada salinitas rendah kepadatan stomata lebih tinggi (40,765 per mm²), dan kandungan klorofil juga menurun signifikan pada salinitas tinggi (32,167 CCI berbanding 47,333 CCI). Hal ini menunjukkan bahwa mangrove mengatur kepadatan stomata untuk mengurangi transpirasi, namun strategi ini mengorbankan kapasitas fotosintesis. Pada daun *Sonneratia alba* juga ditemukan trikoma non-glandular bersel tunggal, yang membantu mengurangi kehilangan air dan paparan cahaya. Namun, terdapat hubungan timbal balik yang kompleks antara pengaturan stomata dan cekaman penggenangan: perubahan salinitas mengubah respons fotosintesis mangrove terhadap penggenangan, dan penggenangan jangka panjang menurunkan potensi oksidasi-reduksi sedimen serta ketersediaan oksigen, memaksa sistem perakaran beralih dari respirasi aerobik ke metabolisme anaerobik yang kurang efisien, yang selanjutnya memengaruhi efisiensi fotosintesis dan akumulasi biomassa. Plastisitas fisiologis inilah yang menjadi kunci bagi mangrove untuk bertahan dan tumbuh di berbagai mikrohabitat zona intertidal.

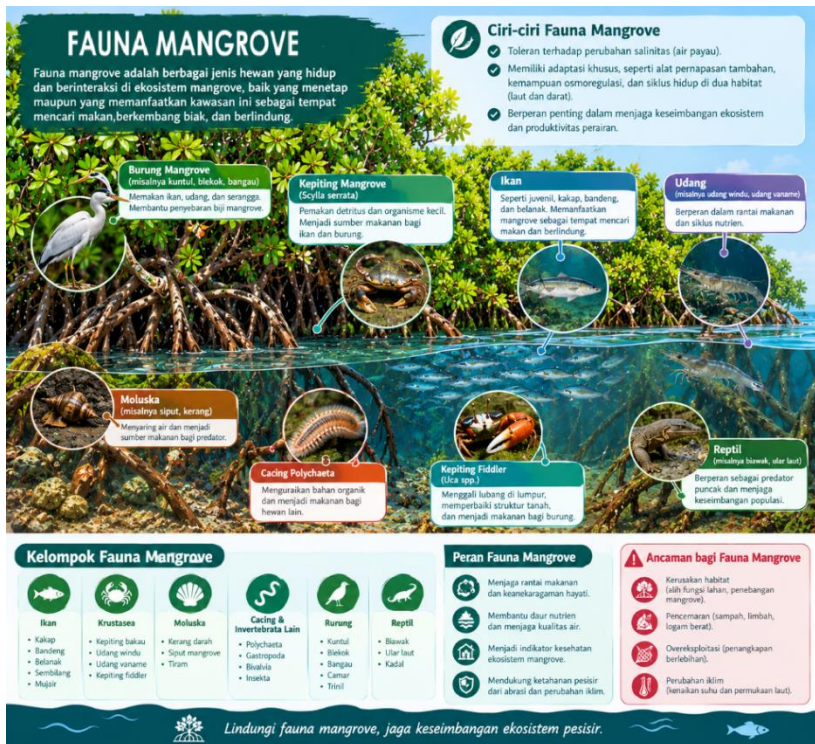
Keanekaragaman Flora dan Fauna Mangrove

Keanekaragaman flora mangrove Indonesia merupakan yang tertinggi di dunia, dengan total 240 jenis tumbuhan yang tercatat terdiri dari 48 jenis mangrove sejati dan 192 jenis mangrove asosiasi. Komposisi ini mencakup 74 jenis pohon, 36 jenis semak, 52 jenis herba, enam jenis palem, 43 jenis epifit, 23 jenis liana, tiga jenis paku, dan tiga jenis parasit. Angka ini menegaskan posisi Indonesia sebagai pusat keanekaragaman mangrove global, dengan sekitar 45 persen dari total jenis tersebut terbatas hidup di kawasan mangrove sejati. Kekayaan jenis ini tidak tersebar merata, melainkan bervariasi antar pulau: Jawa mencatat 166 jenis, Sumatra 157 jenis, Kalimantan 150 jenis, Papua 142 jenis, Sulawesi 135 jenis, Maluku 133 jenis, dan Kepulauan Sunda Kecil 120 jenis.

Sebaran flora mangrove Indonesia menunjukkan pola yang khas dengan konsentrasi terbesar di wilayah Papua. Hutan mangrove terbaik dan terluas terdapat di pantai barat daya Papua sekitar Teluk Bintuni, yang mencapai luas 1,3 juta Ha atau sepertiga dari total luas mangrove Indonesia. Kawasan New Guinea secara keseluruhan memiliki keanekaragaman jenis tertinggi di dunia dengan total luasan 34.739 km², di mana 13.820 km² di antaranya berada di bagian Papua, Indonesia. Teluk Bintuni sendiri memiliki kawasan hutan bakau terluas di Papua dengan luas 618.500 Ha. Di kawasan ini, hutan bakau sering terdiri dari pohon-pohon bertajuk sempit dengan ketinggian 30–40 meter, dengan lapisan atas didominasi jenis-jenis *Rhizophora* dan *Avicennia*,

sedangkan lapisan bawah terdiri dari *Bruguiera*, *Acrostichum*, *Ceriops*, *Excoecaria*, *Nypa*, dan *Dalbergia*.

Fauna mangrove Indonesia mencakup keanekaragaman yang luar biasa, terdiri dari fauna akuatik dan terestrial yang saling terkait dalam jaring-jaring makanan kompleks. Ekosistem mangrove Indonesia menampung 125 jenis ikan dari 47 famili dan 169 jenis *makrozoobentos* dari 52 famili. Fauna terestrial tercatat sebanyak 161 jenis, terdiri dari 80 jenis burung, 38 jenis squamata (kadal dan ular), empat jenis buaya, enam jenis amfibi, 11 jenis *testudinate* (kura-kura dan penyu), serta 21 jenis mamalia. Kelimpahan fauna ini tidak hanya mencerminkan kekayaan biologis, tetapi juga menunjukkan peran mangrove sebagai habitat kritis bagi siklus hidup berbagai spesies, baik yang menetap permanen maupun yang bermigrasi.



Gambar 6. Fauna Mangrove

Burung merupakan salah satu kelompok fauna paling menonjol di ekosistem mangrove Indonesia, dengan banyak spesies dilindungi dan bernilai konservasi tinggi. Hutan mangrove menjadi habitat bagi burung air seperti pecuk ular (*Anhinga melanogaster*), bangau tongtong (*Leptoptilos javanicus*), kuntul perak kecil (*Egretta garzetta*), kowak merah (*Nycticorax caledonicus*), dan blekek asia (*Limnodromus semipalmatus*). Di Kawasan Cagar Alam Pulau Dua, Teluk Banten, tercatat tidak kurang dari 108 jenis burung dari 39 famili, yang merupakan 7 persen dari

seluruh jenis burung di Indonesia. Beberapa jenis burung yang terancam punah juga bergantung pada mangrove, termasuk bangau bluwok (*Mycteria cinerea*) yang 90 persen populasi dunianya ditemukan di wilayah ini, serta pelikan paruh totol (*Pelecanus philippensis*) yang mungkin hanya berkembang biak di Indonesia dan Malaysia.

Mamalia mangrove Indonesia diwakili oleh spesies-spesies ikonik dan endemik yang memiliki keterkaitan erat dengan habitat ini, terutama bekantan di Kalimantan. Bekantan (*Nasalis larvatus*) merupakan primata endemik Kalimantan yang hampir sepenuhnya bergantung pada hutan mangrove dan rawa gambut, menjadikannya salah satu mamalia besar yang paling terkait dengan ekosistem pesisir. Spesies ini memiliki adaptasi unik berupa lambung bersekat kompleks dengan bakteri khusus untuk mencerna daun muda dan biji buah mentah yang menjadi makanannya. Selain bekantan, mamalia lain yang menghuni mangrove Indonesia meliputi monyet ekor panjang (*Macaca fascicularis*), lutung (*Trachypithecus auratus*), berang-berang (*Lutra perspicillata* dan *Amblyonyx cinerea*), babi hutan (*Sus scrofa*), kancil (*Tragulus spp.*), serta kelelawar pemakan buah (*Pteropus spp.*).

Reptilia dan amfibi mangrove Indonesia mencakup spesies-spesies yang berperan penting dalam rantai makanan dan indikator kesehatan ekosistem. Buaya muara (*Crocodylus porosus*) merupakan predator puncak yang ditemukan di hampir seluruh wilayah mangrove Indonesia, dari Sumatra, Kalimantan, Jawa, hingga Papua. Biawak air (*Varanus salvator*) adalah reptil yang umum

dijumpai dan berperan sebagai pemakan bangkai serta pengendali populasi invertebrata. Beberapa jenis ular air juga menghuni mangrove, seperti ular belang (*Boiga dendrophila*), ular sanca (*Phyton reticulatus*), dan ular air berwajah anjing (*Cerberus rhynchops*). Di antara amfibi, katak *Rana cancrivora* dan *Rana limnocharis* merupakan dua jenis yang mampu bertahan di lingkungan mangrove meskipun kondisi salinitasnya tinggi. Kehadiran kelompok-kelompok fauna ini memperkuat fungsi mangrove sebagai ekosistem penyangga yang menghubungkan kehidupan daratan dan lautan.

Interaksi Spesies dan Jaring-Jaring Makanan Mangrove

Ekosistem mangrove memiliki karakteristik unik dalam hal struktur trofiknya, di mana komponen dasar rantai makanan bukanlah tumbuhan mangrove itu sendiri, melainkan serasah yang berasal dari tumbuhan mangrove. Berbeda dengan ekosistem pesisir lainnya seperti padang lamun atau terumbu karang yang produktivitasnya sebagian besar dikonsumsi langsung oleh herbivora, pada ekosistem mangrove hanya sekitar lima persen dari total produksi daun tahunan yang dikonsumsi oleh grazer terestrial. Sisanya masuk ke sistem perairan sebagai serasah dan menjadi sumber energi utama bagi jaring-jaring makanan berbasis detritus. Produksi serasah mangrove Indonesia berkisar antara 9-78 ton per hektar per tahun, dengan puncak produksi terjadi pada bulan Juni dan Juli.

Serasah mangrove mengalami proses dekomposisi yang melibatkan tiga fase utama: fase pelindian cepat (*fast leaching phase*), fase dekomposisi mikroba (*microbial decomposition phase*), dan fase *recalcitrant*. Pada fase pertama, senyawa organik terlarut seperti gula dan asam amino segera terlarut ke dalam air dan masuk ke kolam karbon organik terlarut (DOC). Pada fase kedua, bakteri dan fungi mengkolonisasi partikel serasah dan menggunakan nutrisi yang tersedia untuk pertumbuhan mereka. Mikroba memainkan peran kunci dalam setiap fase dekomposisi ini, mengubah senyawa kompleks seperti lignoselulosa menjadi bentuk yang lebih sederhana melalui enzim ekstraseluler. Biomassa mikroba yang terbentuk selama dekomposisi yang umumnya sekitar 1% atau kurang dari biomassa detritus dan menjadi sumber makanan yang sangat mudah diasimilasi bagi detritivora.

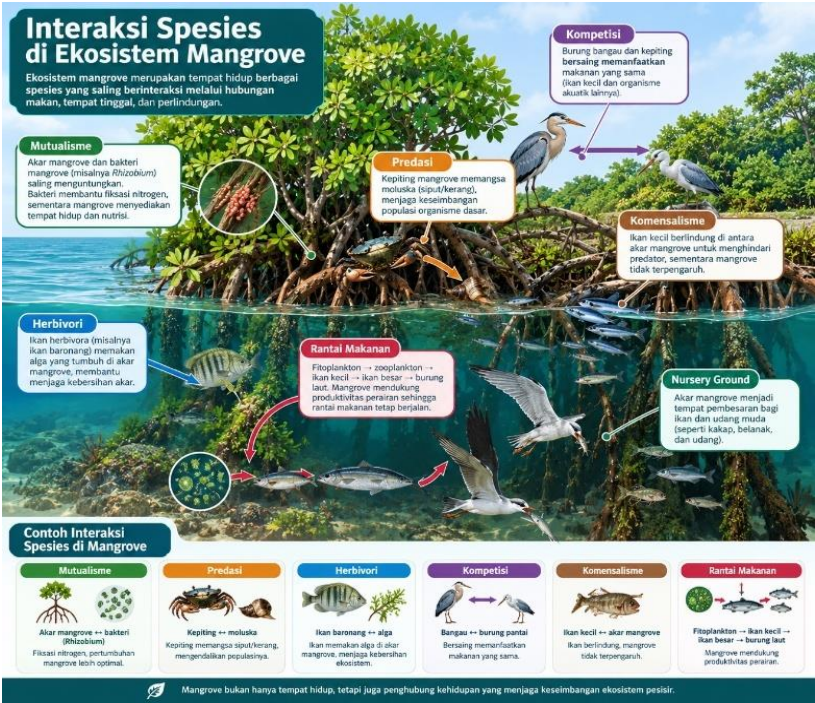
Detritus yang diperkaya oleh mikroba menjadi sumber makanan utama bagi berbagai organisme akuatik, membentuk fondasi jaring-jaring makanan berbasis detritus (*detritus-based trophic structure*) yang mendominasi zona mangrove. Kepiting, udang, dan ikan tertentu bergantung pada partikel serasah yang telah dikolonisasi mikroba sebagai makanan utama mereka. Sistem mangrove Florida Selatan menunjukkan bahwa *Penaeus duorarum* (udang pink), beberapa spesies mysid, serta moluska seperti *Brachiodontes exustus* dan *Crassostrea virginica* sangat bergantung pada detritus. Di antara ikan, *Mugil cephalus* (belanak) dan *Cyprinodon variegatus*

merupakan detritivora yang menonjol. Dalam ekosistem mangrove Indonesia, udang dan rebon memakan bahan organik hasil dekomposisi, kemudian menjadi makanan bagi larva ikan, udang, dan kepiting, yang pada gilirannya menjadi mangsa bagi predator yang lebih besar.

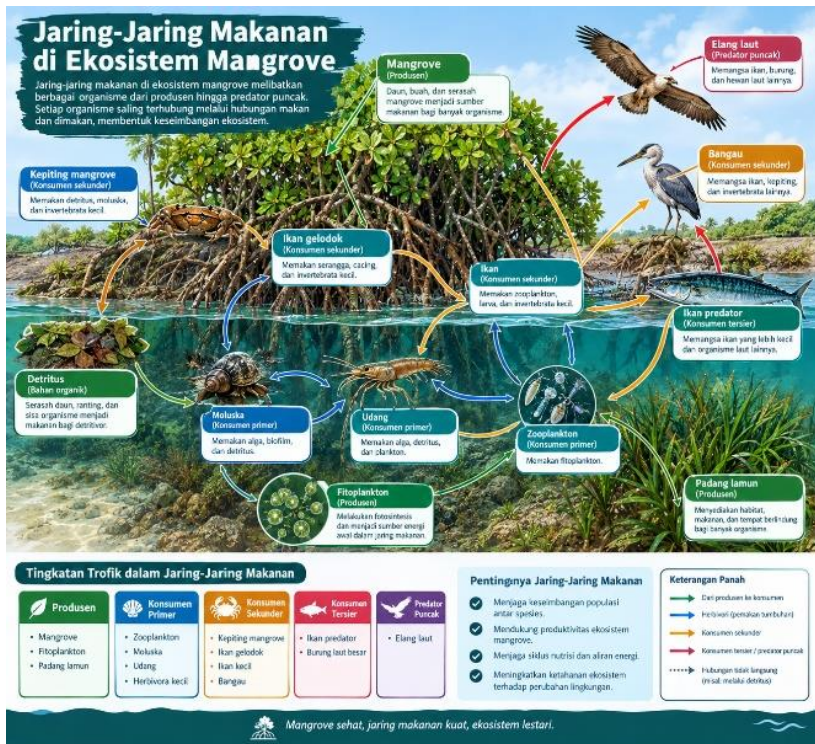
Kepiting mangrove merupakan kelompok fauna yang memainkan peran ganda dalam jaring-jaring makanan, baik sebagai konsumen detritus maupun sebagai mangsa bagi predator akuatik dan terestrial. Pembahasan tentang kepiting pohon mangrove *Aratus pisonii* mengungkapkan interaksi kompleks antara predator terestrial dan akuatik dalam mengendalikan populasi kepiting. Kepiting ini terutama hidup di pohon mangrove untuk menghindari predator, namun ketika menghadapi serangan burung, mereka melompat ke air dan menjadi rentan terhadap predasi ikan. Ikan kakap kelabu (*Lutjanus griseus*) dapat mengonsumsi *Aratus* hingga 29% dari volume dietnya, menunjukkan bahwa energi yang berasal dari mangrove mengalir ke jaring-jaring makanan akuatik melalui jalur ini. Interaksi semacam ini menciptakan subsidi energi lintas habitat yang menghubungkan ekosistem terestrial dan akuatik dalam satu lanskap pesisir.

Predator puncak (*top predators*) memainkan peran yang tidak proporsional dalam mengatur struktur jaring-jaring makanan mangrove melalui efek kaskade trofik. Hilangnya predator dari lahan basah pesisir dapat menjadi salah satu penyebab degradasi awal, sebagaimana terjadi pada rawa asin di mana penangkapan ikan

predator secara berlebihan menyebabkan keruntuhan ekosistem melalui kaskade trofik yang memungkinkan grazing tak terkendali pada vegetasi. Restorasi predator atau pemilihan lokasi dengan populasi predator yang sehat dapat membantu meningkatkan resiliensi ekosistem. Efek interaktif antara spesies mangsa juga penting: keberadaan spesies mangsa yang berbeda dapat meningkatkan laju konsumsi oleh predator bersama melalui interaksi agonistik yang mengubah perilaku dan penggunaan refugia.



Gambar 7. Interaksi Spesies di Ekosistem Mangrove



Gambar 8. Jaring-Jaring Makanan di Ekosistem Mangrove

Jaring-jaring makanan mangrove tidak berdiri sendiri, melainkan terhubung secara fungsional dengan ekosistem pesisir lainnya melalui ekspor detritus dan migrasi organisme. Hipotesis *outwelling* mangrove mempostulatkan bahwa ekspor detritus dari mangrove menyokong ekosistem yang berdekatan seperti padang lamun dan terumbu karang. Analisis biomarker asam lemak dan isotop stabil menunjukkan adanya aliran materi organik berasal mangrove ke sedimen ekosistem

pesisir yang berdekatan, meskipun kontribusi langsung mangrove terhadap jaring-jaring makanan konsumen mungkin minimal dan lebih banyak melalui jalur mikroba dan fitoplankton yang disubsidi nutrien dari dekomposisi serasah. Konektivitas ini juga mencakup migrasi ikan dan krustasea yang menggunakan mangrove sebagai daerah asuhan dan kemudian bermigrasi ke terumbu karang atau laut lepas saat dewasa.

Keanekaragaman hayati pada tingkat fungsional berupa kehadiran beberapa spesies dengan peran ekologis serupa yang memberikan redundansi dan meningkatkan stabilitas jaring-jaring makanan mangrove. Kelompok fungsi seperti detritivora, herbivora, dan predator yang diwakili oleh beberapa spesies memastikan bahwa fungsi ekologis tetap berjalan meskipun satu spesies terganggu oleh tekanan lingkungan atau eksploitasi. Dalam konteks ini, pemahaman tentang jaring-jaring makanan mangrove bukan hanya penting untuk kepentingan akademis, tetapi juga memiliki implikasi langsung bagi pengelolaan perikanan dan konservasi. Perubahan pada satu komponen jaring-jaring makanan, sebagai contoh hilangnya predator puncak atau penurunan pasokan serasah akibat degradasi mangrove, sehingga dapat merambat ke seluruh sistem dan memengaruhi produktivitas perikanan serta ketahanan pangan masyarakat pesisir.

Fungsi Ekologis dan Ekonomis Mangrove

Fungsi ekologis mangrove yang paling fundamental adalah kemampuannya sebagai benteng alami yang melindungi garis pantai dari abrasi, erosi, dan hempasan

gelombang laut. Akar mangrove yang rapat dan sistem perakaran yang luas mampu meredam energi gelombang, menahan sedimen, serta mengurangi intrusi air laut ke daratan. Perlindungan ini tidak hanya terbatas pada abrasi sehari-hari, tetapi juga terbukti efektif dalam mengurangi dampak bencana besar seperti tsunami dan badai siklon, sebagaimana terlihat pada peristiwa tsunami Samudra Hindia 2004 dan topan Haiyan. Mangrove bertindak sebagai infrastruktur hijau yang biayanya jauh lebih murah dibandingkan pembangunan tanggul beton, sekaligus memberikan manfaat ekologis tambahan yang tidak dapat disediakan oleh konstruksi buatan.

Mangrove juga berfungsi sebagai penyimpan karbon (*carbon sink*) yang sangat efisien, sehingga memainkan peran krusial dalam mitigasi perubahan iklim global. Substrat lumpur di ekosistem mangrove mampu menyimpan 20–25% karbon, dan satu hektare hutan mangrove dapat menyerap sekitar 1,5 metrik ton karbon per tahun. Hingga 90% karbon yang diserap mangrove tersimpan di dalam tanah dalam kondisi anaerob yang menghambat respirasi mikroba, memungkinkan penyimpanan karbon berlangsung selama ribuan tahun. FAO mencatat bahwa mangrove yang terjaga dapat berfungsi sebagai sumur karbon (*carbon sink*) jangka panjang, menjadikannya salah satu ekosistem paling bernilai di dunia dalam konteks perdagangan karbon dan komitmen pengurangan emisi nasional.

Mangrove berfungsi sebagai habitat kritis, daerah asuhan (*nursery ground*), dan daerah pemijahan (*spawning ground*) bagi berbagai biota akuatik yang bernilai ekologis dan ekonomis tinggi. Ranting dan cabang mangrove yang jatuh dan terurai menghasilkan unsur hara yang menyuburkan lingkungan laut, sementara sistem perakaran yang kompleks menyediakan tempat berlindung bagi ikan, udang, kepiting, dan moluska pada fase-fase awal siklus hidupnya. Fungsi ini tidak bersifat universal, melainkan bervariasi bergantung pada aksesibilitas spasial-temporal dan konektivitas dengan habitat pesisir yang berdekatan, di mana mangrove dan ekosistem sekitarnya saling melengkapi melalui migrasi ontogenetik dan *relay trofik*. Perlindungan terhadap fungsi asuhan ini menjadi kunci bagi keberlanjutan stok perikanan tangkap di perairan sekitar.

Mangrove juga berperan sebagai filter alami yang meningkatkan kualitas air dan melindungi ekosistem pesisir lainnya dari sedimentasi berlebih. Sistem perakaran mangrove yang rapat mampu menjebak sedimen, menyerap nutrisi berlebih, dan mengakumulasi logam berat, sehingga air yang keluar dari kawasan mangrove memiliki kualitas yang lebih baik. Fungsi filtrasi ini sangat penting bagi kesehatan ekosistem terumbu karang dan padang lamun di sekitarnya, karena sedimentasi berlebih dapat menghambat fotosintesis dan merusak struktur fisik kedua ekosistem tersebut. Dengan demikian, kesehatan mangrove secara langsung memengaruhi kesehatan ekosistem pesisir yang lebih luas, sebagaimana

ditegaskan dalam prinsip bahwa "jika mangrovenya sehat, seagrass sehat, maka terumbu karang juga akan sehat".

Mangrove dilihat dari perspektif ekonomi merupakan ekosistem yang menyediakan sumber penghidupan langsung bagi masyarakat pesisir melalui pemanfaatan kayu, hasil hutan non-kayu, dan produk olahan. Batang mangrove dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi rumah dan kayu bakar, sementara daun nipah digunakan sebagai bahan atap. Buah mangrove dapat diolah menjadi produk bernilai jual seperti sirup, batik, dan pewarna alami, sebagaimana dikembangkan dalam program rehabilitasi mangrove. Pohon, daun, dan buah mangrove juga dimanfaatkan sebagai bahan obat-obatan tradisional oleh masyarakat di berbagai wilayah Indonesia. Pemanfaatan langsung ini memberikan pendapatan tunai yang dapat dirasakan segera, meskipun skalanya bergantung pada luasan dan kepadatan hutan mangrove yang tersedia.

Fungsi ekonomi mangrove yang paling signifikan terletak pada kontribusinya terhadap produktivitas perikanan, baik tangkap maupun budidaya. Di Desa Babalan nilai ekonomi ekosistem mangrove dari kegiatan perikanan tangkap mencapai Rp. 252.473.749 per tahun dan dari tambak mencapai Rp. 27.771.070 per tahun. Di Kabupaten Tana Tidung, produksi tambak yang didukung ekosistem mangrove mencapai 108.600 ton/tahun dengan nilai sekitar Rp 6 miliar dari komoditas bandeng dan udang windu, ditambah hasil tangkapan

sampingan kepiting bakau senilai Rp.102.600.000. FAO mencatat nilai rata-rata global mangrove untuk perikanan mencapai USD 77 per Ha/tahun untuk ikan dan USD 213 per Ha/tahun untuk perikanan campuran, dengan nilai melebihi USD 10.000 per Ha di zona paling produktif.

Ekowisata mangrove juga telah berkembang menjadi sektor ekonomi yang signifikan, memanfaatkan keindahan alam dan kekayaan hayati mangrove sebagai daya tarik wisata. Sejak tahun 1980, pemanfaatan area mangrove untuk kegiatan wisata meningkat tajam, dengan contoh sukses seperti Taman Alam Kuala Selangor di Malaysia. Di Indonesia, ekowisata mangrove menjadi salah satu pilar ekonomi dalam program rehabilitasi yang melibatkan masyarakat sejak perencanaan hingga pemanfaatan hasil. Nilai ekonomi jasa budaya (*cultural services*) dari ekosistem mangrove yang mencakup wisata dan pendidikan, menjadi komponen penting dalam total nilai ekonomi yang mencapai Rp 52 miliar per tahun. Ekowisata mangrove juga berfungsi sebagai sarana pendidikan lingkungan, tempat belajar bagi siswa, dan media kampanye konservasi yang efektif.

Valuasi ekonomi total ekosistem mangrove Indonesia menunjukkan nilai yang jauh melampaui alternatif penggunaan lahan seperti tambak konvensional, menegaskan bahwa konservasi adalah pilihan yang rasional secara ekonomi. Misal di Desa Muara, Karawang, menemukan bahwa nilai ekonomi total mangrove mencapai Rp. 663.268.188 per Ha/tahun, atau sekitar 23,45 kali lebih besar dibandingkan pendapatan bersih tambak

tradisional yang hanya Rp. 28.290.000 per Ha/tahun. Ketika biaya lingkungan diperhitungkan dalam *Extended Cost Benefit Analysis* (ECBA), tambak konvensional menjadi tidak layak secara finansial, sementara *silvofishery* dengan sistem yang mengintegrasikan mangrove dengan budidaya dapat menjadi alternatif yang layak secara ekonomi sekaligus lingkungan. Jasa penyediaan perikanan tangkap mangrove di Pandansari, Brebes bernilai Rp.124.401.446 per Ha/tahun, sementara jasa pengaturan sebagai pengendali banjir mencapai Rp.1.625.340.000 per tahun. Investasi dalam konservasi mangrove bukan sekadar kewajiban ekologis, melainkan keputusan ekonomi yang menguntungkan jangka panjang.

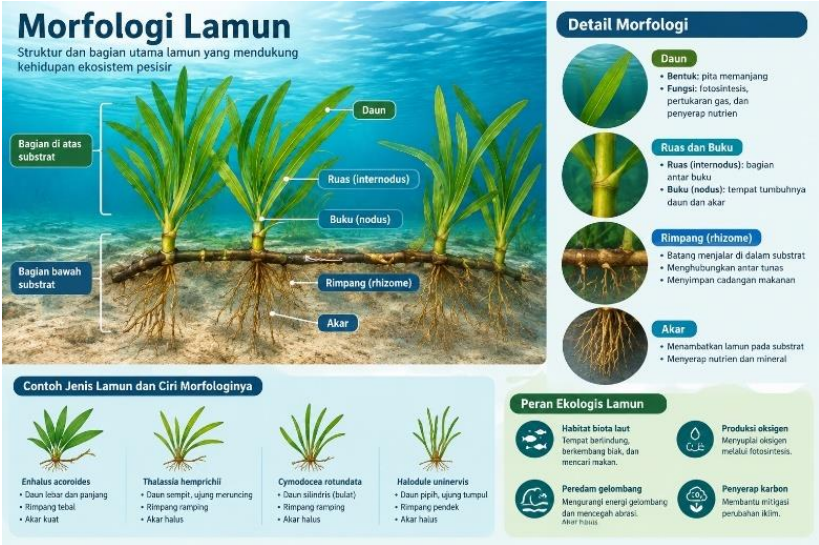
➤ Ekobiologi Ekosistem Padang Lamun

Morfologi, Jenis, dan Sebaran Lamun di Indonesia

Lamun (seagrass) merupakan tumbuhan berbunga sejati (*Angiospermae*) yang telah beradaptasi sepenuhnya untuk hidup terbenam di bawah permukaan air laut. Berbeda dengan rumput laut (*algae*) yang tidak memiliki sistem perakaran sejati, lamun memiliki akar, batang (*rhizoma*), daun, bunga, dan buah yang lengkap. Adaptasi morfologi dan anatomi lamun sangat khas, mencerminkan evolusi panjang untuk bertahan di lingkungan laut: penyerbukan terjadi di dalam air, daun tidak memiliki stomata, dan kutikula sangat tipis untuk memfasilitasi pertukaran gas langsung dengan air. Lamun juga memiliki sistem lakuna (rongga udara) yang berliku-liku di seluruh tubuhnya,

berfungsi sebagai saluran transportasi oksigen dari daun ke akar dan *rhizoma* yang tertanam dalam substrat anoksik.

Akar lamun memiliki sistem serabut yang berfungsi untuk menyerap zat hara dan menancapkan tumbuhan dengan kuat ke substrat. Morfologi dan anatomi akar menunjukkan variasi antar jenis yang memiliki nilai taksonomi penting. Jenis-jenis dari genus *Halophila* dan *Halodule* memiliki akar yang sangat tipis dan rapuh (*fragile*) seperti rambut, sedangkan *Thalassodendron* memiliki akar yang kuat dan berkayu dengan sel epidermal yang jelas. Akar lamun berfungsi ganda: selain menyerap nutrisi, juga menyimpan oksigen untuk mendukung proses fotosintesis dan respirasi.



Gambar 9. Morfologi Lamun

Rhizoma (rimpang) lamun merupakan organ utama yang menjalar di bawah permukaan substrat dan berperan krusial dalam reproduksi vegetatif serta penyebaran koloni. Volume *rhizoma* dapat mencakup 60–80% dari total biomassa lamun, menegaskan perannya sebagai organ penyimpanan sekaligus alat perbanyak. *Rhizoma* memiliki buku-buku (*nodus*) yang mengandung jaringan meristem, tempat tumbuhnya daun dan akar baru. Morfologi *rhizoma* bervariasi antar jenis *Cymodocea rotundata* memiliki *rhizoma* halus berwarna putih hingga kekuningan, sementara *Thalassia hemprichii* memiliki *rhizoma* tebal dengan buku-buku yang jelas berwarna coklat berselang-seling.

Daun lamun memiliki bentuk dan struktur yang sangat bervariasi antar jenis, dan karakteristik daun termasuk bentuk, ujung, serta ada tidaknya ligula yang merupakan ciri taksonomi yang paling andal untuk identifikasi spesies. Secara umum, daun lamun terdiri dari dua bagian, yaitu pelepah (*sheath*) yang menutupi *rhizoma* dan melindungi daun muda, serta helaian daun (*blade*). Genus *Halophila* memiliki daun lonjong (*petiolate*) dan tidak memiliki pelepah, sedangkan genus lain umumnya memiliki daun memanjang seperti pita atau selempang. Panjang daun sangat bervariasi, mulai dari 1 cm pada beberapa spesies *Halophila* hingga mencapai 1–2,5 m pada *Enhalus acoroides*, spesies lamun terbesar.

Terdapat 60 spesies lamun yang ditemukan di dunia dan sebanyak 16 jenis tercatat terdapat di perairan Indonesia, menempatkan Indonesia sebagai salah satu

pusat keanekaragaman lamun tertinggi di dunia. Lamun di Indonesia terdiri atas dua suku utama, yaitu *Hydrocharitaceae* (marga *Enhalus*, *Thalassia*, *Halophila*) dan *Cymodoceae* (marga *Halodule*, *Cymodocea*, *Syringodium*, dan *Thalassodendron*). Beberapa jenis yang umum dijumpai antara lain *Enhalus acoroides* (lamun terbesar, daun seperti pita panjang hingga 150 cm), *Thalassia hemprichii* (spesies paling melimpah di kepulauan Indonesia), *Cymodocea rotundata*, *Cymodocea serrulata*, *Halodule uninervis*, *Halodule pinifolia*, serta beberapa spesies *Halophila*.

Jenis-jenis lamun di Indonesia dapat dikelompokkan berdasarkan strategi hidupnya menjadi tiga kategori, yaitu perintis (*pioneer*), oportunist, dan persisten. Lamun perintis seperti *Halophila ovalis* sering menjadi spesies pertama yang tumbuh setelah gangguan ekosistem, memiliki siklus hidup cepat namun tidak tahan lama. Lamun oportunist seperti *Cymodocea serrulata* dan *Cymodocea rotundata* memiliki pertumbuhan cepat tetapi berumur relatif pendek. Adapun lamun persisten seperti *Enhalus acoroides* dan *Thalassia hemprichii* memiliki umur panjang dan membentuk padang yang stabil, tetapi pertumbuhannya lambat. Perbedaan strategi hidup ini secara langsung memengaruhi pola distribusi dan sebaran masing-masing jenis di perairan Indonesia.

Sebaran padang lamun di Indonesia mencakup hampir seluruh wilayah pesisir, dari perairan barat hingga timur, dengan konsentrasi kekayaan tertinggi di Indonesia bagian timur. Padang lamun ditemukan di Kepulauan Riau, Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, Maluku,

dan Papua. Berdasarkan Peta Karang dan Padang Lamun 2025 yang diluncurkan secara resmi pada Desember 2025, luas padang lamun Indonesia tercatat mencapai 660.000 Ha, tersebar terutama di wilayah timur Indonesia. Angka ini merupakan pemutakhiran signifikan dari verifikasi sebelumnya pada 2018 yang hanya mencatat 293.000 hektare, meskipun pemetaan masih belum mencakup seluruh wilayah perairan nasional.

Meskipun memiliki luas yang signifikan, kondisi padang lamun Indonesia menghadapi tekanan yang semakin meningkat, dengan data menunjukkan penurunan tutupan lamun sekitar 10% dalam dua dekade terakhir. Pemantauan terhadap 20 lokasi menunjukkan bahwa perairan Indonesia bagian timur relatif lebih sehat, sementara wilayah barat mengalami kehilangan habitat yang lebih parah akibat polusi, sedimentasi, dan pembangunan pesisir. Beberapa daerah seperti Bangka Belitung bahkan kehilangan hingga 40% padang lamunnya. Hanya sekitar 15,35% dari total luasan lamun Indonesia yang berada dalam kondisi baik dan berkelanjutan. Ancaman utama meliputi sedimentasi yang menghalangi penetrasi cahaya untuk fotosintesis, pembangunan infrastruktur dan reklamasi pantai, kompetisi ruang dengan budidaya rumput laut, serta kerusakan fisik akibat jangkar dan baling-baling kapal. Pemetaan nasional 2025 diharapkan menjadi titik tolak penting bagi kebijakan konservasi dan pengelolaan lamun yang lebih efektif di Indonesia.

Adaptasi, Reproduksi, dan Siklus Hidup Lamun

Lamun telah mengalami adaptasi evolusioner menyeluruh untuk hidup terbenam di bawah permukaan air laut, sebuah proses yang oleh para ilmuwan disebut sebagai "kembali ke laut" dari nenek moyang tumbuhan darat. Adaptasi morfologi yang paling mencolok adalah ketiadaan stomata pada daun dan keberadaan kutikula yang sangat tipis, yang memungkinkan pertukaran gas dan penyerapan nutrisi langsung dari air laut. Sistem *lakuna* (rongga udara) yang berkeluk-luk di seluruh tubuh lamun mulaidari daun hingga akar dan *rhizome* yang berfungsi sebagai saluran transportasi oksigen ke bagian-bagian yang tertanam dalam substrat anoksik. Kondisi ini memungkinkan lamun bertahan di lingkungan sedimen yang kekurangan oksigen. Daun yang berbentuk pita dengan luas permukaan besar meningkatkan efisiensi fotosintesis, sementara *rhizoma* yang menjalar dan sistem perakaran yang kuat menancapkan tumbuhan dengan kokoh di dasar laut yang dinamis.

Toleransi terhadap fluktuasi salinitas merupakan salah satu adaptasi fisiologis paling penting pada lamun, mengingat habitatnya yang mencakup zona intertidal hingga perairan estuaria. Sebagian besar spesies lamun memiliki kisaran toleransi salinitas yang lebar, yaitu antara 10 hingga 40‰, dengan nilai optimum sekitar 35‰. Namun, kemampuan toleransi ini bervariasi antar jenis dan tahap kehidupan. Lamun dewasa umumnya lebih toleran terhadap fluktuasi salinitas dibandingkan individu muda. Penurunan salinitas akibat masukan air

tawar yang berlebihan dapat menurunkan kemampuan fotosintesis lamun, sehingga salinitas menjadi faktor pembatas penting dalam distribusi dan produktivitas padang lamun di perairan pesisir.

Lamun memiliki dua strategi reproduksi yang saling melengkapi, yaitu reproduksi aseksual (vegetatif) melalui pertumbuhan *rhizoma*, dan reproduksi seksual melalui pembentukan bunga, buah, dan biji. Reproduksi aseksual terjadi ketika *rhizoma* memanjang dan membentuk tunas baru, yang kemudian tumbuh menjadi individu mandiri yang secara genetik identik dengan induknya. Strategi ini memungkinkan lamun untuk memperluas koloni dan mempertahankan padang yang sudah ada secara efisien, serta menjadi mekanisme utama pemeliharaan padang lamun tahunan. Sementara itu, reproduksi seksual menyediakan variasi genetik yang penting untuk adaptasi terhadap perubahan lingkungan dan kolonisasi habitat baru.

Reproduksi seksual lamun melibatkan proses *hidrofilus* (penyerbukan di bawah air), sebuah adaptasi unik yang membedakannya dari tumbuhan darat. Bunga lamun memiliki struktur yang lebih sederhana dibandingkan tumbuhan darat, terdiri dari periantium, benang sari, putik, dan tangkai bunga. Lamun dapat bersifat monoesus (bunga jantan dan betina pada satu individu) atau diesius (bunga jantan dan betina pada individu berbeda), dengan beberapa spesies seperti *Thalassia hemprichii* dan *Enhalus acoroides* menunjukkan pola yang spesifik. Penyerbukan terjadi di dalam air, dan

setelah pembuahan, ovarium berkembang menjadi buah yang mengandung satu atau beberapa biji, tergantung spesiesnya.

Siklus hidup lamun dipengaruhi secara signifikan oleh faktor lingkungan, terutama suhu perairan, yang mengatur fenologi reproduksi (waktu pembungaan, pembuahan, dan pematangan biji). Empat spesies *Zostera* di Korea fase reproduksi seksual berbeda secara temporal. *Z. caespitosa* berbunga Februari–Mei (10–16°C), *Z. caulescens* Januari–Juni (9–19°C), *Z. japonica* Juli–September (18–22°C), dan *Z. marina* April–Agustus (7–21°C). Suhu air merupakan pemicu utama pembungaan, dan perubahan iklim yang menyebabkan pergeseran suhu musiman berpotensi mengganggu sinkronisasi reproduksi lamun. Sebagian besar lamun bersifat perenial (hidup bertahun-tahun) dengan masukan reproduksi seksual yang rendah, mengandalkan pertumbuhan vegetatif untuk mempertahankan populasi.

Pemahaman tentang adaptasi, reproduksi, dan siklus hidup lamun memiliki implikasi langsung bagi upaya konservasi dan restorasi ekosistem pesisir. Reproduksi aseksual yang dominan pada banyak spesies lamun berarti bahwa pemulihan padang lamun yang rusak melalui penyebaran alami biji mungkin berlangsung sangat lambat, sehingga restorasi aktif, seperti transplantasi *rhizome* sering diperlukan. Di sisi lain, reproduksi seksual yang menghasilkan variasi genetik penting untuk ketahanan jangka panjang terhadap perubahan iklim, sehingga strategi konservasi harus

mempertimbangkan perlindungan populasi yang memiliki keragaman genetik tinggi. Dengan demikian, pengetahuan tentang strategi reproduksi dan faktor-faktor lingkungan yang mengendalikan siklus hidup lamun menjadi fondasi krusial bagi pengelolaan ekosistem lamun yang efektif dan berkelanjutan di Indonesia.

Peran Ekologis Lamun sebagai Habitat dan Daerah Asuhan

Padang lamun merupakan salah satu ekosistem pesisir paling produktif yang berfungsi sebagai habitat kritis, daerah asuhan (*nursery ground*), tempat mencari makan (*feeding ground*), dan tempat perlindungan (*shelter*) bagi berbagai jenis biota laut. Sebagai contoh di Pantai Wawontulap, Sulawesi Utara, menemukan 10 spesies ikan dari famili *Lethrinidae*, *Lutjanidae*, *Mullidae*, *Nemipteridae*, *Scaridae*, *Siganidae*, *Carangidae*, *Serranidae*, dan *Labridae* yang memanfaatkan padang lamun sebagai habitat mencari makan maupun daerah asuhan. Keberadaan berbagai jenis ikan tersebut menunjukkan bahwa ekosistem padang lamun masih memiliki fungsi ekologis yang baik dalam mendukung komunitas ikan pesisir. Dengan demikian, padang lamun berperan sebagai sistem penyangga kehidupan yang menghubungkan berbagai tingkatan trofik dalam jaring-jaring makanan pesisir.

Fungsi lamun sebagai daerah asuhan (*nursery ground*) telah dibuktikan secara kuantitatif melalui struktur komunitas ikan. Sebagai contoh di padang lamun tropis Sulawesi Utara menemukan bahwa 93,10% spesies

ikan yang tertangkap memiliki panjang maksimum kurang dari panjang saat matang gonad (*length at maturity*), yang secara langsung mengindikasikan bahwa padang lamun berfungsi sebagai habitat asuhan bagi banyak spesies ikan. Contoh ini juga mencatat indeks keanekaragaman Shannon-Wiener komunitas ikan berkisar 1,57–3,69, dengan famili *Apogonidae* mendominasi baik dalam kelimpahan (8,27 individu/100 m²) maupun biomassa (28,49 g/100 m²). Padang lamun menyediakan kondisi lingkungan yang optimal bagi juvenil ikan untuk tumbuh dan berkembang sebelum bermigrasi ke habitat dewasa.

Peran lamun sebagai habitat tidak terbatas pada ikan, tetapi juga mencakup invertebrata dan megafauna laut yang memiliki nilai konservasi tinggi. Interaksi dugong (*Dugong dugon*) dengan padang lamun di Indonesia Timur padang lamun intertidal yang didominasi *Halodule uninervis* merupakan sumber daya krusial bagi kelangsungan hidup dugong. Dugong melakukan penggembalaan rotasional pada petak-petak terbatas, dengan pola penggembalaan berkorelasi signifikan terhadap kandungan karbohidrat dalam biomassa bawah tanah lamun. Selain dugong, penyu hijau (*Chelonia mydas*) juga bergantung pada padang lamun sebagai habitat mencari makan, sebagaimana teridentifikasi dalam proyek konservasi di Pulau Banyak dan Nias Selatan. Kehadiran megafauna ini menjadikan padang lamun sebagai habitat prioritas dalam perencanaan konservasi laut.

Lamun menyediakan mikrohabitat yang beragam yang memungkinkan berbagai spesies untuk mengurangi risiko predasi melalui adaptasi perilaku dan morfologi. Pembahasan di ekosistem lamun tropis mengungkapkan bahwa padang lamun menyediakan jaringan akar dan tunas yang rapat serta berbagai mikrohabitat seperti tambalan karang, tambalan pasir dengan lamun jarang, rongga, hamparan alga, dan taman spons. Beberapa spesies ikan mengembangkan perilaku adaptif: ikan yang bersembunyi di rongga atau udang komensal dapat menjelajah lebih jauh dari tempat persembunyiannya di padang lamun dibandingkan di terumbu karang karena perlindungan yang diberikan oleh mikrohabitat lamun. Spesies lain menyesuaikan warna tubuh dengan latar belakang atau meniru bentuk daun lamun, seperti *Petroscirtes lupus*. Keragaman mikrohabitat ini menjadikan padang lamun sebagai sistem yang sangat kompleks yang mendukung keanekaragaman hayati tinggi.

Konektivitas antara padang lamun dan ekosistem pesisir lainnya, terutama terumbu karang, menjadikan lamun komponen integral dari lanskap pesisir yang saling terhubung. Lebih dari 82% spesies ikan di Sulawesi Utara dan Wenchang, China, terutama memakan lamun dan epifitnya, menunjukkan ketergantungan trofik yang kuat. Dalam mosaik lamun-terumbu karang, berbagai spesies ikan berlindung di terumbu karang pada siang hari dan mencari makan di padang lamun yang berdekatan pada malam hari, menciptakan subsidi trofik melalui pergerakan harian dan pasang surut. Padang lamun juga

berfungsi sebagai daerah asuhan bagi spesies ikan karang yang penting secara ekonomi. Pembahasan lamun di Karibia menunjukkan bahwa lamun, bersama mangrove dan terumbu karang dangkal, berperan sebagai daerah asuhan bagi ikan karang penting, dengan teknik sensus visual mengungkapkan pola penggunaan habitat yang spesifik berdasarkan tahap kehidupan. Konektivitas ini menegaskan bahwa konservasi lamun tidak dapat dipisahkan dari pengelolaan ekosistem pesisir secara keseluruhan.

Implikasi dari fungsi ekologis lamun sebagai habitat dan daerah asuhan sangat signifikan bagi ketahanan pangan dan penghidupan masyarakat pesisir Indonesia. Misal di Wakatobi, Sulawesi Tenggara, menemukan bahwa 68% aktivitas penangkapan ikan terjadi di padang lamun, dan 62% ikan yang tertangkap menggunakan padang lamun pada beberapa tahap siklus hidupnya. Masyarakat setempat menunjukkan preferensi terhadap spesies ikan yang berasal dari lamun seperti baronang (*Siganus canaliculatus*) yang dikenal sebagai "Kola". Survei rumah tangga di 147 desa di Indo-Pasifik mengungkapkan bahwa padang lamun merupakan habitat penangkapan ikan yang paling umum digunakan, dengan hampir setengah dari rumah tangga yang disurvei lebih memilih menangkap ikan di lamun dibandingkan habitat lain karena keandalan hasil tangkapan. Dengan demikian, perlindungan padang lamun bukan hanya kepentingan ekologis, tetapi juga strategi penting untuk menjaga

ketahanan pangan dan ekonomi masyarakat pesisir Indonesia.

Asosiasi Biota pada Ekosistem Lamun

Padang lamun bukan sekadar hamparan tumbuhan hijau di dasar laut, melainkan sebuah ekosistem dinamis yang menampung keanekaragaman biota laut yang luar biasa. Berbagai jenis organisme, mulai dari yang berukuran mikroskopis hingga mamalia laut besar, menjadikan lamun sebagai rumah, tempat berlindung, dan sumber makanan. Kehadiran mereka tidak hanya memperkaya keanekaragaman hayati, tetapi juga menjadi indikator kesehatan ekosistem pesisir secara keseluruhan.

Biota yang berasosiasi dengan padang lamun dapat dikelompokkan berdasarkan cara hidup dan posisinya dalam ekosistem. Organisme yang hidup menempel pada daun atau tangkai lamun disebut epifit, seperti alga dan mikroba. Ada pula infauna, yaitu hewan yang hidup terkubur dalam sedimen di antara *rhizoma*, dan epifauna mobile, seperti moluska dan krustasea yang bergerak bebas di permukaan sedimen atau di antara daun lamun. Kelompok lain adalah sessile epifauna, hewan yang menempel permanen pada lamun, serta epibenthic fauna, organisme yang berasosiasi bebas dengan padang lamun.

Echinodermata merupakan salah satu fauna yang paling mudah dijumpai dari kelompok invertebrata. Bulu babi, seperti *Diadema setosum* dan *Tripneustes gratilla*, sering ditemukan dalam jumlah melimpah dan cenderung hidup berkelompok pada area dengan kerapatan lamun yang jarang. Selain bulu babi, teripang (*Holothuroidea*) juga

umum ditemukan; spesies seperti *Holothuria scabra* dan *Holothuria atra* beradaptasi dengan membenamkan diri dalam substrat atau melapisi tubuhnya dengan pasir halus. Bintang laut dari jenis *Archaster* sp. juga sering dijumpai di zona rata pasir di antara padang lamun.

Kelompok krustasea dan moluska menunjukkan keanekaragaman yang sangat tinggi di ekosistem ini. Puluhan jenis krustasea, termasuk kepiting, udang, amphipoda, dan isopoda, serta beragam jenis moluska seperti kerang, gastropoda, dan cumi-cumi. Beberapa spesies moluska, seperti sotong (*Sepia* sp.) dan gurita (*Octopus* sp.), merupakan biota bernilai ekonomis tinggi yang memanfaatkan padang lamun sebagai habitat mencari makan. Krustasea seperti udang dan kepiting juga menjadi komponen penting dalam jaring-jaring makanan, menghubungkan produksi primer lamun dengan konsumen tingkat tinggi.

Ikan merupakan kelompok fauna yang paling banyak memanfaatkan padang lamun, dengan perkiraan sekitar 360 spesies ikan ditemukan berasosiasi dengan ekosistem ini di perairan Indonesia. Banyak di antaranya adalah spesies bernilai ekonomi penting, seperti ikan beronang (*Siganus canaliculatus*), kakap (*Lutjanus* spp.), lencam (*Lethrinus* spp.), dan kuwe (*Caranx* spp.). Kehadiran juvenil ikan dalam jumlah besar menjadikan padang lamun sebagai daerah asuhan (*nursery ground*) yang krusial, tempat anak-anak ikan berlindung dari predator dan memperoleh makanan sebelum bermigrasi ke habitat dewasa di terumbu karang atau laut lepas.

Keberadaan biota-biota ini memiliki implikasi ekologis yang sangat penting. Mereka tidak hanya berperan sebagai konsumen, tetapi juga berkontribusi pada siklus nutrisi dan aliran energi dalam ekosistem. Epifauna, misalnya, menjadi penghubung antara produksi primer alga epifit dengan konsumen tingkat tinggi, termasuk ikan-ikan predator. Dengan demikian, asosiasi biota pada padang lamun mencerminkan kesehatan dan produktivitas ekosistem secara keseluruhan, sekaligus menegaskan peran strategis lamun sebagai penopang keanekaragaman hayati laut di perairan pesisir Indonesia.



Gambar 10. Asosiasi Biota pada Ekosistem Lamun

➤ Ekobiologi Ekosistem Terumbu Karang

Klasifikasi dan Distribusi Terumbu Karang di Indonesia

Indonesia merupakan pusat keanekaragaman hayati terumbu karang dunia, dengan total 590 spesies karang batu dari 82 genera yang tercatat di perairan Nusantara yang mencakup sekitar 69% spesies dan 76% genera karang dunia. Angka ini menempatkan Indonesia sebagai pusat segitiga terumbu karang (*Coral Triangle*) yang menjadi episentrum biodiversitas karang global. Terdapat 113 spesies *Acropora* yang tercatat di dunia dan 91 di antaranya ditemukan di perairan Indonesia dengan frekuensi tertinggi berada di Teluk Tomini, Sulawesi Tengah yang mencapai 78 spesies. Kekayaan spesies ini tidak tersebar merata, melainkan terkonsentrasi di wilayah Indonesia bagian tengah dan timur yang dipengaruhi oleh Arus Lintas Indonesia (*Indonesian Through Flow*) yang membawa air jernih dari Pasifik.

Terumbu karang di Indonesia secara geologis dapat diklasifikasikan berdasarkan genesa dan morfologinya, dengan klasifikasi Maxwell (1968) yang telah diadopsi sebagai standar pemetaan nasional. Klasifikasi ini membedakan empat tipe utama terumbu berdasarkan pertumbuhan horizontal: *oceanic reef* (terumbu samudra), *platform reef* (terumbu paparan), *wall reef* (terumbu dinding), dan *plug reef* (terumbu sumbat). Model ideal untuk masing-masing tipe telah diidentifikasi di perairan Indonesia: *oceanic reef* di Pulau Besar dan Gosong-goni, *platform reef* di Kepulauan Seribu, *wall reef* di Pulau

Wangiwangi, dan *plug reef* di sekitar Mansuar, Raja Ampat. Penerapan klasifikasi ini menggunakan citra satelit skala 1:250.000 memungkinkan pemetaan sistematis yang sebelumnya hanya dilakukan pada skala lokal dengan metode berbasis lapangan.

Berdasarkan morfologi dan posisinya terhadap daratan, terumbu karang Indonesia umumnya dikelompokkan menjadi empat tipe utama, yaitu terumbu tepi (*fringing reef*), terumbu penghalang (*barrier reef*), atol (*atoll*), dan gosong karang (*patch reef*). Terumbu tepi merupakan tipe paling umum dan tersebar luas, tumbuh langsung di tepi pulau atau benua. Terumbu penghalang terpisah dari daratan oleh laguna yang dalamnya bervariasi antara 20 hingga lebih dari 100 meter. Atol adalah formasi karang berbentuk cincin yang mengelilingi laguna, dengan Taman Nasional Taka Bonerate di Sulawesi Selatan sebagai contoh atol terbesar di Asia Tenggara. Adapun gosong karang adalah terumbu yang belum mencapai permukaan laut, tumbuh di paparan pulau atau benua.

Distribusi terumbu karang Indonesia menunjukkan pola yang sangat kontras antara wilayah barat dan timur, dipengaruhi oleh kondisi oseanografis dan geologis yang berbeda. Terumbu karang di Indonesia bagian barat dan Selatan yang menghadap Samudra Hindia, pada umumnya berupa terumbu tepi dangkal dengan dataran terumbu yang lebar dan lereng yang landai. Sebaliknya, terumbu karang di Indonesia bagian tengah dan timur yang dipengaruhi Samudra Pasifik dan Arus Lintas

Indonesia berupa terumbu tepi perairan dalam dengan dataran terumbu sempit dan lereng curam, serta beberapa tipe terumbu penghalang dan atol. Perbedaan karakteristik ini tidak hanya memengaruhi morfologi terumbu, tetapi juga komposisi spesies dan pola pertumbuhan karang.

Konsentrasi keanekaragaman karang tertinggi di Indonesia terletak di Raja Ampat, Papua, yang mencatat 456 spesies dari 77 genera merupakan jumlah tertinggi yang pernah tercatat di Indonesia. Kepulauan Derawan di Kalimantan Timur menyusul dengan 444 spesies, Banda dengan 330 spesies, dan Spermonde di Sulawesi Selatan dengan 262 spesies. Sebaliknya, perairan Indonesia bagian barat umumnya memiliki kurang dari 250 spesies. Beberapa spesies endemik juga tercatat, seperti *Acropora togeamensis* yang hanya ditemukan di perairan Togean dan *A. suharsonoi* yang endemik di perairan Bali dan Lombok. Pola distribusi ini menegaskan peran Indonesia timur sebagai pusat biodiversitas karang yang tidak tergantikan.

Meskipun memiliki kekayaan spesies tertinggi di dunia, kondisi terumbu karang Indonesia secara umum masih menghadapi tantangan serius dengan rata-rata tutupan karang hidup sekitar 30%. Berdasarkan pemantauan terhadap 1.067 lokasi, sekitar 36,18% terumbu tergolong dalam kategori jelek, 34,3% cukup, 22,96% baik, dan hanya 6,56% yang sangat baik. Perbedaan kondisi ini sangat dipengaruhi oleh faktor geografis, yaitu terumbu di wilayah barat dan Selatan

terutama pantai barat Sumatra yang cenderung lebih buruk karena berhadapan langsung dengan Samudra Hindia dan rentan terhadap fenomena pemutihan karang (*bleaching*). Di wilayah timur dan tengah, ancaman utama justru berasal dari aktivitas antropogenik seperti penangkapan ikan dengan bom dan sianida yang masih sering terjadi.

Pemahaman yang komprehensif tentang klasifikasi dan distribusi terumbu karang Indonesia memiliki implikasi langsung bagi strategi konservasi yang berbasis ekobiologi. Pemetaan sistematis menggunakan klasifikasi Maxwell memungkinkan identifikasi tipe terumbu yang memerlukan prioritas perlindungan, sekaligus menjadi dasar bagi perencanaan tata ruang laut dan pengelolaan kawasan konservasi. Klasifikasi morfologi (terumbu tepi, penghalang, atol, gosong) membantu penentuan zonasi yang sesuai dengan karakteristik ekologis masing-masing tipe. Adapun data distribusi spesies menjadi fondasi bagi penetapan kawasan konservasi yang mewakili kekayaan biodiversitas tertinggi, seperti Raja Ampat, Teluk Cenderawasih, dan Taka Bonerate, yang telah ditetapkan sebagai taman nasional laut dengan mandat perlindungan ekosistem karang. Dengan demikian, integrasi data klasifikasi dan distribusi menjadi fondasi krusial bagi konservasi terumbu karang Indonesia yang efektif dan berkelanjutan.

Simbiosis *Zooxanthellae*

Simbiosis antara karang batu (*Scleractinia*) dan *zooxanthellae* merupakan fondasi biologis yang memungkinkan terbentuknya ekosistem terumbu karang, sebuah hubungan mutualistik yang telah berevolusi selama ratusan juta tahun. *Zooxanthellae* adalah alga dinoflagelata uniseluler fotosintetik yang hidup di dalam jaringan endoderm karang, terkandung dalam vakuola khusus yang disebut simbiosom. Hubungan ini bersifat mutualistik: karang menyediakan lingkungan terlindungi, karbon dioksida, dan nutrisi anorganik seperti amonia dan fosfat dari sisa metabolismenya, sementara *zooxanthellae* mentransfer hingga 90–95% produk fotosintesisnya, berupa gula, asam amino, dan oksigen kepada inang karang. Transfer karbon ini menjadi pendorong utama pertumbuhan dan produktivitas terumbu karang, memungkinkan karang membangun kerangka kalsium karbonat yang masif di perairan tropis yang miskin nutrisi.



Gambar 11. Simbiosis *Zooxanthellae*

Keberadaan *zooxanthellae* tidak hanya menyokong nutrisi karang, tetapi juga secara langsung mempercepat proses kalsifikasi dan menentukan distribusi batimetri karang pembentuk terumbu. Karang yang mengandung *zooxanthellae* dikenal sebagai karang hermatipik (pembentuk terumbu), sedangkan karang yang tidak bersimbiosis disebut ahermatipik dan umumnya menghuni perairan dalam atau wilayah geografis yang lebih luas karena tidak bergantung pada cahaya untuk simbiotiknya. Asosiasi dengan *zooxanthellae* mempercepat kalsifikasi, memungkinkan karang hermatipik membangun kerangka yang dapat mengimbangi gangguan fisik dan biologis di lingkungan terumbu. Ketergantungan pada cahaya untuk fotosintesis *zooxanthellae* inilah yang membatasi karang pembentuk terumbu pada perairan

jernih dengan sedikit material tersuspensi, menciptakan paradoks ekologis berupa terumbu karang memerlukan air yang jernih dan miskin nutrisi, namun merupakan salah satu ekosistem paling produktif dan beragam di bumi.

Zooxanthellae bukanlah kelompok tunggal, melainkan kompleks spesies yang sangat beragam dengan preferensi dan toleransi lingkungan yang berbeda-beda, sebuah pemahaman yang telah direvolusi oleh metode molekuler. Apa yang dahulu dianggap sebagai satu spesies (*Symbiodinium microadriaticum*) kini diakui sebagai kumpulan kelompok yang saling berjauhan secara genetik, masing-masing dengan keragaman genetik yang signifikan. Genus *Cladocopium* merupakan kelompok dominan pada karang di Indo-Pasifik, termasuk Indonesia, sementara *Durudinium* dikenal sebagai genus yang lebih toleran terhadap panas dan sering dikaitkan dengan resistensi terhadap pemutihan. Perbedaan toleransi ini memiliki implikasi ekologis langsung, yaitu karang yang bersimbiosis dengan tipe *zooxanthellae* yang lebih sensitif terhadap panas lebih rentan mengalami pemutihan, sedangkan karang dengan simbiosis toleran panas memiliki peluang bertahan hidup lebih tinggi saat stres termal terjadi.

Suhu air laut merupakan faktor lingkungan yang paling dominan memengaruhi stabilitas simbiosis karang-*zooxanthellae*, dengan kenaikan suhu yang berkepanjangan menjadi pemicu utama pemutihan karang. Pemutihan karang (*coral bleaching*) adalah fenomena di mana karang

kehilangan *zooxanthellae* dari jaringannya akibat stres lingkungan, mengakibatkan karang tampak putih karena kerangka kalsium karbonatnya terekspos. Mekanisme di balik pemutihan melibatkan gangguan pada tiga fungsi inti simbiosis: homeostasis nutrisi, imunitas inang, dan pengelolaan kadar oksigen tinggi dari fotosintesis. Ketika suhu meningkat, keseimbangan pertukaran nutrisi antara karang dan *zooxanthellae* terganggu, memicu serangkaian respons stres seluler yang berujung pada pelepasan simbiosis. Data dari Indonesia menunjukkan bahwa pemutihan karang telah terjadi di berbagai wilayah seperti Bali dan Bunaken akibat kenaikan suhu air laut, dengan BMKG mencatat bahwa perubahan iklim menjadi pemicu utama fenomena ini.

Selain suhu, berbagai faktor lingkungan lain turut memengaruhi stabilitas simbiosis, baik secara langsung maupun sebagai faktor yang memperburuk dampak stres termal. Salinitas yang tidak normal, baik terlalu rendah akibat masukan air tawar berlebih maupun terlalu tinggi, dapat mengganggu keseimbangan osmotik dan memicu pelepasan *zooxanthellae*. Radiasi sinar matahari berlebih, terutama sinar ultraviolet, memperburuk kerusakan fotosintesis pada *zooxanthellae* dan mempercepat pemutihan. Sedimentasi yang meningkat menghalangi penetrasi cahaya yang diperlukan untuk fotosintesis simbiosis. Konsentrasi nutrisi yang tidak seimbang, terutama peningkatan nitrogen dan fosfor dari pencemaran, dapat mengganggu homeostasis nutrisi dalam simbiosis dan meningkatkan kerentanan karang

terhadap pemutihan. Bahkan kadar karbon dioksida laut ($p\text{CO}_2$) diduga memengaruhi stabilitas simbiosis; hipotesis yang diajukan menunjukkan bahwa kadar $p\text{CO}_2$ di atas ambang batas sekitar 260 ppmv dapat memperbanyak fraksi *zooxanthellae* "berlebih" dan meningkatkan kecenderungan pemutihan sebagai respons terhadap stres suhu dan cahaya.

Respons karang terhadap stres termal tidak seragam, melainkan bervariasi secara signifikan antarspesies dan antarkoloni, bergantung pada faktor genetik inang, jenis simbiosis, dan kondisi lingkungan lokal. Karang bercabang seperti *Acropora* dan *Pocillopora* umumnya lebih rentan memutih dibandingkan karang masif, namun variasi intraspesifik juga teramati dalam peristiwa pemutihan alami. Sebagai contoh di Kepulauan Seribu area rehabilitasi yang dikelola aktif memiliki tingkat pemutihan yang jauh lebih rendah (25,96%) dibandingkan area perlindungan laut (81,33%), meskipun terpapar suhu perairan yang serupa. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi lingkungan lokal dan praktik pengelolaan, seperti transplantasi karang dan pengurangan tekanan antropogenik dapat menentukan tingkat keparahan dampak pemutihan. Selain itu, beberapa karang memiliki kemampuan untuk mengganti simbiosisnya dari tipe yang sensitif panas ke tipe yang lebih toleran (*symbiont shuffling*), sebuah mekanisme adaptif yang dapat meningkatkan ketahanan terhadap pemutihan berikutnya. Namun, kemampuan ini dibatasi oleh spesifisitas inang dan hubungan evolusioner yang erat antara karang dan

simbionnya, sehingga tidak semua spesies dapat mengakomodasi perubahan komposisi simbion.

Pertumbuhan, Reproduksi, dan Rekrutmen Karang

Pertumbuhan karang merupakan proses biologis yang lambat namun fundamental dalam pembentukan terumbu, di mana polip karang mensekresikan kerangka kalsium karbonat (CaCO_3) dalam bentuk kristal aragonit secara terus-menerus. Laju pertumbuhan sangat bervariasi antar spesies dan dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti cahaya, suhu, dan arus. Karang masif seperti *Porites* tumbuh sangat lambat, hanya sekitar 1 cm per tahun atau bahkan kurang, sementara karang bercabang seperti *Acropora* dapat tumbuh jauh lebih cepat, mencapai 10–20 cm per tahun pada kondisi optimal. Perbedaan laju pertumbuhan ini mencerminkan strategi hidup yang berbeda: karang masif menginvestasikan energi pada kerangka yang padat dan tahan lama, sedangkan karang bercabang tumbuh cepat untuk mendominasi ruang, meskipun lebih rentan terhadap kerusakan fisik.

Pertumbuhan karang dilihat dari perspektif ekobiologi bukan sekadar penambahan massa, melainkan proses kalsifikasi yang sangat kompleks dan dinamis, dipengaruhi oleh kontrol internal (genetik dan simbiosis *zooxanthellae*) serta kontrol eksternal (suhu, cahaya, dan kimia air). Pertumbuhan karang menunjukkan bahwa kecepatan dan jumlah CaCO_3 yang didepositkan bervariasi dari waktu ke waktu, sejalan dengan perubahan musim, siklus bulan, dan siklus matahari. Variasi ini

meninggalkan jejak berupa perbedaan densitas pengendapan pada kerangka karang, mirip dengan lingkaran tahun pada pohon, yang memungkinkan untuk merekonstruksi kondisi lingkungan masa lalu melalui analisis kerangka karang. Dengan demikian, pertumbuhan karang tidak hanya menjadi indikator kesehatan individu, tetapi juga arsip iklim yang berharga.

Reproduksi karang berlangsung melalui dua mekanisme utama, yaitu aseksual dan seksual, yang keduanya memiliki peran berbeda dalam mempertahankan dan memperluas populasi karang. Reproduksi aseksual terjadi melalui pertunasan (*budding*) dan fragmentasi. Pertunasan intratentakular (di dalam polip induk) dan ekstrapentakular (di luar polip induk) menghasilkan koloni yang terus bertambah besar tanpa terpisah dari induknya. Fragmentasi, yaitu patahnya bagian koloni yang kemudian tumbuh menjadi koloni baru, merupakan strategi dominan pada karang bercabang seperti *Acropora* dan efektif untuk pemulihan cepat setelah gangguan fisik. Reproduksi aseksual memungkinkan karang memperluas koloni dan mempertahankan populasi yang sudah ada secara efisien, namun tidak menghasilkan variasi genetik baru.



Gambar 12. Reproduksi Karang

Reproduksi seksual karang melibatkan produksi *gamet* (sperma dan telur) dan pembentukan larva planula yang berenang bebas, sebuah proses yang sangat dipengaruhi oleh isyarat lingkungan. Sekitar tiga perempat karang batu bersifat hermafrodit, dan sebagian besar merupakan *broadcast spawners* yang melepaskan gamet dalam jumlah besar ke kolom air untuk pembuahan eksternal. Peristiwa pemijahan massal (*mass spawning*) terjadi secara sinkron pada banyak spesies, dipicu oleh kombinasi isyarat suhu, panjang hari, dan fase bulan. Setelah pembuahan, *zigot* berkembang menjadi planula yang berenang ke permukaan, terbawa arus, dan setelah beberapa hari hingga minggu mencari substrat yang sesuai untuk menempel dan bermetamorfosis menjadi polip baru. Strategi reproduksi seksual ini penting untuk

penyebaran spesies ke habitat baru dan menjaga keragaman genetik populasi.

Rekrutmen karang adalah proses kritis yang menghubungkan reproduksi dengan pemulihan ekosistem, didefinisikan sebagai penambahan individu baru (juvenil berukuran kurang dari 5 cm) ke dalam populasi karang dewasa. Keberhasilan rekrutmen bergantung pada ketersediaan larva, ketersediaan substrat yang stabil untuk penempelan, dan kelangsungan hidup juvenil setelah menetap. Sebagai contoh di Indonesia tingkat rekrutmen karang sangat bervariasi secara spasial dan temporal. Di Kawasan Konservasi Pulau Pieh, rata-rata rekrutmen di zona inti tergolong sangat rendah (1,84 ind/m²), sementara zona pemanfaatan terbatas mencapai kategori rendah (2,83 ind/m²), dengan genus dominan *Pocillopora* dan *Porites*. Di Gili Air, densitas rekrutmen juga tergolong sangat rendah, yaitu 1,22 ind/m² pada area alami dan 1,18 ind/m² pada area restorasi, yang diduga akibat kurangnya substrat stabil.

Pemahaman tentang pertumbuhan, reproduksi, dan rekrutmen karang memiliki implikasi langsung bagi strategi konservasi dan restorasi terumbu karang di Indonesia. Laju pertumbuhan yang lambat pada banyak spesies karang berarti bahwa pemulihan alami setelah kerusakan parah dapat memakan waktu puluhan tahun, sehingga intervensi aktif sering diperlukan. Keberhasilan rekrutmen yang rendah di banyak lokasi menegaskan perlunya strategi restorasi yang tidak hanya berfokus pada transplantasi karang dewasa, tetapi juga pada

penyediaan substrat yang stabil dan pengendalian faktor yang menghambat penempelan larva, seperti sedimentasi dan pertumbuhan alga. Selain itu, pemahaman tentang pola pemijahan massal dan siklus reproduksi karang dapat menginformasikan penetapan kawasan perlindungan yang mencakup sumber larva (*recruitment hotspots*) dan jalur konektivitas antar populasi, sehingga upaya konservasi dapat diarahkan pada lokasi-lokasi yang paling strategis untuk mendukung pemulihan ekosistem terumbu karang secara berkelanjutan.

Keanekaragaman Ikan Karang dan Biota Asosiasi

Terumbu karang Indonesia menampung lebih dari 2.000 spesies ikan, menjadikannya sebagai salah satu pusat keanekaragaman ikan karang tertinggi di dunia. Keanekaragaman ini mencakup spektrum trofik yang luas, mulai dari ikan herbivora yang berperan krusial dalam mengendalikan pertumbuhan alga, ikan karnivora yang menduduki posisi predator, hingga ikan koralivora yang memangsa polip karang. Famili-famili dominan seperti *Pomacentridae* (ikan damselfish) dan *Balistidae* (ikan triggerfish) sering mendominasi komunitas ikan karang, sementara famili *Caesionidae* (ikan fusilier) juga umum ditemukan dalam jumlah besar. Keberadaan ikan-ikan ini tidak hanya memperkaya biodiversitas, tetapi juga menjadi indikator kesehatan ekosistem terumbu karang secara keseluruhan.

Distribusi keanekaragaman ikan karang Indonesia menunjukkan pola spasial yang khas, dengan wilayah Indonesia bagian timur, terutama yang dipengaruhi

Samudra Pasifik, memiliki kekayaan dan kelimpahan tertinggi untuk semua tingkat trofik. Raja Ampat, sebagai jantung Segitiga Karang Dunia, mencatat lebih dari 1.600 spesies ikan karang, angka tertinggi yang pernah tercatat. Wakatobi dan Biak juga teridentifikasi sebagai "titik panas" keanekaragaman ikan karang, di mana Wakatobi unggul dalam keanekaragaman ikan karnivora, sementara Biak unggul dalam ikan herbivora. Sebaliknya, wilayah Indonesia bagian barat seperti Karimunjawa juga memiliki keanekaragaman yang signifikan, dengan catatan 147 spesies ikan dari 31 famili melalui metode eDNA. Pola distribusi ini mencerminkan pengaruh kompleks dari sejarah geologis, kondisi oseanografis, dan konektivitas larva antar wilayah.

Selain ikan, terumbu karang Indonesia menampung keanekaragaman biota asosiasi yang luar biasa, mencakup invertebrata yang menjalin hubungan simbiotik dengan karang sebagai inangnya. Kepiting dari genus *Trapezia* dan udang snapping *Alpheus lottini* merupakan contoh *exosymbiont* obligat yang hidup pada karang *Pocillopora* dan memberikan layanan ekologis penting bagi inangnya, seperti membersihkan sedimen dan menghalau predator koralivora. Uji coba molekuler mengungkapkan bahwa biota asosiasi ini memiliki keragaman kriptik yang kompleks, di mana apa yang dianggap satu spesies ternyata terdiri dari beberapa *lineage* yang berbeda secara genetik. Hubungan simbiotik ini tidak hanya penting bagi kelangsungan hidup karang inang, tetapi juga

berkontribusi pada stabilitas dan resiliensi ekosistem terumbu karang secara keseluruhan.

Keanekaragaman biota asosiasi juga mencakup kelompok invertebrata lain yang berperan sebagai bioindikator kesehatan ekosistem, seperti *nudibranch* (kelompok moluska tanpa cangkang). Misal di Kawasan Konservasi Perairan Selat Dampier, Raja Ampat, distribusi *nudibranch* sangat dipengaruhi oleh struktur mikrohabitat dan parameter lingkungan seperti tutupan substrat, kejernihan air, dan kompleksitas bentik. Sebagian besar asosiasi antarspesies *nudibranch* tergolong lemah, mengindikasikan spesialisasi habitat yang tinggi dan sensitivitas terhadap perubahan lingkungan. Namun, asosiasi kuat antara *Nembrotha kubaryana* dan *Phyllidiella pustulosa* dapat diinterpretasikan sebagai indikator stabilitas ekosistem lokal. Pendekatan berbasis mikrohabitat sangat penting dalam perencanaan zonasi konservasi dan pemanfaatan biota asosiasi sebagai bioindikator dalam sistem pemantauan ekosistem terumbu karang.

Ancaman Alami dan Antropogenik terhadap Terumbu Karang

Terumbu karang Indonesia menghadapi ancaman ganda yang saling memperkuat, yaitu gangguan alami yang dipicu oleh fenomena iklim, dan tekanan antropogenik yang bersumber dari aktivitas manusia di darat maupun di laut. Ancaman alami terhadap terumbu karang Indonesia didominasi oleh stres termal, baik panas maupun dingin yang ekstrem, yang berhubungan dengan

fenomena El Niño dan Dipol Samudra Hindia. Ketika karang terpapar akumulasi panas yang berkepanjangan melebihi suhu musim panas rata-rata sebesar 1°C atau lebih, *zooxanthellae* simbiotik dikeluarkan dari sel karang dalam proses yang dikenal sebagai pemutihan (*bleaching*), yang mengurangi perolehan energi dan pada akhirnya menyebabkan kematian karang. Peristiwa El Niño menjadi pendorong utama anomali suhu permukaan laut yang memicu pemutihan massal yang tercatat terjadi pada 1983-1984, 1997-1998, 2010, dan 2016. Namun, stres dingin juga merupakan ancaman yang belum banyak dimonitor: peristiwa Dipol Samudra Hindia positif (pIOD) menyebabkan pendinginan kuat akibat upwelling di lepas pantai Jawa dan Sumatra, dan paparan air dingin yang anomali juga dapat menyebabkan pemutihan serta kematian karang. Selain stres suhu, gangguan alami lain seperti siklon, letusan gunung berapi, gempa bumi, tsunami, dan predator juga berkontribusi terhadap kerusakan terumbu karang di Indonesia.

Tekanan antropogenik menjadi ancaman yang lebih langsung dan luas, dengan lebih dari 85% terumbu karang Indonesia terancam oleh tekanan lokal yang diperparah oleh dampak perubahan iklim. Penangkapan ikan destruktif menggunakan bom dan sianida merupakan praktik yang paling merusak, menghancurkan struktur terumbu dan memusnahkan kehidupan laut. Uji coba pemantauan suara di Kepulauan Spermonde mencatat lebih dari 3.500 ledakan dalam 483 hari, atau sekitar 23 ledakan per hari, yang menghancurkan terumbu karang

dan memusnahkan kehidupan laut. Praktik ini tidak hanya terjadi di Spermonde tetapi juga di berbagai wilayah seperti Pulau Aceh, di mana KKP mengamankan kapal-kapal pelaku bom ikan dengan barang bukti kompresor dan bahan peledak. Di Seraya Marannu, Labuan Bajo, praktik bom ikan dan potasium yang meluas hingga tahun 2000-an menyebabkan kerusakan terumbu karang yang hingga kini baru pulih sekitar 20–30% di beberapa lokasi.

Pencemaran, sedimentasi, dan pembangunan pesisir merupakan tekanan antropogenik yang bekerja secara sinergis dengan stres termal, memperburuk kerentanan terumbu karang. Limbah yang mengandung senyawa fosfat dan nitrogen meningkatkan kesuburan tanaman air, yang jika tumbuh berlebihan akan menghambat pertumbuhan karang. Sampah yang menutupi terumbu menghalangi fotosintesis dan dapat dimakan oleh ikan, seperti yang terjadi di Kepulauan Seribu. Sedimentasi akibat perubahan penggunaan lahan, berupa konversi hutan dan semak menjadi lahan pertanian, permukiman, dan tambak telah menurunkan persentase tutupan karang hidup hingga di bawah 24,9% di Pantai Pasir Putih, Trenggalek. Di Selat Lembeh, Sulawesi Utara, kekeruhan air yang tinggi akibat debit sungai, pengelolaan lahan yang buruk, pembangunan pelabuhan, dan permukiman menjadi penyebab utama penurunan terumbu karang. Aktivitas wisatawan yang tidak ramah lingkungan, antara lain menginjak karang, membuang jangkar, memberi makan ikan juga mengganggu ekosistem terumbu karang.

Ancaman alami dan antropogenik tidak bekerja secara terpisah, melainkan berinteraksi secara sinergis yang dapat mengganggu resiliensi ekosistem terumbu karang secara keseluruhan. Efek sinergis antara berbagai gangguan antropogenik dan alami menjadi isu penting, yaitu terumbu yang telah tertekan oleh pencemaran atau penangkapan ikan berlebihan memiliki kapasitas pemulihan yang lebih rendah ketika menghadapi stres termal. Selama dua dekade terhadap 394 situs pemantauan menunjukkan bahwa tutupan karang relatif stabil di sebagian besar lokasi (26 dari 32 lokasi), namun stabilitas ini memiliki batas kritis dikarenakan tutupan karang turun tajam ketika akumulasi stres termal melampaui ambang batas. Pemutihan massal pasca-ENSO 2024 di Raja Ampat lebih dari 70% koloni *Pachyseris speciosa* mengalami pemutihan parah, meskipun pemulihan cepat teramati dalam satu tahun, mengindikasikan bahwa beberapa wilayah seperti Raja Ampat memiliki potensi resiliensi yang perlu dilindungi melalui strategi konservasi yang ditargetkan. Dengan demikian, pemahaman tentang interaksi kompleks antara ancaman alami dan antropogenik menjadi fondasi krusial bagi perumusan strategi konservasi terumbu karang yang efektif dan berkelanjutan di Indonesia.

➤ Ekobiologi Ekosistem Estuaria dan Pantai Berpasir



Gambar 13. Estuaria dan Pantai Berpasir

Karakteristik dan Dinamika Fisika-Kimia Estuaria

Estuaria dan pantai berpasir merupakan dua sistem pesisir yang sangat dinamis, di mana proses fisik, kimia, dan biologis berinteraksi secara intensif untuk menciptakan lingkungan unik yang mendukung kehidupan laut. Estuaria adalah badan air pesisir semi-tertutup yang memiliki hubungan bebas dengan laut terbuka, dan di dalamnya air laut tercampur secara terukur dengan air tawar yang berasal dari daratan. Menurut definisi Pritchard, estuaria merupakan zona transisi di mana proses fisika, kimia, dan biologis berlangsung dengan intensitas tinggi. Estuaria memiliki salinitas yang berkisar dari nilai sangat rendah khas

sungai hingga nilai tinggi yang ditemukan di laut terbuka. Interaksi antara debit sungai dan dinamika pasang surut membentuk properti biogeokimia lingkungan estuaria-pesisir, di mana sirkulasi air mengangkut organisme, nutrisi, oksigen, serta sedimen. Estuaria umumnya relatif dangkal (< 100 m), memungkinkan interaksi kuat antara dasar perairan dan kolom air di atasnya (*benthic-pelagic coupling*), serta efek pasang surut yang kuat.

Karakteristik fisika-kimia estuaria sangat dipengaruhi oleh pola sirkulasi air yang bergantung pada keseimbangan antara aliran sungai dan arus pasang surut. Ketika air tawar dan air laut bertemu, keduanya tidak selalu tercampur dengan mudah karena air tawar yang kurang padat cenderung mengapung di atas air laut yang lebih berat. Derajat pencampuran bergantung pada arah dan kecepatan angin, kisaran pasang surut, bentuk estuaria, serta volume dan laju aliran sungai. Para ilmuwan mengklasifikasikan estuaria berdasarkan sirkulasi air menjadi lima tipe utama: *salt-wedge* (stratifikasi paling kuat), *fjord*, *slightly stratified*, *vertically mixed* (tercampur sempurna), dan *freshwater*. Di estuaria *partially mixed* yang umum ditemukan, air yang lebih tawar dari sungai berada di atas air yang lebih asin dan padat dari laut, dengan gradien salinitas baik sepanjang estuaria maupun secara vertikal.

Variasi musiman di wilayah tropis, khususnya di Indonesia, memberikan pengaruh signifikan terhadap dinamika parameter fisika-kimia estuaria. Misal di Estuaria Jeneberang parameter suhu, salinitas, pH, total

padatan tersuspensi (TSS), dan kandungan karbon organik terlarut mengalami variasi musiman yang signifikan, sedangkan oksigen terlarut (DO) cenderung konstan sepanjang musim. Pada Musim Barat, salinitas dan TSS memiliki hubungan paling kuat dengan parameter lainnya karena besarnya masukan air tawar dari sungai dan curah hujan langsung yang membawa konsentrasi partikel tersuspensi tinggi akibat erosi lahan atas. Pada Musim Timur, gerak massa air di sekitar estuaria melemah sehingga konsentrasi oksigen terlarut menjadi lebih rendah dan mempengaruhi dinamika parameter lainnya. Di muara Sungai Jajar, oksigen terlarut relatif rendah (3,66–4,51 mg/L) mengindikasikan konsumsi oksigen akibat dekomposisi bahan organik dan nitrifikasi, sementara nitrat berkorelasi negatif kuat dengan salinitas ($r = -0,729$) dan pH ($r = -0,761$), menegaskan dominasi pengaruh air tawar di zona muara.

Proses biogeokimia di estuaria melibatkan serangkaian reaksi terminal yang kompleks dalam sedimen, terutama ketika oksigen terdepleksi akibat dekomposisi bahan organik. Di sedimen dataran lumpur dan mangrove, lapisan bagian atas (lapisan oksik) teroksigenasi dengan baik oleh bioturbasi hewan penggali, sehingga mikroorganisme menggunakan respirasi aerobik untuk mengoksidasi bahan organik. Ketika oksigen habis, organisme beralih ke serangkaian jalur anaerobik dengan akseptor elektron terminal alternatif: nitrat direduksi menjadi nitrogen (denitrifikasi), kemudian besi ferri (Fe^{3+}) dan mangan (Mn^{4+}) direduksi

dan larut, dan akhirnya sulfat direduksi menjadi sulfida yang bereaksi dengan besi ferro membentuk besi sulfida dan pirit. Proses diagenesis ini memiliki implikasi penting untuk siklus logam jejak; dalam lingkungan rendah oksigen, proses metabolik anaerobik dapat menginduksi disolusi fase oksihidroksida Fe dan Mn yang melepaskan logam jejak ke air pori, membuat logam tersebut tersedia untuk transpor atau inkorporasi organisme.

Pantai berpasir merupakan sistem yang secara fisik dikendalikan oleh energi gelombang dan pasang surut, dengan sedimen sebagai substrat yang bergerak dan tidak stabil. Berbeda dengan pantai berbatu yang menyediakan substrat padat dan tidak bergerak bagi organisme untuk menempel dan bertahan hidup, pantai berpasir kurang aktif secara biologis karena tidak adanya tempat berlindung yang permanen. Pantai berpasir bergantung pada subsidi alokton dari ekosistem yang berdekatan, seperti estuaria yang menyediakan masukan nutrisi anorganik dan bahan organik partikulat. Teori ekologi pantai berpasir menyatakan bahwa fitur fisik pantai mengontrol struktur komunitas makrobentik pada sebagian besar pantai, namun komunitas makroinfauna tidak semata-mata dikendalikan oleh faktor fisik, melainkan oleh kombinasi kompleks dan dinamis dari variabel nutrisi, kimia, dan fisik.

Interaksi antara estuaria dan pantai berpasir yang berdekatan menciptakan gradien kimia dan nutrisi yang memengaruhi struktur komunitas biota. Pembahasan di Pantai Mtunzini, Afrika Selatan, masukan estuaria

musiman menciptakan gradien salinitas, konsentrasi nutrien anorganik terlarut, dan konsentrasi pigmen fotosintetik yang bervariasi secara spasial dan temporal. Komunitas makroinfauna di pantai tersebut tidak distrukturkan terutama oleh faktor fisik, tetapi oleh campuran dinamis dari rasio C:N bahan organik partikulat, konsentrasi nutrien anorganik terlarut, salinitas, dan lebar pantai. Pantai berpasir yang terbuka terhadap laut harus diakui sebagai ekosistem fungsional tersendiri yang dinamikanya tidak dapat dipahami secara terpisah dari sistem pesisir di sekitarnya. Dengan demikian, pemahaman terpadu tentang karakteristik dan dinamika fisika-kimia estuaria dan pantai berpasir menjadi fondasi penting bagi pengelolaan ekosistem pesisir yang holistik dan berkelanjutan.

Adaptasi Biota Estuaria dan Pantai Berpasir

Adaptasi merupakan strategi inti bagi biota estuaria dan pantai berpasir untuk bertahan hidup, di mana mereka mengembangkan spesialisasi fisiologis, morfologis, dan perilaku guna menghadapi kondisi lingkungan yang ekstrem seperti fluktuasi salinitas, kekurangan oksigen, gelombang kuat, dan substrat yang tidak stabil. Tantangan utama yang dihadapi biota estuaria adalah fluktuasi salinitas yang tajam, yang mereka atasi terutama melalui osmoregulasi dan penghindaran perilaku. Lingkungan estuaria memiliki fluktuasi salinitas yang besar, sehingga jumlah spesies yang menghuninya jauh lebih sedikit dibandingkan perairan tawar atau laut murni, namun biomassa totalnya tinggi. Kedalaman

penetrasi dan durasi tinggal ikan serta krustasea laut di estuaria terutama ditentukan oleh toleransi salinitasnya. Konsentrasi kortisol yang merupakan indikator stress pada ikan estuaria sekitar empat kali lebih tinggi dibandingkan ikan perairan pantai, yang disebabkan oleh fluktuasi harian suhu dan salinitas di habitat estuaria yang jauh lebih besar dibandingkan wilayah pesisir. Pada tingkat fisiologi respirasi, spesies estuaria memiliki toleransi yang lebih tinggi terhadap perubahan salinitas dan hipoksia dibandingkan spesies laut murni atau air tawar; misalnya, *Palaemon varians* menunjukkan independensi oksigen yang tinggi di perairan payau dan tidak terpengaruh oleh suhu. Spesies estuaria yang berhasil bertahan hidup mempertahankan kebugaran tinggi melalui adaptasi perilaku, kompensasi, dan resistensi, serta dinamika riwayat hidup pada tingkat populasi, dengan laju pertumbuhan tinggi yang didukung oleh ketersediaan nutrisi dan makanan yang melimpah.

Hipoksia dan rendahnya oksigen terlarut merupakan tekanan fisiologis utama lainnya bagi biota estuaria, yang mereka atasi melalui regulasi respirasi yang efisien dan pemilihan perilaku. Pada estuaria yang tercampur baik, distribusi spasial dan temporal organisme akuatik sebagian besar dapat dijelaskan oleh gradien salinitas. Dalam kondisi hipoksia, spesies yang mampu mempertahankan independensi laju metabolisme saat oksigen terlarut menurun memiliki keunggulan kompetitif. Adaptasi perilaku juga krusial: penghuni permanen zona intertidal seperti ikan gobi memanfaatkan

genangan air yang terbentuk di lubang bekas ikan pari untuk bertahan saat surut, sementara beberapa spesies ikan menerapkan strategi migrasi pasang surut dengan masuk ke zona intertidal saat pasang untuk mencari makan dan kembali ke area yang selalu terendam saat surut. Selain itu, banyak invertebrata bentik memiliki kemampuan bergerak yang terbatas sehingga lebih sulit menghindari kondisi berbahaya dibandingkan spesies yang mobile; oleh karena itu, struktur komunitasnya mampu mengintegrasikan dan mencerminkan gangguan pada skala waktu yang lebih panjang.

Biota pantai berpasir menghadapi tekanan utama berupa ketidakstabilan substrat dan aksi gelombang yang kuat, sehingga kemampuan menggali dan mobilitas cepat menjadi adaptasi morfologis dan perilaku yang paling mendasar. Banyak ciri adaptif yang membedakan fauna pantai berpasir dari fauna habitat laut lainnya bersumber dari ketidakstabilan substrat yang disertai aksi gelombang kuat; perilaku menggali di pantai berenergi tinggi harus dilakukan dengan cepat dan kuat, jika tidak hewan akan tersapu gelombang. Mobilitas tinggi dan kemampuan menghadapi iklim surf yang keras sangat penting, yang selanjutnya menuntut kemampuan mempertahankan posisi di pantai serta memperoleh kembali posisi tersebut setelah hilang; respons seperti rheotaksis dan pembenaman pada titik yang tepat dalam siklus pasang surut membantu mempertahankan posisi. Krustasea seperti kepiting hantu (*Ocypode*) memiliki kemampuan menggali yang kuat, dengan liang yang menyediakan penyangga

termal, sementara beberapa isopoda dan amphipoda mampu merasakan datangnya badai dan bergerak secara massal menuju laut, menempel pada struktur buatan hingga badai berlalu. Pada pantai reflektif (pasir kasar, lereng curam, gelombang kuat), krustasea merupakan biota yang paling umum karena lebih mampu menahan hempasan gelombang, memiliki mobilitas lebih tinggi, dan kemampuan menggali yang lebih baik.

Adaptasi makan biota pantai berpasir mencerminkan heterogenitas spasial dan temporal sumber makanan, dengan berbagai strategi dari filter feeding hingga pemilahan sedimen yang sesuai dengan mikrohabitat masing-masing. Kerang *Donax variabilis* merasakan suara gelombang untuk memprediksi datangnya surf besar, aktif melompat keluar dari pasir untuk menumpang gelombang terbesar bermigrasi ke arah pantai, perilaku yang dikendalikan oleh ritme pasang surut endogen. Antena *Emerita* terspesialisasi untuk menyaring dan menangkap detritus dari gelombang surut. Kepiting hantu adalah pemakan bangkai dan predator oportunistik yang hampir dapat memakan apa pun yang tertinggal di pantai, termasuk ubur-ubur. Kepiting *Dotilla* memiliki alat mulut yang sangat terspesialisasi untuk pemilahan sedimen, sangat efisien dalam mengekstrak bahan organik dari pasir yang miskin organik, aktif pada siang hari saat surut dan membenamkan diri pada malam hari. Pantai berpasir juga memiliki kekayaan fauna serangga, seperti lalat rumput laut (*Coelopidae*) yang bergantung pada serasah alga

sebagai makanan dan habitat, dengan permukaan tubuh yang hidrofobik memungkinkan mereka merayap di antara alga yang rapat tanpa terperangkap.

Ritme pasang surut merupakan sinyal lingkungan kunci yang mengatur perilaku biota pantai berpasir, dan banyak spesies mengembangkan jam biologis endogen untuk memprediksi bukan sekadar merespons perubahan pasang surut. Eksperimen siput surf *Olivella semistriata* dalam kondisi gelombang konstan tanpa petunjuk pasang surut, hampir seluruhnya bermigrasi ke arah pantai saat surut dan menunjukkan migrasi ke atas yang jelas saat pasang, mengindikasikan keberadaan jam sirkatidal endogen. *Donax variabilis* menunjukkan periode stasioner di sekitar surut, yang merupakan penyebab langsung penghentian migrasi secara sistematis di sekitar surut. Ritme endogen ini, dikombinasikan dengan respons terhadap petunjuk lingkungan seperti suara gelombang, memungkinkan biota pantai berpasir mengatur perilaku migrasi pasang surutnya secara presisi, mengoptimalkan kelangsungan hidup dan efisiensi migrasi di lingkungan surf yang sangat dinamis.

Ekosistem Pantai Berpasir dan Formasi Vegetasinya

Ekosistem pantai berpasir merupakan sistem pesisir yang secara fisik didominasi oleh substrat pasir dan berada di atas garis pasang tertinggi, dengan vegetasi yang khas dan teradaptasi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Pantai berpasir memiliki produktivitas relatif rendah karena ketidakstabilan substrat dan minimnya bahan organik, namun tetap menjadi habitat penting bagi

vegetasi pantai yang mampu bertahan pada suhu tinggi, angin kencang, dan tanah miskin hara. Hutan pantai berpasir atau vegetasi pantai berpasir didefinisikan sebagai tutupan vegetasi yang tumbuh dan berkembang di pantai berpasir di atas garis pasang tertinggi di wilayah tropika, tidak terpengaruh iklim, tumbuh pada tanah kering (berpasir), dan tidak terpengaruh pasang surut air laut.

Vegetasi pantai berpasir Indonesia tersusun dalam dua formasi utama yang khas, yaitu Formasi *Pes-caprae* dan Formasi *Barringtonia*, yang mencerminkan proses suksesi dari garis pantai ke arah daratan. Formasi *Pes-caprae* merupakan formasi vegetasi perintis yang didominasi oleh tumbuhan menjalar dan rumput-rumputan, dengan *Ipomoea pes-caprae* (katang-katang) sebagai jenis yang paling mencolok. Formasi ini berada pada daerah pasang tertinggi dan pada semua pantai terbuka di daerah tropika, sering ditumbuhi kelompok spesies perintis yang terpisah-pisah dengan kerapatan agak rendah. Adapun Formasi *Barringtonia* merupakan formasi setelah *Pes-caprae* yang didominasi oleh pohon dan semak berukuran lebih besar, terletak lebih jauh dari garis pantai, dengan *Barringtonia asiatica* sebagai jenis penciri.

Formasi *Pes-caprae* dicirikan oleh vegetasi menjalar yang memiliki adaptasi morfologis khusus untuk bertahan di lingkungan pantai berpasir yang ekstrem. *Ipomoea pes-caprae* memiliki daun tebal menyerupai kaki kambing, batang menjalar yang dapat mencapai panjang

30 m, dan akar yang mampu menembus tanah hingga satu meter untuk mencapai air tanah. Tumbuhan ini mampu beradaptasi terhadap kadar garam tinggi, tiupan angin kencang, kekeringan, serta tanah miskin nutrien, dan berperan sebagai stabilisator pasir serta pelopor suksesi vegetasi. Selain *Ipomoea pes-caprae*, jenis lain yang umum dijumpai pada formasi ini meliputi *Canavalia maritima* (kekara laut), *Vigna marina* (kacang laut), *Spinifex littoreus* (rumput angin), *Thuarea involuta* (grinting segara), serta berbagai jenis teki seperti *Cyperus pedunculatus* dan *Fimbristylis sericea*. Pada kebanyakan pantai di Indonesia, tegakan cemara laut (*Casuarina equisetifolia*) dan pohon kelapa (*Cocos nucifera*) sering berasosiasi dengan formasi ini.

Formasi *Barringtonia* terdiri dari pohon-pohon dan semak yang lebih tinggi, dengan komposisi floristik yang relatif seragam di seluruh kawasan Malesia dan memiliki mekanisme penyebaran biji yang khas melalui air laut (hidrokori). Jenis-jenis pohon yang mendominasi formasi ini meliputi *Barringtonia asiatica* (butun/keben), *Calophyllum inophyllum* (nyamplung), *Terminalia catappa* (ketapang), *Hibiscus tiliaceus* (waru), *Thespesia populnea* (waru laut), *Sterculia foetida* (kepuh), *Heritiera littoralis* (dungun), dan *Pongamia pinnata* (malapari). Buah dari pepohonan pada formasi ini memiliki kemampuan untuk tetap mengapung di atas air selama berminggu-minggu atau berbulan-bulan tanpa mengalami kerusakan, sehingga mudah terbawa oleh arus laut dan menyebar ke berbagai wilayah pesisir. Selain pohon, formasi ini juga

didiami oleh semak-semak seperti *Crinum asiaticum* (bakung laut), *Scaevola taccada* (gagabusan), *Pandanus tectorius* (pandan duri), dan *Sophora tomentosa* (tarum laut). Lebar formasi *Barringtonia* ke arah daratan dapat mencapai 25–50 m sebelum berbatasan dengan tipe ekosistem hutan lainnya.

Peran Estuaria sebagai Zona Penyangga (*Buffer Zone*)

Wilayah estuari yang merupakan wilayah peralihan antara perairan tawar dan laut, salinitas merupakan salah satu parameter yang sangat berfluktuasi. Adanya pengaruh dua perairan tersebut juga turut mempengaruhi masukan bahan organik, nutrient serta kondisi hidrodinamika. Sementara itu, wilayah pesisir memiliki kondisi substrat yang sangat dipengaruhi energi gelombang di garis pantai tersebut. Perbedaan karakteristik tersebut berdampak pada ketersediaan habitat, distribusi serta adaptasi bagi organisme yang hidup didalamnya.

Estuaria berfungsi sebagai zona penyangga (*buffer zone*) yang melindungi garis pantai, komunitas pesisir, dan ekosistem laut dari dampak banjir, badai, serta polutan yang berasal dari daratan. Vegetasi estuaria, seperti mangrove dan rawa asin, bertindak sebagai filter raksasa yang menyerap kelebihan sedimen, nutrien, herbisida, pestisida, dan logam berat dari air yang mengalir melaluinya sebelum mencapai laut terbuka. Ketika air sungai melambat saat memasuki estuaria, partikel tersuspensi dan bahan pencemar mengendap, sehingga air yang keluar ke laut menjadi lebih jernih dan

bersih. Kemampuan filtrasi ini tidak hanya melindungi ekosistem terumbu karang dan padang lamun dari sedimentasi berlebih, tetapi juga mencegah eutrofikasi di perairan pesisir.

Sebagai penyangga fisik, estuaria meredam energi gelombang dan arus, sehingga melindungi daratan dari erosi serta mengurangi dampak banjir dan gelombang badai. Akar dan *rhizoma* vegetasi estuaria mengikat sedimen, menstabilkan garis pantai, dan mengurangi laju aliran air. Ketika banjir terjadi, estuaria berfungsi seperti spons raksasa yang menyerap kelebihan air, sehingga mengurangi volume air yang mencapai kawasan hilir. Hutan mangrove di sekitar muara juga berperan sebagai pemecah gelombang alami yang dapat meredam tinggi dan kecepatan gelombang badai, memberikan perlindungan yang lebih murah dan berkelanjutan dibandingkan infrastruktur keras seperti tembok beton.

Peran estuaria sebagai zona penyangga juga mencakup fungsi biogeokimia dalam mengatur siklus nutrisi dan menjaga kualitas air. Sedimen estuaria bertindak sebagai reservoir fosfor yang dapat menyerap atau melepaskan nutrisi tergantung pada konsentrasi di kolom air, sehingga menjaga keseimbangan nutrisi di perairan pesisir. Proses denitrifikasi mikroba di sedimen estuaria mengubah nitrat menjadi gas nitrogen yang dilepaskan ke atmosfer, sehingga mengurangi beban nitrogen yang mencapai laut. Dengan demikian, estuaria berperan sebagai sistem penyangga alami yang tidak

hanya melindungi dari dampak fisik, tetapi juga menjaga kesehatan ekosistem pesisir secara keseluruhan.

Produktivitas Hayati Estuaria bagi Perikanan

Estuaria memiliki produktivitas hayati yang luar biasa tinggi, setara dengan hutan hujan tropis dan terumbu karang, sehingga menjadikannya salah satu ekosistem perairan paling produktif di dunia dan penopang utama sektor perikanan. Produktivitas ini lebih tinggi dibandingkan perairan laut terbuka maupun perairan tawar, didorong oleh mekanisme pengebakan zat hara yang intensif, siklus nutrien yang cepat, serta produksi detritus yang melimpah dari serasah mangrove dan makrofiton akuatik. Proses fotosintesis di daerah tropis berlangsung sepanjang tahun karena keragaman tumbuhan yang terdiri dari makrofiton dasar, lamun, dan fitoplankton, menjamin ketersediaan makanan yang kontinu bagi hewan akuatik pemakan detritus.

Peran ekologis estuaria sebagai daerah asuhan (*nursery ground*) dan daerah pemijahan (*spawning ground*) merupakan kontribusi paling signifikan bagi perikanan, karena banyak spesies ikan dan udang komersial bergantung pada estuaria pada fase-fase kritis awal kehidupannya. Ikan-ikan pelagis kecil bermigrasi dari perairan tawar ke laut atau sebaliknya, menjadikan estuaria sebagai tempat mencari makan, tempat asuhan dan pembesaran, serta tempat berkembang biak. Estuari Segara Anakan, misalnya, tercatat sebagai habitat bagi 87 spesies ikan dari 45 famili, dengan keberadaan juvenil sebagai komposisi terbesar yang menegaskan peran

ekologisnya sebagai daerah pemijahan dan pembesaran. Spesies seperti udang niaga memijah di laut lepas, namun membesarkan larvanya di estuaria dengan memanfaatkan produktivitas hayati yang tinggi sebagai sumber makanan.

Kontribusi produktivitas estuaria terhadap perikanan tercermin dalam nilai ekonomi dan ketergantungan nelayan, di mana muara sungai menjadi tumpuan hidup masyarakat pesisir, terutama saat musim paceklik atau gelombang besar menghalangi aktivitas melaut. Di Kabupaten Kulon Progo, muara Sungai Progo, Serang, dan Bogowonto menjadi pilihan nelayan untuk mencari ikan ketika tidak melaut, menghasilkan berbagai macam ikan, kepiting, dan udang dengan berbagai ukuran. Di Queensland, Australia, indeks konektivitas mangrove, rawa asin, dan saluran air menjelaskan 30–70% variasi hasil tangkapan per unit usaha (CPUE) untuk berbagai kelompok spesies, menegaskan bahwa konektivitas lahan basah pasang surut merupakan prediktor penting bagi produksi perikanan pesisir. Dengan demikian, perlindungan dan pengelolaan estuaria bukan hanya kepentingan ekologis, tetapi juga strategi ekonomi untuk menjaga ketahanan pangan dan mata pencaharian masyarakat pesisir.

➤ Metode Penilaian Ekosistem dan Analisis Struktur Komunitas Ekobiologi Pesisir

Metode Penilaian Ekosistem Mangrove

Analisis struktur komunitas mangrove merupakan fondasi kuantitatif untuk menilai kondisi, kesehatan, dan dinamika ekosistem mangrove. Pendekatan ini mencakup serangkaian prosedur lapangan dan analisis data yang memungkinkan untuk mengukur komposisi spesies, distribusi spasial, dominansi, dan keanekaragaman hayati dalam suatu kawasan mangrove. Metodologi yang baku dan konsisten sangat penting untuk memastikan data yang dihasilkan dapat dibandingkan antar lokasi dan antar waktu, serta menjadi dasar yang valid bagi keputusan pengelolaan dan konservasi. Struktur komunitas mangrove dianalisis melalui beberapa parameter utama, yaitu kerapatan jenis, frekuensi jenis, dominasi jenis, dan Indeks Nilai Penting (INP).

A. Identifikasi Titik Stasiun Potensial

Stasiun pengamatan ditentukan pada survei awal (T_0) dengan langkah-langkah sebagai berikut:

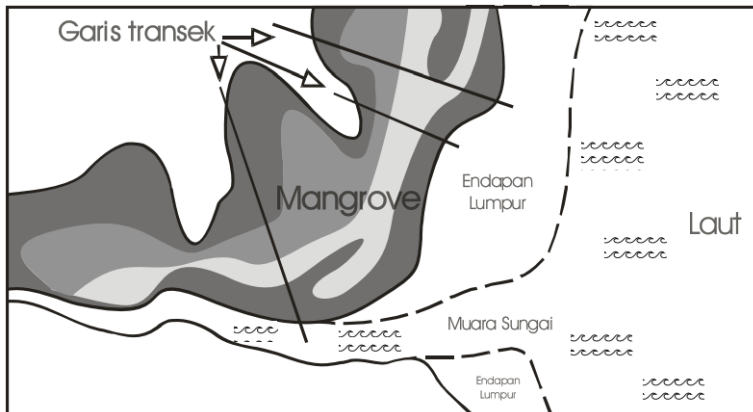
- a. Interpretasi objek mangrove berupa sebaran stasiun mangrove dalam wilayah target dapat diidentifikasi menggunakan *Google Earth* yang dapat memberikan gambaran awal secara spasial tentang keberadaan ekosistem mangrove.

- b. Penentuan jumlah stasiun dilakukan dengan mempertimbangan representasi area, ketersediaan waktu, sumber daya dan anggaran
- c. Stasiun potensial dibuat sebagai seluruh calon lokasi pemantauan permanen yang perlu diverifikasi selanjutnya dan dimasukkan dalam peta tematik temporer.

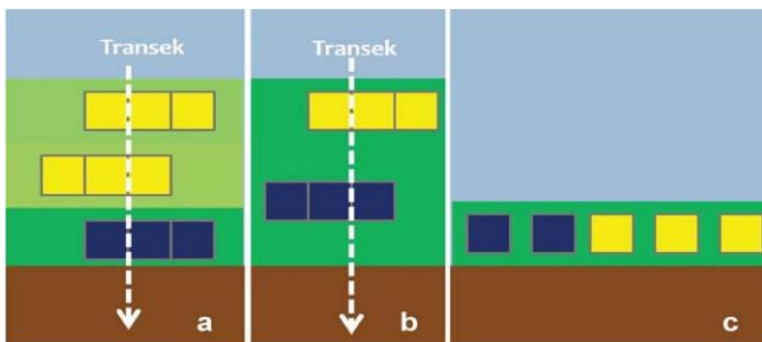
B. Penentuan Plot Pengamatan

Metode pertama yang digunakan dalam penentuan plot pengamatan yaitu *line transect*. *Line transect* yang dilakukan dengan cara membuat garis tegak lurus pantai ke arah darat dengan membuat petakan atau plot-plot untuk mengetahui struktur komunitas mangrove. *Statified Random Sampling* digunakan dalam menempatkan plot dalam setiap strata dengan mempertimbangkan kemudahan akses ke lokasi pengamatan.

Jumlah stasiun uji coba disesuaikan dengan kebutuhan dengan masing-masing stasiun terdiri atas 3. Stasiun pengamatan dapat ditentukan berdasarkan penampakan rona stratifikasi hijau pada Citra Satelit.



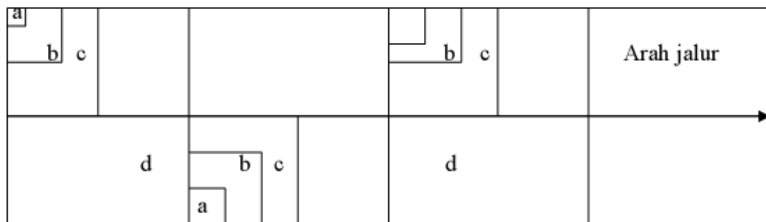
Gambar 14. Ilustrasi Peletakan Garis Transek
 Sumber gambar: Keputusan Menteri Negara
 Lingkungan Hidup Nomor 201 Tahun 2004 tentang
 Kriteria Baku dan Pedoman Penentuan Kerusakan
 Mangrove



Gambar 15. Ilustrasi penentuan plot a) mangrove
 dengan tiga stratifikasi/zona yang berbeda; b) vegetasi
 mangrove dengan stratifikasi dan atau tanpa
 stratifikasi yang jelas; dan c) vegetasi mangrove
 dengan ketebalan 50-100 meter

Sumber gambar: Dharmawan dan Pramudji (2017)

Plot pengamatan dibuat tegak lurus atau sejajar dengan garis pantai berukuran 10x10 m untuk pengamatan pohon, 5 x 5 m untuk pengamatan pancang dan 1 x 1 m untuk pengamatan semai. Plot dibuat menggunakan roll meter dan dikelilingi oleh tali rafia.



Gambar 16. Ilustrasi Petak Contoh Pengambilan Data Mangrove

Sumber gambar: Bengen (2004)

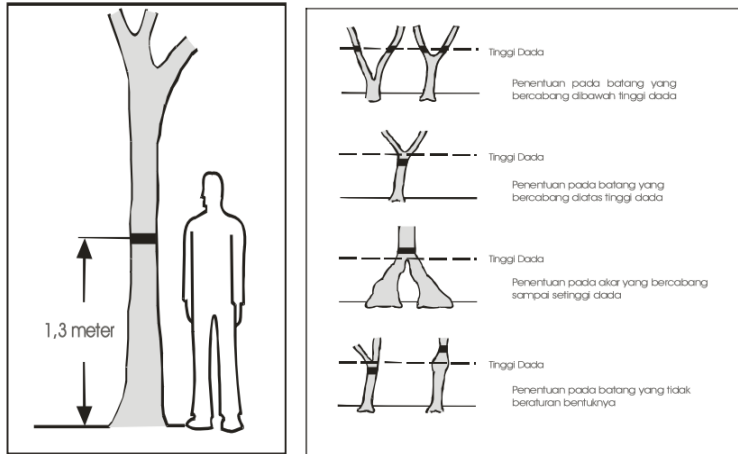
Keterangan:

- a. Plot 2 x 2 m untuk tingkat semai
- b. Plot 5 x 5 m untuk tingkat pancang
- c. Plot 10 x 10 m untuk tingkat pohon

C. Kerapatan Spesies

Kerapatan adalah jumlah individu setiap spesies yang dijumpai dalam petak contoh. Analisis tingkat kerapatan jenis mangrove dilakukan berdasarkan kategori pertumbuhan pohon dengan cara sebagai berikut:

- a. Pengukuran dilakukan pada seluruh pohon yang berada di setiap plot.



Gambar 17. Ilustrasi Penentuan lingkaran batang mangrove setinggi dada dan Penentuan lingkaran batang mangrove pada berbagai jenis batang mangrove

Sumber gambar: Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 201 Tahun 2004 tentang Kriteria Baku dan Pedoman Penentuan Kerusakan Mangrove

- b. Pengamatan pohon dilakukan dengan ketentuan sebagai berikut:
 - a) Keliling lingkaran batang lebih sama dengan 16 cm
 - b) Pengukuran dilakukan setinggi dada (130 cm)
 - c) Pencatatan dilakukan pada setiap spesies pohon yang ditemukan dalam satu plot

D. Analisis data

Kerapatan jenis (K_i) merupakan jumlah tegakan jenis ke- i dalam suatu unit area. Penentuan kerapatan jenis melalui rumus :

$$K_i = \frac{n_i}{A}$$

Keterangan :

K_i : Kerapatan jenis ke- i

n_i : Jumlah total individu ke- i

A : Luas total area pengambilan contoh (m^2)

Kerapatan Relatif (KR_i) merupakan perbandingan antara jumlah jenis tegakan ke- i dengan total tegakan seluruh jenis. Penentuan kerapatan relatif (KR_i) menggunakan rumus:

$$KR_i = \left(\frac{n_i}{\sum n} \right) \times 100\%$$

Keterangan :

KR_i : Kerapatan relatif

n : Total tegakan seluruh jenis

n_i : Jumlah total individu ke- i

E. Frekuensi Spesies

Frekuensi jenis (F_i) merupakan perbandingan jumlah plot di mana suatu jenis ditemukan dengan total jumlah plot, sedangkan frekuensi relatif (RF_i) dihitung sebagai persentase frekuensi suatu jenis terhadap total

frekuensi seluruh jenis. Frekuensi menggambarkan sebaran atau peluang ditemukannya suatu jenis dalam petak sampel; jenis dengan frekuensi tinggi menunjukkan distribusi yang luas dan toleransi ekologis yang lebar yang dianalisis menggunakan rumus sebagai berikut,

F. Frekuensi jenis (F_i)

$$F_i = \frac{p_i}{\sum p}$$

Keterangan:

F_i : Frekuensi jenis ke- i

p_i : Jumlah petak contoh dimana ditemukan jenis ke- i

n : Jumlah total petak contoh yang dibuat

G. Frekuensi Relatif (FRi)

Frekuensi relatif (FRi) adalah perbandingan antara frekuensi jenis ke- i dengan jumlah frekuensi seluruh jenis yang dianalisis menggunakan rumus berikut,

$$FR_i = \left(\frac{F_i}{\sum p} \right) \times 100\%$$

Keterangan :

FRi : Frekuensi jenis ke- i

F_i : Frekuensi jenis ke- i

$\sum p$: Jumlah total petak contoh yang dibuat

H. Dominasi/ Penutupan Spesies

Dominasi/penutupan jenis (C_i) dihitung berdasarkan basal area yang dihitung dari diameter batang setinggi dada. Dominasi relatif (RC_i) dinyatakan sebagai persentase dominasi suatu jenis terhadap total dominasi seluruh jenis. Penting dicatat bahwa jenis dengan kerapatan rendah dapat memiliki dominasi tinggi jika individu-individunya berukuran besar.

I. Penutupan Jenis (C_i)

Penutupan jenis (C_i) adalah luas penutupan jenis ke- i dalam suatu unit area tertentu dengan rumus berikut,

$$C_i = \frac{\sum BA}{A}$$

Dimana,

$$BA = \frac{\pi DBH^2}{4}$$

Keterangan :

C_i : Penutupan jenis

BA : Basal Area

A : Luas total area pengambilan contoh

DBH : Diameter batang pohon,

π : Konstanta (3,1416)

J. Penutupan Relatif (CRi)

Penutupan relatif (CRi) yaitu perbandingan antara penutupan jenis ke-i dengan luas total penutupan untuk seluruh jenis yang dianalisis menggunakan rumus sebagai berikut,

$$CRi = \left(\frac{Ci}{\sum C} \right) \times 100\%$$

Keterangan:

RCi : penutupan relatif

Ci : Penutupan jenis ke-i

C : Penutupan total untuk seluruh jenis

K. Indeks Nilai Penting (INP)

Indeks Nilai Penting (INP) diperoleh dengan menjumlahkan ketiga nilai relatif: $INP = RDi + RFi + RCi$. Untuk kategori semai dan pancang, INP dihitung hanya dari $RDi + RFi$ karena basal area tidak relevan untuk individu berukuran kecil. Nilai INP menggambarkan peran ekologis suatu spesies dalam komunitas; spesies dengan INP tinggi memiliki kontribusi dominan dalam struktur komunitas tersebut.

L. Analisis Tutupan Kanopi dan Kesehatan Mangrove

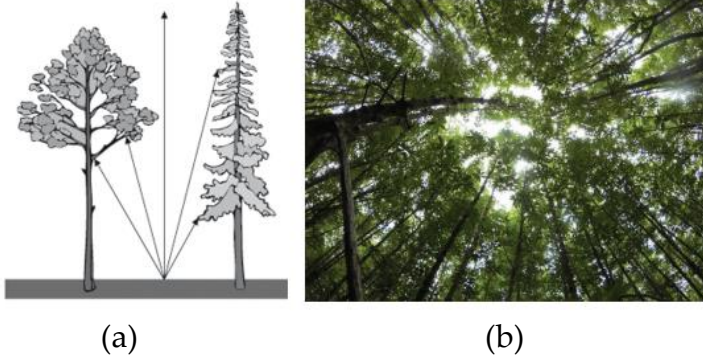
Persentase tutupan mangrove dilakukan dengan mengikuti tahapan pada pengambilan data komunitas mangrove. Persentase tutupan mangrove dihitung

menggunakan metode *hemispherical photography* yang membutuhkan kamera dengan sudut pandang 180 derajat pada satu titik pengambilan foto. Teknik ini cenderung cukup baru digunakan di Indonesia pada hutan mangrove, penerapannya mudah dan menghasilkan data yang lebih akurat. Teknik pelaksanaan metode ini sebagai berikut:

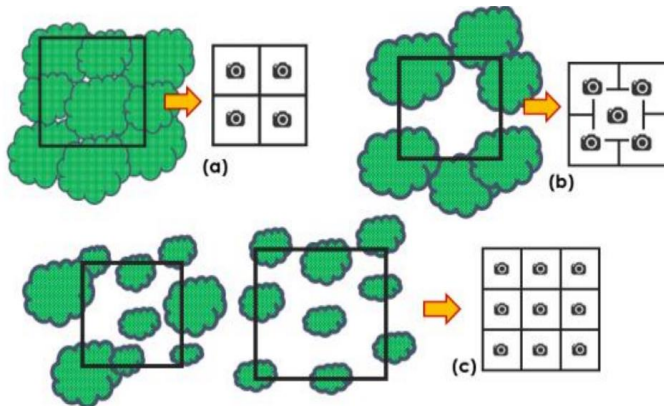
- a. Setiap plot $10 \times 10 \text{ m}^2$ dibagi menjadi 4 (empat) hingga 9 (sembilan) kuadran sesuai dengan kepadatan pohon.
- b. Titik pengambilan foto ditempatkan di sekitar pusat plot kecil; harus berada di antara satu pohon dengan pohon yang lainnya; serta hindarkan pemotretan tepat di samping batang suatu pohon.
- c. Posisi kamera disejajarkan dengan tinggi dada tim pengambil foto serta tegak lurus/menghadap lurus ke langit.
- d. Lakukan pencatatan nomor foto pada form data sheet untuk mempermudah dan mempercepat analisis data.
- e. Dalam setiap zona minimal dilakukan pengambilan foto sebanyak 4 titik dengan setiap plot $10 \times 10 \text{ m}^2$ tanpa pengulangan dan tandai foto di setiap akhir sesi pengambilan foto setiap plot. Berdasarkan jumlah stasiun pengamatan, maka pengambilan foto minimal 36 kali dengan asumsi terdapat 9 plot

pengamatan dan pengambilan foto masing-masing plot adalah 4 kuadran.

- f. Hindarkan pengambilan foto ganda pada setiap titik untuk mencegah kebingungan dalam analisis data.



Gambar 18. Ilustrasi metode *hemispherical photography* untuk mengukur tutupan mangrove; (b) hasil pengambilan gambar secara 129vertical
Sumber gambar: Dharmawan dan Pramudji (2014)



Gambar 19. Titik pengambilan gambar dalam setiap plot pemantauan

Sumber gambar: Dharmawan dan Pramudji (2017)

g. Analisis Persen Tutupan dan Intepretasi Hasil dan Penentuan Kondisi Komunitas Mangrove

Analisis data persen tutupan menggunakan perangkat lunak *Image J* dengan memisahkan pixel langit dan tutupan vegetasi.

Menghasilkan nilai kerapatan dalam satuan pohon/ha dan persentase tutupan dalam satuan persen (%). Hasil tersebut dapat digunakan untuk menggambarkan status kondisi hutan mangrove yang dikategorikan berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 201 Tahun 2004 sebagaimana tersaji pada Tabel berikut.

Tabel 1. Standar baku kerusakan hutan mangrove berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 201 Tahun 2004

Kriteria		Penutupan	Kerapatan (pohon/ha)
Baik	Padat	$\geq 75 \%$	≥ 1500
Sedang	Sedang	50 % - 75 %	1000 – 1500
Rusak	Jarang	$< 50 \%$	< 1000

Metode Penilaian Ekosistem Padang Lamun

Analisis struktur komunitas padang lamun merupakan fondasi kuantitatif untuk menilai kondisi, kesehatan, dan dinamika ekosistem lamun. Pendekatan ini mencakup prosedur lapangan dan analisis data yang memungkinkan

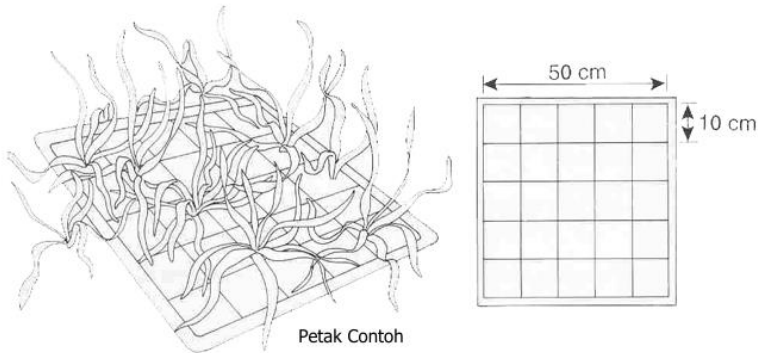
untuk mengukur komposisi spesies, kepadatan, tutupan, distribusi, dan keanekaragaman hayati dalam suatu kawasan padang lamun. Metodologi yang baku sangat penting untuk memastikan data dapat di-bandingkan antar lokasi dan antar waktu, serta menjadi dasar valid bagi keputusan pengelolaan dan konservasi. Metode penilaian ekosistem padang lamun didasarkan pada Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 200 Tahun 2004 tentang Kriteria Baku Kerusakan dan Pedoman Penentuan Status Padang Lamun.

A. Desain Sampling dan Penempatan Transek

Pengambilan data struktur komunitas lamun umumnya menggunakan metode *line transect* yang dikombinasikan dengan transek kuadrat (*quadrat transect*). Transek garis ditarik tegak lurus garis pantai, dimulai dari tepi pantai (batas ditemukannya lamun) hingga ke arah tubir atau laut. Panjang transek bervariasi, umumnya 50–100 meter, dengan interval peletakan kuadrat setiap 10 meter.

Ukuran kuadrat yang digunakan bervariasi, yaitu $50 \times 50 \text{ cm}^2$ atau $1 \times 1 \text{ m}^2$. Kuadrat diletakkan secara sistematis sepanjang garis transek, dan pada setiap titik kuadrat dilakukan identifikasi jenis lamun, penghitungan jumlah tegakan (*shoot*), serta estimasi persentase tutupan. Kuadrat $1 \times 1 \text{ m}$, kuadrat dapat dibagi lagi menjadi 16 plot kecil berukuran $25 \times 25 \text{ cm}$

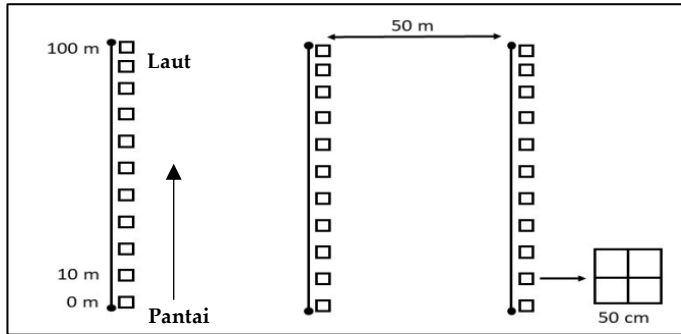
atau 25 plot kecil berukuran 10 x 10 cm untuk pengamatan yang lebih detail.



Gambar 20. Ilustrasi Transek Kuadrat

Sumber gambar: Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 200 Tahun 2004 tentang Kriteria Baku Kerusakan dan Pedoman Penentuan Status Padang Lamun

Jumlah transek per stasiun bervariasi, umumnya 2–3 transek yang mewakili keseluruhan hamparan lamun. Penentuan stasiun pengamatan dapat dilakukan secara *purposive sampling* berdasarkan keterwakilan kondisi habitat, substrat, dan tingkat tekanan antropogenik.



Gambar 21. Desain Sampling dan Penempatan Transek

Sumber gambar: Rahmawati et al. (2014)

B. Persen Penutupan

Persen penutupan merupakan persen tutupan jenis (P_i), yaitu luas area yang ditutupi oleh jenis lamun, dihitung sebagai perbandingan luas total penutupan jenis ke- i terhadap luas total pengambilan sampel. Pencatatan dilakukan terhadap banyaknya masing-masing jenis pada tiap sub petak dan dimasukkan ke dalam kelas kehadiran sebagaimana gambar di bawah. Analisa penutupan jenis lamun tertentu pada masing-masing petak dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut dengan nilai M tersaji pada tabel di bawahnya,

$$C = \frac{\sum (M_i \times f_i)}{\sum f}$$

Keterangan:

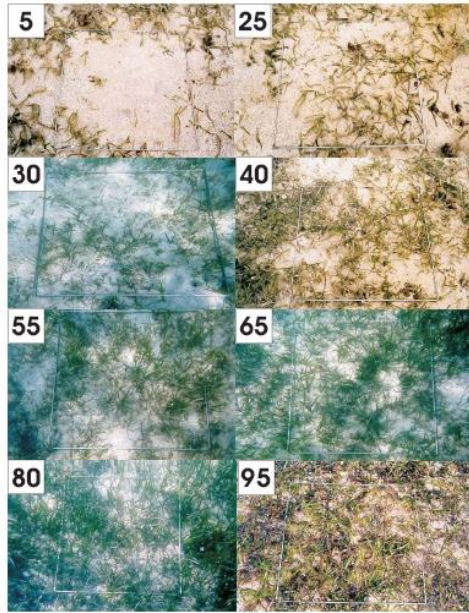
C : presentase penutupan jenis lamun i

Mi : presentase titik tengah dari kelas kehadiran jenis lamun i

F : frekuensi/banyaknya sub petak kelas ditemukan kehadiran jenis lamun i

Tabel 2. Luas Area Penutupan dan Titik Tengah (Median)

Kelas	Luas Area Penutupan	% Penutupan Area	% Titik Tengah (M)
0	Tidak ada	0	0
1	$< \frac{1}{16}$	$< 6,25$	3,13
2	$\frac{1}{16} - \frac{1}{8}$	6,25 – 12,5	9,38
3	$\frac{1}{8} - \frac{1}{4}$	12,5 – 25	18,75
4	$\frac{1}{4} - \frac{1}{2}$	25 – 50	37,5
5	$\frac{1}{2} - \text{Penuh}$	50 – 100	75



Gambar 22. Persen tutupan lamun
 Sumber gambar: McKenzie dan Campbell (2003)

Kondisi lamun dan status padang lamun berdasarkan persentase penutupan dikelaskan dalam Tabel di bawah ini,

Tabel 3. Kondisi Lamun berdasarkan Persentase Penutupan

Persen penutupan	Kategori
> 75 %	Sangat Baik
50 – 75 %	Baik
25 – 49 %	Sedang
< 25 %	Buruk

Sumber: Setyobudiandi *et al.* (2009)

Tabel 4. Status Padang Lamun

Kondisi		Penutupan (%)
Baik	Kaya/sehat	≥ 60
Rusak	Kurang kaya/kurang sehat	30 – 59,9
	Miskin	$\leq 29,9$

Sumber: Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 200 Tahun 2004 tentang Kriteria Baku Kerusakan dan Pedoman Penentuan Status Padang Lamun

C. Kesehatan Lamun

Seagrass Ecological Quality Index (SEQI) dikembangkan oleh Hernawan *et al.* (2021) sebagai respons terhadap kebutuhan Indonesia akan alat penilaian kesehatan ekosistem lamun yang sederhana, hemat biaya, dan dapat diterapkan dalam skala luas. Framework penilaian yang ada sebelumnya, seperti PREI (*Posidonia Ecological Index*) dan alat monitoring dari *Great Barrier Reef Marine Park Authority* dikembangkan untuk ekosistem lamun Mediterania atau memerlukan analisis laboratorium dan keahlian khusus yang tidak praktis untuk diterapkan secara luas di Indonesia. SEQI dirancang khusus untuk ekosistem lamun tropis multi-spesies Indonesia, dengan menggunakan nilai referensi lokal dan parameter yang dapat diukur secara visual di lapangan.

Keunggulan utama SEQI terletak pada kemampuannya untuk digunakan dalam konteks keterbatasan data dan sumber daya, menjadikannya alat yang "management-ready" untuk skrining cepat, penetapan baseline, dan penentuan prioritas restorasi. SEQI mengintegrasikan lima parameter ekologis yang mewakili komponen struktur komunitas (kekayaan spesies dan tutupan lamun), kondisi habitat (kecerahan air), dan tekanan ekologis (tutupan makroalga dan epifit).

SEQI dihitung sebagai indeks komposit dengan bobot yang sama (0,2) untuk setiap parameter, sehingga tidak ada satu variabel yang mendominasi penilaian dengan rumus SEQI sebagai berikut,

$$\text{SEQI} = (\text{St}/\text{Sref} \times 0,2) + (\text{Ct}/\text{Cref} \times 0,2) + (\text{Wt}/\text{Wref} \times 0,2) + (1 - \text{Mt}/\text{Mmax} \times 0,2) + (1 - \text{Et}/\text{Emax} \times 0,2)$$

Keterangan:

- St : kekayaan spesies lamun yang teramati
- Sref : nilai maksimum kekayaan spesies lamun (9 spesies)
- Ct : persentase tutupan lamun yang teramati
- Cref : nilai maksimum tutupan lamun (100%)
- Wt : kecerahan air yang teramati (dalam meter)
- Wref : nilai maksimum kecerahan air (2 meter)

- Mt : persentase tutupan makroalga yang teramati
- Mmax : nilai maksimum tutupan makroalga (100%)
- Et : persentase tutupan epifit yang teramati
- Emax : nilai maksimum tutupan epifit (100%)

Perhatikan bahwa untuk makroalga dan epifit, rumus menggunakan $(1 - Mt/Mmax)$ dan $(1 - Et/Emax)$ karena kedua parameter ini merupakan indikator tekanan ekologis, sehingga semakin tinggi tutupannya, semakin rendah kualitas ekologis. Nilai referensi Sref = 9 spesies merepresentasikan sembilan spesies lamun yang umum ditemukan di perairan Indonesia, yaitu *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, *Cymodocea rotundata*, *C. serrulata*, *Halophila ovalis*, *Halodule uninervis*, *H. pinifolia*, *Syringodium isoetifolium*, dan *Thalassodendron ciliatum*.

Nilai SEQI berkisar antara 0 hingga 1, dengan klasifikasi status kesehatan ekosistem lamun sebagai berikut.

Tabel 5. Indeks Kesehatan Lamun

Nilai SEQI	Kategori
0 – 0,36	Buruk (<i>Bad</i>)
0,37 – 0,52	Jelek (<i>Poor</i>)
0,53 – 0,68	Sedang (<i>Moderate</i>)

Nilai SEQI	Kategori
0,69 – 0,84	Baik (<i>Good</i>)
0,85 – 1	Sangat Baik (<i>Excellent</i>)

Sumber: Hernawan *et al.* (2021)

Metode Penilaian Ekosistem Terumbu Karang

Metode *Line Intercept Transect* (LIT), *Point Intercept Transect* (PIT), maupun photo transect digunakan bergantung pada tujuan uji coba, karakteristik habitat, dan tingkat ketelitian yang diperlukan. Metode transek merupakan salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam ekologi terumbu karang karena mampu menghasilkan data kuantitatif mengenai kondisi komunitas benthik secara terstandar. Persentase tutupan karang merupakan parameter dasar dalam menggambarkan kondisi komunitas benthik.

A. *Line Intercept Transect* (LIT)

Line Intercept Transect (LIT) merupakan metode survei visual yang paling lama digunakan dan diandalkan untuk menilai kondisi terumbu karang, di mana penyelam merekam jenis tutupan benthik yang bersinggungan langsung dengan garis transek yang dibentangkan sepanjang 50 meter di atas substrat. Metode ini mengandalkan pencatatan kontinu: setiap kali terjadi perubahan kategori lifeform, penyelam mencatat jarak kumulatif sepanjang garis transek,

sehingga data yang dihasilkan berupa panjang intercept (cm) yang kemudian dikonversi menjadi persentase tutupan relatif. Kategori lifeform yang dicatat mencakup kelompok karang keras (*Acropora* branching, *Acropora* digitate, coral massive, coral submassive, coral foliose, dan lainnya), karang lunak, spons, alga, serta substrat abiotik seperti pasir, *rubble*, dan *rock*. Kekuatan utama LIT terletak pada kesederhanaannya, biaya operasional yang rendah, dan kompatibilitasnya dengan dataset pemantauan jangka panjang yang telah terstandarisasi sejak 1997, menjadikannya pilihan utama untuk program monitoring rutin meskipun metode berbasis fotogrametri digital kini menawarkan presisi spasial yang lebih tinggi. Pendekatan ini memperoleh informasi mengenai kontribusi relatif masing-masing kelompok karang dan substrat terhadap keseluruhan komunitas bentik. Nilai persentase tutupan setiap kategori dihitung menggunakan rumus berikut,

$$C_i = (L_i / L) \times 100\%$$

Keterangan

C_i : persentase tutupan kategori ke- i

L_i : panjang intersep kategori ke- i

L : panjang total transek

Komposisi komunitas karang selanjutnya dianalisis berdasarkan jumlah takson yang ditemukan pada setiap stasiun pengamatan. Takson dapat diidentifikasi hingga tingkat spesies apabila karakter morfologi memungkinkan, tetapi identifikasi hingga tingkat genus atau lifeform dapat digunakan apabila kondisi lapangan, kualitas dokumentasi, atau kemampuan identifikasi tidak memungkinkan untuk mencapai tingkat spesies. Jumlah takson yang ditemukan dinyatakan sebagai kekayaan taksonomi (S). Nilai kekayaan tersebut memberikan informasi mengenai jumlah takson yang menyusun komunitas, tetapi belum menggambarkan bagaimana kelimpahan atauutupan masing-masing takson didistribusikan dalam komunitas.

Proporsi relatif setiap takson dihitung untuk memperoleh gambaran kontribusi masing-masing takson terhadap komunitas. Proporsi relatif (p_i) diperoleh dengan membagi nilaiutupan takson ke-i dengan jumlahutupan seluruh takson yang digunakan dalam analisis. Nilai proporsi tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perhitungan indeks keanekaragaman, keseragaman, dan dominansi.

B. *Point Intercept Transect (PIT)*

Point Intercept Transect (PIT) merupakan metode survei visual yang merekam jenis tutupan benthik pada interval titik tertentu di sepanjang garis transek, di mana setiap titik yang jatuh di bawah garis dicatat untuk menghitung persentase tutupan relatif. Metode ini dikembangkan sebagai alternatif yang lebih cepat dan sederhana dibandingkan *Line Intercept Transect (LIT)*, dengan penyelam hanya mencatat keberadaan atau ketiadaan komponen benthik pada titik-titik yang telah ditentukan, bukan mengukur panjang setiap intercept secara kontinu. Interval antar titik dapat bervariasi yang umumnya 10, 20, 25, atau 50 cm dengan interval yang lebih rapat menghasilkan data lebih presisi namun membutuhkan waktu lebih lama, sedangkan interval yang lebih jarang lebih efisien tetapi kurang akurat. Kategori yang dicatat meliputi karang keras hidup (sering hingga tingkat genus), karang mati, makroalga, alga koralin, pasir, rubble, dan substrat abiotik lainnya. PIT banyak digunakan dalam program pemantauan seperti Reef Check karena kemudahannya diterapkan oleh penyelam dengan pelatihan terbatas, pada tingkat identifikasi yang sesuai, PIT memberikan informasi yang hampir setara dengan LIT namun dengan waktu penyelaman yang lebih singkat. Rumus perhitungan persentase tutupan pada metode *Point*

Intercept Transect (PIT) cukup sederhana dan berbasis pada rasio jumlah titik yang terekam terhadap total titik pengamatan, yaitu:

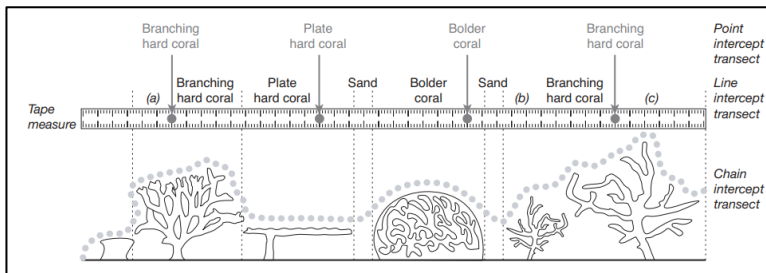
$$\text{Persentase Tutupan} = \frac{\text{Jumlah Titik untuk Kategori Tertentu}}{\text{Total Titik Sepanjang Transek}} \times 100\%$$

C. *Chain Intercept Transect* (CIT)

Chain Intercept Transect (CIT) merupakan metode pengukuran struktur fisik terumbu karang yang dilakukan dengan meletakkan rantai sepanjang 2 meter secara berulang mengikuti kontur substrat di sepanjang garis transek, kemudian membandingkan panjang rantai yang terpasang dengan jarak linear transek untuk menghasilkan indeks rugositas (*rugosity index*). Nilai rugositas dihitung sebagai rasio antara panjang permukaan kontur (panjang rantai) dengan jarak linear (panjang transek lurus), di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan struktur habitat yang lebih kompleks dan ber relief tinggi. Dalam praktiknya, CIT sering dikombinasikan dengan *Line Intercept Transect* (LIT) untuk tutupan karang, karena CIT menyediakan data tiga dimensi yang melengkapi data dua dimensi dari LIT. Metode ini sangat efektif untuk area dengan karang masif dan berperan penting dalam analisis hubungan antara kompleksitas struktural terumbu karang dengan kelimpahan ikan karang. Rumus dasar

untuk menghitung indeks rugositas pada metode *Chain Intercept Transect* (CIT) adalah rasio antara panjang rantai yang mengikuti kontur substrat dengan jarak linear transek yang dibentangkan sebagai berikut,

$$Rugosity\ Index\ (R) = \frac{\text{Panjang Rantai Mengikuti Kontur (A)}}{\text{Panjang Transek Linear (B)}}$$



Gambar 23. Ilustrasi Perbandingan Metode Pengamatan Karang menggunakan PIT, LIT dan CIT
Sumber gambar: *Australian Institute of Marine Science* (2004)

D. *Underwater Photo Transect (UPT)*

Underwater Photo Transect (UPT) atau transek foto bawah air merupakan metode pengambilan data kondisi komunitas bentik terumbu karang melalui dokumentasi foto bawah air pada bidang pengamatan yang dibuat terstandar. Foto yang dihasilkan dapat dianalisis setelah kegiatan lapangan sehingga menyediakan rekaman visual yang dapat diperiksa kembali. Dalam panduan COREMAP-CTI-LIPI, UPT menggunakan garis transek sebagai acuan dan *frame*

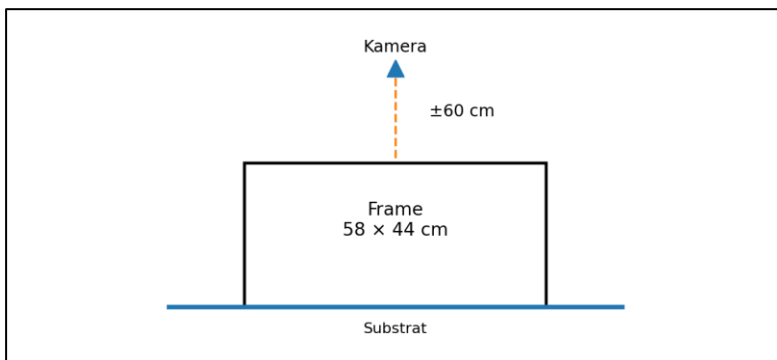
berukuran 58×44 cm untuk memperoleh bidang foto yang relatif seragam. Metode ini digunakan untuk memperoleh informasi mengenai persentase tutupan karang dan kategori bentik lainnya.

Metode ini memanfaatkan perkembangan teknologi kamera digital maupun teknologi piranti lunak komputer. Pengambilan foto-foto bawah air yang dilakukan dengan pemotretan menggunakan kamera digital bawah air dan menghasilkan foto 2D. Analisis data karang 2D menggunakan metode UPT (*Underwater photo transect*) menggunakan *Software* CP Ce.

Metode UPT dilakukan melalui pemotretan tegak lurus pada jarak sekitar 60 cm dari dasar substrat, dilakukan pada setiap rentang jarak 1 m sepanjang garis transek yang telah ditentukan, dan pemotretan diambil dari meter ke-1 pada bagian sebelah kiri garis transek dilanjutkan pengambilan foto pada meter kedua di sebelah kanan. Selanjutnya dilakukan analisis untuk mendapatkan prosentase tutupan karang.

Rancangan UPT yang umum digunakan dalam uji coba terumbu karang di Indonesia adalah transek sepanjang 50 m, pemotretan setiap 1 m, *frame* 58×44 cm, dan kamera diposisikan tegak lurus terhadap *frame* pada jarak sekitar 60 cm. Foto pada meter ganjil diletakkan di satu sisi garis transek dan foto pada meter

genap di sisi lainnya, sehingga satu transek menghasilkan 50 *frame* foto. Rancangan ini digunakan dalam berbagai kegiatan monitoring di Indonesia.

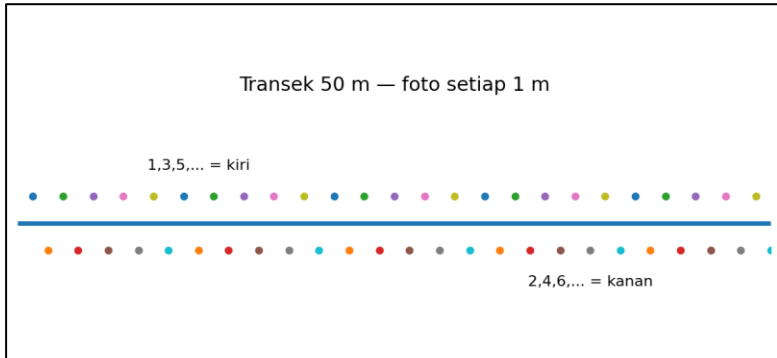


Gambar 24. Ilustrasi Posisi Kamera dalam Pengambilan Gambar

Sumber gambar: Giyanto *et al.* (2014)

Angka 50 m, 58 × 44 cm, interval 1 m, dan jarak kamera sekitar 60 cm merupakan konfigurasi UPT yang banyak digunakan dalam pedoman Indonesia, bukan satu-satunya konfigurasi fotografi terumbu karang. AIMS menggunakan kamera sekitar 40 cm di atas substrat dan jumlah foto yang berbeda menurut program monitoring. Karena itu, harus memilih satu protokol dan mempertahankannya konsisten antar-stasiun dan antar waktu.

Transek dipasang pada habitat yang telah ditetapkan. Pemotretan dimulai pada meter ke-1 sampai meter ke-50. Pada konfigurasi yang merujuk pedoman UPT Indonesia, nomor ganjil ditempatkan di satu sisi garis transek dan nomor genap di sisi lainnya.



Gambar 25. Ilustrasi pengambilan foto UPT pada transek 50 m dengan interval 1 m dan posisi *frame* bergantian kiri-kanan

Sumber gambar: Giyanto *et al.* (2014)

Foto UPT dapat dianalisis menggunakan pendekatan *point count*. Sejumlah titik ditempatkan secara acak atau sistematis pada setiap foto, kemudian kategori bentik tepat di bawah setiap titik diidentifikasi. Panduan COREMAP-CTI-LIPI menggunakan perangkat lunak CPCe untuk analisis foto. Jumlah titik per foto harus ditetapkan sebelum analisis dan digunakan secara konsisten; 30 titik per foto merupakan salah satu pendekatan yang banyak digunakan di Indonesia. Contoh kategori antara lain *Hard Coral*, *Soft Coral*, *Dead Coral*, *Rubble*, *Sand*, *Rock*, *Macroalgae*, *Sponge*, dan kategori lain. Persentase tutupan kategori bentik dihitung dari jumlah titik yang masuk pada kategori tersebut dibandingkan dengan

seluruh titik valid atau berdasarkan luas kategori bentik menggunakan rumus sebagai berikut,

$$C_i = (N_i / N) \times 100\%$$

Keterangan:

C_i : persentase tutupan kategori ke-i

N_i : jumlah titik pada kategori ke-i

N : jumlah seluruh titik valid

Atau,

Persentase tutupan terumbu karang =

$$\frac{\text{Jumlah area kategori ke-}i}{\text{Luas area frame foto}} \times 100\%$$

Hasil persentase tutupan karang dikategorikan sesuai table berikut.

Tabel 6. Kategori Tutupan Karang

Persentase (%)	Kategori
0-24,9	Buruk
25-49,9	Sedang
50-74,9	Baik
75-100	Baik Sekali

Sumber: Gomes dan Yap (1984)

Metode Penilaian Ekosistem Estuaria dan Pantai Berpasir

Penilaian kesehatan ekosistem estuaria dan pantai berpasir memerlukan pendekatan yang berbeda karena karakteristik fisik-kimia dan komunitas biota yang khas

pada masing-masing sistem. Berikut adalah perbandingan metode penilaian kedua ekosistem tersebut.

Tabel 7. Komparatif Metode Penilaian Ekosistem Estuaria dan Pantai Berpasir

Aspek Penilaian	Ekosistem Estuaria	Ekosistem Pantai Berpasir
Karakteristik Lingkungan	Zona transisi air tawar–laut; salinitas berfluktuasi; substrat lumpur/berpasir; energi gelombang rendah–sedang	Substrat pasir tidak stabil; energi gelombang tinggi; salinitas stabil (marin); zona intertidal sempit
Komponen Biotik Utama	<i>Makrozoobentos</i> , ikan, fitoplankton, makrofita, burung air	Makroinfauna (<i>krustasea</i> , <i>polychaeta</i> , <i>moluska</i>), burung pantai, vegetasi gumuk pasir
Indeks Biotik	AMBI, M-AMBI, BENTIX, BAT (<i>Benthic Assessment Tool</i>), <i>Estuary Health Index</i> (EHI), <i>Fish Community Index</i> ,	Indeks Shannon-Wiener, Pielou, Simpson, Kurva k-dominansi (ABC curve),

Aspek Penilaian	Ekosistem Estuaria	Ekosistem Pantai Berpasir
	<i>Phytoplankton Quality Index</i>	AMBI, BENTIX, BPI
Indeks Abiotik Pendukung	Salinitas, suhu, pH, DO, nutrien (N, P), TSS, klorofil-a, logam berat	Ukuran butir sedimen, kemiringan pantai, tinggi gelombang, lebar zona intertidal, kandungan organik sedimen
Pendekatan Multimetrik	EHI (skor 0–100; kelas A–F); M-AMBI (kombinasi AMBI + keanekaragaman + kekayaan); BAT (Margalef + Shannon + AMBI)	Kerangka seleksi metrik berbasis isu manajemen; integritas gumuk pasir; kombinasi indeks ekologi + kurva ABC
Tingkat Kompleksitas	Tinggi — memerlukan penilaian multi-komponen (fisika, kimia, biologi) dan mempertimbangkan	Sedang — fokus pada makroinfauna dan kondisi gumuk; parameter fisik

Aspek Penilaian	Ekosistem Estuaria	Ekosistem Pantai Berpasir
	gradien salinitas serta konektivitas darat–laut	lebih dominan dibandingkan kimia
Kondisi Referensi	Diperlukan kondisi historis " <i>minimally disturbed</i> " (BCG); data <i>time-series</i> untuk mendeteksi perubahan	Kondisi referensi dapat ditetapkan dari pantai tanpa gangguan (akses kendaraan, pembangunan, wisata intensif)
Keunggulan Metode	Mencerminkan integrasi proses darat–laut; sensitif terhadap eutrofikasi dan pencemaran; dapat mendeteksi perubahan jangka panjang	Relatif sederhana dan hemat biaya; makroinfauna merespons cepat terhadap gangguan fisik; dapat dikombinasikan dengan penilaian estetika pantai
Keterbatasan Metode	Membutuhkan data multi-parameter; variabilitas alami tinggi menyulitkan	Substrat tidak stabil menyulitkan sampling

Aspek Penilaian	Ekosistem Estuaria	Ekosistem Pantai Berpasir
	penetapan baseline; indeks berbasis ikan memerlukan keahlian taksonomi	kuantitatif; komunitas biota relatif miskin; indeks berbasis makroinfauna kurang sensitif terhadap pencemaran kimia
Aplikasi di Indonesia	Digunakan di Estuaria Segara Anakan, Muara Sungai Jajar, Estuaria Jeneberang	Digunakan di Pantai Pasir Putih (Lampung), Pantai Amal (Tarakan), pantai-pantai wisata di Bali dan Jawa

A. Metode Penilaian Ekosistem Estuaria

Estuaria memiliki kompleksitas tinggi karena merupakan zona transisi antara air tawar dan air laut. Beberapa pendekatan yang umum digunakan antara lain:

a. *Estuary Health Index (EHI)*

Metode ini menggabungkan skor dari variabel abiotik (hidrologi, hidrodinamika, kualitas air, habitat fisik) dan variabel biotik (mikroalga, makrofita, invertebrata, ikan, burung). Setiap variabel diberi bobot, dan skor akhir (0–100) diklasifikasikan ke dalam status ekologis dari A (tidak termodifikasi) hingga F (termodifikasi kritis).

b. *Indeks Berbasis Makrozoobentos (Benthic Indices)*

Makrozoobentos adalah indikator yang sangat baik karena hidup relatif menetap dan merespons perubahan lingkungan. Beberapa indeks yang dapat digunakan:

- a) AMBI (AZTI's Marine Biotic Index): Mengklasifikasikan spesies ke dalam kelompok ekologis berdasarkan toleransinya terhadap tekanan.
- b) BENTIX: Mirip dengan AMBI, dirancang untuk perairan transisi.
- c) M-AMBI: Kombinasi AMBI dengan indeks keanekaragaman dan kekayaan spesies.
- d) BAT (Benthic Assessment Tool): Multimetrik yang menggabungkan indeks Margalef, Shannon-Wiener, dan AMBI, yang telah diuji di estuaria Portugal.

c. *Indeks Biotik Berbasis Ikan (Fish Community Index)*

Metode ini menggunakan metrik komunitas ikan seperti kelimpahan, komposisi spesies, dan struktur trofik untuk menilai kesehatan estuaria. Skor dihitung dan dibandingkan dengan kondisi referensi, menghasilkan kelas kondisi dari A (sangat baik) hingga E (sangat buruk).

d. *Indeks Kualitas Fitoplankton (Phytoplankton Quality Index)*

Pendekatan yang lebih baru yang menggunakan komunitas fitoplankton sebagai bioindikator, dengan menggabungkan indeks ekologi fitoplankton, dinamika nutrien, dan indeks pencemaran logam berat dalam kerangka statistik multivariat.

e. *Biological Condition Gradient (BCG)*

Kerangka yang mengevaluasi perubahan struktur habitat melalui waktu, dengan menetapkan level referensi "*minimally disturbed*" berdasarkan kondisi historis sebelum gangguan antropogenik besar.

B. Metode Penilaian Ekosistem Pantai Berpasir

Pantai berpasir memiliki karakteristik yang sangat berbeda dari estuaria karena substrat yang tidak stabil, energi gelombang tinggi, dan komunitas biota yang didominasi oleh makroinfauna. Pendekatan penilaiannya pun berbeda, antara lain:

a. *Penilaian Integritas Gumuk Pasir (Dune Integrity)*

Kesehatan ekosistem pantai berpasir sering dinilai melalui integritas gumuk pasir (dune) sebagai indikator utama. Penilaian ini mencakup kondisi vegetasi gumuk, stabilitas substrat, dan tingkat gangguan antropogenik seperti akses kendaraan dan pembangunan.

b. *Metrik Komunitas Makrozoobentos*

Makrozoobentos (terutama makroinfauna) adalah komponen biotik yang paling umum digunakan untuk menilai kesehatan pantai berpasir. Metrik yang digunakan meliputi:

- a) Indeks keanekaragaman (Shannon-Wiener): Mengukur kompleksitas komunitas.
- b) Indeks keseragaman (Pielou): Mengukur distribusi individu antarspesies.
- c) Indeks dominansi (Simpson): Mengukur dominansi spesies tertentu.
- d) Kurva k-dominansi (ABC curve): Membandingkan kurva kelimpahan dan biomassa untuk mendeteksi gangguan. Pada komunitas terganggu sedang, kurva kelimpahan dan biomassa menjadi mirip; pada gangguan berat, kurva kelimpahan berada di atas kurva biomassa.

c. *Indeks Biotik Berbasis Makrofauna (AMBI, BENTIX, BPI)*

Indeks-indeks ini awalnya dikembangkan untuk perairan laut dan estuaria, tetapi telah diuji penerapannya untuk pantai berpasir. Misal di Rio de Janeiro menguji AMBI, BENTIX, dan BPI untuk menilai status ekologis 68 pantai berpasir, dengan hipotesis bahwa indeks-indeks ini sensitif terhadap tingkat urbanisasi dan intensitas fasilitas rekreasi.

d. *Kerangka Seleksi Metrik Berbasis Isu Manajemen*

Pendekatan ini dimulai dengan mengidentifikasi isu lingkungan spesifik yang dihadapi (misalnya erosi, polusi, gangguan wisata), kemudian memilih metrik yang paling relevan untuk menjawab isu tersebut. Metrik yang dinilai tinggi untuk berbagai isu meliputi ukuran agregat kelimpahan/biomassa/tutupan biota, burung pantai, dan metrik komunitas makroinfauna.

e. *Penilaian Kualitas Pemandangan Pantai (Scenic Quality)*

Meskipun bukan penilaian ekologis murni, metode ini sering dikombinasikan dengan penilaian kesehatan ekosistem karena pantai memiliki nilai budaya dan ekonomi. Kerangka Ergin et al. (2004) menganalisis kualitas pemandangan berdasarkan parameter fisik, biologis, dan manusiawi, yang

kemudian dihubungkan dengan integritas gumuk pasir sebagai indikator kesehatan ekosistem.

Analisis Struktur Komunitas

Struktur komunitas merupakan salah satu aspek penting yang dapat digunakan untuk menggambarkan kondisi suatu komunitas melalui susunan, komposisi jenis serta kelimpahan individu dari organisme dalam komunitas tersebut. Analisis struktur komunitas dapat membantu memberikan informasi komposisi serta distribusi biota yang berkaitan dengan kondisi lingkungan. Informasi yang dihasilkan bermanfaat dalam memahami dinamika yang terjadi di dalam ekosistem beserta faktor-faktor yang mempengaruhinya serta mendukung penilaian dalam proses penentuan pengelolaan yang berkelanjutan. Kondisi habitat akuatik seperti estuari dan wilayah pesisir memiliki karakteristik yang sangat dinamis.

Analisis struktur komunitas memiliki peran penting dalam mendukung pengelolaan ekosistem perairan secara berkelanjutan karena dapat memberikan sebuah gambaran yang berkaitan mengenai kondisi biologis suatu ekosistem serta respons komunitas didalamnya terhadap perubahan kondisi lingkungan. Informasi tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan kondisi komunitas, keberadaan spesies dominan atau spesies toleran terhadap gangguan, serta

perbedaan kondisi ekologis antarwilayah maupun antarwaktu. Pada ekosistem estuari salah satunya, struktur komunitas telah digunakan bersama dengan indeks biotik untuk menilai status ekologis dan tingkat gangguan habitat, sehingga menghasilkan informasi dasar bagi pemantauan dan evaluasi pengelolaan ekosistem. Di ekosistem lain seperti pesisir juga menunjukkan analisis struktur komunitas *makrozoobentos* dapat digunakan sebagai indikator kondisi perairan mengingat perubahan komposisi serta kelimpahan *makrozoobentos* berkaitan dengan perubahan yang terjadi di lingkungan hidupnya. Disamping memberikan kondisikeanekaragaman, struktur komunitas juga dapat menjadi dasar informasi bagi penentuan prioritas perlindungan habitat, identifikasi wilayah yang mengalami tekanan lingkungan, evaluasi keberhasilan rehabilitasi, dan perancangan sistem pemantauan ekologis berkala.

Analisis struktur komunitas terdapat beberapa indeks yang dapat digunakan, diantaranya adalah indeks keanekaragaman (H'), indeks keseragaman (E), dan indeks dominansi (D) yang ketiganya saling berkaitan satu sama lain.

A. Indeks keanekaragaman

Indeks keanekaragaman adalah ukuran kuantitatif yang digunakan untuk memberikan informasi mengenai banyaknya jenis organisme yang berbeda dalam suatu komunitas atau wilayah tertentu. Dalam keanekaragaman, kategori jenis yang digunakan dapat berupa spesies, genera, family atau kategori lainnya. Shannon-Wiener (1949), indeks keanekaragaman (H') dapat dihitung dengan menggunakan nilai proporsi jumlah individu masing-masing jenis terhadap keseluruhan organisme yang diperoleh, dengan menggunakan formula berikut:

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i * \ln p_i$$

Keterangan:

H' : Indeks Keanekaragaman

p_i : Proporsi jumlah individu (n_i/N)

n_i : jumlah individu dari spesies ke- i

N : jumlah individu dari keseluruhan spesies

Berikut adalah kategori tingkat keanekaragaman berdasarkan nilai yang diperoleh:

Tabel 8. Kategori nilai indeks keanekaragaman Shannon-Wiener (H')

Sumber	Kisaran	Kategori
Shantala et al., 2009	0,0 – 1,0	Sangat rendah
	1,0 – 2,0	Rendah
	2,0 – 3,0	Sedang
	3,0 – 4,5	Tinggi
Setyobudiandy et al., 2009	$H' \leq 2$	Rendah
	$2,0 < H' \leq 3$	Sedang
	$H' \geq 3,0$	Tinggi

B. Indeks keseragaman

Indeks keseragaman merupakan indeks yang dapat memberikan informasi terkait keseimbangan sebaran individu antar spesies. Formula yang umum digunakan untuk menghitung nilai keseragaman adalah dengan indeks keseragaman Pielou (E) yang dihitung dengan membandingkan nilai keanekaragaman actual (H') dengan nilai keanekaragaman maksimal (H_{max}) seperti formula berikut:

$$E = \frac{H'}{H_{max}}$$

Nilai H_{max} menunjukkan kondisi ketika seluruh spesies memiliki jumlah individu yang sama atau memiliki kelimpahan yang merata. Dalam kondisi

tersebut, maka nilai keanekaragaman maksimum dapat dihitung dengan menggunakan:

$$H_{max} = \ln S$$

Sehingga rumus indeks keseragaman dapat dituliskan menjadi berikut:

$$E = \frac{H'}{\ln S}$$

Keterangan:

E : Indeks keseragaman Pielou

H' : Indeks keanekaragaman

H_{max} : Keanekaragaman maksimum

S : Jumlah spesies yang ditemukan

Nilai indeks keseragaman berkisar antara 0 – 1 dan dapat menunjukkan tingkat keseragaman antarspesies dengan kategori berikut,

Tabel 9. Kategori nilai indeks keseragaman Pielou

Kisaran	Kategori
$0,00 < E \leq 0,50$	Komunitas dalam kondisi tertekan
$0,50 < E \leq 0,75$	Komunitas dalam kondisi labil
$0,75 < E \leq 1,00$	Komunitas dalam kondisi stabil

Sumber: Setyobudiandy *et al.* (2009)

C. Indeks dominansi (D)

Indeks dominansi (D) merupakan salah satu indeks dalam analisis struktur komunitas yang berikan gambaran terkait tingkat konsentrasi atau dominasi

suatu spesies dalam komunitas. Pada umumnya perhitungan indeks ini menggunakan formula Simpson dengan memanfaatkan data jumlah individu organisme yang ditemukan dengan formula berikut:

$$D = \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right)^2$$

Keterangan:

D : Indeks dominansi

n_i : jumlah individu spesies ke-i

N : jumlah individu dari seluruh spesies

Kisaran nilai indeks dominansi berkisar antara 0-1 dengan nilai D semakin tinggi menunjukkan tingkat dominansi yang juga semakin tinggi. Berikut kategori dominansi berdasarkan nilai indeks dominansi,

Tabel 10. Kategori indeks dominansi

Kisaran	Kategori
$0,00 < D \leq 0,50$	Rendah
$0,50 < D \leq 0,75$	Sedang
$0,75 < D \leq 1,00$	Tinggi

Sumber: Setyobudiandy *et al.*, 2009

Nilai ketiga indeks tersebut dapat saling melengkapi dalam analisis struktur komunitas. Secara umum, komunitas yang memiliki indeks keanekaragaman (H') yang tinggi cenderung diikuti

dengan nilai keseragaman (E) tinggi dan dominansi (D) yang rendah. Kondisi tersebut terjadi ketika jumlah individu relatif merata pada berbagai spesies dalam komunitas. Sebaliknya, apabila nilai kelimpahan dari satu atau beberapa spesies jauh lebih tinggi, maka distribusi menjadi tidak merata yang menyebabkan nilai keseragaman (E) menurun dan nilai dominansi (D) meningkat yang umumnya diikuti dengan penurunan nilai keanekaragaman.

BAB III

DINAMIKA DAN INTERAKSI EKOSISTEM

➤ Interaksi dan Keterkaitan Antar Ekosistem Pesisir

Hubungan Fungsional Mangrove–Lamun–Terumbu Karang (MLT)

Hutan mangrove, padang lamun, dan terumbu karang (MLT) bukanlah tiga ekosistem yang berdiri sendiri, melainkan satu kesatuan fungsional yang saling menopang melalui aliran materi, energi, dan migrasi biota. Keterhubungan ini menciptakan stabilitas ekologis yang jauh melampaui kapasitas masing-masing ekosistem jika beroperasi secara terpisah.

Ketiga ekosistem ini membentuk jaringan aliran biogeokimia yang kompleks, di mana nutrien, bahan organik, dan partikel sedimen bergerak melintasi batas habitat dan menciptakan kondisi yang memungkinkan kehidupan di ekosistem tetangga. Mangrove menyaring dan menyerap kelebihan nutrien serta sedimen dari aliran sungai sebelum mencapai laut, sehingga menjaga kualitas air yang dibutuhkan lamun dan karang. Lamun, dengan sistem perakarannya yang rapat, menstabilkan sedimen dan menjernihkan air di sekitarnya, menciptakan kondisi cahaya yang optimal bagi fotosintesis *zooxanthellae* pada karang. Sebaliknya, terumbu karang meredam energi gelombang dan arus, menciptakan perairan yang tenang bagi pertumbuhan lamun dan mangrove.

Ketiga ekosistem bekerja secara sinergis memberikan perlindungan fisik sebagai infrastruktur alami yang saling memperkuat. Terumbu karang berfungsi sebagai pemecah gelombang pertama yang meredam energi laut terbuka, sehingga mengurangi tekanan hidrodinamika yang mencapai padang lamun dan mangrove di belakangnya. Mangrove dan lamun kemudian menstabilkan sedimen, mencegah erosi, dan menahan partikel tersuspensi agar tidak mengendap di terumbu karang. Sebagai contoh di Clungup Mangrove *Conservation*, Malang Selatan, terumbu karang, lamun, dan mangrove masing-masing mereduksi tinggi gelombang signifikan sebesar 41,6–57,5%, 15,0–20,5%, dan 40,0–70,9%, dengan reduksi fluks energi kumulatif mencapai 91,5% saat bekerja bersinergi.

Keterhubungan biologis melalui migrasi biota merupakan jalur penting yang menghubungkan ketiga ekosistem dalam satu siklus hidup yang utuh. Banyak spesies ikan karang dan invertebrata laut menggunakan mangrove dan padang lamun sebagai daerah asuhan (*nursery ground*) pada fase juvenil, kemudian bermigrasi ke terumbu karang saat dewasa untuk mencari makan dan memijah. Sebaliknya, larva dari populasi ikan dewasa di terumbu karang sering diekspor kembali ke lamun dan mangrove untuk menyelesaikan tahap awal kehidupannya. Misal di Indonesia keberadaan mangrove dan lamun secara signifikan memengaruhi kelimpahan dan keanekaragaman ikan karang, menegaskan bahwa

konservasi terumbu karang tidak dapat dipisahkan dari perlindungan ekosistem pesisir di sekitarnya.

Kesehatan masing-masing ekosistem dalam jaringan MLT bergantung pada kesehatan ekosistem lainnya; degradasi pada satu komponen akan merambat ke seluruh sistem melalui rantai dampak yang saling terkait. Hilangnya mangrove menghilangkan fungsi penyaringan nutrisi, sehingga kelebihan nutrisi mencapai lamun dan karang dan memicu eutrofikasi serta pertumbuhan makroalga yang menyaingi karang. Fragmentasi padang lamun mengganggu stabilisasi sedimen dan aliran bahan organik, yang berdampak pada karang di sekitarnya. Sebaliknya, kerusakan terumbu karang menghilangkan perlindungan fisik terhadap gelombang dan arus, meningkatkan erosi dan sedimentasi yang merusak lamun dan mangrove. Keterkaitan ini menjadikan pendekatan konservasi berbasis lanskap laut (*seascape-wide*) sebagai keharusan, bukan pilihan.

Pemahaman tentang hubungan fungsional MLT memiliki implikasi langsung bagi strategi konservasi dan pengelolaan pesisir di Indonesia. Pengelolaan kawasan konservasi perairan yang hanya berfokus pada satu ekosistem, misalnya hanya terumbu karang atau hanya mangrove, maka akan gagal mempertahankan fungsi ekologis secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengelolaan terpadu yang mempertimbangkan konektivitas hidrodinamika, aliran biogeokimia, dan migrasi biota antar habitat. Sebagaimana disimpulkan oleh Earp *et al.* (2018),

keterhubungan antar ekosistem tropis merupakan kunci resiliensi mereka, dan gangguan pada keterhubungan ini dapat mempercepat degradasi skala besar yang mengancam jasa ekosistem yang sangat bernilai bagi masyarakat pesisir.

Aliran Materi dan Energi Antar Ekosistem Pesisir

Ekosistem pesisir (mangrove, padang lamun, dan terumbu karang) tidak berdiri sendiri, melainkan terhubung melalui aliran materi dan energi yang mengalir melintasi batas habitat, menciptakan satu kesatuan fungsional yang disebut lanskap laut (*seascape*). Aliran ini terjadi melalui berbagai jalur, diantaranya ekspor bahan organik terlarut dan partikulat, migrasi organisme, serta perpindahan nutrisi yang dibawa arus dan pasang surut. Pemahaman tentang aliran ini menjadi kunci untuk menjelaskan mengapa kesehatan satu ekosistem sangat bergantung pada kondisi ekosistem tetangganya.

Jalur utama aliran energi dari mangrove ke ekosistem pesisir lainnya adalah melalui ekspor detritus, berupa serasah daun dan material organik yang terurai dan dibawa oleh arus maupun pasang surut. Mangrove memproduksi serasah dalam jumlah besar, dan sebagian besar material ini diekspor ke perairan sekitarnya karena jaringan tumbuhan vaskular mangrove relatif resisten terhadap dekomposisi bakteri laut, sehingga terurai secara lambat dan menyediakan pasokan detritus yang

stabil bagi jaring-jaring makanan perairan. Hipotesis *outwelling* yang pertama kali diajukan Odum dan Heald (1975) sebagian besar bahan organik yang diproduksi mangrove diekspor ke habitat laut yang berdekatan, di mana ia diasimilasi oleh organisme pada dasar rantai makanan detrital. Meskipun besaran kontribusi mangrove terhadap konsumen di habitat tetangga masih diperdebatkan, nutrisi berasal mangrove dapat terdeteksi hingga jarak 10 km dari sumbernya, terutama pada konsumen yang memiliki plastisitas heterotrofik seperti karang berpolip besar dan spons.

Padang lamun berperan sebagai penghasil bahan organik sekaligus penjebak sedimen yang melindungi terumbu karang dari sedimentasi berlebih. Lamun memproduksi bahan organik dan nutrisi yang kemudian terbawa arus menuju ekosistem terumbu karang, sementara sistem perakarannya yang rapat menjebak sedimen sehingga tidak mengganggu kehidupan karang yang membutuhkan perairan jernih untuk fotosintesis *zooxanthellae*. Proses ini menciptakan kondisi lingkungan yang optimal bagi pertumbuhan karang, sekaligus menjadikan lamun sebagai penyangga (*buffer*) antara pengaruh daratan dan ekosistem terumbu karang. Selain itu, lamun juga menghasilkan sedimen karbonat melalui aktivitas alga berkapur dan epifit yang berasosiasi

dengannya, yang dalam beberapa kasus melebihi kontribusi sedimen dari terumbu karang itu sendiri.

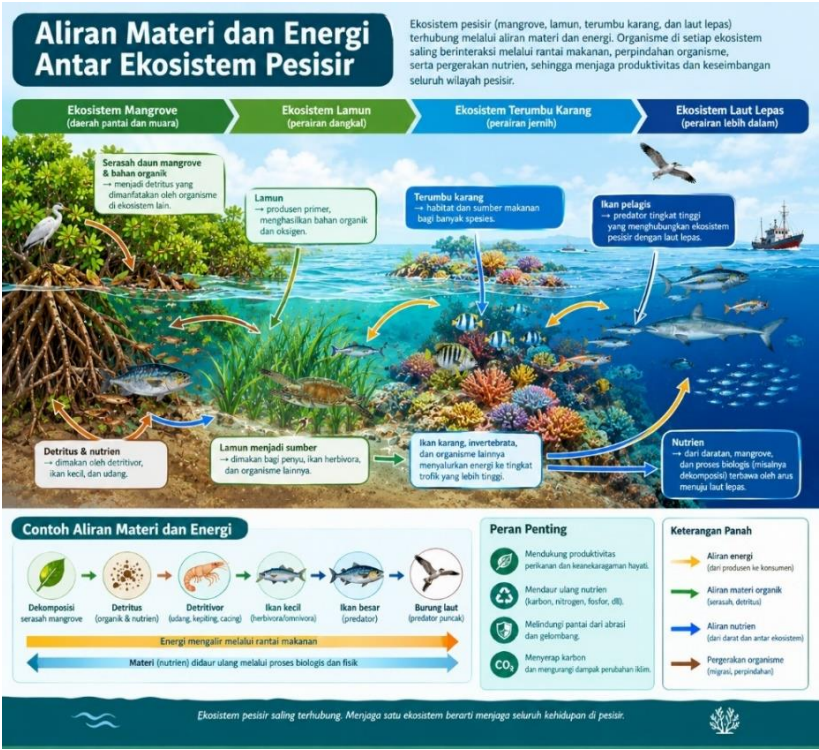
Migrasi organisme antar habitat merupakan jalur penting aliran energi yang tidak dapat diabaikan, terutama melalui migrasi harian (diel) dan migrasi ontogenetik. Ikan-ikan pemakan malam seperti *grunts* dan *snappers* bergerak dari terumbu karang tempat mereka berlindung pada siang hari menuju padang lamun untuk mencari makan pada malam hari, kemudian kembali ke karang sebelum fajar. Misal di Puerto Rico bagian barat daya transfer biomassa mangsa dari lamun ke terumbu karang mencapai 0,016 kg/km, sementara dari mangrove ke lamun mencapai 0,006 kg/km, dengan spesies pelagis seperti jacks dan sharks menyumbang 37–46% dari transportasi biomassa mangsa tersebut. Pola ini menegaskan bahwa batas antar habitat bukanlah penghalang, melainkan zona pertukaran energi yang aktif.

Migrasi ontogenetic, yaitu perpindahan organisme dari habitat asuhan ke habitat dewasa, akan menciptakan subsidi energi jangka panjang dari ekosistem pesisir ke terumbu karang. Uji coba menggunakan isotop stabil dalam otolit ikan di Tanzania (Indo-Pasifik) menunjukkan bahwa 82% dari ikan *Lethrinus harak* dewasa yang ditangkap di terumbu karang pernah menghuni mangrove (29%) atau lamun (53%) sebagai juvenil,

sementara 99% dari *Lutjanus fulviflamma* dewasa melewati mangrove pada fase juvenilnya. Mangrove dan lamun di Indo-Pasifik, termasuk Indonesia, berfungsi sebagai daerah asuhan yang menyuplai populasi ikan karang dewasa sebuah fungsi yang sebelumnya diragukan untuk wilayah ini. Dengan demikian, energi yang terakumulasi di mangrove dan lamun selama fase pertumbuhan juvenil diangkut ke terumbu karang melalui migrasi ikan dewasa, yang kemudian menjadi bagian dari biomassa yang tersedia bagi perikanan dan predator di terumbu.

Aliran materi juga mencakup ekspor nutrisi terlarut dan partikulat yang bergerak dalam pola satu arah dari daratan menuju laut, dengan mangrove sebagai sumber utama dan terumbu karang sebagai penerima akhir. Mangrove dan lamun cenderung "bocor" atau mengeksport nutrisi, sebagian dalam bentuk bahan organik terlarut (DOM) dan partikulat (POM) yang dapat menutrisi organisme terumbu. Sebagai contoh di Okinawa, Jepang, karbon anorganik terlarut (DIC) yang diekspor dari tanah mangrove selama pasang surut diasimilasi oleh lamun dan karang pembentuk terumbu di estuaria yang sama, mengindikasikan bahwa jalur karbon anorganik juga merupakan komponen penting dari konektivitas ini. Sebaliknya, terumbu karang juga mengeksport bahan organik dalam bentuk lendir (*mucus*) yang dihasilkan oleh karang, yang kemudian dibawa

arus ke perairan mangrove dan dimanfaatkan oleh zooplankton serta ikan di sana. Hal ini merupakan sebuah aliran balik yang menunjukkan bahwa konektivitas ini bersifat dua arah meskipun volume ekspor dari mangrove dan lamun umumnya lebih besar.

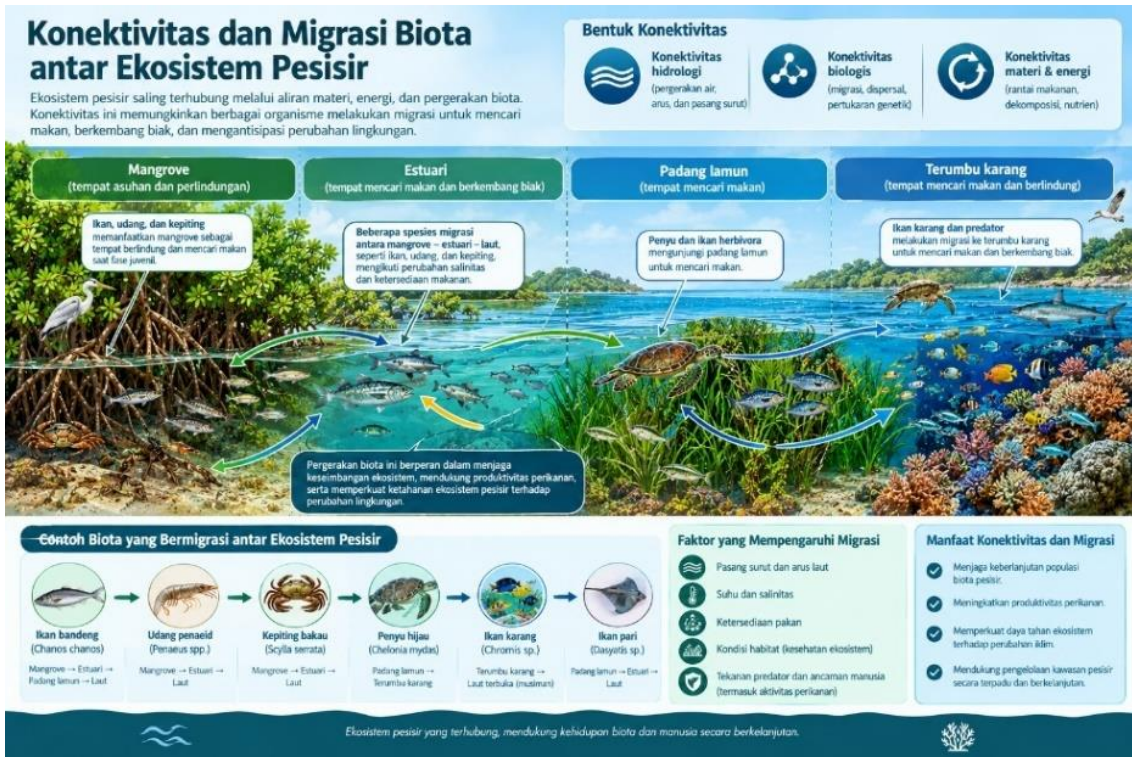


Gambar 26. Aliran Materi dan Energi antar Ekosistem Pesisir

Dengan demikian, aliran materi dan energi antar ekosistem pesisir merupakan jaringan kompleks yang mencakup jalur detrital, migrasi organisme, dan pertukaran nutrisi terlarut. Keterhubungan ini menegaskan bahwa konservasi ekosistem pesisir tidak dapat dilakukan secara terpisah-pisah, melainkan memerlukan pendekatan pengelolaan berbasis lanskap laut yang mempertahankan konektivitas hidrodinamika dan biologis antar habitat.

Konektivitas dan Migrasi Biota antar Ekosistem Pesisir

Konektivitas dan migrasi biota antar ekosistem pesisir (mangrove, padang lamun, dan terumbu karang) merupakan mekanisme fundamental yang menjaga produktivitas perikanan, keanekaragaman hayati, dan stabilitas ekosistem di lanskap laut tropis. Tanpa konektivitas ini, masing-masing ekosistem akan kehilangan fungsi ekologisnya yang paling bernilai.



Gambar 27. Konektivitas dan Migrasi Biota antar Ekosistem Pesisir

Migrasi ontogenetik, yaitu perpindahan organisme dari habitat asuhan ke habitat dewasa seiring pertambahan usia, merupakan bentuk konektivitas biologis yang paling terdokumentasi dengan baik dalam literatur ekologi pesisir. Uji coba menggunakan isotop stabil dalam otolit ikan di Tanzania (Indo-Pasifik) menunjukkan bahwa 82% dari ikan *Lethrinus harak* dewasa yang ditangkap di terumbu karang pernah menghuni mangrove (29%) atau lamun (53%) sebagai juvenil, sementara 99% dari *Lutjanus fulvivittatus* dewasa melewati mangrove pada fase juvenilnya. Mangrove Indo-Pasifik, termasuk Indonesia, berfungsi sebagai daerah asuhan yang menyuplai populasi ikan karang dewasa yang sebuah fungsi yang sebelumnya diragukan untuk wilayah ini. Sebagai contoh di Laut Merah menggunakan analisis asam amino spesifik dalam otolit menemukan bahwa *Lutjanus ehrenbergii* melakukan migrasi ontogenetik hingga lebih dari 30 km dari habitat asuhan ke terumbu karang, dengan konfigurasi lanskap laut memainkan peran penting dalam menentukan tingkat konektivitas fungsional.

Konektivitas tidak hanya terjadi satu arah dari habitat asuhan ke terumbu karang, tetapi juga melalui migrasi harian (diel) yang menciptakan aliran energi dua arah antar habitat. Ikan-ikan pemakan malam seperti *grunts* dan *snappers* bergerak dari terumbu karang tempat

mereka berlindung pada siang hari menuju padang lamun untuk mencari makan pada malam hari, kemudian kembali ke karang sebelum fajar. Misal di Puerto Rico bagian barat daya transfer biomassa mangsa dari lamun ke terumbu karang mencapai 0,016 kg/km, sementara dari mangrove ke lamun mencapai 0,006 kg/km, dengan spesies pelagis seperti jacks dan sharks menyumbang 37–46% dari transportasi biomassa mangsa tersebut. Pola ini menegaskan bahwa batas antar habitat bukanlah penghalang, melainkan zona pertukaran energi yang aktif dan dinamis.

Konektivitas biogeokimia, yaitu aliran materi non-hidup seperti nutrisi, bahan organik, dan partikel sedimen antar habitat, merupakan komponen konektivitas yang relatif kurang diteliti namun sangat penting bagi stabilitas ekosistem pesisir. Mangrove dan lamun memproduksi detritus dalam jumlah besar yang diekspor ke ekosistem tetangga, dengan jaringan tumbuhan vaskular keduanya relatif resisten terhadap dekomposisi bakteri laut sehingga terurai secara lambat dan menyediakan pasokan detritus yang stabil bagi jaring-jaring makanan perairan. Aliran nutrisi ini menciptakan efek penyangga yang melindungi terumbu karang dari eutrofikasi; mangrove menyaring kelebihan nutrisi dari aliran sungai sebelum mencapai laut, sehingga menjaga keseimbangan antara karang dan

makroalga. Sebaliknya, fragmentasi salah satu habitat dapat memicu efek degradasi berantai pada habitat lain karena hilangnya efek fasilitatif ini.

Konektivitas genetik melalui penyebaran larva merupakan mekanisme jangka panjang yang menjaga aliran gen antar populasi dan memastikan pemulihan ekosistem setelah gangguan. Genetika populasi karang di Indonesia menemukan bahwa meskipun populasi karang terdifferentiasi secara signifikan di seluruh kepulauan, tingkat struktur genetiknya jauh lebih rendah dibandingkan takson lain, mengindikasikan bahwa penyebaran jarak jauh tetap terjadi dan menjaga konektivitas di seluruh nusantara. Model biofisik menunjukkan bahwa perilaku berkelompok (*schooling*) larva ikan dapat meningkatkan tingkat penempelan larva sekaligus mengurangi persentase koneksi yang terwujud, menyoroti pentingnya perilaku larva dalam menentukan pola konektivitas skala halus. Di Indonesia juga konektivitas mangrove-karang memberikan efek positif yang signifikan terhadap kelimpahan ikan karang, dengan kombinasi konektivitas, tutupan karang, dan habitat mozaik menjelaskan 58,7% variasi komunitas ikan.

Kerangka konseptual konektivitas lanskap laut (*seascape connectivity*) telah berkembang dari sekadar deskripsi pola menjadi alat prediktif yang mengintegrasikan hidrodinamika, perilaku organisme, dan

genetika populasi. *Seascape genetics*, yang secara konseptual terkait dengan *landscape genetics*, mempelajari bagaimana fitur struktural dan lingkungan yang bervariasi secara spasial memengaruhi pola genetik organisme laut, dengan arus laut sebagai fitur pembeda utama dari sistem terestrial. Model konektivitas menggunakan data ekologi seperti pola kehadiran, kelimpahan, dan penggunaan habitat untuk mengembangkan "permukaan resistensi" yang menggambarkan probabilitas relatif pergerakan hewan melalui fitur lanskap laut yang berbeda. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi koridor konektivitas yang perlu dilindungi dalam jaringan kawasan konservasi perairan, serta prediksi dampak perubahan penggunaan lahan terhadap konektivitas biologis.

Implikasi dari pemahaman konektivitas dan migrasi biota ini sangat signifikan bagi strategi konservasi di Indonesia, di mana fragmentasi habitat pesisir terus berlangsung akibat pembangunan dan perubahan penggunaan lahan. Kawasan konservasi yang hanya melindungi satu ekosistem, misalnya hanya terumbu karang atau hanya mangrove, akan gagal mempertahankan fungsi ekologis secara keseluruhan, karena organisme yang bermigrasi antar habitat akan tetap rentan selama fase hidupnya di habitat yang tidak terlindungi. Konservasi mozaik habitat, yang mencakup

mangrove, lamun, dan terumbu karang secara bersamaan, merupakan prioritas utama untuk keberlanjutan populasi ikan Indo-Pasifik. Di Indonesia, keberadaan dan kedekatan jarak antara mangrove dan terumbu karang memfasilitasi komposisi spesies ikan yang berbeda dibandingkan habitat terumbu karang yang terisolasi, menegaskan bahwa konektivitas mangrove-karang harus dipertahankan untuk mempertahankan keanekaragaman hayati dan produktivitas perikanan.

➤ **Dinamika Ekosistem Pesisir dalam Menghadapi Perubahan**

Perubahan Iklim dan Dampaknya terhadap Ekosistem Pesisir

Perubahan iklim telah menjadi ancaman eksistensial bagi ekosistem pesisir Indonesia, dengan dampak yang terukur dan semakin meningkat pada mangrove, padang lamun, dan terumbu karang di seluruh nusantara. Kenaikan suhu permukaan laut merupakan dampak iklim yang paling terdokumentasi dan berdampak langsung pada ekosistem terumbu karang. Data pemantauan jangka panjang dari 394 situs permanen di 32 lokasi di Indonesia menunjukkan bahwa suhu permukaan laut telah meningkat secara signifikan selama empat dekade terakhir (1985–2023), dengan laju pemanasan berkisar 0,12 hingga 0,28°C per dekade, dan Indonesia bagian timur

mengalami pemanasan lebih cepat dibandingkan wilayah barat. Proyeksi iklim menunjukkan bahwa suhu permukaan laut Indonesia akan terus meningkat sebesar 0,20–0,30°C per dekade, mencapai kenaikan 1,0–1,5°C pada tahun 2100 di bawah skenario emisi tinggi. Ketika karang terpapar akumulasi panas yang berkepanjangan melebihi suhu musim panas rata-rata sebesar 1°C atau lebih, *zooxanthellae* simbiotik dikeluarkan dari sel karang dalam proses yang dikenal sebagai pemutihan, yang mengurangi perolehan energi dan pada akhirnya menyebabkan kematian karang. Peristiwa El Niño menjadi pendorong utama anomali suhu permukaan laut yang memicu pemutihan massal, dan pemutihan karang tercatat terjadi pada 1983/84, 1997/98, 2010, dan 2016.

Gelombang panas laut (*marine heatwaves*) yang semakin sering dan berkepanjangan menjadi ancaman yang lebih intensif bagi terumbu karang Indonesia. Proyeksi menunjukkan bahwa peristiwa gelombang panas laut yang pada periode 1991–2020 hanya bersifat sporadis (2–5 hari per tahun) akan menjadi tahunan hingga semi-tahunan pada tahun 2050, dan dapat melebihi 25 hari per tahun pada tahun 2100. Sebagai contoh di perairan barat daya Sulawesi Selatan menemukan bahwa frekuensi, durasi total, dan durasi rata-rata gelombang panas laut meningkat sekitar sepuluh kali lipat, 18,4 kali lipat, dan dua kali lipat pada dekade

terakhir (2012–2021) dibandingkan dekade pertama (1982–1991). Uji coba selama dua dekade terhadap terumbu karang Indonesia mengungkapkan bahwa tutupan karang keras relatif stabil di sebagian besar lokasi (26 dari 32), namun stabilitas ini memiliki batas kritis berupa tutupan karang turun tajam ketika akumulasi stres termal melampaui ambang batas sekitar 12 *degree-heating weeks* (DHW). Selain stres panas, anomali pendinginan juga merupakan ancaman yang belum banyak dipantau melalui peristiwa Dipol Samudra Hindia positif (pIOD) menyebabkan pendinginan kuat akibat upwelling di lepas pantai Jawa dan Sumatra, dan paparan air dingin yang anomali juga dapat menyebabkan pemutihan serta kematian karang.

Peningkatan konsentrasi karbon dioksida atmosfer juga memicu pengasaman laut (*ocean acidification*) yang mengancam kemampuan karang dan organisme bercangkang untuk membentuk struktur kalsium karbonat. Pada tahun 2020, dunia telah melampaui batas aman pengasaman laut, dengan 40% permukaan laut dan 60% perairan hingga kedalaman 200 m melewati ambang batas planet. Habitat yang sesuai bagi karang yang masih terdapat cukup aragonit untuk mendukung pembentukan kerangka telah menyusut sekitar 43%. Proyeksi menunjukkan bahwa pada tahun 2100, hingga 90% perairan laut Eropa barat laut akan mengalami

undersaturasi kalsium karbonat selama setidaknya satu bulan setiap tahun, menciptakan kondisi di mana karang dan organisme bercangkring kesulitan membentuk atau mempertahankan struktur mereka. Pengasaman laut berdampak pada organisme melalui efek fisiologis langsung dari perubahan pH dan kadar CO₂, serta efek tidak langsung melalui gangguan jaring-jaring makanan.

Dampak perubahan iklim terhadap ekosistem pesisir Indonesia juga mencakup perubahan pola sirkulasi laut dan produktivitas primer yang memengaruhi distribusi perikanan. Proyeksi menunjukkan bahwa Arus Lintas Indonesia (*Indonesian Throughflow*) akan menguat, mengubah fluks nutrisi dan produktivitas primer di Laut Banda dan Arafura. Pergeseran ini akan memengaruhi distribusi perikanan, produktivitas plankton, dan dinamika siklus karbon di seluruh Zona Ekonomi Eksklusif Indonesia. Pemodelan menunjukkan bahwa perubahan waktu bloom fitoplankton meningkatkan risiko ketidaksesuaian temporal antara musim pemijahan ikan dan ketersediaan makanan, yang dapat menyebabkan kegagalan rekrutmen ikan. Hilangnya biodiversitas laut pada akhirnya mengancam resiliensi ekosistem laut, dengan konsekuensi lanjutan pada penyediaan jasa ekosistem.

Respons adaptasi dan mitigasi yang terintegrasi menjadi kunci untuk mengurangi kerentanan ekosistem pesisir Indonesia terhadap perubahan iklim. Proyek pembangunan sabuk mangrove sepanjang 6 km di Pekalongan, Jawa Tengah, menunjukkan bagaimana mangrove berfungsi sebagai infrastruktur alami yang melindungi dari banjir pesisir, membangun resiliensi komunitas, dan memberikan manfaat ekonomi melalui ekowisata serta sumber pewarna alami untuk industri batik. Pendekatan *Spatial Planning-Based Ecosystem Adaptation* (SPBEA) yang diterapkan di pantai utara Jawa Tengah mengintegrasikan pemetaan ilmiah, restorasi ekosistem, dan perencanaan partisipatif untuk memperkuat resiliensi iklim, dengan hasil awal menunjukkan akumulasi sedimen dan stabilisasi garis pantai di lokasi restorasi. IPCC menegaskan bahwa kemampuan beradaptasi terhadap dampak pesisir saat ini, mengatasi risiko pesisir di masa depan, dan mencegah percepatan kenaikan muka air laut lebih lanjut bergantung pada implementasi tindakan mitigasi dan adaptasi yang segera. Manajemen yang menghilangkan penangkapan ikan berlebihan memfasilitasi adaptasi perikanan yang berhasil terhadap perubahan iklim, dan tata kelola inklusif yang mengakomodasi pergeseran geografis kehidupan laut serta menggabungkan bukti ilmiah, pengetahuan adat, dan pengetahuan lokal menunjukkan janji terbesar untuk

mengurangi kerentanan manusia terhadap semua perubahan yang diproyeksikan dalam jasa ekosistem laut dan pesisir.

Kenaikan Muka Air Laut dan Abrasi Pantai

Kenaikan muka air laut di Indonesia bukan sekadar fenomena global, melainkan ancaman nyata yang diperparah oleh penurunan muka tanah lokal yang jauh lebih cepat, menciptakan krisis pesisir yang bersifat sistemik dan mendesak. Pemodelan data altimetri di Pantura Jawa menunjukkan tren kenaikan muka air laut rata-rata 0,41–0,42 sentimeter per tahun, mengakumulasi kenaikan hingga 15,5 sentimeter dalam kurun waktu 32 tahun (1993–2025). Namun, angka ini menjadi jauh lebih berbahaya ketika dikombinasikan dengan amblesan tanah: laju penurunan muka tanah tertinggi tercatat di Demak sebesar 16 cm per tahun, disusul Jakarta (15 cm/tahun), Sidoarjo (14 cm/tahun), dan Pekalongan (11 cm/tahun). Di koridor pesisir Jakarta-Bekasi, penurunan muka tanah yang mencapai puncaknya 11,2 cm per tahun bertanggung jawab atas 82% varians dalam perluasan genangan pesisir, menjadikan kenaikan muka air relatif jauh lebih destruktif daripada rata-rata eustatik global.

Kenaikan muka air laut (*sea level rise*) mengancam keberadaan ekosistem mangrove dan padang lamun melalui penggenangan permanen dan salinisasi. Proyeksi

iklim Indonesia menunjukkan bahwa laju kenaikan muka air laut meningkat dari 4,3 mm/tahun (historis) menjadi sekitar 6 mm/tahun pada pertengahan abad, menghasilkan kenaikan kumulatif 0,25–0,35 m pada tahun 2050 dan 0,60–0,70 m pada tahun 2100 di bawah skenario emisi tinggi. Indonesia bagian timur, seperti Papua, Maluku, dan Nusa Tenggara telah diidentifikasi sebagai titik panas kenaikan muka air laut yang persisten, sementara Jawa bagian utara mengalami risiko gabungan terbesar ketika penurunan tanah lokal diperhitungkan. IPCC memproyeksikan bahwa pada tahun 2050, sebagian besar terumbu karang dan mangrove tidak akan mampu mengimbangi laju kenaikan muka air laut, dengan dampak ekologis yang meningkat pesat setelah tahun 2050, terutama pada skenario yang menggabungkan emisi tinggi dengan pembangunan pesisir yang agresif.

Abrasi pantai di Indonesia telah mencapai proporsi krisis di wilayah-wilayah pesisir yang paling padat penduduk dan paling strategis secara ekonomi. Perubahan garis pantai menggunakan Citra Satelit Sentinel selama periode 2000–2024 mengungkapkan bahwa 65,8% dari total garis Pantai Utara Jawa mengalami erosi, sementara hanya 34,2% yang mengalami akresi. Wilayah Pantura Jawa yang membentang dari Serang, Banten hingga Situbondo, Jawa Timur merupakan tulang punggung perekonomian nasional yang kini menghadapi

krisis nyata. Peneliti BRIN mencatat bahwa 84% Pantai Utara Jawa tersusun oleh endapan aluvial dan delta yang belum terkonsolidasi dengan kuat, sehingga sangat mudah mengalami erosi dan pemampatan. Morfologi pantai yang didominasi relief rendah dengan elevasi kurang dari 10 meter yang mencakup 83% dari panjang seluruh Pantura Jawa semakin memperparah kerentanan wilayah ini terhadap abrasi.

Akar penyebab abrasi di Indonesia tidak semata-mata bersifat iklim, melainkan sangat dipengaruhi oleh modifikasi antropogenik yang memutus suplai sedimen alami. Erosi masif justru terjadi di lingkungan delta yang secara alami merupakan area sedimentasi yang merupakan sebuah anomali yang berkaitan erat dengan aktivitas di daerah hulu seperti kanalisasi, pembelokan arah sungai, dan pembangunan bendungan yang memutus suplai sedimen ke wilayah muara. Dampaknya terlihat nyata di lapangan: di Tanjung Pontang, Serang, daratan seluas 1,72 Km telah lenyap akibat erosi yang disebabkan pembelokan aliran Sungai Ciujung Baru. Di Pantai Bahagia, Muara Gembong, Bekasi, air laut merangsek masuk hingga 4 Km ke daratan, menenggelamkan infrastruktur publik secara permanen dan merendam lebih dari 1.000 Ha tambak milik masyarakat. Kondisi serupa melanda Legonkulon, Subang, dengan intrusi air laut sejauh 2 Km merendam 700 Ha tambak,

serta abrasi yang mengerosi jalan desa sepanjang 500 m hingga 1 Km di Krangkeng, Indramayu.

Proyeksi ke depan menunjukkan bahwa abrasi dan genangan akan terus memburuk secara signifikan tanpa intervensi adaptasi yang sistemik, dengan dampak yang bersifat kumulatif dan mengancam keberlanjutan wilayah pesisir. Pemodelan jangka panjang untuk Kabupaten Demak memproyeksikan peningkatan luas genangan yang sangat dramatis dari 3.735,58 Ha pada tahun 2025 menjadi 37.772,04 Ha pada tahun 2100 yang merupakan peningkatan sebesar 911,1% dalam kurun waktu 75 tahun dengan kontribusi penurunan tanah mendominasi 79–83% dari total kenaikan muka air relatif. Proyeksi kehilangan pantai terbesar terjadi di Distrik Balikpapan Selatan Kalimantan Timur, sementara area genangan banjir maksimum (6.643,4 Ha) diproyeksikan terjadi di bawah skenario SSP5-8.5 untuk tahun 2150. Kebutuhan mendesak akan strategi adaptasi yang memadukan mitigasi struktural, restorasi ekosistem pesisir, dan pengendalian pengambilan air tanah untuk mengurangi laju penurunan tanah.

Pencemaran dan Eutrofikasi di Wilayah Pesisir

Pencemaran dan eutrofikasi di wilayah pesisir Indonesia merupakan persoalan yang saling terkait erat, di mana masukan nutrisi berlebih dari aktivitas antropogenik,

terutama dari pertanian, akuakultur, dan limbah domestik yang memicu ledakan populasi fitoplankton yang pada akhirnya menguras oksigen terlarut dan mengancam kehidupan biota laut. Eutrofikasi bukan sekadar fenomena “air menjadi subur”, melainkan gangguan keseimbangan biogeokimia yang merambat ke seluruh jaring-jaring makanan pesisir.

Sumber utama pencemaran nutrisi di perairan pesisir Indonesia berasal dari limpasan pertanian dan aktivitas akuakultur intensif. Data dari wilayah Indonesia bagian barat menunjukkan bahwa Kalimantan Selatan secara konsisten mencatat limbah akuakultur tertinggi (>30.000 ton per tahun sejak 2020), diikuti Kalimantan Barat (20.000–22.000 ton/tahun), yang mencerminkan intensitas budidaya tambak dan keramba dengan efisiensi konversi pakan yang rendah. Sekitar 25% dari total pakan yang diberikan dalam akuakultur dilepaskan sebagai limbah organik ke lingkungan perairan, menyumbang pengayaan nutrisi yang signifikan. Sementara itu, penggunaan pupuk menunjukkan volume tertinggi yang mencerminkan besarnya tekanan nutrisi dari sektor pertanian ke perairan pesisir.

Dampak eutrofikasi paling dramatis terlihat pada fenomena ledakan alga berbahaya (*harmful algal blooms*/HAB) yang semakin sering terjadi di teluk-teluk pesisir Indonesia. Tiga teluk yang paling parah terdampak

adalah Teluk Jakarta, Teluk Lampung, dan Teluk Ambon, dengan spesies penyebab ledakan yang bersifat toksik terutama dari kelompok dinoflagellata seperti *Pyrodinium* sp., *Aleandrium* sp., *Gymnodinium* sp., dan *Cochlodinium* sp., serta spesies yang paling sering memicu ledakan seperti *Skeletonema*, *Chaetoceros*, *Trichodesmium*, dan *Noctiluca*. Nitrat dan fosfat menjadi faktor pendorong utama yang berasal dari aktivitas antropogenik di daratan, yang membuat perairan pesisir menjadi eutrofik. Di Teluk Lampung, bencana ledakan alga pertama dilaporkan pada tahun 1991 yang menyebabkan kematian massal udang budidaya akibat ledakan *Trichodesmium*, dan sejak itu fenomena serupa terus berulang dengan spesies *Cochlodinium* yang muncul secara berkelanjutan sejak akhir 2012.

Konsekuensi eutrofikasi terhadap ekosistem pesisir bersifat berantai, dimulai dari penurunan kualitas air hingga kerusakan habitat kritis. Ketika fitoplankton yang melimpah mati, dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme mengonsumsi oksigen terlarut dalam jumlah besar, menciptakan kondisi hipoksia atau bahkan anoksia di perairan dasar. Kondisi ini dapat menyebabkan kematian massal ikan dan invertebrata, serta mengubah struktur komunitas bentik secara permanen. Selain itu, pengayaan nutrisi merangsang pertumbuhan makroalga yang dapat menutupi karang dan lamun, menghalangi

cahaya yang diperlukan untuk fotosintesis, dan pada akhirnya memicu pergeseran fase (*phase shift*) dari ekosistem yang didominasi karang menjadi ekosistem yang didominasi alga.

Eutrofikasi juga memperparah kerentanan ekosistem pesisir terhadap tekanan lain, seperti penyakit dan perubahan iklim, menciptakan efek sinergis yang mempercepat degradasi. Peningkatan kelimpahan patogen mikroba di perairan tropis, yang dikombinasikan dengan eutrofikasi, berpotensi meningkatkan insiden penyakit infeksius pada padang lamun dan spesies yang berasosiasi dengannya. Di Teluk Jakarta, tumpukan limbah cangkang kerang hijau yang mencapai 1–4 ton/hari terurai dan melepaskan nutrisi dalam jumlah besar, yang sangat berpotensi memicu eutrofikasi dan penurunan drastis oksigen terlarut pada malam hari, bahkan dapat menyebabkan kematian massal biota air. Cangkang dan daging kerang di Teluk Jakarta juga terdeteksi mengandung logam berat berbahaya seperti merkuri, timbal, kadmium, tembaga, kromium, dan seng, yang dapat terserap oleh mangrove dan berpindah ke biota lain melalui biomagnifikasi.

Dengan demikian, pencemaran dan eutrofikasi di wilayah pesisir Indonesia merupakan krisis lingkungan yang bersifat sistemik, memerlukan pendekatan pengelolaan terpadu yang mencakup pengendalian

sumber nutrisi dari hulu, perbaikan teknologi akuakultur, pengelolaan limbah domestik, serta pemantauan kualitas air yang berkelanjutan. Tanpa intervensi yang terkoordinasi, eutrofikasi akan terus menggerus produktivitas perikanan, keanekaragaman hayati, dan jasa ekosistem pesisir yang menjadi tumpuan hidup jutaan masyarakat Indonesia.

Degradasi Habitat Akibat Perubahan Penggunaan Lahan

Degradasi habitat pesisir Indonesia akibat perubahan penggunaan lahan merupakan proses sistemik yang paling dominan didorong oleh konversi mangrove menjadi tambak, diperparah oleh pembangunan infrastruktur pesisir, dan dipercepat oleh lemahnya tata kelola serta penegakan hukum. Konversi mangrove menjadi tambak merupakan penyebab utama degradasi habitat pesisir di hampir seluruh wilayah Indonesia, dengan pola yang konsisten dari barat hingga timur. Data Kementerian Kehutanan periode 2023–2025 menunjukkan bahwa alih fungsi mangrove menjadi tambak di Provinsi Gorontalo merupakan faktor paling dominan dalam penurunan luas hutan mangrove. Misal di Aceh Tamiang, analisis citra satelit resolusi tinggi mengungkapkan kehilangan 379,65 Ha tutupan mangrove antara tahun 2020–2024, dengan lebih dari 99% deforestasi terjadi di

zona hutan produksi, terutama akibat konversi untuk akuakultur dan perkebunan kelapa sawit. Konversi ini tidak hanya menghilangkan vegetasi, tetapi juga mengubah karakteristik tanah secara permanen: di Banten ditemukan konversi mangrove menjadi tambak mengakibatkan kehilangan karbon tanah berkisar antara 6% hingga 60%, dengan cadangan karbon total pada tambak *non-silvofishery* hanya 261 Mg C/ha dibandingkan 574 Mg C/ha pada mangrove tepi.

Pola degradasi akibat konversi lahan tidak hanya terjadi pada mangrove, tetapi juga berdampak sistemik pada ekosistem pesisir lainnya melalui peningkatan sedimentasi dan penurunan kualitas air. Di Teluk Saleh, Nusa Tenggara Barat, alih fungsi lahan di daerah tangkapan air menyebabkan peningkatan konsentrasi sedimen secara signifikan dari tahun 2000 hingga 2018, yang mengakibatkan kerusakan habitat laut termasuk pengurangan kualitas air dan terganggunya ekosistem mangrove serta padang lamun. Sedimentasi berlebih ini berdampak langsung pada biota yang bergantung pada perairan jernih, seperti hiu paus yang populasinya terancam karena terganggunya siklus hidup plankton sebagai sumber makanannya. Uji coba dari Universitas Mataram mengonfirmasi bahwa alih fungsi lahan pesisir di Nusa Tenggara Barat telah memicu erosi yang meningkatkan kekeruhan air laut, memaksa petani

rumput laut memindahkan lokasi budidaya ke perairan yang lebih jernih. Hal ini menunjukkan indikasi langsung bahwa degradasi habitat akibat perubahan penggunaan lahan mengancam produktivitas ekonomi pesisir.

Pembangunan infrastruktur pesisir seperti reklamasi dan perluasan pelabuhan menjadi pendorong degradasi habitat yang semakin signifikan, terutama di kawasan pesisir padat penduduk. Di Pantai Utara Jawa, pembangunan pelabuhan melalui reklamasi di Romokalisari, Surabaya, telah merusak ekosistem pesisir terutama hutan mangrove. Aktivitas reklamasi dan penambangan pasir untuk proyek reklamasi di Teluk Jakarta dan Serang telah mengubah lanskap pesisir secara signifikan, meskipun setelah penambangan dihentikan pada tahun 2013, area mangrove di Serang mulai menunjukkan tanda-tanda pemulihan dari 22,41 Ha pada 2012 menjadi 30,15 Ha pada 2015. Namun, cadangan karbon di mangrove Serang jauh lebih rendah dibandingkan mangrove yang lebih matang dan terlindungi di Angke, Jakarta, menunjukkan bahwa restorasi ekosistem belum dilaksanakan secara optimal.

Lemahnya tata kelola dan penegakan hukum memperparah degradasi habitat, menciptakan kondisi di mana konversi lahan ilegal terus berlangsung tanpa konsekuensi yang berarti. Aktivitas penebangan mangrove di Maumere, Nusa Tenggara Timur untuk tambak terus berlangsung hingga kini, dengan banyak

tambak yang diduga beroperasi tanpa izin lingkungan bahkan mengantongi sertifikat hak milik di kawasan mangrove yang seharusnya dilindungi. Warga di Kelurahan Kota Uneng melaporkan bahwa dampaknya mulai terasa, antara lain banjir rob, angin kencang yang semakin berisiko, dan keharusan mengungsi saat cuaca buruk. Hal ini merupakan sebuah konsekuensi langsung dari hilangnya mangrove sebagai pelindung pesisir alami. Proyek *food estate* di Nusakambangan berupa tambak seluas 32 Ha di kawasan mangrove Gragalan, Desa Ujungalang, dilakukan tanpa sosialisasi kepada warga dan diduga menyerobot lahan yang sebelumnya dimanfaatkan masyarakat untuk bercocok tanam. Koalisi Rakyat untuk Keadilan Perikanan (Kiara) menilai proyek tambak berskala industri ini jauh dari keadilan karena diawali dengan perampasan ruang hidup pesisir.

Degradasi habitat akibat perubahan penggunaan lahan tidak hanya berdampak ekologis, tetapi juga menciptakan kerugian ekonomi dan sosial yang signifikan bagi masyarakat pesisir. Hilangnya mangrove menyebabkan hasil tangkapan nelayan seperti ikan, udang, dan kepiting semakin berkurang, karena mangrove berfungsi sebagai tempat mencari makan, pemijahan, dan pembesaran biota laut. Selain itu, habitat kepiting bakau mulai hilang akibat konversi mangrove menjadi tambak, dan masyarakat merasakan dampak berantai, berupa

produktivitas tambak menurun, air cepat keruh, penyakit ikan lebih mudah muncul, dan garis pantai makin rentan terkikis. Mangrove di kawasan yang tidak terlindungi akan mengalami pengurangan luas yang signifikan akibat konversi menjadi tambak dan pembangunan kota, sementara mangrove di kawasan konservasi akan tetap stabil. Perbedaan ini menegaskan bahwa status perlindungan dan kualitas tata kelola merupakan faktor penentu utama dalam mencegah degradasi habitat akibat perubahan penggunaan lahan.

Resiliensi dan Daya Pulih Ekosistem Pesisir

Resiliensi ekosistem pesisir Indonesia merupakan kemampuan untuk menyerap gangguan, beradaptasi, dan pulih Kembali yang bersifat kontekstual, sangat bergantung pada jenis ekosistem, tingkat tekanan kumulatif, dan intervensi pengelolaan yang diterapkan. Resiliensi ekosistem mangrove Indonesia menunjukkan variasi yang signifikan, dengan beberapa kawasan mampu pulih secara alami dalam skala dekade, sementara yang lain memerlukan intervensi aktif untuk kembali ke kondisi semula. Uji coba paleoekologi selama 8.000 tahun di Sulawesi Utara mengungkapkan bahwa mangrove telah mengalami setidaknya 18 peristiwa gangguan besar, berupa letusan gunung berapi, kebakaran, badai, tsunami, dan dampak manusia dengan waktu pemulihan penuh

berkisar antara 14 hingga 903 tahun. Mangrove di Likupang yang direstorasi sekitar tahun 2003 setelah pembukaan tambak pada 1980-an masih dalam proses pemulihan 16 tahun kemudian, namun komposisi spesiesnya sudah menunjukkan kemiripan dengan kondisi sebelum deforestasi. Sebaliknya, mangrove di Mantehage yang terpapar peristiwa seismik abad ke-14 mengalami penurunan resiliensi jangka panjang terhadap gangguan berikutnya, mengindikasikan bahwa gangguan berulang dapat melemahkan kapasitas pemulihan ekosistem secara permanen.

Kasus Kuri Caddi di Sulawesi Selatan memberikan contoh konkret bagaimana restorasi berbasis komunitas dapat memulihkan resiliensi ekosistem mangrove yang telah kolaps akibat konversi tambak. Pada 1970-an, kawasan pesisir Kuri Caddi merupakan hutan mangrove yang rapat, namun ambisi ekonomi untuk meningkatkan produksi udang menyebabkan konversi besar-besaran menjadi tambak dan merupakan sebuah “taruhan” yang gagal, sehingga meninggalkan tambak terbengkalai, kualitas air menurun, erosi pantai, dan banjir rob. Pada 2012, program rehabilitasi berbasis komunitas yang dipimpin *Blue Forest* mulai memulihkan 7 Ha tambak tidak produktif kembali menjadi ekosistem mangrove menggunakan pendekatan *Ecological Mangrove Restoration* (EMR). Hasilnya, tutupan mangrove meningkat

signifikan, komunitas lokal melaporkan berkurangnya erosi, peningkatan tangkapan kepiting dan ikan, serta banjir yang lebih jarang dan menjadi bukti bahwa pemulihan resiliensi ekosistem dan kesejahteraan masyarakat dapat berjalan bersamaan.

Resiliensi ekosistem pesisir Indonesia sangat dipengaruhi oleh tekanan lokal yang dapat dikelola; mengurangi stresor seperti pengayaan nutrisi, pembangunan pesisir, gangguan hidrologi, sedimentasi, dan penangkapan ikan merusak akan mengurangi dampak buruk perubahan iklim. Tinjauan komprehensif tentang efek perubahan iklim pada ekosistem laut dan pesisir menegaskan bahwa meskipun respons ekosistem terhadap tekanan iklim bervariasi tergantung pada komposisi spesies, interaksi, dan pengaturan geomorfologi, penanganan stresor lokal yang dapat dikelola merupakan strategi kunci untuk memperkuat resiliensi. Area rehabilitasi yang dikelola aktif memiliki tingkat pemutihan karang yang jauh lebih rendah (25,96%) dibandingkan area perlindungan laut (81,33%) meskipun terpapar suhu perairan yang serupa dan mengindikasikan bahwa kondisi lingkungan lokal serta praktik pengelolaan menentukan tingkat keparahan dampak stres termal.

Upaya restorasi ekosistem pesisir Indonesia menunjukkan tren peningkatan yang signifikan, dengan pendekatan yang semakin mengintegrasikan aspek ekologis, sosial, dan ekonomi. Data Kementerian Kelautan dan Perikanan menunjukkan capaian pemulihan kawasan pesisir meningkat dari 20 kawasan pada 2021 menjadi 98 kawasan pada 2024 melampaui target 140% melalui beragam intervensi termasuk penanaman mangrove (224,78 Ha), pembangunan sarana pengelolaan lingkungan, aksi bersih pantai, dan pengembangan karbon biru. Model *Climate Smart Shrimp* (CSS) yang dikembangkan di Desa Lalombi, Donggala, mendemonstrasikan bagaimana restorasi mangrove dapat diintegrasikan dengan budidaya udang berkelanjutan, dengan alokasi 3,5 Ha untuk mangrove dan 6,5 Ha untuk tambak intensif, serta proyeksi penyerapan karbon mencapai 7.350 ton CO₂e. Pendekatan ini menegaskan bahwa resiliensi ekosistem pesisir tidak hanya tentang pemulihan biologis, tetapi juga tentang membangun sistem sosial-ekonomi yang memungkinkan masyarakat pesisir untuk bertahan dan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan yang terus berlangsung.

BAB IV

STRATEGI PENGELOLAAN DAN KONSERVASI

➤ Prinsip dan Kebijakan Konservasi Ekosistem Pesisir

Konservasi ekosistem pesisir merupakan upaya terencana untuk melindungi, melestarikan, dan memanfaatkan sumber daya pesisir secara berkelanjutan guna menjamin keberadaan dan kesinambungan ekosistem bagi generasi kini dan mendatang. Tujuan utamanya mencakup tiga aspek, yaitu menjaga fungsi ekologis ekosistem pesisir sebagai habitat, daerah asuhan, dan pelindung pantai alami; mempertahankan keanekaragaman hayati yang menjadi fondasi stabilitas ekosistem; serta memastikan pemanfaatan sumber daya yang adil dan berkelanjutan bagi kesejahteraan masyarakat pesisir. Ruang lingkup konservasi pesisir mencakup mangrove, padang lamun, terumbu karang, estuaria, dan pantai berpasir, beserta seluruh biota yang berasosiasi dengannya.

Pendekatan konservasi dapat dilakukan melalui dua strategi utama, yaitu *in situ* dan *ex situ*. Konservasi *in situ* merupakan pendekatan prioritas yang dilakukan di habitat alami organisme, memungkinkan proses ekologis dan evolusioner berlangsung secara alami serta menjaga

keterkaitan antarspesies yang kompleks. Tumbuhan pantai *Ipomoea pes-caprae* menunjukkan bahwa komunitas fungi endofit pada tumbuhan yang hidup in situ di pantai alami berbeda secara signifikan dari tumbuhan yang ditanam ex situ di kebun raya, mengindikasikan bahwa konservasi in situ mempertahankan interaksi mikroba yang khas dan tidak tergantikan. Adapun konservasi ex situ seperti penanaman di kebun raya atau bank benih, berfungsi sebagai pelengkap dan jaring pengaman untuk spesies yang sangat terancam, namun tidak dapat menggantikan peran konservasi in situ dalam mempertahankan biodiversitas secara holistik.

Kawasan Konservasi Perairan (KKP) merupakan instrumen utama konservasi laut Indonesia, yang dikelola melalui sistem zonasi untuk menyeimbangkan perlindungan ekologis dan pemanfaatan berkelanjutan. Berdasarkan Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Nomor 31 Tahun 2020, kawasan konservasi dibagi menjadi tiga zona, yaitu Zona Inti sebagai area perlindungan penuh yang melarang segala bentuk pemanfaatan; Zona Pemanfaatan Terbatas yang mengakomodasi aktivitas perikanan tradisional, budidaya, dan ekowisata ramah lingkungan; serta Zona Lain yang disesuaikan dengan karakteristik lokal seperti zona rehabilitasi atau jalur pelayaran. Indonesia menargetkan perlindungan 30% wilayah perairan atau sekitar 97,5 juta

Ha pada tahun 2045, dengan pendekatan *Marine Protected Area* (MPA) sebagai tulang punggung dan *Other Effective Area-Based Conservation Measures* (OECM) untuk mengakui praktik konservasi berbasis masyarakat adat dan sektor swasta.

Kerangka regulasi konservasi pesisir Indonesia dibangun di atas tiga undang-undang utama yang saling melengkapi: UU No. 27 Tahun 2007 tentang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (sebagaimana diubah dengan UU No. 1 Tahun 2014) yang mengatur Kawasan Konservasi WP3K; UU No. 31 Tahun 2004 tentang Perikanan (diubah dengan UU No. 45 Tahun 2009) yang menjadi dasar Kawasan Konservasi Perairan; serta UU No. 32 Tahun 2014 tentang Kelautan yang mengatur Kawasan Konservasi Laut. Implementasi kebijakan ini diperkuat melalui Peraturan Menteri KP No. 31 Tahun 2020 tentang Pengelolaan Kawasan Konservasi serta berbagai NSPK (Norma, Standar, Prosedur, dan Kriteria) yang disusun untuk memastikan pengelolaan kawasan berjalan efektif dan terukur. Selain itu, integrasi karbon biru dalam tata ruang laut melalui Peraturan Menteri KP No. 28 Tahun 2021 menjadi landasan penting bagi pengelolaan ekosistem pesisir yang berkelanjutan dan berbasis komunitas.

➤ Strategi Pengelolaan Berbasis Ekobiologi

Strategi pengelolaan berbasis ekobiologi menuntut integrasi antara perlindungan ekosistem, pemanfaatan sumber daya yang berkelanjutan, dan keterlibatan aktif masyarakat pesisir sebagai aktor utama konservasi. Pengelolaan Wilayah Pesisir Terpadu (*Integrated Coastal Management/ICM*) merupakan kerangka perencanaan yang mengintegrasikan dimensi ekologis, sosial-ekonomi, kelembagaan, dan partisipasi pemangku kepentingan untuk mengatasi kompleksitas tantangan pesisir. Pendekatan ini lahir dari kesadaran bahwa permasalahan pesisir, seperti abrasi, banjir rob, penurunan muka tanah, degradasi ekosistem, dan tekanan Pembangunan, tidak dapat diselesaikan melalui pendekatan sektoral yang berjalan sendiri-sendiri. Di Provinsi Jawa Tengah, *Center for Integrated Coastal Zone Management (ICZM)* Universitas Diponegoro bersama BAPPEDA tengah menyusun dokumen Rencana Pengelolaan Pesisir Terpadu yang mencakup aspek ekologi dan sosial ekonomi, dengan fokus pada integrasi perlindungan ekosistem, penguatan ketahanan masyarakat pesisir, tata ruang wilayah, serta sinkronisasi kebijakan pembangunan antar sektor. Pengalaman di Desa Sukajaya Lempasing, Lampung, menunjukkan bahwa ICM dapat diterapkan pada skala desa dengan memanfaatkan modal dasar seperti regulasi

desa terkait pesisir, mekanisme musyawarah, dan struktur mata pencaharian multisektor, meskipun masih menghadapi tantangan berupa regulasi yang belum komprehensif dan partisipasi yang belum terlembaga secara berkelanjutan.

Pendekatan Ekosistem dalam Pengelolaan Perikanan (*Ecosystem Approach to Fisheries Management/ EAFM*) juga menyeimbangkan aspek ekologi, sosial, dan ekonomi dalam pengelolaan sumber daya ikan melalui enam domain penilaian. EAFM mencakup domain sumber daya ikan, teknik penangkapan, habitat dan ekosistem, ekonomi, sosial, serta kelembagaan, masing-masing dengan indikator spesifik yang dievaluasi untuk menentukan status keberlanjutan. Evaluasi di Kabupaten Buru Selatan, Maluku, menunjukkan bahwa penerapan EAFM tergolong baik dengan skor agregat 71 dan tingkat keberlanjutan cukup (indeks 51,49), dengan strategi perbaikan dirancang dalam tiga periode: jangka pendek melalui *Conservation Management Strategy*, serta jangka menengah dan panjang melalui *Maintain Existing Strategy*. Penerapan EAFM telah dilakukan di Kaimana, Papua Barat pada perikanan demersal skala kecil dengan 107 kapal yang utamanya menggunakan pancing tangan, menghasilkan 17 opsi keputusan taktis untuk melestarikan sumber daya ikan sekaligus meningkatkan kesejahteraan nelayan. Namun, tantangan tetap ada, yaitu

kerangka regulasi yang terfragmentasi di berbagai tingkat pemerintahan nasional, provinsi, kabupaten, hingga hukum adat sasi, sehingga belum teroperasionalkan secara terintegrasi untuk perikanan skala kecil.

Rehabilitasi dan restorasi ekosistem pesisir di Indonesia menunjukkan tren peningkatan dengan pendekatan yang semakin mengintegrasikan aspek ekologis, sosial, dan ekonomi. Data Kementerian Kelautan dan Perikanan menunjukkan capaian pemulihan kawasan pesisir meningkat dari 20 kawasan pada 2021 menjadi 98 kawasan pada 2024, melalui intervensi seperti penanaman mangrove (224,78 Ha), pembangunan sarana pengelolaan lingkungan, dan pengembangan karbon biru. Program konservasi terpadu di Malili, Luwu Timur, Sulawesi Selatan, yang melibatkan pihak swasta, Lembaga swadaya Masyarakat, akademisi, dan masyarakat setempat melakukan transplantasi karang, restorasi mangrove, dan pemulihan padang lamun, dengan fokus tidak hanya pada aspek ekologi tetapi juga sosial-ekonomi karena kerusakan ekosistem memaksa nelayan melaut lebih jauh dan meningkatkan biaya operasional secara swadaya. Pendekatan berbasis Masyarakat lainnya seperti proyek karbon biru "Ibu Bakau" di Desa Pengudang, Bintan, melibatkan masyarakat dalam pembibitan, penanaman, pemeliharaan, dan pengawasan mangrove, dengan 6.554 penerima manfaat (25,8% perempuan),

sekaligus menciptakan peluang mata pencaharian alternatif melalui ekowisata dan *silvofishery*.

Pemodelan ekobiologi berfungsi sebagai jembatan antara pemahaman ilmiah dan keputusan pengelolaan, memungkinkan simulasi skenario restorasi dan prediksi respons ekosistem terhadap berbagai intervensi. *Conceptual Ecological Models* (CEM) menyediakan struktur dan panduan untuk pengembangan model numerik, mengidentifikasi ketidakpastian, dan memastikan tujuan prioritas pengelolaan dapat dijawab secara kuantitatif. Pendekatan ini menggunakan desain bersarang yang mengidentifikasi laju vital, proses, atribut, dan luaran pada tingkat spesies, populasi, dan metapopulasi sebagai respons terhadap perubahan lingkungan. Dalam konteks restorasi ekosistem pesisir, model hidrodinamika yang digabungkan dengan model populasi dan transportasi larva memungkinkan simulasi siklus hidup penuh organisme dan konektivitas populasi, membantu menyeimbangkan tujuan konservasi, restorasi, dan pengelolaan perikanan. Untuk ekosistem lamun, pengembangan indeks seperti *Seagrass Ecological Quality Index* (SEQI) yang mempertimbangkan tutupan lamun, pertumbuhan epifit, dan keanekaragaman spesies menjadi instrumen penting dalam pemodelan kesehatan ekosistem, terutama karena kualitas air yang buruk berkorelasi langsung dengan penurunan nilai SEQI.

Indikator dan pemantauan kesehatan ekosistem pesisir di Indonesia diwujudkan melalui Indeks Kesehatan Laut Indonesia (IKLI) yang mengintegrasikan sepuluh tujuan pengelolaan laut berkelanjutan. IKLI menggunakan variabel seperti jumlah spesies ikan, mangrove, karang, dan lamun sebagai indikator kondisi ekosistem, dengan metode perhitungan yang mempertimbangkan status terkini dan tren perubahan di masa depan. Di tingkat daerah, Provinsi DKI Jakarta mengembangkan platform JakOcean berbasis Sistem Informasi Geografis (GIS) untuk memantau dan mengelola ekosistem laut serta pesisir, dengan capaian Indeks Kesehatan Laut tahun 2025 sebesar 71,06 atau 92,57% dari Standar Nasional. Pemantauan juga mencakup evaluasi rutin terhadap indikator EAFM dan penyusunan Rencana Pengelolaan Perikanan berbasis ekosistem sebagai dasar penguatan tata kelola. Ke depan, pengembangan standar kompetensi kerja khusus (SK3) EAFM yang sedang divalidasi oleh LSP Konservasi dan Jasa Kelautan bersama GEF-6 CFI Indonesia diharapkan menjadi acuan nasional dalam sertifikasi kompetensi pengelola perikanan, memastikan bahwa kapasitas SDM terus berkembang mendukung pengelolaan berbasis ekosistem yang berkelanjutan.

➤ **Konservasi dan Pembangunan Berkelanjutan**

Konservasi dan pembangunan berkelanjutan di wilayah pesisir Indonesia menuntut integrasi antara perlindungan ekosistem, pemanfaatan ekonomi yang bertanggung jawab, dan partisipasi aktif masyarakat sebagai fondasi tata kelola yang inklusif dan adaptif. Ekowisata berbasis konservasi telah terbukti menjadi model yang efektif dalam menghubungkan perlindungan ekosistem pesisir dengan peningkatan kesejahteraan masyarakat lokal, sebagaimana ditunjukkan oleh berbagai inisiatif di Indonesia. Komunitas lokal Nusa Lembongan, Nusa Penidam bertransformasi dari pengeksrakasi sumber daya menjadi pengelola ekowisata mangrove, dengan organisasi berbasis desa yang mengawasi operasi wisata, pemeliharaan habitat, dan pengelolaan sampah, sekaligus memperkenalkan operasi kano terjadwal dan harga transparan untuk meningkatkan kualitas wisata tanpa mengorbankan ekosistem. Model serupa dikembangkan di Teluk Saleh, Sumbawa, di mana kemitraan antara lembaga konservasi, pemerintah daerah, dan sembilan kelompok masyarakat di tujuh desa pesisir membangun model ekowisata hiu paus yang inklusif, terintegrasi jangka panjang, penyaluran hibah komunitas, zonasi partisipatif, dan advokasi regulasi. Di Pangempang, Kalimantan Timur, kolaborasi antara Pokdarwis dan

komunitas konservasi tidak hanya menjaga lingkungan tetapi juga mengembangkan potensi ekowisata berbasis masyarakat, dengan wisatawan diajak menanam mangrove sebagai bagian dari paket wisata.

Daya dukung lingkungan merupakan konsep krusial dalam perencanaan tata ruang pesisir, yang menetapkan batas kemampuan suatu kawasan untuk mendukung aktivitas manusia tanpa mengorbankan integritas ekologisnya. Daya dukung didefinisikan sebagai batas kemampuan suatu zona pesisir untuk mendukung semua aktivitas yang diciptakan manusia, di mana semua kinerja ekologis dipertahankan pada tingkat berkelanjutan. Kegagalan menetapkan metode dan regulasi yang kuat tentang analisis daya dukung akan mengarah pada pengembangan zona pesisir yang sangat berisiko, yang pada gilirannya mengancam keberlanjutan kawasan. Analisis daya dukung untuk kawasan pesisir dapat menggunakan dua parameter kunci, yaitu daya dukung lahan dan air bersih, yang kemudian dioperasionalkan untuk mengembangkan rencana tata ruang berbasis bukti. Pendekatan ini memastikan bahwa rencana pembangunan tidak melampaui kapasitas regenerasi ekosistem, sehingga pemanfaatan ruang pesisir dapat berlangsung secara berkelanjutan.

Pemberdayaan masyarakat pesisir dalam konservasi merupakan prasyarat keberhasilan jangka panjang, karena masyarakat lokal adalah pemangku kepentingan utama yang berinteraksi langsung dengan ekosistem pesisir sehari-hari. Di Desa Labuhan, Bangkalan, Kelompok Sadar Wisata (Pokdarwis) Payung Kuning memulai penanaman mangrove pada 2014 dan mengedukasi masyarakat tentang pentingnya menjaga kelestarian mangrove, sehingga kini kawasan tersebut menjadi ekowisata dan konservasi dengan hamparan bakau lebih dari 6 Ha yang menjadi rumah bagi 32 jenis burung dilindungi. Selain itu, di Kepulauan Lease, Maluku, pendekatan sains warga (*citizen science*) yang melibatkan nelayan dan komunitas pesisir dalam pelaporan penampakan dugong berhasil meningkatkan pengetahuan masyarakat dari 63% menjadi 84% dan kemauan melindungi dugong dari 70% menjadi 98%, sekaligus menghasilkan peraturan desa yang mendukung pengelolaan kawasan konservasi yang adaptif. Penguatan kapasitas juga mencakup pelatihan manajemen usaha kecil, literasi keuangan, dan pemasaran produk hasil laut, sehingga komunitas dapat menjadi mitra sejajar bagi pemerintah dan sektor swasta dalam program konservasi.

Ekonomi biru (*Blue Economy*) telah menjadi paradigma pembangunan yang mengintegrasikan pertumbuhan ekonomi dengan kelestarian ekosistem laut

dan pesisir, menawarkan kerangka yang lebih holistik dibandingkan model ekonomi konvensional. Bank Dunia mendefinisikan ekonomi biru sebagai penggunaan sumber daya laut secara berkelanjutan untuk pertumbuhan ekonomi, peningkatan penghidupan, dan lapangan kerja sambil menjaga kesehatan ekosistem laut. Program LAUTRA (Laut untuk Kesejahteraan) yang dikembangkan KKP mencakup 11 provinsi, 20 kawasan konservasi, dan 3 Wilayah Pengelolaan Perikanan dengan total area 8,3 juta Ha, menargetkan lebih dari 75 ribu penerima manfaat langsung, termasuk 30 persen kelompok perempuan pesisir, melalui empat komponen utama: penguatan kelembagaan konservasi, pembangunan ekonomi lokal, pembiayaan berkelanjutan (*blue financing*), dan manajemen proyek terpadu. Banda Neira dikembangkan sebagai model integrasi konservasi laut, arkeologi, dan budaya maritim, dengan pendanaan melalui skema hibah dari micro grant Rp150 juta hingga matching grant Rp1,25 miliar untuk mendukung UMKM biru yang ramah lingkungan.

Sinergi antara kebijakan, ilmu pengetahuan, dan masyarakat merupakan kunci untuk mewujudkan pengelolaan pesisir yang adaptif dan berbasis bukti, di mana setiap aktor memiliki peran yang saling melengkapi dalam kerangka tata kelola kolaboratif. Di Kabupaten Batang, mempertemukan pemerintah daerah, akademisi,

dunia usaha, dan masyarakat untuk menyelaraskan capaian pengelolaan pesisir, dengan fokus pada penguatan tata kelola yang berbasis keterpaduan darat-laut, adaptif terhadap perubahan iklim, dan berbasis ekosistem. Bupati Batang menegaskan bahwa pendekatan parsial tidak lagi memadai, dan kerja sama multi-stakeholder yang melibatkan pemerintah, dunia usaha, akademisi, masyarakat, serta mitra pembangunan menjadi keharusan untuk menjawab persoalan pesisir yang kompleks. Untuk memperkuat kapasitas aparat pemerintah daerah, penguatan kompetensi teknis dalam inventarisasi sumber daya pesisir menggunakan teknologi seperti sistem informasi geografis (SIG) dan penginderaan jauh menjadi penting untuk merumuskan kebijakan berbasis bukti ilmiah. Forum multipihak juga dapat digunakan untuk merancang modul pelatihan bersama yang relevan dengan kebutuhan lokal sekaligus selaras dengan target nasional dan komitmen internasional, sehingga strategi pengelolaan terpadu tidak hanya tertuang dalam dokumen rencana tetapi benar-benar dijalankan secara efektif di lapangan.

➤ Tantangan, Pembelajaran, dan Agenda Konservasi Pesisir Indonesia

Tantangan konservasi pesisir Indonesia terletak pada paradoks mendasar antara ambisi perlindungan yang terus diperluas dan realitas regulasi yang masih membuka ruang bagi eksploitasi sumber daya di kawasan yang seharusnya dilindungi. Tantangan kelembagaan dan tata kelola menjadi penghambat utama efektivitas konservasi pesisir di Indonesia. Kawasan Konservasi Perairan (KKP) mengungkapkan bahwa faktor tata Kelola, terutama konflik tenurial, asimetri kekuasaan, dan fragmentasi kebijakan antar-lembaga seperti KKP dan KLHK, menyumbang sekitar 75% dari kegagalan pengelolaan yang teramati. Persoalan ini diperparah oleh regulasi yang memungkinkan perubahan fungsi kawasan konservasi untuk kepentingan pembangunan strategis, sebagaimana diatur dalam PP Nomor 27 Tahun 2021 dan diperkuat oleh UU Minerba yang memberikan prioritas besar pada aktivitas pertambangan, bahkan memungkinkan pulau-pulau kecil yang berfungsi sebagai penyangga ekosistem berubah menjadi kawasan tambang. Ketergantungan pada pendanaan pemerintah yang bersifat proyek juga menjadi kelemahan struktural; di Belitung, belum ada mekanisme pendanaan mandiri untuk konservasi, sehingga keberlanjutan program sangat

rentan terhadap perubahan prioritas anggaran. Keterbatasan data dan informasi sumber daya laut juga diakui sebagai tantangan formal dalam Rencana Strategis KKP 2025–2029, yang menuntut penguatan sistem informasi terintegrasi serta inovasi sebagai arah kebijakan.

Pembelajaran dari praktik konservasi di lapangan menunjukkan bahwa keberhasilan jangka panjang sangat bergantung pada pelibatan masyarakat dan pengakuan terhadap kearifan lokal. Di Belitung, keberhasilan pengelolaan kawasan konservasi Selat Nasik tidak terlepas dari proses panjang yang dimulai sejak 1970-an, ketika masyarakat Gersik menyusun kesepakatan internal tentang aturan penangkapan ikan, yang kemudian diformalkan menjadi peraturan daerah dan diperkuat melalui pembentukan kelompok pengawas masyarakat (POKMASWAS). Pembelajaran lain datang dari Papua Barat Daya, di mana penetapan Kawasan Konservasi Maksegara seluas 162.874 Ha pada September 2026 merupakan hasil proses sejak 2019 yang melibatkan pemerintah pusat dan daerah, masyarakat hukum adat, akademisi, serta organisasi mitra pembangunan, dengan pendekatan berbasis sains yang mengintegrasikan informasi biofisik, sosial-ekonomi, dan nilai budaya dalam penyusunan zonasi. Sementara itu, di tingkat kapasitas SDM, Wakatobi MPA *Center of Excellence* telah

melatih 81 peserta dari berbagai latar belakang pengelola kawasan konservasi melalui empat siklus pelatihan (2022–2025), dengan kurikulum yang menekankan 70% praktik lapangan dan 30% teori, menjadi model pembelajaran nasional untuk pengelolaan kawasan konservasi yang inklusif. Program Sekolah Pantai Indonesia (SPI) yang telah menetapkan 14 kabupaten/kota sebagai lokasi sejak 2017 hingga 2023 dan melibatkan 700 siswa juga menunjukkan bahwa pendidikan lingkungan sejak usia sekolah merupakan investasi jangka panjang yang sistematis. Agenda konservasi pesisir Indonesia ke depan diarahkan pada pencapaian target ambisius 30% wilayah perairan atau sekitar 97,5 juta hektare pada tahun 2045, dengan penekanan bukan hanya pada penambahan luas kawasan, tetapi juga pada efektivitas pengelolaan melalui perencanaan, pemantauan, pengawasan, dan pelibatan masyarakat. Untuk tahun 2026, KKP menargetkan penambahan 700.000 hektare kawasan konservasi baru, pengelolaan efektif seluas 19,1 juta hektare, serta pencegahan dan pemulihan kerusakan pesisir dengan target penanggulangan sampah plastik kumulatif 296 Ton dan rehabilitasi kawasan pesisir dengan nilai ketahanan 57. Instrumen *Other Effective Area-Based Conservation Measures* (OECM) diposisikan sebagai pelengkap KKP untuk mengakui praktik konservasi berbasis masyarakat adat dan sektor swasta, meskipun terdapat kekhawatiran

bahwa mekanisme ini berisiko menjadi "solusi semu" jika tidak disertai jaminan perlindungan hak masyarakat yang memadai. Penguatan tata kelola karbon biru juga menjadi agenda prioritas, dengan roadmap Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Karbon Biru 2026–2045 yang diluncurkan September 2026, mengarahkan strategi iklim Indonesia dari pendekatan berbasis daratan menjadi strategi holistik darat-laut yang mengoptimalkan 3,45 juta Ha mangrove dan 660.000 Ha lamun yang mampu menyimpan hingga 3,4 gigaton karbon. Model pemantauan digital partisipatif atau Monitoring Adaptif dan Pembelajaran Reflektif (MALR) pada tingkat tapak mengintegrasikan *citizen science* dan indikator sosial-ekologis diusulkan sebagai standar efektivitas baru untuk melengkapi indeks Evaluasi Efektivitas Pengelolaan Kawasan Konservasi (EVIKA) dan *Management Effectiveness Tracking Tool* (METT) yang sudah ada. Hal ini untuk memastikan bahwa konservasi tidak hanya diukur dari luasan kawasan tetapi juga dari keadilan dan partisipasi masyarakat.

Keberhasilan konservasi pesisir Indonesia ke depannya akan sangat ditentukan oleh kemampuan negara untuk menyelesaikan paradoks antara perluasan kawasan lindung dan pemberian izin eksploitasi di wilayah yang secara ekologis kritis. Tanpa harmonisasi regulasi yang mengikat, penguatan hak tenurial

masyarakat adat, dan mekanisme pendanaan yang berkelanjutan di luar siklus proyek, taret perlindungan 30% wilayah perairan Indonesia pada 2045 berisiko menjadi pencapaian statistik semata tanpa perlindungan nyata bagi ekosistem dan masyarakat yang bergantung padanya.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Arif, "Luas Mangrove Dunia Bertambah, di Indonesia Justru Menyusut," Kompas.id. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.kompas.id/artikel/luas-mangrove-dunia-bertambah-di-indonesia-justru-menyusut>
- A. E. Douglas, "Coral bleaching—how and why?," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 46, no. 4, pp. 385–392, Apr. 2003, doi: 10.1016/s0025-326x(03)00037-7.
- A. E. Magurran, *Measuring biological diversity*. Malden, Mass. Blackwell, 2004.
- A. E. Nugroho, U. Muawanah, R. S. Pomeroy, and D. Pramadhana, "Analyzing coral reef degradation in Indonesia using O'Hara's principles of political economy," *Marine Policy*, vol. 193, p. 107230, Nov. 2026, doi: 10.1016/j.marpol.2026.107230.
- A. H. Nugraha et al., "Decadal change (2015-2025) in seagrass cover, species composition and ecosystem quality in eastern Bintan marine protected area, Indonesia," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 225, p. 119231, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.marpolbul.2026.119231.
- A. H. Ramdhani, "Industri Ekstraktif Kian Masif, Ambisi Konservasi Laut Hanya Ilusi?," Mongabay.co.id. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://mongabay.co.id/2026/06/11/industri-ekstraktif-kian-masif-ambisi-konservasi-hanya-ilusi/>

- A. H. Ramdhani, "Nasib Kepiting Bakau Lombok di Tengah Himpitan Tambak," Mongabay.co.id. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://mongabay.co.id/2026/04/23/nasib-kepiting-bakau-lombok-di-tengah-himpitan-tambak/>
- A. Hananto, "Dari Dasar Laut hingga Puncak Bukit, Raja Ampat Adalah Laboratorium Evolusi Kehidupan," Mongabay.co.id. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://mongabay.co.id/2025/06/06/dari-dasar-laut-hingga-puncak-bukit-raja-ampat-adalah-laboratorium-evolusi-kehidupan/>
- A. Hemelikova, "Adela Hemelikova - Beyond Nesting Beaches: Identifying and Protecting Sea Turtle and Dugong Foraging Habitats in Pulau Banyak and South Nias, Indonesia - The Rufford Foundation," Rufford.org. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.rufford.org/projects/adela-hemelikova-2/beyond-nesting-beaches-identifying-and-protecting-sea-turtle-and-dugong-foraging-habitats-in-pulau-banyak-and-south-nias-indonesia/>
- A. Joseph, "Citadel-Building," Investigating Seafloors and Oceans, pp. 377–442, 2017, doi: 10.1016/b978-0-12-809357-3.00007-2.
- A. Kunzmann, Z. Arifin, and G. Baum, "Pollution of Coastal Areas Of Jakarta Bay: Water Quality and Biological Responses," Marine Research in Indonesia, vol. 43, no. 1, p. 37, Jun. 2018, doi: 10.14203/mri.v43i1.299.

- A. Malik et al., "eDNA Uncovers Hidden Fish Diversity in the Coral Reef Ecosystems of Karimunjawa National Park, Indonesia," *Regional Studies in Marine Science*, pp. 103945–103945, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.rsma.2024.103945.
- A. N. L. Tobing, S. Darmanti, E. D. Hastuti, and M. Izzati, "Struktur Anatomi Daun Mangrove Api-api Putih [*Avicennia marina* (Forsk.) Vierh] Di Pantai Mangunharjo, Semarang," *Buletin Anatomi dan Fisiologi*, vol. 6, no. 1, pp. 96–103, Apr. 2021, doi: 10.14710/baf.6.1.2021.96-103.
- A. Rahman, M. Syahdan, and Nursalam, "Analisis Struktur Komunitas *Makrozoobentos* pada Ekosistem Mangrove di Pesisir Kecamatan Aluh-aluh Kabupaten Banjar Provinsi Kalimantan Selatan," *Marine Coastal and Small Islands Journal - Jurnal Ilmu Kelautan*, vol. 4, no. 2, p. 1, Jan. 2024, doi: 10.20527/m.v4i2.11786.
- A. Romadhon, D. A. S. Rini, and M. K. Wardhani, *Paradoks Pulau Kecil: Wisata dan Batas Ekologis*. Penerbit Karya Bakti Makmur (KBM) Indonesia, 2026.
- A. S. Paramadani, "Peran Penting Karbon Biru dalam Mitigasi Perubahan Iklim di Wilayah Pesisir Indonesia," *Jurnal Relasi Publik*, vol. 2, no. 4, pp. 23–36, Oct. 2024, doi: 10.59581/jrp-widyakarya.v2i4.4129.

- A. Sembiring et al., "Reef Fish Diversity and Community Composition Revealed using BRUV Surveys in The Remote Damer Marine Protected Area," *Regional Studies in Marine Science*, vol. 100, p. 105187, Jul. 2026, doi: 10.1016/j.rsma.2026.105187.
- A. Shafa, H. Novitasari, Insafitri, and W. A. Nugraha, "Penutupan, Rugositas Terumbu Karang dan Kelimpahan Ikan Karang di Perairan Utara Bangkalan," *Jurnal Kelautan Tropis*, vol. 25, no. 2, pp. 202–212, Apr. 2022, doi: 10.14710/jkt.v25i2.13769.
- A. Syafitri, S. Siregar, and Elimasni, "Keragaman Jenis Tumbuhan Mangrove Famili Lythraceae di Belawan Pulau Sicanang, Sumatera Utara," *BERITA BIOLOGI*, vol. 23, no. 1, pp. 115–128, Apr. 2024, doi: 10.55981/beritabiologi.2024.3901.
- A. Tuwo, "Mangroves and Ponds: A Story of Recovery, Resilience, and Water Quality – Multitrophic Research Group," Unhas.ac.id. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://trg.unhas.ac.id/multitrophic/2026/03/01/mangroves-and-ponds-a-story-of-recovery-resilience-and-water-quality/>
- Anonymous, "Community-Based Whale Shark Ecotourism and *Conservation* in Saleh Bay, Indonesia - GSAP SKILLS Online Knowledge Platform," GSAP SKILLS Online Knowledge Platform. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://gsapskills.org/resources/community-based->

whale-shark-ecotourism-and-conservation-in-saleh-bay-indonesia/

Anonymous, "Community-Led *Blue Economy*: Sustainable Visitor Management for Mangrove Eco-tourism in Nusa Penida Marine Protected Area - GSAP SKILLS Online Knowledge Platform," GSAP SKILLS Online Knowledge Platform. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://gsapskills.org/resources/community-led-blue-economy-sustainable-visitor-management-for-mangrove-eco-tourism-in-nusa-penida-marine-protected-area/>

Anonymous, "Direktorat Jenderal Pengelolaan Kelautan | KKP | Kementerian Kelautan dan Perikanan," Kkp.go.id. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.kkp.go.id/djpk/perbarui-tools-evaluasi-efektifitas-pengelolaan-kawasan-konservasi-kkp-berikan-sosialisasi-pedoman-teknis-evika65c2f2ec9c437/detail.html>

Anonymous, "Establishing Mangrove Belt to Combat Coastal Flooding in Indonesia | Adaptation Database | Asia-Pacific Climate Change Adaptation Information Platform (AP-PLAT)," AP PLAT. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://ap-plat.nies.go.jp/adaptation-database/list/case-study/db1369.html>

Anonymous, "Implementing Integrated Coastal Landscape Management for Climate Change Adaptation in Indonesia | Adaptation Database |

Asia-Pacific Climate Change Adaptation Information Platform (AP-PLAT),” AP PLAT. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://ap-plat.nies.go.jp/adaptation-database/list/case-study/db1452.html>

Anonymous, “KKP | Kementerian Kelautan dan Perikanan,” Kkp.go.id. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://kkp.go.id/news/news-detail/kkp-kembangkan-banda-neira-sebagai-model-ekonomi-biru-berbasis-budaya-maritim-36zn.html>

Anonymous, “KKP Amankan 2 Kapal Nelayan Pelaku Bom Ikan di Perairan Pulau Aceh | Berita | KKP,” KKP. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://kkp.go.id/news/news-detail/kkp-amankan-2-kapal-nelayan-pelaku-bom-ikan-di-perairan-pulau-aceh.html>

Anonymous, “KKP dan IFAD Kembangkan Blue Coast Project untuk Tingkatkan Ekonomi Pesisir | Siaran Pers | KKP,” KKP. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.kkp.go.id/news/news-detail/kkp-dan-ifad-kembangkan-blue-coast-project-untuk-tingkatkan-ekonomi-pesisir-Pj22.html>

Anonymous, “KKP Dorong Perlindungan Ekosistem Laut & Pesisir di Luar Kawasan Koservasi | Siaran Pers | KKP,” KKP. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://kkp.go.id/news/news-detail/kkp-dorong-perlindungan-ekosistem-laut-pesisir-di-luar-kawasan-koservasi-qQ6R.html>

Anonymous, “KKP– KEHATI dan EcoNusa Tandatangani PKS, Perkuat Kolaborasi Untuk Pengelolaan Kelautan Berkelanjutan | Berita | KKP,” KKP. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://kkp.go.id/news/news-detail/kkp-kehati-dan-econusa-tandatangani-pks-perkuat-kolaborasi-untuk-pengelolaan-kelautan-berkelanjutan-pk72.html>

Anonymous, “KKP Kejar Target Perluasan Kawasan Konservasi Melalui MPA & OECM | Berita | KKP,” KKP. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://kkp.go.id/news/news-detail/kkp-kejar-target-perluasan-kawasan-konservasi-melalui-mpa-oecm-83Zm.html>

Anonymous, “KKP Tetapkan 162 Ribu Hektare Laut di Kepala Burung Papua sebagai Kawasan Konservasi | Siaran Pers | KKP,” KKP. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.kkp.go.id/news/news-detail/kkp-tetapkan-162-ribu-hektare-laut-di-kepala-burung-papua-sebagai-kawasan-konservasi-v8AX.html>

Anonymous, “KKP Tingkatkan Efektifitas Tata Ruang Laut untuk Karbon Biru | Berita | KKP,” KKP. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://kkp.go.id/news/news-detail/kkp-tingkatkan-efektifitas-tata-ruang-laut-untuk-karbon-biru-6BoN.html>

- Anonymous, "M4CR: Mangrove untuk Perlindungan Pesisir dan Kesejahteraan Masyarakat - Berita - Tata Kelola Data dan Pelayanan Terpadu BPKH Wilayah XXI," Kehutanan.go.id. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://bpkh21.planologi.kehutanan.go.id/news/m4cr-mangrove-untuk-perlindungan-pesisir-dan-kesejahteraan-masyarakat>
- Anonymous, "Menteri Trenggono Beberkan Cetak Biru Pengelolaan Laut Indonesia, Kawasan Konservasi Ditargetkan Capai 30 Persen pada 2045 | Siaran Pers | KKP," KKP. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.kkp.go.id/news/news-detail/menteri-trenggono-beberkan-cetak-biru-pengelolaan-laut-indonesia-kawasan-konservasi-ditargetkan-capai-30-persen-pada-2045-3yAO.html>
- Anonymous, "Pentingnya Konservasi Laut dan Pesisir," Jatimprov.go.id. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://dkp.jatimprov.go.id/news/view/3680>
- Anonymous, "Peran Zonasi dalam Pengelolaan Kawasan Konservasi Perairan," Jatimprov.go.id. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://dkp.jatimprov.go.id/news/view/4256>
- Anonymous, "UU No. 27 Tahun 2007," Database Peraturan | JDIH BPK. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/39911/uu-no-27-tahun-2007>

- Anonymous, Konservasi Hiu Paus dan Pemanfaatan Sumber Daya Alam Berkelanjutan melalui Ekowisata. Dinas Kelautan dan Perikanan Provinsi Nusa Tenggara Barat, 2025.
- Asia-Pacific Network for Global Change Research, "Seagrass-Mangrove Ecosystems: Bioshields against Biodiversity Loss and Impacts of Local and Global Change along Indo-Pacific Coasts (the Seagrass-Mangrove Bioshield Project, SMBP)," apngcr. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.apn-gcr.org/project/seagrass-mangrove-ecosystems-bioshields-against-biodiversity-loss-and-impacts-of-local-and-global-change-along-indo-pacific-coasts-the-seagrass-mangrove-bioshield-project-smbp/>
- Australian Government, "3.4.6 Symbiosis," Outlook Report. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://outlookreport.gbrmpa.gov.au/values/3-ecosystem-health/34-ecological-processes/346-symbiosis>
- B. L. H. Jones et al., "Dependence on Seagrass Fisheries Governed by Household Income and Adaptive Capacity," *Ocean & Coastal Management*, vol. 225, p. 106247, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106247.
- C. Coral et al., "Shellfish Reefs as Essential Fish Habitats: Complementary Insights from eDNA and BRUVs in the North Sea," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 789, pp. 1–22, Jul. 2026, doi: 10.3354/meps15179.

- C. E. Shannon and W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University Of Illinois Press, 1949. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available:
https://pure.mpg.de/rest/items/item_2383164_3/component/file_2383163/content
- C. Grieve and K. Short, "Implementation of Ecosystem-Based Management in Marine Capture Fisheries: Case studies from WWF's Marine Ecoregions," 2007. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available:
https://seaknowledgebank.net/sites/default/files/2024-04/implementation-of-ecosystem-based-management-in-marine-capture-fisheries-case-studies_0.pdf#14#11
- C. M. Hanum, A. Kamal, A. A. Metananda, Kurniawati, D. Kiswayadi, and Bakruddin, "Spatiotemporal Dynamics of Mangrove Cover in Aceh Tamiang Regency, Indonesia (2020–2024): An NDVI-Based Remote Sensing Assessment," *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 165–171, Mar. 2026, doi: 10.25299/jgeet.2026.11.1.23237.
- C. Muryani, P. Wijayanti, R. Noviani, and F. D. Kartika, "Anthropogenic Drivers of Mangrove Degradation on the North Coast of Java: insights from recent studies," *Environmental Science: Advances*, vol. 5, no. 5, pp. 711–725, 2026, doi: 10.1039/d5va00387c.

- C. Y. Kuo et al., "Fine Intervals are Required when using *Point Intercept Transects* to Assess Coral Reef Status," *Frontiers in Marine Science*, vol. 9, 2022, doi: 10.3389/fmars.2022.795512.
- CFI - Indonesia, "GEF-6 Cfi Indonesia Dorong Sertifikasi Kompetensi Eafm Untuk Perkuat Sdm Pengelolaan Perikanan Berkelanjutan," CFI Indonesia. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://cfi-indonesia.id/blog/gef-6-cfi-indonesia-dorong-sertifikasi-kompetensi-eafm-untuk-perkuat-sdm-pengelolaan-perikanan-berkelanjutan/>
- D. D. Rahayu and S. Aritonang, "Diplomasi Pertahanan dan Perubahan Iklim: Studi kasus Indonesia dan Selandia Baru," *Jurnal Praksis dan Dedikasi Sosial*, vol. 8, no. 1, pp. 144–153, Apr. 2025, doi: 10.17977/um022v8i12025p144-153.
- D. G. Bengen, *Pedoman Teknis: Pengenalan dan Pengelolaan Ekosistem Mangrove*. Bogor, Indonesia: Pusat Kajian Sumberdaya Pesisir dan Lautan, Institut Pertanian Bogor, 2004.
- D. J. Prihadi et al., *Ekosistem Mangrove Indonesia: Fungsi, Dinamika, Dan Tantangan Pesisir*. MMFAST PUBLISHING, 2026.
- D. J. Prihadi, I. R. Riyantini, and M. R. Ismail, "Pengelolaan Kondisi Ekosistem Mangrove dan Daya Dukung Lingkungan Kawasan Wisata Bahari Mangrove Di Karangsong Indramayu," *Jurnal Kelautan Nasional*, vol. 13, no. 1, p. 53, Apr. 2018, doi: 10.15578/jkn.v1i1.6748.

- D. N. Choesin, "Lahan Basah Pesisir sebagai Ekosistem Karbon Biru untuk Mitigasi dan Adaptasi Perubahan Iklim," in Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, May 09, 2026. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://fgb.itb.ac.id/wp-content/uploads/sites/26/2026/05/Prof.-Devi-Nandita-Choesin-Lahan-Basah-Pesisir-1.pdf#12#7>
- D. N. Handiani, N. S. Ningsih, and E. Beliyana, "Coral Bleaching Occurrence and its Relation to Marine Heatwave Events in the Southwestern Waters of South Sulawesi, Indonesia, as Part of the Coral Triangle Region," *Journal of Marine Systems*, vol. 252, p. 104136, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.jmarsys.2025.104136.
- D. P. Behera, R. Ravinesh, L. Prabhadevi, D. Dixit, and K. N. Ingle, "Flooding Stress Adaptations: Evolutionary Mechanisms of Mangrove Tolerance," *Journal of Aquatic Plants*, vol. 2, p. 100014, May 2026, doi: 10.1016/j.jap.2026.100014.
- D. Rosalina et al., *Pengelolaan Wilayah Pesisir Terpadu: Perspektif Perikanan dan Kelautan*. Kamiya Jaya Aquatic, 2026.
- D. S. Brooks, J. DiFrisco, and W. C. Wimsatt, *Levels of Organization in the Biological Sciences*. MIT Press, 2021.

- Dinas Kelautan dan Perikanan Kabupaten Tuban, "Konservasi Mangrove: Menyelamatkan Pesisir, Menyelamatkan Kehidupan," [Jatimprov.go.id](http://jatimprov.go.id). Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://dkp.jatimprov.go.id/unit/dkp-tubankab//news/view/3661>
- Direktur Jenderal Pengelolaan Kelautan, "Keputusan Direktur Jenderal Pengelolaan Kelautan Nomor 40 Tahun 2025 Tentang Rencana Strategis Direktorat Jenderal Pengelolaan Kelautan Kementerian Kelautan dan Perikanan Tahun 2025-2029," Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jakarta, Dec. 2025. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://kkp.go.id/download-pdf-akuntabilitas-kinerja/akuntabilitas-kinerja-perencanaan-kinerja-rencana-strategis-direktorat-jenderal-pengelolaan-kelautan-kementerian-kelautan-dan-perikanan-tahun-2025-2030.pdf#18#4>
- E. C. Pielou, "The Measurement of Diversity in Different Types of Biological Collections," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 13, pp. 131–144, Dec. 1966, doi: 10.1016/0022-5193(66)90013-0.
- E. Damastuti, R. de Groot, A. O. Debrot, and M. J. Silvius, "Effectiveness of Community-Based Mangrove Management for Biodiversity *Conservation*: A case study from Central Java, Indonesia," *Trees, Forests and People*, vol. 7, p. 100202, 2022, Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available:

<https://agris.fao.org/search/en/records/675ac4550ce2cede71d0bcf0#1>

- E. de Rosary, "Kala Hutan Mangrove Maumere Kian Terbabat untuk Tambak," Mongabay.co.id. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://mongabay.co.id/2026/03/30/kala-hutan-mangrove-di-maumere-kian-terbabat-untuk-tambak/>
- E. E. Ampou et al., "Post-ENSO 2024 Mass Bleaching and Early Signs of Resilience in *Pachyseris speciosa* Dominated Reefs of Raja Ampat, Indonesia," *Scientific Reports*, vol. 16, no. 1, May 2026, doi: 10.1038/s41598-026-49171-1.
- E. Trégarot et al., "Effects of Climate Change on Marine Coastal Ecosystems – A Review to Guide Research and management," *Biological Conservation*, vol. 289, no. 110394, p. 110394, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.biocon.2023.110394.
- E. Tuohy, C. Wade, and E. Weil, "Lack of Recovery of the Long-Spined Sea Urchin *Diadema antillarum* Philippi in Puerto Rico 33 years after the Caribbean-wide Mass Mortality," *PeerJ*, vol. 8, p. e8428, Feb. 2020, doi: 10.7717/peerj.8428.
- E. W. Berry and S. D. Heron, Jr., "Southeastern Geology" *Southeastern Geology*, vol. 2, no. 1, Aug. 1960, Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://pdf.core.ac.uk/corefilesystem/pdf/3065/345086404.pdf?se=2026-10-03T13%3A00%3A35Z&sp=r&sv=2026-06->

06&sr=b&rsct=inline%3B%20filename%3D%22345086404.pdf%22&rsct=application/pdf&sig=KxcVo98ENj9kuyw/3dlNM0qO8/a7akuucE%2Blpd/ocYc%3D#page=16#6#3

- F. Ali Rahman, "Analisis Korelasi Kimia-Fisika Perairan terhadap Kelimpahan Mangrove Teluk Sereweh, Kabupaten Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat," JURNAL SAINS DAN PEMBELAJARAN MATEMATIKA, vol. 1, no. 2, pp. 49–53, Jul. 2023, doi: 10.51806/jspm.v1i2.65.
- F. Dahdouh-Guebas, J. G. Kairo, L. P. Jayatissa, S. Cannicci, and N. Koedam, "An Ordination Study to View Vegetation Structure Dynamics in Disturbed and Undisturbed Mangrove Forests in Kenya and Sri Lanka," Plant Ecology, vol. 161, no. 1, pp. 123–135, Jul. 2002, doi: 10.1023/a:1020333706650.
- F. F. Muhsoni et al., "Comparison of *Line Intercept Transect* Method, Underwater Photo Transect, Underwater 3D Photo, Drone, and Satellite Imagery in Coral Reef Survey," Egyptian Journal of Aquatic Research, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.ejar.2026.04.002.
- F. Gyn, "Upaya Pemerintah untuk mencapai Nationally Determined Contribution dalam Kerangka Kebijakan Karbon Biru Indonesia," BELLI AC PACIS, vol. 10, no. 1, p. 1, Jul. 2024, doi: 10.20961/belli.v10i1.42303.

- F. Mz, "Sinergi Multi-Pihak Perkuat Pengelolaan Pesisir Batang: PKSPL IPB Dorong ICM Adaptif Berbasis Ilmu Pengetahuan - Pusat Kajian Sumberdaya Pesisir dan Lautan," Pusat Kajian Sumberdaya Pesisir dan Lautan. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://pkspl.ipb.ac.id/sinergi-multi-pihak-perkuat-pengelolaan-pesisir-batang-pkspl-ipb-dorong-icm-adaptif-berbasis-ilmu-pengetahuan/>
- FAO, "Servicios ecosistémicos," MangroveManagement. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.fao.org/forestry/mangrove/ecosystem-services/es>
- Giyanto et al., Panduan Monitoring Kesehatan Terumbu Karang Terumbu Karang, Ikan Karang, Megabenthos, dan Penulisan Laporan. Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, 2014.
- H. A. W. Cappenberg and D. A. Wulandari, "Struktur Komunitas Moluska di Padang Lamun Perairan Pulau Belitung Provinsi Bangka Belitung," Jurnal ilmu dan teknologi kelautan tropis, vol. 11, no. 3, pp. 735–750, Dec. 2019, doi: 10.29244/jitkt.v11i3.26133.
- H. H. De Iongh, W. Kiswara, W. Kustiawan, and P. E. Loth, "A Review of Research on the Interactions Between Dugongs (Dugong Dugon Müller 1776) and Intertidal Seagrass Beds in Indonesia," Hydrobiologia, vol. 591, no. 1, pp. 73–83–83, 2024, Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available:

<https://agris.fao.org/search/fr/records/65dffce94c5ae494fe760c8#1>

- H. Rouzé et al., "Molecular Characterization Reveals the Complexity of Previously Overlooked Coral-Exosymbiont Interactions and the Implications for Coral-guild Ecology," *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, Mar. 2017, doi: 10.1038/srep44923.
- H. S. Earp, N. Prinz, M. J. Czesielski, and M. Andskog, "For a World Without Boundaries: Connectivity Between Marine Tropical Ecosystems in Times of Change," *YOUMARES 8 – Oceans Across Boundaries: Learning from each other*, pp. 125–144, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-93284-2_9.
- H. S. R. A. Nugraha, "Implementasi Program Fish Apartment untuk Jadikan Laut Sehat, Nelayan Hebat dan Mandiri (FUJI LESTARI) Sebagai Upaya Konservasi Lingkungan Di Desa Bangsring, Banyuwangi," *Fao.org*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://agris.fao.org/search/zh/records/68d2a1f7b3b40a20d6186b8a#1>
- H. W. Paerl, "Assessing and Managing Nutrient-Enhanced Eutrophication in Estuarine and Coastal Waters: Interactive Effects of Human and Climatic Perturbations," *Ecological Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 40–54, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.ecoleng.2005.09.006.

- I. A. Kimirei, I. Nagelkerken, Y. D. Mgya, and C. M. Huijbers, "The Mangrove Nursery Paradigm Revisited: Otolith Stable Isotopes Support Nursery-to-Reef Movements by Indo-Pacific Fishes," *PLoS ONE*, vol. 8, no. 6, p. e66320, Jun. 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0066320.
- I. Bachtiar, "Reproduksi Seksual Karang *Scleractinia*: Telaah Pustaka," *Biota : Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, pp. 131–134, Nov. 2019, doi: 10.24002/biota.v8i3.2856.
- I. Bachtiar, E. Jefri, M. Abrar, and T. A. Hadi, "Biak and Wakatobi Reefs are the Two Hottest Hotspots of Coral Reef Fish Diversity and Abundance in the Indonesian Archipelago," *Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 25, no. 11, pp. 549–558, Nov. 2022, doi: 10.47853/fas.2022.e49.
- I. G. P. I. Aditya, H. Numazawa, and S. Kure, "Historical and Future Shoreline Changes and Sea Level Rise Impacts on Riverine Flooding in East Kalimantan, Indonesia," *Journal of JSCE*, vol. 13, no. 2, p. n/a, 2025, doi: 10.2208/journalofjsce.25-17093.
- I. Nagelkerken, *Ecological Connectivity among Tropical Coastal Ecosystems*. Springer Nature, 2009.
- I. Riniatsih, R. Hartati, W. Widianingsih, and R. T. Mahendrajaya, "Seagrass Ecological Quality Index of Seagrass Meadows in Jepara Waters, Central Java, Indonesia," *IOP conference series*, vol. 1224, no. 1, pp. 012027–012027, Aug. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1224/1/012027.

- I. S. T. Septian, C. F. A. Sondak, V. Warouw, J. J. H. Paulus, R. A. J. Lintang, and R. L. Kreckhoff, "Struktur Komunitas Lamun di Desa Darunu Kecamatan Wori Kabupaten Minahasa Utara," *JURNAL PESISIR DAN LAUT TROPIS*, vol. 10, no. 3, pp. 305–314, Oct. 2022, doi: 10.35800/jplt.10.3.2022.55015.
- I. Setyobudiandi, et al., "Sampling dan Analisis Data Perikanan dan Kelautan: Terapan Metode Pengambilan Contoh di Wilayah Pesisir dan Laut," Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor (IPB), Bogor, 2009.
- I. Takeuchi and H. Yamashiro, *Coral Reefs of Eastern Asia under Anthropogenic Impacts*. Springer Nature, 2023.
- I. W. E. Dharmawan and Pramudji, *Panduan Pemantauan Komunitas Mangrove*, 2nd ed. Jakarta, Indonesia: COREMAP-CTI, Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), 2017.
- IUCN, "Advancing Marine *Conservation* Excellence: Laut Banda MPA Embarks on the IUCN Green List Journey," IUCN. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://iucn.org/story/202508/advancing-marine-conservation-excellence-laut-banda-mpa-embarks-iucn-green-list>
- IUCN, "Promoting Climate Resilience through Traditional Sasi and Climate-Smart MPA Design in Ay and Rhun Islands, Indonesia - GSAP SKILLS Online Knowledge Platform," GSAP SKILLS Online Knowledge Platform. Accessed: Oct. 03, 2026.

[Online]. Available:
<https://gsapskills.org/resources/promoting-climate-resilience-through-traditional-sasi-and-climate-smart-mpa-design-in-ay-and-rhun-islands-indonesia/>

- J. D. Prasetya and D. H. Santoso, "Comparative Study of *Point Intercept Transect* (PIT) Method and Underwater Photo Transect (UPT) to Calculate Hard Coral Cover Percentage," *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, vol. 14, no. 2, pp. 404–410, Aug. 2022, doi: 10.20473/jipk.v14i2.32393.
- J. Du et al., "Seagrass Meadows Provide Multiple Benefits to Adjacent Coral Reefs through Various Microhabitat Functions," *Ecosystem Health and Sustainability*, vol. 6, no. 1, p. 1812433, Sep. 2020, doi: 10.1080/20964129.2020.1812433.
- J. Du et al., "Temporal and Spatial Variation of Fish Community and their Nursery in a Tropical Seagrass Meadow," *Acta Oceanologica Sinica*, vol. 37, no. 12, pp. 63–72, Dec. 2018, doi: 10.1007/s13131-018-1288-z.
- J. Hill, *Methods for Ecological Monitoring of Coral Reefs A Resource for Managers*. Australian Institute of Marine Science, 2004.
- J. L. Maté, "Corals and Coral Reefs of the Pacific Coast of Panamá," Elsevier eBooks, pp. 387–417, Jan. 2003, doi: 10.1016/b978-044451388-5/50018-7.

- J. Li et al., "Coral-associated Symbiodiniaceae Exhibit Host Specificity but Lack Phylosymbiosis, with Cladocopium and Durusdinium showing Different Cophylogenetic Patterns," *New Phytologist*, vol. 247, no. 1, pp. 309–324, May 2025, doi: 10.1111/nph.70184.
- J. N. Newton et al., "Estimating the Impact of Oceans on Human Health: The Value of taking a Burden of Disease Approach," Elsevier eBooks, pp. 473–495, Jan. 2023, doi: 10.1016/b978-0-323-95227-9.00005-1.
- J. Richir, S. Bouillon, S. Gobert, M. W. Skov, and A. V. Borges, *Structure, Functioning and Conservation of Coastal Vegetated Wetlands*. Frontiers Media SA, 2020.
- J. Rodríguez and J. R. Segura, "Conservación y Protección de Ecosistemas Marinos: Conceptos, Herramientas y Ejemplos de Actuaciones," Fao.org. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://agris.fao.org/search/fr/records/679babca969e37f4376fd41a#1>
- K. Analuddin et al., "Mangrove Landscape Dynamics and Ecosystem Services Sustainability In The Coral Triangle Southeast Sulawesi, Indonesia," *Regional Studies in Marine Science*, vol. 92, p. 104632, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.rsma.2025.104632.
- K. M. Quigley and V. M. Weis, "Cellular and Molecular Mechanisms Governing Coral Bleaching: Trends and Implications," *One Earth*, vol. 8, no. 12, p. 101553, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.oneear.2025.101553.

- K. Rusdianti and S. Sunito, "Konversi Lahan Hutan Mangrove serta Upaya Penduduk Lokal dalam Merehabilitasi Ekosistem Mangrove," *Sodality: Jurnal Sosiologi Pedesaan*, vol. 6, no. 1, Apr. 2012, doi: 10.22500/sodality.v6i1.5815.
- K. Tolule, A. D. Kambey, and A. B. Rondonuwu, "Community Structure of Seagrass in Coastal Waters of Bahoi Village, West Likupang Sub-district, North Minahasa Regency, North Sulawesi Province," *Jurnal Ilmiah PLATAX*, vol. 3, no. 2, pp. 63–67, Jan. 2016, doi: 10.35800/jip.3.2.2015.13221.
- K. Z. Bachrul, "Pemutihan Karang di Area Perlindungan Laut dan Area Rehabilitasi Karang Smiling Coral Pulau Pramuka, Kepulauan Seribu," *Ipb.ac.id*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/177728>
- Kementerian Kehutanan RI, "Komisi IV DPR RI Dukung Upaya Pemerintah dalam Merehabilitasi Mangrove," *Kementrian Kehutanan Republik Indonesia*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://ppid.kehutan.go.id/berita/siaran-pers/7970/komisi-iv-dpr-ri-dukung-upaya-pemerintah-dalam-merehabilitasi-mangrove>
- Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman dan Investasi Republik Indonesia, "Pedoman Pengukuran Indeks Kesehatan Laut Indonesia," *Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman dan Investasi Republik Indonesia*, Jakarta, 2020.

Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available:
<https://maritim.go.id/uploads/magazine/20230803142002-2023-08-03magazine142000.pdf#7#5>

Kementerian Lingkungan Hidup, “KLH Perkuat Strategi Ekonomi Biru dan Perlindungan Pesisir Nasional di Bali Ocean Days 2026 | Kementerian Lingkungan Hidup / Badan Pengendalian Lingkungan Hidup,” KLH Perkuat Strategi Ekonomi Biru dan Perlindungan Pesisir Nasional di Bali Ocean Days 2026 | Kementerian Lingkungan Hidup / Badan Pengendalian Lingkungan Hidup. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available:
<https://kemenlh.go.id/news/detail/klh-perkuat-strategi-ekonomi-biru-dan-perlindungan-pesisir-nasional-di-bali-ocean-days-2026>

Kementerian Lingkungan Hidup, “RPPEM Nasional, Fondasi Baru Perlindungan Mangrove Indonesia | Kementerian Lingkungan Hidup / Badan Pengendalian Lingkungan Hidup,” RPPEM Nasional, Fondasi Baru Perlindungan Mangrove Indonesia | Kementerian Lingkungan Hidup / Badan Pengendalian Lingkungan Hidup. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available:
<https://kemenlh.go.id/news/detail/rppem-nasional-fondasi-baru-perlindungan-mangrove-indonesia>

Kusdiantoro et al., “Laporan Kinerja Direktorat Jenderal Pengelolaan Kelautan dan Ruang Laut Tahun 2024,” Ditjen PKRL Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jakarta, 2024. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online].

Available: <https://www.kkp.go.id/download-pdf-akuntabilitas-kinerja/akuntabilitas-kinerja-pelaporan-kinerja-laporan-kinerja-direktorat-jenderal-pengelolaan-kelautan-dan-ruang-laut-tahun-2024.pdf#56#27>

- L. Arumingtyas, "Padang Lamun di Lombok Utara Kian Terkikis," Mongabay.co.id. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://mongabay.co.id/2025/06/02/padang-lamun-di-lombok-utara-kian-terkikis/>
- L. Broudic et al., "Toward a Spatialized Index of the 'Benthic Ecological State' using a New Coral Reef Rapid Assessment Method (CORRAM): Case Study at Reunion Island," *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 27, p. 100811, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.indic.2025.100811.
- L. C. Surbakti et al., "Penilaian Analisis Cluster dan Non-Metric Multidimensional Scalling terhadap Struktur Komunitas Mangrove di Desa Bagan Serdang, Sumatera Utara," *Buletin Oseanografi Marina*, vol. 14, no. 2, pp. 241–254, Apr. 2025, doi: 10.14710/buloma.v14i2.69484.
- L. G. Gillis, C. G. Jones, A. D. Ziegler, D. van der Wal, A. Breckwoldt, and T. J. Bouma, "Opportunities for Protecting and Restoring Tropical Coastal Ecosystems by Utilizing a Physical Connectivity Approach," *Frontiers in Marine Science*, vol. 4, Nov. 2017, doi: 10.3389/fmars.2017.00374.

- L. Gillis et al., "Potential for Landscape-Scale Positive Interactions among Tropical Marine Ecosystems," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 503, pp. 289–303, Apr. 2014, doi: 10.3354/meps10716.
- L. J. McKenzie and S. J. Campbell, *Seagrass-Watch: Manual for Community (Citizen) Monitoring of Seagrass Habitat—Western Pacific Edition*. Cairns, Australia: Queensland Fisheries Service, Northern Fisheries Centre, 2003.
- L. R. Andhika, "Tata Kelola Adaptif Wilayah Pesisir: Meta Teori Analisis," *Inovasi Pembangunan : Jurnal Kelitbangan*, vol. 9, no. 01, p. 87, Apr. 2021, doi: 10.35450/jip.v9i01.173.
- M. B. R. Adj, "RI Backs Blue Carbon to Balance Growth, Sustainability," *Antara News*. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://en.antaranews.com/news/433371/ri-backs-blue-carbon-to-balance-growth-sustainability>
- M. C. Claudino, A. L. M. Pessanha, F. G. Araújo, and A. M. Garcia, "Trophic Connectivity and Basal Food Sources Sustaining Tropical Aquatic Consumers along a Mangrove to Ocean Gradient," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 167, pp. 45–55, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.ecss.2015.07.005.
- M. D. N. Meinita, "Coral Reefs in Indonesia: A Review on Anthropogenic and Natural Disturbances," *Journal of Marine Bioscience and Biotechnology*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2016, Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available:

<https://koreascience.kr/article/JAKO200715643930997.page#1>

- M. Facon et al., "A Comparative Study of The Accuracy and Effectiveness of Line and *Point Intercept Transect* Methods for Coral Reef Monitoring in The Southwestern Indian Ocean Islands," *Ecological Indicators*, vol. 60, pp. 1045–1055, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.ecolind.2015.09.005.
- M. Firmansyah, "Potensi Karbon Biru Indonesia Capai Rp 33 Triliun per Tahun, Apa Tantangannya?," *KOMPAS.com*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://lestari.kompas.com/read/2026/03/14/181700986/potensi-karbon-biru-indonesia-capai-rp-33-triliun-per-tahun-apa-tantangannya>
- M. G. Ridho, S. Supriharyono, and A. Rahman, "Analisis Hubungan Jarak dan Kedalaman dengan Struktur Komunitas Lamun di Pantai Pancuran, Kepulauan Karimunjawa," *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, vol. 7, no. 4, pp. 352–360, Dec. 2018, doi: 10.14710/marj.v7i4.22569.
- M. K. La Peyre, S. Sable, D. A. Marshall, E. Irwin, and C. Hanson, "The use of Conceptual Ecological Models to Identify Critical Data and Uncertainties To Support Numerical Modeling: The northern Gulf of Mexico Eastern Oyster *Crassostrea Virginica* Example," *Marine and Coastal Fisheries*, vol. 16, no. 4, Aug. 2024, doi: 10.1002/mcf2.10297.

- M. K. Wardhani and D. A. S. Rini, "Integrasi Valuasi Konservasi Riparian dalam Analisis Kelayakan Investasi Tambak Garam Rakyat di Desa Losarang Kabupaten Indramayu Jawa Barat," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 24, no. 1, pp. 16–26, Mar. 2026, doi: 10.14710/jil.24.1.16-26.
- M. K. Wardhani and D. R. Kumalasari, "Perkembangan dan Penataan Dalam Pelaksanaan Tugas Pengawas Perikanan di Indonesia," *Semeru: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 2, no. 2, pp. 312–323, Nov. 2025, doi: 10.55499/semeru.v2i2.1699.
- M. K. Wardhani, "Analisis Kesesuaian Lahan Konservasi Hutan Mangrove Di Pesisir Selatan Kabupaten Bangkalan," *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 69–74, Oct. 2014, doi: 10.21107/jk.v7i2.799.
- M. K. Wardhani, H. A. Rachman, Z. Hidayah, A. F. Syah, D. Irawan, and Abd. R. As-syakur, "Spatial Modelling Of Coral Reefs Habitat under Climate Scenario In Coral Triangle Area of East Java," *Ecological Engineering & Environmental Technology*, vol. 27, no. 2, pp. 109–124, Feb. 2026, doi: 10.12912/27197050/216574.
- M. K. Wardhani, *Mangrove Biology, Ecosystem, and Conservation*. Book Chapter: Mangrove Health Assessment Using Hemispherical Photography: A Case Study on Mangrove Ecosystem for Ecotourism at Tajungan-Bangkalan, Madura Island, Indonesia. BoD – Books on Demand, 2023.

- M. Miharja and S. Arsallia, "Integrated Coastal Zone Planning Based on Environment Carrying Capacity Analysis," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 79, p. 012008, Jul. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/79/1/012008.
- M. Novena, "Penangkapan Ikan Marak Pakai Bom, Terumbu Karang di Indonesia Terancam," KOMPAS.com. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://lestari.kompas.com/read/2026/08/15/173552086/penangkapan-ikan-marak-pakai-bom-terumbu-karang-di-indonesia-terancam>
- M. R. B. E. Prasetyo, "Peneliti Pulihkan Mangrove Terintegrasi Budidaya Udang di Donggala," Antara News. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.antaraneews.com/berita/4660465/peneliti-pulihkan-mangrove-terintegrasi-budidaya-udang-di-donggala>
- M. R. M. Naufal, M. M. Kamal, and K. Fery, "Evaluasi dan Strategi Pengelolaan Perikanan di Kabupaten Buru Selatan melalui Pendekatan EAFM," Fao.org. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://agris.fao.org/search/en/records/6878e8490868163a2f751fc7#1>
- M. T. Rahmadi, W. N. Damayani, And M. S. Harefa, "Mapping Dominant Mangrove Genera using SPOT-6 Imagery and Maximum Likelihood Classification for *Conservation* Planning in Langsa City, Aceh,

- Indonesia," *Asian Journal of Forestry*, vol. 10, no. 1, Mar. 2026, doi: 10.13057/asianjfor/r100120.
- Mazlan, F. Yulianda, G. Yulianto, and D. Rachmawani, "Nilai Manfaat Langsung Ekosistem Mangrove untuk Budi Daya Ikan Berbasis Tambak di Kabupaten Tana Tidung," *Fao.org*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://agris.fao.org/search/fr/records/68d2a0a10bd1e9d992db7545#1>
- N. I. Hidayat, F. Kurniawan, and Z. Zairion, "Balancing Economy and Ecology: Ecosystem Approach to Enhanced Traditional Demersal Fisheries Management in West Papua, Indonesia," *Marine Policy*, vol. 181, p. 106843, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.marpol.2025.106843.
- N. M. D. Darmawan, "Seraya Marannu: from Sea Wound to Blue Hope," *Wwf.id*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://wwf.id/en/blog/seraya-marannu-sea-wound-blue-hope>
- N. Puspitarini and D. P. Azaria, "Integrasi Perlindungan Padang Lamun sebagai Ekosistem Karbon Biru dalam Penguatan Mitigasi Iklim," *SEIKAT: Jurnal Ilmu Sosial, Politik dan Hukum*, vol. 5, no. 3, pp. 370–386, Jun. 2026, doi: 10.55681/seikat.v5i3.2198.
- N. Rahman et al., "A Review on the Biodiversity and Conservation of Mangrove Ecosystems in Indonesia," *Biodiversity and Conservation*, vol. 33, no. 3, pp. 875–903, Feb. 2024, doi: 10.1007/s10531-023-02767-9.

- N. T. Agnika, "Mangrove, Tak Sekadar Penjaga Serangan Abrasi," Wwf.id. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://wwf.id/id/blog/mangrove-tak-sekadar-penjaga-serangan-abrasi>
- National Geographic, "Luas Mangrove Dunia Bertambah, tapi Mangrove Indonesia justru Menyusut," Grid.id. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://nationalgeographic.grid.id/read/134398975/luas-mangrove-dunia-bertambah-tapi-mangrove-indonesia-justru-menyusut>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), "Zooxanthellae...What's That - Corals: NOAA's National Ocean Service Education," Noaa.gov. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_corals/coral02_zooxanthellae.html
- Ó. J. Romero-Oliva, "Archivos | Con-Ciencia Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 3," repository.uaeh.edu.mx. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa3/issue/archive>
- O. Setiani and A. M. Firdaus, "Keanekaragaman dan Dominansi Spesies Mangrove di Kawasan Rehabilitasi Mangrove Desa Kaliwlingi Kabupaten Brebes," MAIYAH, vol. 4, no. 3, p. 155, Sep. 2025, doi: 10.20884/1.maiyah.2025.4.3.16788.

- P. A. Lestari et al., "Analysis Of Seagrass Ecosystem Health and The Presence of Associated Biota in Gili Balu, West Nusa Tenggara," *Jurnal Perikanan Unram*, vol. 15, no. 5, pp. 2769–2779, Dec. 2025, doi: 10.29303/jp.v15i5.1893.
- P. H. Dutton, M. Meekan, L. Bejder, and L. M. Komoroske, *Integrating Emerging Technologies into Marine Megafauna Conservation Management*. Frontiers Media SA, 2020.
- P. H. Hennessy, *From Student to Citizen: a Community-Based Vision for Democracy*. White Knight Books, 2006.
- P. M. Mohan and R. Kumari, "Conservation of Coral Reef Environment: Perspectives for Tropical Islands," Elsevier eBooks, Jan. 2008, doi: 10.1016/b978-0-12-813064-3.00026-0.
- P. P. Mustika, "Sains Warga untuk Pemetaan Lamun," *Kompas.id*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.kompas.id/artikel/sains-warga-untuk-pemetaan-lamun>
- P. S. P. Atmaja, I. P. Y. Darmendra, E. Faiqoh, I. W. G. K. Dananjaya, B. Nuegiarti, and R. R. Amgra, "Spatial Variation in the Ecological Condition of Seagrass Meadows in the Lesser Sunda Islands, Indonesia: A SEQI-based framework," *Regional Studies in Marine Science*, vol. 93, p. 104689, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.rsma.2025.104689.

- P. Saenger and S. Funge-Smith, "A Review of Mangrove and Seagrass Ecosystems and their Linkage to Fisheries and Fisheries Management," Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bangkok, 2013. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available:
<https://www.fao.org/4/i3355e/i3355e.pdf#14#5>
- Plymouth Marine Laboratory, "UK Waters facing Accelerated Ocean Acidification, new PML-led study reveals - Ocean Acidification," Ocean Acidification. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://news-oceanacidification-icc.org/2025/03/05/uk-waters-facing-accelerated-ocean-acidification-new-pml-led-study-reveals/>
- R. A. Sinaga, N. M. Ernawati, and N. L. G. R. A. Saraswati, "Kelimpahan dan Keanekaragaman *Makrozoobentos* pada Perakaran Mangrove Berbeda di Teluk Benoa, Bali," Journal of Marine Research, vol. 15, no. 1, pp. 179–189, Jan. 2026, doi: 10.14710/jmr.v15i1.51619.
- R. Ambo-Rappe et al., "Spatial-multivariate Modelling of Seagrass Ecological Quality Index (SEQUI) in Central to Eastern Indonesia," Science of The Total Environment, vol. 1039, p. 181904, Jul. 2026, doi: 10.1016/j.scitotenv.2026.181904.
- R. D. Clark et al., "Nocturnal Fish Movement and Trophic Flow Across Habitat Boundaries in a Coral Reef Ecosystem (SW Puerto Rico)," Caribbean Journal of Science, vol. 45, no. 2–3, pp. 282–303, Jan. 2009, doi: 10.18475/cjos.v45i2.a15.

- R. F. Haya, R. Hasan, and Suparman, "Leaf Morphology and Anatomy of *Sonneratia alba* Growing at Different Salinity Habitat in Pangandaran Coastal, West Java," *Florea : Jurnal Biologi dan Pembelajarannya*, vol. 13, no. 1, pp. 15–25, Apr. 2026, doi: 10.25273/florea.v13i1.24383.
- R. Hidayatullah, D. Santoso, and A. Syukur, "The Value of Habitat Complexity and Diversity of Reef Fish Species in Sangiang Island, Bima Regency, West Nusa Tenggara," *Jurnal Biologi Tropis*, vol. 20, no. 3, p. 514, Dec. 2020, doi: 10.29303/jbt.v20i3.2261.
- R. Holmes et al., "Mangrove Dynamics and Resilience in North Sulawesi, Indonesia, across the Holocene," *Ecological Indicators*, vol. 171, p. 113231, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.ecolind.2025.113231.
- R. K. AlMealla et al., "Biogeographical Patterns of Coral-Associated Symbiodiniaceae Across Thermal Regimes Including Trace Molecular Detection of *Cladocopium thermophilum* (C3 -Gulf) in the Seychelles," *Ecology and Evolution*, vol. 16, no. 7, Jul. 2026, doi: 10.1002/ece3.73941.
- R. Muthukrishnan and P. Fong, "Multiple Anthropogenic Stressors Exert Complex, Interactive Effects on a Coral Reef Community," *Coral Reefs*, vol. 33, no. 4, pp. 911–921, Aug. 2014, doi: 10.1007/s00338-014-1199-1.

- R. Nampu, "Menteri KKP: Rehabilitasi Mangrove harus mampu Topang Ketahanan Pangan," Antara News. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.antaranews.com/berita/5666464/menteri-kkp-rehabilitasi-mangrove-harus-mampu-topang-ketahanan-pangan>
- R. O. S. E. Mantiri, P. D. Darmawan, A. D. Pramassetya, G. S. Gerung, and D. A. Sumilat, "Composition of Fish Species in The Seagrass Ecosystem at Wawontulap Beach South Minahasa," Fao.org. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://agris.fao.org/search/en/providers/126017/records/6a32c054b9a0a56f302a6c56#1>
- R. Setiahadi, M. Lukitasari, N. K. Dewi, S. Sumani, C. Retnaningdyah, And M. Mukhtasor, "Analysis of the Factors Contributing to the Degradation of Coral Reefs and Marine Biota at Pasir Putih Beach, Prigi Bay, Trenggalek District, East Java, Indonesia," Biodiversitas Journal of Biological Diversity, vol. 26, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.13057/biodiv/d260339.
- R. Sigit, "Para Ahli Serukan Pentingnya Tindakan Nyata untuk Lindungi Ekosistem Lamun Indonesia," Mongabay.co.id. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://mongabay.co.id/2025/11/06/para-ahli-serukan-pentingnya-tindakan-nyata-untuk-lindungi-ekosistem-lamun-indonesia/>

- Redaksi Harian Jogja, "Total Luas Mangrove Indonesia Ditetapkan 3,45 Juta Hektare," *Harianjogja.com*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://ecologic.harianjogja.com/r-1243124/total-luas-mangrove-indonesia-ditetapkan-345-juta-hektare>
- RRI, "Alih Fungsi Lahan Jadi Tambak Dominasi Penurunan Luasan Mangrove di Gorontalo," *rri.co.id* - Portal berita terpercaya. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://rri.co.id/gorontalo/regional/2481354/alih-fungsi-lahan-jadi-tambak-dominasi-penurunan-luasan-mangrove-di-gorontalo>
- RRI, "Alih Fungsi Lahan, Ancaman Serius Bagi Hutan Mangrove," *rri.co.id* - Portal berita terpercaya. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://rri.co.id/banda-aceh/regional/2312465/alih-fungsi-lahan-ancaman-serius-bagi-hutan-mangrove>
- RRI, "Padang Lamun: Benteng Laut Indonesia yang Perlu Dijaga," *rri.co.id* - Portal berita terpercaya. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://rri.co.id/surakarta/berita-lain/2419190/padang-lamun-benteng-laut-indonesia-yang-perlu-dijaga>
- RRI, "Perubahan Iklim Picu Pemutihan Karang di Perairan Indonesia," *rri.co.id* - Portal berita terpercaya. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://rri.co.id/ipitek/1402396/about.html>

- S. A. English, V. J. Baker, and C. R. Wilkinson, *Survey Manual for Tropical Marine Resources*. Australian Institute of Marine Science, 1997.
- S. Aslam et al., "Biodiversity of Natural Versus Planted Mangrove Forests Across Latitudes in Guangdong China with seven new records and potential new species," *Scientific Reports*, vol. 16, no. 1, Apr. 2026, doi: 10.1038/s41598-026-38032-6.
- S. Ayudiana, "KKP: Rehabilitasi mangrove penting untuk jaga produktivitas perikanan," *Antara News*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.antaranews.com/berita/5667447/kkp-rehabilitasi-mangrove-penting-untuk-jaga-produktivitas-perikanan>
- S. Christiansen, *Geografi som "Human Ecologi."*. 1967.
- S. D. Mutia, B. Widigdo, and Taryono, "Penilaian Jasa Penyediaan dan Pengaturan Ekosistem Mangrove di Pandansari Brebes Jawa Tengah," *Fao.org*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://agris.fao.org/search/ar/records/671267427f591113e2a63aec#1>
- S. E. Irawan, D. Duryat, M. Riniarti, Y. S. Budi, M. Tri, and R. Rodiani, "Pola Zonasi Mangrove di Wilayah Rawajitu Kabupaten Tulang Bawang Provinsi Lampung," *Fao.org*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://agris.fao.org/search/en/records/68d2a039b3b40a20d618477f#1>

- S. F. Simamora, M. Ramli, A. Asmadin, and M. A. Adidharma, "Struktur Komunitas dan Tutupan Kanopi Mangrove di Teluk Staring Bagian Barat Laut, Sulawesi Tenggara," *Journal of Marine Research*, vol. 15, no. 3, pp. 502–522, Jul. 2026, doi: 10.14710/jmr.v15i3.58486.
- S. I. T. A. Taruna Alkadrie, G. R. P. Raymond, A. F. Rohman, and V. F. Mayasari, "Laporan Kinerja Triwulan III," Balai Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Laut Pontianak, 2024. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.kkp.go.id/download-pdf-akuntabilitas-kinerja/akuntabilitas-kinerja-pelaporan-kinerja-laporan-kinerja-bpspl-pontianak-triwulan-iii-tahun-2024.pdf#21#10>
- S. Jefryco, F. Purwanti, and K. Prakoso, "Valuasi Ekonomi Sumber Daya Perikanan di Kawasan Ekosistem Mangrove Desa Babalan Kabupaten Demak," *Jurnal Pasir Laut*, vol. 9, no. 1, pp. 49–58, Feb. 2025, doi: 10.14710/jpl.2025.69487.
- S. Kalita, U. John, and N. Kuehne, *YOUMARES 8 – Oceans Across Boundaries: Learning from each other*. Springer Open, 2018.
- S. M. O'Brien, B. P. Helm, T. M. Davidson, and J. M. Kneitel, "Invertebrate Community Composition Differs between Restored and Natural Vernal Pools," *Restoration Ecology*, vol. 32, no. 3, Dec. 2023, doi: 10.1111/rec.14080.

- S. P. Cobacho, I. A. van de Leemput, M. Holmgren, and M. J. A. Christianen, "Impact of Human Disturbance on Biogeochemical Fluxes in Tropical Seascapes," *Marine Environmental Research*, vol. 197, p. 106479, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.marenvres.2024.106479.
- S. Purnama, "Alih Fungsi Lahan Pesisir Pengaruhi Produktivitas Rumput Laut di NTB," *Antara News*. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.antaraneews.com/berita/5350101/alih-fungsi-lahan-pesisir-pengaruhi-produktivitas-rumput-laut-di-ntb>
- S. R. Nuban, A. Lukmini, and S. M. Y. Salu, "Coastal Environmental Degradation in Kupang City (2018–2024): A Systematic Review And Policy Implications for *Conservation*," *Jurnal Purifikasi*, vol. 24, no. 2, pp. 143–152, Dec. 2025, doi: 10.12962/purifikasi.v24i2.489.
- S. Rahmawati, A. Irawan, I. H. Supriyadi, and M. H. Azkab, *Panduan Monitoring Padang Lamun*. Jakarta, Indonesia: CRITC–COREMAP–CTI, Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), 2014.
- Science.gov, "Shannon Diversity Indices: Topics by Science.gov," Science.gov. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.science.gov/topicpages/s/shannon+diversity+indices#1>

- Suharsono, N. Wentao, Supono, J. Sahauka, and A. Budiyo, "Status of Coral Reefs in The Lembeh Straits and Adjacent Water, North Sulawesi," *Marine Research in Indonesia*, vol. 37, no. 2, pp. 57–61, Mar. 2015, doi: 10.14203/mri.v37i2.19.
- T. B. Razak et al., "Two Decades of Coral Monitoring Reveal Thermal Stress Thresholds on Indonesian Reefs," *Biological Conservation*, vol. 318, p. 111781, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.biocon.2026.111781.
- T. Handoko, "Ketika Kawasan Mangrove Terdampak Proyek Tambak di Nusakambangan," *Mongabay.co.id*. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://mongabay.co.id/2026/01/16/waswas-pencemaran-tambak-lapas-nusakambangan/>
- T. K. Watanabe, S. Ito, A. U. Nurhidayati, S. Y. Cahyarini, and M. Pfeiffer, "Coral Reefs in the Indonesian Seas Threatened by Heat and Cold Stress," *Geophysical Research Letters*, vol. 53, no. 9, Apr. 2026, doi: 10.1029/2025gl121003.
- T. My, "In central Viet Nam, a Marine Protected Area Listened to Its Residents. It worked.," *Mekong Eye*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.mekongeye.com/2026/02/23/cham-island-marine-protected-area>
- T. S. Agardy and United Nations Environment Programme, *Taking Steps Toward Marine and Coastal Ecosystem-Based Management: An Introductory Guide*. Nairobi: Unep, 2011.

- T. Solihuddin, H. L. Salim, S. Husrin, T. L. Kepel, A. Prasetyo, and M. Farid, "Coastal Dynamics along the Northern Coast of Java, Indonesia: Scales, impacts, and governance strategies," *Regional Studies in Marine Science*, vol. 95, p. 104825, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.rsma.2026.104825.
- U. E. Hernawan et al., "The first Nation-wide Assessment Identifies Valuable Blue Carbon Seagrass Habitat in Indonesia is in Moderate Condition," *Science of The Total Environment*, vol. 782, p. 146818, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146818.
- U. S. Environmental Protection Agency, "Gulf Breeze: Collected Reprints, 1973--1974," U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research & Development, Environmental Research Laboratory, Sabine Island, Gulf Breeze, Florida, 1973. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=9100PTVJ.PDF#133#12>
- UNDP, "In Indonesia, Mangrove Restoration is Protecting the Coastline against Rising Sea Levels | UNDP Climate Change Adaptation," *Adaptation-undp.org*. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.adaptation-undp.org/indonesia-mangrove-restoration-protecting-coastline-against-rising-sea-levels>

- United Nations Environment Programme and Regional Organization for the Protection of the Marine Environment, "Proceedings of the ROPME Workshop on Coastal Area Development," Unep.org. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available:
<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/31564>
- United Nations Environment Programme, "Monitoring Coral Reefs for Global Change: Reference Methods for Marine Pollution Studies No. 61," Unep.org. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available:
<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/1626>
- United Nations Environment Programme, Report of the Meeting of the Regional Group of Experts on the International Coral Reef Action Network (ICRAN) and Report of the First ICRAN Regional Workshop... and Target Sites in the East Asian Seas. United Nations, 2003.
- US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, "NOAA National Ocean Service Education: Corals Tutorial," noaaocan. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: https://nosced-oceanservice-asuat.azurewebsites.net/education/tutorial_corals/coral06_reproduction.html
- US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, "NOAA National Ocean Service Education: Estuaries Tutorial," noaaocan. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online].

Available: https://nosced-oceanservice-asuat.azurewebsites.net/education/tutorial_estuaries/est07_adaptations.html

- US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, "What is a Coral Reef made of?," Noaa.gov. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available: https://oceanservice.noaa.gov/facts/coralmadeof.html?trk=public_post_comment-text
- V. Tilot, N. Aarab, J. M. Navas, A. Dahl, and Alain, "The Role of Rapid Environmental Assessment in Monitoring the Environmental Impacts of Deep-Sea Mining," *Archimer (Ifremer)*, pp. 257–323, Jan. 2025, doi: 10.1007/978-3-031-92737-9_9.
- W. Ardi, "COE Wakatobi MPA 4th Cycle Training: Molding Reliable Practitioners Ready to Manage *Conservation Areas*," Wwf.id. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://wwf.id/en/blog/coe-wakatobi-mpa-4th-cycle-training-molding-reliable-practitioners-ready-manage-conservation>
- W. Asriningrum et al., "Identification of Geomorphological Reef Types of Indonesia Seawaters using Maxwell Classification Scheme from Satellite Imagery," *Regional Studies in Marine Science*, vol. 96, p. 104946, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.rsma.2026.104946.
- W. Hidayat, "Spatial Modeling of Coastal Flood Vulnerability Driven by Land Subsidence and Sea Level Rise Based on Altimetry and Geospatial Data,"

Structures, Infrastructure, Planning, Implementation, and Legislation, vol. 2, no. 1, pp. 1–9, May 2026, doi: 10.69855/sipil.v2i1.480.

W. N. W. Saelan et al., “Foraminiferal Insights into Reef Condition in a Marine Protected Area of Pulau Perhentian, South China Sea,” *Marine Environmental Research*, vol. 217, p. 107981, May 2026, doi: 10.1016/j.marenvres.2026.107981.

Wetlands International Indonesia, “Pembaruan *Global Mangrove Watch* Ungkap Pertumbuhan Mangrove Dunia, tetapi Ancaman Belum Berakhir,” Wetlands International Indonesia. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available:

<https://indonesia.wetlands.org/id/pembaruan-global-mangrove-watch-ungkap-pertumbuhan-mangrove-dunia-tetapi-ancaman-belum-berakhir/>

Wetlands International, “Good news for Mangroves Globally Masks Big Losses in Some Regions, according to Updated *Global Mangrove Watch*,” Wetlands International. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available:

<https://www.wetlands.org/good-news-for-mangroves-globally-masks-big-losses-in-some-regions-according-to-updated-global-mangrove-watch/>

WWF, “A Baby Dugong Sighting shows Success of Seagrass Meadow *Conservation* in Indonesia,” World Wildlife Fund. Accessed: Oct. 03, 2026. [Online]. Available:

<https://www.worldwildlife.org/news/stories/a-baby-dugong-sighting-shows-success-of-seagrass-meadow-conservation-in-indonesia/>

- Y. F. Arifin and S. Hamidah, "Analysis of Ecological Factors Influencing the Formation of Mangrove Zonation and Carbon Sequestration in Indonesia," *BIO Web of Conferences*, vol. 245, p. 04005, 2026, doi: 10.1051/bioconf/202624504005.
- Y. I. Pattinaja, Y. Maruanaya, and S. D. Wattimena, *Hiniotaniv're the Star of Cenderawasih: Exploring the World of Whale Sharks*. CV. NUSANTARA PRESS INDONESIA, 2026.
- Y. Wang, Y. Li, K. Yu, and X. Chen, "Evaluating Coral Reef Restoration in Marine Protected Areas using Habitat Structural Complexity and Coral Communities," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 196, no. 12, Nov. 2024, doi: 10.1007/s10661-024-13443-y.
- Y. Y. Sedo, U. N. W. J. R. embet, L. J. L. Lumingas, F. S. I. Menajang, R. Lasabuda, and J. R. R. Sangari, "An Overview of Mangrove Ecosystem Services in Wori Village, North Sulawesi, Indonesia," *Zenodo*, Feb. 2026, doi: 10.5281/zenodo.18453068.
- Y.-H. Yeh and R. Kirschner, "Study of Endophytic Fungi of *Ipomoea Pes-caprae* Reveals the Superiority of In Situ Plant *Conservation* Over Ex Situ *Conservation* from a Mycological View," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-86508-8.

- Z. Prihatini, "65 Persen Garis Pantai Pesisir Pantura Erosi akibat Alih Fungsi Lahan," KOMPAS.com. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://lestari.kompas.com/read/2026/05/04/192257186/65-persen-garis-pantai-pesisir-pantura-erosi-akibat-alih-fungsi-lahan>
- Z. Prihatini, "Guru Besar IPB: Tumpukan Limbah Cangkang Kerang di Cilincing Ancam Ekosistem," KOMPAS.com. Accessed: Oct. 04, 2026. [Online]. Available: <https://lestari.kompas.com/read/2025/11/25/190627286/guru-besar-ipb-tumpukan-limbah-cangkang-kerang-di-cilincing-ancam-ekosistem>

BIODATA PENULIS



**Dr. Maulinna Kusumo Wardhani,
S.Kel., M.Si.**

Dr. Maulinna Kusumo Wardhani, S.Kel., M.Si. merupakan dosen pada Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Trunodjoyo Madura. Beliau menyelesaikan pendidikan sarjana di bidang Ilmu Kelautan di Universitas Trunodjoyo Madura, Pendidikan Magister di Institut Pertanian Bogor (IPB), dan Program Doktor di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Bidang keahliannya meliputi konservasi sumber daya pesisir dan laut, serta pengelolaan sumber daya alam yang keberlanjutan. Dalam kegiatan akademik dan penelitian, beliau menaruh perhatian pada konservasi ekosistem mangrove, pengelolaan kawasan pesisir dan pulau-pulau kecil, pengembangan ekowisata Bahari, serta keberlanjutan pemanfaatan sumber daya alam. Selain menjalankan tugas pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat, beliau juga aktif dalam menulis di berbagai jurnal nasional dan internasional bereputasi serta mengembangkan kajian ilmiah yang mendukung pengelolaan sumber daya pesisir dan laut secara terpadu. Beliau juga merupakan penulis buku *Konservasi Sumberdaya Pesisir, Laut dan Pulau-pulau*

Kecil, dan buku Paradoks Pulau Kecil: Wisata dan Batas Ekologis. Melalui buku *Konservasi Ekosistem Pesisir: Ekobiologi dan Strategi Pengelolaan Berkelanjutan*, diharapkan dapat berkontribusi dalam memperkuat pemahaman mengenai hubungan antara karakteristik biologis dan ekologis ekosistem pesisir, dinamika lingkungan, serta strategi konservasi yang berbasis ilmu pengetahuan. Buku ini dapat menjadi referensi bagi mahasiswa, akademisi, peneliti, praktisi lingkungan, dan pemangku kepentingan dalam merumuskan upaya konservasi dan pengelolaan ekosistem pesisir yang adaptif, terpadu, dan berkelanjutan.



Febi Ayu Pramithasari, S.Pi., M.Si.

Febi Ayu Pramithasari, S.Pi., M.Si. merupakan dosen pada Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Universitas Trunodjoyo Madura. Beliau menyelesaikan Pendidikan Sarjana pada Jurusan Manajemen Sumberdaya Perairan dan Magister pada Jurusan Pengelolaan Sumberdaya Perairan di Institut Pertanian Bogor (IPB). Bidang keilmuannya berkaitan dengan ekologi perairan (*aquatic ecology*), khususnya kajian ekosistem perairan, struktur komunitas organisme akuatik, serta pengelolaan dan konservasi sumber daya perairan. Beliau turut mendukung pengembangan ilmu pengetahuan di bidang ekologi perairan dan pengelolaan sumber daya perairan melalui

publikasi pada jurnal nasional dan internasional bereputasi. Dalam buku ini, perspektif keilmuan tersebut relevan untuk memperkuat pemahaman mengenai hubungan antara organisme dan habitatnya, kondisi ekologis ekosistem pesisir, serta pentingnya pengelolaan berbasis bukti ilmiah guna menjaga kelestarian keanekaragaman hayati dan keberlanjutan fungsi ekosistem.



Dedi Irawan, S.Si., M.Si.

Penulis adalah akademisi dan peneliti pada Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Universitas Trunodjoyo Madura. Bidang keahlian beliau berfokus pada pengelolaan pesisir dan laut berbasis teknologi spasial yang aktif mengembangkan ekosistem terumbu karang, pesisir, foto-grametri bawah air, dan pemodelan tiga dimensi. Beliau menyelesaikan pendidikan Sarjana Ilmu Kelautan di Universitas Trunojoyo Madura dan melanjutkan studi Magister di Universitas Airlangga. Dedi Irawan telah menghasilkan sejumlah publikasi ilmiah di jurnal nasional dan internasional bereputasi, serta aktif sebagai pemakalah dalam forum ilmiah. Beliau juga merupakan penulis buku *Metode 3 Dimensi Underwater Fotogrametri* yang menjadi kontribusi penting dalam pengembangan metode survei terumbu karang berbasis teknologi modern di Indonesia.



Dr. Agus Romadhon, S.P., M.Si.

Penulis merupakan dosen pada Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Trunodjoyo Madura. Beliau menempuh pendidikan sarjana di Universitas Bangkalan, kemudian pendidikan magister dan doktor di Institut Pertanian Bogor (IPB), dengan fokus pengelolaan sumber daya pesisir dan lautan serta pengelolaan pulau-pulau kecil. Beliau memiliki latar belakang akademik dan keahlian dalam bidang pengelolaan sumber daya pesisir dan laut, khususnya pengelolaan wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil. Fokus keilmuannya berkaitan dengan pemanfaatan sumber daya pesisir secara berkelanjutan, perencanaan pengelolaan kawasan pesisir, serta pengembangan pendekatan pengelolaan yang mempertimbangkan aspek ekologis dan sosial-ekonomi masyarakat pesisir. Dr. Agus Romadhon telah menghasilkan berbagai publikasi ilmiah pada jurnal nasional dan internasional bereputasi serta aktif di berbagai forum ilmiah. Beliau juga merupakan penulis buku *Konservasi Sumberdaya Pesisir, Laut dan Pulau-pulau Kecil*, *Paradoks Pulau Kecil: Wisata dan Batas Ekologis*, *Navigasi Keberlanjutan Pulau Kecil: Integrasi Cultural Ecosystem Services dan Mitigasi Risiko Berbasis Indeks di Madura*.



Dr. Haryo Triajie, S.Pi., M.Si.

Dr. Haryo Triajie, S.Pi., M.Si. merupakan dosen pada Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Universitas Trunodjoyo Madura. Beliau menyelesaikan pendidikan sarjana pada bidang Budidaya Perairan di Universitas Brawijaya Malang, Pendidikan Magister pada bidang Ilmu Perairan di Institut Pertanian Bogor dan Program Doktor di Universitas Brawijaya Malang. Bidang keahliannya meliputi bioteknologi perairan, akuakultur, dan pengelolaan sumber daya perairan. Dalam kegiatan akademik dan penelitian, beliau mengembangkan kajian yang berkaitan dengan kualitas lingkungan perairan, bioteknologi perikanan, serta pengembangan teknologi budidaya perikanan berkelanjutan yang memiliki relevansi penting dalam konservasi ekosistem pesisir. Beliau telah menghasilkan berbagai publikasi dalam jurnal nasional dan internasional bereputasi, aktif dalam pertemuan ilmiah dan juga merupakan penulis buku dengan judul Spesies Fitoplankton Perairan Madura. Melalui kontribusi akademik dan penelitian, beliau turut mendukung pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sumber daya perairan dan pengelolaan lingkungan pesisir.