ISBN 978-634-255-804-1

BUKU AJAR

EKOLOGI LAUT

Darius Arkwright, Sri Herlina,
Siluh Putu Sri Dia Utari, Philipus Uli Basa Hutabarat,
Avisha Fauziah Erzad

BUKU AJAR EKOLOGI LAUT

Darius Arkwright
Sri Herlina
Siluh Putu Sri Dia Utari
Philipus Uli Basa Hutabarat
Avisha Fauziah Erzad

GET PRESS INDONESIA

BUKU AJAR EKOLOGI LAUT

Penulis : Darius Arkwright
Sri Herlina
Siluh Putu Sri Dia Utari
Philipus Uli Basa Hutabarat
Avisha Fauziah Erzad

ISBN: 978-634-255-804-1

Editor : Resma Wahyuni, M.Pd.
Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd
PENERBIT : GET PRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022
Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com
Cetakan Pertama, Oktober 2026
Hak cipta dilindungi undang-undang.
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Undang Undang Republik Indonesia Nomor 19 *Tahun 2002*
Tentang Hak Cipta

Ketentuan Pidana:
Pasal 72

1. Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp 1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/ atau denda paling banyak Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barangsiapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/ atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadirat Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Ajar Ekologi Laut ini.

Buku Ini Membahas : Konsep ekologi laut,Daerah penyebaran dan distribusi mangrove, Faktor lingkungan untuk pertumbuhan mangrove, Zona biogeoragik utama laut, Mengenal ekosistem terumbu karang, Faktor - faktor yang berperan dalam ekosistem terumbu karang, Fungsi dan peranan padang lamun.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, September 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **i**
DAFTAR ISI ..... **ii**
DAFTAR TABEL ..... **v**
DAFTAR GAMBAR ..... **vi**
BAB 1 KONSEP EKOLOGI LAUT **1**
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN 1
B. PENDAHULUAN 1
C. MATERI 4
1.1 Pengertian Ekologi 4
1.2 Definisi Ekologi Laut 21
1.3 Sejarah Perkembangan Ilmu Ekologi Laut 65
1.4 Transformasi Ekologi Laut Menuju Era Digital dan Anthropocene 82
D. RANGKUMAN 119
E. EVALUASI / SOAL LATIHAN 124
F. KUNCI JAWABAN DAN PEMBAHASAN 127
DAFTAR PUSTAKA 131
BAB 2 DAERAH DAN PENYEBARAN DISTRIBUSI MANGROVE **137**
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN 137
B. PENDAHULUAN 137
C. Materi 138
2.1 Konsep Penyebaran dan distrubusi mangrove 139
2.2 Penyebaran Mangrove Dunia 139
2.3 Penyebaran Mangrove di Indonesia 142
2.4 Faktor lingkungan pembatas distribusi mangrove 143
2.5 Karakteristik Komponen Zonasi Mangrove 147
2.6 Distrubusi Mangrove 149
D. RANGKUMAN 154
E. EVALUASI / SOAL LATIHAN 155
F. KUNCI JAWABAN DAN PEMBAHASAN 156
DAFTAR PUSTAKA 159
BAB 3 FAKTOR LINGKUNGAN UNTUK PERTUMBUHAN MANGROVE **161**
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN 161

B. PENDAHULUAN 161
C. MATERI 164
3.1 Pengaruh Faktor Fisik terhadap Pertumbuhan Mangrove 164
3.2 Pengaruh Faktor Kimia terhadap Pertumbuhan Mangrove 175
3.3 Pengaruh Faktor Hidrologi 185
3.4 Pengaruh Faktor Biologis 192
3.5 Dampak Aktivitas Manusia terhadap Faktor Lingkungan Mangrove 199
3.6 Upaya Pengelolaan Lingkungan untuk Mendukung Pertumbuhan Mangrove 207
D. RANGKUMAN 209
DAFTAR PUSTAKA 211
BAB 4 ZONA BIOGEOGRAFIK UTAMA LAUT 215
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN 215
B. MATERI 215
4.1 Konsep Biogeografi Laut 215
4.2 Pembagian Zona Biogeografik Laut 220
4.3 Zona Berdasarkan Karakteristik Lingkungan Laut 227
4.4 Faktor Lingkungan dalam Pembentukan Zona Biogeografik 233
4.5 Pola Distribusi dan Adaptasi Organisme Laut 240
DAFTAR PUSTAKA 248
BAB 5 MENGENAL EKOSISTEM TERUMBU KARANG.. 251
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN 251
B. PENDAHULUAN 251
C. MATERI 252
5.1 Terminologi Terumbu Karang 252
5.2 Sejarah Perkembangan Studi Terumbu Karang . 261
5.3 Karakteristik Umum Ekosistem 265
5.4 Biologi Dan Anatomi Organisme Karang (*Scleractinia*) 275
5.5 Zonasi Ekosistem Terumbu Karang 279
5.6 Ekologi Biota Non-Karang Keras pada Ekosistem Terumbu Karang 287
5.6.1 Dinamika dan Peran Ekologis *Octocorallia* 287

D. RANGKUMAN....292
E. Soal Latihan....294
DAFTAR PUSTAKA....301
BAB 6 FAKTOR-FAKTOR YANG BERPERAN DALAM EKOSISTEM TERUMBU KARANG....311
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN....311
B. MATERI....312
6.1 Konsep Dasar Ekosistem Terumbu Karang....312
6.2 Faktor Abiotik....315
6.3 Faktor Biotik....319
6.4 Faktor Geomorfologi dan Hidrodinamika....324
6.5 Faktor Antropogenik....328
6.6 Keterkaitan Faktor Lingkungan terhadap Stabilitas Terumbu Karang....333
DAFTAR PUSTAKA....339
BAB 7 FUNGSI DAN PERANAN PADANG LAMUN....343
A. CAPAIAN PEMBELAJARAN....343
B. PENDAHULUAN....343
C. MATERI....345
7.1 Padang Lamun Sebagai Penyedia Jasa Ekosistem....345
7.2 Peranan Padang Lamun Terhadap Stabilitas Ekosistem Pesisir....349
7.3 Peranan Padang Lamun Dalam Mendukung Keanekaragaman Hayati....351
7.4 Peranan Padang Lamun Terhadap Perikanan....354
7.5 Peranan Padang Lamun Bagi Kehidupan Masyarakat Pesisir....357
D. RANGKUMAN....360
E. EVALUASI / SOAL LATIHAN....361
F. KUNCI JAWABAN DAN PEMBAHASAN....362
DAFTAR PUSTAKA....363
BIODATA PENILIS

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Perkembangan Konsep Ekologi 12
Tabel 1.2. Perbandingan Paradigma Ekologi Klasik dan Ekologi Modern 17
Tabel 1.3. Pengertian Ekologi Laut Menurut Para Ahli .. 24
Tabel 1.4. Tingkat Organisasi dalam Ekologi Laut..... 30
Tabel 1.5. Perbedaan ruang lingkup cabang oseanografi dan relevansinya terhadap ekologi laut..... 33
Tabel 1.6. Skala Ruang dan Waktu dalam Interaksi Oseanografi dan Ekologi Laut 54
Tabel 2.1. Data Luas Mangrove dan Potensi Habitat Mangrove Tahun 2023 151
Tabel 3.1. Penelitian tentang Pemanfaatan Akar Mangrove 196
Tabel 3.2. Dampak Perubahan Iklim terhadap Ekosistem Mangrove..... 205
Tabel 3.3. Upaya Pengelolaan Lingkungan untuk Mendukung Pertumbuhan Mangrove..... 208
Tabel 5.1. Perbedaan konseptual antara karang sebagai organisme, terumbu sebagai struktur, dan terumbu karang sebagai ekosistem. 261

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Diagram konsep keterkaitan disiplin ilmu kelautan.....25
Gambar 1.2. Hierarki Ruang Lingkup Ekologi Laut.....31
Gambar 2.1. Distribusi Mangrove di Dunia 140
Gambar 2.2. Enam wilayah biogeografi menurut Duke .142
Gambar 2.3. Zonasi mangrove 148
Gambar 2.4. Zonasi mangrove 150
Gambar 2.5. Peta Mangrove Nasional Tahun 2023 152
Gambar 2.6. Peta Mangrove Eksisting dan Potensi Habitat Mangrove Provinsi Papua Tahun 2021 153
Gambar 5.1. Anatomi Mikroskopik Karang Hermatipik.....253
Gambar 5.2. Anatomi Polip dan Kerangka Karang Keras.....277
Gambar 5.3. *Lifeform* Karang *Massive, Sub-Massive*, dan *Branching* 278
Gambar 5.4. *Lifeforms* Karang *Encrusting*, *Foliose/ Laminar*, dan *Tabular* 279
Gambar 5.5. Zonasi Ekosistem Terumbu Karang 285
Gambar 5.6. Ekosistem Karang Mesofotik di Perairan Bahamas (A dan B) 287
Gambar 6.1. Terumbu Karang.....319

BAB 1
KONSEP EKOLOGI LAUT

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menjelaskan definisi dan konsep dasar ekologi laut secara ilmiah.
2. Mendeskripsikan ruang lingkup kajian ekologi laut dalam konteks ekosistem pesisir, laut dangkal, dan laut dalam.
3. Menganalisis hubungan antara komponen biotik dan abiotik dalam ekosistem laut.
4. Menjelaskan proses aliran energi dan siklus biogeokimia dalam lingkungan laut.
5. Mengidentifikasi struktur trofik dan produktivitas primer pada ekosistem laut.
6. Menganalisis pengaruh faktor oseanografi fisik terhadap distribusi organisme laut.
7. Mengevaluasi dampak aktivitas antropogenik dan perubahan iklim terhadap ekosistem laut.
8. Menjelaskan pendekatan pengelolaan ekosistem laut berbasis keberlanjutan (*ecosystem-based management*).
9. Mengembangkan kemampuan berpikir kritis terhadap isu-isu ekologis kelautan kontemporer melalui analisis literatur ilmiah.

B. PENDAHULUAN

Laut merupakan ekosistem terbesar di Bumi yang menutupi lebih dari 70% permukaan planet dan memiliki peran fundamental dalam menjaga keseimbangan sistem kehidupan global. Selain menjadi habitat bagi jutaan spesies organisme, laut berfungsi sebagai pengatur iklim, penyerap karbon dioksida (*carbon sink*), penyedia sumber daya hayati, serta penopang berbagai aktivitas sosial dan ekonomi manusia. Kompleksitas fungsi tersebut menjadikan ekologi laut sebagai salah satu

disiplin ilmu yang sangat penting dalam memahami proses-proses ekologis yang berlangsung di lingkungan laut.

Ekologi laut merupakan cabang ilmu ekologi yang mempelajari hubungan timbal balik antara organisme laut dengan lingkungan fisik, kimia, dan biologinya. Kajian ini tidak hanya membahas keberadaan suatu organisme, tetapi juga menjelaskan bagaimana organisme tersebut berinteraksi dengan organisme lain maupun dengan faktor-faktor lingkungan yang memengaruhi pertumbuhan, kelangsungan hidup, reproduksi, distribusi, dan dinamika populasinya. Dengan demikian, ekologi laut menjadi landasan ilmiah dalam memahami struktur, fungsi, produktivitas, dan stabilitas ekosistem laut pada berbagai skala ruang dan waktu.

Sebagai suatu sistem yang dinamis, ekosistem laut dipengaruhi oleh berbagai faktor oseanografi, seperti suhu, salinitas, arus, gelombang, pasang surut, intensitas cahaya, serta ketersediaan unsur hara. Interaksi antara faktor-faktor tersebut membentuk karakteristik habitat yang menentukan penyebaran organisme, produktivitas primer, aliran energi, siklus biogeokimia, serta terbentuknya berbagai komunitas biologis di laut. Oleh karena itu, pemahaman mengenai prinsip-prinsip dasar ekologi laut sangat diperlukan untuk menjelaskan bagaimana suatu ekosistem berfungsi dan bagaimana perubahan lingkungan dapat memengaruhi keseimbangan ekologisnya.

Dalam beberapa dekade terakhir, ekosistem laut menghadapi tekanan yang semakin besar akibat aktivitas manusia dan perubahan lingkungan global. Berbagai permasalahan seperti pemanasan laut (*ocean warming*), pengasaman laut (*ocean acidification*), kenaikan muka air laut, pencemaran, eutrofikasi, eksploitasi sumber daya yang berlebihan (*overexploitation*), serta degradasi habitat pesisir telah menyebabkan menurunnya kualitas lingkungan dan berkurangnya keanekaragaman hayati laut. Kondisi tersebut menuntut adanya pendekatan ilmiah yang mampu menjelaskan penyebab, mekanisme, serta dampak perubahan ekosistem secara komprehensif sehingga dapat menjadi dasar dalam penyusunan strategi konservasi dan pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan.

Seiring berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, kajian ekologi laut juga mengalami kemajuan yang signifikan. Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*), Sistem Informasi Geografis (SIG/GIS), pemodelan spasial, bioinformatika, analisis molekuler, kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), serta teknik pemantauan oseanografi modern telah memperluas kemampuan ilmuwan dalam mengamati dan menganalisis dinamika ekosistem laut secara lebih akurat dan efisien. Pendekatan-pendekatan tersebut mendukung pengembangan konsep pengelolaan berbasis ekosistem (*Ecosystem-Based Management*), konservasi keanekaragaman hayati, serta implementasi pembangunan kelautan yang berkelanjutan (*blue economy*).

Bab ini disusun sebagai fondasi bagi pembahasan ekologi laut pada bab-bab berikutnya. Materi diawali dengan pengenalan konsep dasar dan definisi ekologi laut, kemudian dilanjutkan dengan pembahasan mengenai ruang lingkup kajian, komponen penyusun ekosistem laut, struktur dan fungsi ekosistem, aliran energi, siklus biogeokimia, keanekaragaman hayati, interaksi antara faktor oseanografi dan organisme, hingga berbagai tantangan ekologis yang dihadapi ekosistem laut pada era perubahan global. Melalui pemahaman terhadap konsep-konsep tersebut, mahasiswa diharapkan mampu mengembangkan cara berpikir ekologis yang komprehensif serta mengaplikasikan prinsip-prinsip ekologi dalam penelitian, pengelolaan sumber daya perairan, konservasi, dan pengambilan keputusan berbasis ilmiah.

Materi dalam bab ini memadukan referensi klasik yang membentuk fondasi teori dengan buku teks akademik, laporan lembaga ilmiah, dan artikel jurnal yang dapat ditelusuri melalui penerbit atau repositori resmi. Literatur mutakhir digunakan terutama untuk topik perubahan iklim, teknologi observasi, biologi molekuler, kecerdasan buatan, dan pengelolaan laut, sedangkan karya historis tetap dipertahankan ketika diperlukan untuk menjelaskan asal-usul konsep.

C. MATERI

1.1 Pengertian Ekologi

1.1.1 Definisi Ekologi menurut Ernst Haeckel

Ekologi merupakan salah satu cabang ilmu biologi yang mempelajari hubungan timbal balik antara organisme dengan lingkungannya. Sebagai disiplin ilmu, ekologi tidak hanya berfokus pada individu atau spesies tertentu, tetapi juga mengkaji bagaimana organisme berinteraksi dengan organisme lain, memanfaatkan sumber daya, merespons perubahan lingkungan, serta membentuk suatu sistem kehidupan yang dinamis. Dalam perkembangannya, ekologi telah menjadi landasan ilmiah bagi berbagai disiplin ilmu, termasuk biologi konservasi, ilmu lingkungan, oseanografi biologis, perubahan iklim, hingga pengelolaan sumber daya alam berbasis ekosistem.

Istilah *ecology* berasal dari bahasa Yunani, yaitu *oikos* yang berarti "rumah", "tempat tinggal", atau "habitat", serta *logos* yang berarti "ilmu" atau "kajian". Secara etimologis, ekologi dapat dimaknai sebagai ilmu yang mempelajari "rumah" atau tempat hidup organisme beserta seluruh interaksi yang berlangsung di dalamnya. Pemaknaan tersebut mencerminkan pandangan bahwa setiap organisme merupakan bagian dari suatu sistem yang lebih besar sehingga tidak dapat dipahami secara terpisah dari lingkungan tempat organisme tersebut hidup.

Konsep tersebut diperkenalkan secara formal oleh zoolog Jerman Ernst Haeckel melalui Generelle Morphologie der Organismen yang diterbitkan pada tahun 1866. Haeckel menggunakan istilah Oekologie untuk menempatkan hubungan organisme dengan lingkungan hidupnya sebagai bidang kajian ilmiah tersendiri (Haeckel, 1866). Haeckel mengemukakan bahwa:

"By ecology, we mean the body of knowledge concerning the economy of nature—the investigation of the total relations of the animal both to its inorganic and organic environment."

Definisi tersebut menunjukkan bahwa sejak awal ekologi dipandang sebagai ilmu yang mempelajari keseluruhan hubungan organisme dengan lingkungan abiotik maupun biotiknya. Lingkungan anorganik meliputi berbagai faktor fisik

dan kimia, seperti suhu, cahaya, air, tanah, udara, dan unsur hara, sedangkan lingkungan organik mencakup hubungan dengan organisme lain melalui kompetisi, predasi, simbiosis, maupun bentuk interaksi biologis lainnya.

Pemikiran Haeckel dipengaruhi secara kuat oleh teori evolusi Charles Darwin yang menekankan bahwa keberhasilan suatu organisme ditentukan oleh kemampuannya beradaptasi terhadap lingkungan. Namun demikian, Haeckel memperluas gagasan Darwin dengan menempatkan lingkungan sebagai komponen utama yang harus dipelajari untuk memahami proses evolusi dan keberlangsungan kehidupan. Dalam perspektif Haeckel, evolusi tidak dapat dijelaskan hanya melalui perubahan sifat organisme, tetapi juga melalui interaksi kompleks antara organisme dengan kondisi lingkungan tempat organisme tersebut hidup. Pandangan inilah yang kemudian menjadi salah satu fondasi perkembangan ekologi modern.

Meskipun definisi Haeckel menjadi tonggak sejarah lahirnya ilmu ekologi, konsep hubungan antara organisme dan lingkungan sebenarnya telah berkembang jauh sebelum abad ke-19. Filsuf Yunani seperti Aristoteles dan Theophrastus telah mendeskripsikan hubungan antara tumbuhan, hewan, dan habitatnya melalui pendekatan natural history. Pada abad ke-18, Carl Linnaeus memperkenalkan konsep *Oeconomia Naturae* yang menggambarkan alam sebagai suatu sistem yang terorganisasi, sedangkan Alexander von Humboldt menunjukkan bahwa distribusi organisme dipengaruhi oleh variasi kondisi lingkungan seperti iklim, topografi, dan elevasi. Gagasan-gagasan tersebut kemudian diintegrasikan oleh Haeckel ke dalam kerangka ilmiah yang lebih sistematis sehingga melahirkan disiplin ilmu ekologi.

Definisi Haeckel juga memperkenalkan perspektif holistik dalam memandang alam. Sebelumnya, kajian biologi lebih banyak berorientasi pada deskripsi morfologi, anatomi, dan klasifikasi organisme. Haeckel mengubah paradigma tersebut dengan menempatkan organisme sebagai bagian dari suatu jaringan hubungan yang kompleks. Dalam pandangan ini, setiap perubahan pada salah satu komponen lingkungan akan memengaruhi komponen lainnya melalui mekanisme sebab-akibat yang saling berkaitan. Konsep tersebut kemudian

berkembang menjadi dasar pemikiran mengenai ekosistem, jaringan makanan (*food web*), keseimbangan ekologis (*ecological balance*), serta dinamika populasi yang menjadi fokus utama penelitian ekologi hingga saat ini.

Perkembangan ilmu pengetahuan selama lebih dari satu abad menunjukkan bahwa definisi Haeckel tetap relevan, meskipun telah mengalami penyempurnaan. Pada pertengahan abad ke-20, para ahli mulai menekankan bahwa ekologi tidak hanya mempelajari hubungan organisme dengan lingkungannya, tetapi juga berupaya menjelaskan pola distribusi, kelimpahan (*abundance*), produktivitas, dan dinamika komunitas dalam suatu ruang dan waktu tertentu. Pendekatan ini berkembang seiring munculnya teori sistem (*systems theory*), yang memandang ekosistem sebagai satu kesatuan fungsional yang tersusun atas berbagai komponen yang saling bergantung.

Dalam konteks tersebut, ekologi modern mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu, seperti fisiologi, genetika, klimatologi, geografi, oseanografi, matematika, hingga ilmu komputer. Perkembangan teknologi, seperti penginderaan jauh (*remote sensing*), Sistem Informasi Geografis (GIS), pemodelan spasial, bioinformatika, dan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), memungkinkan para ilmuwan menganalisis hubungan organisme–lingkungan pada skala yang jauh lebih luas dibandingkan masa Haeckel. Walaupun metode penelitian mengalami perubahan yang sangat pesat, esensi definisi Haeckel mengenai hubungan antara organisme dan lingkungannya tetap menjadi fondasi konseptual bagi seluruh cabang ilmu ekologi, termasuk ekologi laut.

Dalam konteks ilmu kelautan, definisi tersebut memiliki makna yang sangat penting karena lingkungan laut merupakan sistem yang sangat kompleks dan dinamis. Organisme laut tidak hanya dipengaruhi oleh interaksi biologis, tetapi juga oleh berbagai faktor oseanografi, seperti suhu, salinitas, arus, gelombang, pasang surut, tekanan hidrostatik, intensitas cahaya, serta ketersediaan nutrien. Oleh sebab itu, kajian ekologi laut berkembang sebagai disiplin yang berupaya memahami keterkaitan antara proses-proses fisik, kimia, dan biologis dalam

menentukan struktur, fungsi, produktivitas, serta keberlanjutan ekosistem laut.

Di era perubahan iklim global, konsep ekologi yang diperkenalkan Haeckel memperoleh relevansi yang semakin besar. Berbagai fenomena seperti pemanasan laut (*ocean warming*), pengasaman laut (*ocean acidification*), kenaikan muka air laut (*sea level rise*), hilangnya keanekaragaman hayati, serta meningkatnya tekanan antropogenik terhadap ekosistem laut menunjukkan bahwa organisme tidak dapat dipisahkan dari perubahan lingkungan tempat hidupnya. Dengan demikian, pemahaman mengenai definisi ekologi bukan sekadar kajian historis, melainkan menjadi dasar konseptual untuk menjelaskan berbagai fenomena ekologis kontemporer dan merumuskan strategi konservasi serta pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa definisi ekologi yang dikemukakan oleh Ernst Haeckel merupakan tonggak lahirnya ilmu ekologi modern. Konsep hubungan timbal balik antara organisme dan lingkungan yang diperkenalkan lebih dari 150 tahun yang lalu masih menjadi fondasi bagi perkembangan teori ekologi, termasuk ekologi laut. Perbedaannya terletak pada ruang lingkup dan pendekatan analisis yang kini semakin luas melalui integrasi ilmu biologi, oseanografi, klimatologi, teknologi informasi, dan ilmu data. Dengan demikian, ekologi tidak lagi dipandang sebagai ilmu yang bersifat deskriptif semata, melainkan sebagai ilmu sistem yang mampu menjelaskan dinamika kehidupan pada berbagai tingkat organisasi biologis dan mendukung pengelolaan lingkungan secara ilmiah.

1.1.2 Evolusi Konsep Ekologi

Sejak diperkenalkan oleh Ernst Haeckel pada tahun 1866, ekologi mengalami perkembangan yang sangat pesat, baik dari sisi objek kajian, pendekatan ilmiah, maupun metode penelitian. Pada awal perkembangannya, ekologi lebih berorientasi pada pengamatan deskriptif terhadap hubungan organisme dengan lingkungannya. Para ilmuwan berusaha menjelaskan bagaimana tumbuhan dan hewan tersebar di berbagai wilayah geografis,

bagaimana organisme beradaptasi terhadap kondisi lingkungan tertentu, serta bagaimana faktor-faktor fisik memengaruhi keberadaan suatu spesies. Pendekatan ini dikenal sebagai *descriptive ecology*, yang menitikberatkan pada inventarisasi dan dokumentasi fenomena alam.

Meskipun pendekatan deskriptif memberikan fondasi penting bagi ilmu ekologi, pendekatan tersebut memiliki keterbatasan karena belum mampu menjelaskan mekanisme yang mengatur dinamika suatu ekosistem. Seiring berkembangnya metode ilmiah, perhatian para peneliti bergeser dari sekadar mendeskripsikan pola menjadi menjelaskan proses (*process-oriented ecology*). Pergeseran paradigma ini menandai lahirnya ekologi sebagai ilmu yang tidak hanya mengidentifikasi hubungan antarorganisme, tetapi juga berupaya memahami mekanisme yang mengendalikan perubahan dalam suatu sistem ekologis.

Perkembangan penting terjadi pada awal abad ke-20 ketika kajian komunitas tumbuhan berkembang pesat melalui karya-karya Frederic Clements. Clements memperkenalkan konsep suksesi ekologi (*ecological succession*), yaitu perubahan bertahap komposisi komunitas organisme menuju kondisi yang relatif stabil atau klimaks (*climax community*). Menurut Clements, komunitas tumbuhan berkembang seperti organisme hidup yang mengalami tahapan pertumbuhan hingga mencapai kondisi dewasa. Konsep ini menjadi salah satu teori pertama yang mencoba menjelaskan dinamika ekosistem sebagai suatu proses yang berlangsung secara teratur.

Pandangan tersebut kemudian memperoleh kritik dari Henry Gleason yang mengemukakan *individualistic concept of plant association*. Gleason berpendapat bahwa komunitas bukanlah suatu "superorganisme", melainkan kumpulan individu yang masing-masing memiliki respons berbeda terhadap kondisi lingkungan. Perdebatan antara Clements dan Gleason menjadi tonggak penting dalam perkembangan teori ekologi karena mendorong lahirnya pendekatan yang lebih kuantitatif dalam mempelajari struktur komunitas dan distribusi spesies.

Konsep lain yang sangat berpengaruh diperkenalkan oleh Charles Elton melalui bukunya *Animal Ecology* pada tahun 1927.

Elton mengembangkan konsep relung ekologi (*ecological niche*), rantai makanan (*food chain*), jaring makanan (*food web*), serta piramida trofik. Menurut Elton, setiap organisme menempati posisi tertentu dalam suatu jaringan interaksi yang menentukan perannya terhadap aliran energi dan materi dalam ekosistem. Konsep tersebut hingga kini menjadi dasar dalam analisis struktur trofik ekosistem laut.

Perubahan paradigma yang paling mendasar terjadi ketika Arthur George Tansley memperkenalkan istilah ekosistem (*ecosystem*) pada tahun 1935. Tansley mengkritik pendekatan yang hanya berfokus pada komunitas organisme dan menegaskan bahwa komponen biotik dan abiotik harus dipelajari sebagai satu kesatuan yang saling berinteraksi. Menurutnya, organisme, tanah, air, atmosfer, energi matahari, dan berbagai faktor fisik lainnya membentuk suatu sistem yang tidak dapat dipisahkan. Konsep ekosistem inilah yang kemudian menjadi fondasi utama seluruh cabang ilmu ekologi, termasuk ekologi laut.

Perkembangan berikutnya dipelopori oleh Raymond Lindeman yang menerbitkan artikel klasik *The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology* pada tahun 1942. Lindeman memperkenalkan pendekatan kuantitatif terhadap aliran energi dalam ekosistem melalui tingkat trofik (*trophic levels*). Ia menunjukkan bahwa perpindahan energi antarorganisme berlangsung secara tidak efisien, sehingga hanya sebagian kecil energi yang dapat diteruskan ke tingkat trofik berikutnya. Teori ini menjadi dasar bagi kajian produktivitas primer, efisiensi ekologi, dan dinamika jaring makanan yang hingga kini banyak diterapkan dalam penelitian ekologi laut.

Perkembangan selanjutnya semakin diperkaya oleh karya Eugene P. Odum melalui buku *Fundamentals of Ecology*. Odum mengembangkan konsep ekologi sistem (*systems ecology*) yang memandang ekosistem sebagai suatu sistem terbuka dengan aliran energi, siklus materi, mekanisme umpan balik (*feedback*), serta kemampuan mengatur diri (*self-regulation*). Dalam pendekatan ini, perubahan pada satu komponen ekosistem akan memengaruhi keseluruhan sistem melalui berbagai jalur interaksi. Pendekatan sistem memungkinkan para ilmuwan

menjelaskan stabilitas, produktivitas, dan resiliensi suatu ekosistem secara lebih komprehensif.

Pada dekade 1970-an, paradigma ekologi kembali mengalami perkembangan melalui konsep resiliensi ekologi yang diperkenalkan oleh Crawford Stanley Holling. Berbeda dengan konsep stabilitas yang menekankan kemampuan sistem untuk mempertahankan kondisi keseimbangan, Holling menjelaskan bahwa ekosistem memiliki kapasitas untuk menyerap gangguan, beradaptasi, dan membentuk keseimbangan baru tanpa kehilangan fungsi utamanya. Konsep resiliensi menjadi sangat penting dalam memahami respons ekosistem laut terhadap tekanan seperti perubahan iklim, pencemaran, eksploitasi sumber daya, maupun spesies invasif (Holling, 1973).

Memasuki abad ke-21, perkembangan teknologi mengubah secara fundamental cara ilmuwan mempelajari ekosistem. Kemajuan dalam penginderaan jauh (*remote sensing*), Sistem Informasi Geografis (GIS), pemodelan numerik, sensor oseanografi otomatis, genomik lingkungan (*environmental genomics*), *environmental DNA* (eDNA), bioinformatika, serta kecerdasan buatan memungkinkan pengamatan ekosistem pada skala ruang dan waktu yang sebelumnya tidak mungkin dilakukan. Penelitian ekologi tidak lagi terbatas pada lokasi tertentu, tetapi mampu mengintegrasikan data satelit, pengamatan lapangan, data oseanografi, dan model prediktif untuk memahami dinamika ekosistem secara global.

Dalam konteks ekologi laut, perubahan paradigma tersebut menghasilkan pendekatan yang lebih integratif. Ekosistem laut dipandang sebagai sistem kompleks yang dipengaruhi oleh interaksi antara proses fisik, kimia, biologis, dan aktivitas manusia. Arus laut, suhu permukaan laut, upwelling, sirkulasi termohalin, serta variabilitas iklim seperti El *Niño–Southern Oscillation* (ENSO) tidak lagi dipelajari secara terpisah, tetapi dianalisis sebagai faktor yang membentuk produktivitas primer, distribusi organisme, struktur komunitas, dan fungsi ekosistem.

Paradigma modern juga menempatkan manusia sebagai bagian yang tidak terpisahkan dari sistem ekologi. Pendekatan *social-ecological systems* memandang bahwa keberlanjutan

ekosistem sangat dipengaruhi oleh interaksi antara proses ekologis, kebijakan, ekonomi, budaya, dan tata kelola sumber daya alam. Dengan demikian, pengelolaan ekosistem laut tidak hanya bertujuan mempertahankan biodiversitas, tetapi juga menjamin keberlanjutan jasa ekosistem (*ecosystem services*) yang menopang kehidupan masyarakat pesisir dan pembangunan ekonomi.

Perubahan paradigma dari ilmu deskriptif menuju ilmu sistem juga tercermin dalam metode penelitian. Jika penelitian awal didominasi oleh observasi lapangan dan deskripsi spesies, penelitian modern lebih menekankan analisis kuantitatif, eksperimen, pemodelan matematis, analisis jaringan (*network analysis*), analisis spasial, serta integrasi berbagai disiplin ilmu. Pendekatan multidisiplin ini memungkinkan peneliti menjelaskan mekanisme yang mendasari perubahan ekosistem sekaligus memprediksi respons ekosistem terhadap berbagai skenario perubahan lingkungan.

Evolusi konsep ekologi menunjukkan bahwa disiplin ini telah berkembang dari ilmu yang berorientasi pada deskripsi organisme menjadi ilmu sistem yang mengintegrasikan berbagai komponen biotik, abiotik, dan sosial dalam satu kerangka analisis yang utuh. Transformasi tersebut menjadi dasar bagi perkembangan ekologi laut modern yang memandang laut sebagai sistem kompleks, dinamis, dan adaptif. Pemahaman terhadap evolusi konsep ini sangat penting karena menjadi landasan teoritis bagi pembahasan mengenai struktur ekosistem laut, aliran energi, siklus biogeokimia, keanekaragaman hayati, serta pengelolaan sumber daya laut berbasis ekosistem yang akan dibahas pada bagian-bagian berikutnya.

Tabel 1.1. Perkembangan Konsep Ekologi

Periode	Tokoh	Konsep Utama	Kontribusi terhadap Ekologi Modern
1866	Ernst Haeckel	Definisi ekologi	Hubungan organisme dengan lingkungan
Awal abad ke-20	Frederic Clements	Suksesi ekologi	Dinamika perkembangan komunitas
1927	Charles Elton	Relung ekologi, rantai makanan	Struktur trofik dan interaksi spesies
1935	A. G. Tansley	Ekosistem	Integrasi komponen biotik dan abiotik
1942	Raymond Lindeman	Dinamika trofik	Aliran energi dalam ekosistem
1953–1971	Eugene P. Odum	Ekologi sistem	Ekosistem sebagai sistem terbuka
1973	C. S. Holling	Resiliensi ekologi	Respons ekosistem terhadap gangguan
Abad ke-21	Berbagai peneliti	Social-ecological systems, Big Data Ecology	Integrasi ekologi, teknologi, dan keberlanjutan

1.1.3 Perkembangan Paradigma Ekologi Modern

Perkembangan ilmu pengetahuan selama beberapa dekade terakhir telah mengubah secara fundamental cara pandang terhadap ekologi. Jika pada awal perkembangannya ekologi lebih berfokus pada deskripsi hubungan antara organisme dan lingkungannya, maka paradigma modern memandang ekosistem sebagai suatu sistem kompleks yang tersusun atas berbagai komponen biotik, abiotik, dan sosial yang saling berinteraksi secara dinamis. Pergeseran paradigma ini dipicu oleh kemajuan teori sistem, perkembangan teknologi observasi lingkungan, meningkatnya kemampuan komputasi, serta semakin kompleksnya permasalahan lingkungan global, seperti perubahan iklim, hilangnya keanekaragaman hayati, dan degradasi ekosistem.

Salah satu karakteristik utama paradigma ekologi modern adalah pengakuan bahwa ekosistem merupakan sistem adaptif

kompleks (*complex adaptive systems*). Dalam sistem seperti ini, perubahan pada satu komponen dapat menghasilkan respons yang tidak linier pada komponen lainnya. Dengan kata lain, hubungan sebab-akibat dalam ekosistem tidak selalu bersifat sederhana dan proporsional, tetapi sering kali melibatkan mekanisme umpan balik (*feedback*), ambang batas (*threshold*), serta perubahan rezim (*regime shifts*) yang dapat mengubah kondisi ekosistem secara drastis (Levin, 1998; Folke et al., 2004).

Pendekatan sistem adaptif kompleks menekankan bahwa setiap organisme merupakan bagian dari suatu jaringan interaksi yang luas. Hubungan antara produsen, konsumen, dekomposer, faktor fisik, siklus nutrien, serta aktivitas manusia membentuk suatu jaringan ekologis (*ecological network*) yang terus berkembang. Oleh karena itu, penelitian ekologi modern tidak lagi berorientasi hanya pada satu spesies atau satu habitat, tetapi berusaha memahami bagaimana keseluruhan jaringan tersebut berfungsi sebagai suatu sistem yang terintegrasi.

Paradigma modern juga menempatkan keanekaragaman hayati (*biodiversity*) sebagai komponen fundamental dalam menjaga fungsi dan stabilitas ekosistem. Keanekaragaman hayati tidak hanya diukur berdasarkan jumlah spesies, tetapi juga mencakup variasi genetik, keragaman fungsi (*functional diversity*), serta keragaman filogenetik (*phylogenetic diversity*). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa ekosistem dengan tingkat biodiversitas yang tinggi umumnya memiliki produktivitas lebih besar, efisiensi penggunaan sumber daya yang lebih baik, serta kemampuan adaptasi yang lebih tinggi terhadap gangguan lingkungan (Cardinale et al., 2012).

Dalam konteks tersebut berkembang konsep fungsi ekosistem (*ecosystem functioning*), yaitu seluruh proses biologis, kimia, dan fisik yang memungkinkan suatu ekosistem mempertahankan produktivitas dan kestabilannya. Fungsi-fungsi tersebut meliputi produksi biomassa, dekomposisi bahan organik, siklus unsur hara, penyerapan karbon, serta regulasi hidrologi. Berbeda dengan paradigma klasik yang lebih berorientasi pada struktur komunitas, paradigma modern menitikberatkan pada bagaimana berbagai komponen ekosistem

bekerja secara bersama-sama untuk mempertahankan keberlanjutan sistem.

Perkembangan berikutnya melahirkan konsep jasa ekosistem (*ecosystem services*), yaitu seluruh manfaat yang diperoleh manusia dari ekosistem. Menurut Millennium Ecosystem Assessment (2005), jasa ekosistem dikelompokkan menjadi empat kategori utama, yaitu jasa penyediaan (*provisioning services*), jasa pengaturan (*regulating services*), jasa budaya (*cultural services*), dan jasa pendukung (*supporting services*). Dalam ekosistem laut, jasa tersebut meliputi penyediaan sumber pangan, penyimpanan karbon biru (*blue carbon*), perlindungan pantai, pemeliharaan siklus nutrien, hingga penyediaan ruang bagi kegiatan rekreasi dan pariwisata.

Perubahan paradigma ini menunjukkan bahwa tujuan ekologi modern tidak lagi hanya menjelaskan bagaimana ekosistem bekerja, tetapi juga bagaimana mempertahankan fungsi-fungsi tersebut agar tetap mampu mendukung kesejahteraan manusia secara berkelanjutan. Dengan demikian, ilmu ekologi memiliki keterkaitan yang sangat erat dengan konsep pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*).

Perhatian terhadap keberlanjutan semakin meningkat setelah diperkenalkannya konsep resiliensi sosial-ekologis (*social-ecological resilience*). Konsep ini menjelaskan bahwa ketahanan suatu ekosistem tidak hanya ditentukan oleh karakteristik biologisnya, tetapi juga oleh kemampuan masyarakat dalam mengelola sumber daya secara adaptif. Dalam kerangka ini, manusia dipandang sebagai bagian dari ekosistem, bukan sebagai faktor eksternal yang terpisah. Oleh karena itu, keberhasilan konservasi sangat bergantung pada interaksi antara proses ekologis, kebijakan publik, kelembagaan, ekonomi, serta perilaku masyarakat (Folke et al., 2010).

Paradigma modern juga memperkenalkan konsep *planetary boundaries*, yaitu batas-batas biofisik yang membantu menggambarkan ruang operasi yang aman bagi masyarakat manusia dalam sistem Bumi. Dalam konteks kelautan, tekanan terhadap integritas biosfer berkaitan dengan penurunan populasi biota, degradasi habitat, pencemaran, serta perubahan kondisi oseanografi akibat perubahan iklim (Steffen et al., 2015).

Perubahan iklim kemudian menjadi salah satu fokus utama penelitian ekologi abad ke-21. Meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca telah menyebabkan kenaikan suhu atmosfer dan laut, perubahan pola sirkulasi samudra, meningkatnya frekuensi gelombang panas laut (*marine heatwaves*), pengasaman laut (*ocean acidification*), serta kenaikan muka air laut. Perubahan tersebut tidak hanya memengaruhi distribusi spesies, tetapi juga mengubah struktur komunitas, produktivitas primer, dinamika jaring makanan, dan stabilitas ekosistem laut (IPCC, 2023).

Kemajuan teknologi turut mempercepat transformasi paradigma ekologi modern. Pemanfaatan citra satelit resolusi tinggi, kendaraan bawah laut nirawak (*autonomous underwater vehicles*), sensor oseanografi otomatis, *environmental DNA* (eDNA), pengurutan genom berkapasitas tinggi (*high-throughput sequencing*), serta kecerdasan buatan memungkinkan pengamatan ekosistem pada skala spasial dan temporal yang sebelumnya sulit dicapai. Integrasi data dari berbagai sumber menghasilkan pendekatan yang dikenal sebagai *big data ecology*, yaitu penggunaan kumpulan data berukuran besar untuk memahami pola dan proses ekologis melalui analisis komputasional.

Di bidang ekologi laut, pendekatan ini memungkinkan ilmuwan memantau perubahan suhu permukaan laut, distribusi klorofil-a, produktivitas primer, migrasi organisme, serta kondisi habitat secara hampir waktu nyata (*near real-time*). Informasi tersebut menjadi dasar dalam pengembangan sistem peringatan dini terhadap pemutihan terumbu karang, ledakan alga berbahaya (*harmful algal blooms*), maupun penurunan stok perikanan.

Selain pendekatan berbasis data, paradigma modern juga menekankan pentingnya pendekatan lintas disiplin (*transdisciplinary approach*). Permasalahan lingkungan tidak dapat diselesaikan hanya melalui ilmu ekologi, tetapi memerlukan integrasi dengan oseanografi, klimatologi, ekonomi sumber daya, ilmu sosial, hukum lingkungan, serta kebijakan publik. Pendekatan multidisiplin ini melahirkan konsep *Ecosystem-Based Management (EBM)*, yaitu strategi pengelolaan yang mempertimbangkan seluruh komponen ekosistem beserta

interaksinya, bukan hanya satu spesies atau satu sektor pemanfaatan.

Bagi ilmu ekologi laut, perubahan paradigma ini memiliki implikasi yang sangat besar. Laut kini dipahami sebagai sistem yang saling terhubung dari wilayah pesisir hingga laut dalam, dari skala lokal hingga global, serta dari proses biologis hingga dinamika sosial-ekonomi. Oleh karena itu, penelitian dan pengelolaan ekosistem laut harus mempertimbangkan keterkaitan antarhabitat, variabilitas iklim, konektivitas populasi, serta dampak aktivitas manusia terhadap fungsi ekosistem secara keseluruhan.

Berdasarkan uraian di atas maka paradigma ekologi modern tidak hanya memperluas ruang lingkup kajian ekologi, tetapi juga mengubah tujuan ilmu ini. Ekologi kini berfungsi sebagai ilmu integratif yang menjelaskan mekanisme kerja sistem kehidupan, memprediksi respons ekosistem terhadap perubahan lingkungan, serta menyediakan dasar ilmiah bagi konservasi keanekaragaman hayati dan pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan. Paradigma inilah yang menjadi fondasi konseptual bagi perkembangan ekologi laut kontemporer, terutama dalam menghadapi tantangan global pada era Anthropocene.

Tabel 1.2. Perbandingan Paradigma Ekologi Klasik dan Ekologi Modern

Aspek	Paradigma Klasik	Paradigma Modern
Fokus kajian	Organisme dan habitat	Sistem sosial-ekologis
Pendekatan	Deskriptif	Sistem, kuantitatif, prediktif
Skala analisis	Populasi dan komunitas	Ekosistem hingga biosfer
Metode	Observasi lapangan	Pemodelan, GIS, penginderaan jauh, genomik, AI
Tujuan	Memahami pola distribusi organisme	Memahami fungsi, resiliensi, dan keberlanjutan ekosistem
Orientasi	Ilmu dasar	Ilmu dasar dan pengambilan keputusan berbasis sains

1.1.4 Prinsip Dasar Interaksi Organisme–Lingkungan

Interaksi antara organisme dengan lingkungannya merupakan prinsip fundamental dalam ilmu ekologi. Seluruh organisme, mulai dari mikroorganisme hingga mamalia laut, hidup dalam suatu lingkungan yang senantiasa mengalami perubahan. Organisme tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, tetapi juga berperan aktif dalam memodifikasi lingkungan tersebut melalui berbagai proses biologis. Hubungan timbal balik inilah yang membentuk dasar seluruh proses ekologis, mulai dari tingkat individu, populasi, komunitas, ekosistem, hingga biosfer (Odum & Barrett, 2005).

Dalam perspektif ekologi modern, lingkungan (*environment*) didefinisikan sebagai seluruh faktor eksternal yang memengaruhi kehidupan suatu organisme. Faktor-faktor tersebut meliputi komponen fisik, kimia, biologis, bahkan sosial pada spesies tertentu. Tidak ada organisme yang hidup secara terisolasi; setiap individu selalu berada dalam jaringan interaksi yang kompleks dengan lingkungannya. Oleh karena itu, perubahan pada salah satu komponen lingkungan akan memengaruhi struktur dan fungsi keseluruhan sistem ekologis (Odum & Barrett, 2005).

A. Komponen Lingkungan

Secara umum, lingkungan organisme tersusun atas dua komponen utama, yaitu lingkungan abiotik dan lingkungan biotik.

1. Faktor Abiotik

Faktor abiotik merupakan seluruh komponen fisik dan kimia yang memengaruhi kehidupan organisme. Pada ekosistem laut, faktor abiotik memiliki peranan yang sangat dominan karena menentukan distribusi spasial organisme, produktivitas primer, serta dinamika komunitas. Faktor-faktor tersebut meliputi:

a. Suhu (*temperature*);
b. Salinitas;
c. Intensitas cahaya;
d. Tekanan hidrostatik;
e. Oksigen terlarut;
f. pH;
g. Nutrien;
h. Arus laut;
i. Gelombang;
j. Pasang surut;
k. Kedalaman perairan.

Perubahan pada faktor abiotik dapat menghasilkan respons biologis yang besar ketika kondisi lingkungan mendekati atau melampaui batas toleransi organisme. Pada terumbu karang, misalnya, anomali suhu laut yang berlangsung cukup lama dapat mengganggu simbiosis karang dengan dinoflagellata Symbiodiniaceae dan memicu pemutihan karang; besarnya respons bergantung pada intensitas serta durasi stres panas, riwayat paparan, dan kondisi lokal (IPCC, 2023).

Demikian pula, penurunan pH laut akibat meningkatnya konsentrasi karbon dioksida atmosfer memengaruhi proses kalsifikasi berbagai organisme laut, seperti karang batu, moluska, dan plankton berkapur. Fenomena ini dikenal sebagai pengasaman laut (*ocean acidification*) dan saat ini menjadi salah satu isu utama dalam ekologi laut global (IPCC, 2023).

2. Faktor Biotik

Faktor biotik mencakup seluruh interaksi antarorganisme yang hidup dalam suatu ekosistem. Interaksi tersebut dapat terjadi antarindividu dalam satu spesies (*intraspecific interaction*) maupun antarspesies (*interspecific interaction*). Beberapa bentuk interaksi biotik meliputi:

a. Kompetisi;
b. Predasi;
c. Herbivori;
d. Parasitisme;
e. Mutualisme;
f. Komensalisme;
g. Amensalisme;
h. Fasilitasi (*facilitation*).

Hubungan-hubungan tersebut membentuk struktur komunitas dan menentukan dinamika populasi dalam jangka panjang.

Pada ekosistem terumbu karang, misalnya, hubungan mutualistik antara karang hermatipik dan alga dinoflagellata dari famili Symbiodiniaceae merupakan salah satu contoh interaksi biotik yang sangat menentukan produktivitas ekosistem. Gangguan terhadap hubungan tersebut dapat menyebabkan penurunan produktivitas hingga kematian koloni karang.

B. Faktor Pembatas (*Limiting Factors*)

Salah satu prinsip dasar ekologi menyatakan bahwa pertumbuhan dan distribusi organisme dikendalikan oleh faktor lingkungan yang paling membatasi (*limiting factor*). Konsep ini pertama kali diperkenalkan melalui Hukum Minimum Liebig (*Liebig's Law of the Minimum*) yang menyatakan bahwa keberhasilan pertumbuhan organisme ditentukan oleh sumber daya yang tersedia dalam jumlah paling sedikit relatif terhadap kebutuhannya.

Pada ekosistem laut, unsur hara nitrogen dan fosfor sering menjadi faktor pembatas produktivitas primer. Di wilayah oligotrofik seperti Samudra Pasifik bagian tengah, rendahnya konsentrasi nitrogen menyebabkan pertumbuhan fitoplankton

berlangsung sangat lambat meskipun cahaya matahari tersedia melimpah. Sebaliknya, pada wilayah upwelling seperti pesisir Peru dan California, suplai nutrien dari laut dalam meningkatkan produktivitas primer sehingga mendukung biomassa ikan yang sangat tinggi (Longhurst, 2007).

Selain Hukum Minimum, konsep faktor pembatas juga dikembangkan melalui Hukum Toleransi Shelford (*Shelford's Law of Tolerance*). Menurut Shelford, setiap organisme memiliki kisaran toleransi terhadap setiap faktor lingkungan. Kisaran tersebut terdiri atas:

1. Zona optimum;
2. Zona stres fisiologis;
3. Batas minimum;
4. Batas maksimum.

Di luar kisaran toleransi, kinerja fisiologis organisme menurun dan pada kondisi ekstrem kelangsungan hidupnya dapat terancam. Pada karang tropis, ambang pemutihan tidak tepat dinyatakan sebagai satu suhu universal karena berbeda antarwilayah dan dipengaruhi akumulasi stres panas. Oleh karena itu, penilaian risiko pemutihan lebih tepat menggunakan anomali terhadap klimatologi lokal dan durasi paparan panas, bukan sekadar satu nilai suhu tetap (IPCC, 2023).

Konsep toleransi ekologis sangat penting dalam menjelaskan distribusi geografis organisme laut. Banyak spesies hanya ditemukan pada wilayah tertentu karena memiliki kisaran toleransi yang sempit terhadap suhu, salinitas, atau kedalaman. Sebaliknya, spesies yang memiliki toleransi luas (*eurytopic species*) cenderung memiliki distribusi geografis yang lebih besar dibandingkan spesies dengan toleransi sempit (*stenotopic species*).

C. Relung Ekologi (*Ecological Niche*)

Konsep relung ekologi merupakan salah satu konsep sentral dalam ilmu ekologi modern. Charles Elton (1927) mendefinisikan relung sebagai peran fungsional suatu organisme dalam komunitas, sedangkan Hutchinson (1957) mengembangkan konsep tersebut menjadi n-dimensional

hypervolume, yaitu ruang multidimensi yang menggambarkan seluruh kondisi lingkungan yang memungkinkan suatu spesies bertahan hidup dan bereproduksi. Dengan demikian, relung tidak hanya berkaitan dengan lokasi hidup organisme (*habitat*), tetapi juga mencakup:

1. Jenis makanan,
2. Waktu aktivitas,
3. Kisaran suhu,
4. Kebutuhan oksigen,
5. Interaksi dengan spesies lain,
6. Strategi reproduksi,
7. Serta berbagai faktor ekologis lainnya.

Dalam ekosistem laut, berbagai spesies dapat hidup pada habitat yang sama tetapi memiliki relung yang berbeda. Sebagai contoh, beberapa spesies ikan karang memanfaatkan bagian terumbu yang sama, tetapi memiliki jenis mangsa, waktu mencari makan, serta perilaku reproduksi yang berbeda sehingga kompetisi dapat diminimalkan. Konsep relung menjadi dasar dalam memahami mekanisme koeksistensi spesies serta tingginya biodiversitas pada ekosistem laut tropis seperti kawasan Coral Triangle.

1.2 Definisi Ekologi Laut

Ekologi laut (*marine ecology*) merupakan penerapan prinsip-prinsip ekologi pada lingkungan laut. Fondasi konseptualnya berakar pada gagasan Haeckel mengenai hubungan organisme dengan lingkungan, kemudian berkembang melalui pendekatan ekosistem yang menekankan keterkaitan struktur, fungsi, aliran energi, dan siklus materi (Haeckel, 1866; Odum, 1971). Dalam kerangka ini, ekologi laut mempelajari distribusi dan kelimpahan organisme, interaksi ekologis, serta proses yang menghubungkan komponen biotik dengan kondisi oseanografi.

Ekosistem laut berbeda secara karakteristik dari ekosistem daratan. Pertama, laut merupakan *sistem terbuka* dengan konektivitas spasial yang tinggi. Arus laut dapat membawa organisme, nutrien, dan materi organik antarwilayah

luas, sehingga populasi di satu lokasi dapat terhubung oleh dispersal larval atau migrasi panjang. Banyak habitat laut (misalnya padang lamun, terumbu karang, hutan mangrove) bersifat berbentuk petak-petak (*patchy*). Dengan demikian, konsep *metapopulasi* sering digunakan: populasi- populasi lokal dihubungkan oleh aliran individu melalui larva atau fase hidup berpindah.

Kedua, ekosistem laut memiliki stratifikasi vertikal yang khas. Intensitas cahaya, suhu, dan oksigen menurun seiring kedalaman, sehingga kehidupan laut terdistribusi dalam zona fungsional (mis. zona fotorik, mesopelagik, abyssal). Banyak produsen primer (fitoplankton) terkonsentrasi di lapisan permukaan yang mendapat cahaya, sementara organisme lain beradaptasi pada kegelapan laut dalam. Faktor abiotik seperti suhu, salinitas, tekanan hidrostatik, serta nutrien pula bervariasi vertikal dan latitudinal, memengaruhi keragaman hayati laut.

Ketiga, dinamika fisik laut sangat dominan memengaruhi ekologi laut. Berbeda dengan daratan yang stabil, lautan dipengaruhi oleh fenomena oseanografi seperti gelombang, arus termohalin, serta variabilitas iklim (contoh: *El Niño–Southern Oscillation*). Proses-proses ini mengontrol distribusi nutrien dan organisme. Misalnya, *upwelling* di pesisir melepaskan nutrien dari laut dalam ke permukaan, mendorong produktivitas tinggi dan memicu munculnya rantai makanan yang kaya. Sebaliknya, zona laut tropis luas sering oligotrofik (rendah nutrien) karena stratifikasi kuat dan siklus air yang lambat. Perubahan kecil pada suhu atau pH pun langsung berdampak ekologis besar: pemanasan laut memicu pemutihan karang, sementara pengasaman laut menghambat proses kalsifikasi organisme berkerangka kapur (moluska, koral).

Dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, ekologi laut diartikan sebagai ilmu yang mempelajari interaksi organisme laut (biotik) dengan faktor abiotik laut (fisik, kimia), serta proses-proses ekologis yang timbul darinya. Secara konseptual, ekologi laut mengeksplorasi “mengapa spesies terdapat di habitat tertentu, bagaimana mereka berinteraksi, dan bagaimana struktur komunitas serta produktivitas terbentuk” (Levinton, 2017; Kaiser et al., 2020). Sebagai disiplin integratif,

ekologi laut menggabungkan pendekatan biologi, oseanografi, dan ilmu lingkungan untuk memahami fungsionalitas ekosistem laut. Misalnya, kajian ekosistem laut meliputi: aliran energi dari fitoplankton ke zooplankton ke ikan; siklus karbon organik di laut; keterkaitan mangrove–lamun–karang; serta respon ekosistem terhadap perubahan iklim global.

Karakteristik Ekosistem Laut

1. **Konektivitas Tinggi** – *Arus laut dan tahap larva.* Sebagian besar organisme laut (misalnya ikan, krustasea, kriptogama laut) memiliki tahap larva planktonik yang dapat terbawa arus hingga ratusan kilometer sebelum menetap kembali. Hal ini menghasilkan konektivitas antarhabitat yang luas. Sebagai contoh, penetasan larva ikan di mangrove dapat menambah stok ikan di terumbu karang terdekat. Oleh karena itu, gangguan di satu habitat (misalnya pembabatan mangrove) dapat berdampak ekologis pada habitat terhubung lainnya.
2. **Sistem Terbuka dan Dinamis** – *Distribusi organisme tidak merata.* Laut adalah sistem terbuka secara alami. Arus global, perubahan tata letak kontinen, dan variasi iklim menyebabkan ekosistem laut berubah dinamis. Setiap wilayah laut dipengaruhi kondisi di luarnya (misalnya nutrient dari proses upwelling dapat memicu ledakan fitoplankton di jarak jauh). Heterogenitas lingkungan laut tinggi: suhu, salinitas, dan cahaya bervariasi vertikal dan horizontal. Secara umum, organisme laut tidak tersebar merata; ekosistem laut lebih bersifat mosaik.
3. **Tekanan Fisik Intensif** – *Siklus pH, suhu, dan nutrien.* Laut menyerap >90% panas tambahan akibat pemanasan global dan 25–30% CO_2 antropogenik, sehingga suhu permukaan laut naik dan keasaman meningkat. Proses-proses fisik seperti pasang surut pantai, arus termohalin, atau gelombang memberikan tekanan langsung pada kehidupan laut. Contoh, zona intertidal mengalami perubahan drastis setiap hari, memaksa adaptasi fisiologis ekstrem pada organisme. Variasi abiotik semacam ini memengaruhi pola keanekaragaman: banyak spesies laut mempersempit relung

ekologisnya karena rentang toleransi yang ketat terhadap salinitas, suhu, atau tekanan.

Peran Disiplin Ekologi Laut

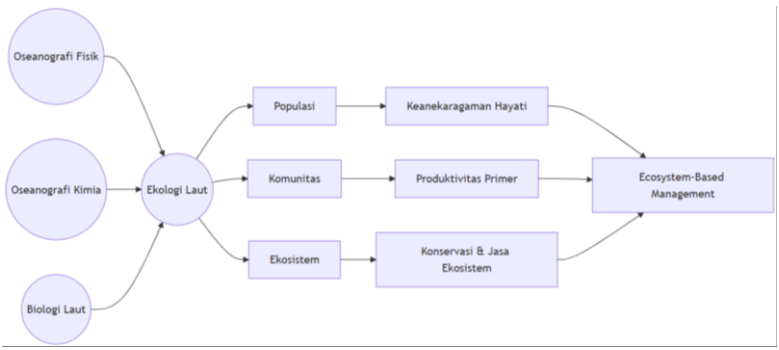
Ekologi laut berperan sebagai jembatan antar-disiplin. Informasi oseanografi fisik dan kimia digunakan sebagai parameter lingkungan dalam studi ekologi. Contohnya, ahli ekologi laut menerapkan data arus laut untuk memodelkan penyebaran larva, atau menggunakan data ketersediaan nutrien untuk menjelaskan variasi produktivitas fitoplankton. Bidang ini juga menyentuh aspek sosial-ekonomi melalui studi *human dimensions* seperti perikanan berkelanjutan dan dampak perubahan iklim pada komunitas pesisir. Inilah alasan mengapa istilah *sistem sosial-ekologis* sering digunakan: ekosistem laut sekarang dipahami bukan hanya dari sudut biologi dan fisik, tetapi juga mempertimbangkan peran manusia sebagai bagian sistem tersebut (Folke et al., 2010). Hasil kajian ekologi laut menyediakan dasar ilmiah untuk manajemen ekosistem laut secara menyeluruh, misalnya konsep *Ecosystem-Based Management (EBM)* yang menuntut pendekatan lintas bidang untuk konservasi laut.

Marine Insight: *Konservasi terpadu. Keberhasilan konservasi laut tergantung pada pemahaman konektivitas dan resiliensi ekosistem. Sebagai contoh, rancangan Kawasan Perlindungan Laut (KPL) yang efektif harus mempertimbangkan jalur migrasi larva dan tingkat keragaman genetik populasi. Penelitian menunjukkan bahwa taman laut yang saling terhubung (melalui arus) lebih efektif memulihkan stok ikan dan menjaga keanekaragaman karena memungkinkan regenerasi spillover ke wilayah di sekitarnya (Jones et al., 2007; Almany et al., 2017). Selain itu, kawasan pesisir yang terintegrasi dengan ekosistem daratan (misalnya hutan bakau–padang lamun–terumbu karang) lebih tahan terhadap bencana alam seperti badai atau gelombang panas laut. Dengan kata lain, pendekatan konservasi harus mempertimbangkan ekosistem laut sebagai jaringan terpadu, bukan entitas terpisah.*

Tabel 1.3. Pengertian Ekologi Laut Menurut Para Ahli

Definisi Ekologi Laut	Sumber
Ernst Haeckel (1866)	"Kajian hubungan organisme dengan lingkungan anorganik maupun organik".
Eugene P. Odum (1971)	Ekologi = *struktur dan fungsi* alam (berupa sistem ekosistem).
Nybakken & Bertness (2005)	Studi tentang habitat laut, populasi, dan interaksi organisme laut dengan lingkungannya (definisi baku buku teks biologi laut).
Levinton (2017)	Ilmu tentang bagaimana organisme laut berinteraksi dengan lingkungan dan sesamanya, serta pengaruhnya pada keanekaragaman dan fungsi laut.
Kaiser et al. (2020)	Marine Ecology menekankan proses ekologis yang membentuk struktur komunitas dan dampak aktivitas manusia dalam ekosistem laut.
Pendekatan modern (literatur ilmiah)	Studi sistem adaptif kompleks di laut, mencakup *ecosystem functioning*, jasa ekosistem, ketahanan ekosistem, dan integrasi sosial-ekologi.

Catatan: Definisi di atas menunjukkan evolusi pemahaman, dari fokus "organisme–lingkungan" Haeckel hingga konsep sistem ekosistem yang kompleks. Raja sumber keras, definisi Otentik Haeckel dan Odum di sini diambil dari Cary Institute.



Gambar 1.1. Diagram konsep keterkaitan disiplin ilmu kelautan.

Oseanografi fisik dan kimia serta biologi laut berkonvergensi dalam kajian ekologi laut. Aspek populasi, komunitas, dan ekosistem laut saling terkait, membentuk kerangka keanekaragaman, produktivitas, dan konservasi yang menjadi fokus manajemen berbasis ekosistem.

1.2.1 Paradigma Modern dalam Ekologi Laut

Sejak paruh kedua abad ke-20 hingga kini, ekologi laut berkembang dari pendekatan deskriptif menuju ilmu sistem yang semakin kuantitatif dan prediktif. Levin (1998) menempatkan ekosistem sebagai *complex adaptive systems*, yaitu sistem dengan banyak komponen yang saling berinteraksi, memiliki umpan balik, dan dapat menunjukkan respons nonlinier. Dalam konteks laut, perubahan pada penggerak lingkungan seperti suhu, suplai nutrien, atau tekanan eksploitasi dapat memicu perubahan struktur komunitas dan, pada kondisi tertentu, pergeseran rezim ekosistem. Karena itu, ekosistem laut modern dipahami sebagai jaringan interaksi yang dinamis, bukan sistem statis.

Fungsi ekosistem dan jasa ekosistem menjadi fokus penting dalam paradigma modern. Fungsi ekosistem mencakup proses biologis, kimia, dan fisik yang mempertahankan produktivitas, siklus nutrien, dekomposisi, dan penyimpanan karbon, sedangkan jasa ekosistem menggambarkan manfaat yang diperoleh manusia dari fungsi tersebut. Bukti eksperimental dan sintesis global menunjukkan bahwa kehilangan biodiversitas dapat menurunkan kemampuan ekosistem laut mempertahankan produksi biologis dan berbagai jasa yang penting bagi manusia (Worm et al., 2006).

Ketahanan dan sosial-ekologi. Paradigma *resiliensi* yang diperkenalkan Holling (1973) menjadi pusat perhatian: sistem ekologi laut dipahami memiliki kapasitas untuk menyerap gangguan (mis. badai, polusi) dan kembali ke kondisi fungsional. Folke et al. (2004) menekankan pentingnya menjaga keanekaragaman biotik dan pengetahuan lokal untuk mencegah *regime shift* besar dalam ekosistem (seperti peralihan terumbu karang ke padang rumput alga). Konsep sosial-ekologis bergema melalui kerangka *manajemen berbasis ekosistem* dan *one health*: manusia dan ekosistem laut dipandang

sebagai satu sistem terpadu. Keberlanjutan laut kini diukur tidak hanya dari aspek biologis, tapi juga dari kemampuan masyarakat pesisir beradaptasi dan mengelola sumber daya laut secara lestari (Folke et al., 2010).

Big Data dan teknologi modern mengubah metodologi ekologi laut. Data penginderaan jauh, kendaraan bawah laut otonom, sensor otomatis, akustik, serta environmental DNA menghasilkan data berukuran besar dan multidimensi. Pembelajaran mesin dapat membantu klasifikasi, pengenalan pola, dan prediksi, tetapi hasilnya tetap memerlukan validasi, evaluasi ketidakpastian, dan pemahaman proses ekologis yang mendasari pola data (Malde et al., 2020; Reichstein et al., 2019).

Ekologi laut modern memandang laut sebagai sistem kompleks dan dinamis. Pendekatannya lintas-disiplin, menggabungkan biologi dengan oseanografi (fisik dan kimia), serta ilmu sosial untuk memastikan kelestarian fungsi laut. Paradigma ini menjadi dasar upaya konservasi global, pembangunan ekonomi biru (*blue economy*), dan pemenuhan *Sustainable Development Goals* (SDG 14) tentang kehidupan di bawah air.

1.2.2 Ruang Lingkup Ekologi Laut

Ruang lingkup suatu disiplin ilmu menggambarkan batas kajian, objek penelitian, serta pendekatan ilmiah yang digunakan dalam memahami fenomena yang dipelajari. Dalam konteks ekologi laut, ruang lingkupnya sangat luas karena mencakup seluruh interaksi antara organisme laut dengan lingkungan fisik, kimia, dan biologinya, mulai dari tingkat individu hingga biosfer laut. Perkembangan ilmu kelautan modern semakin memperluas ruang lingkup tersebut melalui integrasi oseanografi, biologi molekuler, ilmu data, penginderaan jauh, serta ilmu sosial-ekologi untuk menjelaskan dinamika ekosistem laut dalam berbagai skala ruang dan waktu (Kaiser et al., 2020; Levinton, 2017).

Berbeda dengan disiplin yang hanya berfokus pada identifikasi organisme atau karakteristik lingkungan, ekologi laut berupaya memahami bagaimana sistem laut bekerja (*how marine ecosystems function*). Oleh karena itu, ruang lingkup ekologi laut

meliputi tiga dimensi utama, yaitu tingkat organisasi kehidupan, komponen ekosistem, dan proses-proses ekologis yang menghubungkan seluruh komponen tersebut.

A. Ruang Lingkup Berdasarkan Tingkat Organisasi Kehidupan

Salah satu karakteristik utama ilmu ekologi adalah kajiannya yang dilakukan secara bertingkat (*hierarchical organization*). Setiap tingkat organisasi memiliki karakteristik, proses, dan pendekatan analisis yang berbeda, tetapi saling berhubungan membentuk suatu sistem ekologis yang utuh.

1. Individu (*Individual Ecology*)

Tingkat individu merupakan unit organisasi kehidupan yang paling dasar dalam ekologi laut. Pada tingkat ini, kajian difokuskan pada respons fisiologis, morfologis, dan perilaku organisme terhadap kondisi lingkungan. Beberapa aspek yang dipelajari meliputi:

a. Adaptasi terhadap salinitas;
b. Adaptasi terhadap tekanan hidrostatik;
c. Toleransi suhu;
d. Strategi reproduksi;
e. Perilaku mencari makan;
f. Migrasi.

Sebagai contoh, ikan-ikan laut dalam (*deep-sea fishes*) memiliki adaptasi fisiologis terhadap tekanan hidrostatik yang sangat tinggi, sedangkan lamun memiliki kemampuan fisiologis untuk mentoleransi fluktuasi salinitas di daerah estuari.

2. Populasi (*Population Ecology*)

Pada tingkat populasi, ekologi laut mempelajari sekelompok individu dari spesies yang sama yang hidup pada suatu wilayah tertentu. Fokus kajiannya meliputi:

a. Ukuran populasi;
b. Kepadatan;
c. Struktur umur;
d. Natalitas;
e. Mortalitas;
f. Migrasi;
g. Dinamika populasi.

Kajian populasi sangat penting dalam pengelolaan sumber daya perikanan karena menentukan tingkat eksploitasi yang masih dapat dipertahankan tanpa mengganggu keberlanjutan stok ikan.

3. Komunitas (*Community Ecology*)

Komunitas merupakan kumpulan berbagai populasi yang hidup bersama dalam suatu habitat dan saling berinteraksi. Kajian komunitas meliputi:

a. Struktur komunitas;
b. Komposisi spesies;
c. Keanekaragaman hayati;
d. Dominansi;
e. Kompetisi;
f. Predasi;
g. Simbiosis;
h. Suksesi komunitas.

Sebagai contoh, komunitas terumbu karang terdiri atas karang hermatipik, ikan karang, moluska, krustasea, echinodermata, spons, makroalga, serta mikroorganisme yang membentuk jaringan interaksi ekologis yang kompleks.

4. Ekosistem (*Ecosystem Ecology*)

Ekosistem merupakan unit fungsional yang tersusun atas komunitas organisme beserta lingkungan fisiknya. Kajian ekosistem meliputi:

a. Aliran energi;
b. Siklus karbon;
c. Siklus nitrogen;
d. Produktivitas primer;
e. Produktivitas sekunder;
f. Efisiensi trofik;
g. Fungsi ekosistem.

Pendekatan ekosistem menjadi dasar dalam pengelolaan laut modern karena mempertimbangkan seluruh komponen biotik dan abiotik secara terpadu.

5. Lanskap Laut (*Seascape Ecology*)

Dalam dua dekade terakhir berkembang konsep seascape ecology, yaitu kajian mengenai pola spasial habitat laut serta

pengaruhnya terhadap distribusi organisme. Pendekatan ini mengintegrasikan:

a. GIS;
b. Citra satelit;
c. Habitat mapping;
d. Konektivitas habitat;
e. Migrasi organisme;
f. Metapopulasi.

Konsep ini sangat penting dalam penentuan kawasan konservasi laut.

6. Biosfer Laut

Pada tingkat tertinggi, ruang lingkup ekologi laut mencakup biosfer laut secara keseluruhan. Kajian dilakukan terhadap:

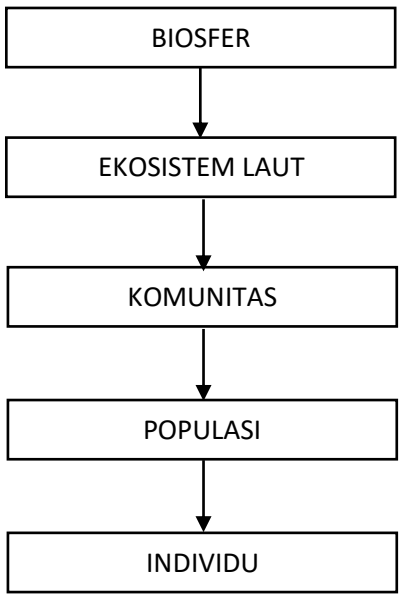
a. Sirkulasi global karbon;
b. Perubahan iklim;
c. Pemanasan laut;
d. Pengasaman laut;
e. Biodiversitas global;
f. Interaksi laut–atmosfer.

Pada skala ini, laut dipandang sebagai komponen utama sistem Bumi (*Earth System*).

Tabel 1.4. Tingkat Organisasi dalam Ekologi Laut

Tingkat Organisasi	Fokus Kajian	Contoh Penelitian
Individu	Adaptasi organisme	Toleransi suhu hiu berjalan Halmahera
Populasi	Dinamika populasi	Estimasi stok tuna
Komunitas	Struktur komunitas	Komunitas ikan terumbu
Ekosistem	Fungsi ekosistem	Produktivitas padang lamun
Seascape	Pola spasial habitat	Konektivitas mangrove–lamun–karang

Tingkat Organisasi	Fokus Kajian	Contoh Penelitian
Biosfer	Proses global	Peran laut dalam siklus karbon



Gambar 1.2. Hierarki Ruang Lingkup Ekologi Laut

Hubungan hierarkis ini menunjukkan bahwa perubahan pada tingkat individu dapat memengaruhi populasi, komunitas, hingga fungsi ekosistem. Sebaliknya, perubahan pada skala biosfer, seperti pemanasan global atau pengasaman laut, dapat memberikan tekanan terhadap seluruh tingkat organisasi kehidupan di laut.

1.2.3 Hubungan Ekologi Laut dengan Oseanografi

1.2.3.1 Kerangka Konseptual

Ekologi laut dan oseanografi merupakan dua disiplin ilmu yang berkembang secara paralel dan saling melengkapi dalam memahami sistem kelautan. Ekologi laut berfokus pada hubungan timbal balik antara organisme laut dengan

lingkungannya, mencakup interaksi antarorganisme, dinamika populasi, struktur komunitas, aliran energi, siklus materi, serta fungsi ekosistem. Sementara itu, oseanografi mempelajari karakteristik fisik, kimia, biologi, dan geologi lautan yang membentuk kondisi lingkungan tempat organisme hidup.

Pada perkembangan ilmu kelautan modern, batas antara kedua disiplin tersebut semakin kabur. Berbagai fenomena ekologis di laut tidak dapat dipahami hanya melalui pendekatan biologi semata, tetapi memerlukan pemahaman terhadap dinamika oseanografi yang mengendalikan distribusi energi, nutrien, oksigen, suhu, salinitas, serta sirkulasi massa air. Oleh karena itu, ekologi laut pada hakikatnya merupakan ilmu yang bersifat multidisiplin dengan oseanografi sebagai fondasi utama dalam menjelaskan proses-proses ekologis yang terjadi di lautan.

Hubungan tersebut bersifat dua arah (*two-way interaction*). Di satu sisi, proses oseanografi menentukan kondisi lingkungan yang memengaruhi keberadaan organisme. Sebaliknya, aktivitas biologis organisme laut juga memengaruhi proses oseanografi, terutama melalui siklus biogeokimia karbon, nitrogen, fosfor, dan silikon. Fitoplankton, misalnya, menyerap karbon dioksida melalui fotosintesis sehingga berkontribusi terhadap pengaturan konsentrasi karbon di atmosfer. Organisme bentik berperan dalam proses bioturbasi yang memengaruhi pertukaran unsur hara antara sedimen dan kolom air, sedangkan mikroorganisme mengendalikan transformasi berbagai unsur kimia di laut.

Dengan demikian, laut harus dipandang sebagai suatu sistem terpadu (*integrated marine system*) yang terdiri atas komponen fisik, kimia, biologi, geologi, dan aktivitas manusia yang saling berinteraksi secara dinamis. Pendekatan sistem ini menjadi dasar berkembangnya paradigma pengelolaan ekosistem laut modern (*ecosystem-based management*) yang menempatkan seluruh komponen tersebut sebagai satu kesatuan yang tidak dapat dipisahkan.

Definisi Ruang Lingkup Masing-Masing Disiplin

Untuk memahami hubungan antara ekologi laut dan oseanografi, perlu dibedakan ruang lingkup masing-masing cabang ilmu sebagaimana disajikan pada Tabel 1.5.

Tabel 1.5. Perbedaan ruang lingkup cabang oseanografi dan relevansinya terhadap ekologi laut

Cabang Ilmu	Fokus Kajian	Kontribusi terhadap Ekologi Laut
Oseanografi Fisik	Arus laut, gelombang, pasang surut, suhu, salinitas, sirkulasi massa air, pencampuran (mixing), stratifikasi	Menentukan distribusi organisme, konektivitas populasi, transport larva, produktivitas primer, serta karakter habitat.
Oseanografi Kimia	Nutrien, oksigen terlarut, karbon anorganik, pH, alkalinitas, unsur hara dan unsur jejak	Mengendalikan produktivitas primer, metabolisme organisme, pengasaman laut, dan siklus biogeokimia.
Oseanografi Biologi	Fitoplankton, zooplankton, nekton, mikroorganisme, jaring makanan, produktivitas primer	Menjadi penghubung antara proses oseanografi dan proses ekologis melalui kajian dinamika organisme laut.
Oseanografi Geologi	Sedimen, geomorfologi dasar laut, proses sedimentasi, aktivitas tektonik, ventilasi hidrotermal	Membentuk habitat bentik, menyediakan substrat, memengaruhi distribusi organisme dasar laut, dan penyimpanan karbon jangka panjang.

Tabel tersebut menunjukkan bahwa setiap cabang oseanografi memberikan kontribusi yang berbeda, tetapi saling melengkapi dalam menjelaskan proses-proses ekologi laut. Sebagai contoh, distribusi terumbu karang tropis tidak hanya ditentukan oleh faktor biologis, tetapi juga dipengaruhi oleh suhu permukaan laut, kejernihan air, arus, salinitas, ketersediaan karbonat, serta karakteristik substrat dasar laut. Demikian pula, keberhasilan rekrutmen ikan pelagis sangat dipengaruhi oleh interaksi antara musim, arus, upwelling, produktivitas

fitoplankton, dan ketersediaan zooplankton sebagai sumber makanan larva.

Perkembangan ilmu pengetahuan dalam dua dekade terakhir semakin menegaskan bahwa ekologi laut tidak dapat dipisahkan dari oseanografi. Kemajuan teknologi penginderaan jauh satelit, wahana bawah laut otonom (*autonomous underwater vehicles*), pelampung Argo, sensor biogeokimia, pemodelan numerik, kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), serta analisis DNA lingkungan (*environmental DNA/eDNA*) memungkinkan para ilmuwan mempelajari hubungan antara dinamika oseanografi dan respons ekologis secara lebih komprehensif. Pendekatan ini membuka peluang untuk memahami perubahan ekosistem laut akibat perubahan iklim global, peningkatan suhu laut, pengasaman laut, deoksigenasi, serta tekanan antropogenik lainnya.

Secara konseptual, hubungan antara oseanografi dan ekologi laut dapat digambarkan sebagai suatu rangkaian proses yang dimulai dari dinamika fisik dan kimia lautan, kemudian memengaruhi produktivitas primer, struktur jaring makanan, distribusi organisme, keanekaragaman hayati, hingga penyediaan jasa ekosistem bagi manusia. Dengan kata lain, dinamika arus, suhu, nutrien, dan karakteristik habitat menjadi penggerak utama (*ecological drivers*) yang menentukan struktur dan fungsi ekosistem laut.

1.2.3.2 Kontribusi Oseanografi Fisik terhadap Proses Ekologi Laut

Oseanografi fisik merupakan cabang ilmu oseanografi yang mempelajari sifat-sifat fisik air laut beserta proses dinamis yang terjadi di dalamnya, seperti arus laut, gelombang, pasang surut, suhu, salinitas, densitas, pencampuran massa air (*mixing*), stratifikasi, serta sirkulasi samudra. Seluruh proses tersebut membentuk kondisi lingkungan yang menentukan keberlangsungan kehidupan organisme laut. Dengan demikian, oseanografi fisik berperan sebagai pengendali utama (*primary physical driver*) dalam ekologi laut karena mengatur distribusi energi, nutrien, oksigen, serta konektivitas habitat di berbagai skala ruang dan waktu.

Berbeda dengan ekosistem daratan yang relatif stabil, lingkungan laut bersifat sangat dinamis. Massa air terus bergerak akibat pengaruh angin, gaya Coriolis, perbedaan densitas, pasang surut, dan sirkulasi termohalin. Pergerakan tersebut menyebabkan perubahan kondisi fisik secara terus-menerus sehingga organisme laut harus mampu beradaptasi terhadap variasi lingkungan yang terjadi setiap saat. Oleh karena itu, distribusi organisme laut tidak hanya ditentukan oleh kemampuan biologisnya, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh dinamika oseanografi.

1. **Arus Laut sebagai Penggerak Distribusi Organisme**

   Arus laut merupakan perpindahan massa air secara horizontal maupun vertikal yang terjadi akibat pengaruh angin, rotasi bumi, perbedaan suhu, salinitas, dan densitas. Arus memiliki fungsi ekologis yang sangat penting karena berperan sebagai media transportasi energi, nutrien, oksigen, plankton, larva ikan, telur ikan, bahkan berbagai polutan.

   Dalam perspektif ekologi laut, arus berfungsi sebagai mekanisme utama yang menghubungkan berbagai habitat (*ecological connectivity*). Larva ikan karang, misalnya, tidak mampu berenang dalam jarak jauh sehingga penyebarannya sangat bergantung pada arus laut. Arus memungkinkan terjadinya pertukaran individu antarpopulasi sehingga menjaga aliran gen (*gene flow*) dan meningkatkan ketahanan populasi terhadap perubahan lingkungan.

   Selain itu, arus juga mengendalikan distribusi fitoplankton. Daerah yang memperoleh suplai massa air kaya nutrien umumnya memiliki produktivitas primer tinggi sehingga menjadi lokasi berkumpulnya zooplankton, ikan pelagis, mamalia laut, hingga burung laut. Oleh karena itu, banyak daerah penangkapan ikan utama di dunia berada pada wilayah yang dipengaruhi oleh sistem arus besar dan zona pertemuan massa air (*ocean fronts*).

2. ***Upwelling* dan *Downwelling***

   Salah satu fenomena oseanografi yang paling berpengaruh terhadap produktivitas ekosistem laut adalah upwelling, yaitu proses naiknya massa air laut dari lapisan

dalam menuju permukaan. Air laut dari lapisan dalam umumnya memiliki suhu lebih rendah, tetapi kaya akan unsur hara seperti nitrat, fosfat, dan silikat yang berasal dari proses dekomposisi bahan organik.

Ketika nutrien tersebut mencapai lapisan eufotik yang masih memperoleh cahaya matahari, fitoplankton mengalami pertumbuhan yang sangat cepat sehingga terjadi ledakan populasi fitoplankton (*phytoplankton bloom*). Peningkatan biomassa fitoplankton akan diikuti oleh peningkatan zooplankton, ikan pelagis kecil, ikan predator, mamalia laut, hingga burung laut. Oleh sebab itu, kawasan upwelling dikenal sebagai wilayah dengan produktivitas perikanan tertinggi di dunia.

Sebaliknya, downwelling merupakan proses tenggelamnya massa air permukaan menuju lapisan yang lebih dalam. Walaupun tidak meningkatkan produktivitas primer secara langsung, downwelling berperan penting dalam mendistribusikan oksigen ke lapisan bawah laut dan membantu penyimpanan karbon dalam laut (*ocean carbon sequestration*). Keseimbangan antara upwelling dan downwelling menjadi komponen penting dalam menjaga stabilitas siklus biogeokimia global.

3. Stratifikasi Kolom Air

Stratifikasi adalah pembentukan lapisan-lapisan massa air yang memiliki densitas berbeda akibat variasi suhu dan salinitas. Pada wilayah tropis, lapisan permukaan umumnya lebih hangat sehingga memiliki densitas lebih rendah dibandingkan lapisan bawah. Kondisi tersebut membentuk termoklin, yaitu zona transisi dengan perubahan suhu yang sangat tajam.

Stratifikasi memiliki implikasi ekologis yang sangat besar. Apabila stratifikasi terlalu kuat, pencampuran vertikal akan berkurang sehingga nutrien dari lapisan bawah sulit mencapai permukaan. Akibatnya, produktivitas primer menurun meskipun intensitas cahaya tinggi. Sebaliknya, pencampuran vertikal yang cukup memungkinkan suplai nutrien berlangsung secara kontinu sehingga mendukung pertumbuhan fitoplankton.

Perubahan iklim global menyebabkan peningkatan suhu permukaan laut sehingga stratifikasi menjadi semakin kuat. Kondisi ini diperkirakan akan menurunkan produktivitas primer di banyak wilayah samudra tropis dan subtropis karena berkurangnya suplai nutrien dari lapisan dalam.

4. Pencampuran Massa Air (*Vertical Mixing*)

Pencampuran massa air (*vertical mixing*) merupakan proses perpindahan massa air secara vertikal akibat pengaruh angin, badai, gelombang internal, maupun turbulensi. Proses ini berfungsi mengangkut nutrien dari laut dalam menuju lapisan permukaan sekaligus mendistribusikan oksigen ke lapisan bawah.

Secara ekologis, intensitas pencampuran sangat menentukan komposisi komunitas fitoplankton. Pencampuran yang kuat cenderung mendukung dominasi diatom yang membutuhkan nutrien dalam jumlah besar, sedangkan kondisi yang sangat stabil lebih menguntungkan kelompok pikoplankton dan sianobakteri yang mampu hidup pada konsentrasi nutrien rendah. Perbedaan komposisi fitoplankton tersebut akan memengaruhi struktur jaring makanan hingga tingkat trofik yang lebih tinggi.

5. Pasang Surut

Pasang surut merupakan fluktuasi periodik muka air laut akibat gaya gravitasi Bulan dan Matahari. Fenomena ini tidak hanya menentukan dinamika wilayah pesisir, tetapi juga memengaruhi distribusi organisme, produktivitas ekosistem estuari, padang lamun, dan hutan mangrove.

Pada kawasan pesisir dangkal, arus pasang surut meningkatkan pertukaran air sehingga memperbaiki suplai oksigen, mendistribusikan nutrien, dan mengurangi akumulasi limbah organik. Selain itu, pasang surut mengatur siklus aktivitas berbagai organisme intertidal, seperti kepiting, moluska, echinodermata, dan makroalga, yang telah berevolusi mengikuti ritme pasang surut harian.

Di estuari, interaksi antara pasang surut dan aliran sungai menghasilkan gradien salinitas yang membentuk habitat unik bagi berbagai spesies ikan, udang, dan biota

lainnya. Oleh karena itu, dinamika pasang surut merupakan salah satu faktor utama yang menentukan produktivitas ekosistem pesisir.

6. Gelombang dan Energi Hidrodinamika

Gelombang laut merupakan bentuk transfer energi dari atmosfer ke permukaan laut. Energi gelombang berperan penting dalam membentuk morfologi pantai, mengaduk sedimen dasar, meningkatkan aerasi perairan, serta memengaruhi struktur komunitas bentik.

Di kawasan terumbu karang, gelombang sedang berfungsi meningkatkan pertukaran oksigen dan nutrien sehingga mendukung pertumbuhan karang. Namun, gelombang ekstrem akibat badai dapat menyebabkan kerusakan fisik pada koloni karang, mencabut lamun, dan mengubah struktur habitat. Organisme yang hidup pada daerah berenergi gelombang tinggi umumnya memiliki adaptasi morfologi yang kuat, seperti tubuh pipih, daya lekat tinggi, atau rangka yang lebih kokoh.

7. Variabilitas Iklim Laut

Selain proses oseanografi lokal, ekosistem laut juga dipengaruhi oleh fenomena iklim global, seperti *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO), *Indian Ocean Dipole* (IOD), dan *Pacific Decadal Oscillation* (PDO). Fenomena tersebut mengubah pola angin, suhu permukaan laut, curah hujan, intensitas upwelling, serta distribusi nutrien.

Pada fase El Niño, melemahnya upwelling di Samudra Pasifik bagian timur menyebabkan penurunan produktivitas primer yang berdampak pada berkurangnya stok ikan pelagis. Sebaliknya, fase La Niña umumnya meningkatkan produktivitas primer melalui penguatan proses upwelling. Di Indonesia, ENSO juga memengaruhi musim penangkapan ikan karena perubahan distribusi klorofil-a dan suhu permukaan laut.

Perubahan iklim global diproyeksikan meningkatkan frekuensi kejadian gelombang panas laut (*marine heatwaves*), memperkuat stratifikasi, dan mengurangi pencampuran vertikal. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan produktivitas primer, menggeser distribusi

spesies ke lintang yang lebih tinggi, serta meningkatkan risiko pemutihan karang (*coral bleaching*).

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa oseanografi fisik merupakan fondasi utama dalam memahami ekologi laut. Arus, upwelling, stratifikasi, pencampuran massa air, pasang surut, gelombang, dan variabilitas iklim bekerja secara simultan dalam mengendalikan distribusi nutrien, produktivitas primer, konektivitas populasi, serta struktur komunitas organisme laut. Oleh karena itu, analisis terhadap dinamika fisik lautan menjadi prasyarat dalam menjelaskan pola keanekaragaman hayati, produktivitas perikanan, maupun respons ekosistem terhadap perubahan iklim. Integrasi antara oseanografi fisik dan ekologi laut merupakan dasar ilmiah bagi pengelolaan ekosistem berbasis ekosistem (*ecosystem-based management*) yang berkelanjutan.

1.2.3.3 Kontribusi Oseanografi Kimia terhadap Proses Ekologi Laut

Oseanografi kimia merupakan cabang ilmu oseanografi yang mempelajari komposisi kimia air laut, distribusi unsur-unsur kimia, serta proses-proses biogeokimia yang mengendalikan transformasi dan pergerakan materi di lingkungan laut. Fokus kajiannya meliputi salinitas, pH, alkalinitas, gas-gas terlarut, nutrien anorganik, unsur hara mikro, bahan organik terlarut (*dissolved organic matter*), karbon laut, hingga berbagai kontaminan kimia. Seluruh parameter tersebut berinteraksi secara dinamis dan menentukan kualitas habitat bagi organisme laut. Oleh karena itu, oseanografi kimia menjadi fondasi penting dalam memahami produktivitas primer, siklus nutrien, metabolisme organisme, serta respons ekosistem laut terhadap perubahan lingkungan.

Dalam perspektif ekologi laut, faktor kimia tidak dapat dipisahkan dari faktor fisik dan biologis. Dinamika arus dan pencampuran massa air menentukan distribusi zat-zat kimia, sedangkan aktivitas organisme memengaruhi perubahan komposisi kimia melalui proses fotosintesis, respirasi, ekskresi, dekomposisi, dan biomineralisasi. Hubungan timbal balik

tersebut membentuk berbagai siklus biogeokimia yang menghubungkan komponen abiotik dan biotik dalam ekosistem laut.

1. **Salinitas sebagai Faktor Pengendali Kehidupan Laut**

   Salinitas merupakan konsentrasi total garam terlarut dalam air laut yang umumnya dinyatakan dalam satuan *Practical Salinity Unit* (PSU). Rata-rata salinitas laut terbuka berkisar sekitar 35 PSU, namun nilainya dapat bervariasi akibat pengaruh curah hujan, evaporasi, aliran sungai, pencairan es, maupun proses pembentukan es laut.

   Perbedaan salinitas memiliki pengaruh langsung terhadap tekanan osmotik yang dialami organisme laut. Organisme harus mempertahankan keseimbangan antara cairan tubuh dan lingkungan sekitarnya melalui berbagai mekanisme osmoregulasi. Spesies yang hidup di laut terbuka umumnya beradaptasi terhadap kisaran salinitas yang relatif stabil (*stenohaline*), sedangkan organisme estuari memiliki toleransi salinitas yang lebih luas (*euryhaline*). Variasi salinitas juga memengaruhi distribusi spesies, keberhasilan reproduksi, pertumbuhan larva, serta pola migrasi berbagai organisme akuatik.

   Selain berperan terhadap organisme, salinitas turut menentukan densitas air laut sehingga memengaruhi pembentukan massa air, stratifikasi, dan sirkulasi samudra. Dengan demikian, salinitas menjadi penghubung antara proses fisik dan proses biologis dalam ekosistem laut.

2. **Oksigen Terlarut dan Respirasi Ekosistem**

   Oksigen terlarut (*dissolved oxygen*) merupakan salah satu parameter kimia terpenting dalam ekologi laut karena diperlukan oleh hampir seluruh organisme aerob untuk melakukan respirasi seluler. Konsentrasi oksigen di laut dipengaruhi oleh difusi dari atmosfer, fotosintesis fitoplankton, pencampuran massa air, serta konsumsi oksigen melalui respirasi dan dekomposisi bahan organik.

   Perairan dengan konsentrasi oksigen tinggi umumnya mendukung keanekaragaman hayati yang lebih besar dibandingkan wilayah yang mengalami kekurangan oksigen (*hypoxia*). Penurunan oksigen dapat terjadi akibat

peningkatan beban bahan organik, eutrofikasi, atau lemahnya sirkulasi air. Dalam kondisi yang lebih ekstrem (*anoxia*), sebagian besar organisme aerob tidak mampu bertahan hidup sehingga hanya organisme anaerob tertentu yang dapat mendominasi komunitas.

Fenomena perluasan zona minimum oksigen (*Oxygen Minimum Zones/OMZs*) di beberapa wilayah samudra menjadi perhatian penting dalam ekologi laut modern. Perubahan iklim diperkirakan akan memperluas wilayah dengan kadar oksigen rendah melalui peningkatan stratifikasi dan penurunan ventilasi massa air laut dalam.

3. Nutrien sebagai Penggerak Produktivitas Primer

Produktivitas primer laut sangat bergantung pada ketersediaan unsur hara anorganik, terutama nitrogen, fosfor, dan silikon. Nitrogen tersedia dalam bentuk nitrat, nitrit, dan amonium, sedangkan fosfor umumnya ditemukan sebagai fosfat. Silikat diperlukan terutama oleh kelompok diatom untuk membentuk dinding sel silika (*frustule*).

Di wilayah laut terbuka tropis, nutrien sering kali menjadi faktor pembatas (*limiting factor*) pertumbuhan fitoplankton meskipun intensitas cahaya matahari sangat tinggi. Sebaliknya, daerah yang memperoleh suplai nutrien melalui proses upwelling atau aliran sungai biasanya memiliki produktivitas primer yang tinggi. Peningkatan produksi fitoplankton kemudian mendukung terbentuknya biomassa zooplankton, ikan, hingga predator tingkat tinggi melalui aliran energi dalam jaring makanan.

Selain unsur hara makro, beberapa unsur mikro seperti besi (Fe), seng (Zn), dan mangan (Mn) juga berperan penting sebagai kofaktor berbagai enzim metabolisme. Di beberapa wilayah samudra, terutama kawasan *High Nutrient Low Chlorophyll* (HNLC), ketersediaan besi menjadi faktor pembatas utama pertumbuhan fitoplankton meskipun konsentrasi nitrat dan fosfat relatif tinggi.

4. Siklus Karbon Laut

Laut merupakan salah satu penyerap karbon terbesar di bumi dan memainkan peran sentral dalam regulasi iklim global. Karbon memasuki laut melalui difusi karbon dioksida

(CO_2) dari atmosfer maupun melalui aliran sungai. Di lapisan permukaan, fitoplankton menggunakan CO_2 untuk proses fotosintesis sehingga menghasilkan biomassa organik dan oksigen.

Sebagian biomassa tersebut dimakan oleh organisme lain dalam jaring makanan, sedangkan sisanya tenggelam ke dasar laut sebagai partikel organik melalui mekanisme yang dikenal sebagai pompa biologis karbon (*biological carbon pump*). Proses ini memungkinkan karbon tersimpan di laut dalam selama ratusan hingga ribuan tahun sehingga membantu mengurangi konsentrasi CO_2 di atmosfer.

Selain pompa biologis, terdapat pula pompa kelarutan (*solubility pump*), yaitu proses pelarutan karbon dioksida ke dalam air laut yang lebih efektif terjadi pada perairan bersuhu rendah. Kedua mekanisme tersebut menjadikan samudra sebagai komponen utama dalam siklus karbon global dan pengendali perubahan iklim.

5. Pengasaman Laut (*Ocean Acidification*)

Peningkatan konsentrasi karbon dioksida atmosfer akibat aktivitas manusia menyebabkan semakin banyak CO_2 larut ke dalam air laut. Reaksi kimia antara CO_2 dan air menghasilkan asam karbonat yang kemudian melepaskan ion hidrogen sehingga menurunkan nilai pH air laut. Fenomena ini dikenal sebagai pengasaman laut (*ocean acidification*).

Penurunan pH mengurangi ketersediaan ion karbonat yang dibutuhkan organisme pembentuk kalsium karbonat, seperti karang batu (*Scleractinia*), moluska, foraminifera, dan beberapa jenis plankton. Akibatnya, proses pembentukan kerangka dan cangkang menjadi lebih sulit sehingga pertumbuhan organisme tersebut dapat terganggu.

Dalam jangka panjang, pengasaman laut diperkirakan akan mengubah struktur komunitas, menurunkan keanekaragaman hayati, serta mengurangi kemampuan ekosistem laut dalam menyediakan jasa lingkungan, termasuk perlindungan pantai dan produktivitas perikanan.

6. Bahan Organik dan Dekomposisi

Bahan organik di laut berasal dari sisa organisme, ekskresi biota, aliran sungai, maupun aktivitas manusia. Sebagian besar bahan organik akan mengalami dekomposisi oleh bakteri dan mikroorganisme lainnya sehingga unsur-unsur penyusunnya kembali dilepaskan ke lingkungan sebagai nutrien yang dapat dimanfaatkan kembali oleh fitoplankton.

Proses dekomposisi merupakan bagian penting dari daur ulang nutrien (*nutrient recycling*) yang menjaga keberlanjutan produktivitas ekosistem laut. Namun demikian, apabila masukan bahan organik terlalu tinggi akibat limbah domestik, pertanian, maupun industri, laju dekomposisi akan meningkatkan konsumsi oksigen sehingga memicu hipoksia dan menurunkan kualitas habitat.

7. Kontaminan Kimia dan Dampaknya terhadap Ekosistem

Selain unsur-unsur alami, laut juga menerima berbagai bahan pencemar seperti logam berat, hidrokarbon minyak bumi, pestisida, senyawa organik persisten (*persistent organic pollutants*), mikroplastik, serta berbagai bahan kimia sintetis lainnya. Senyawa-senyawa tersebut dapat memasuki rantai makanan melalui proses bioakumulasi dan biomagnifikasi.

Paparan kontaminan kimia dapat mengganggu fisiologi organisme, menurunkan keberhasilan reproduksi, menghambat pertumbuhan, menyebabkan kelainan perkembangan, hingga meningkatkan mortalitas. Pada tingkat ekosistem, pencemaran kimia mampu mengubah struktur komunitas, menurunkan keanekaragaman hayati, serta mengurangi fungsi ekosistem dalam menyediakan berbagai jasa lingkungan.

Kajian oseanografi kimia menjadi sangat penting dalam memantau kualitas perairan serta mengevaluasi dampak aktivitas manusia terhadap kesehatan ekosistem laut. Informasi tersebut menjadi dasar ilmiah bagi pengelolaan wilayah pesisir, pengendalian pencemaran, dan konservasi sumber daya laut.

Oseanografi kimia memberikan landasan ilmiah untuk memahami bagaimana komposisi kimia air laut mengendalikan proses-proses ekologis pada berbagai tingkat organisasi kehidupan. Salinitas, oksigen terlarut, nutrien, karbon, pH, bahan organik, dan berbagai senyawa kimia lainnya membentuk kondisi lingkungan yang menentukan produktivitas primer, distribusi organisme, stabilitas jaring makanan, serta fungsi ekosistem laut. Interaksi antara proses kimia, dinamika fisik, dan aktivitas biologis menghasilkan berbagai siklus biogeokimia yang menjaga keseimbangan ekosistem laut. Oleh karena itu, integrasi oseanografi kimia dengan ekologi laut menjadi sangat penting dalam memahami respons ekosistem terhadap perubahan iklim, pencemaran, dan tekanan antropogenik lainnya, sekaligus mendukung penerapan pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan.

1.2.3.4 Kontribusi Oseanografi Biologi terhadap Proses Ekologi Laut

Oseanografi biologi merupakan cabang oseanografi yang mempelajari distribusi, kelimpahan, produktivitas, interaksi, serta dinamika organisme laut dalam kaitannya dengan kondisi lingkungan oseanik. Bidang ini menjembatani ilmu oseanografi dengan ekologi laut melalui kajian mengenai bagaimana faktor-faktor fisik dan kimia memengaruhi kehidupan organisme, sekaligus bagaimana aktivitas organisme mengubah karakteristik lingkungan laut. Oleh karena itu, oseanografi biologi sering dipandang sebagai disiplin yang paling dekat dengan ekologi laut karena sama-sama menempatkan organisme sebagai objek utama kajian.

Dalam perspektif ekologi laut, organisme bukan sekadar penghuni ekosistem, tetapi merupakan komponen aktif yang mengendalikan aliran energi, siklus materi, dan stabilitas ekosistem. Fitoplankton, zooplankton, nekton, bentos, serta mikroorganisme membentuk suatu sistem biologis yang saling terhubung melalui jaring makanan dan berbagai proses biogeokimia. Interaksi antarorganisme tersebut menentukan

produktivitas, keanekaragaman hayati, serta kemampuan ekosistem dalam mempertahankan fungsi ekologisnya.

1. **Fitoplankton sebagai Produsen Primer Laut**

   Fitoplankton merupakan organisme mikroskopis fotosintetik dan menjadi produsen primer utama di sebagian besar lautan. Walaupun biomassa sesaatnya relatif kecil dibandingkan biomassa tumbuhan darat, produksi primer laut secara keseluruhan menyumbang kira-kira separuh produksi primer biosfer global sehingga fitoplankton menjadi fondasi bagi sebagian besar jaring makanan pelagik (Field et al., 1998).

   Produktivitas fitoplankton dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, seperti intensitas cahaya, suhu, ketersediaan nutrien, stabilitas kolom air, dan proses pencampuran massa air. Oleh karena itu, perubahan kondisi oseanografi fisik dan kimia secara langsung akan memengaruhi komposisi komunitas fitoplankton serta laju produktivitas primer.

   Komunitas fitoplankton didominasi oleh beberapa kelompok utama, yaitu diatom, dinoflagellata, coccolithophore, dan sianobakteri. Masing-masing kelompok memiliki karakteristik fisiologis yang berbeda sehingga responsnya terhadap perubahan lingkungan juga berbeda. Sebagai contoh, diatom berkembang pesat pada perairan kaya nutrien hasil upwelling, sedangkan sianobakteri lebih dominan pada perairan tropis yang stabil dengan konsentrasi nutrien rendah.

   Sebagai produsen primer, fitoplankton mengubah energi matahari menjadi energi kimia melalui fotosintesis. Energi tersebut kemudian ditransfer ke tingkat trofik yang lebih tinggi melalui proses makan-dimakan sehingga menopang seluruh produktivitas ekosistem laut.

2. **Zooplankton sebagai Penghubung Tingkat Trofik**

   Zooplankton merupakan kelompok organisme heterotrof yang sebagian besar memanfaatkan fitoplankton sebagai sumber makanan. Kelompok ini terdiri atas protozoa, copepoda, krill, larva berbagai invertebrata, serta larva ikan.

Dalam ekologi laut, zooplankton berfungsi sebagai penghubung utama antara produsen primer dan konsumen tingkat tinggi. Efisiensi transfer energi dari fitoplankton menuju ikan sangat bergantung pada struktur komunitas zooplankton. Oleh sebab itu, perubahan komposisi zooplankton sering kali diikuti oleh perubahan produktivitas perikanan.

Sebagian zooplankton melakukan migrasi vertikal harian (*diel vertical migration*), yaitu bergerak menuju permukaan pada malam hari untuk mencari makan dan kembali ke lapisan yang lebih dalam pada siang hari guna menghindari predator. Fenomena ini merupakan migrasi biomassa terbesar di bumi dan berperan penting dalam distribusi karbon serta nutrien di kolom air.

3. Nekton dan Dinamika Populasi Ikan

Nekton meliputi organisme yang mampu berenang secara aktif melawan arus, seperti ikan, cumi-cumi, penyu, mamalia laut, dan sebagian reptil laut. Distribusi nekton dipengaruhi oleh kombinasi faktor oseanografi dan faktor biologis, termasuk suhu, salinitas, oksigen terlarut, produktivitas primer, ketersediaan mangsa, serta pola migrasi.

Banyak spesies ikan pelagis menunjukkan hubungan yang erat dengan kondisi oseanografi. Tuna, cakalang, dan tongkol, misalnya, cenderung terkonsentrasi pada daerah front oseanik atau wilayah upwelling yang memiliki produktivitas primer tinggi. Sebaliknya, perubahan suhu permukaan laut akibat fenomena El Niño atau gelombang panas laut dapat menyebabkan pergeseran daerah penyebaran ikan menuju lintang yang lebih tinggi atau perairan yang lebih dalam.

Kajian oseanografi biologi memungkinkan ilmuwan memahami hubungan antara dinamika populasi ikan dan kondisi lingkungan sehingga menjadi dasar bagi pengelolaan perikanan berbasis ekosistem (*ecosystem-based fisheries management*).

4. Organisme Bentik dan Fungsi Dasar Laut

Organisme bentik merupakan kelompok organisme yang hidup pada atau di dalam substrat dasar laut, meliputi bakteri, foraminifera, spons, karang, lamun, moluska, krustasea, echinodermata, hingga berbagai jenis cacing laut.

Komunitas bentik memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga fungsi ekosistem. Organisme-organisme tersebut berperan dalam dekomposisi bahan organik, daur ulang nutrien, stabilisasi sedimen, pembentukan habitat, serta penyimpanan karbon jangka panjang. Terumbu karang, misalnya, membentuk struktur tiga dimensi yang menyediakan tempat berlindung bagi ribuan spesies ikan dan invertebrata, sedangkan padang lamun berfungsi sebagai habitat pembesaran (*nursery ground*) berbagai jenis ikan ekonomis penting.

Beberapa organisme bentik, seperti cacing polychaeta dan teripang, melakukan bioturbasi, yaitu pengadukan sedimen melalui aktivitas menggali dan mencari makan. Proses ini meningkatkan pertukaran oksigen dan nutrien antara sedimen dan kolom air sehingga mendukung produktivitas ekosistem pesisir.

5. Peran Mikroorganisme dalam Ekosistem Laut

Mikroorganisme laut merupakan komponen yang sangat penting tetapi sering kali kurang mendapat perhatian dalam kajian ekologi laut. Kelompok ini meliputi bakteri, Archaea, virus, dan protista mikroskopis yang berperan dalam transformasi berbagai unsur kimia.

Bakteri laut menguraikan bahan organik menjadi senyawa sederhana yang dapat digunakan kembali oleh fitoplankton. Selain itu, berbagai kelompok bakteri terlibat dalam proses nitrifikasi, denitrifikasi, fiksasi nitrogen, oksidasi sulfur, dan transformasi berbagai unsur lainnya.

Virus laut juga memainkan peranan ekologis yang besar melalui proses lisis sel mikroorganisme. Lisis tersebut melepaskan bahan organik terlarut ke lingkungan sehingga dapat dimanfaatkan kembali oleh komunitas bakteri. Mekanisme ini mempercepat siklus nutrien dan memengaruhi dinamika populasi mikroorganisme laut.

6. ***Microbial Loop* dalam Siklus Nutrien**

Konsep microbial loop menjelaskan bahwa sebagian besar bahan organik terlarut yang dihasilkan melalui ekskresi organisme atau lisis sel tidak langsung hilang dari ekosistem, tetapi dimanfaatkan kembali oleh bakteri heterotrof. Selanjutnya, bakteri dikonsumsi oleh protozoa dan mikrozooplankton sebelum akhirnya energi tersebut kembali memasuki jaring makanan klasik.

Keberadaan *microbial loop* meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi dan unsur hara dalam ekosistem laut, terutama pada wilayah oligotrofik yang memiliki produktivitas primer relatif rendah. Tanpa mekanisme ini, sebagian besar karbon organik akan hilang dari sistem biologis dan tidak dapat dimanfaatkan oleh organisme tingkat trofik yang lebih tinggi.

7. **Pompa Biologis (*Biological Pump*)**

Salah satu kontribusi terbesar organisme laut terhadap sistem bumi adalah keberadaan pompa biologis karbon (*biological carbon pump*). Melalui fotosintesis, fitoplankton menyerap karbon dioksida dari atmosfer dan mengubahnya menjadi biomassa organik. Sebagian biomassa tersebut kemudian tenggelam ke laut dalam sebagai partikel organik atau pelet feses zooplankton.

Karbon yang berhasil mencapai laut dalam dapat tersimpan selama ratusan hingga ribuan tahun sebelum kembali ke atmosfer. Dengan demikian, aktivitas biologis organisme laut membantu mengurangi konsentrasi karbon dioksida atmosfer dan berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim global.

Efisiensi pompa biologis dipengaruhi oleh ukuran fitoplankton, struktur jaring makanan, kedalaman zona eufotik, serta intensitas pencampuran massa air. Oleh karena itu, perubahan komunitas plankton akibat pemanasan global berpotensi memengaruhi kemampuan laut dalam menyerap karbon.

8. **Jaring Makanan dan Aliran Energi**

Seluruh organisme laut saling terhubung melalui jaringan interaksi trofik yang kompleks. Energi mengalir dari

produsen primer menuju konsumen primer, konsumen sekunder, predator puncak, hingga akhirnya kembali ke lingkungan melalui proses dekomposisi.

Berbeda dengan konsep rantai makanan yang bersifat linear, ekosistem laut lebih tepat dijelaskan menggunakan konsep jaring makanan (*food web*), karena setiap organisme umumnya memiliki lebih dari satu sumber makanan dan lebih dari satu predator. Kompleksitas jaring makanan meningkatkan stabilitas ekosistem dengan menyediakan jalur alternatif aliran energi apabila salah satu spesies mengalami penurunan populasi.

Dalam beberapa dekade terakhir, pendekatan food-web ecology berkembang pesat untuk menjelaskan bagaimana perubahan pada satu tingkat trofik dapat memengaruhi keseluruhan ekosistem melalui mekanisme kaskade trofik (*trophic cascade*). Pendekatan ini menjadi salah satu dasar penting dalam pengelolaan perikanan dan konservasi laut modern.

Oseanografi biologi menjelaskan bagaimana organisme laut membentuk struktur dan fungsi ekosistem melalui proses produktivitas primer, transfer energi, siklus nutrien, dan interaksi trofik. Fitoplankton, zooplankton, nekton, bentos, serta mikroorganisme membentuk jaringan kehidupan yang saling bergantung dan berinteraksi dengan dinamika fisik maupun kimia lautan. Dengan demikian, oseanografi biologi berfungsi sebagai penghubung utama antara kondisi lingkungan oseanik dan respons biologis organisme. Integrasi kajian oseanografi biologi dengan ekologi laut menjadi landasan ilmiah bagi pemahaman dinamika ekosistem, pengelolaan sumber daya perikanan, konservasi keanekaragaman hayati, serta prediksi dampak perubahan iklim terhadap ekosistem laut.

1.2.3.5 Integrasi Oseanografi dalam Ekologi Laut

Ekosistem laut merupakan sistem yang sangat dinamis, di mana berbagai proses fisik, kimia, biologi, dan geologi berlangsung secara bersamaan pada skala ruang dan waktu yang sangat beragam. Tidak seperti ekosistem daratan yang umumnya

memiliki batas spasial yang lebih jelas, lingkungan laut dicirikan oleh konektivitas tinggi melalui pergerakan massa air, sehingga perubahan yang terjadi pada suatu lokasi dapat memengaruhi wilayah lain yang berjarak ratusan hingga ribuan kilometer. Oleh karena itu, pemahaman terhadap hubungan antara oseanografi dan ekologi laut harus dilakukan melalui pendekatan multiskala (*multi-scale approach*), yaitu dengan mempertimbangkan bagaimana proses ekologis berubah dari skala mikroskopik hingga skala global, serta dari rentang waktu harian hingga ribuan tahun.

Dalam ekologi laut modern, konsep skala (*scale*) menjadi sangat penting karena setiap fenomena ekologis berlangsung pada dimensi ruang dan waktu tertentu. Interaksi antara virus dan fitoplankton terjadi dalam skala mikrometer dan hanya berlangsung beberapa menit atau jam, sedangkan perubahan sirkulasi termohalin global berlangsung selama ratusan hingga ribuan tahun dan memengaruhi distribusi panas serta kehidupan laut di seluruh dunia. Demikian pula, proses-proses oseanografi seperti gelombang internal, pasang surut, arus laut, fenomena *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO), hingga sirkulasi termohalin bekerja pada skala yang berbeda-beda namun saling berhubungan.

Pemahaman terhadap variasi skala tersebut memungkinkan para ahli ekologi menjelaskan mengapa respons organisme terhadap perubahan lingkungan tidak selalu berlangsung secara seragam. Sebuah perubahan suhu yang hanya berlangsung beberapa hari mungkin hanya memengaruhi perilaku makan plankton, sedangkan peningkatan suhu laut yang terjadi selama beberapa dekade dapat mengubah struktur komunitas, distribusi geografis spesies, bahkan fungsi keseluruhan ekosistem.

1. **Skala Ruang dalam Interaksi Oseanografi dan Ekologi Laut**

   Dari perspektif spasial, proses oseanografi dan ekologi laut berlangsung pada berbagai tingkat organisasi ruang. Pada skala mikroskopik, interaksi terjadi antara bakteri, virus, fitoplankton, dan senyawa kimia terlarut. Walaupun berlangsung pada ukuran hanya beberapa

mikrometer, proses tersebut menentukan produktivitas primer, daur ulang nutrien, serta efisiensi transfer energi di dalam *microbial loop*.

Pada skala lokal, dinamika pasang surut, gelombang, dan arus pantai memengaruhi distribusi organisme bentik, padang lamun, hutan mangrove, maupun terumbu karang. Variasi kedalaman, jenis substrat, dan kondisi hidrodinamika menciptakan mosaik habitat yang mendukung tingginya keanekaragaman hayati di wilayah pesisir.

Pada skala regional, sistem arus laut menghubungkan berbagai habitat melalui mekanisme konektivitas ekologis (*ecological connectivity*). Larva ikan, telur, plankton, maupun propagul tumbuhan laut dapat terbawa arus hingga ratusan kilometer sebelum menetap pada habitat baru. Dengan demikian, populasi yang secara geografis terpisah sebenarnya masih merupakan bagian dari satu sistem metapopulasi yang saling berhubungan.

Pada skala global, sirkulasi termohalin, sistem arus samudra, serta fenomena iklim seperti ENSO, *Pacific Decadal Oscillation* (PDO), *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO), dan *Atlantic Meridional Overturning Circulation* (AMOC) mengendalikan distribusi panas, karbon, oksigen, dan nutrien di seluruh samudra dunia. Proses-proses tersebut membentuk pola produktivitas primer, distribusi keanekaragaman hayati, serta dinamika perikanan global.

Dengan demikian, tidak ada proses ekologis yang dapat dipahami hanya berdasarkan pengamatan pada satu lokasi. Seluruh ekosistem laut saling terhubung melalui proses oseanografi yang bekerja lintas ruang.

2. Skala Waktu dalam Dinamika Ekosistem Laut

Selain bervariasi secara spasial, proses-proses ekologi laut juga berlangsung pada berbagai skala waktu. Beberapa proses berlangsung sangat cepat, sedangkan proses lainnya memerlukan puluhan hingga ribuan tahun untuk menunjukkan dampaknya terhadap ekosistem.

Pada skala harian, perubahan intensitas cahaya akibat siklus siang dan malam mengendalikan aktivitas fotosintesis fitoplankton, migrasi vertikal zooplankton, perilaku makan

ikan, serta ritme metabolisme berbagai organisme laut. Pasang surut yang terjadi setiap beberapa jam juga menghasilkan perubahan periodik terhadap kedalaman perairan, salinitas, distribusi nutrien, dan aktivitas organisme intertidal.

Pada skala musiman, perubahan intensitas radiasi matahari, suhu permukaan laut, stratifikasi kolom air, serta kekuatan angin memengaruhi produktivitas primer dan pola reproduksi berbagai organisme. Di wilayah subtropis dan temperata, pergantian musim menghasilkan ledakan populasi fitoplankton (*spring bloom*) yang menjadi dasar peningkatan biomassa seluruh jaring makanan laut.

Pada skala antar-tahun (*interannual*), fenomena ENSO, Indian Ocean Dipole (IOD), dan variabilitas monsun mengubah pola suhu permukaan laut, curah hujan, intensitas upwelling, serta distribusi nutrien. Perubahan tersebut berdampak langsung terhadap produktivitas perikanan, keberhasilan rekrutmen ikan, dan distribusi berbagai spesies laut.

Pada skala dekade, fenomena seperti *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) maupun *North Atlantic Oscillation* (NAO) menyebabkan perubahan rezim ekosistem (*regime shifts*) yang dapat mengubah struktur komunitas dan komposisi spesies selama bertahun-tahun. Contoh yang banyak dikaji adalah fenomena "The Blob" di Samudra Pasifik Utara, yaitu gelombang panas laut yang berlangsung beberapa tahun dan menyebabkan perubahan besar pada komunitas plankton, ikan, burung laut, serta mamalia laut.

Dalam rentang waktu yang lebih panjang, yaitu ratusan hingga ribuan tahun, perubahan sirkulasi samudra, fluktuasi glasial–interglasial, dan dinamika tektonik membentuk sejarah evolusi ekosistem laut. Informasi mengenai perubahan tersebut diperoleh melalui kajian paleooseanografi menggunakan inti sedimen (*sediment cores*), mikrofosil planktonik, isotop stabil, serta rekaman geokimia dasar laut.

3. Konektivitas Ekologis sebagai Konsep Multiskala

Salah satu konsep terpenting dalam ekologi laut modern adalah konektivitas ekologis (*ecological connectivity*), yaitu hubungan fungsional antarhabitat melalui perpindahan organisme, energi, nutrien, maupun materi genetik. Konsep ini menjelaskan bahwa populasi laut jarang bersifat terisolasi, melainkan saling terhubung melalui dinamika oseanografi.

Pada skala lokal, konektivitas dapat terjadi antara padang lamun, hutan mangrove, dan terumbu karang yang berdekatan. Banyak spesies ikan memanfaatkan mangrove sebagai daerah pembesaran (*nursery ground*), kemudian bermigrasi ke padang lamun dan akhirnya hidup di terumbu karang ketika dewasa.

Pada skala regional, larva ikan, karang, maupun berbagai invertebrata dapat terbawa arus laut hingga ratusan kilometer sebelum menetap. Pola penyebaran tersebut menentukan hubungan antar populasi, mempertahankan aliran gen (*gene flow*), serta meningkatkan ketahanan populasi terhadap gangguan lingkungan.

Perkembangan analisis genetika populasi dan model dispersi larva (*biophysical larval dispersal models*) menunjukkan bahwa banyak populasi laut membentuk metapopulasi, yaitu kumpulan populasi lokal yang tetap saling berhubungan melalui perpindahan individu. Konsep ini menjadi dasar ilmiah dalam perencanaan kawasan konservasi laut modern, karena keberhasilan suatu kawasan konservasi tidak hanya ditentukan oleh kondisi di dalam kawasan tersebut, tetapi juga oleh hubungan oseanografi dengan habitat lain di sekitarnya.

Tabel 1.6. Skala Ruang dan Waktu dalam Interaksi Oseanografi dan Ekologi Laut

Skala Waktu	Contoh Proses Oseanografi	Dampak Ekologis
Jam–Hari	Siklus pasang surut, badai, siklus siang–malam	Ritme fotosintesis fitoplankton, migrasi vertikal zooplankton, pencampuran nutrient
Minggu–Bulan	Stratifikasi musiman, pencampuran massa air, awal upwelling	*Spring bloom*, musim pemijahan, rekrutmen larva
1–5 Tahun	ENSO, monsun, Indian Ocean Dipole	Pergeseran produktivitas primer, fluktuasi stok ikan, perubahan distribusi spesies
10–30 Tahun	*Pacific Decadal Oscillation* (PDO), *North Atlantic Oscillation* (NAO), tren pemanasan laut	Perubahan struktur komunitas, pergeseran wilayah sebaran spesies, perubahan rezim ekosistem
>100 Tahun	Perubahan sirkulasi termohalin, siklus glasial–interglasial	Evolusi ekosistem laut, perubahan biogeografi global, rekonstruksi paleoekologi

4. Pendekatan Observasi dan Pemodelan dalam Ekologi Laut Modern

Pemahaman mengenai hubungan antara proses oseanografi dan dinamika ekologi laut tidak hanya bergantung pada teori, tetapi juga pada kemampuan untuk mengamati dan mengukur perubahan yang terjadi di lautan. Kompleksitas sistem laut yang sangat dinamis, serta luasnya wilayah yang harus diamati, menyebabkan pengamatan lapangan secara konvensional tidak lagi memadai untuk menjelaskan seluruh proses ekologis yang berlangsung. Oleh karena itu, perkembangan teknologi observasi, penginderaan jauh, sensor otomatis, biologi molekuler, dan

pemodelan numerik telah menjadi fondasi utama dalam penelitian ekologi laut modern.

Pendekatan observasi modern tidak hanya bertujuan menggambarkan kondisi laut pada suatu waktu tertentu, tetapi juga mengungkap mekanisme yang menghubungkan proses fisik, kimia, dan biologi dalam skala ruang dan waktu yang berbeda. Integrasi berbagai sumber data memungkinkan para peneliti memahami bagaimana perubahan kondisi oseanografi memengaruhi produktivitas primer, distribusi organisme, struktur komunitas, hingga fungsi ekosistem secara keseluruhan.

a. Penginderaan Jauh (*Remote Sensing*)

Penginderaan jauh (*remote sensing*) merupakan salah satu kemajuan terbesar dalam oseanografi modern. Teknologi ini memungkinkan pengamatan kondisi laut secara luas dan berulang melalui sensor yang ditempatkan pada satelit. Dibandingkan dengan pengamatan lapangan yang hanya mencakup lokasi tertentu, citra satelit mampu memberikan informasi mengenai kondisi seluruh samudra secara hampir waktu nyata (*near real-time*).

Berbagai sensor satelit menyediakan parameter yang berbeda dan saling melengkapi. SeaWiFS dan Sentinel-3 OLCI terutama digunakan untuk ocean color dan estimasi klorofil-a; MODIS serta VIIRS menyediakan produk ocean color dan suhu permukaan laut; sedangkan tinggi muka laut dan anomali muka laut diperoleh terutama dari misi altimetri radar. Pemisahan ini penting karena setiap parameter berasal dari prinsip pengukuran dan sensor yang berbeda (McClain, 2009).

Suhu permukaan laut digunakan untuk mengidentifikasi massa air, front oseanik, upwelling, gelombang panas laut (*marine heatwaves*), maupun fenomena El Niño dan La Niña. Konsentrasi klorofil-a digunakan sebagai indikator tidak langsung (*proxy*) biomassa fitoplankton sehingga dapat menggambarkan tingkat produktivitas primer suatu wilayah. Sementara itu, data tinggi muka laut hasil altimetri satelit

dimanfaatkan untuk mempelajari sirkulasi arus, pembentukan pusaran (*eddy*), dan dinamika mesoskal yang berpengaruh terhadap distribusi organisme laut.

Melalui penginderaan jauh, para peneliti dapat menghubungkan fenomena oseanografi dengan respons biologis pada skala regional hingga global. Sebagai contoh, peningkatan suhu permukaan laut akibat El Niño sering diikuti oleh penurunan konsentrasi klorofil-a pada kawasan upwelling, yang selanjutnya menyebabkan penurunan produktivitas perikanan. Dengan demikian, data satelit telah menjadi komponen penting dalam pemantauan kesehatan ekosistem laut dan pengelolaan sumber daya perikanan.

b. Sistem Observasi *In Situ* dan Pengamatan Jangka Panjang

Meskipun penginderaan jauh mampu memberikan cakupan spasial yang sangat luas, pengamatan langsung (*in situ*) tetap diperlukan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi kolom air yang tidak dapat diamati dari satelit. Berbagai parameter seperti salinitas, oksigen terlarut, nutrien, pH, karbon terlarut, maupun karakteristik biologis hanya dapat diukur secara akurat melalui instrumen yang berada di dalam laut.

Perkembangan teknologi telah menghasilkan berbagai sistem observasi otomatis, seperti ARGO Float, Biogeochemical ARGO (BGC-Argo), mooring station, glider, serta Autonomous Underwater Vehicle (AUV). Instrumen-instrumen tersebut mampu melakukan pengukuran secara kontinu mulai dari permukaan hingga kedalaman lebih dari 2.000 meter.

Jaringan ARGO merupakan salah satu komponen utama sistem observasi samudra global. Pelampung inti ARGO terutama mengukur profil suhu, salinitas, dan tekanan, sedangkan Biogeochemical-ARGO memperluas observasi dengan sensor untuk enam variabel inti biogeokimia dan bio-optik: oksigen, nitrat, pH, klorofil-a, partikel tersuspensi melalui hamburan balik optik, serta

irradiance ke bawah. Kombinasi tersebut memungkinkan pemantauan proses biogeokimia pada skala global (Claustre et al., 2020).

Selain jaringan observasi global, berbagai stasiun pemantauan jangka panjang seperti *Hawaii Ocean Time-series* (HOT), *Bermuda Atlantic Time-series Study* (BATS), dan OceanSITES menyediakan data kontinu mengenai perubahan kondisi oseanografi selama puluhan tahun. Rekaman jangka panjang tersebut sangat penting untuk membedakan variasi alami dari dampak perubahan iklim terhadap ekosistem laut.

c. Pengambilan Sampel Biologis dan Pendekatan Molekuler

Kajian ekologi laut memerlukan informasi yang akurat mengenai struktur komunitas organisme. Oleh karena itu, berbagai metode pengambilan sampel biologis masih menjadi bagian penting dalam penelitian lapangan.

Penggunaan jaring plankton (*plankton net*), perangkap sedimen (*sediment trap*), penyelaman ilmiah (*scientific diving*), kendaraan bawah laut kendali jarak jauh (*Remotely Operated Vehicle/ROV*), serta berbagai teknik survei bentik memungkinkan identifikasi komposisi spesies, biomassa, distribusi spasial, dan dinamika komunitas organisme laut.

Dalam satu dekade terakhir, perkembangan biologi molekuler telah menghadirkan pendekatan baru melalui analisis DNA lingkungan (*Environmental DNA* atau *eDNA*). Teknik ini memungkinkan identifikasi organisme berdasarkan fragmen DNA yang terdapat di dalam sampel air laut tanpa harus menangkap organisme tersebut secara langsung.

Pendekatan *eDNA metabarcoding* terbukti mampu mendeteksi keberadaan ikan, mamalia laut, invertebrata, plankton, hingga mikroorganisme dengan tingkat sensitivitas yang sangat tinggi. Dibandingkan metode konvensional, teknik ini lebih efisien dalam

memantau spesies langka, spesies invasif, maupun organisme yang sulit diamati secara visual.

Selain *eDNA*, berbagai teknik genomik dan metagenomik kini digunakan untuk memahami perubahan struktur komunitas mikroba laut sebagai respons terhadap perubahan suhu, pengasaman laut, maupun perubahan ketersediaan nutrien. Pendekatan molekuler tersebut semakin memperkaya pemahaman mengenai hubungan antara biodiversitas dan dinamika oseanografi.

d. Pemodelan Ekosistem Laut

Kemajuan teknologi komputasi memungkinkan integrasi berbagai data hasil observasi ke dalam model numerik yang mampu mensimulasikan dinamika ekosistem laut. Pemodelan (*modelling*) menjadi salah satu alat utama dalam memprediksi respons ekosistem terhadap perubahan lingkungan maupun tekanan antropogenik.

Model yang paling sederhana menggambarkan hubungan antara nutrien, fitoplankton, zooplankton, dan detritus melalui model NPZD (*Nutrient–Phytoplankton–Zooplankton–Detritus*). Model ini banyak digunakan untuk mempelajari produktivitas primer, siklus karbon, serta respons plankton terhadap perubahan kondisi oseanografi.

Pada tingkat yang lebih kompleks, Individual-Based Models (IBM) digunakan untuk mensimulasikan pertumbuhan, perilaku, dan penyebaran individu organisme, terutama larva ikan. Model tersebut kemudian dikombinasikan dengan model sirkulasi laut sehingga menghasilkan model dispersi larva biogeofisik (*biophysical larval dispersal models*) yang mampu memetakan konektivitas antarhabitat.

Selain itu, Species Distribution Models (SDM) menghubungkan keberadaan suatu spesies dengan variabel lingkungan seperti suhu, salinitas, kedalaman, dan konsentrasi klorofil-a. Model ini banyak digunakan untuk memprediksi perubahan distribusi spesies akibat

perubahan iklim serta mendukung perencanaan kawasan konservasi laut.

Perkembangan terbaru dalam oseanografi modern adalah penggunaan Earth System Models, yaitu model terpadu yang menghubungkan atmosfer, laut, biosfer, dan siklus biogeokimia. Model ini menjadi dasar dalam berbagai proyeksi perubahan iklim global yang diterbitkan oleh IPCC.

e. Sistem Observasi Laut Global

Perkembangan ilmu oseanografi modern mengarah pada pembangunan sistem observasi laut yang bersifat global, terintegrasi, dan berkelanjutan. Berbagai jaringan internasional seperti ARGO, GO-SHIP, OceanSITES, Global Drifter Program, serta *Marine Biodiversity Observation Network* (MBON) bekerja secara sinergis dalam menyediakan data oseanografi dan biodiversitas secara berkesinambungan.

Jaringan tersebut mengintegrasikan pengamatan satelit, sensor otomatis, survei biologis, analisis *eDNA*, pengamatan masyarakat (*citizen science*), hingga pemodelan numerik menjadi satu sistem informasi yang komprehensif. Tujuan utama pengembangan sistem ini adalah mewujudkan kemampuan untuk mengamati lautan sebagaimana manusia mengamati cuaca, yaitu melalui pengamatan global secara terus-menerus dan hampir waktu nyata.

Sistem observasi semacam ini menjadi sangat penting dalam mendeteksi perubahan kondisi laut akibat pemanasan global, pengasaman laut, deoksigenasi, maupun munculnya berbagai kejadian ekstrem seperti gelombang panas laut dan ledakan alga berbahaya (*harmful algal blooms*). Dengan tersedianya data yang berkesinambungan, ilmuwan dapat mengembangkan sistem prediksi yang lebih akurat sehingga pengambilan keputusan dalam pengelolaan sumber daya laut dapat dilakukan secara lebih adaptif dan berbasis bukti ilmiah.

5. Integrasi Pemahaman dan Aplikasi dalam Ekologi Laut Modern

Perkembangan ilmu ekologi laut selama beberapa dekade terakhir menunjukkan adanya perubahan paradigma yang mendasar. Jika sebelumnya ekosistem laut dipelajari sebagai kumpulan komponen yang berdiri sendiri, kini laut dipandang sebagai suatu sistem sosial-ekologi (*social–ecological system*) yang tersusun atas interaksi kompleks antara proses biofisik, aktivitas manusia, dan perubahan lingkungan global. Dalam paradigma ini, oseanografi tidak lagi berfungsi sebagai ilmu pendukung, melainkan sebagai fondasi yang menjelaskan bagaimana lingkungan fisik dan kimia membentuk struktur, fungsi, serta dinamika ekosistem laut.

Pendekatan sistem tersebut menegaskan bahwa keberhasilan pengelolaan sumber daya laut hanya dapat dicapai apabila hubungan antara proses oseanografi dan proses ekologi dipahami secara menyeluruh. Sebagai contoh, upaya melindungi stok ikan tidak cukup hanya dengan mengatur jumlah tangkapan, tetapi juga harus mempertimbangkan dinamika arus laut yang menghubungkan daerah pemijahan, daerah pembesaran (*nursery ground*), serta habitat ikan dewasa. Demikian pula, konservasi hutan kelp, padang lamun, maupun terumbu karang memerlukan pemahaman mengenai variasi suhu, intensitas cahaya, dinamika nutrien, serta tekanan iklim yang memengaruhi ketahanan ekosistem tersebut. Integrasi oseanografi dan ekologi laut menjadi dasar ilmiah bagi pengambilan keputusan dalam pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan.

6. Indikator Pemantauan Ekosistem Laut

Pengelolaan ekosistem laut memerlukan indikator yang mampu menggambarkan perubahan kondisi lingkungan secara cepat dan akurat. Indikator tersebut berfungsi sebagai penghubung antara proses oseanografi dengan respons biologis organisme sehingga memungkinkan deteksi dini terhadap gangguan ekosistem.

Salah satu indikator yang paling banyak digunakan adalah konsentrasi klorofil-a, yang diperoleh melalui penginderaan jauh maupun pengukuran lapangan. Klorofil-a merupakan indikator tidak langsung biomassa fitoplankton sehingga sering digunakan untuk mengestimasi produktivitas primer dan potensi sumber daya perikanan. Perubahan konsentrasi klorofil-a biasanya mencerminkan perubahan pasokan nutrien, intensitas pencampuran massa air, maupun pengaruh fenomena iklim seperti ENSO.

Parameter oksigen terlarut (DO) juga menjadi indikator penting dalam menilai kualitas habitat laut. Penurunan kadar oksigen mengindikasikan meningkatnya risiko terbentuknya zona hipoksia (*hypoxic zone*) yang dapat menyebabkan kematian massal organisme laut dan hilangnya habitat berbagai spesies ekonomis penting.

Selain itu, pH laut digunakan sebagai indikator utama pengasaman laut (*ocean acidification*). Pemantauan pH secara kontinu memungkinkan identifikasi wilayah-wilayah yang rentan terhadap penurunan kejenuhan kalsium karbonat sehingga dapat digunakan sebagai dasar perlindungan ekosistem terumbu karang dan organisme berkalsium lainnya.

Perkembangan teknologi sensor juga memungkinkan pengukuran karbon anorganik terlarut, nitrat, fosfat, silikat, fluoresensi klorofil, hingga partikel organik secara otomatis melalui pelampung oseanografi maupun sistem Biogeochemical Argo (BGC-Argo). Kombinasi berbagai indikator tersebut menghasilkan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi ekosistem dibandingkan penggunaan satu parameter tunggal.

7. Pengelolaan Berbasis Ekosistem (*Ecosystem-Based Management*)

Kompleksitas interaksi antara oseanografi dan ekologi melahirkan pendekatan Pengelolaan Berbasis Ekosistem (*Ecosystem-Based Management* atau EBM). Pendekatan ini menempatkan seluruh komponen ekosistem—baik komponen fisik, kimia, biologis, maupun

sosial—sebagai satu kesatuan yang harus dipertimbangkan dalam proses pengelolaan.

Berbeda dengan pendekatan sektoral yang hanya berfokus pada satu spesies atau satu sumber daya, EBM bertujuan mempertahankan struktur, fungsi, produktivitas, dan ketahanan seluruh ekosistem. Oleh karena itu, berbagai keputusan pengelolaan selalu mempertimbangkan hubungan antara habitat, konektivitas populasi, dinamika oseanografi, perubahan iklim, serta aktivitas manusia.

Dalam pengelolaan perikanan, misalnya, informasi mengenai pola arus laut dan dispersi larva digunakan untuk menentukan kawasan pemijahan yang perlu dilindungi. Wilayah upwelling sering ditetapkan sebagai kawasan konservasi prioritas karena berfungsi sebagai pusat produktivitas primer sekaligus sumber penyebaran larva menuju wilayah lain. Model dispersi larva dan model konektivitas biogeofisik kini menjadi salah satu dasar ilmiah dalam perancangan Kawasan Konservasi Laut (Marine Protected Areas/MPA) yang efektif.

Pendekatan EBM juga diterapkan dalam pengelolaan wilayah pesisir melalui integrasi konservasi mangrove, padang lamun, terumbu karang, serta pengelolaan daerah aliran sungai. Hal ini didasarkan pada kenyataan bahwa seluruh ekosistem tersebut saling terhubung melalui aliran air, sedimen, nutrien, dan perpindahan organisme.

8. Perubahan Iklim sebagai Tantangan Ekologi Laut

Perubahan iklim merupakan faktor penggerak (*driver*) utama yang memengaruhi hampir seluruh komponen oseanografi dan ekologi laut. Peningkatan suhu laut menyebabkan perubahan stratifikasi kolom air, mengurangi pencampuran vertikal, menurunkan suplai nutrien ke lapisan permukaan, serta memengaruhi produktivitas primer.

Selain pemanasan, penyerapan karbon dioksida oleh laut mengakibatkan pengasaman laut yang berdampak terhadap organisme pembentuk kalsium karbonat, seperti karang batu, moluska, dan beberapa jenis plankton. Pada saat yang sama, berkurangnya kelarutan oksigen akibat

peningkatan suhu menyebabkan meluasnya zona deoksigenasi di berbagai wilayah samudra.

Salah satu fenomena yang semakin sering terjadi adalah gelombang panas laut (*marine heatwaves*), yaitu peningkatan suhu permukaan laut yang berlangsung selama beberapa hari hingga beberapa bulan. Gelombang panas laut terbukti menyebabkan pemutihan karang secara masif, kematian lamun, perubahan distribusi ikan, serta terganggunya struktur jaring makanan.

Berbagai dampak tersebut mendorong berkembangnya pendekatan baru dalam konservasi laut, seperti identifikasi refugia iklim (*climate refugia*), yaitu kawasan yang diperkirakan tetap memiliki kondisi lingkungan yang sesuai bagi organisme meskipun terjadi perubahan iklim global. Selain itu, strategi restorasi terumbu karang, rehabilitasi padang lamun, konservasi karbon biru (*blue carbon*), dan adaptasi berbasis ekosistem menjadi semakin penting dalam menjaga ketahanan ekosistem pesisir.

9. Sistem Peringatan Dini dan Prediksi Ekosistem Laut

Kemajuan teknologi observasi dan pemodelan memungkinkan pengembangan sistem peringatan dini (*early warning system*) terhadap berbagai gangguan ekosistem laut. Sistem ini memanfaatkan indikator oseanografi sebagai penduga awal perubahan kondisi biologis sebelum dampaknya terlihat secara nyata. Sebagai contoh, anomali suhu permukaan laut, perubahan stratifikasi, maupun perubahan indeks iklim seperti ENSO dan Indian Ocean Dipole (IOD) dapat digunakan untuk memprediksi kemungkinan terjadinya ledakan alga berbahaya (*harmful algal blooms*), perubahan stok ikan, maupun kejadian pemutihan karang. Demikian pula, perubahan konsentrasi klorofil-a yang terdeteksi melalui satelit sering dimanfaatkan untuk memperkirakan produktivitas perairan dan potensi daerah penangkapan ikan.

Perkembangan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), pembelajaran mesin (*machine learning*), serta asimilasi data dalam model oseanografi semakin

meningkatkan kemampuan sistem prediksi tersebut. Integrasi data satelit, sensor otomatis, observasi lapangan, dan model numerik memungkinkan penyusunan prakiraan kondisi ekosistem laut dengan tingkat akurasi yang semakin tinggi. Ke depan, pengembangan sistem observasi laut terpadu diperkirakan akan menjadi salah satu komponen terpenting dalam mendukung pengelolaan sumber daya laut yang adaptif terhadap perubahan lingkungan global.

Seluruh pembahasan pada subbab ini menunjukkan bahwa oseanografi dan ekologi laut merupakan dua disiplin ilmu yang tidak dapat dipisahkan. Oseanografi menyediakan kerangka fisik, kimia, biologi, dan geologi yang membentuk kondisi lingkungan laut, sedangkan ekologi laut menjelaskan bagaimana organisme merespons kondisi tersebut melalui berbagai proses biologis, mulai dari produktivitas primer hingga pembentukan struktur komunitas dan penyediaan jasa ekosistem.

Interaksi antara arus laut, suhu, salinitas, nutrien, oksigen, substrat, serta komunitas organisme menghasilkan sistem ekologis yang sangat kompleks dan dinamis. Kompleksitas tersebut hanya dapat dipahami melalui pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan observasi lapangan, penginderaan jauh, teknologi molekuler, pemodelan numerik, dan analisis spasial.

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, pemahaman mengenai hubungan oseanografi dan ekologi laut menjadi landasan ilmiah bagi konservasi keanekaragaman hayati, pengelolaan perikanan berbasis ekosistem, perlindungan kawasan pesisir, mitigasi perubahan iklim, serta pengembangan ekonomi biru. Oleh karena itu, integrasi kedua disiplin ilmu tersebut tidak hanya penting bagi pengembangan ilmu pengetahuan, tetapi juga menjadi dasar dalam mewujudkan pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan dan tangguh terhadap perubahan lingkungan pada masa mendatang.

1.3 Sejarah Perkembangan Ilmu Ekologi Laut

1.3.1 Pendahuluan

Perkembangan suatu disiplin ilmu tidak terjadi secara tiba-tiba, melainkan merupakan hasil dari akumulasi pengetahuan yang dibangun melalui proses pengamatan, eksplorasi, eksperimen, inovasi teknologi, serta penyempurnaan teori yang berlangsung selama berabad-abad. Demikian pula halnya dengan ekologi laut, yang berkembang dari sekadar catatan deskriptif mengenai organisme dan fenomena laut menjadi suatu disiplin ilmu multidisiplin yang mampu menjelaskan, memodelkan, bahkan memprediksi dinamika ekosistem laut dalam berbagai skala ruang dan waktu. Memahami sejarah perkembangan ilmu ekologi laut menjadi penting karena memberikan gambaran mengenai bagaimana paradigma ilmiah berubah seiring dengan meningkatnya kemampuan manusia dalam mengamati, mengukur, dan menganalisis lingkungan laut.

Laut merupakan sistem alam yang sangat kompleks. Sekitar 71% permukaan bumi ditutupi oleh lautan yang menyimpan lebih dari 97% cadangan air di planet ini serta menjadi habitat bagi sebagian besar keanekaragaman hayati dunia. Kompleksitas tersebut menyebabkan pemahaman terhadap proses-proses ekologis di laut berkembang lebih lambat dibandingkan ekologi daratan. Selama berabad-abad, keterbatasan teknologi menjadi kendala utama dalam mempelajari lingkungan laut, terutama wilayah laut dalam yang sulit dijangkau. Oleh karena itu, sejarah perkembangan ekologi laut sangat erat kaitannya dengan sejarah perkembangan oseanografi, teknologi eksplorasi kelautan, serta kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi secara umum.

Pada tahap awal perkembangannya, kajian mengenai kehidupan laut didominasi oleh pendekatan deskriptif (*descriptive science*), yaitu kegiatan mengamati, mengidentifikasi, mengklasifikasikan, dan mendokumentasikan organisme maupun fenomena alam tanpa memahami secara menyeluruh mekanisme yang mendasarinya. Para naturalis pada masa Yunani Kuno hingga abad ke-18 lebih banyak mencatat jenis-jenis organisme, pola distribusi, serta karakteristik habitat

berdasarkan hasil observasi lapangan. Pengetahuan tersebut menjadi fondasi penting bagi lahirnya biologi laut dan taksonomi organisme laut, namun belum mampu menjelaskan hubungan sebab-akibat antara faktor lingkungan dengan dinamika kehidupan di lautan.

Memasuki abad ke-19, perkembangan ilmu oseanografi melalui berbagai ekspedisi ilmiah mengubah cara pandang para ilmuwan terhadap lautan. Laut tidak lagi dipahami sebagai kumpulan habitat yang berdiri sendiri, tetapi sebagai suatu sistem yang saling terhubung melalui sirkulasi massa air, pertukaran energi, serta siklus materi. Penemuan mengenai arus laut, stratifikasi kolom air, distribusi nutrien, dan pola produktivitas primer membuka jalan bagi lahirnya konsep-konsep dasar ekologi laut modern. Pada periode ini, perhatian ilmuwan mulai bergeser dari pertanyaan "organisme apa yang hidup di laut?" menjadi "mengapa organisme tersebut hidup pada lokasi tertentu dan bagaimana lingkungan memengaruhi kehidupannya?" Pergeseran tersebut menandai transformasi dari ilmu sejarah alam (*natural history*) menuju ilmu ekologi.

Perkembangan berikutnya semakin dipercepat oleh kemajuan teknologi. Penemuan kapal riset modern, alat selam mandiri (*Self-Contained Underwater Breathing Apparatus* atau SCUBA), kendaraan bawah laut kendali jarak jauh (*Remotely Operated Vehicle* atau ROV), kendaraan bawah laut otonom (*Autonomous Underwater Vehicle* atau AUV), serta berbagai instrumen oseanografi memungkinkan pengamatan langsung terhadap lingkungan laut yang sebelumnya sulit dijangkau. Bersamaan dengan itu, kemajuan teknologi satelit, sistem informasi geografis (*Geographic Information System* atau GIS), sensor otomatis, serta jaringan observasi laut global menghasilkan data oseanografi dalam jumlah yang sangat besar dengan cakupan spasial dan temporal yang belum pernah dicapai sebelumnya. Integrasi teknologi tersebut mengubah penelitian ekologi laut dari studi yang bersifat lokal menjadi analisis berskala regional hingga global.

Revolusi teknologi pada akhir abad ke-20 dan awal abad ke-21 semakin memperluas cakupan penelitian ekologi laut melalui berkembangnya biologi molekuler, genomika,

environmental DNA (eDNA), DNA metabarcoding, kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence* atau AI), pembelajaran mesin (*machine learning*), komputasi awan (*cloud computing*), serta pemodelan sistem bumi (*Earth System Modelling*). Teknologi-teknologi tersebut memungkinkan identifikasi organisme tanpa harus menangkapnya, pemetaan habitat secara otomatis, analisis jutaan data oseanografi dalam waktu singkat, hingga prediksi perubahan ekosistem laut sebagai respons terhadap perubahan iklim global. Dengan demikian, ekologi laut modern tidak lagi hanya berfungsi untuk mendeskripsikan kondisi lingkungan, tetapi juga untuk memahami mekanisme ekologis, menguji berbagai hipotesis ilmiah, serta memprediksi perubahan ekosistem di masa depan.

Perubahan tersebut mencerminkan terjadinya pergeseran paradigma (*paradigm shift*) dalam perkembangan ilmu ekologi laut. Jika pada masa awal penelitian lebih berorientasi pada deskripsi organisme dan habitat, maka penelitian modern lebih menekankan pada pendekatan kuantitatif, integratif, dan prediktif. Ekologi laut saat ini memanfaatkan data hasil observasi lapangan, penginderaan jauh, eksperimen laboratorium, teknologi molekuler, serta model numerik untuk menjelaskan hubungan antara faktor fisik, kimia, biologis, dan sosial dalam satu kerangka sistem yang terpadu. Pergeseran paradigma ini sejalan dengan berkembangnya konsep Earth System Science, yang memandang lautan sebagai bagian integral dari sistem Bumi yang saling berinteraksi dengan atmosfer, daratan, biosfer, dan aktivitas manusia.

Selain perubahan metodologi, perkembangan ilmu ekologi laut juga dipengaruhi oleh meningkatnya tantangan lingkungan global. Pemanasan laut, pengasaman laut (*ocean acidification*), deoksigenasi, pencemaran plastik, eksploitasi sumber daya yang berlebihan, introduksi spesies invasif, serta degradasi habitat pesisir telah mengubah fokus penelitian dari sekadar memahami proses alami menjadi upaya mencari solusi ilmiah terhadap berbagai permasalahan lingkungan. Dalam konteks ini, ekologi laut berkembang menjadi ilmu yang berorientasi pada pengelolaan berkelanjutan (*sustainability science*), konservasi keanekaragaman hayati, mitigasi perubahan

iklim, serta pembangunan ekonomi biru (*blue economy*). Pendekatan tersebut menempatkan ilmu pengetahuan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan sumber daya laut yang adaptif dan berbasis bukti ilmiah (*evidence-based management*).

Memahami sejarah perkembangan ilmu ekologi laut memiliki beberapa manfaat penting bagi mahasiswa dan peneliti. Pertama, pemahaman historis membantu menjelaskan asal-usul berbagai konsep, teori, dan metodologi yang digunakan dalam penelitian ekologi laut saat ini. Banyak teori yang dianggap mapan pada masa kini merupakan hasil penyempurnaan dari berbagai penelitian yang dilakukan selama puluhan bahkan ratusan tahun. Kedua, kajian sejarah memperlihatkan bagaimana perkembangan teknologi telah menjadi faktor utama yang mempercepat kemajuan ilmu pengetahuan. Hampir setiap lompatan besar dalam pemahaman ekologi laut selalu didahului oleh inovasi teknologi observasi maupun analisis data. Ketiga, sejarah perkembangan ilmu memberikan pemahaman mengenai perubahan paradigma ilmiah sehingga mahasiswa tidak hanya menghafal teori, tetapi juga memahami alasan ilmiah di balik berkembangnya suatu konsep.

Lebih jauh lagi, mempelajari sejarah perkembangan ekologi laut memberikan perspektif mengenai arah perkembangan ilmu di masa depan. Saat ini penelitian ekologi laut memasuki era Anthropocene, yaitu periode ketika aktivitas manusia menjadi faktor dominan yang memengaruhi sistem Bumi. Pada era ini, tantangan utama bukan lagi sekadar mendokumentasikan perubahan ekosistem, melainkan memprediksi dampaknya, mengembangkan strategi adaptasi, dan merancang kebijakan pengelolaan yang mampu menjaga keberlanjutan fungsi ekosistem laut. Oleh karena itu, pemahaman terhadap perjalanan historis perkembangan ilmu menjadi bekal penting dalam mengembangkan inovasi penelitian yang relevan dengan tantangan global abad ke-21.

Pembahasan pada subbab ini bertujuan menguraikan perjalanan perkembangan ilmu ekologi laut secara kronologis, mulai dari periode pengamatan awal terhadap kehidupan laut, era ekspedisi oseanografi yang melahirkan dasar-dasar

oseanografi modern, revolusi teknologi kelautan pada abad ke-20, hingga transformasi menuju ekologi laut digital pada era satelit, sistem informasi geografis, biologi molekuler, kecerdasan buatan, dan analisis data skala besar. Pembahasan diakhiri dengan kajian mengenai perkembangan ekologi laut pada era Anthropocene, ketika ilmu pengetahuan tidak hanya berperan dalam memahami dinamika ekosistem, tetapi juga menjadi instrumen utama dalam mendukung konservasi, pengelolaan sumber daya laut, dan pembangunan berkelanjutan di tengah perubahan lingkungan global yang semakin cepat.

1.3.2 Periode Awal: Lahirnya Konsep Ekologi Laut (Sebelum Abad ke-19)

Sejarah perkembangan ekologi laut berakar pada perjalanan panjang manusia dalam mengenal dan memanfaatkan lingkungan laut jauh sebelum ilmu pengetahuan modern berkembang. Selama ribuan tahun, laut dipandang sebagai sumber pangan, jalur perdagangan, sarana transportasi, sekaligus ruang yang penuh misteri. Pengetahuan mengenai kehidupan laut pada masa tersebut belum disusun dalam kerangka ilmiah seperti saat ini, melainkan berkembang melalui pengalaman empiris, pengamatan berulang, dan pewarisan pengetahuan antargenerasi. Meskipun bersifat sederhana, berbagai pengamatan tersebut menjadi fondasi bagi lahirnya ilmu kelautan dan ekologi laut modern.

Pada periode sebelum abad ke-19, perkembangan pengetahuan tentang laut didominasi oleh pendekatan sejarah alam (*natural history*), yaitu kegiatan mengamati, mendeskripsikan, mengelompokkan, dan mendokumentasikan berbagai fenomena alam tanpa disertai penjelasan mekanistik mengenai hubungan sebab-akibat. Fokus utama para ilmuwan pada masa itu adalah mengenali keberagaman organisme, mencatat penyebarannya, serta memahami karakteristik lingkungan tempat organisme tersebut ditemukan. Walaupun belum menggunakan istilah "ekologi laut", berbagai pengamatan tersebut telah memperlihatkan adanya kesadaran bahwa kehidupan organisme laut sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungannya.

1. Pengamatan Masyarakat Pesisir dan Pelaut Kuno

Jauh sebelum berkembangnya metode ilmiah, masyarakat pesisir telah memiliki pengetahuan yang kaya mengenai dinamika lingkungan laut. Pengetahuan tersebut lahir dari interaksi yang berlangsung terus-menerus antara manusia dengan laut melalui kegiatan menangkap ikan, pelayaran, perdagangan, maupun eksplorasi wilayah pesisir. Dalam konteks modern, pengetahuan tersebut dikenal sebagai pengetahuan ekologi tradisional (*Traditional Ecological Knowledge* atau TEK), yaitu kumpulan pengalaman empiris yang diwariskan secara turun-temurun mengenai hubungan antara manusia dan lingkungannya.

Bangsa Fenisia, yang berkembang sekitar 1500–300 SM di kawasan Mediterania Timur, dikenal sebagai salah satu pelaut dan pedagang maritim terbesar pada zamannya. Mereka mengembangkan kemampuan navigasi berdasarkan pengamatan terhadap posisi bintang, arah angin, arus laut, serta pola gelombang. Meskipun tujuan utama pelayaran mereka adalah perdagangan, kemampuan memahami dinamika laut secara tidak langsung menunjukkan adanya pemahaman awal mengenai hubungan antara kondisi oseanografi dengan keselamatan pelayaran.

Fenisia juga menyadari bahwa perubahan musim memengaruhi kekuatan angin dan arus laut. Pengetahuan tersebut memungkinkan mereka menentukan waktu pelayaran yang aman serta memilih rute perdagangan yang efisien. Pengamatan terhadap pola migrasi ikan dan produktivitas perairan pesisir juga menjadi dasar dalam menentukan lokasi penangkapan ikan yang produktif. Walaupun belum dijelaskan secara ilmiah, praktik tersebut menunjukkan bahwa masyarakat kuno telah memahami adanya hubungan antara perubahan lingkungan laut dengan distribusi organisme.

Peradaban Yunani Kuno memberikan kontribusi yang lebih sistematis terhadap perkembangan pengetahuan kelautan. Bangsa Yunani tidak hanya memanfaatkan laut sebagai jalur perdagangan, tetapi juga mulai mengembangkan tradisi berpikir rasional mengenai

fenomena alam. Para filsuf alam berusaha menjelaskan berbagai gejala kelautan berdasarkan pengamatan dan penalaran, bukan semata-mata melalui mitologi.

Salah satu fenomena yang mendapat perhatian adalah pasang surut laut. Beberapa filsuf Yunani telah menduga adanya hubungan antara pasang surut dengan pergerakan Bulan, meskipun mekanisme gravitasi baru dapat dijelaskan secara ilmiah berabad-abad kemudian oleh Isaac Newton. Pengamatan terhadap perubahan muka air laut tersebut sangat penting bagi kegiatan pelayaran, pembangunan pelabuhan, serta penangkapan ikan di wilayah pesisir.

Bangsa Yunani juga mengenali adanya variasi musim penangkapan ikan. Mereka menyadari bahwa beberapa spesies ikan hanya muncul pada waktu-waktu tertentu dalam setahun, sedangkan spesies lainnya bermigrasi mengikuti perubahan suhu maupun kondisi laut. Pengamatan tersebut merupakan salah satu bentuk awal pemahaman mengenai dinamika populasi ikan dan hubungan antara organisme dengan faktor lingkungan.

Peradaban Romawi kemudian mengembangkan berbagai pengetahuan praktis mengenai pengelolaan sumber daya laut. Bangsa Romawi membangun pelabuhan, tambak ikan (*fish ponds*), dan sistem perdagangan hasil laut dalam skala besar. Mereka juga mencatat berbagai karakteristik habitat organisme laut, kualitas perairan, serta pengaruh musim terhadap hasil tangkapan. Berbagai catatan tersebut memperlihatkan bahwa masyarakat pada masa Romawi telah memahami pentingnya kondisi lingkungan dalam menentukan keberhasilan pemanfaatan sumber daya laut.

Selain di kawasan Mediterania, berbagai masyarakat maritim di Asia, Pasifik, Afrika, dan Nusantara juga mengembangkan sistem pengetahuan lokal mengenai laut. Nelayan tradisional mampu mengenali arah arus, pola gelombang, perubahan warna air, keberadaan burung laut, hingga perilaku ikan sebagai indikator lokasi penangkapan. Banyak komunitas pesisir juga menggunakan kalender musim berdasarkan posisi bintang, arah angin muson, dan

fase bulan untuk menentukan waktu melaut. Pengetahuan lokal tersebut masih dipraktikkan di berbagai wilayah Indonesia hingga saat ini dan menjadi salah satu contoh penerapan pengetahuan ekologi tradisional dalam pengelolaan sumber daya laut.

Walaupun bersifat empiris, berbagai pengetahuan tersebut menunjukkan bahwa manusia telah lama memahami keterkaitan antara faktor-faktor oseanografi—seperti pasang surut, arus, musim, dan angin—dengan distribusi serta kelimpahan organisme laut. Hubungan inilah yang kelak menjadi salah satu prinsip dasar dalam ilmu ekologi laut modern.

2. Kontribusi Naturalis Awal

Perkembangan pengetahuan mengenai kehidupan laut memasuki tahap yang lebih sistematis ketika para naturalis mulai melakukan pengamatan ilmiah terhadap organisme laut. Berbeda dengan masyarakat pesisir yang lebih menekankan aspek praktis, para naturalis berupaya mendokumentasikan keanekaragaman hayati secara teratur serta mencari pola-pola umum yang menjelaskan kehidupan organisme.

Tokoh yang paling berpengaruh pada periode ini adalah Aristoteles (384–322 SM), seorang filsuf Yunani yang sering disebut sebagai pelopor ilmu biologi. Melalui karya monumentalnya *Historia Animalium*, Aristoteles mendeskripsikan lebih dari 500 spesies hewan, termasuk sekitar 180 spesies organisme laut seperti ikan, moluska, krustasea, echinodermata, dan mamalia laut. Pengamatan tersebut sebagian besar dilakukan di Pulau Lesbos dan wilayah pesisir Laut Aegea.

Keistimewaan Aristoteles tidak hanya terletak pada banyaknya spesies yang dideskripsikan, tetapi juga pada pendekatan ilmiah yang digunakannya. Ia melakukan pengamatan langsung terhadap anatomi, perilaku, reproduksi, habitat, serta kebiasaan makan berbagai organisme. Aristoteles telah membedakan kelompok hewan berdasarkan karakteristik morfologi dan fisiologi, seperti hewan yang memiliki darah dan tidak memiliki darah, yang

kemudian menjadi cikal bakal klasifikasi vertebrata dan invertebrata.

Selain itu, Aristoteles juga mengamati hubungan antara organisme dengan lingkungannya. Ia mencatat bahwa beberapa spesies hanya ditemukan pada substrat berbatu, sementara spesies lain hidup di dasar berlumpur atau perairan dangkal. Pengamatan mengenai variasi habitat tersebut merupakan salah satu bentuk awal pemikiran ekologis, karena menunjukkan bahwa distribusi organisme dipengaruhi oleh kondisi lingkungan.

Beberapa konsep yang dikemukakan Aristoteles memang kemudian direvisi oleh ilmu pengetahuan modern, namun pendekatan observasional yang ia terapkan menjadi dasar bagi perkembangan zoologi dan biologi laut selama lebih dari dua ribu tahun.

Tokoh penting berikutnya adalah Pliny the Elder (23–79 M) dari Kekaisaran Romawi. Dalam ensiklopedianya yang berjudul *Naturalis Historia*, Pliny menghimpun berbagai pengetahuan mengenai tumbuhan, hewan, mineral, geografi, dan fenomena alam, termasuk kehidupan laut. Karya tersebut merupakan salah satu kompilasi ilmu pengetahuan terbesar pada dunia kuno.

Pliny mendeskripsikan berbagai jenis ikan, kerang, spons, rumput laut, serta mamalia laut berdasarkan informasi dari nelayan, pelaut, dan hasil pengamatannya sendiri. Walaupun sebagian penjelasannya masih dipengaruhi kepercayaan pada zamannya, dokumentasi tersebut memberikan gambaran mengenai keanekaragaman organisme laut yang dikenal masyarakat Romawi.

Kontribusi Aristoteles dan Pliny menunjukkan perubahan penting dalam cara manusia mempelajari laut. Pengamatan yang sebelumnya hanya bertujuan memenuhi kebutuhan praktis mulai berkembang menjadi upaya sistematis untuk mendokumentasikan dan mengelompokkan kehidupan laut. Tradisi inilah yang kemudian berkembang menjadi disiplin sejarah alam (natural history).

3. Munculnya Konsep *Natural History* dan Transisi Menuju Ilmu Kelautan Modern

Memasuki masa Renaisans hingga abad ke-18, perkembangan ilmu pengetahuan di Eropa mendorong lahirnya tradisi *natural history* yang lebih sistematis. Para naturalis melakukan berbagai ekspedisi ke wilayah-wilayah baru untuk mengumpulkan spesimen tumbuhan, hewan, dan mineral. Laut menjadi salah satu objek eksplorasi utama karena menyimpan keanekaragaman hayati yang belum banyak diketahui.

Pada periode ini, kegiatan ilmiah lebih banyak berfokus pada identifikasi spesies, penyusunan koleksi museum, ilustrasi organisme, dan penyempurnaan sistem klasifikasi. Salah satu tokoh yang sangat berpengaruh adalah Carl Linnaeus (1707–1778), yang memperkenalkan sistem tata nama binomial (*binomial nomenclature*). Sistem klasifikasi tersebut memberikan standar internasional dalam penamaan organisme dan menjadi fondasi bagi seluruh cabang ilmu biologi, termasuk ekologi laut.

Perkembangan klasifikasi memungkinkan para ilmuwan membandingkan organisme dari berbagai wilayah dunia secara lebih sistematis. Berbagai ekspedisi pelayaran yang dilakukan bangsa Eropa pada abad ke-17 dan ke-18 membawa ribuan spesimen organisme laut ke berbagai museum dan kebun raya, sehingga pengetahuan mengenai biodiversitas laut berkembang sangat pesat.

Meskipun demikian, kajian pada masa *natural history* masih memiliki keterbatasan. Sebagian besar penelitian hanya menjawab pertanyaan "apa yang hidup di laut?" tanpa mampu menjelaskan "mengapa organisme tersebut hidup di sana?" atau "bagaimana interaksi antara organisme dengan lingkungannya?" Hubungan antara suhu, arus laut, salinitas, kedalaman, nutrien, dan distribusi organisme belum dipahami secara komprehensif karena keterbatasan teknologi observasi.

Transformasi menuju ilmu kelautan modern mulai terjadi ketika para ilmuwan menyadari bahwa organisme laut tidak dapat dipelajari secara terpisah dari lingkungan

fisik dan kimianya. Perkembangan instrumen pengukuran kedalaman, termometer laut, alat pengambil sampel air, serta meningkatnya kemampuan pelayaran memungkinkan penelitian yang lebih sistematis mengenai kondisi oseanografi. Kesadaran bahwa proses fisik mengendalikan distribusi kehidupan laut menjadi titik awal integrasi antara oseanografi dan biologi, yang kemudian melahirkan disiplin ekologi laut pada abad ke-19.

Periode sebelum abad ke-19 dapat dipandang sebagai fase pembentukan fondasi konseptual bagi ekologi laut modern. Pengetahuan empiris masyarakat pesisir, tradisi observasi para naturalis, perkembangan klasifikasi organisme, dan munculnya pendekatan *natural history* membangun dasar ilmiah yang memungkinkan lahirnya penelitian oseanografi dan ekologi laut berbasis observasi sistematis. Tahap berikutnya dalam sejarah perkembangan disiplin ini ditandai oleh era ekspedisi oseanografi, ketika eksplorasi ilmiah terhadap samudra mulai dilakukan secara terencana dan menghasilkan revolusi besar dalam pemahaman manusia mengenai kehidupan di laut.

1.3.3 Perkembangan Abad ke-19: Ekspedisi Oseanografi dan Lahirnya Oseanografi Modern

Abad ke-19 menjadi fase transisi penting dari natural history menuju penelitian kelautan yang sistematis. Kemajuan navigasi, termometri, sounding, pengerukan dasar laut, dan pengambilan sampel memungkinkan ilmuwan menghubungkan keberadaan organisme dengan kedalaman, suhu, substrat, dan karakter massa air. Perubahan metodologis ini memperluas pertanyaan penelitian dari inventarisasi spesies menuju analisis hubungan organisme-lingkungan.

Ekspedisi menggunakan H.M.S. Lightning dan H.M.S. Porcupine pada akhir dekade 1860-an memberikan bukti bahwa organisme dapat ditemukan pada kedalaman yang sebelumnya dianggap terlalu ekstrem untuk mendukung kehidupan. Hasil pengerukan, pengukuran temperatur laut dalam, dan dokumentasi fauna dirangkum antara lain oleh C. Wyville Thomson dalam The Depths of the Sea (1873). Temuan tersebut

memperlemah anggapan bahwa laut dalam merupakan zona tanpa kehidupan dan mendorong eksplorasi samudra yang lebih sistematis (Thomson, 1873).

Tonggak berikutnya adalah ekspedisi H.M.S. Challenger tahun 1872–1876. Ekspedisi ini menggabungkan pengukuran kedalaman, temperatur, sifat air laut, sedimen, serta koleksi organisme pada banyak stasiun di samudra dunia. Signifikansinya bagi ekologi laut terletak pada penerapan pengambilan sampel yang lebih terstandar dan integrasi data lingkungan dengan data biologis. Laut mulai dipahami bukan hanya sebagai ruang geografis, tetapi sebagai sistem dengan gradien lingkungan yang dapat diukur dan dibandingkan antarwilayah.

Data ekspedisi abad ke-19 juga memperkuat perkembangan biogeografi laut dan kajian distribusi plankton, bentos, serta organisme laut dalam. Pada akhir abad tersebut, penelitian kelautan mulai membentuk tradisi kelembagaan dan laboratorium pesisir yang kemudian berkembang menjadi marine ecology dan biological oceanography. Kajian historis menunjukkan bahwa penyatuan pendekatan biologi dengan proses oseanografi berlangsung bertahap dan baru memperoleh bentuk disipliner yang lebih jelas pada abad ke-20 (Mills, 1995).

Abad ke-19 menyediakan tiga fondasi bagi ekologi laut modern, yaitu observasi samudra berbasis instrumen, pengambilan sampel biologis yang sistematis, dan pemikiran bahwa pola kehidupan laut harus dijelaskan bersama kondisi fisik-kimia lingkungannya. Fondasi ini memungkinkan abad ke-20 bergerak lebih jauh dari eksplorasi menuju analisis ekosistem, aliran energi, produktivitas, dan proses ekologis.

1.3.4 Perkembangan Ekologi Laut pada Abad ke-20

Abad ke-20 merupakan periode yang paling menentukan dalam sejarah perkembangan ekologi laut. Jika pada abad sebelumnya penelitian masih didominasi oleh eksplorasi dan inventarisasi keanekaragaman hayati laut, maka pada abad ini perhatian para ilmuwan bergeser menuju pemahaman mengenai proses-proses ekologis yang mengendalikan struktur dan fungsi ekosistem laut. Perkembangan tersebut dipicu oleh kemajuan

pesat dalam berbagai disiplin ilmu, terutama ekologi, oseanografi, biologi laut, kimia laut, fisika laut, matematika, dan teknologi observasi. Integrasi berbagai disiplin tersebut melahirkan paradigma baru yang memandang laut sebagai suatu sistem kompleks yang terdiri atas komponen fisik, kimia, biologis, dan geologi yang saling berinteraksi secara dinamis.

Perubahan paradigma ini tidak hanya memperluas ruang lingkup penelitian, tetapi juga mengubah tujuan utama ekologi laut. Jika sebelumnya penelitian lebih berfokus pada deskripsi organisme dan habitatnya, maka pada abad ke-20 perhatian beralih pada bagaimana energi mengalir, bagaimana materi bersiklus, bagaimana populasi saling berinteraksi, serta bagaimana proses oseanografi mengendalikan distribusi dan produktivitas organisme laut. Dengan demikian, abad ke-20 menjadi titik awal lahirnya ekologi laut modern yang berbasis pendekatan sistem (*systems approach*).

1. Munculnya Konsep Ekosistem

Perubahan terbesar dalam ilmu ekologi pada abad ke-20 diawali oleh munculnya konsep ekosistem (ecosystem). Sebelum konsep ini diperkenalkan, organisme umumnya dipelajari secara terpisah dari lingkungan fisiknya. Penelitian lebih banyak berfokus pada identifikasi spesies, klasifikasi taksonomi, dan distribusi geografis. Hubungan antara organisme dengan faktor-faktor abiotik seperti suhu, cahaya, nutrien, dan arus laut belum dipahami sebagai satu kesatuan yang utuh.

Perubahan tersebut dimulai ketika Arthur George Tansley pada tahun 1935 memperkenalkan istilah ecosystem. Tansley mendefinisikan ekosistem sebagai suatu sistem yang terdiri atas komunitas organisme beserta seluruh lingkungan fisiknya yang saling berinteraksi melalui pertukaran energi dan materi. Konsep ini menempatkan komponen biotik dan abiotik sebagai bagian yang tidak terpisahkan dalam suatu sistem ekologis.

Penerapan konsep ekosistem dalam lingkungan laut memberikan perspektif baru bahwa produktivitas perairan tidak hanya ditentukan oleh keberadaan organisme, tetapi juga oleh kondisi oseanografi seperti suhu, salinitas, arus,

intensitas cahaya, nutrien, dan dinamika massa air. Dengan demikian, laut dipahami sebagai sistem yang seluruh komponennya saling bergantung dan membentuk keseimbangan yang dinamis.

Perkembangan berikutnya dipelopori oleh Raymond L. Lindeman, yang pada tahun 1942 memperkenalkan konsep dinamika trofik (trophic dynamics). Lindeman menjelaskan bahwa energi matahari yang ditangkap oleh produsen primer mengalir melalui berbagai tingkat trofik hingga akhirnya hilang sebagai panas sesuai dengan hukum termodinamika. Konsep tersebut memperkenalkan pendekatan kuantitatif dalam ekologi melalui analisis aliran energi (*energy flow*) dan efisiensi transfer energi antar tingkat trofik.

Dalam konteks ekologi laut, teori Lindeman memberikan dasar ilmiah untuk memahami hubungan antara fitoplankton sebagai produsen primer, zooplankton sebagai konsumen pertama, ikan pelagis kecil, predator tingkat tinggi, hingga mamalia laut. Pendekatan ini menjelaskan bahwa perubahan kecil pada produktivitas primer dapat menghasilkan dampak berantai terhadap seluruh struktur komunitas laut.

Konsep ekosistem kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh Eugene P. Odum, yang dikenal sebagai salah satu pelopor ekologi modern. Melalui bukunya *Fundamentals of Ecology* yang pertama kali diterbitkan pada tahun 1953, Odum memperkenalkan pendekatan sistem dalam mempelajari ekosistem. Ia menekankan bahwa ekosistem merupakan unit fungsional yang dicirikan oleh adanya aliran energi, siklus materi, produktivitas biologis, interaksi antarorganisme, serta mekanisme umpan balik (*feedback mechanisms*).

Pemikiran Odum memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap perkembangan ekologi laut. Penelitian tidak lagi dilakukan hanya pada tingkat spesies, tetapi juga pada tingkat komunitas, ekosistem, bahkan biosfer. Pendekatan tersebut menjadi landasan bagi berkembangnya berbagai konsep seperti produktivitas primer laut, jaring makanan,

siklus karbon laut, dan pengelolaan ekosistem berbasis pendekatan holistik.

2. Perkembangan Oseanografi Fisik

Bersamaan dengan berkembangnya teori ekologi, oseanografi fisik mengalami kemajuan yang sangat pesat. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa distribusi organisme laut tidak dapat dipisahkan dari dinamika fisik laut yang mengendalikan pergerakan panas, garam, oksigen, dan nutrien.

Salah satu pencapaian penting adalah semakin dipahaminya sirkulasi arus laut global (*global ocean circulation*). Penelitian mengenai arus permukaan dan arus laut dalam memperlihatkan bahwa samudra dunia saling terhubung melalui sistem sirkulasi termohalin (*thermohaline circulation*), yang sering disebut sebagai *global conveyor belt*. Sistem ini berperan dalam mendistribusikan panas dari daerah tropis menuju lintang tinggi, sekaligus mengangkut oksigen, karbon, dan nutrien ke berbagai wilayah samudra.

Pengetahuan mengenai sirkulasi global memberikan penjelasan mengapa produktivitas biologis berbeda antarwilayah laut. Perairan tropis yang hangat sering kali memiliki produktivitas lebih rendah dibandingkan wilayah upwelling karena terbatasnya pasokan nutrien ke lapisan permukaan. Sebaliknya, daerah lintang tinggi maupun kawasan upwelling memiliki produktivitas primer yang tinggi akibat suplai nutrien dari lapisan laut dalam.

Kemajuan berikutnya adalah pemahaman mengenai proses upwelling dan downwelling. Upwelling merupakan proses naiknya massa air laut dalam yang kaya nutrien menuju permukaan akibat pengaruh angin dan dinamika arus. Fenomena ini menjadi dasar terbentuknya beberapa kawasan perikanan paling produktif di dunia, seperti sistem upwelling Peru–Humboldt, Benguela, Canary, dan California Current.

Penelitian pada abad ke-20 juga mengungkap pengaruh fenomena iklim global seperti El Niño–Southern Oscillation (ENSO) terhadap ekosistem laut. ENSO menyebabkan perubahan suhu permukaan laut, kekuatan

angin pasat, intensitas upwelling, serta distribusi nutrien di Samudra Pasifik tropis. Dampaknya tidak hanya dirasakan pada produktivitas primer, tetapi juga terhadap kelimpahan ikan, keberhasilan reproduksi burung laut, distribusi mamalia laut, hingga kondisi sosial-ekonomi masyarakat pesisir yang bergantung pada sektor perikanan.

Perkembangan oseanografi fisik memperjelas bahwa faktor-faktor lingkungan bukan sekadar latar belakang kehidupan organisme, melainkan merupakan penggerak utama yang menentukan struktur dan fungsi ekosistem laut.

3. Revolusi Biologi Laut

Perkembangan teknologi mikroskopi, kultur organisme, metode analisis kimia, serta penelitian oseanografi mendorong terjadinya revolusi dalam bidang biologi laut. Perhatian ilmuwan tidak lagi terbatas pada organisme berukuran besar, tetapi juga mencakup komunitas plankton, mikroorganisme, dan proses biogeokimia yang berlangsung pada skala mikroskopis.

Salah satu bidang yang berkembang sangat pesat adalah ekologi plankton (*plankton ecology*). Penelitian menunjukkan bahwa fitoplankton merupakan produsen primer utama di lautan dan, secara global, produksi primer laut menyumbang kira-kira separuh produksi primer biosfer. Produktivitas fitoplankton dipengaruhi oleh intensitas cahaya, suhu, stabilitas kolom air, dan ketersediaan nutrien seperti nitrogen, fosfor, silikat, serta besi (Field et al., 1998).

Pemahaman mengenai plankton kemudian berkembang menjadi kajian jaring makanan laut (*marine food web*). Berbeda dengan konsep rantai makanan yang bersifat linier, jaring makanan menggambarkan hubungan trofik yang jauh lebih kompleks, di mana satu spesies dapat berinteraksi dengan banyak spesies lainnya melalui berbagai jalur aliran energi. Pendekatan ini memungkinkan para ilmuwan menjelaskan stabilitas komunitas, dinamika populasi, serta respons ekosistem terhadap gangguan lingkungan.

Pada dekade 1980-an, pemahaman mengenai peran mikroorganisme mengalami perubahan besar melalui diperkenalkannya konsep microbial loop oleh Farooq Azam dan koleganya. Konsep ini menunjukkan bahwa sebagian besar karbon organik terlarut (*Dissolved Organic Carbon/DOC*) tidak langsung dimanfaatkan oleh zooplankton, tetapi terlebih dahulu didaur ulang oleh bakteri heterotrof, protista, dan mikroorganisme lainnya sebelum kembali memasuki jaring makanan (Azam et al., 1983)..

Penemuan *microbial loop* mengubah pandangan ilmuwan mengenai aliran energi di lautan. Sebelumnya mikroorganisme dianggap hanya memiliki peran kecil dalam ekosistem, namun penelitian selanjutnya membuktikan bahwa mikroba merupakan komponen utama yang mengendalikan daur karbon, nitrogen, fosfor, dan berbagai unsur hara lainnya.

Konsep penting lainnya adalah biological pump, yaitu mekanisme biologis yang memindahkan karbon dari atmosfer menuju laut dalam melalui aktivitas fotosintesis fitoplankton dan pengendapan partikel organik. Biological pump berperan penting dalam mengatur konsentrasi karbon dioksida atmosfer sehingga menjadi salah satu komponen utama dalam sistem iklim global. Pemahaman mengenai mekanisme ini memperlihatkan bahwa organisme laut tidak hanya dipengaruhi oleh lingkungan, tetapi juga berperan aktif dalam mengendalikan proses-proses oseanografi dan iklim bumi.

4. Integrasi Oseanografi dan Ekologi

Salah satu karakteristik utama perkembangan ekologi laut pada abad ke-20 adalah semakin kuatnya integrasi antara oseanografi dan ekologi. Jika pada masa sebelumnya kedua disiplin berkembang secara relatif terpisah, maka berbagai penelitian menunjukkan bahwa proses-proses biologis tidak dapat dijelaskan tanpa memahami dinamika fisik dan kimia laut.

Pendekatan integratif ini melahirkan konsep marine ecosystem functioning, yaitu pemahaman bahwa produktivitas primer, distribusi spesies, struktur komunitas,

siklus biogeokimia, dan fungsi ekosistem merupakan hasil interaksi yang kompleks antara faktor oseanografi dan respons biologis organisme. Arus laut menentukan penyebaran larva, stratifikasi kolom air mengendalikan suplai nutrien, suhu memengaruhi laju metabolisme organisme, sedangkan komunitas biologis memengaruhi siklus karbon dan kualitas perairan.

Perubahan paradigma tersebut juga menggeser metodologi penelitian. Penelitian ekologi laut tidak lagi hanya berupa survei deskriptif mengenai keberadaan spesies, tetapi berkembang menjadi analisis kuantitatif berbasis eksperimen, pengamatan jangka panjang, pemodelan matematis, statistik multivariat, serta integrasi berbagai disiplin ilmu. Pendekatan proses (*process-based ecology*) memungkinkan para ilmuwan menjelaskan mekanisme yang mendasari perubahan ekosistem, menguji hipotesis secara kuantitatif, dan memprediksi respons ekosistem terhadap gangguan lingkungan.

Transformasi tersebut menjadikan ekologi laut sebagai salah satu cabang ilmu yang sangat multidisiplin. Menjelang akhir abad ke-20, penelitian ekologi laut telah mengintegrasikan oseanografi fisik, oseanografi kimia, oseanografi biologi, geologi laut, klimatologi, biogeokimia, genetika, serta ilmu komputer dalam satu kerangka analisis yang terpadu. Integrasi inilah yang kemudian menjadi fondasi bagi lahirnya ekologi laut modern pada abad ke-21, yang memanfaatkan teknologi penginderaan jauh, sistem observasi global, biologi molekuler, kecerdasan buatan, dan pemodelan sistem bumi untuk memahami serta memprediksi dinamika ekosistem laut dalam menghadapi perubahan lingkungan global.

1.4 Transformasi Ekologi Laut Menuju Era Digital dan Anthropocene

Paruh kedua abad ke-20 hingga awal abad ke-21 merupakan periode transformasi terbesar dalam sejarah perkembangan ilmu ekologi laut. Jika pada abad ke-19 penelitian kelautan berfokus pada eksplorasi samudra dan inventarisasi

keanekaragaman hayati, serta pada abad ke-20 berkembang menuju pemahaman proses-proses ekologis melalui pendekatan ekosistem, maka perkembangan setelah tahun 1950 ditandai oleh revolusi teknologi yang mengubah secara fundamental cara ilmuwan mengamati, menganalisis, dan memahami lingkungan laut. Kemajuan tersebut tidak hanya meningkatkan kemampuan manusia dalam mengeksplorasi lautan yang sebelumnya sulit dijangkau, tetapi juga melahirkan paradigma baru dalam penelitian ekologi laut yang berbasis data, terintegrasi, dan prediktif.

Transformasi ini didorong oleh kemajuan pesat dalam berbagai bidang ilmu pengetahuan dan teknologi. Perkembangan instrumen eksplorasi bawah laut, satelit penginderaan jauh, sistem observasi oseanografi otomatis, biologi molekuler, teknologi komputasi, kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), hingga pemodelan sistem bumi (*Earth System Models*) telah menghasilkan perubahan mendasar dalam skala, resolusi, dan kualitas informasi yang dapat diperoleh dari ekosistem laut. Penelitian yang sebelumnya bergantung pada pengamatan langsung dalam ruang dan waktu yang terbatas kini berkembang menjadi sistem observasi global yang mampu memantau perubahan kondisi laut secara hampir real-time dengan cakupan spasial dari skala lokal hingga seluruh samudra dunia.

Perubahan tersebut mencerminkan pergeseran paradigma penelitian dari observasi manual menuju observasi global yang berkesinambungan. Pada masa awal perkembangan ekologi laut, data diperoleh melalui survei lapangan menggunakan kapal penelitian dengan jumlah stasiun pengamatan yang relatif sedikit. Informasi mengenai kondisi laut sering kali bersifat sesaat (*snapshot*) sehingga sulit menggambarkan dinamika ekosistem yang berlangsung secara kontinu. Selain membutuhkan biaya besar dan waktu yang panjang, metode tersebut juga memiliki keterbatasan dalam menjangkau wilayah laut dalam, kawasan kutub, maupun samudra lepas.

Perkembangan teknologi observasi secara bertahap mengatasi berbagai keterbatasan tersebut. Penemuan peralatan selam mandiri (*Self-Contained Underwater Breathing Apparatus*

atau SCUBA) memungkinkan ilmuwan melakukan observasi langsung terhadap ekosistem bawah laut. Selanjutnya, kemajuan teknologi kendaraan bawah laut seperti *Remotely Operated Vehicle* (ROV) dan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) membuka akses penelitian ke kedalaman ribuan meter tanpa risiko bagi penyelam. Pada saat yang sama, jaringan pelampung oseanografi otomatis seperti Argo Float dan Biogeochemical Argo (BGC-Argo) menyediakan data suhu, salinitas, oksigen terlarut, pH, nitrat, klorofil, serta berbagai parameter oseanografi lainnya secara kontinu di seluruh samudra dunia.

Revolusi berikutnya terjadi ketika penginderaan jauh satelit diterapkan secara luas dalam penelitian kelautan. Sensor ocean color seperti SeaWiFS dan OLCI, sensor multispektral seperti MODIS dan VIIRS, serta sistem altimetri radar menyediakan informasi yang saling melengkapi mengenai klorofil-a, suhu permukaan laut, karakter optik perairan, dan dinamika muka laut. Data tersebut kemudian dipadukan dengan GIS, komputasi awan, dan basis data oseanografi global sehingga memungkinkan analisis spasial-temporal pada skala regional hingga global (McClain, 2009).

Kemajuan teknologi observasi diikuti oleh revolusi dalam bidang biologi molekuler. Pengembangan teknik DNA barcoding, environmental DNA (eDNA), DNA metabarcoding, genomika, metagenomika, serta kajian mikrobioma laut memungkinkan identifikasi organisme tanpa harus menangkap atau mengamatinya secara langsung. Pendekatan molekuler tidak hanya meningkatkan akurasi inventarisasi biodiversitas, tetapi juga mengungkap keberadaan spesies langka, spesies invasif, maupun komunitas mikroorganisme yang sebelumnya sulit dideteksi menggunakan metode konvensional. Dengan demikian, pemahaman mengenai struktur komunitas dan fungsi ekosistem laut berkembang dari pendekatan morfologi menuju pendekatan genetik dan molekuler (Hebert et al., 2003; Deiner et al., 2017).

Transformasi tersebut semakin dipercepat oleh kemajuan teknologi komputasi dan analisis data. Volume data yang dihasilkan dari satelit, sensor otomatis, kapal riset, instrumen bawah laut, serta teknologi molekuler meningkat secara eksponensial sehingga melahirkan era Big Data oseanografi.

Pengelolaan dan analisis data dalam jumlah sangat besar hanya dimungkinkan melalui komputasi berkinerja tinggi (*high-performance computing*), komputasi awan, algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*), pembelajaran mendalam (*deep learning*), dan berbagai pendekatan kecerdasan buatan. Teknologi tersebut memungkinkan identifikasi pola-pola ekologis yang kompleks, pembangunan model prediktif, hingga simulasi perubahan ekosistem laut dalam berbagai skenario lingkungan (Malde et al., 2020; Reichstein et al., 2019).

Perkembangan tersebut mengubah fungsi utama ekologi laut. Jika sebelumnya penelitian terutama bertujuan mendeskripsikan kondisi ekosistem, maka kini fokus bergeser pada kemampuan menjelaskan mekanisme ekologis, memprediksi perubahan di masa depan, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti ilmiah (*evidence-based decision making*). Kecerdasan buatan, pemodelan numerik, dan sistem observasi global memungkinkan prediksi terhadap distribusi spesies, stok perikanan, pemutihan terumbu karang (*coral bleaching*), ledakan alga berbahaya (*harmful algal blooms*), hingga dampak perubahan iklim terhadap produktivitas laut. Dengan demikian, ekologi laut berkembang dari ilmu deskriptif (*descriptive science*) menjadi ilmu prediktif (*predictive science*) yang mampu mengantisipasi perubahan ekosistem sebelum dampaknya terjadi secara luas.

Perubahan paradigma tersebut berlangsung bersamaan dengan meningkatnya tekanan antropogenik terhadap lingkungan laut. Aktivitas manusia kini menjadi faktor dominan yang memengaruhi struktur dan fungsi ekosistem laut melalui pemanasan global, pengasaman laut (*ocean acidification*), gelombang panas laut (*marine heatwaves*), penurunan kadar oksigen (*deoxygenation*), pencemaran plastik, eksploitasi sumber daya yang berlebihan, serta degradasi habitat pesisir. Kondisi ini mendorong lahirnya konsep Anthropocene, yaitu suatu periode ketika aktivitas manusia menjadi kekuatan utama yang mengubah sistem Bumi, termasuk lautan. Dalam konteks tersebut, perkembangan teknologi tidak lagi dipandang semata-mata sebagai sarana eksplorasi ilmiah, tetapi sebagai instrumen

penting untuk memahami, memantau, dan mengelola perubahan lingkungan global secara berkelanjutan.

Oleh karena itu, transformasi ekologi laut pada era digital tidak hanya ditandai oleh kemajuan instrumen penelitian, tetapi juga oleh integrasi berbagai disiplin ilmu dalam satu kerangka analisis yang komprehensif. Oseanografi, biologi molekuler, penginderaan jauh, sistem informasi geografis, ilmu komputer, statistik, kecerdasan buatan, dan ilmu iklim kini saling melengkapi dalam membangun pemahaman yang lebih utuh mengenai dinamika ekosistem laut. Pendekatan multidisiplin tersebut memungkinkan penelitian dilakukan secara lebih efisien, akurat, dan adaptif terhadap perubahan lingkungan yang berlangsung semakin cepat.

Pada subbab ini akan dibahas transformasi ekologi laut menuju era digital dan Anthropocene melalui enam aspek utama, yaitu revolusi teknologi kelautan, perkembangan teknologi digital dalam penelitian ekologi laut, revolusi biologi molekuler, penerapan kecerdasan buatan, tantangan ekologi laut pada era Anthropocene, serta arah perkembangan ekologi laut di masa depan. Pembahasan ini menunjukkan bahwa kemajuan ilmu ekologi laut tidak hanya ditentukan oleh perkembangan teori, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh inovasi teknologi yang memungkinkan manusia memahami lautan sebagai suatu sistem yang dinamis, saling terhubung, dan terus mengalami perubahan pada skala global.

1.4.1 Revolusi Teknologi Kelautan

Perkembangan ekologi laut modern tidak dapat dipisahkan dari revolusi teknologi yang berlangsung sejak pertengahan abad ke-20. Kemajuan teori ekologi dan oseanografi pada periode sebelumnya membuka pemahaman baru mengenai kompleksitas ekosistem laut, namun kemampuan untuk menguji berbagai teori tersebut masih dibatasi oleh keterbatasan teknologi observasi. Laut, khususnya laut dalam, merupakan lingkungan yang sulit diakses karena tekanan hidrostatik yang tinggi, kondisi gelap, suhu rendah, serta luasnya wilayah yang harus diamati. Oleh karena itu, kemajuan teknologi eksplorasi menjadi faktor utama yang memungkinkan penelitian ekologi

laut berkembang dari ilmu yang didasarkan pada observasi terbatas menjadi disiplin ilmu yang mampu mengamati proses ekologis secara langsung, kontinu, dan pada skala global.

Revolusi teknologi kelautan ditandai oleh lahirnya berbagai instrumen yang memperluas jangkauan penelitian, meningkatkan akurasi pengukuran, serta memungkinkan pengumpulan data secara otomatis dalam jangka waktu yang panjang. Mulai dari peralatan selam mandiri, kapal riset modern, kendaraan bawah laut tanpa awak, hingga jaringan sensor oseanografi global, seluruh inovasi tersebut telah mengubah cara ilmuwan memahami struktur, fungsi, dan dinamika ekosistem laut.

SCUBA dan Awal Eksplorasi Bawah Laut

Tonggak penting revolusi teknologi kelautan terjadi pada tahun 1943 ketika Jacques-Yves Cousteau bersama insinyur Prancis Émile Gagnan mengembangkan Aqua-Lung, yaitu sistem pernapasan bawah air mandiri (*Self-Contained Underwater Breathing Apparatus* atau SCUBA). Sebelum penemuan ini, penyelam masih bergantung pada suplai udara dari permukaan melalui selang sehingga mobilitas dan waktu penyelaman sangat terbatas.

Aqua-Lung memungkinkan penyelam membawa sendiri tabung udara bertekanan tinggi sehingga dapat bergerak lebih bebas dan melakukan pengamatan langsung terhadap berbagai habitat bawah laut. Inovasi ini menjadi titik awal berkembangnya penelitian ekologi bawah laut (*underwater ecology*) karena ilmuwan dapat mengamati perilaku organisme dalam habitat alaminya tanpa harus mengangkat organisme tersebut ke permukaan.

Penggunaan SCUBA membawa perubahan besar dalam penelitian terumbu karang, padang lamun, hutan mangrove, komunitas bentik, serta ekosistem pesisir lainnya. Berbagai aspek yang sebelumnya sulit diamati, seperti perilaku makan ikan, interaksi predator dan mangsa, reproduksi karang, kompetisi ruang antarorganisme, hingga dinamika komunitas bentik, mulai dapat dipelajari secara langsung melalui observasi lapangan.

Selain meningkatkan kualitas penelitian ilmiah, teknologi SCUBA juga mendorong berkembangnya metode sensus visual bawah air (*Underwater Visual Census/UVC*) yang hingga kini masih menjadi salah satu teknik standar dalam pemantauan biodiversitas ikan karang dan kondisi terumbu karang di berbagai negara.

Kapal Riset Modern

Perkembangan berikutnya ditandai oleh modernisasi kapal riset oseanografi. Jika kapal ekspedisi pada abad ke-19 seperti *HMS Challenger* lebih berfungsi sebagai sarana eksplorasi, maka kapal riset modern telah berkembang menjadi laboratorium ilmiah terapung yang dilengkapi berbagai instrumen observasi dan analisis.

Kapal penelitian modern memiliki kemampuan melakukan pengukuran oseanografi secara simultan, seperti suhu, salinitas, oksigen terlarut, pH, arus laut, nutrien, hingga karakteristik sedimen dasar laut. Instrumen seperti CTD (*Conductivity–Temperature–Depth Profiler*) memungkinkan pengukuran profil vertikal kolom air secara presisi, sedangkan sistem *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) digunakan untuk mengukur kecepatan dan arah arus laut pada berbagai kedalaman.

Keberadaan laboratorium di atas kapal juga memungkinkan analisis sampel biologis, kimia, maupun mikrobiologi dilakukan segera setelah pengambilan sampel, sehingga meningkatkan kualitas data penelitian. Kapal riset modern menjadi tulang punggung berbagai ekspedisi internasional yang bertujuan mempelajari perubahan iklim, produktivitas primer, biodiversitas laut dalam, hingga dinamika karbon laut.

***Remotely Operated Vehicle* (ROV)**

Meskipun SCUBA membuka peluang eksplorasi bawah laut, kedalaman operasional penyelam tetap terbatas, umumnya tidak lebih dari sekitar 40 meter untuk penyelaman ilmiah biasa. Untuk menjangkau laut dalam, dikembangkan *Remotely Operated*

Vehicle (ROV), yaitu kendaraan bawah laut yang dikendalikan dari kapal melalui kabel serat optik.

ROV dilengkapi kamera resolusi tinggi, lampu, lengan manipulator, sensor oseanografi, serta berbagai instrumen pengambilan sampel. Teknologi ini memungkinkan eksplorasi hingga kedalaman ribuan meter, termasuk kawasan palung laut, gunung api bawah laut, ventilasi hidrotermal (*hydrothermal vents*), dan ekosistem laut dalam yang sebelumnya hampir tidak pernah diamati secara langsung.

Penggunaan ROV menghasilkan berbagai penemuan penting, termasuk komunitas organisme ekstremofil pada ventilasi hidrotermal, ekosistem laut dalam yang bergantung pada kemosintesis, serta berbagai spesies baru yang memperluas pemahaman mengenai evolusi dan adaptasi kehidupan laut.

Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

Perkembangan selanjutnya adalah *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV), yaitu kendaraan bawah laut yang mampu beroperasi secara mandiri tanpa kabel penghubung dengan kapal penelitian. Berbeda dengan ROV yang dikendalikan secara langsung oleh operator, AUV menjalankan misi berdasarkan program navigasi yang telah ditentukan sebelumnya.

AUV dapat membawa berbagai sensor oseanografi untuk mengukur suhu, salinitas, oksigen, kekeruhan, fluoresensi klorofil, arus laut, bahkan memetakan topografi dasar laut menggunakan teknologi sonar multibeam. Karena mampu beroperasi selama berjam-jam hingga berhari-hari, AUV sangat efektif untuk survei habitat laut yang luas maupun pengamatan jangka panjang pada wilayah yang sulit dijangkau.

Dalam penelitian ekologi laut, AUV digunakan untuk pemetaan habitat terumbu karang, padang lamun, distribusi plankton, migrasi organisme laut, hingga pemantauan kawasan konservasi secara berulang dengan tingkat akurasi yang tinggi.

Argo Float

Salah satu revolusi terbesar dalam observasi oseanografi global adalah lahirnya program Argo pada awal abad ke-21. Argo

merupakan jaringan ribuan pelampung oseanografi otomatis (*Argo Float*) yang tersebar di seluruh samudra dunia.

Setiap pelampung secara periodik menyelam hingga kedalaman sekitar 2.000 meter untuk mengukur profil suhu dan salinitas, kemudian naik kembali ke permukaan sambil mengirimkan data melalui satelit ke pusat data internasional. Siklus ini berlangsung secara otomatis setiap sekitar sepuluh hari dan dapat berlangsung selama beberapa tahun.

Jaringan Argo telah menghasilkan jutaan profil oseanografi yang memungkinkan ilmuwan memantau perubahan kondisi laut secara global dengan resolusi temporal dan spasial yang belum pernah dicapai sebelumnya. Data tersebut menjadi sumber utama dalam penelitian sirkulasi laut, perubahan iklim, kenaikan muka laut, serta dinamika panas samudra.

Biogeochemical Argo (BGC-Argo)

Keberhasilan Argo mendorong pengembangan *Biogeochemical Argo* (BGC-Argo), yaitu generasi baru pelampung otomatis yang tidak hanya mengukur parameter fisik, tetapi juga berbagai parameter biogeokimia.

Selain suhu dan salinitas, BGC-Argo dilengkapi sensor untuk mengukur oksigen terlarut, pH, nitrat, fluoresensi klorofil-a, partikel tersuspensi, hingga intensitas cahaya. Data tersebut memungkinkan ilmuwan mempelajari hubungan antara kondisi fisik laut dengan produktivitas primer, respirasi ekosistem, siklus karbon, dan dinamika nutrien secara simultan.

BGC-Argo melengkapi observasi fisik dengan sensor untuk enam variabel inti biogeokimia dan bio-optik: oksigen, nitrat, pH, klorofil-a, partikel tersuspensi melalui *optical backscatter,* serta *downwelling irradiance*. Variabel tersebut memungkinkan hubungan antara struktur fisik kolom air, produktivitas, siklus karbon, dan dinamika biogeokimia dipantau dalam ruang dan waktu secara lebih luas (Claustre et al., 2020).

Sensor Otomatis dan Observatorium Laut

Selain pelampung Argo, revolusi teknologi kelautan juga ditandai oleh berkembangnya berbagai sensor otomatis yang dipasang pada buoy, stasiun pantai, kabel bawah laut, kapal

penelitian, hingga wahana bawah laut. Sensor-sensor tersebut mampu melakukan pengukuran kontinu terhadap suhu, salinitas, arus, tinggi gelombang, kadar oksigen, pH, karbon dioksida terlarut, nutrien, kebisingan bawah air, serta parameter meteorologi.

Di berbagai negara maju, jaringan sensor tersebut diintegrasikan dalam observatorium laut (*Ocean Observatories*) yang beroperasi selama 24 jam sehari sepanjang tahun. Sistem observasi ini menghasilkan deret waktu (*time series*) jangka panjang yang sangat penting untuk mendeteksi perubahan ekosistem, memahami variabilitas iklim, serta mengevaluasi dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan laut.

Keberadaan observatorium laut juga memungkinkan pengembangan sistem peringatan dini terhadap berbagai fenomena seperti gelombang panas laut (*marine heatwaves*), ledakan alga berbahaya (*harmful algal blooms*), hipoksia, hingga perubahan kualitas perairan pesisir.

Dampak Revolusi Teknologi terhadap Penelitian Ekologi Laut

Seluruh perkembangan teknologi tersebut telah mengubah secara mendasar paradigma penelitian ekologi laut. Jika sebelumnya penelitian sangat bergantung pada pengamatan sesaat di lokasi tertentu, kini ilmuwan mampu memantau kondisi laut secara kontinu, multidisiplin, dan berskala global. Data yang diperoleh tidak lagi terbatas pada keberadaan organisme, tetapi juga mencakup berbagai parameter fisik, kimia, biologis, dan biogeokimia yang saling berinteraksi membentuk fungsi ekosistem.

Revolusi teknologi juga mempercepat integrasi antara observasi lapangan, eksperimen, penginderaan jauh, pemodelan numerik, dan analisis data sehingga memungkinkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai dinamika ekosistem laut. Berbagai inovasi tersebut menjadi fondasi bagi lahirnya era digital dalam ekologi laut yang memanfaatkan penginderaan jauh, sistem informasi geografis, komputasi awan, dan analisis data skala besar untuk mempelajari lautan sebagai satu sistem global yang saling terhubung. Dengan demikian, revolusi

teknologi kelautan tidak hanya meningkatkan kemampuan eksplorasi, tetapi juga mengubah ekologi laut menjadi ilmu yang semakin kuantitatif, integratif, dan prediktif.

1.4.2 Era Digital dalam Ekologi Laut

Revolusi teknologi kelautan yang ditandai oleh berkembangnya instrumen observasi bawah laut, kapal riset modern, dan sistem pengamatan otomatis menjadi landasan bagi lahirnya era digital dalam ekologi laut. Jika revolusi teknologi sebelumnya berfokus pada peningkatan kemampuan memperoleh data dari lingkungan laut, maka era digital menitikberatkan pada kemampuan mengintegrasikan, mengelola, menganalisis, dan memvisualisasikan data tersebut dalam skala yang jauh lebih besar. Perkembangan teknologi informasi, penginderaan jauh, komputasi berkinerja tinggi, dan jaringan komunikasi global telah mengubah penelitian ekologi laut dari aktivitas yang bersifat lokal menjadi sistem observasi global yang menghasilkan data secara terus-menerus.

Pada era ini, lautan tidak lagi dipelajari hanya melalui ekspedisi lapangan yang berlangsung beberapa minggu atau bulan, tetapi dipantau secara berkesinambungan melalui kombinasi satelit, sensor otomatis, kendaraan bawah laut, pelampung oseanografi, dan stasiun pengamatan permanen. Integrasi berbagai sumber data tersebut memungkinkan para ilmuwan mengamati dinamika laut hampir secara real-time, mulai dari perubahan suhu permukaan laut hingga distribusi klorofil, produktivitas primer, arus laut, tinggi muka laut, bahkan kondisi ekosistem pesisir. Dengan demikian, era digital telah memperluas dimensi penelitian ekologi laut dari pengamatan titik-titik lokasi menjadi analisis spasial dan temporal pada skala samudra hingga global.

Penginderaan Jauh Satelit

Salah satu perkembangan paling revolusioner dalam ekologi laut adalah penerapan penginderaan jauh satelit (*satellite remote sensing*). Teknologi ini memungkinkan pengamatan kondisi permukaan laut secara berulang tanpa harus melakukan

pengukuran langsung di lapangan. Satelit dilengkapi sensor optik, inframerah, dan gelombang mikro yang merekam karakteristik fisik maupun biologis lautan berdasarkan pantulan dan emisi energi elektromagnetik.

Keunggulan utama penginderaan jauh adalah kemampuannya menghasilkan informasi dengan cakupan spasial yang sangat luas dan frekuensi pengamatan yang tinggi. Jika survei lapangan hanya mampu menggambarkan kondisi pada lokasi tertentu, citra satelit dapat memetakan seluruh kawasan pesisir, laut regional, bahkan samudra dunia secara simultan. Kemampuan ini sangat penting untuk memahami fenomena ekologis yang berlangsung pada skala besar, seperti dinamika arus laut, distribusi produktivitas primer, pemutihan terumbu karang, maupun dampak perubahan iklim terhadap ekosistem laut.

Perkembangan teknologi satelit dimulai dengan peluncuran *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) pada tahun 1997. SeaWiFS dirancang khusus untuk mengukur warna laut (*ocean color*), yang berkaitan erat dengan konsentrasi klorofil-a sebagai indikator biomassa fitoplankton. Data SeaWiFS merevolusi pemahaman mengenai distribusi produktivitas primer global dan memungkinkan estimasi produksi primer laut secara kuantitatif (McClain, 2009).

Keberhasilan SeaWiFS kemudian dilanjutkan oleh sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) yang terpasang pada satelit Terra dan Aqua. Selain mengukur klorofil-a, MODIS mampu menghasilkan informasi mengenai suhu permukaan laut (*Sea Surface Temperature*), kekeruhan, konsentrasi sedimen tersuspensi, serta berbagai parameter bio-optik lainnya. Kombinasi data oseanografi fisik dan biologis dari MODIS memperluas cakupan penelitian ekologi laut, khususnya dalam memahami hubungan antara kondisi lingkungan dan distribusi organisme.

Generasi berikutnya adalah *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) yang memiliki resolusi radiometrik lebih tinggi sehingga mampu menghasilkan citra dengan kualitas yang lebih baik, terutama untuk wilayah pesisir yang kompleks. VIIRS banyak digunakan dalam pemantauan produktivitas

primer, distribusi fitoplankton, ledakan alga berbahaya (*harmful algal blooms*), serta perubahan kualitas perairan.

Program Copernicus Sentinel menghadirkan misi dengan fungsi yang saling melengkapi. Sentinel-2 menyediakan citra optik resolusi spasial tinggi yang banyak dimanfaatkan untuk pemetaan pesisir; Sentinel-3 membawa instrumen ocean color, radiometer suhu, dan altimeter untuk observasi laut; sedangkan Sentinel-1 menggunakan *Synthetic Aperture Radar* (SAR) yang dapat beroperasi pada kondisi berawan dan tanpa cahaya matahari. Pemilihan sensor harus disesuaikan dengan parameter ekologis dan skala analisis yang dituju.

Integrasi berbagai sistem satelit tersebut memungkinkan penelitian ekologi laut dilakukan secara lebih komprehensif dibandingkan hanya mengandalkan survei lapangan. Pengamatan jangka panjang dari satelit juga menghasilkan deret waktu (*time series*) yang sangat penting untuk mendeteksi perubahan lingkungan laut akibat variabilitas iklim maupun aktivitas manusia.

Sistem Informasi Geografis (GIS)

Kemajuan penginderaan jauh berjalan seiring dengan berkembangnya Sistem Informasi Geografis (*Geographic Information System*/GIS) sebagai perangkat utama dalam analisis spasial ekologi laut. GIS memungkinkan berbagai jenis data spasial—seperti citra satelit, batimetri, distribusi spesies, kualitas perairan, penggunaan lahan pesisir, hingga data sosial-ekonomi—diintegrasikan dalam satu sistem analisis yang terpadu.

Dalam ekologi laut, GIS digunakan untuk memvisualisasikan pola distribusi organisme, mengidentifikasi hubungan antara habitat dengan kondisi lingkungan, serta menganalisis perubahan ekosistem dari waktu ke waktu. Kemampuan melakukan analisis spasial memungkinkan ilmuwan mengidentifikasi kawasan dengan produktivitas tinggi, wilayah pemijahan ikan, jalur migrasi spesies, maupun daerah yang rentan terhadap gangguan lingkungan.

Salah satu penerapan GIS yang berkembang sangat pesat adalah pemetaan habitat laut (*marine habitat mapping*). Melalui

kombinasi citra satelit, survei lapangan, data sonar, dan pengukuran oseanografi, berbagai tipe habitat seperti terumbu karang, padang lamun, hutan mangrove, substrat dasar laut, dan ekosistem pesisir lainnya dapat dipetakan dengan tingkat ketelitian yang semakin tinggi. Informasi tersebut menjadi dasar dalam inventarisasi biodiversitas serta evaluasi kondisi habitat secara berkala.

GIS juga menjadi komponen utama dalam *Marine Spatial Planning* (MSP) atau perencanaan tata ruang laut. MSP merupakan pendekatan pengelolaan yang bertujuan mengalokasikan berbagai aktivitas di laut—seperti perikanan, pelayaran, konservasi, energi, dan pariwisata—secara terintegrasi untuk meminimalkan konflik pemanfaatan ruang dan menjaga keberlanjutan ekosistem. Analisis spasial melalui GIS memungkinkan pengambilan keputusan yang didasarkan pada distribusi habitat penting, kawasan biodiversitas tinggi, jalur migrasi organisme, serta kondisi sosial-ekonomi masyarakat pesisir (Ehler & Douvere, 2009).

Dalam bidang konservasi, GIS berperan penting dalam penentuan kawasan konservasi laut (*Marine Protected Areas/MPAs*), evaluasi efektivitas pengelolaan kawasan konservasi, serta identifikasi wilayah prioritas restorasi ekosistem. Pendekatan berbasis spasial memungkinkan strategi konservasi disusun berdasarkan bukti ilmiah yang lebih objektif dan komprehensif.

Big Data Oseanografi

Perkembangan sistem observasi global menghasilkan volume data oseanografi yang meningkat secara eksponensial. Setiap hari, satelit, pelampung Argo, observatorium laut, kapal riset, kendaraan bawah laut, sensor otomatis, serta berbagai platform lainnya menghasilkan jutaan data mengenai kondisi fisik, kimia, biologis, dan biogeokimia laut. Fenomena ini melahirkan era Big Data oseanografi, yaitu pengelolaan dan analisis kumpulan data yang sangat besar, kompleks, dan terus bertambah sehingga tidak lagi dapat diproses menggunakan metode konvensional.

Big Data memungkinkan integrasi berbagai jenis informasi yang sebelumnya terpisah, seperti data oseanografi fisik, biodiversitas, genomika, meteorologi, hingga data sosial-ekonomi. Melalui integrasi tersebut, ilmuwan dapat mengidentifikasi pola-pola ekologis yang tidak dapat dikenali melalui pengamatan berskala kecil. Sebagai contoh, analisis Big Data memungkinkan pemodelan hubungan antara perubahan suhu permukaan laut dengan distribusi ikan pelagis, produktivitas primer, maupun kejadian pemutihan terumbu karang pada tingkat regional hingga global.

Cloud Computing

Pengelolaan Big Data memerlukan kapasitas komputasi yang sangat besar. Oleh karena itu, perkembangan *cloud computing* menjadi salah satu komponen penting dalam era digital ekologi laut. Komputasi awan memungkinkan penyimpanan, pengolahan, dan analisis data dilakukan melalui jaringan internet tanpa bergantung pada kapasitas komputer lokal.

Platform seperti Google Earth Engine, Copernicus Data Space Ecosystem, maupun berbagai pusat data oseanografi internasional memungkinkan peneliti mengakses jutaan citra satelit, data oseanografi, dan hasil pemodelan secara daring. Dengan pendekatan ini, analisis yang sebelumnya memerlukan waktu berhari-hari atau berminggu-minggu dapat diselesaikan dalam hitungan menit hingga jam. Cloud computing juga meningkatkan kolaborasi ilmiah karena data dan algoritma dapat diakses secara bersama oleh peneliti dari berbagai negara.

Earth System Models

Transformasi digital dalam ekologi laut mencapai tahap yang lebih maju melalui berkembangnya *Earth System Models* (ESMs). Model ini merupakan representasi matematis yang mengintegrasikan proses fisik, kimia, biologis, atmosfer, daratan, kriosfer, dan aktivitas manusia ke dalam satu sistem simulasi yang terpadu (Eyring et al., 2016).

Dalam konteks ekologi laut, Earth System Models digunakan untuk memprediksi perubahan suhu laut, sirkulasi

samudra, produktivitas primer, distribusi karbon, perubahan habitat, serta respons organisme terhadap berbagai skenario perubahan iklim. Berbeda dengan model oseanografi tradisional yang hanya memfokuskan pada dinamika fisik laut, ESM menghubungkan proses oseanografi dengan siklus biogeokimia dan dinamika ekosistem sehingga menghasilkan proyeksi yang lebih realistis.

Kemampuan melakukan simulasi jangka panjang menjadikan Earth System Models sebagai salah satu instrumen utama dalam penyusunan kebijakan mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Berbagai laporan ilmiah internasional, termasuk yang disusun oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, memanfaatkan hasil Earth System Models untuk mengevaluasi dampak perubahan iklim terhadap sistem laut global.

Dampak Era Digital terhadap Penelitian Ekologi Laut

Era digital telah mengubah secara fundamental paradigma penelitian ekologi laut. Pengamatan yang sebelumnya bersifat lokal dan episodik berkembang menjadi sistem observasi global yang mampu menghasilkan informasi multidimensi secara kontinu. Integrasi penginderaan jauh, GIS, Big Data, cloud computing, dan Earth System Models memungkinkan ilmuwan tidak hanya mendeskripsikan kondisi ekosistem, tetapi juga memahami pola, proses, dan dinamika perubahan lingkungan pada berbagai skala ruang dan waktu.

Transformasi ini menjadikan ekologi laut sebagai disiplin ilmu yang semakin berbasis data (*data-driven science*), kuantitatif, dan prediktif. Selain meningkatkan pemahaman ilmiah mengenai fungsi ekosistem laut, era digital juga menyediakan landasan yang kuat bagi pengelolaan sumber daya laut berbasis bukti ilmiah (*evidence-based management*), konservasi keanekaragaman hayati, dan perencanaan tata ruang laut yang berkelanjutan. Perkembangan ini selanjutnya membuka jalan bagi revolusi berikutnya, yaitu pemanfaatan biologi molekuler untuk mengungkap biodiversitas laut hingga tingkat genetik dan komunitas mikroorganisme yang sebelumnya tidak dapat diamati melalui metode konvensional.

1.4.3 Revolusi Biologi Molekuler dalam Ekologi Laut

Kemajuan teknologi observasi dan era digital telah menghasilkan informasi yang sangat rinci mengenai kondisi fisik dan kimia lautan. Namun demikian, hingga akhir abad ke-20 masih terdapat keterbatasan mendasar dalam memahami komponen biologis ekosistem laut. Sebagian besar penelitian biodiversitas masih bergantung pada identifikasi morfologi, yaitu pengenalan organisme berdasarkan bentuk tubuh, struktur anatomi, warna, maupun karakteristik eksternal lainnya. Pendekatan tersebut terbukti efektif untuk organisme berukuran besar, tetapi memiliki berbagai keterbatasan ketika diterapkan pada spesies yang berukuran sangat kecil, memiliki morfologi yang mirip (*cryptic species*), berada pada fase larva, atau hidup di habitat yang sulit dijangkau.

Revolusi besar dalam penelitian ekologi laut terjadi ketika perkembangan biologi molekuler mulai diterapkan secara luas sejak dekade 1990-an. Pemanfaatan DNA sebagai penanda biologis memungkinkan identifikasi organisme dilakukan berdasarkan informasi genetik, bukan lagi semata-mata berdasarkan karakter morfologi. Perkembangan ini mengubah secara fundamental cara ilmuwan mempelajari keanekaragaman hayati, hubungan kekerabatan evolusioner, struktur populasi, hingga fungsi komunitas mikroorganisme di laut.

Integrasi biologi molekuler dengan ekologi laut melahirkan pendekatan baru yang dikenal sebagai *molecular marine ecology*, yaitu kajian ekologi yang memanfaatkan informasi genetik untuk memahami struktur, fungsi, dinamika, dan evolusi ekosistem laut. Pendekatan ini membuka peluang untuk mendeteksi spesies langka, mengidentifikasi organisme invasif, menelusuri pola migrasi, hingga mengevaluasi kesehatan ekosistem dengan tingkat ketelitian yang sebelumnya tidak dapat dicapai menggunakan metode konvensional.

DNA Barcoding

Salah satu inovasi paling penting dalam revolusi biologi molekuler adalah DNA barcoding. Teknik ini diperkenalkan pada awal tahun 2000-an sebagai metode identifikasi spesies

menggunakan fragmen pendek DNA yang memiliki variasi tinggi antarspesies tetapi relatif seragam dalam satu spesies (Hebert et al., 2003).

Pada hewan, gen *Cytochrome c Oxidase Subunit* I (COI) yang terdapat pada DNA mitokondria menjadi penanda yang paling banyak digunakan. Untuk kelompok tumbuhan laut, makroalga, maupun fitoplankton, digunakan penanda genetik lain seperti rbcL, matK, 18S rRNA, atau ITS, sesuai karakteristik masing-masing kelompok organisme.

Keunggulan utama DNA barcoding adalah kemampuannya mengidentifikasi spesies secara cepat dan akurat, termasuk spesies yang sulit dibedakan secara morfologis. Dalam ekologi laut, teknik ini banyak digunakan untuk mengidentifikasi ikan, moluska, krustasea, karang, echinodermata, lamun, makroalga, hingga berbagai kelompok plankton.

DNA barcoding juga memberikan kontribusi besar terhadap revisi klasifikasi taksonomi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sejumlah spesies yang sebelumnya dianggap sebagai satu spesies ternyata terdiri atas beberapa spesies berbeda yang memiliki morfologi hampir identik (*cryptic species*). Sebaliknya, beberapa spesies yang semula dipisahkan berdasarkan karakter morfologi ternyata merupakan variasi dari spesies yang sama.

Dalam pengelolaan sumber daya laut, DNA barcoding dimanfaatkan untuk memastikan identitas hasil tangkapan perikanan, mendeteksi perdagangan ilegal spesies yang dilindungi, serta meningkatkan akurasi inventarisasi biodiversitas di kawasan konservasi laut.

Environmental DNA (eDNA)

Perkembangan berikutnya yang merevolusi penelitian biodiversitas laut adalah munculnya konsep Environmental DNA (eDNA). Berbeda dengan DNA barcoding yang memerlukan sampel jaringan organisme, eDNA memanfaatkan fragmen DNA yang dilepaskan organisme ke lingkungan melalui lendir, kulit, sisik, rambut, feses, urin, gamet, maupun jaringan yang mengalami degradasi (Thomsen & Willerslev, 2015).

Fragmen DNA tersebut dapat ditemukan di air laut, sedimen, maupun kolom air, kemudian diisolasi dan dianalisis di laboratorium untuk mengetahui organisme yang pernah atau sedang berada di lokasi tersebut. Dengan demikian, keberadaan suatu spesies dapat dideteksi tanpa harus menangkap atau mengamatinya secara langsung.

Penerapan eDNA memberikan perubahan besar dalam metode survei ekologi laut. Organisme yang berukuran kecil, hidup secara nokturnal, memiliki kepadatan rendah, atau berada di habitat yang sulit dijangkau kini dapat dideteksi hanya melalui analisis sampel air. Teknik ini juga sangat efektif untuk mendeteksi spesies invasif pada tahap awal kolonisasi sehingga tindakan pengendalian dapat dilakukan lebih cepat.

Dalam beberapa tahun terakhir, eDNA telah banyak digunakan untuk memantau keberadaan hiu, pari, mamalia laut, penyu, ikan karang, plankton, hingga spesies endemik yang memiliki nilai konservasi tinggi. Dibandingkan metode survei konvensional, eDNA umumnya lebih efisien, lebih sensitif, dan memerlukan gangguan yang jauh lebih kecil terhadap organisme maupun habitatnya.

DNA Metabarcoding

Perkembangan teknologi *Next Generation Sequencing* (NGS) memungkinkan analisis DNA dilakukan terhadap ribuan hingga jutaan fragmen secara bersamaan. Kemajuan ini melahirkan teknik DNA metabarcoding, yaitu analisis simultan terhadap DNA berbagai organisme yang terdapat dalam satu sampel lingkungan (Deiner et al., 2017).

Melalui DNA metabarcoding, satu sampel air laut dapat mengandung informasi mengenai ratusan bahkan ribuan spesies yang hidup pada lokasi tersebut. Pendekatan ini sangat efektif untuk mengkaji struktur komunitas plankton, mikroorganisme, ikan, maupun komunitas bentik secara menyeluruh.

Dalam ekologi laut, DNA metabarcoding digunakan untuk mengevaluasi perubahan komunitas akibat pencemaran, perubahan iklim, invasi spesies asing, maupun restorasi habitat. Teknik ini juga memungkinkan perbandingan biodiversitas

antarwilayah dilakukan dengan tingkat akurasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan survei morfologi tradisional.

Genomika Laut

Kemajuan teknologi sekuensing DNA kemudian berkembang menuju genomika laut (*marine genomics*), yaitu kajian mengenai keseluruhan materi genetik organisme laut. Berbeda dengan DNA barcoding yang hanya menggunakan sebagian kecil genom, pendekatan genomika menganalisis keseluruhan susunan gen untuk memahami fungsi biologis, adaptasi, serta hubungan evolusioner organisme.

Dalam penelitian ekologi laut, genomika digunakan untuk mengungkap mekanisme adaptasi organisme terhadap berbagai tekanan lingkungan, seperti perubahan suhu, peningkatan salinitas, hipoksia, maupun pengasaman laut. Analisis genom juga membantu mengidentifikasi populasi yang memiliki keragaman genetik tinggi sehingga menjadi prioritas dalam program konservasi.

Selain itu, genomika memberikan informasi mengenai konektivitas populasi melalui analisis aliran gen (*gene flow*), yang sangat penting dalam perencanaan kawasan konservasi laut dan pengelolaan stok sumber daya perikanan.

Metagenomika

Jika genomika mempelajari genom suatu organisme, maka metagenomika mempelajari seluruh materi genetik yang terdapat dalam suatu komunitas organisme secara bersamaan.

Pendekatan ini sangat penting dalam penelitian mikroorganisme laut karena sebagian besar mikroba tidak dapat dikultur menggunakan metode laboratorium konvensional. Melalui metagenomika, ilmuwan dapat mengidentifikasi berbagai kelompok bakteri, Archaea, virus, dan protista beserta fungsi ekologisnya tanpa perlu mengisolasi setiap organisme secara terpisah.

Penelitian metagenomika mengungkap bahwa komunitas mikroba memainkan peran sentral dalam siklus karbon, nitrogen,

sulfur, fosfor, serta berbagai proses biogeokimia yang mengendalikan produktivitas laut. Pengetahuan tersebut mengubah paradigma lama yang menganggap mikroorganisme hanya sebagai komponen pendukung ekosistem. Saat ini mikroba dipandang sebagai penggerak utama berbagai proses ekologis yang menentukan stabilitas ekosistem laut.

Mikrobioma Laut

Perkembangan berikutnya adalah kajian mengenai mikrobioma laut (*marine microbiome*), yaitu keseluruhan komunitas mikroorganisme beserta interaksi dan fungsi ekologisnya dalam suatu organisme atau habitat.

Penelitian menunjukkan bahwa hampir seluruh organisme laut memiliki mikrobioma yang berperan penting dalam mempertahankan kesehatan inangnya. Terumbu karang, misalnya, merupakan suatu holobiont, yaitu sistem biologis yang terdiri atas hewan karang, zooxanthellae, bakteri, Archaea, jamur, dan virus yang hidup secara simbiosis (Rosenberg et al., 2007).

Komposisi mikrobioma dapat berubah akibat peningkatan suhu laut, pencemaran, eutrofikasi, maupun penyakit. Oleh karena itu, perubahan struktur mikrobioma kini digunakan sebagai indikator dini kesehatan ekosistem sebelum muncul kerusakan yang dapat diamati secara visual.

Kajian mikrobioma juga berkembang pada padang lamun, hutan mangrove, sedimen laut, hingga organisme ekonomi penting seperti udang, kerang, dan ikan budidaya. Pemahaman mengenai interaksi mikroorganisme dengan inangnya membuka peluang pengembangan strategi konservasi dan restorasi ekosistem berbasis mikrobioma.

Keterbatasan dan Kendali Mutu Pendekatan Molekuler

Walaupun sangat kuat, metode molekuler tidak bebas dari bias. Pada eDNA, sinyal yang terdeteksi dipengaruhi oleh pelepasan, transport, pengenceran, dan degradasi DNA; sementara tahap ekstraksi, pemilihan primer, amplifikasi, serta kelengkapan basis data referensi dapat memengaruhi organisme

mana yang berhasil terdeteksi. Karena itu, tidak ditemukannya sekuens tidak selalu berarti organisme benar-benar tidak ada, dan jumlah sekuens tidak selalu dapat diterjemahkan langsung menjadi kelimpahan organisme. Desain blanko, replikasi, kontrol positif-negatif, validasi taksonomi, serta integrasi dengan survei konvensional tetap diperlukan untuk menghasilkan inferensi ekologis yang kuat (Thomsen & Willerslev, 2015; Deiner et al., 2017).

Kontribusi Revolusi Biologi Molekuler terhadap Ekologi Laut

Revolusi biologi molekuler telah mengubah secara fundamental paradigma penelitian biodiversitas laut. Inventarisasi spesies yang sebelumnya bergantung pada identifikasi morfologi kini berkembang menjadi analisis berbasis informasi genetik dengan tingkat sensitivitas dan ketelitian yang jauh lebih tinggi. Berbagai teknologi molekuler memungkinkan ilmuwan mendeteksi spesies langka, mengenali spesies kriptik, memetakan struktur populasi, mengungkap hubungan evolusioner, serta memahami fungsi komunitas mikroorganisme dalam menjaga stabilitas ekosistem.

Lebih jauh lagi, integrasi biologi molekuler dengan penginderaan jauh, sistem observasi oseanografi, dan analisis spasial telah memperluas cakupan penelitian ekologi laut dari tingkat individu hingga ekosistem. Informasi genetik kini tidak hanya digunakan untuk identifikasi spesies, tetapi juga sebagai dasar dalam pemantauan kesehatan ekosistem, evaluasi efektivitas kawasan konservasi, pengelolaan sumber daya perikanan, serta prediksi respons biodiversitas terhadap perubahan lingkungan global.

Perkembangan ini menjadi salah satu fondasi utama lahirnya ekologi laut presisi (*precision marine ecology*), yaitu pendekatan yang mengintegrasikan data molekuler, observasi lapangan, dan teknologi digital untuk menghasilkan pemahaman yang lebih akurat mengenai dinamika ekosistem laut. Revolusi biologi molekuler juga menjadi landasan bagi perkembangan tahap berikutnya, yaitu pemanfaatan kecerdasan buatan

(*Artificial Intelligence*) dalam mengolah data ekologi laut berskala besar dan membangun sistem prediksi perubahan ekosistem secara otomatis.

1.4.4 *Artificial Intelligence* dalam Ekologi Laut

Perkembangan teknologi observasi, penginderaan jauh, sistem informasi geografis, dan biologi molekuler telah menghasilkan volume data ekologi laut yang meningkat secara eksponensial. Setiap hari, satelit mengirimkan citra permukaan laut, pelampung oseanografi merekam berbagai parameter fisik dan biogeokimia, kendaraan bawah laut menghasilkan rekaman video dasar laut, sementara teknologi sekuensing DNA menghasilkan jutaan informasi genetik dari komunitas organisme laut. Besarnya volume, keragaman, dan kompleksitas data tersebut melampaui kapasitas analisis konvensional yang mengandalkan pengolahan manual maupun metode statistik klasik. Kondisi inilah yang mendorong berkembangnya penerapan *Artificial Intelligence* (AI) dalam penelitian ekologi laut.

Artificial Intelligence merupakan cabang ilmu komputer yang mengembangkan sistem yang mampu meniru kemampuan kognitif manusia, seperti mengenali pola, melakukan klasifikasi, mempelajari hubungan antarvariabel, mengambil keputusan, serta membuat prediksi berdasarkan data. Dalam ekologi laut, AI tidak dimaksudkan untuk menggantikan peran ilmuwan, tetapi menjadi alat analisis yang mampu mengolah data dalam jumlah sangat besar secara cepat, konsisten, dan objektif. Integrasi AI dengan sistem observasi global telah mengubah penelitian ekologi laut dari pendekatan yang bersifat reaktif menjadi pendekatan prediktif yang mampu mengantisipasi perubahan ekosistem sebelum dampaknya terjadi secara luas.

Pemanfaatan AI berkembang seiring dengan meningkatnya kemampuan komputasi, ketersediaan Big Data oseanografi, dan kemajuan algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*). Berbagai metode AI kini diterapkan untuk mengidentifikasi spesies secara otomatis, memprediksi distribusi organisme, memperkirakan stok ikan, mendeteksi pemutihan terumbu karang, hingga membangun simulasi digital

ekosistem laut yang sangat kompleks. Dengan demikian, kecerdasan buatan telah menjadi salah satu pilar utama dalam transformasi ekologi laut menuju era digital.

Machine Learning

Bidang AI yang paling banyak digunakan dalam penelitian ekologi laut adalah *Machine Learning* (ML) atau pembelajaran mesin. Machine Learning merupakan metode komputasi yang memungkinkan komputer mempelajari pola dari data tanpa harus diprogram secara eksplisit untuk setiap kondisi yang mungkin terjadi. Melalui proses pelatihan (*training*), algoritma mampu mengenali hubungan antara variabel lingkungan dengan respons biologis sehingga dapat digunakan untuk membuat prediksi pada kondisi yang belum pernah diamati sebelumnya (Malde et al., 2020).

Dalam ekologi laut, *Machine Learning* digunakan untuk membangun model distribusi spesies (*Species Distribution Models*), memprediksi produktivitas primer, mengidentifikasi habitat potensial, serta memperkirakan perubahan biodiversitas akibat perubahan iklim. Algoritma seperti *Random Forest, Support Vector Machine* (SVM), Gradient Boosting, dan *Artificial Neural Network* (ANN) telah banyak digunakan untuk menghubungkan data suhu permukaan laut, salinitas, batimetri, konsentrasi klorofil-a, arus laut, maupun parameter oseanografi lainnya dengan distribusi berbagai organisme laut.

Keunggulan Machine Learning dibandingkan pendekatan statistik konvensional terletak pada kemampuannya menangani hubungan nonlinier dan interaksi yang kompleks antarvariabel lingkungan. Ekosistem laut merupakan sistem yang sangat dinamis sehingga hubungan antara faktor lingkungan dan respons biologis sering kali tidak dapat dijelaskan melalui model linier sederhana. *Machine Learning* mampu memanfaatkan pola-pola tersebut untuk menghasilkan prediksi yang lebih akurat.

Deep Learning

Perkembangan lebih lanjut dari *Machine Learning* adalah *Deep Learning* (DL), yaitu pendekatan yang menggunakan jaringan saraf tiruan berlapis (*deep neural networks*) untuk

mempelajari pola yang sangat kompleks dari data berukuran besar. Deep Learning sangat efektif dalam menganalisis citra satelit, foto bawah laut, rekaman video, maupun sinyal akustik. Algoritma ini mampu mengenali objek secara otomatis tanpa memerlukan ekstraksi fitur secara manual sebagaimana pada metode analisis citra tradisional. Dengan semakin banyaknya data visual yang dihasilkan oleh ROV, AUV, kamera bawah laut, dan drone, Deep Learning menjadi salah satu teknologi utama dalam penelitian ekologi laut modern (Christin et al., 2019).

Dalam pemetaan habitat, misalnya, Deep Learning dapat membedakan terumbu karang hidup, karang mati, lamun, pasir, makroalga, maupun substrat lainnya berdasarkan karakteristik spektral dan tekstur citra. Kemampuan tersebut secara signifikan meningkatkan efisiensi pemetaan ekosistem dibandingkan interpretasi visual yang memerlukan waktu lama dan bergantung pada pengalaman analis.

Computer Vision

Salah satu penerapan paling berkembang dari Deep Learning adalah *Computer Vision*, yaitu teknologi yang memungkinkan komputer memahami informasi visual dari gambar maupun video. Dalam ekologi laut, Computer Vision digunakan untuk menganalisis jutaan foto dan rekaman video yang diperoleh dari kamera bawah laut, kendaraan otonom, maupun sistem observasi permanen. Sebelumnya, identifikasi organisme dari foto dilakukan secara manual oleh para ahli sehingga memerlukan waktu berbulan-bulan untuk menyelesaikan satu survei. Saat ini, algoritma Computer Vision mampu mengenali berbagai spesies secara otomatis dengan tingkat akurasi yang terus meningkat.

Computer Vision banyak dimanfaatkan dalam pemantauan terumbu karang, sensus ikan karang, identifikasi mamalia laut, pengamatan perilaku organisme, serta pemantauan kawasan konservasi. Teknologi ini juga digunakan untuk menghitung tutupan karang hidup, mengukur ukuran koloni karang, mengidentifikasi penyakit karang, serta mendeteksi perubahan kondisi habitat dari waktu ke waktu.

Selain citra optik, Computer Vision mulai dikombinasikan dengan data sonar dan citra hiperspektral sehingga mampu mengidentifikasi habitat dasar laut pada wilayah yang tidak dapat diamati menggunakan kamera biasa.

Prediksi Stok Ikan

Salah satu aplikasi AI yang memiliki dampak langsung terhadap pengelolaan sumber daya laut adalah prediksi stok ikan. Pengelolaan perikanan modern memerlukan informasi mengenai kelimpahan populasi, distribusi spasial, pola migrasi, serta potensi perubahan stok akibat faktor lingkungan maupun tekanan penangkapan.

Melalui integrasi data satelit, data hasil tangkapan (*catch statistics*), survei akustik, informasi oseanografi, dan model Machine Learning, AI mampu memperkirakan distribusi stok ikan dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan konvensional. Prediksi tersebut membantu menentukan daerah penangkapan ikan yang potensial, memperkirakan musim penangkapan, serta mengevaluasi risiko eksploitasi berlebihan (*overfishing*).

Dalam pendekatan pengelolaan perikanan berbasis ekosistem (*Ecosystem-Based Fisheries Management*), AI juga digunakan untuk mengevaluasi dampak perubahan iklim terhadap distribusi stok ikan, sehingga kebijakan pengelolaan dapat disesuaikan dengan perubahan kondisi lingkungan.

Prediksi Pemutihan Terumbu Karang

Pemutihan terumbu karang (*coral bleaching*) merupakan salah satu dampak paling nyata dari peningkatan suhu laut akibat perubahan iklim. Kejadian pemutihan sering berlangsung dalam waktu singkat namun berdampak besar terhadap keanekaragaman hayati dan produktivitas ekosistem terumbu karang.

Artificial Intelligence kini digunakan untuk membangun sistem prediksi dini (*early warning system*) terhadap kejadian pemutihan karang. Model AI mengintegrasikan data suhu permukaan laut, intensitas radiasi matahari, arus laut, kondisi

atmosfer, serta data historis kejadian bleaching untuk memperkirakan lokasi dan waktu terjadinya pemutihan.

Informasi tersebut sangat penting bagi pengelola kawasan konservasi karena memungkinkan tindakan mitigasi dilakukan sebelum kerusakan ekosistem berkembang lebih luas. Selain itu, AI juga digunakan untuk mengevaluasi tingkat pemulihan terumbu karang setelah gangguan melalui analisis citra bawah laut secara otomatis.

Deteksi Spesies Secara Otomatis

Perkembangan AI juga merevolusi proses identifikasi organisme laut. Jika sebelumnya identifikasi spesies memerlukan keahlian taksonomi yang tinggi, kini algoritma Deep Learning mampu mengenali berbagai organisme secara otomatis berdasarkan foto, video, rekaman suara, maupun sinyal akustik.

Teknologi ini diterapkan pada berbagai kelompok organisme, termasuk ikan karang, hiu, pari, penyu, mamalia laut, plankton, hingga burung laut. Sistem identifikasi otomatis memungkinkan pemantauan biodiversitas dilakukan secara lebih cepat, konsisten, dan berkesinambungan.

Selain meningkatkan efisiensi survei, teknologi ini juga mengurangi potensi kesalahan identifikasi akibat perbedaan pengalaman antarpeneliti. Pada beberapa aplikasi, AI bahkan mampu mengenali individu tertentu berdasarkan pola tubuh, bentuk sirip, atau tekstur kulit, sehingga mendukung penelitian mengenai dinamika populasi dan perilaku satwa laut.

Digital Twin Ocean

Perkembangan paling mutakhir dalam penerapan AI adalah konsep *Digital Twin Ocean*, yaitu representasi digital dari sistem laut yang diperbarui secara terus-menerus menggunakan data observasi nyata. Digital Twin Ocean mengintegrasikan data satelit, sensor oseanografi, Argo Float, kendaraan bawah laut, model oseanografi, data biodiversitas, serta algoritma AI ke dalam satu platform simulasi yang mampu menggambarkan kondisi laut secara dinamis. Sistem ini memungkinkan pengguna melakukan simulasi berbagai skenario, seperti perubahan suhu laut, pencemaran, pembangunan pesisir, eksploitasi sumber

daya, maupun dampak perubahan iklim terhadap ekosistem (European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 2022).

Berbeda dengan model numerik konvensional, Digital Twin Ocean terus diperbarui menggunakan data terbaru sehingga menghasilkan representasi kondisi laut yang mendekati keadaan sebenarnya. Konsep ini dipandang sebagai salah satu inovasi paling menjanjikan dalam penelitian kelautan dan menjadi bagian penting dari berbagai inisiatif internasional, termasuk UN *Decade of Ocean Science for Sustainable Development* (2021–2030) dan program European Digital Twin Ocean.

Keterbatasan, Validasi, dan Interpretabilitas AI

Akurasi model AI bergantung pada kualitas dan keterwakilan data pelatihan. Data yang tidak seimbang antarspesies, perubahan kondisi sensor, perbedaan habitat, atau domain shift antara lokasi pelatihan dan lokasi penerapan dapat menghasilkan prediksi yang tampak akurat tetapi tidak dapat digeneralisasi. Model juga dapat sulit ditafsirkan dan tidak selalu mematuhi mekanisme ekologis yang diketahui. Oleh karena itu, penerapan AI perlu disertai validasi independen, pelaporan ketidakpastian, pemeriksaan bias, serta evaluasi terhadap data baru. Pendekatan hibrida yang menggabungkan model berbasis proses dengan pembelajaran mesin merupakan salah satu arah penting untuk meningkatkan konsistensi ilmiah dan kemampuan prediksi (Christin et al., 2019; Reichstein et al., 2019).

Dampak *Artificial Intelligence* terhadap Perkembangan Ekologi Laut

Artificial Intelligence telah mengubah secara mendasar cara penelitian ekologi laut dilakukan. Analisis yang sebelumnya membutuhkan waktu berbulan-bulan kini dapat diselesaikan dalam hitungan menit hingga jam. AI memungkinkan integrasi jutaan data yang berasal dari berbagai sumber, mulai dari penginderaan jauh, sensor otomatis, observasi lapangan, hingga

teknologi molekuler, sehingga menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai dinamika ekosistem laut.

Lebih dari sekadar mempercepat analisis, AI mendorong perubahan paradigma dari ekologi deskriptif menuju ekologi prediktif. Penelitian tidak lagi hanya menjelaskan kondisi ekosistem saat ini, tetapi juga mampu memproyeksikan perubahan di masa depan berdasarkan berbagai skenario lingkungan dan aktivitas manusia. Kemampuan prediktif tersebut sangat penting dalam mendukung pengelolaan adaptif (*adaptive management*), konservasi berbasis bukti ilmiah (*evidence-based conservation*), serta mitigasi dampak perubahan iklim terhadap ekosistem laut.

Dengan semakin berkembangnya Big Data, komputasi awan, dan sistem observasi global, peran Artificial Intelligence dalam ekologi laut diperkirakan akan terus meningkat. Integrasi AI dengan teknologi penginderaan jauh, genomika, *environmental DNA* (eDNA), serta Digital Twin Ocean menjadi fondasi bagi lahirnya generasi baru penelitian ekologi laut yang lebih presisi, otomatis, dan mampu mendukung pengambilan keputusan secara cepat dalam menghadapi tantangan lingkungan laut pada era Anthropocene.

1.4.5 Ekologi Laut pada Era Anthropocene

Perkembangan teknologi observasi, biologi molekuler, dan kecerdasan buatan telah meningkatkan kemampuan manusia dalam memahami dinamika ekosistem laut secara signifikan. Namun, pada saat yang sama, aktivitas manusia juga telah menjadi faktor utama yang mengubah struktur, fungsi, dan stabilitas ekosistem laut dalam skala global. Memasuki abad ke-21, fokus penelitian ekologi laut tidak lagi hanya diarahkan pada upaya memahami proses-proses alami, tetapi juga pada bagaimana aktivitas antropogenik memengaruhi sistem kelautan serta bagaimana ilmu pengetahuan dapat berkontribusi dalam mitigasi, adaptasi, dan pengelolaan sumber daya laut secara berkelanjutan.

Perubahan tersebut melahirkan paradigma baru dalam ekologi laut yang berkembang seiring dengan konsep Anthropocene, yaitu suatu periode ketika aktivitas manusia

menjadi kekuatan dominan yang memengaruhi sistem Bumi. Dalam era ini, lautan tidak lagi dipandang sebagai sistem alami yang relatif stabil, melainkan sebagai ekosistem yang terus mengalami tekanan akibat perubahan iklim, eksploitasi sumber daya, pencemaran, dan perubahan tata guna wilayah pesisir. Oleh karena itu, penelitian ekologi laut modern semakin berorientasi pada pemahaman interaksi antara proses ekologis dan aktivitas manusia dalam kerangka keberlanjutan (*sustainability*).

Konsep Anthropocene

Istilah Anthropocene dipopulerkan pada awal abad ke-21 untuk menggambarkan periode ketika pengaruh manusia terhadap sistem Bumi menjadi sangat besar (Crutzen, 2002). Secara stratigrafi, pada Maret 2024 *International Union of Geological Sciences* (IUGS) dan *International Commission on Stratigraphy* (ICS) menegaskan bahwa Anthropocene tidak ditetapkan sebagai epoch formal dalam Geological Time Scale. Meskipun demikian, istilah Anthropocene tetap digunakan secara luas sebagai konsep informal dalam ilmu lingkungan untuk membahas perubahan sistem Bumi yang didorong aktivitas manusia (International Union of Geological Sciences & International Commission on Stratigraphy, 2024).

Dalam konteks ekologi laut, Anthropocene ditandai oleh meningkatnya tekanan terhadap ekosistem akibat pertumbuhan populasi manusia, industrialisasi, urbanisasi pesisir, pembangunan infrastruktur, eksploitasi sumber daya laut, serta peningkatan emisi gas rumah kaca. Berbagai perubahan tersebut tidak hanya memengaruhi organisme tertentu, tetapi juga mengubah fungsi ekosistem secara menyeluruh, termasuk produktivitas primer, siklus biogeokimia, struktur jaring makanan, dan distribusi biodiversitas.

Paradigma Anthropocene menempatkan manusia sebagai bagian yang tidak terpisahkan dari ekosistem laut. Dengan demikian, penelitian ekologi laut tidak hanya mempelajari hubungan antarorganisme dan lingkungannya, tetapi juga menganalisis hubungan timbal balik antara sistem sosial dan sistem ekologis (*social-ecological systems*).

Perubahan Iklim

Perubahan iklim (*climate change*) merupakan tantangan terbesar yang dihadapi ekologi laut pada era Anthropocene. Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer menyebabkan bertambahnya energi panas yang diserap oleh sistem Bumi, dan sekitar 90% kelebihan panas tersebut disimpan oleh lautan. Akibatnya, laut menjadi komponen utama yang merespons perubahan iklim global (IPCC, 2023).

Dampak perubahan iklim terhadap ekosistem laut sangat beragam, mulai dari perubahan suhu, pola arus, stratifikasi kolom air, distribusi nutrien, hingga perubahan pola reproduksi dan migrasi berbagai organisme. Banyak spesies mengalami pergeseran distribusi menuju lintang yang lebih tinggi atau perairan yang lebih dalam sebagai respons terhadap meningkatnya suhu laut.

Selain memengaruhi biodiversitas, perubahan iklim juga berdampak pada sektor perikanan, ketahanan pangan, perlindungan pantai, serta berbagai jasa ekosistem yang bergantung pada kesehatan lingkungan laut.

Ocean Warming

Salah satu indikator paling nyata perubahan iklim adalah pemanasan laut (*ocean warming*). Sejak pertengahan abad ke-20, suhu rata-rata permukaan laut terus meningkat akibat penyerapan panas oleh samudra.

Peningkatan suhu memengaruhi hampir seluruh komponen ekosistem laut. Pada tingkat fisiologis, suhu yang lebih tinggi meningkatkan laju metabolisme organisme sehingga kebutuhan energi juga meningkat. Namun apabila suhu melampaui kisaran toleransi, pertumbuhan, reproduksi, dan kelangsungan hidup organisme akan menurun.

Ocean warming juga menyebabkan perubahan distribusi geografis berbagai spesies. Banyak organisme laut tropis mulai bermigrasi ke wilayah subtropis dan temperate, sementara spesies yang hidup di daerah kutub kehilangan habitat akibat mencairnya es laut. Pergeseran distribusi tersebut mengubah struktur komunitas, interaksi trofik, serta produktivitas perikanan di berbagai kawasan dunia.

Ocean Acidification

Selain menyerap panas, lautan juga menyerap sekitar seperempat emisi karbon dioksida (CO_2) yang dilepaskan ke atmosfer setiap tahun. Penyerapan CO_2 menyebabkan terbentuknya asam karbonat yang menurunkan pH air laut, suatu proses yang dikenal sebagai *ocean acidification* (Doney et al., 2009; IPCC, 2023).

Penurunan pH mengurangi ketersediaan ion karbonat yang dibutuhkan organisme laut untuk membentuk cangkang dan rangka berbahan kalsium karbonat. Organisme yang sangat rentan terhadap pengasaman laut antara lain karang batu, moluska, echinodermata, foraminifera, serta berbagai kelompok plankton berkalsium.

Kerusakan pada organisme pembentuk habitat seperti terumbu karang memiliki dampak yang jauh lebih luas karena ekosistem tersebut menjadi tempat hidup bagi ribuan spesies lainnya. Oleh sebab itu, ocean acidification dipandang sebagai salah satu ancaman paling serius terhadap keanekaragaman hayati laut pada abad ke-21.

Marine Heatwaves

Fenomena lain yang semakin sering terjadi adalah *marine heatwaves*, yaitu periode ketika suhu permukaan laut meningkat jauh di atas kondisi normal selama beberapa hari hingga beberapa bulan. Gelombang panas laut dapat menyebabkan pemutihan terumbu karang secara masif, kematian lamun, perubahan komposisi plankton, hingga meningkatnya kejadian penyakit pada berbagai organisme laut. Dampaknya sering kali bersifat regional, tetapi dapat memengaruhi fungsi ekosistem dalam jangka waktu yang panjang.

Dalam beberapa dekade terakhir, frekuensi, durasi, dan intensitas marine heatwaves meningkat secara signifikan. Oleh karena itu, fenomena ini menjadi salah satu fokus utama penelitian ekologi laut modern, terutama dalam pengembangan sistem peringatan dini berbasis penginderaan jauh dan kecerdasan buatan.

Deoxygenation

Perubahan iklim juga menyebabkan menurunnya kadar oksigen terlarut di lautan atau *deoxygenation*. Penurunan ini terjadi karena air laut yang lebih hangat memiliki kemampuan lebih rendah dalam melarutkan oksigen, sementara stratifikasi kolom air menghambat pencampuran massa air kaya oksigen dari permukaan menuju laut dalam. *Deoxygenation* memperluas zona miskin oksigen (*oxygen minimum zones*) yang membatasi habitat berbagai organisme laut. Kondisi ini memengaruhi pertumbuhan ikan, invertebrata, dan organisme bentik serta mengubah struktur komunitas dan jaring makanan laut.

Apabila berlangsung secara terus-menerus, deoxygenation dapat menyebabkan penurunan produktivitas perikanan dan meningkatkan kerentanan ekosistem terhadap gangguan lingkungan lainnya.

Pencemaran Plastik Laut

Selain perubahan iklim, pencemaran plastik laut merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang berkembang sangat cepat pada era Anthropocene. Diperkirakan jutaan ton sampah plastik memasuki laut setiap tahun melalui sungai, kawasan pesisir, aktivitas pelayaran, dan perikanan (Jambeck et al., 2015).

Plastik berukuran besar dapat menyebabkan organisme terjerat atau tertelan, sedangkan mikroplastik telah ditemukan pada plankton, ikan, moluska, mamalia laut, bahkan sedimen laut dalam. Kehadiran mikroplastik menimbulkan kekhawatiran karena dapat berpindah melalui jaring makanan dan berpotensi memengaruhi kesehatan organisme maupun manusia.

Penelitian ekologi laut saat ini tidak hanya mempelajari distribusi plastik, tetapi juga interaksinya dengan organisme, mikroorganisme, polutan kimia, serta proses biogeokimia di lingkungan laut.

Overfishing

Eksploitasi sumber daya laut yang berlebihan (*overfishing*) merupakan tekanan antropogenik lain yang telah mengubah struktur ekosistem laut di berbagai wilayah dunia. Penangkapan ikan yang melampaui kemampuan stok untuk pulih

menyebabkan penurunan biomassa, hilangnya spesies predator puncak, dan terganggunya keseimbangan jaring makanan (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024).

Dalam perspektif ekologi, overfishing tidak hanya mengurangi jumlah ikan target, tetapi juga memicu perubahan struktur komunitas, meningkatnya dominasi spesies oportunistik, serta menurunnya ketahanan ekosistem terhadap gangguan lingkungan.

Oleh karena itu, pengelolaan perikanan modern semakin mengadopsi pendekatan *Ecosystem-Based Fisheries Management* (EBFM) yang mempertimbangkan interaksi ekologis, kondisi habitat, serta dinamika lingkungan secara menyeluruh.

Blue Carbon

Di tengah meningkatnya ancaman perubahan iklim, berkembang konsep Blue Carbon, yaitu karbon yang diserap dan disimpan oleh ekosistem pesisir seperti hutan mangrove, padang lamun, dan rawa pasang surut. Ekosistem tersebut memiliki kemampuan menyerap karbon dalam jumlah besar sekaligus menyediakan berbagai jasa ekosistem lainnya, seperti perlindungan pantai, habitat biota, penyaringan polutan, dan penunjang produktivitas perikanan (McLeod et al., 2011; Duarte et al., 2013).

Konsep Blue Carbon memperluas peran ekologi laut dari ilmu yang mempelajari interaksi organisme menjadi ilmu yang juga berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim melalui konservasi dan restorasi ekosistem pesisir.

Nature-based Solutions

Sebagai respons terhadap meningkatnya tekanan terhadap lingkungan laut, berkembang pendekatan *Nature-based Solutions* (NbS), yaitu pemanfaatan proses-proses alami untuk mengatasi berbagai tantangan lingkungan dan sosial (Seddon et al., 2020).

Dalam ekosistem laut, Nature-based Solutions diwujudkan melalui restorasi mangrove, rehabilitasi terumbu karang, pemulihan padang lamun, perlindungan lahan basah pesisir, serta konservasi habitat alami yang mampu

meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap perubahan iklim sekaligus mempertahankan fungsi ekologis ekosistem.

Pendekatan ini menempatkan ekosistem sebagai bagian dari solusi, bukan hanya sebagai objek yang harus dilindungi.

UN *Decade of Ocean Science for Sustainable Development* (2021–2030)

Pengakuan terhadap pentingnya ilmu pengetahuan dalam mendukung keberlanjutan laut diwujudkan melalui UN *Decade of Ocean Science for Sustainable Development* (2021–2030) yang dicanangkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNESCO-IOC, 2021).

Inisiatif ini bertujuan memperkuat kolaborasi internasional dalam menghasilkan ilmu pengetahuan yang mampu mendukung pengelolaan laut secara berkelanjutan. Program ini mendorong integrasi observasi laut, teknologi digital, kecerdasan buatan, biologi molekuler, ilmu sosial, serta kebijakan publik untuk menghasilkan "*the science we need for the ocean we want*."

Bagi perkembangan ekologi laut, Ocean Decade menjadi momentum penting untuk memperkuat penelitian multidisiplin, memperluas akses terhadap data oseanografi global, meningkatkan kapasitas negara berkembang, serta mempercepat penerapan hasil penelitian dalam kebijakan konservasi dan pengelolaan sumber daya laut.

Era Anthropocene menandai perubahan mendasar dalam orientasi ilmu ekologi laut. Fokus penelitian tidak lagi terbatas pada upaya menjelaskan proses-proses ekologis, tetapi berkembang menuju pemahaman mengenai interaksi kompleks antara perubahan lingkungan global, aktivitas manusia, dan respons ekosistem laut. Pendekatan ini menempatkan ilmu ekologi laut sebagai fondasi ilmiah bagi konservasi keanekaragaman hayati, pengelolaan sumber daya laut berbasis ekosistem, mitigasi perubahan iklim, dan pembangunan ekonomi biru yang berkelanjutan.

Ekologi laut modern telah berkembang dari ilmu yang bersifat observasional menjadi ilmu yang tidak hanya menjelaskan dan memprediksi perubahan ekosistem, tetapi juga

menyediakan dasar ilmiah untuk merancang solusi terhadap berbagai tantangan lingkungan pada abad ke-21. Transformasi ini menjadi pijakan menuju arah masa depan ekologi laut yang semakin mengintegrasikan observasi global, kecerdasan buatan, sistem digital, dan pendekatan *One Ocean* dalam mendukung keberlanjutan samudra dunia.

1.4.6 Arah Masa Depan Ekologi Laut

Perkembangan ekologi laut pada dekade mendatang akan ditentukan oleh kemampuan mengintegrasikan observasi, eksperimen, model, dan data biologis dalam satu kerangka yang dapat diuji serta digunakan untuk pengambilan keputusan. Tantangan utamanya bukan hanya menghasilkan lebih banyak data, tetapi memastikan data dapat dibandingkan lintas waktu dan wilayah, memiliki metadata yang baik, serta dapat digunakan kembali untuk menguji hipotesis ekologis dan mengevaluasi kebijakan.

Observasi Laut Terintegrasi dan Data Terbuka

Sistem observasi masa depan akan semakin menggabungkan satelit, Argo dan BGC-Argo, mooring, glider, AUV, survei kapal, sensor pesisir, akustik, serta observasi biodiversitas. Integrasi tersebut perlu mengikuti prinsip data yang dapat ditemukan, diakses, dioperasikan lintas sistem, dan digunakan kembali. Kerangka Ocean Decade menempatkan observasi berkelanjutan, pertukaran data, penguatan kapasitas, dan co-design ilmu pengetahuan dengan pengguna sebagai unsur penting bagi pengelolaan laut berkelanjutan (UNESCO-IOC, 2021).

Integrasi Model Proses, Kecerdasan Buatan, dan Digital Twin Ocean

Model ekosistem dan Earth System Models akan tetap penting untuk menjelaskan mekanisme, sedangkan AI memberikan kemampuan mengekstrak pola dari data berukuran besar. Arah yang semakin penting adalah hybrid modelling, yaitu menggabungkan pengetahuan proses fisik-biogeokimia dengan pembelajaran mesin agar prediksi tidak hanya akurat tetapi juga konsisten dengan mekanisme sistem Bumi (Eyring et al., 2016;

Reichstein et al., 2019). Konsep Digital Twin Ocean memperluas integrasi tersebut ke dalam lingkungan digital interaktif yang menggabungkan data, model, dan perangkat analisis untuk mengevaluasi kondisi serta skenario pengelolaan (European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 2022).

Biodiversitas Molekuler dan Pemantauan Multimetode

eDNA, metabarcoding, genomika, dan metagenomika akan memperluas kemampuan mendeteksi biodiversitas, terutama organisme yang jarang, kecil, kriptik, atau sulit diamati. Namun, pendekatan molekuler paling kuat ketika digunakan bersama survei visual, akustik, pengukuran lingkungan, dan informasi taksonomi. Integrasi multimetode memungkinkan perubahan biodiversitas dikaitkan dengan mekanisme lingkungan dan mengurangi risiko kesimpulan yang hanya bergantung pada satu sumber data (Deiner et al., 2017).

Ekologi Prediktif untuk Adaptasi dan Pengelolaan

Perubahan iklim meningkatkan kebutuhan terhadap ekologi yang mampu mengidentifikasi risiko, ambang perubahan, refugia iklim, serta prioritas konservasi dan restorasi. Karena proyeksi selalu mengandung ketidakpastian, keluaran model perlu dikomunikasikan sebagai rentang kemungkinan dan diuji melalui pemantauan adaptif. Pendekatan ini menempatkan ekologi laut sebagai ilmu yang menghubungkan pemahaman proses dengan keputusan pengelolaan, bukan sekadar menghasilkan prediksi numerik.

Kolaborasi, Kapasitas, dan Relevansi bagi Indonesia

Bagi Indonesia, masa depan ekologi laut memerlukan penguatan observasi jangka panjang pada wilayah pesisir dan laut kepulauan, peningkatan interoperabilitas basis data, pengembangan kemampuan bioinformatika dan pemodelan, serta kolaborasi antara perguruan tinggi, lembaga pemerintah, masyarakat pesisir, dan jejaring internasional. Posisi Indonesia di pusat keanekaragaman hayati laut dunia menjadikan pengembangan kapasitas tersebut strategis untuk konservasi,

perikanan berkelanjutan, adaptasi perubahan iklim, dan tata kelola ruang laut berbasis bukti ilmiah.

Dengan demikian, masa depan ekologi laut bergerak menuju ilmu yang lebih terintegrasi, transparan, dapat direproduksi, dan berorientasi pada penyelesaian masalah. Teknologi akan memperluas kemampuan observasi dan prediksi, tetapi kualitas inferensi tetap ditentukan oleh desain penelitian, validasi, keterbukaan data, pemahaman proses, dan kemampuan menghubungkan pengetahuan ilmiah dengan kebutuhan pengelolaan laut.

D. RANGKUMAN

Bab ini membahas konsep dasar, ruang lingkup, serta perkembangan historis ilmu ekologi laut sebagai landasan untuk memahami berbagai proses ekologis yang berlangsung di lingkungan laut. Ekologi laut merupakan cabang ilmu ekologi yang mempelajari hubungan timbal balik antara organisme laut dengan lingkungan fisik, kimia, dan biologinya. Sebagai disiplin yang bersifat multidisiplin, ekologi laut mengintegrasikan konsep-konsep dari biologi, oseanografi, geologi, klimatologi, kimia laut, matematika, dan ilmu komputer untuk menjelaskan struktur, fungsi, dinamika, serta perubahan ekosistem laut pada berbagai skala ruang dan waktu.

Perkembangan ilmu ekologi laut berlangsung melalui proses yang panjang. Pada periode awal sebelum abad ke-19, pengetahuan tentang laut berkembang melalui pengalaman empiris masyarakat pesisir, pelaut, dan naturalis seperti Aristoteles dan Pliny the Elder yang mendokumentasikan berbagai organisme laut dalam tradisi *natural history*. Penelitian pada masa ini masih bersifat deskriptif dan berfokus pada identifikasi spesies serta pengamatan fenomena alam tanpa menjelaskan mekanisme ekologis yang mendasarinya.

Memasuki abad ke-19, berbagai ekspedisi oseanografi, terutama *HMS Challenger Expedition*, membuka era baru penelitian kelautan melalui pengumpulan data oseanografi dan biologi laut secara sistematis. Ekspedisi ini membuktikan bahwa

kehidupan terdapat hingga laut dalam serta menghasilkan dasar ilmiah bagi berkembangnya oseanografi modern dan ekologi laut.

Perkembangan terbesar terjadi pada abad ke-20 ketika konsep ekosistem diperkenalkan oleh Arthur G. Tansley dan kemudian dikembangkan oleh Raymond Lindeman serta Eugene P. Odum. Pada periode ini, penelitian bergeser dari sekadar mendeskripsikan organisme menuju pemahaman mengenai aliran energi, siklus materi, struktur trofik, produktivitas primer, dan fungsi ekosistem. Bersamaan dengan itu, kemajuan oseanografi fisik menghasilkan pemahaman mengenai peran arus laut, upwelling, ENSO, dan dinamika massa air dalam mengendalikan distribusi organisme serta produktivitas laut. Konsep-konsep seperti *marine food web*, *microbial loop*, dan *biological pump* semakin memperjelas hubungan antara proses biologis dan proses oseanografi dalam mengatur fungsi ekosistem laut.

Perkembangan teknologi setelah pertengahan abad ke-20 membawa perubahan mendasar dalam metode penelitian ekologi laut. Penemuan SCUBA memungkinkan observasi langsung di bawah air, sedangkan kapal riset modern, *Remotely Operated Vehicle* (ROV), *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV), Argo Float, Biogeochemical Argo, serta berbagai sensor oseanografi otomatis memperluas kemampuan ilmuwan untuk memantau kondisi laut dari perairan dangkal hingga laut dalam secara kontinu. Revolusi teknologi ini menjadikan penelitian ekologi laut semakin akurat, efisien, dan mampu menjangkau wilayah yang sebelumnya sulit dipelajari.

Era digital kemudian mempercepat transformasi tersebut melalui pemanfaatan penginderaan jauh satelit, Sistem Informasi Geografis (GIS), Big Data oseanografi, komputasi awan (*cloud computing*), dan *Earth System Models*. Teknologi-teknologi tersebut memungkinkan pengamatan kondisi laut pada skala lokal hingga global, integrasi berbagai sumber data, serta pengembangan model prediktif untuk memahami dinamika ekosistem laut dalam jangka panjang. Penelitian ekologi laut tidak lagi hanya bergantung pada survei lapangan, tetapi didukung oleh sistem observasi global yang menghasilkan data secara berkesinambungan.

Transformasi berikutnya terjadi melalui revolusi biologi molekuler. Penerapan DNA barcoding, *environmental DNA* (eDNA), DNA metabarcoding, genomika, metagenomika, dan kajian mikrobioma laut telah meningkatkan kemampuan ilmuwan dalam mengidentifikasi spesies, mengungkap struktur komunitas, memahami fungsi mikroorganisme, serta mengevaluasi kesehatan ekosistem dengan tingkat ketelitian yang jauh lebih tinggi dibandingkan pendekatan morfologi konvensional.

Perkembangan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) semakin memperluas kapasitas analisis ekologi laut. Teknologi seperti *Machine Learning*, *Deep Learning*, dan *Computer Vision* memungkinkan identifikasi spesies secara otomatis, prediksi stok ikan, deteksi pemutihan terumbu karang, analisis habitat, hingga pembangunan *Digital Twin Ocean*. Integrasi AI dengan sistem observasi global dan Big Data telah mengubah ekologi laut dari ilmu yang terutama bersifat deskriptif menjadi ilmu yang mampu menjelaskan sekaligus memprediksi perubahan ekosistem.

Bab ini juga menjelaskan bahwa perkembangan ilmu ekologi laut berlangsung bersamaan dengan meningkatnya tekanan antropogenik terhadap lingkungan laut. Pada era Anthropocene, perubahan iklim, pemanasan laut (*ocean warming*), pengasaman laut (*ocean acidification*), gelombang panas laut (*marine heatwaves*), deoksigenasi, pencemaran plastik, dan eksploitasi sumber daya yang berlebihan menjadi tantangan utama yang memengaruhi struktur dan fungsi ekosistem laut. Sebagai respons terhadap berbagai tantangan tersebut, berkembang konsep Blue Carbon, *Nature-based Solutions*, serta berbagai inisiatif global seperti *UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021–2030)* yang menempatkan ilmu pengetahuan sebagai dasar pengelolaan laut secara berkelanjutan.

Perkembangan ekologi laut menunjukkan adanya perubahan paradigma yang sangat signifikan. Ilmu yang pada awalnya berorientasi pada pengamatan deskriptif terhadap organisme laut kini telah berkembang menjadi disiplin ilmu yang bersifat multidisiplin, berbasis teknologi, kuantitatif, integratif,

dan prediktif. Integrasi antara oseanografi, biologi molekuler, penginderaan jauh, sistem informasi geografis, Big Data, kecerdasan buatan, dan pemodelan sistem bumi memungkinkan ilmuwan memahami dinamika ekosistem laut secara lebih komprehensif serta mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti ilmiah dalam konservasi, pengelolaan sumber daya laut, dan pembangunan berkelanjutan.

Beberapa poin esensial dari materi yang telah dibahas pada bab ini dapat dituliskan sebagai berikut:

1. Ekologi laut mempelajari hubungan timbal balik antara organisme laut dengan lingkungan fisik, kimia, dan biologinya dalam suatu sistem ekologi yang saling terhubung.
2. Perkembangan ekologi laut berawal dari pengamatan empiris masyarakat pesisir dan tradisi *natural history* sebelum berkembang menjadi disiplin ilmiah modern.
3. Ekspedisi oseanografi pada abad ke-19 menjadi tonggak penting lahirnya oseanografi modern dan memperluas pemahaman tentang kehidupan di laut.
4. Konsep ekosistem, aliran energi, siklus materi, dan interaksi trofik pada abad ke-20 mengubah ekologi laut dari ilmu deskriptif menjadi ilmu yang menjelaskan proses ekologis.
5. Revolusi teknologi kelautan memungkinkan observasi laut secara langsung, otomatis, dan berkesinambungan dari perairan pesisir hingga laut dalam.
6. Era digital menghadirkan penginderaan jauh, GIS, Big Data, komputasi awan, dan *Earth System Models* yang memperluas analisis ekologi laut pada skala regional hingga global.
7. Revolusi biologi molekuler memungkinkan identifikasi biodiversitas dan analisis fungsi ekosistem menggunakan informasi genetik melalui DNA barcoding, eDNA, genomika, dan metagenomika.
8. Artificial Intelligence meningkatkan kemampuan analisis, pemodelan, dan prediksi perubahan ekosistem laut melalui Machine Learning, Deep Learning, dan Digital Twin Ocean.
9. Era Anthropocene ditandai oleh meningkatnya tekanan aktivitas manusia terhadap ekosistem laut, termasuk

perubahan iklim, pengasaman laut, pencemaran plastik, dan eksploitasi sumber daya yang berlebihan.

10. Masa depan ekologi laut mengarah pada pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan observasi global, teknologi digital, biologi molekuler, kecerdasan buatan, dan pengelolaan berbasis ekosistem untuk mendukung konservasi serta pemanfaatan sumber daya laut secara berkelanjutan.

E. EVALUASI / SOAL LATIHAN

Evaluasi pada bab ini bertujuan untuk mengukur pemahaman mahasiswa mengenai konsep dasar ekologi laut, sejarah perkembangannya, transformasi teknologi dalam penelitian ekologi laut, serta berbagai tantangan yang dihadapi ekosistem laut pada era Anthropocene.

A. Soal Pilihan Ganda

1. Ekologi laut merupakan cabang ilmu yang mempelajari....
   A. Struktur geologi dasar laut
   B. Hubungan antara organisme laut dengan lingkungan fisik, kimia, dan biologinya
   C. Teknik eksploitasi sumber daya laut
   D. Proses pembentukan samudra
2. Tokoh yang pertama kali memperkenalkan konsep ekosistem (*ecosystem*) adalah....
   A. Charles Darwin
   B. Eugene P. Odum
   C. Arthur G. Tansley
   D. Raymond Lindeman
3. Ekspedisi yang menjadi tonggak perkembangan oseanografi modern adalah....
   A. Beagle Expedition
   B. Challenger Expedition
   C. Discovery Expedition
   D. Fram Expedition
4. Salah satu kontribusi utama Raymond Lindeman dalam perkembangan ekologi adalah....
   A. Penemuan DNA
   B. Konsep aliran energi antar tingkat trofik
   C. Penemuan arus termohalin
   D. Teori seleksi alam
5. Teknologi yang memungkinkan penyelam melakukan observasi ilmiah secara langsung di bawah air adalah....
   A. SONAR
   B. LIDAR
   C. SCUBA
   D. GPS

6. Sensor satelit yang dirancang khusus untuk mengamati warna laut (*ocean color*) sehingga dapat mengestimasi konsentrasi klorofil-a adalah....
   A. Sentinel-1
   B. SeaWiFS
   C. Landsat
   D. ASTER
7. Teknologi yang memungkinkan identifikasi spesies hanya melalui sampel air laut tanpa menangkap organismenya disebut....
   A. DNA Barcoding
   B. Metagenomika
   C. Environmental DNA (eDNA)
   D. PCR Konvensional
8. Salah satu keunggulan utama Artificial Intelligence dalam ekologi laut adalah....
   A. Menggantikan seluruh pekerjaan lapangan
   B. Mengurangi kebutuhan pengamatan satelit
   C. Mengolah Big Data untuk membangun model prediksi ekosistem
   D. Menghilangkan kebutuhan analisis statistik
9. Ocean acidification terutama disebabkan oleh....
   A. Peningkatan salinitas laut
   B. Penyerapan karbon dioksida oleh laut
   C. Aktivitas vulkanik dasar laut
   D. Penurunan curah hujan
10. Konsep Blue Carbon berkaitan dengan....
   A. Produksi energi dari gelombang laut
   B. Penyimpanan karbon oleh ekosistem pesisir seperti mangrove dan lamun
   C. Budidaya rumput laut
   D. Konservasi mamalia laut

B. Soal Uraian

1. Jelaskan pengertian ekologi laut serta ruang lingkup kajiannya. Mengapa ekologi laut bersifat multidisiplin?
2. Uraikan perkembangan ilmu ekologi laut mulai dari periode *natural history* hingga berkembang menjadi ilmu yang bersifat prediktif pada era digital.
3. Jelaskan hubungan antara oseanografi dan ekologi laut dalam menjelaskan distribusi organisme di laut.
4. Bandingkan karakteristik penelitian ekologi laut sebelum dan sesudah berkembangnya teknologi penginderaan jauh dan sistem observasi otomatis.
5. Jelaskan perbedaan antara DNA Barcoding, Environmental DNA (eDNA), dan Metabarcoding beserta contoh penerapannya dalam penelitian ekologi laut.
6. Mengapa Artificial Intelligence dipandang sebagai salah satu teknologi yang akan membentuk masa depan penelitian ekologi laut?
7. Jelaskan pengaruh perubahan iklim terhadap struktur dan fungsi ekosistem laut.

C. Studi Kasus

Sebuah kawasan terumbu karang mengalami penurunan tutupan karang hidup dari 68% menjadi 32% dalam waktu sepuluh tahun. Hasil pengamatan menunjukkan peningkatan suhu permukaan laut, meningkatnya jumlah wisatawan, bertambahnya sampah plastik, dan penurunan populasi ikan herbivora.

Berdasarkan kasus tersebut, jawablah pertanyaan berikut.

a. Identifikasi faktor-faktor penyebab degradasi ekosistem tersebut.
b. Jelaskan keterkaitan antara faktor fisik, biologis, dan aktivitas manusia terhadap perubahan ekosistem.
c. Teknologi modern apa saja yang dapat digunakan untuk memantau kondisi kawasan tersebut? Jelaskan alasan pemilihannya.
d. Rancang rekomendasi pengelolaan berbasis ekosistem untuk memulihkan kondisi kawasan tersebut.

F. KUNCI JAWABAN DAN PEMBAHASAN

A. Kunci Jawaban Pilihan Ganda

1. Kunci Jawaban: **B**

Pembahasan: Ekologi laut mempelajari interaksi antara organisme laut dengan lingkungan fisik, kimia, dan biologinya. Kajiannya mencakup individu, populasi, komunitas, ekosistem, hingga biosfer laut.

2. Kunci Jawaban: **C**

Pembahasan: Arthur G. Tansley memperkenalkan istilah *ecosystem* pada tahun 1935. Konsep ini menjadi dasar berkembangnya ekologi modern karena memandang organisme dan lingkungannya sebagai satu kesatuan sistem.

3. Kunci Jawaban: **B**

Pembahasan: *HMS Challenger Expedition* (1872–1876) merupakan ekspedisi oseanografi pertama yang dilakukan secara sistematis dan menjadi tonggak lahirnya oseanografi modern.

4. Kunci Jawaban: **B**

Pembahasan: Raymond Lindeman mengembangkan konsep aliran energi melalui tingkat trofik yang menjelaskan bagaimana energi berpindah dari produsen menuju konsumen dan akhirnya mengalami kehilangan pada setiap tingkat trofik.

5. Kunci Jawaban: **C**

Pembahasan: SCUBA (*Self-Contained Underwater Breathing Apparatus*) memungkinkan penyelam melakukan observasi langsung terhadap organisme dan habitat bawah laut tanpa bergantung pada suplai udara dari permukaan.

6. Kunci Jawaban: **B**

Pembahasan: SeaWiFS merupakan sensor satelit yang dirancang khusus untuk mengamati warna laut sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi konsentrasi klorofil-a dan produktivitas primer fitoplankton.

7. Kunci Jawaban: **C**

Pembahasan: Environmental DNA (eDNA) memanfaatkan fragmen DNA yang terdapat di lingkungan, seperti air laut atau sedimen, untuk mendeteksi keberadaan organisme tanpa harus menangkapnya secara langsung.

8. Kunci Jawaban: **C**
Pembahasan: Artificial Intelligence mampu mengolah Big Data oseanografi, mengenali pola yang kompleks, serta membangun model prediksi distribusi organisme, perubahan habitat, dan dinamika ekosistem laut.
9. Kunci Jawaban: **B**
Pembahasan: Ocean acidification terjadi akibat meningkatnya penyerapan karbon dioksida (CO_2) oleh laut. CO_2 bereaksi dengan air membentuk asam karbonat yang menyebabkan penurunan pH air laut.

10. Kunci Jawaban: **B**
Pembahasan: Blue Carbon merupakan karbon yang diserap dan disimpan oleh ekosistem pesisir seperti mangrove, padang lamun, dan rawa pasang surut. Ekosistem tersebut berperan penting dalam mitigasi perubahan iklim.

B. Pedoman Jawaban Soal Uraian

Soal 1

Mahasiswa diharapkan menjelaskan definisi ekologi laut, ruang lingkup kajian mulai dari individu hingga ekosistem, serta menjelaskan bahwa ekologi laut mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu seperti biologi, oseanografi, kimia laut, klimatologi, geologi, dan teknologi informasi.

Soal 2

Jawaban yang baik memuat tahapan perkembangan berikut:

- Periode *natural history*.
- Ekspedisi Challenger.
- Konsep ekosistem.
- Aliran energi dan struktur trofik.
- Revolusi teknologi kelautan.
- Era digital.
- Revolusi biologi molekuler.
- Artificial Intelligence.
- Era Anthropocene.

Jawaban yang menunjukkan hubungan antartahap perkembangan memperoleh nilai lebih tinggi dibandingkan jawaban yang hanya berupa daftar kronologis.

Soal 3

Mahasiswa harus menjelaskan bahwa parameter oseanografi seperti suhu, salinitas, arus, nutrien, cahaya, dan gelombang memengaruhi distribusi organisme laut sehingga oseanografi menjadi dasar dalam memahami pola ekologi laut.

Soal 4

Jawaban diharapkan membandingkan penelitian konvensional yang bergantung pada survei lapangan dengan penelitian modern yang menggunakan satelit, GIS, sensor otomatis, Argo Float, ROV, AUV, serta Big Data sehingga mampu menghasilkan observasi berskala global secara berkesinambungan.

Soal 5

Mahasiswa harus mampu membedakan ketiga teknik tersebut.

- DNA Barcoding digunakan untuk mengidentifikasi satu spesies menggunakan fragmen DNA tertentu.
- eDNA mendeteksi keberadaan organisme melalui DNA yang terdapat di lingkungan.
- Metabarcoding mengidentifikasi banyak spesies sekaligus dari satu sampel menggunakan teknologi sekuensing berkapasitas tinggi.

Soal 6

Jawaban yang baik menjelaskan bahwa AI digunakan dalam Machine Learning, Deep Learning, Computer Vision, prediksi stok ikan, identifikasi spesies otomatis, pemetaan habitat, sistem peringatan dini pemutihan karang, serta Digital Twin Ocean untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data.

Soal 7

Jawaban diharapkan menjelaskan dampak perubahan iklim berupa peningkatan suhu laut, pengasaman laut, deoksigenasi, marine heatwaves, perubahan distribusi spesies, penurunan biodiversitas, serta implikasinya terhadap jasa ekosistem dan pengelolaan sumber daya laut.

C. Pembahasan Studi Kasus

a. Faktor penyebab degradasi

Faktor penyebab meliputi peningkatan suhu laut yang memicu pemutihan karang, tekanan wisata yang berlebihan, pencemaran plastik, serta penurunan ikan herbivora yang menyebabkan pertumbuhan makroalga tidak terkendali.

b. Hubungan faktor fisik, biologis, dan aktivitas manusia

Peningkatan suhu merupakan faktor fisik yang melemahkan kondisi fisiologis karang. Berkurangnya ikan herbivora mengubah keseimbangan biologis sehingga alga mendominasi ruang hidup karang. Aktivitas manusia melalui pencemaran dan wisata yang tidak terkendali mempercepat kerusakan habitat. Ketiga faktor tersebut saling berinteraksi dan menyebabkan penurunan fungsi ekosistem.

c. Teknologi yang dapat digunakan

Mahasiswa dapat mengusulkan beberapa teknologi berikut beserta alasannya.

- Penginderaan jauh satelit untuk memantau suhu permukaan laut dan kondisi habitat.
- Drone untuk pemetaan wilayah pesisir.
- GIS untuk analisis spasial perubahan habitat.
- Kamera bawah air atau ROV untuk dokumentasi kondisi karang.
- eDNA untuk memantau keanekaragaman hayati.
- Artificial Intelligence untuk analisis citra dan prediksi perubahan ekosistem.

Semakin lengkap integrasi teknologi yang dijelaskan, semakin baik kualitas jawaban.

d. Rekomendasi pengelolaan

Rekomendasi yang diharapkan meliputi penerapan pengelolaan berbasis ekosistem, pembatasan aktivitas wisata, rehabilitasi terumbu karang, pengendalian sampah plastik, perlindungan ikan herbivora, pemantauan berkala menggunakan teknologi digital, pelibatan masyarakat pesisir, serta penguatan kebijakan konservasi berbasis bukti ilmiah (*evidence-based management*).

DAFTAR PUSTAKA

Azam, F., Fenchel, T., Field, J. G., Gray, J. S., Meyer-Reil, L. A., & Thingstad, F. (1983). The ecological role of water-column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series, 10*, 257–263. https://doi.org/10.3354/meps010257

Boyd, P. W., Claustre, H., Levy, M., Siegel, D. A., & Weber, T. (2019). Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. *Nature, 568*(7752), 327–335. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1098-2

Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G. M., Tilman, D., Wardle, D. A., Kinzig, A. P., Daily, G. C., Loreau, M., Grace, J. B., Larigauderie, A., Srivastava, D. S., & Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature, 486*, 59–67. https://doi.org/10.1038/nature11148

Christin, S., Hervet, É., & Lecomte, N. (2019). Applications for deep learning in ecology. *Methods in Ecology and Evolution, 10*(10), 1632–1644. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13256

Claustre, H., Johnson, K. S., & Takeshita, Y. (2020). Observing the global ocean with Biogeochemical-Argo. *Annual Review of Marine Science, 12*, 23–48. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-010956

Clements, F. E. (1916). *Plant succession: An analysis of the development of vegetation*. Carnegie Institution of Washington.

Crutzen, P. J. (2002). Geology of mankind. *Nature, 415*(6867), 23. https://doi.org/10.1038/415023a

Deiner, K., Bik, H. M., Mächler, E., Seymour, M., Lacoursière-Roussel, A., Altermatt, F., Creer, S., Bista, I., Lodge, D. M., de Vere, N., Pfrender, M. E., & Bernatchez, L. (2017). Environmental DNA metabarcoding: Transforming how we survey animal and plant communities. *Molecular Ecology, 26*(21), 5872–5895. https://doi.org/10.1111/mec.14350

Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO2 problem. *Annual Review of Marine Science, 1*, 169–192. https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834

Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., & Marbà, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change, 3*(11), 961–968. https://doi.org/10.1038/nclimate1970

Ehler, C., & Douvere, F. (2009). *Marine spatial planning: A step-by-step approach toward ecosystem-based management* (IOC Manual and Guides No. 53, ICAM Dossier No. 6). UNESCO.

Elton, C. S. (1927). *Animal ecology*. Macmillan. https://doi.org/10.5962/bhl.title.7435

European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. (2022). *The digital twin ocean: An interactive replica of the ocean for better decision-making*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2777/343496

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development, 9*, 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. G. (1998). Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science, 281*(5374), 237–240. https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237

Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., & Holling, C. S. (2004). Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 35*, 557–581. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105711

Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., & Rockström, J. (2010). Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society, 15*(4), 20. https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in action*. FAO. https://doi.org/10.4060/cd0683en

Gleason, H. A. (1926). The individualistic concept of the plant association. *Bulletin of the Torrey Botanical Club, 53*(1), 7–26. https://doi.org/10.2307/2479933

Haeckel, E. (1866). *Generelle Morphologie der Organismen*. G. Reimer. https://doi.org/10.5962/bhl.title.3953

Hebert, P. D. N., Cywinska, A., Ball, S. L., & deWaard, J. R. (2003). Biological identifications through DNA barcodes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 270*(1512), 313–321. https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2218

Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics, 4*, 1–23. https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245

Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, 22*, 415–427. https://doi.org/10.1101/SQB.1957.022.01.039

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

International Union of Geological Sciences, & International Commission on Stratigraphy. (2024, March 21). *The Anthropocene: IUGS-ICS statement*. https://www.iugs.org/the-anthropocene-iugs-ics-statement/

Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science,*

347(6223), 768–771. https://doi.org/10.1126/science.1260352

Kaiser, M. J., Attrill, M. J., Jennings, S., & Thomas, D. N. (2020). *Marine ecology: Processes, systems, and impacts* (3rd ed.). Oxford University Press.

Lalli, C. M., & Parsons, T. R. (1997). *Biological oceanography: An introduction* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Levin, S. A. (1998). Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems, 1*(5), 431–436. https://doi.org/10.1007/s100219900037

Levinton, J. S. (2017). *Marine biology: Function, biodiversity, ecology* (5th ed.). Oxford University Press.

Lindeman, R. L. (1942). The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology, 23*(4), 399–417. https://doi.org/10.2307/1930126

Longhurst, A. R. (2007). *Ecological geography of the sea* (2nd ed.). Academic Press.

Malde, K., Handegard, N. O., Eikvil, L., & Salberg, A.-B. (2020). Machine intelligence and the data-driven future of marine science. *ICES Journal of Marine Science, 77*(4), 1274–1285. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz057

McClain, C. R. (2009). A decade of satellite ocean color observations. *Annual Review of Marine Science, 1*, 19–42. https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163650

McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., & Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO2. *Frontiers in Ecology and the Environment, 9*(10), 552–560. https://doi.org/10.1890/110004

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press.

Mills, E. L. (1995). From marine ecology to biological oceanography. *Helgoländer Meeresuntersuchungen, 49*(1–4), 29–44. https://doi.org/10.1007/BF02368334

Nybakken, J. W., & Bertness, M. D. (2005). *Marine biology: An ecological approach* (6th ed.). Pearson/Benjamin Cummings.

Odum, E. P. (1971). *Fundamentals of ecology* (3rd ed.). W. B. Saunders.

Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2005). *Fundamentals of ecology* (5th ed.). Thomson Brooks/Cole.

Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N., & Prabhat. (2019). Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature, 566*, 195–204. https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1

Rosenberg, E., Koren, O., Reshef, L., Efrony, R., & Zilber-Rosenberg, I. (2007). The role of microorganisms in coral health, disease and evolution. *Nature Reviews Microbiology, 5*, 355–362. https://doi.org/10.1038/nrmicro1635

Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A. J., Smith, A., & Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 375*(1794), 20190120. https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science, 347*(6223), 1259855. https://doi.org/10.1126/science.1259855

Tansley, A. G. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology, 16*(3), 284–307. https://doi.org/10.2307/1930070

Thomsen, P. F., & Willerslev, E. (2015). Environmental DNA—An emerging tool in conservation for monitoring past and present biodiversity. *Biological Conservation, 183*, 4–18. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.11.019

Thomson, C. W. (1873). *The depths of the sea: An account of the general results of the dredging cruises of H.M.SS. Porcupine and Lightning during the summers of 1868, 1869, and 1870*. Macmillan and Co. https://doi.org/10.5962/bhl.title.16330

UNESCO-IOC. (2021). *The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021–2030): Implementation plan*. UNESCO-IOC.

Worm, B., Barbier, E. B., Beaumont, N., Duffy, J. E., Folke, C., Halpern, B. S., Jackson, J. B. C., Lotze, H. K., Micheli, F., Palumbi, S. R., Sala, E., Selkoe, K. A., Stachowicz, J. J., & Watson, R. (2006). Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science, 314*(5800), 787–790. https://doi.org/10.1126/science.1132294

BAB 2
DAERAH DAN PENYEBARAN DISTRIBUSI MANGROVE

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

1. Mahasiswa mampu menjelaskan status dan luasan ekosistem mangrove.
2. Mahasiswa dapat memetakan daerah penyebaran utama magrove di sebagian pulau besar di Indonesia.
3. Mahasiswa mampu menganalisis pola zonasi (permintakatan) dan distribusi jenis berdasarkan faktor lingkungan.
4. Mahasiswa mampu mengidentifikasi faktor abiotik dan ancaman yang mempengaruhi dinamika distribus magrove.

B. PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove merupakan salah satu formasi hutan paling unik dan produktif di dunia yang mengkolonisasi wilayah intertidal yakni zona peralihan dinamis antara daratan dan laut di sepanjang pesisir tropis dan subtropis. Secara ekologis ekosistem ini bertindak sebagai benteng hijau pembatas yang melindungi garis pantai dari ancaman abrasi mekanis sekaligus menjadi ekosistem pendukung kehidupan pesisir melalui fungsinya sebagai tempat memijah mencari makan dan membesarkan anak (*nursery ground*) bagi berbagai biota laut bernilai ekonomis penting seperti ikan udang dan kepiting. Tidak hanya itu dalam konteks mitigasi perubahan iklim global mangrove kini diakui sebagai salah satu penyimpan karbon biru (*blue carbon*) terbaik di dunia yang mampu mengunci emisi karbon dalam jumlah masif di dalam biomassa dan substrat sedimennya. Pertumbuhan perkembangan dan eksistensi ekosistem halofit ini di permukaan bumi tidak terjadi secara acak melainkan dikendalikan secara ketat oleh batas-batas toleransi fisiologis vegetasi terhadap interaksi faktor klimatik oseanografi

dan edafik lokal. Faktor makro seperti suhu udara dan air laut membatasi sebaran global mangrove agar tetap berada di kawasan hangat, sementara dinamika lokal seperti fluktuasi pasang surut salinitas air tanah energi gelombang, dan laju sedimentasi menyaring jenis spesies yang mampu bertahan hidup. Interaksi kompleks dari faktor-faktor pembatas (*limiting factors*) inilah yang kemudian melahirkan fenomena karakteristik unik berupa keteraturan pola sebaran jenis dari arah laut lepas menuju ke daratan kering, yang dikenal sebagai konsep "zonasi" mangrove.

Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dengan garis pantai yang sangat panjang dan kondisi geomorfologi yang ideal Indonesia dianugerahi ekosistem mangrove terluas di dunia yang mencakup sekitar seperempat dari total luasan global. Kendati demikian distribusi spasial mangrove di pulau-pulau besar Indonesia menghadapi tantangan antropogenik yang timpang; mulai dari kawasan pesisir Papua yang masih terjaga dalam kondisi hutan primer luas hingga kawasan pesisir Jawa, Sumatra dan Kalimantan yang mengalami tekanan degradasi serta fragmentasi parah akibat masifnya alih fungsi lahan menjadi kawasan tambak komersial industri dan perkebunan. Oleh karena itu memahami daerah penyebaran, dinamika pola distribusi, faktor lingkungan pembatas hingga ancaman nyata terhadap eksistensi ekosistem ini menjadi landasan ilmiah yang krusial bagi mahasiswa dalam merumuskan strategi konservasi dan rehabilitasi mangrove yang berkelanjutan di masa depan.

C. Materi

Berisi tentang pembahasan mendalam mengenai teori, konsep penyebaran dan distribusi mangrove, penyebaran mangrove dunia, penyebaran mangrove di Indonesia, Faktor lingkungan pembatas distribusi mangrove dan karakteristik zonasi mangrove. Materi disajikan secara terstruktur serta penjelasan komprehensif untuk membantu pembaca mencapai kompetensi yang diharapkan.

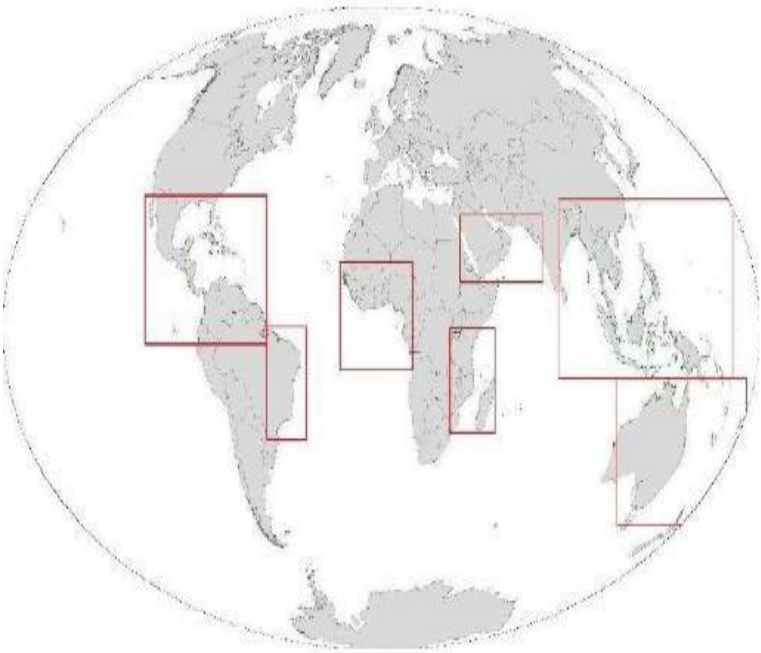
2.1 Konsep Penyebaran dan distrubusi mangrove

Pengertin Mangrove

Istilah *mangrove* digunakan untuk menjelaskan kelompok tumbuhan berkayu yang tumbuh pada wilayah pesisir tropis dan subtropis yang dipengaruhi pasang surut, sekaligus merujuk pada komunitas vegetasi yang mendominasi habitat intertidal tersebut. Untuk menghindari ambiguitas, para peneliti modern sering membedakan penggunaan istilah menjadi *mangrove plants* untuk menyebut spesies penyusunnya dan *mangrove ecosystems* atau *mangrove forests* untuk menggambarkan keseluruhan komunitas beserta lingkungan fisiknya (Friess et al., 2020; Maurya et al., 2021). Mangrove merupakan kelompok tumbuhan tingkat tinggi yang memiliki kemampuan adaptasi khusus terhadap kondisi salinitas tinggi, substrat berlumpur serta fluktuasi genangan akibat pasang surut laut. Adaptasi tersebut memungkinkan mangrove mengkolonisasi habitat peralihan antara daratan dan lautan yang dikenal sebagai zona intertidal tropis dan subtropis. Selain berperan sebagai komponen penting ekosistem pesisir mangrove juga menyediakan berbagai jasa ekosistem seperti perlindungan pantai, penyimpanan karbon biru (*blue carbon*) habitat biota perairan serta penunjang mata pencaharian masyarakat pesisir (Vasquez et al., 2024; Lovelock et al., 2025). Oleh karena itu, dalam literatur modern istilah mangrove tidak hanya mengacu pada spesies tumbuhan tertentu, tetapi juga pada keseluruhan ekosistem pesisir yang memiliki struktur, fungsi, dan keanekaragaman hayati yang khas.

2.2 Penyebaran Mangrove Dunia

Mangrove terutama tumbuh di daerah antara garis lintang 30^{o} sebelah Utara dan Selatan bumi ini, tetapi vegetasi tersebut tidak ditemukan di kebanyakan pulau di Samudera Pasifik (Spalding, Blasco, & Field, 1997). Di belahan bumi sebelah Utara distribusi mangrove terbatas hingga Bermuda (32^{o} 20' LU) dan Jepang (31^{o} 22' LU). Di sebelah Selatan, mangrove berdistribusi hingga Selatan Australia (38^{o} 45' LS) dan Selandia Baru (38^{o} 03' LS).



Gambar 2.1. Distribusi Mangrove di Dunia
(Sumber: Nasa, 2010 *dalam* Djamaluddin, 2018)

Setiap jenis mangrove memiliki batas toleransi tertentu terhadap suhu yang dingin, sebagaimana diindikasikan oleh batas distribusi vegetasi tersebut ke arah kutub. Oleh karena itu, penyebaran mangrove secara global karena suhu yang terlalu dingin (Duke, 1998). Distribusi mangrove yang luas hanya mungkin terdapat di daerah dengan temperatur udara tidak kurang dari 20^{o} C saat musim terdingin, serta perbedaan temperatur udara musiman tidak melebihi 10^{o} C (Walsh, 1974; Chapman, 1975). Seorang peneliti Blasko (1984), melakukan evaluasi tentang hubungan antara distribusi mangrove dan faktor iklim berupa curah hujan dan temperatur. Ia menemukan bahwa daerah dimana mangrove ditemukan dapat diklasifikasikan ke dalam empat kelompok utama, yakni:

1. Wilayah yang panas dimana sekitar 90% dari mangrove di seluruh dunia dapat ditemukan di daerah selatan Mexiko hingga Kolombia, Karibia, Brasil sebelah utara, Asia Tenggara hingga Bagian Utara Queensland di Australia.

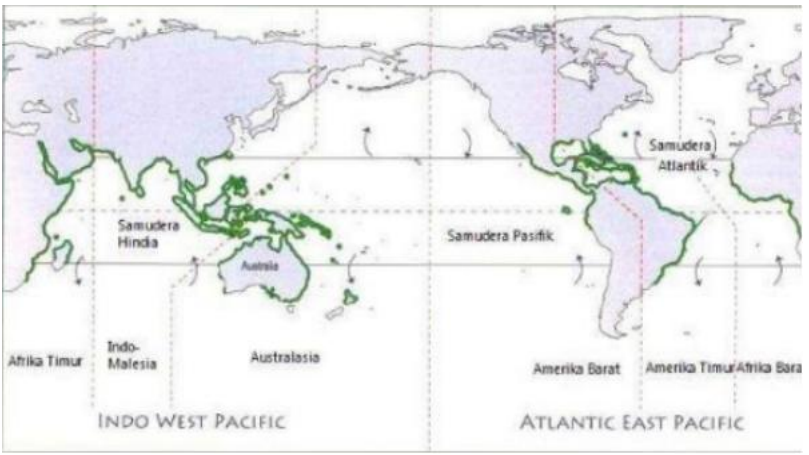
2. Daerah Sub-humid dimana mangrove dapat ditemukan secara sporadik, seperti bagian Afrika Timur, Bagian Selatan Queensland, Mesiko, dan Venezuela.
3. Daerah Semi-arid dimana mangrove sangat jarang, umumnya hadir di dekat muara sungai seperti di Delta Indus (Pakistan), Gujarat (India), Australia Bagian Barat dan Northern Territory.
4. Daerah Arid; dimana mangrove secara praktis tidak diketahui kehadirannya kecuali disana terdapat hujan musim dingin (*winter rains*), seperti yang terjadi di sepanjang Pantai Laut Merah meliputi Etiopia dan Mesir Gurun Persia dan Gurun California.

Menurut (Tomlinson, 2016) terdapat dua kelompok utama pusat keanekaragaman mangrove yakni kelompok bagian Barat dan Timur. Kelompok bagian Barat juga didefinisikan sebagai Pasifik Timur Atlantik (*Atlantic East Pacific*) atau disingkat AEP oleh (Duke, 1992) *dalam* (Djamaluddin, 2018), meliputi mangrove di Afrika dan pantai Amerika bagian Atlantik, Karibia, Gurun Mesiko dan di Amerika khususnya Pantai Barat Pasifik. Sementara itu kelompok bagian Timur juga di definisikan sebagai Barat Indo-Pasifik (*IndoPacific West*) atau disingkat IWP oleh) (Duke, 1992), termasuk mangrove di Bagian Indo-Pasifik dan terbatas hingga ke Timur dan Barat Ujung Afrika. Berdasarkan pencatatan kehadiran dan ketidakhadiran jenis mangrove (Duke, 1992) *dalam* (Djamaluddin, 2018) membagi distribusi mangrove di dunia ke dalam enam wilayah biogeografik yakni:

1. Amerika Bagian Barat dan Pasifik Bagian Barat
2. Amerika Bagian Timur dan Karibia
3. Afrika Bagian Barat
4. Afrika Bagian Timur dan Madagaskar
5. Indo-Malesia dan Asia
6. Australia dan Pasifik Bagian Barat.

Wilayah biogeografik 1, 2, dan 3 merupakan bagian dari AEP dan tiga wilayah selanjutnya termasuk dalam bagian IWP. Secara umum keanekaragaman jenis di IWP empat kali lebih

banyak dibandingkan di AEP. Hingga kini, daftar keseluruhan jenis mangrove di keenam wilayah biogeografik terus dilengkapi, dan salah satunya dapat dilihat dalam (Duke, 1998). Peta sebaran mangrove di enam wilayah biogeografi dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Enam wilayah biogeografi menurut Duke (Sumber: Duke, 2002 *dalam* Djamaluddin, (2018)

2.3 Penyebaran Mangrove di Indonesia

Menyediakan lingkungan yang ideal bagi perkembangbiakan mangrove yang disebabkan oleh pertemuan faktor iklim geologi dan oseanografi. Akibatnya selama habitat yang sesuai tersedia untuk vegetasi mangrove di dalam zona intertidal mangrove ini akan tumbuh subur dan membentuk ekosistem. Luasnya cakupan mangrove di lokasi tertentu ditentukan oleh ketersediaan dan besarnya habitat pertumbuhan yang sesuai. Di sepanjang garis pantai Indonesia mangrove ini diamati tumbuh subur membentuk hutan pesisir yang luas di berbagai topografi pesisir termasuk teluk (misalnya Teluk Tomini di Pulau Sulawesi) delta di pertemuan sungai penting (misalnya Delta Mahakam di pantai timur Kalimantan) garis pantai yang landai (misalnya pantai timur Pulau Sumatera) dan laguna (misalnya Laguna Segara Anakan) di Cilacap). Di daerah pesisir lainnya, baik di daratan pulau- pulau yang lebih besar maupun di dalam kelompok pulau yang lebih kecil tumbuhan ini

dapat ditemukan dalam distribusi sporadis membentuk komunitas yang relatif kecil (Djamaluddin, 2018). Luasan mangrove di suatu tempat ditentukan oleh besaran luasan habitat tumbuh yang tersedia. Di pesisir pantai Indonesia tumbuhan ini ditemukan tumbuh membentuk hutan pantai yang luas di wilayah-wilayah pantai dengan formasi berupa teluk (contoh Teluk Tomini di Pulau Sulawesi) delta-delta di muara sungai besar (contoh Delta Mahakam di wilayah pantai Timur Pulau Kalimantan) pantai-pantai yang landai (contoh, pesisir pantai Timur Pulau Sumatera) dan laguna (contoh Laguna Segara Anakan di Cilacap). Di wilayah pesisir pantai lainnya baik di daratan pulau besar maupun gugusan pulau-pulau kecil tumbuhan ini dapat ditemukan secara sporadis dalam komunitas-komunitas yang relatif kecil.

Pada tahun 2010 dilaporkan bahwa luas habitat mangrove di Indonesia merupakan sekitar 60% (setara dengan 3,06 juta hektar) dari total luas bakau 5,1 juta hektar di wilayah Asia Tenggara. Kawasan ini sejalan dengan perkiraan yang dikeluarkan oleh Pusat Survei Sumber Daya Alam Laut (PSSDAL) Bakosurtanal yang menunjukkan 3,244 juta hektar berdasarkan data citra yang dikumpulkan antara tahun 2006 dan 2009 (Djamaluddin, 2018).. Menurut Peta Mangrove Nasional yang dirilis oleh Direktorat Konservasi Tanah dan Air Direktorat Jenderal PDASRH, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, kawasan mangrove di Indonesia tercatat sebesar 3.364.080 hektar pada tahun 2021 dengan potensi luas habitat mangrove sebesar 756.183 hektar. Terdapat tiga kelompok kenampakan (fitur) mangrove saat ini (eksisting) yang digunakan yaitu mangrove lebat mangrove sedang, dan mangrove jarang (Ditjen PDASRH, 2021).

2.4 Faktor lingkungan pembatas distribusi mangrove

Pertumbuhan, perkembangan, dan penyebaran ekosistem mangrove di permukaan bumi tidak terjadi secara acak melainkan dikendalikan secara ketat oleh batas-batas toleransi fisiologis vegetasi terhadap lingkungan sekitarnya (Tomlinson, 2016). Di alam luar faktor-faktor ini bekerja secara simultan sebagai faktor pembatas (*limiting factors*). Ketika salah satu

parameter lingkungan berada di luar ambang batas toleransi suatu spesies, maka spesies tersebut akan tereliminasi dari peta distribusi wilayah tersebut (Anwar & Gunawan, 2007). Secara garis besar faktor lingkungan pembatas distribusi mangrove dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama: faktor klimatik (iklim skala makro) dan faktor edafik serta oseanografi (kondisi lokal tanah dan perairan) (Djamaluddin, 2018).

2.4.1 Faktor Klimatik (Iklim Makro)

Faktor klimatik memegang kendali penuh atas peta distribusi mangrove pada skala global (dunia) menentukan batas terjauh sejauh mana vegetasi halofit ini dapat bermigrasi ke arah kutub utara dan selatan bumi (Duke et al., 2007).

1. **Suhu Udara dan Suhu Air Laut**

   Suhu merupakan faktor pembatas tunggal yang paling krusial dalam geografi mangrove (Spalding et al., 2010). Sebagai tumbuhan tropis, mangrove membutuhkan lingkungan yang hangat sepanjang tahun. Batas sebaran global mangrove bertepatan erat dengan garis posisi tempat di mana suhu udara pada bulan terdingin tidak jatuh di bawah 20°C, dan suhu air laut di sekitarnya berada di atas 24°C (Tomlinson, 2016) **.**

   Secara fisiologis, vegetasi mangrove tidak memiliki ketahanan terhadap fenomena embun beku (*frost*) atau pembekuan (Anwar & Gunawan, 2007). Ketika suhu lingkungan mendekati 0°C, air di dalam sel-sel tumbuhan akan membeku membentuk kristal es. Pembentukan es ini akan merobek dinding sel, merusak sistem vaskular (pembuluh xilem dan floem), memicu emboli, dan berujung pada kematian pohon secara mendadak (Tomlinson, 2016). Oleh karena itu, penurunan suhu drastis di kawasan lintang tinggi bertindak sebagai dinding pembatas yang menghentikan ekspansi mangrove ke wilayah beriklim sedang (*temperate zone*) (Duke et al., 2007).

2. **Curah Hujan (*Precipitation*)**

   Meskipun tumbuh di dalam air laut, kuantitas curah hujan di suatu wilayah sangat memengaruhi struktur dan kemegahan kanopi hutan mangrove (Giri et al., 2011). Curah

hujan yang tinggi membawa pasokan air tawar dalam volume besar melalui aliran permukaan (*run-off*) dan sistem sungai (Ditjen PDASRH, 2021)Air tawar ini berfungsi penting untuk mengencerkan kepekatan garam di dalam tanah intertidal, mencuci akumulasi garam berlebih serta membawa pasokan zat hara (nutrien) segar dari daratan (Anwar & Gunawan, 2007). Di kawasan tropis basah dengan curah hujan tinggi yang merata sepanjang tahun, hutan mangrove dapat tumbuh subur lebat dan mencapai tinggi tegakan maksimal hingga lebih dari 30 meter (Giri et al., 2011). Sebaliknya di kawasan arid (kering) dengan curah hujan rendah sebaran mangrove sangat terbatas kerdil (*dwarf mangroves*) dan memiliki keanekaragaman spesies yang sangat rendah (Spalding et al., 2010).

2.4.2 Faktor Oseanografi (Dinamika Laut)

Faktor oseanografi mengendalikan distribusi mangrove pada skala regional hingga lokal, menentukan batas vertikal dan horizontal zonasi di sepanjang garis pantai (Setyawan, 2016).

1. **Fluktuasi Pasang Surut Air Laut (*Tides*)**

   Pasang surut air laut adalah motor penggerak utama bagi kehidupan ekosistem mangrove (Noor et al., 2006). Parameter pasang surut bertindak sebagai faktor pembatas melalui dua mekanisme utama durasi penggenangan dan energi mekanik sirkulasi air (Setyawan, 2016). Lama waktu tanah tergenang menentukan tingkat anoksia (ketiadaan oksigen) di dalam substrat. Spesies pionir seperti *Avicennia marina* memiliki toleransi penggenangan yang sangat tinggi sehingga dapat tumbuh di zona terluar yang tergenang hampir 24 jam sehari (Noor et al., 2006). Sebaliknya spesies zona dalam seperti *Bruguiera gymnorhiza* hanya mampu mentoleransi penggenangan singkat saat pasang tertinggi (pasang purnama) dan akan mengalami pembusukan akar lalu mati jika dipaksa terendam air laut secara terus-menerus (Tomlinson, 2016).

2. **Energi Gelombang dan Arus Pantai**

Mangrove memerlukan habitat dengan energi gelombang rendah hingga sedang untuk dapat berkolonisasi (Anwar & Gunawan, 2007). Pantai yang terlindung dari gelombang besar—seperti di dalam teluk, laguna, atau perlindungan pulau-pulau kecil di depannya merupakan tempat di mana sebaran mangrove tumbuh paling luas (Spalding et al., 2010). Gelombang laut yang terlalu besar dan bertenaga tinggi bertindak sebagai pembatas mekanis. Hempasan ombak yang konstan akan mengikis sedimen lumpur tempat akar mencengkeram (*abrasi*) serta mencabut atau mematahkan semai-semai mudanya sebelum mereka sempat mengembangkan sistem akar jangkar yang kuat (Noor et al., 2006; Tomlinson, 2016).

2.4.3 Faktor Edafik (Karakteristik Substrat Tanah)

Kondisi fisik dan kimia tanah intertidal menentukan komposisi spesies dan batas mikro-distribusi vegetasi di sepanjang bentang pesisir (Kurniawan & Setyawan, 2016).

1. **Tekstur Substrat dan Laju Sedimentasi**

Sebagian besar vegetasi mangrove sejati memiliki preferensi kuat terhadap jenis substrat berlumpur halus (*silt* dan *clay*) yang kaya akan kandungan bahan organik **(**Anwar & Gunawan, 2007). Tanah berlumpur ini memiliki kapasitas retensi air yang sangat tinggi dan mampu menyimpan nutrien dalam jumlah besar yang sangat dibutuhkan untuk menyokong metabolisme tanaman (Kurniawan & Setyawan, 2016). Meskipun demikian tekstur tanah dan laju pasokan sedimen baru dari hulu sungai bertindak sebagai penyaring spesies (Noor et al., 2006). Jika pasokan sedimen terlalu pekat dan cepat (*hiper-sedimentasi*) lumpur halus akan mengendap dengan ketebalan ekstrem yang mengubur dan menyumbat lubang-lubang lentisel pada akar napas tumbuhan pionir (Tomlinson, 2016). Akibatnya pasokan oksigen ke jaringan dalam terputus, dan pohon akan mati lemas akibat asfiksia (Anwar & Gunawan, 2007). Di sisi lain pantai yang miskin pasokan lumpur dan hanya memiliki substrat pasir kasar koral sangat membatasi kehadiran

genus *Rhizophora* atau *Bruguiera* memaksa wilayah tersebut didominasi oleh *Rhizophora stylosa* yang adaptif terhadap celah batu karang (Noor et al., 2006).

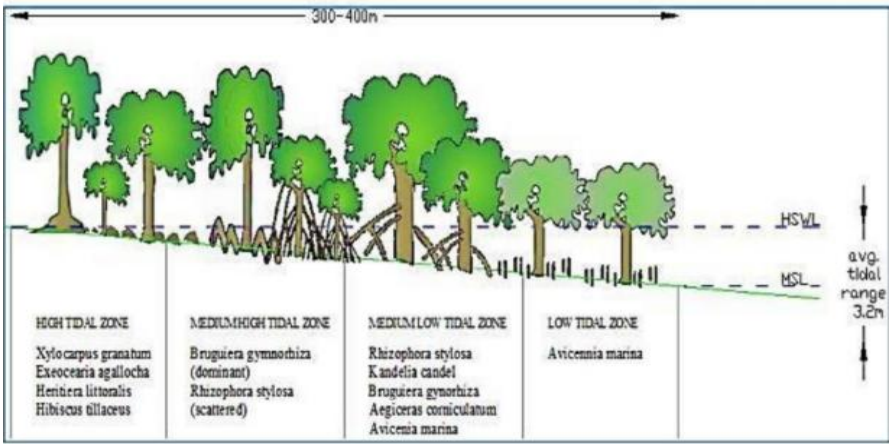
2. Salinitas Air Tanah (*Soil Salinity*)

Garam adalah faktor pembatas kimiawi yang paling menantang bagi kehidupan tumbuhan di wilayah pesisir pantai (Tomlinson, 2016). Mangrove memang diklasifikasikan sebagai tumbuhan halofit (toleran garam), namun mereka tetap membutuhkan air tawar untuk pertumbuhan vegetatif yang optimal (Anwar & Gunawan, 2007).

Salinitas air tanah yang ideal bagi sebagian besar vegetasi mangrove berkisar antara 10 hingga 30 ppt (Kurniawan & Setyawan, 2016). Jika kondisi lingkungan memicu terjadinya hipersalinitas (kadar garam tanah melonjak di atas 40–50 ppt akibat tingginya laju penguapan/evaporasi tanpa adanya bilasan air tawar), garam akan menjadi racun yang mematikan (Tomlinson, 2016). Fisiologi tanaman akan mengalami tekanan osmotik ekstrem di mana akar kesulitan menyerap air meskipun tanah dalam kondisi basah kuyup (*kekeringan fisiologis*) (Anwar & Gunawan, 2007). Hanya spesies dengan ketahanan luar biasa seperti *Ceriops tagal* dan *Avicennia marina* yang mampu bertahan hidup di batas salinitas tinggi tersebut sementara spesies sensitif akan langsung tereliminasi dari peta penyebaran lokal (Noor et al., 2006).

2.5 Karakteristik Komponen Zonasi Mangrove

Secara umum profil lintasan ekosistem mangrove dibagi menjadi empat zona utama dari arah laut menuju ke darat (Tomlinson, 2016):



Gambar 2.3. Zonasi mangrove
(Tusinski dan Verhagen, 2014)

1. **Zona Terluar / Garis Pantai (*Seaward Zone*)**

   Zona ini berhadapan langsung dengan laut terbuka dan bertindak sebagai zona pionir. Substrat di zona ini umumnya berupa lumpur encer yang belum stabil dan tergenang secara konstan setiap hari oleh pasang normal (Kurniawan & Setyawan, 2016). Vegetasi yang mendominasi kawasan ini adalah genus *Avicennia* (Api-api) dan *Sonneratia* (Pedada) **(**Noor et al., 2006). Kedua genus ini mengembangkan sistem akar napas (*pneumatophores*) berbentuk pensil atau pasak yang berfungsi menyerap oksigen langsung dari udara saat air surut (Tomlinson, 2016).

2. **Zona Tengah (*Mid Zone*)**

   Zona tengah terletak di belakang zona pionir dengan kondisi lingkungan yang jauh lebih tenang karena energi gelombang laut telah diredam. Substrat tanahnya berupa lumpur tebal dalam dan kaya akan kandungan bahan organik (Anwar & Gunawan, 2007). Zona ini didominasi mutlak oleh genus *Rhizophora* (Bakau) (Noor et al., 2006). Spesies ini mengembangkan akar tunjang (*stilt roots*) yang mencengkeram lumpur dengan kuat guna menahan pohon tetap tegak di atas substrat yang labil (Tomlinson, 2016).

3. **Zona Dalam (*Landward Zone*)**

   Zona ini terletak jauh di pedalaman, mendekati wilayah daratan kering, dan hanya tergenang pada saat pasang tertinggi seperti pasang purnama (Setyawan, 2016). Substrat tanah di zona ini cenderung lebih keras dan padat, serta sering kali bersifat hipersalin akibat penguapan yang tinggi Vegetasi dominan meliputi genus *Bruguiera* (Tanjang), *Ceriops* (Tengar), dan *Xylocarpus* (Nyiri) yang mengandalkan sistem akar lutut (*knee roots*) atau akar papan (*buttress roots*) (Tomlinson, 2016).

4. **Zona Peralihan (*Transition Zone*)**

   Merupakan pembatas fisik antara ekosistem mangrove dengan hutan dataran rendah asli (*terrestrial forest*). Air laut hampir tidak pernah mencapai zona ini, sehingga salinitas tanahnya sangat rendah (Noor et al., 2006). Vegetasi yang dominan di kawasan ini adalah *Nypa **fruticans*** (Nipah) dan *Acrostichum aureum* (Paku laut) (Noor et al., 2006).

2.6 Distrubusi Mangrove

2.6.1 Distribusi Biogeografi Global

Secara global, distribusi mangrove dunia dibagi secara tegas menjadi dua belahan provinsi biogeografi utama yang memiliki perbedaan kekayaan spesies sangat mencolok (Spalding, 2010):

1. **Kawasan Indo-Malaya / Indo-Pasifik Barat (*Indo-West Pacific* / IWP)**

   Kawasan IWP mencakup pesisir timur Afrika, Samudra Hindia, Asia Tenggara, hingga pantai utara Australia (Spalding, 2010). Kawasan ini merupakan episentrum keanekaragaman hayati mangrove tertinggi di dunia, dengan lebih dari 50 hingga 60 spesies mangrove sejati yang berhasil diidentifikasi (Tomlinson, 2016).

2. **Kawasan Atlantik-Pasifik Timur (*Atlantic-East Pacific* / AEP)**

   Kawasan AEP mencakup pesisir barat dan timur benua Amerika, kepulauan Karibia serta pesisir barat benua Afrika (Spalding et al., 2010). Berbeda dengan kawasan IWP,

kawasan AEP memiliki tingkat keanekaragaman hayati yang sangat rendah di mana komunitas mangrovenya hanya didominasi oleh sekitar 10 hingga 12 spesies saja seperti *Rhizophora mangle* dan *Avicennia germinans* (C. Giri, 2010).

2.6.2 Distribusi Mangrove Nasional di Indonesia

Indonesia merupakan negara dengan ekosistem mangrove terluas di dunia mencakup sekitar 3,36 juta hektar atau setara dengan seperempat dari total luas mangrove global (Giri et al., 2011; Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [KLHK], 2023). Distribusi spasial mangrove di Indonesia sangat dipengaruhi oleh kondisi geomorfologi pulau-pulau besarnya :

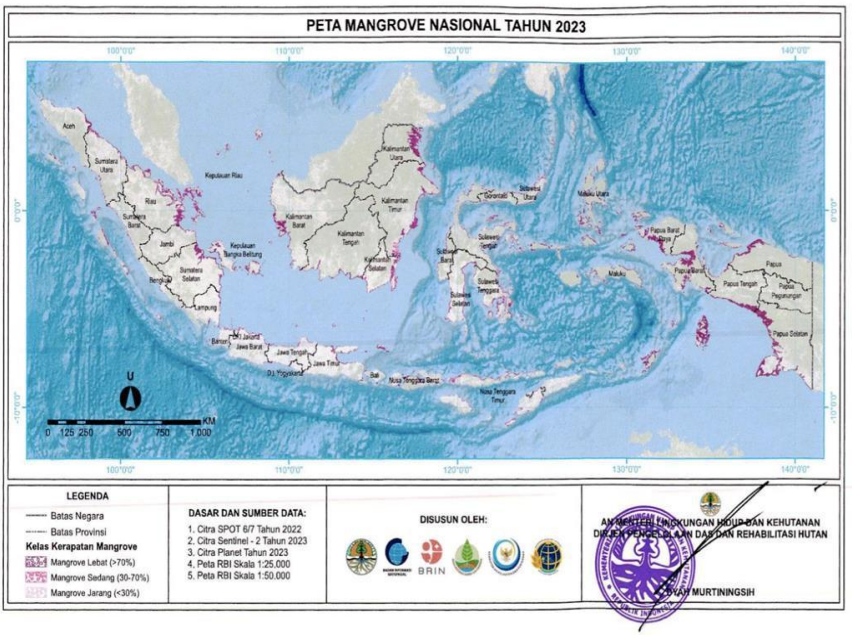
Gambar 2.4. Zonasi mangrove
(Tusinski dan Verhagen, 2014)

Pada tahun 2023 Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan mengeluarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6636 Tahun 2024 tentang Peta Mangrove Nasional Tahun 2023. Berdasarkan data dalam Keputusan tersebut, data luasan mangrove eksisting menurut provinsi yang

tertuang meningkat jika dibandingkan data Peta Mangrove Nasional Tahun 2021 dari 3.364.080 Ha menjadi 3.442.614 Ha dan luas potensi habitat mangorve dari 756.183 Ha menjadi 777.636 Ha, seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Data Luas Mangrove dan Potensi Habitat Mangrove Tahun 2023

No	Provinsi	Luas (Ha)	
		Mangrove Eksisting	Potensi Habitat Mangrove
1	Aceh	30.137	18.126
2	Sumatera Utara	59.765	24.458
3	Sumatera Barat	16.638	977
4	Riau	231.038	13.431
5	Kepulauan Riau	66.939	5.183
6	Kepulauan Bangka Belitung	66.583	9.594
7	Bengkulu	2.757	1.823
8	Jambi	12.434	667
9	Sumatera Selatan	171.265	48.021
10	Lampung	10.096	346
11	Banten	3.787	11.027
12	DKI Jakarta	613	39
13	Jawa Barat	12.205	39.305
14	Jawa Tengah	14.339	43.140
15	Daerah Istimewa Yogyakarta	15	12
16	Jawa Timur	30.888	43.173
17	Bali	2.287	237
18	Nusa Tenggara Barat	11.130	4.182

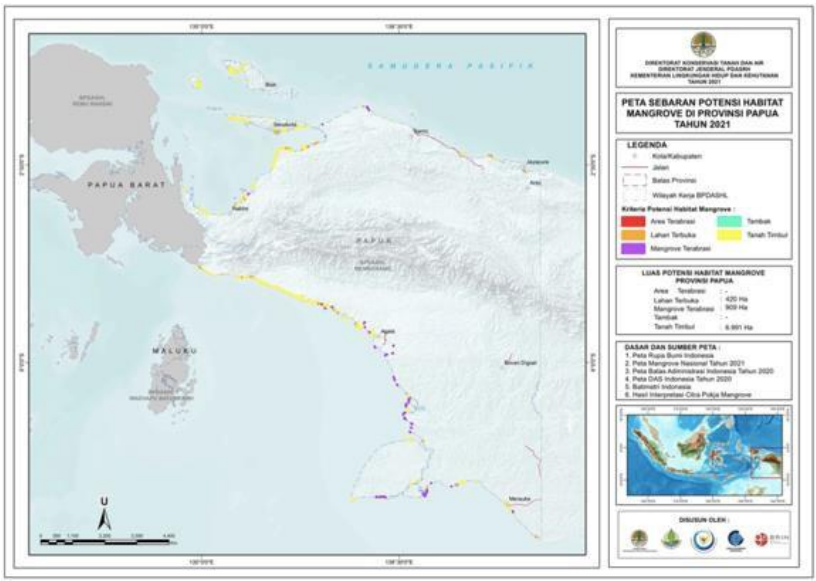


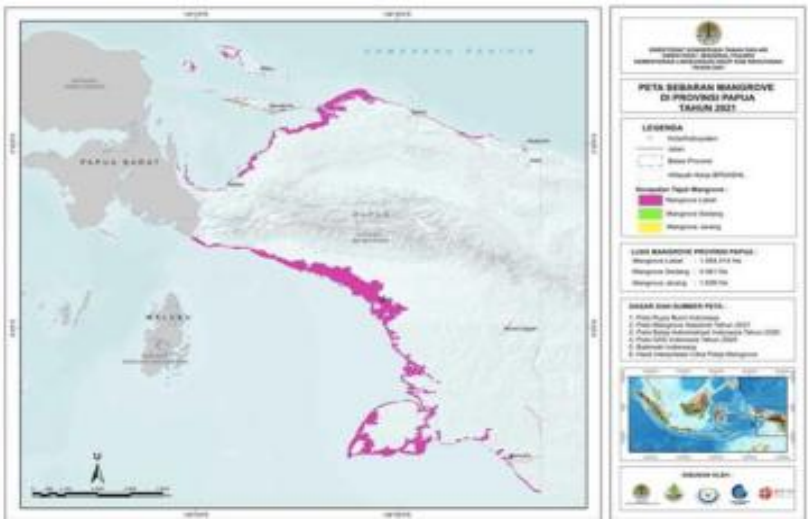
Gambar 2.5. Peta Mangrove Nasional Tahun 2023
(Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan 2024)

1. Pesisir Papua

Papua memiliki luasan hutan mangrove terbesar di Indonesia, terutama di kawasan Mimika, Asmat, dan Teluk Bintuni yang merupakan bagian dari bentang alam mangrove terluas di wilayah timur Indonesia. Sebagian besar ekosistem mangrove di wilayah tersebut masih berada dalam kondisi relatif alami dan didominasi oleh hutan primer dengan tingkat gangguan antropogenik yang rendah dibandingkan wilayah pesisir lainnya di Indonesia. Kawasan Teluk Bintuni bahkan dikenal sebagai salah satu ekosistem mangrove terbesar di dunia dengan luasan lebih dari 220.000–250.000 ha. Komunitas vegetasinya didominasi oleh famili Rhizophoraceae, terutama genus *Rhizophora* dan *Bruguiera*, yang membentuk tegakan rapat dengan tinggi pohon dapat mencapai lebih dari 30 meter pada lokasi-lokasi yang masih berkembang optimal. Kondisi tersebut menjadikan kawasan mangrove Papua sebagai habitat penting bagi

keanekaragaman hayati pesisir serta penyimpan karbon biru yang signifikan bagi Indonesia (Ramadhan, 2025).





Gambar 2.6. Peta Mangrove Eksisting dan Potensi Habitat Mangrove Provinsi Papua Tahun 2021
(Sumber: Ditjen PDASRH, 2021)

2. **Pesisir Sumatera dan Kalimantan**

Penyebaran mangrove di Sumatera terpusat di sepanjang pantai timur yang landai, sedangkan pesisir Kalimantan dicirikan oleh bentukan delta estuarian yang sangat luas seperti Delta Mahakam (C. Giri, 2010). Kedua wilayah ini memiliki produktivitas biomassa yang sangat tinggi, namun menghadapi ancaman deforestasi yang masif akibat alih fungsi lahan menjadi tambak udang komersial dan perkebunan kelapa sawit (Kehutanan, 2024).

3. **Pesisir Jawa**

Sebaliknya Pulau Jawa merupakan wilayah dengan tingkat degradasi mangrove tertinggi. Akibat tingginya tekanan populasi manusia sebagian besar sabuk hijau mangrove di utara Jawa telah terfragmentasi dan menyusut drastis menyisakan beberapa kantong konservasi kecil seperti di Segara Anakan Cilacap (Rahim, 2017).

D. RANGKUMAN

Ekosistem mangrove merupakan komunitas tumbuhan halofit di daerah intertidal tropis dan subtropis yang sebaran globalnya dibatasi oleh faktor termal, di mana vegetasi ini membutuhkan suhu udara di atas 20°C dan tidak tahan terhadap fenomena embun beku (*frost*). Secara biogeografi distribusi mangrove dunia dibagi menjadi wilayah Pasifik Timur Atlantik (AEP) dengan keanekaragaman rendah dan wilayah Barat Indo-Pasifik (IWP) yang menjadi episentrum keanekaragaman hayati tertinggi, termasuk Indonesia yang menguasai sekitar seperempat dari total luas mangrove global. Di Indonesia kawasan mangrove yang pada tahun 2021 tercatat mencapai lebih dari 3,3 juta hektar ini tumbuh subur di wilayah pesisir yang landai dan terlindung seperti teluk, laguna, serta delta muara sungai. Distribusi spasial nasional menempatkan Papua sebagai pemilik luasan mangrove terbesar yang mayoritasnya masih berupa hutan primer disusul oleh pesisir Sumatra dan Kalimantan yang kaya produktivitas namun terancam alih fungsi

lahan serta Pulau Jawa yang telah mengalami fragmentasi dan degradasi paling parah akibat tekanan populasi manusia.

Pertumbuhan dan pemetaan zonasi ekosistem ini dari arah laut menuju darat dikendalikan secara ketat oleh faktor pembatas lingkungan seperti fluktuasi pasang surut energi gelombang, tekstur substrat, sedimentasi hingga salinitas air tanah. Karakteristik profil lintasan ini membentuk empat zona utama, dimulai dari Zona Terluar (*Seaward Zone*) sebagai area pionir berlumpur encer yang didominasi genus *Avicennia* dan *Sonneratia* dengan akar napasnya, lalu Zona Tengah (*Mid Zone*) yang didominasi mutlak oleh genus *Rhizophora* dengan akar tunjangnya yang kuat. Berlanjut ke pedalaman, terdapat Zona Dalam (*Landward Zone*) berstruktur tanah lebih padat dan hipersalin yang dihuni oleh genus *Bruguiera*, *Ceriops*, dan *Xylocarpus*, hingga akhirnya ditutup oleh Zona Peralihan (*Transition Zone*) yang berair payau menuju tawar dengan dominasi pohon Nipah dan Paku laut. Saat ini dinamika distribusi dan kelestarian zonasi mangrove menghadapi ancaman ekologis serius akibat konversi lahan menjadi tambak atau perkebunan sawit, pencemaran serta perubahan iklim yang jika dibiarkan rusak dapat memicu abrasi pantai, intrusi air laut hilangnya habitat biota laut (*nursery ground*), hingga terlepasnya emisi karbon biru (*blue carbon*) ke atmosfer.

E. EVALUASI / SOAL LATIHAN

1. Jelaskan mengapa Indonesia disebut sebagai pusat keanekaragaman (center of biodiversity) mangrove di dunia dan sebutkan 3 wilayah di Indonesia yang memiliki ekosistem mangrove terluas!
2. Di dalam ekosistem mangrove terdapat fenomena "zonasi". Mengapa terjadi perbedaan sebaran jenis tanaman (zonasi) dari arah laut menuju ke daratan ? Faktor apa saja yang memengaruhinya?
3. Analisis mengapa hutan mangrove sangat luas perkembangannya di pesisir timur Pulau Sumatra, sedangkan di pesisir barat Pulau Sumatra pertumbuhannya sangat terbatas!

4. Suhu udara dan suhu air laut merupakan faktor pembatas utama dalam distribusi mangrove secara global. Jelaskan batas geografis (lintang bumi) penyebaran mangrove di dunia dan apa dampaknya jika terjadi fenomena pemanasan global terhadap distribusi tersebut!
5. Alih fungsi lahan (konversi lahan) merupakan ancaman terbesar bagi distribusi dan kelestarian mangrove di Indonesia. Sebutkan dampak ekologis yang terjadi pada wilayah pesisir jika distribusi mangrove di wilayah tersebut hilang atau rusak parah!

F. KUNCI JAWABAN DAN PEMBAHASAN

1. **Kunci Jawaban & Pembahasan:** Indonesia terletak di wilayah tropis khatulistiwa dengan bentuk negara kepulauan yang memiliki garis pantai sangat panjang serta banyak memiliki muara sungai besar yang menghasilkan sedimen lumpur stabil. Kondisi lingkungan yang ideal ini membuat Indonesia menjadi rumah bagi sekitar 40-50 spesies mangrove asli menjadikannya pusat keanekaragaman hayati terbesar di dunia. Tiga wilayah di Indonesia dengan ekosistem mangrove terluas adalah Papua (terutama bagian selatan) Sumatra (terutama pesisir timur) dan Kalimantan.
2. **Kunci Jawaban & Pembahasan:** Zonasi terjadi karena setiap spesies mangrove memiliki tingkat toleransi dan kemampuan adaptasi yang berbeda-beda terhadap cekaman lingkungan di area pasang surut. Faktor utama yang memengaruhi zonasi ini antara lain:
    a. **Frekuensi dan durasi genangan air laut:** Area depan lebih sering tergenang dibanding area belakang.
    b. **Tingkat Salinitas:** Kadar garam tanah dan air cenderung berubah dari laut ke darat.
    c. **Karakteristik Substrat:** Jenis tanah (lumpur lembek, lumpur berpasir atau tanah gambut) bergeser seiring menjauhnya dari laut.

d. **Ketersediaan Air Tawar:** Pasokan air tawar dari sungai memengaruhi pengenceran garam di zona belakang.

3. **Kunci Jawaban & Pembahasan:** Perbedaan ini disebabkan oleh karakteristik geomorfologi dan oseanografi pantai:
   a. **Pesisir Timur Sumatra:** Memiliki kondisi pantai yang landai, ombaknya relatif tenang karena terlindung oleh Selat Malaka dan Pulau Kalimantan, serta dialiri oleh banyak sungai besar (seperti Sungai Musi, Batanghari, Indragiri) yang membawa pasokan sedimen lumpur yang kaya nutrisi. Kondisi ini sangat ideal bagi mangrove.
   b. **Pesisir Barat Sumatra:** Berhadapan langsung dengan Samudra Hindia yang menghasilkan ombak besar arusnya kuat dan pantainya cenderung curam serta berpasir/berbatu tanpa deposisi lumpur yang cukup, sehingga tidak mendukung perakaran mangrove.
4. **Kunci Jawaban & Pembahasan:** Secara global mangrove menyebar di sepanjang wilayah tropis dan subtropis hangat umumnya terletak antara garis lintang 30° Lintang Utara (LU) hingga 30° Lintang Selatan (LS). Batas ini bertepatan dengan garis isoterm suhu udara musim dingin sekitar 20°C. Jika terjadi fenomena pamanasan global (global warming), suhu di wilayah lintang tinggi akan meningkat. Dampaknya adalah batas distribusi mangrove diprediksi akan mengalami pergeseran (ekspansi) ke arah kutub (ke utara dan ke selatan melebihi batas lintang saat ini) menempati wilayah-wilayah baru yang sebelumnya terlalu dingin bagi mereka.
5. **Kunci Jawaban & Pembahasan:** Jika distribusi mangrove hilang atau rusak dampak ekologis yang akan terjadi antara lain:
   a. **Terjadinya Abrasi Pantai:** Tidak ada lagi sistem perakaran rapat yang berfungsi sebagai peredam ombak sehingga garis pantai akan terkikis secara cepat oleh air laut.

b. **Intrusi Air Laut:** Air laut akan merembes lebih jauh ke daratan dan mencemari sumber air tawar/sumur warga karena tidak ada vegetasi penahan di pesisir.
c. **Hilangnya Habitat Biota Laut:** Mangrove berfungsi sebagai *nursery ground* (tempat memijah dan membesarkan anak) bagi ikan, kepiting dan udang. Rusaknya mangrove akan menurunkan populasi tangkapan nelayan secara drastis.
d. **Penurunan Kemampuan Penyerapan Karbon:** Mangrove adalah salah satu penyimpan karbon biru (*blue carbon*) terbaik kerusakannya akan melepaskan emisi karbon ke atmosfer dan mempercepat perubahan iklim.

DAFTAR PUSTAKA

Bosire, J. O., Duvail, S., Kairo, J. G., Diele, K., Koedam, N., Dahdouh-Guebas, F., & Walters, B. B. (2021). *Impact of logging on the biodiversity and composition of flora and fauna in the mangrove forests of Bintuni Bay, West Papua, Indonesia*. Forest Ecology and Management, 488, 119038. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119038

Ditjen PDASRH, D. K. (2021). *Peta Mangrove Nasional Tahun 2021. Direktorat Konservasi Tanah dan Air, Ditken PDASRH, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.*

Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Hamilton, S. E., Lee, S. Y., Lucas, R., Primavera, J., Rajkaran, A., & Shi, S. (2020). *A global biophysical typology of mangroves and its relevance for ecosystem structure and deforestation*. Scientific Reports, 10, 14652. https://doi.org/10.1038/s41598-020-71194-5.

Djamaludin, R. (2018). *Mangrove: Biologi, Ekologi, Rehabilitasi, dan Konservasi. Unsrat Press.* Manado: Unsrat Press.

Kehutanan, K. L. (2024). *Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 6636 Tahun 2024 Tentang Peta Mangrove Nasional Tahun 2023. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.*

Kasihiw, P., Bawole, R., Marwa, J., Murdjoko, A., Wihyawari, A., Heipon, Y., Cabuy, R. L., Benu, N. M. H., Hematang, F., & Leftungun, N. Y. (2024). *Mangrove distribution to support biodiversity management in Teluk Bintuni District, West Papua, Indonesia*. Biodiversitas, 25(2), 644–653. https://doi.org/10.13057/biodiv/d250223

Maurya, K., Mahajan, S., & Chaube, N. (2021). *Remote sensing techniques: Mapping and monitoring of mangrove ecosystem—a review*. Complex & Intelligent Systems, 7, 2797–2818. https://doi.org/10.1007/s40747-021-00457-z.

Lovelock, C. E., Hagger, V., Feller, I. C., Amir, A. A., António, V. M., Owuor, M. A., & Friess, D. A. (2025). *Mangrove biodiversity*

and ecosystem services. Nature Reviews Biodiversity, 1, 772–787. https://doi.org/10.1038/s44358-025-00103-3

Rahim, S. &. (2017). *Hutan MangroveE dan Pemanfatan.* Yogyakarta: Deepublish.

Ramdhan, A., Lense, O. N., & Purnawaty, R. (2025). *The land cover change modeling based Artificial Neural Network (ANN) of mangroves in Teluk Bintuni Regency*. Agricola, 15(1), 1–14. https://doi.org/10.35724/ag.v15i1.6572

Vasquez, J., Acevedo-Barrios, R., Miranda-Castro, W., Guerrero, M., & Meneses-Ospina, L. (2024). *Determining changes in mangrove cover using remote sensing with Landsat images: A review*. Water, Air, & Soil Pollution, 235, 18. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06788-6

BAB 3
FAKTOR LINGKUNGAN UNTUK PERTUMBUHAN MANGROVE

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti pembelajaran, peserta didik diharapkan mampu:

1. **Menjelaskan** pengertian dan karakteristik ekosistem mangrove.
2. **Mengidentifikasi** berbagai faktor lingkungan yang memengaruhi pertumbuhan mangrove, seperti salinitas, suhu, pH, pasang surut, jenis tanah, ketersediaan air, dan intensitas cahaya.
3. **Menganalisis** hubungan antara kondisi lingkungan dengan pertumbuhan dan perkembangan tanaman mangrove.
4. **Membedakan** kondisi lingkungan yang mendukung dan menghambat pertumbuhan mangrove.
5. **Menginterpretasikan** data atau hasil pengamatan mengenai faktor lingkungan di ekosistem mangrove.
6. **Menyajikan** hasil pengamatan atau analisis tentang pengaruh faktor lingkungan terhadap pertumbuhan mangrove dalam bentuk laporan, tabel, grafik, atau presentasi.
7. **Menunjukkan sikap peduli lingkungan** melalui pemahaman tentang pentingnya menjaga kondisi ekosistem mangrove.

B. PENDAHULUAN

Mangrove adalah kelompok tumbuhan berkayu yang tumbuh di wilayah pesisir tropis dan subtropis, terutama pada daerah pasang surut, muara sungai, laguna, dan estuaria (Krauss *et al.* 2008). Ekosistem mangrove dicirikan oleh kemampuan vegetasinya untuk beradaptasi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti salinitas tinggi, tanah berlumpur yang miskin

oksigen, serta genangan air laut secara berkala. Adaptasi tersebut terlihat pada keberadaan akar napas *(pneumatofor),* akar tunjang, mekanisme penyaringan garam, dan kemampuan mengatur keseimbangan air dalam jaringan tumbuhan. Selain berfungsi sebagai pelindung pantai dari abrasi dan gelombang, mangrove juga berperan sebagai habitat berbagai organisme, daerah pemijahan dan pembesaran biota perairan, serta penyerap dan penyimpan karbon dalam jumlah besar (Krauss *et al.* 2008). Pertumbuhan mangrove sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan yang bekerja secara simultan. Faktor-faktor tersebut meliputi salinitas, pasang surut, ketersediaan nutrien, intensitas cahaya, suhu, serta karakteristik substrat tempat tumbuhnya. Salinitas merupakan salah satu faktor utama yang menentukan distribusi dan pertumbuhan spesies mangrove. Meskipun mangrove tergolong tumbuhan toleran garam *(halofit),* tingkat salinitas yang terlalu tinggi dapat menyebabkan stres fisiologis yang menghambat penyerapan air dan menurunkan laju fotosintesis. Selain itu, frekuensi dan lama genangan akibat pasang surut juga memengaruhi ketersediaan oksigen di dalam tanah dan perkembangan sistem perakaran mangrove. Kondisi genangan yang sesuai memungkinkan pertukaran nutrien berlangsung optimal sehingga mendukung pertumbuhan vegetasi (Krauss *et al.* 2008).

Ketersediaan nutrien, terutama nitrogen (N) dan fosfor (P), juga menjadi faktor penting dalam pertumbuhan mangrove. Nutrien berperan dalam pembentukan jaringan tanaman, aktivitas fotosintesis, dan produksi biomassa. Alongi (2018) menjelaskan bahwa produktivitas mangrove memiliki keterkaitan yang erat dengan ketersediaan nutrien karena unsur-unsur tersebut memengaruhi laju fotosintesis dan pertumbuhan pohon. Kekurangan nutrien dapat membatasi pertumbuhan, sedangkan ketersediaan nutrien yang memadai akan meningkatkan produktivitas primer ekosistem mangrove. Selain itu, faktor cahaya dan suhu turut memengaruhi proses fisiologis tanaman, terutama fotosintesis dan respirasi, yang pada akhirnya menentukan tingkat pertumbuhan vegetasi mangrove Alongi (2018). Karakteristik substrat juga memegang peranan penting dalam pertumbuhan mangrove. Substrat yang kaya bahan

organik dan memiliki tekstur lumpur atau lempung umumnya mampu menyediakan unsur hara yang lebih baik dibandingkan substrat berpasir. Selain itu, substrat yang stabil mendukung perkembangan akar sehingga tanaman dapat tumbuh dengan lebih baik. Oleh karena itu, keberhasilan pertumbuhan mangrove tidak hanya ditentukan oleh satu faktor lingkungan saja, tetapi oleh interaksi kompleks antara kondisi fisik, kimia, dan biologis habitatnya (Krauss *et al.* 2008).

Produktivitas mangrove merupakan kemampuan ekosistem mangrove dalam menghasilkan biomassa melalui proses fotosintesis. Produktivitas ini dapat diukur melalui pertumbuhan pohon, produksi serasah, akumulasi biomassa, maupun penyerapan karbon. Kondisi habitat memiliki hubungan yang sangat erat dengan tingkat produktivitas mangrove karena kualitas habitat menentukan kemampuan tanaman dalam memperoleh sumber daya yang diperlukan untuk pertumbuhan. Habitat yang memiliki kondisi lingkungan optimal, seperti salinitas moderat, ketersediaan nutrien yang cukup, pola pasang surut yang sesuai, serta substrat yang subur, cenderung menghasilkan produktivitas yang lebih tinggi dibandingkan habitat yang mengalami tekanan lingkungan Alongi (2018). Selain itu, kondisi habitat yang baik mendukung produksi serasah yang banyak di lingkungan. Serasah berupa daun, ranting, bunga, dan buah merupakan komponen penting dalam siklus nutrien ekosistem mangrove. Tingginya produksi serasah menunjukkan bahwa proses pertumbuhan dan produktivitas vegetasi berlangsung secara optimal. Sebaliknya, habitat yang mengalami stres lingkungan biasanya menunjukkan penurunan produksi serasah dan biomassa Alongi (2018). Semakin baik kualitas habitat mangrove, semakin tinggi pula produktivitas ekosistem yang dihasilkan, baik dalam bentuk biomassa, produksi serasah, maupun kemampuan menyerap karbon di udara.

C. MATERI

3.1 Pengaruh Faktor Fisik terhadap Pertumbuhan Mangrove

Faktor fisik merupakan salah satu komponen lingkungan yang sangat menentukan pertumbuhan dan perkembangan mangrove. Faktor-faktor fisik yang berpengaruh meliputi salinitas, suhu, intensitas cahaya, pasang surut, genangan air, serta karakteristik substrat. Faktor-faktor tersebut memengaruhi proses fisiologis tanaman seperti fotosintesis, respirasi, penyerapan air, dan penyerapan unsur hara. Oleh karena itu, kondisi fisik habitat yang sesuai akan mendukung pertumbuhan mangrove secara optimal, sedangkan kondisi yang ekstrem dapat menghambat pertumbuhan bahkan menyebabkan kematian bibit mangrove.

3.1.1 Suhu Lingkungan

Suhu lingkungan merupakan salah satu faktor abiotik utama yang memengaruhi pertumbuhan, perkembangan, produktivitas, serta distribusi vegetasi mangrove. Suhu berperan dalam mengendalikan aktivitas enzim, laju metabolisme, penyerapan air dan unsur hara, serta berbagai proses fisiologis tanaman, termasuk fotosintesis dan respirasi. Pada ekosistem mangrove, suhu dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, suhu udara, suhu permukaan air, pasang surut, serta kondisi iklim lokal (Lovelock *et al*., 2016).

Mangrove merupakan tumbuhan halofit yang beradaptasi pada wilayah pesisir tropis dan subtropis sehingga memiliki toleransi terhadap fluktuasi suhu yang relatif tinggi. Namun demikian, perubahan suhu yang terlalu ekstrem tetap dapat menyebabkan stres fisiologis, menurunkan efisiensi fotosintesis, menghambat pertumbuhan, bahkan meningkatkan mortalitas bibit mangrove (Ward *et al*., 2016). Secara umum, mangrove tumbuh optimal pada daerah dengan suhu udara rata-rata sekitar 20–30°C, sedangkan aktivitas fotosintesis daun mencapai kondisi optimum pada kisaran 28–32°C. Pada suhu tersebut aktivitas enzim fotosintesis berlangsung secara efisien sehingga produksi biomassa menjadi maksimal (Ward *et al.,* 2016). Di sisi lain, suhu minimum juga menjadi faktor pembatas persebaran mangrove.

Sebagian besar spesies mangrove memerlukan suhu minimum bulanan sekitar 16°C untuk mempertahankan pertumbuhan normal. Suhu yang lebih rendah dapat menyebabkan kerusakan jaringan akibat pembekuan *(frost injury)*, embolisme pembuluh xilem, hingga kematian tanaman sehingga membatasi penyebaran mangrove pada wilayah lintang tinggi (Lovelock *et al*., 2016). Sebaliknya, apabila suhu daun meningkat melebihi 38–40°C, laju fotosintesis menurun drastis bahkan dapat berhenti akibat kerusakan sistem fotosintesis, denaturasi enzim, meningkatnya fotorespirasi, serta penutupan stomata yang membatasi difusi karbon dioksida ke dalam daun (Ward *et al*., 2016).

Suhu memiliki pengaruh langsung terhadap laju fotosintesis dan respirasi tanaman mangrove. Pada kisaran suhu optimum, peningkatan suhu akan meningkatkan aktivitas enzim yang terlibat dalam reaksi fotosintesis sehingga laju fiksasi karbon meningkat. Kondisi ini mendukung pertumbuhan vegetatif, pembentukan daun, batang, dan akar yang lebih baik (Lovelock *et al.,* 2016). Namun, ketika suhu melebihi kisaran optimum, efisiensi fotosintesis mulai menurun. Suhu tinggi menyebabkan stomata menutup untuk mengurangi kehilangan air melalui transpirasi sehingga penyerapan CO_2 menjadi terbatas. Selain itu, aktivitas enzim Rubisco cenderung meningkat pada proses fotorespirasi dibandingkan karboksilasi sehingga efisiensi pembentukan karbohidrat menurun. Akibatnya, produktivitas primer mangrove juga mengalami penurunan (Ward *et al*., 2016). Sebaliknya, proses respirasi umumnya meningkat seiring kenaikan suhu karena aktivitas metabolisme menjadi lebih cepat. Respirasi yang terlalu tinggi akan meningkatkan penggunaan hasil fotosintesis sebagai sumber energi sehingga keseimbangan karbon tanaman menjadi berkurang. Jika laju respirasi lebih besar daripada laju fotosintesis dalam waktu yang lama, pertumbuhan tanaman akan terhambat dan cadangan karbon akan menurun (Crawley *et al.,* 2024). Dengan demikian, keseimbangan antara fotosintesis dan respirasi sangat menentukan produktivitas ekosistem mangrove. Suhu optimum memungkinkan kedua proses berlangsung secara seimbang, sedangkan suhu ekstrem menyebabkan

ketidakseimbangan metabolisme yang berdampak pada penurunan pertumbuhan tanaman.

Perubahan iklim global menyebabkan peningkatan suhu udara dan suhu permukaan laut yang secara langsung memengaruhi habitat mangrove. Peningkatan suhu diperkirakan akan mengubah struktur komunitas, komposisi spesies, produktivitas, serta distribusi geografis hutan mangrove (Jennerjahn *et al.,* 2017). Pada wilayah subtropis, meningkatnya suhu menyebabkan berkurangnya kejadian embun beku sehingga mangrove dapat memperluas penyebarannya ke daerah lintang yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada wilayah tropis yang telah memiliki suhu tinggi, peningkatan suhu berpotensi menurunkan produktivitas akibat meningkatnya stres panas, kekeringan, dan salinitas yang lebih tinggi akibat evaporasi (Lovelock *et al.,* 2016).

Selain peningkatan suhu, perubahan iklim juga menyebabkan kenaikan muka air laut, perubahan pola curah hujan, serta meningkatnya frekuensi badai tropis. Kombinasi faktor-faktor tersebut dapat mengurangi luas habitat mangrove, menghambat regenerasi alami, mempercepat erosi pesisir, serta mengubah fungsi ekologis mangrove sebagai penyimpan karbon (Gilman *et al*., 2008; Ward *et al.,* 2016). Dalam jangka panjang, peningkatan suhu yang terus berlangsung diperkirakan akan memengaruhi kemampuan mangrove dalam menyerap karbon atmosfer. Meskipun peningkatan konsentrasi CO_2 dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dan produktivitas pada beberapa spesies, manfaat tersebut dapat berkurang apabila suhu melebihi batas toleransi fisiologis tanaman (Lovelock *et al.,* 2016).

3.1.2 Intensitas Cahaya Matahari

Intensitas cahaya matahari merupakan salah satu faktor lingkungan yang sangat penting dalam mengendalikan pertumbuhan dan produktivitas ekosistem mangrove. Cahaya berfungsi sebagai sumber energi utama dalam proses fotosintesis, yaitu proses pembentukan senyawa organik dari karbon dioksida dan air dengan bantuan energi cahaya. Besarnya intensitas cahaya yang diterima oleh vegetasi mangrove

dipengaruhi oleh letak geografis, kondisi cuaca, musim, kerapatan tajuk (canopy), serta posisi tanaman di dalam zonasi hutan mangrove (Alongi, 2014). Pada habitat alaminya, mangrove umumnya tumbuh di daerah pesisir tropis yang menerima intensitas penyinaran matahari relatif tinggi sepanjang tahun. Kondisi tersebut mendukung tingginya produktivitas primer ekosistem mangrove dibandingkan banyak ekosistem pesisir lainnya (Tomlinson, 2016). Selain memengaruhi proses fisiologis tanaman, intensitas cahaya juga menentukan struktur komunitas mangrove melalui pengaruhnya terhadap regenerasi, pertumbuhan bibit, serta distribusi spesies pada berbagai tingkat naungan. Oleh karena itu, cahaya menjadi salah satu faktor pembatas utama pada fase awal pertumbuhan mangrove (Krauss *et al.,* 2008).

Cahaya matahari merupakan sumber energi utama yang menggerakkan reaksi terang dalam fotosintesis. Energi cahaya diserap oleh pigmen klorofil yang terdapat pada kloroplas untuk menghasilkan ATP dan NADPH, yang selanjutnya digunakan dalam siklus Calvin untuk mengikat karbon dioksida menjadi karbohidrat (Taiz *et al*., 2018).

Pada tanaman mangrove, peningkatan intensitas cahaya hingga mencapai titik optimum akan meningkatkan laju fotosintesis karena semakin banyak energi yang tersedia untuk proses fiksasi karbon. Akan tetapi, setelah mencapai titik jenuh cahaya (*light saturation point*), peningkatan intensitas cahaya tidak lagi meningkatkan laju fotosintesis karena kapasitas enzim fotosintesis telah mencapai maksimum (Lovelock *et al.*, 2016). Intensitas cahaya yang terlalu rendah akibat naungan yang berlebihan, laju fotosintesis akan menurun karena energi yang tersedia untuk reaksi fotosintesis menjadi terbatas. Penurunan laju fotosintesis menyebabkan produksi karbohidrat berkurang sehingga pertumbuhan tanaman menjadi lebih lambat (Taiz *et al.,* 2018). Di sisi lain, intensitas cahaya yang terlalu tinggi dapat menyebabkan fotoinhibisi, yaitu penurunan efisiensi fotosistem II akibat kerusakan pigmen fotosintesis dan meningkatnya pembentukan spesies oksigen reaktif (*reactive oxygen species*). Untuk mengurangi dampak tersebut, mangrove memiliki mekanisme fotoproteksi seperti disipasi energi berlebih melalui

siklus xantofil dan peningkatan aktivitas antioksidan (Lovelock *et al*., 2016).

Mangrove memiliki berbagai adaptasi morfologi dan fisiologi untuk mempertahankan efisiensi fotosintesis pada kondisi cahaya yang berubah-ubah. Salah satu adaptasi tersebut adalah kemampuan mengubah orientasi daun sehingga paparan radiasi matahari berlebih dapat dikurangi, terutama pada siang hari ketika intensitas cahaya matahari mencapai puncaknya. Selain itu, mangrove juga mampu menyesuaikan kandungan klorofil dan struktur anatomi daun sesuai kondisi pencahayaan. Daun yang tumbuh pada kondisi teduh umumnya memiliki kandungan klorofil lebih tinggi, luas daun lebih besar, dan ketebalan daun lebih tipis untuk meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya. Sebaliknya, daun yang berkembang pada lingkungan terbuka cenderung lebih tebal dengan jaringan palisade yang berkembang lebih baik sehingga mampu mengurangi kerusakan akibat radiasi matahari tinggi.

Beberapa spesies mangrove, seperti *Rhizophora mucronata*, *Rhizophora apiculata*, dan *Bruguiera gymnorrhiza*, menunjukkan plastisitas fisiologis yang tinggi terhadap variasi cahaya sehingga mampu tumbuh baik pada kondisi terbuka maupun di bawah naungan sedang. Sebaliknya, spesies pionir seperti *Avicennia marina* umumnya membutuhkan intensitas cahaya yang lebih tinggi untuk memperoleh pertumbuhan optimal (Tomlinson, 2016; Krauss *et al.,* 2008). Kemampuan adaptasi tersebut memungkinkan mangrove tetap mempertahankan produktivitas pada lingkungan yang mengalami perubahan tutupan tajuk akibat regenerasi alami maupun gangguan lingkungan.

Naungan merupakan faktor yang sangat memengaruhi keberhasilan regenerasi mangrove, terutama pada fase perkecambahan dan pertumbuhan bibit. Tingkat naungan menentukan jumlah cahaya yang diterima tanaman sehingga berpengaruh terhadap fotosintesis, akumulasi biomassa, serta perkembangan akar dan tajuk (Krauss *et al.,* 2008).

Naungan ringan hingga sedang pada umumnya memberikan kondisi mikroklimat yang lebih baik bagi bibit mangrove karena mampu menurunkan suhu udara, mengurangi

kehilangan air melalui transpirasi, serta menjaga kelembapan tanah. Kondisi yang mendukung dapat meningkatkan peluang hidup bibit mangrove, terutama pada daerah dengan intensitas cahaya serta suhu yang tinggi. Sebaliknya, naungan yang terlalu rapat menyebabkan intensitas cahaya yang diterima bibit menjadi sangat rendah sehingga laju fotosintesis tidak mampu memenuhi kebutuhan respirasi tanaman. Akibatnya, pertumbuhan tinggi, diameter batang, jumlah daun, dan biomassa bibit mengalami penurunan (Taiz *et al.,* 2018).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa bibit *Rhizophora* memiliki pertumbuhan terbaik pada kondisi naungan sekitar 30–50%, sedangkan *Avicennia marina* umumnya menunjukkan pertumbuhan optimal pada kondisi tanpa naungan atau dengan intensitas cahaya yang lebih tinggi karena spesies ini bersifat lebih toleran terhadap radiasi matahari langsung (Krauss *et al.,* 2008; Alongi, 2014). Dengan demikian, pengaturan tingkat naungan menjadi salah satu aspek penting dalam kegiatan rehabilitasi dan pembibitan mangrove. Pemberian naungan yang sesuai mampu meningkatkan tingkat kelangsungan hidup, mempercepat pertumbuhan, dan menghasilkan bibit dengan kualitas fisiologis yang lebih baik.

3.1.3 Pasang Surut Air Laut

Pasang surut air laut merupakan fenomena naik dan turunnya permukaan air laut secara periodik akibat gaya gravitasi Bulan dan Matahari serta rotasi Bumi. Fenomena ini menjadi salah satu faktor lingkungan terpenting yang mengendalikan kondisi fisik dan biologis ekosistem mangrove karena menentukan frekuensi, durasi, dan kedalaman genangan yang dialami vegetasi mangrove (Alongi, 2009). Pada ekosistem mangrove, pasang surut berperan dalam mengatur distribusi sedimen, salinitas, ketersediaan oksigen tanah, suplai unsur hara, serta penyebaran propagul. Air pasang membawa sedimen halus dan bahan organik ke dalam kawasan mangrove, sedangkan air surut membantu mengeluarkan sisa metabolisme dan memperbarui kualitas air di sekitar perakaran. Oleh karena itu, dinamika pasang surut sangat memengaruhi produktivitas dan

keberlangsungan ekosistem mangrove (Tomlinson, 2016).Selain itu, pasang surut juga menentukan zonasi vegetasi mangrove.

Setiap spesies memiliki toleransi yang berbeda terhadap lama dan frekuensi genangan sehingga distribusi spesies di sepanjang gradien pasang surut membentuk pola zonasi yang khas. Misalnya, spesies dari genus *Avicennia* umumnya menempati zona yang lebih dekat dengan laut, sedangkan *Bruguiera* dan *Xylocarpus* lebih banyak ditemukan pada bagian daratan yang mengalami genangan lebih jarang (Duke, 1992).

Karakteristik pasang surut di kawasan mangrove dipengaruhi oleh kondisi oseanografi dan geomorfologi pantai. Berdasarkan pola harian, pasang surut dapat dibedakan menjadi pasang surut harian tunggal (*diurnal*), harian ganda (*semidiurnal*), dan campuran (*mixed tide*). Pola tersebut menentukan intensitas genangan yang diterima oleh hutan mangrove (Alongi, 2009). Pada sebagian besar kawasan mangrove tropis, vegetasi mengalami genangan secara berkala sesuai siklus pasang surut. Lama genangan dapat berlangsung beberapa jam hingga lebih dari setengah hari, tergantung pada amplitudo pasang, topografi pantai, dan elevasi substrat. Variasi ini menciptakan gradien lingkungan yang memengaruhi komposisi spesies, pertumbuhan, serta regenerasi alami mangrove (Krauss *et al*., 2008).

Selain frekuensi genangan, tinggi muka air pasang juga memengaruhi proses sedimentasi. Kawasan yang mengalami pasang tinggi secara rutin cenderung menerima suplai sedimen lebih besar sehingga mampu mendukung pembentukan substrat baru bagi pertumbuhan mangrove. Sebaliknya, perubahan pola pasang surut akibat reklamasi, pembangunan pesisir, atau perubahan iklim dapat mengganggu keseimbangan hidrologi dan menurunkan kesehatan ekosistem mangrove (Alongi, 2015).

Frekuensi genangan merupakan salah satu faktor ekologis utama yang menentukan pertumbuhan dan produktivitas mangrove. Genangan yang terjadi secara periodik menyediakan air, unsur hara, dan sedimen yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Selain itu, pasang surut membantu mengurangi akumulasi garam pada permukaan tanah melalui proses pencucian (*flushing*) sehingga mengurangi tekanan

osmotik pada akar (Krauss *et al.,* 2008). Namun demikian, frekuensi genangan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kondisi tanah menjadi sangat anaerob karena terbatasnya difusi oksigen ke dalam substrat. Kondisi tersebut menghambat respirasi akar, mengurangi penyerapan unsur hara, dan meningkatkan akumulasi senyawa toksik seperti sulfida yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman (Alongi, 2009). Sebaliknya, genangan yang terlalu jarang juga kurang menguntungkan karena menyebabkan peningkatan salinitas tanah akibat penguapan, berkurangnya suplai sedimen, dan menurunnya kelembapan substrat. Kondisi ini dapat menghambat pertumbuhan akar, mengurangi luas daun, serta menurunkan biomassa tanaman (Lovelock *et al*., 2016).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa setiap spesies mangrove memiliki kisaran frekuensi genangan yang berbeda. *Rhizophora mucronata* dan *Rhizophora apiculata* umumnya tumbuh optimal pada daerah yang mengalami genangan secara teratur, sedangkan *Avicennia marina* memiliki toleransi yang lebih tinggi terhadap variasi genangan maupun kondisi substrat yang lebih kering (Tomlinson, 2016). Pada fase pembibitan, frekuensi genangan yang sesuai mampu meningkatkan pertumbuhan tinggi tanaman, diameter batang, jumlah daun, dan perkembangan sistem perakaran. Sebaliknya, genangan yang terlalu lama dapat menurunkan laju fotosintesis akibat terbatasnya suplai oksigen ke jaringan akar sehingga pertumbuhan bibit menjadi lebih lambat (Krauss *et al.,* 2008).

Mangrove memiliki berbagai adaptasi morfologi, anatomi, dan fisiologi yang memungkinkan tumbuh pada lingkungan dengan genangan berkala dan tanah yang miskin oksigen. Salah satu adaptasi paling khas adalah perkembangan akar udara (*aerial roots*) yang berfungsi meningkatkan pertukaran gas antara jaringan akar dan atmosfer (Tomlinson, 2016). Spesies dari genus *Avicennia* dan *Sonneratia* memiliki akar napas (*pneumatophore*) yang tumbuh tegak ke atas permukaan tanah untuk menyerap oksigen selama kondisi surut. Sementara itu, spesies *Rhizophora* memiliki akar tunjang (*stilt roots*) yang tidak hanya berfungsi sebagai penyangga mekanis, tetapi juga membantu proses aerasi pada sistem perakaran (Alongi, 2009).

Selain adaptasi akar, jaringan akar mangrove memiliki ruang antar sel yang berkembang baik (*aerenchyma*), sehingga oksigen dapat ditransportasikan dari bagian atas tanaman menuju akar yang terendam. Adaptasi ini memungkinkan respirasi akar tetap berlangsung meskipun substrat berada dalam kondisi anaerob (Taiz *et al.,* 2018).

Mangrove juga memiliki kemampuan menyesuaikan metabolisme selama kondisi kekurangan oksigen. Pada saat genangan berlangsung lama, beberapa spesies meningkatkan respirasi anaerob sebagai mekanisme sementara untuk mempertahankan produksi energi hingga kondisi lingkungan kembali normal (Krauss *et al.,* 2008).

Selain itu, kemampuan menghasilkan akar adventif baru setelah terjadi sedimentasi maupun perubahan elevasi substrat merupakan bentuk adaptasi penting terhadap perubahan kondisi pasang surut. Adaptasi tersebut memungkinkan mangrove tetap mampu memperoleh oksigen dan mempertahankan kestabilan tanaman pada lingkungan pesisir yang sangat dinamis (Alongi, 2015). Secara keseluruhan, berbagai bentuk adaptasi tersebut menjadikan mangrove sebagai salah satu kelompok tumbuhan yang paling toleran terhadap kondisi tergenang. Adaptasi morfologi, anatomi, dan fisiologi yang dimiliki memungkinkan mangrove mempertahankan pertumbuhan dan produktivitas pada habitat pesisir yang secara periodik mengalami pasang surut.

3.1.4 Jenis dan Tekstur Substrat

Substrat merupakan media tumbuh utama bagi vegetasi mangrove yang berfungsi sebagai tempat berkembangnya sistem perakaran, penyimpan air, serta sumber unsur hara bagi tanaman. Karakteristik substrat sangat menentukan keberhasilan pertumbuhan, regenerasi, dan distribusi spesies mangrove karena memengaruhi stabilitas akar, aerasi tanah, kapasitas menahan air, serta ketersediaan nutrien (Alongi, 2009). Substrat lumpur merupakan tipe substrat yang paling umum dijumpai pada hutan mangrove, terutama di daerah estuari, muara sungai, dan teluk yang memiliki energi gelombang rendah. Lumpur tersusun atas partikel halus yang didominasi oleh lanau

(*silt*) dan lempung (*clay*) dengan kandungan bahan organik yang relatif tinggi. Karakteristik tersebut menyebabkan lumpur memiliki kemampuan menyimpan air dan unsur hara yang sangat baik sehingga mendukung pertumbuhan mangrove secara optimal (Tomlinson, 2016). Namun demikian, substrat lumpur umumnya memiliki porositas rendah sehingga difusi oksigen ke dalam tanah berlangsung lambat. Akibatnya, kondisi tanah sering bersifat anaerob dan mengandung senyawa sulfida hasil aktivitas bakteri pereduksi sulfat. Meskipun demikian, sebagian besar spesies mangrove telah beradaptasi terhadap kondisi tersebut melalui perkembangan akar udara dan jaringan aerenkima (Alongi, 2009).

Substrat pasir tersusun atas partikel berukuran lebih besar dibandingkan lumpur sehingga memiliki porositas dan permeabilitas yang tinggi. Kondisi ini menyebabkan drainase berlangsung cepat serta meningkatkan sirkulasi oksigen di sekitar akar. Akan tetapi, kemampuan pasir dalam menyimpan air dan unsur hara relatif rendah karena ukuran porinya besar sehingga nutrien mudah tercuci oleh aliran air pasang maupun hujan (Brady & Weil, 2017). Mangrove yang tumbuh pada substrat berpasir umumnya memiliki pertumbuhan lebih lambat dibandingkan pada substrat berlumpur karena keterbatasan unsur hara dan kapasitas menahan air. Meskipun demikian, beberapa spesies seperti *Avicennia marina* mampu beradaptasi dengan baik pada substrat berpasir berkat sistem perakaran yang luas dan efisiensi penyerapan air yang tinggi (Tomlinson, 2016).

Substrat lempung memiliki ukuran partikel yang sangat halus sehingga mampu mengikat air dan unsur hara dalam jumlah besar. Kandungan mineral liat yang tinggi menyebabkan kapasitas tukar kation (*cation exchange capacity*) pada tanah lempung relatif tinggi sehingga unsur hara seperti kalium, kalsium, magnesium, dan amonium lebih mudah dipertahankan di dalam tanah (Brady & Weil, 2017). Di sisi lain, tanah lempung memiliki aerasi yang buruk akibat ruang pori yang kecil sehingga akar tanaman berpotensi mengalami kekurangan oksigen apabila genangan berlangsung terlalu lama. Oleh karena itu, keberhasilan pertumbuhan mangrove pada substrat lempung sangat

dipengaruhi oleh kemampuan adaptasi sistem perakaran terhadap kondisi anaerob (Alongi, 2009). Karakteristik substrat berpengaruh langsung terhadap perkembangan sistem perakaran mangrove. Struktur, tekstur, porositas, kadar air, serta kandungan bahan organik menentukan kemampuan akar dalam menembus tanah, memperoleh oksigen, dan menyerap unsur hara (Krauss et al., 2008).

Pada substrat berlumpur, akar mangrove berkembang secara luas dengan banyak akar lateral karena tekstur tanah yang lunak memudahkan penetrasi akar. Akan tetapi, rendahnya kandungan oksigen dalam lumpur mendorong terbentuknya akar udara sebagai mekanisme adaptasi terhadap kondisi anaerob (Tomlinson, 2016). Sebaliknya, pada substrat berpasir, akar mampu memperoleh oksigen lebih mudah karena aerasi tanah lebih baik. Namun, rendahnya kapasitas tanah dalam menyimpan air menyebabkan sistem perakaran berkembang lebih dalam atau lebih luas untuk memperoleh air dan nutrien yang tersedia dalam jumlah terbatas (Brady & Weil, 2017). Jenis substrat juga memengaruhi bentuk akar khas pada berbagai spesies mangrove. *Rhizophora* memiliki akar tunjang (*stilt roots*) yang memberikan kestabilan pada substrat lunak dan berlumpur, sedangkan *Avicennia* dan *Sonneratia* membentuk akar napas (*pneumatophore*) yang berfungsi menyerap oksigen dari udara ketika substrat berada dalam kondisi tergenang (Tomlinson, 2016). Selain itu, kandungan bahan organik yang tinggi pada substrat berlumpur meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam dekomposisi serasah dan mineralisasi unsur hara. Aktivitas tersebut mendukung perkembangan sistem perakaran serta meningkatkan efisiensi penyerapan nutrien oleh tanaman mangrove (Alongi, 2009).

Ketersediaan unsur hara merupakan salah satu faktor utama yang menentukan produktivitas ekosistem mangrove. Kandungan nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), serta unsur mikro dalam substrat dipengaruhi oleh tekstur tanah, kandungan bahan organik, kondisi redoks, dan dinamika pasang surut (Alongi, 2009). Substrat berlumpur umumnya memiliki kandungan bahan organik tertinggi sehingga menyediakan nitrogen dan fosfor dalam jumlah lebih besar dibandingkan substrat berpasir.

Akumulasi serasah daun, ranting, dan akar yang mengalami dekomposisi menjadi sumber utama nutrien bagi vegetasi mangrove. Oleh karena itu, kawasan mangrove dengan substrat lumpur biasanya menunjukkan produktivitas primer yang lebih tinggi (Alongi, 2014). Sebaliknya, substrat berpasir memiliki kandungan bahan organik dan kapasitas tukar kation yang rendah sehingga unsur hara lebih mudah tercuci oleh air pasang maupun hujan. Akibatnya, tanaman yang tumbuh pada substrat ini sering mengalami keterbatasan nitrogen dan fosfor sehingga pertumbuhan vegetatif berlangsung lebih lambat (Brady & Weil, 2017).

Pada substrat lempung, ketersediaan unsur hara relatif tinggi karena partikel liat mampu mengadsorpsi ion-ion hara dan mengurangi kehilangan nutrien akibat pencucian. Namun demikian, kondisi anaerob pada tanah lempung dapat memengaruhi bentuk kimia beberapa unsur hara, khususnya fosfor dan besi, sehingga memengaruhi ketersediaannya bagi tanaman (Taiz *et al.,* 2018). Selain jenis substrat, dinamika pasang surut juga berperan dalam memperbarui kandungan nutrien melalui deposisi sedimen dan bahan organik dari laut maupun sungai. Interaksi antara tekstur substrat, aktivitas mikroorganisme, dan proses hidrologi menjadikan ekosistem mangrove sebagai salah satu ekosistem pesisir yang memiliki siklus hara sangat dinamis (Alongi, 2009).

Secara keseluruhan, substrat berlumpur merupakan media tumbuh yang paling mendukung pertumbuhan mangrove karena memiliki kandungan bahan organik tinggi, kapasitas penyimpanan air yang baik, serta ketersediaan unsur hara yang lebih besar dibandingkan substrat berpasir. Meskipun demikian, setiap spesies mangrove memiliki kemampuan adaptasi yang berbeda terhadap karakteristik substrat sehingga distribusi vegetasi mangrove sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik dan kimia tanah.

3.2 Pengaruh Faktor Kimia terhadap Pertumbuhan Mangrove

Faktor kimia merupakan salah satu komponen lingkungan yang berperan penting dalam menentukan pertumbuhan,

perkembangan, dan produktivitas tanaman mangrove. Beberapa faktor kimia utama yang memengaruhi pertumbuhan mangrove meliputi salinitas, derajat keasaman (pH), kandungan oksigen terlarut, unsur hara, serta kandungan bahan organik pada substrat. Faktor-faktor tersebut memengaruhi berbagai proses fisiologis tanaman, seperti penyerapan air dan unsur hara, aktivitas enzim, fotosintesis, respirasi, serta metabolisme sel (Alongi, 2009). Setiap spesies mangrove memiliki tingkat toleransi yang berbeda terhadap kondisi kimia lingkungannya. Kondisi kimia yang berada pada kisaran optimum akan mendukung pertumbuhan akar, batang, dan daun serta meningkatkan produktivitas primer. Sebaliknya, kondisi kimia yang tidak sesuai, seperti salinitas yang terlalu tinggi, pH yang terlalu asam atau basa, serta rendahnya ketersediaan unsur hara, dapat menyebabkan stres fisiologis yang menghambat pertumbuhan dan menurunkan kemampuan regenerasi mangrove (Tomlinson, 2016). Selain memengaruhi pertumbuhan individu, faktor kimia juga berperan dalam menentukan komposisi spesies, zonasi vegetasi, dan fungsi ekologis ekosistem mangrove. Oleh karena itu, pemahaman mengenai kondisi kimia lingkungan menjadi aspek penting dalam pengelolaan, konservasi, dan rehabilitasi hutan mangrove agar pertumbuhan tanaman dapat berlangsung secara optimal (Krauss *et al.,* 2008).

3.2.1 Salinitas

Salinitas merupakan konsentrasi total garam terlarut di dalam air atau tanah yang umumnya dinyatakan dalam satuan *practical salinity unit* (PSU) atau bagian per seribu (‰). Salinitas merupakan salah satu faktor kimia utama yang mengendalikan pertumbuhan, distribusi, produktivitas, dan komposisi spesies mangrove karena memengaruhi keseimbangan osmotik, penyerapan air, serta proses fisiologis tanaman (Alongi, 2009). Pada ekosistem mangrove, salinitas dipengaruhi oleh interaksi antara air laut, air tawar dari sungai, curah hujan, pasang surut, penguapan, dan karakteristik topografi pesisir. Oleh karena itu, nilai salinitas di kawasan mangrove sangat bervariasi, mulai dari kondisi hampir tawar di daerah muara hingga lebih dari 40‰ pada kawasan pesisir yang mengalami evaporasi tinggi (Tomlinson, 2016). Perubahan salinitas akan memengaruhi

tekanan osmotik antara tanah dan akar tanaman. Ketika salinitas meningkat, tanaman memerlukan energi lebih besar untuk menyerap air karena potensial air di lingkungan menjadi lebih rendah. Kondisi tersebut dapat menyebabkan stres osmotik yang berdampak pada penurunan pertumbuhan apabila berlangsung dalam waktu lama (Parida & Jha, 2010).

Mangrove dikenal sebagai tumbuhan halofit, yaitu kelompok tumbuhan yang mampu tumbuh pada lingkungan dengan kadar garam relatif tinggi. Meskipun demikian, setiap spesies memiliki kisaran salinitas optimum yang berbeda sesuai kemampuan adaptasi fisiologisnya (Tomlinson, 2016). Secara umum, mangrove dapat tumbuh pada kisaran salinitas sekitar 5–35‰, sedangkan pertumbuhan optimal sebagian besar spesies terjadi pada kisaran 15–25‰. Pada kisaran tersebut, keseimbangan antara penyerapan air, aktivitas fotosintesis, dan metabolisme tanaman dapat berlangsung secara efisien sehingga mendukung pertumbuhan biomassa yang maksimal (Alongi, 2009). Beberapa spesies, seperti *Rhizophora mucronata* dan *Rhizophora apiculata*, umumnya menunjukkan pertumbuhan terbaik pada salinitas sedang sekitar 15–25‰, sedangkan *Avicennia marina* memiliki toleransi yang lebih tinggi dan masih mampu tumbuh pada salinitas melebihi 40‰ karena memiliki mekanisme adaptasi fisiologis yang lebih efektif terhadap cekaman garam (Parida & Jha, 2010). Apabila salinitas terlalu rendah dalam jangka waktu lama, beberapa spesies mangrove dapat mengalami penurunan daya saing terhadap tumbuhan daratan. Sebaliknya, salinitas yang terlalu tinggi meningkatkan tekanan osmotik sehingga penyerapan air menjadi lebih sulit, menghambat pertumbuhan, dan menurunkan produktivitas tanaman (Krauss *et al*., 2008).

Mangrove memiliki berbagai adaptasi morfologi, anatomi, dan fisiologi yang memungkinkan bertahan hidup pada lingkungan dengan kadar garam tinggi. Salah satu mekanisme utama adalah eksklusi garam (*salt exclusion*), yaitu kemampuan akar menyaring sebagian besar ion garam sehingga hanya sedikit garam yang masuk ke jaringan tanaman. Mekanisme ini banyak ditemukan pada genus *Rhizophora* (Tomlinson, 2016). Sebaliknya, beberapa spesies seperti *Avicennia marina* dan

Aegiceras corniculatum memiliki kelenjar garam (*salt glands*) pada permukaan daun yang berfungsi mengeluarkan kelebihan garam dari dalam jaringan tanaman. Kristal garam yang dikeluarkan melalui kelenjar tersebut sering terlihat menempel pada permukaan daun (Parida & Jha, 2010).

Mangrove juga melakukan penyesuaian osmotik (*osmotic adjustment*) dengan mengakumulasi senyawa organik seperti prolin, glisin betain, dan berbagai gula terlarut di dalam sel. Senyawa-senyawa tersebut membantu mempertahankan tekanan turgor sehingga sel tetap mampu menyerap air meskipun berada pada lingkungan dengan salinitas tinggi (Flowers & Colmer, 2008). Selain itu, daun mangrove umumnya memiliki kutikula yang tebal, jaringan sukulen, dan stomata yang mampu mengatur kehilangan air melalui transpirasi. Adaptasi tersebut membantu menjaga keseimbangan air di dalam jaringan tanaman selama mengalami cekaman salinitas. Mangrove juga memiliki kemampuan mengalokasikan kelebihan garam ke daun yang lebih tua. Daun tersebut kemudian mengalami gugur sehingga sebagian garam dikeluarkan dari tubuh tanaman. Mekanisme ini merupakan salah satu bentuk adaptasi fisiologis yang penting untuk mempertahankan keseimbangan ion dalam jaringan (Tomlinson, 2016).

Perubahan salinitas merupakan salah satu faktor lingkungan yang sangat memengaruhi pertumbuhan mangrove. Peningkatan salinitas menyebabkan tekanan osmotik tanah meningkat sehingga kemampuan akar menyerap air menurun. Akibatnya, tanaman mengalami stres fisiologis yang ditandai dengan berkurangnya laju fotosintesis, penurunan pembentukan daun, serta perlambatan pertumbuhan batang dan akar (Parida & Jha, 2010).

Salinitas yang tinggi juga meningkatkan kebutuhan energi tanaman untuk mempertahankan keseimbangan ion dan melakukan penyesuaian osmotik. Energi yang seharusnya digunakan untuk pertumbuhan dialihkan untuk mempertahankan fungsi fisiologis sehingga produktivitas tanaman menjadi lebih rendah (Alongi, 2009). Pada fase pembibitan, perubahan salinitas memberikan pengaruh yang lebih besar dibandingkan pada tanaman dewasa. Bibit mangrove

umumnya lebih sensitif terhadap cekaman garam karena sistem perakaran dan mekanisme fisiologisnya belum berkembang secara sempurna. Salinitas yang terlalu tinggi dapat menghambat perkecambahan propagul, menurunkan tinggi tanaman, mengurangi jumlah daun, serta menghambat perkembangan biomassa akar (Krauss *et al.,* 2008).

Sebaliknya, penurunan salinitas akibat meningkatnya masukan air tawar juga dapat memengaruhi distribusi spesies mangrove. Beberapa spesies yang beradaptasi pada lingkungan bersalinitas tinggi dapat mengalami penurunan daya saing apabila salinitas terus menurun sehingga komposisi vegetasi berubah. Oleh karena itu, stabilitas salinitas menjadi faktor penting dalam menjaga struktur dan fungsi ekosistem mangrove (Alongi, 2015). Dalam konteks perubahan iklim, kenaikan muka air laut, perubahan pola curah hujan, dan meningkatnya evaporasi diperkirakan akan mengubah pola salinitas di kawasan pesisir. Perubahan tersebut berpotensi memengaruhi produktivitas, regenerasi, serta distribusi geografis mangrove apabila melebihi batas toleransi fisiologis masing-masing spesies (Lovelock *et al.,* 2016).

3.2.2 Derajat Keasaman (pH)

Derajat keasaman (pH) merupakan ukuran konsentrasi ion hidrogen (H^+) dalam suatu larutan yang menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan tanah maupun air. Nilai pH berkisar antara 0–14, dengan pH 7 bersifat netral, pH di bawah 7 bersifat asam, dan pH di atas 7 bersifat basa. Pada ekosistem mangrove, pH merupakan salah satu faktor kimia yang sangat penting karena memengaruhi aktivitas mikroorganisme tanah, proses dekomposisi bahan organik, kelarutan mineral, serta ketersediaan unsur hara yang dibutuhkan tanaman (Alongi, 2009). Nilai pH tanah mangrove dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis substrat, kandungan bahan organik, kondisi pasang surut, proses oksidasi dan reduksi, serta masukan air laut dan air tawar. Tanah mangrove umumnya memiliki pH yang bervariasi dari agak asam hingga netral, meskipun pada beberapa lokasi dapat menjadi sangat asam akibat oksidasi mineral sulfida yang membentuk tanah sulfat masam (*acid sulfate soils*) (Hossain

& Nuruddin, 2016). Selain memengaruhi kondisi kimia tanah, pH juga berperan dalam menentukan aktivitas fisiologis tanaman mangrove. Perubahan pH yang terlalu ekstrem dapat menghambat pertumbuhan akar, mengganggu penyerapan unsur hara, serta menurunkan aktivitas enzim yang berperan dalam metabolisme tanaman (Taiz *et al.,* 2018).

Mangrove mampu tumbuh pada kisaran pH yang cukup luas karena memiliki kemampuan beradaptasi terhadap berbagai kondisi lingkungan pesisir. Namun demikian, sebagian besar spesies mangrove menunjukkan pertumbuhan yang optimal pada tanah dengan pH sekitar **6,5–8,0**, yaitu kondisi agak asam hingga netral. Pada kisaran pH tersebut, sebagian besar unsur hara makro dan mikro berada dalam bentuk yang mudah diserap oleh akar sehingga mendukung pertumbuhan vegetatif dan perkembangan sistem perakaran (Alongi, 2009). Apabila pH tanah turun di bawah sekitar **5,5**, kelarutan ion aluminium (Al^{3+}), besi (Fe), dan mangan (Mn) meningkat sehingga dapat bersifat toksik bagi akar tanaman. Selain itu, ketersediaan fosfor menurun karena terikat oleh aluminium dan besi, sehingga menghambat pertumbuhan tanaman (Brady & Weil, 2017). Sebaliknya, pada kondisi pH yang terlalu tinggi (lebih dari sekitar **8,5**), beberapa unsur hara penting seperti fosfor, besi, seng, dan mangan menjadi kurang tersedia karena mengendap dalam bentuk senyawa yang sukar larut. Akibatnya, tanaman dapat mengalami defisiensi unsur hara meskipun kandungan total unsur tersebut di dalam tanah cukup tinggi (Brady & Weil, 2017). Walaupun beberapa spesies mangrove mampu bertahan pada kondisi pH ekstrem, pertumbuhan optimal umumnya terjadi ketika nilai pH berada pada kisaran yang mendukung aktivitas mikroorganisme tanah dan proses siklus hara secara efisien (Reef *et al.*, 2010).

Nilai pH merupakan salah satu faktor utama yang menentukan ketersediaan dan penyerapan unsur hara oleh tanaman mangrove. pH memengaruhi bentuk kimia unsur hara di dalam tanah sehingga menentukan kemudahan unsur tersebut diserap oleh sistem perakaran (Brady & Weil, 2017). Pada kondisi pH mendekati netral, unsur nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg) umumnya

tersedia dalam jumlah yang cukup untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Selain itu, aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam dekomposisi serasah dan mineralisasi bahan organik berlangsung lebih optimal sehingga meningkatkan pelepasan unsur hara ke dalam tanah. Sebaliknya, pada tanah yang terlalu asam, aktivitas mikroorganisme pengurai menurun sehingga proses dekomposisi bahan organik berlangsung lebih lambat. Kondisi tersebut menyebabkan pelepasan nitrogen dan fosfor menjadi terbatas serta menurunkan efisiensi penyerapan unsur hara oleh akar mangrove (Reef *et al*., 2010).

Nilai pH juga memengaruhi kapasitas tukar kation (*cation exchange capacity* atau CEC), yaitu kemampuan tanah mengikat dan menyediakan ion-ion hara bagi tanaman. Tanah dengan pH yang sesuai umumnya memiliki kapasitas tukar kation yang lebih baik sehingga kehilangan unsur hara akibat pencucian dapat dikurangi (Brady & Weil, 2017). Pada ekosistem mangrove, hubungan antara pH, salinitas, kondisi redoks, dan dinamika pasang surut membentuk sistem yang kompleks dalam mengendalikan ketersediaan unsur hara. Perubahan salah satu faktor tersebut dapat memengaruhi keseimbangan nutrisi tanah dan akhirnya berdampak pada produktivitas mangrove (Alongi, 2009). Secara keseluruhan, pH yang berada pada kisaran optimum akan meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara, memperbaiki perkembangan sistem perakaran, mendukung aktivitas mikroorganisme tanah, serta meningkatkan laju pertumbuhan dan produktivitas mangrove. Sebaliknya, kondisi pH yang terlalu rendah maupun terlalu tinggi dapat menyebabkan ketidakseimbangan nutrisi dan menghambat pertumbuhan tanaman.

3.2.3 Ketersediaan Unsur Hara

Ketersediaan unsur hara merupakan salah satu faktor kimia yang sangat menentukan pertumbuhan, produktivitas, dan keberlanjutan ekosistem mangrove. Unsur hara berfungsi sebagai penyusun jaringan tanaman, aktivator enzim, serta pendukung berbagai proses fisiologis seperti fotosintesis, respirasi, sintesis protein, dan pembentukan biomassa. Pada ekosistem mangrove, ketersediaan unsur hara dipengaruhi oleh

jenis substrat, kandungan bahan organik, dinamika pasang surut, kondisi redoks tanah, aktivitas mikroorganisme, serta masukan nutrien dari sungai dan laut (Alongi, 2009).

Tanah mangrove umumnya memiliki kandungan bahan organik yang tinggi, namun unsur hara yang tersedia bagi tanaman sering kali terbatas karena kondisi tanah yang anaerob memperlambat proses mineralisasi. Selain itu, ketersediaan unsur hara dapat sangat bervariasi antar lokasi sehingga nitrogen (N) dan fosfor (P) sering menjadi faktor pembatas utama bagi pertumbuhan mangrove. Mangrove memiliki berbagai mekanisme konservasi nutrien, seperti efisiensi penggunaan nitrogen, resorpsi unsur hara sebelum daun gugur, serta rasio akar terhadap tajuk yang tinggi untuk meningkatkan penyerapan unsur hara dari tanah (Reef *et al.,* 2010). Nitrogen merupakan unsur hara makro esensial yang dibutuhkan dalam jumlah terbesar oleh tanaman mangrove. Unsur ini merupakan komponen utama penyusun asam amino, protein, asam nukleat (DNA dan RNA), klorofil, serta berbagai enzim yang berperan dalam metabolisme tanaman (Taiz *et al.,* 2018).

Fosfor merupakan unsur hara makro yang berperan penting dalam penyimpanan dan transfer energi melalui senyawa ATP, pembentukan membran sel, sintesis asam nukleat, serta perkembangan akar dan jaringan meristem (Taiz *et al.*, 2018). Pada banyak ekosistem mangrove tropis, fosfor merupakan unsur hara yang paling sering membatasi pertumbuhan tanaman, terutama pada kawasan yang berkembang di atas sedimen karbonat atau substrat yang miskin mineral. Kekurangan fosfor menghambat pembentukan akar, memperlambat pertumbuhan tanaman, dan menurunkan laju fotosintesis (Reef *et al*., 2010). Fosfor juga berperan dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air, mempercepat pembentukan propagul, serta mendukung perkembangan sistem perakaran sehingga tanaman lebih mampu menyerap air dan unsur hara lainnya. Pada kondisi kekurangan fosfor, tanaman mangrove meningkatkan efisiensi penggunaan unsur tersebut melalui proses resorpsi sebelum daun mengalami gugur sebagai salah satu bentuk adaptasi terhadap lingkungan miskin nutrien (Feller *et al*., 2010).

Kalium pada mangrove, berperan untuk membantu tanaman menghadapi kondisi salinitas tinggi. Ion kalium berkontribusi terhadap pengaturan keseimbangan osmotik sehingga tanaman tetap mampu mempertahankan tekanan turgor dan menyerap air dari lingkungan yang memiliki konsentrasi garam tinggi (Parida & Jha, 2010). Ketersediaan kalium yang mencukupi meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan, memperkuat jaringan tanaman, meningkatkan efisiensi fotosintesis, serta mendukung pertumbuhan akar dan batang. Sebaliknya, defisiensi kalium menyebabkan daun mengalami nekrosis pada bagian tepi, menurunkan efisiensi fotosintesis, dan menghambat pertumbuhan tanaman (Taiz *et al.,* 2018).

Selain unsur hara makro, mangrove juga memerlukan unsur hara mikro dalam jumlah yang relatif kecil, tetapi sangat penting bagi kelangsungan proses metabolisme. Unsur mikro yang dibutuhkan antara lain besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), tembaga (Cu), boron (B), molibdenum (Mo), klor (Cl), dan nikel (Ni). Unsur-unsur tersebut berfungsi sebagai kofaktor enzim, penyusun protein tertentu, serta pendukung berbagai reaksi biokimia dalam sel tanaman (Taiz et al., 2018). Secara keseluruhan, keseimbangan antara unsur hara makro dan mikro sangat menentukan produktivitas ekosistem mangrove. Kekurangan salah satu unsur dapat menghambat pertumbuhan, sedangkan kelebihan unsur tertentu juga berpotensi mengganggu keseimbangan fisiologis tanaman. Oleh karena itu, ketersediaan nutrien yang seimbang merupakan salah satu faktor utama yang mendukung keberhasilan pertumbuhan, regenerasi, dan fungsi ekologis hutan mangrove.

3.2.4 Kandungan Oksigen Terlarut

Kandungan oksigen terlarut (*dissolved oxygen* atau DO) merupakan jumlah oksigen yang terlarut di dalam air dan tersedia bagi organisme akuatik serta berperan dalam berbagai proses biogeokimia di ekosistem mangrove. Oksigen terlarut tidak hanya memengaruhi kehidupan organisme perairan, tetapi juga menentukan kondisi oksidasi–reduksi (redoks) pada sedimen yang berpengaruh terhadap pertumbuhan vegetasi

mangrove (Alongi, 2009). Konsentrasi oksigen terlarut di kawasan mangrove dipengaruhi oleh suhu, salinitas, pasang surut, aktivitas fotosintesis, respirasi organisme, serta proses dekomposisi bahan organik. Pada siang hari, aktivitas fotosintesis fitoplankton, alga, dan vegetasi mangrove meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut, sedangkan pada malam hari kandungan oksigen cenderung menurun akibat dominasi proses respirasi (Alongi, 2009).

Ekosistem mangrove umumnya memiliki kandungan bahan organik yang tinggi karena akumulasi serasah daun, ranting, dan akar. Proses dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme mengonsumsi oksigen dalam jumlah besar sehingga kandungan oksigen pada sedimen mangrove sering kali sangat rendah dibandingkan dengan perairan terbuka (Kristensen *et al.,* 2008). Tanah mangrove umumnya bersifat anaerob karena selalu atau secara periodik tergenang oleh air pasang. Genangan menyebabkan ruang pori tanah terisi air sehingga difusi oksigen dari atmosfer menuju sedimen berlangsung sangat lambat. Akibatnya, oksigen hanya tersedia pada lapisan permukaan sedimen, sedangkan lapisan di bawahnya mengalami kondisi anaerob (Alongi, 2009).

Pada kondisi anaerob, mikroorganisme tidak lagi menggunakan oksigen sebagai akseptor elektron utama dalam respirasi, tetapi memanfaatkan senyawa lain seperti nitrat, mangan, besi, sulfat, dan karbon dioksida. Salah satu proses yang dominan adalah reduksi sulfat oleh bakteri anaerob yang menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S). Senyawa ini dapat bersifat toksik bagi akar tanaman apabila terakumulasi dalam konsentrasi tinggi karena menghambat respirasi akar dan penyerapan unsur hara (Kristensen *et al.,* 2008). Mangrove memiliki berbagai adaptasi morfologi, anatomi, dan fisiologi yang memungkinkan tanaman tetap tumbuh pada lingkungan dengan kandungan oksigen tanah yang sangat rendah. Adaptasi tersebut terutama berkembang pada sistem perakaran yang berfungsi memperoleh oksigen langsung dari atmosfer (Tomlinson, 2016).

Salah satu adaptasi utama adalah pembentukan akar udara (*aerial roots*). Spesies dari genus *Avicennia* dan *Sonneratia* memiliki akar napas (*pneumatophore*) yang tumbuh vertikal ke

atas permukaan tanah. Akar ini dilengkapi dengan lentisel yang memungkinkan oksigen dari udara masuk ke jaringan akar ketika permukaan tanah tidak tergenang (Tomlinson, 2016). Pada genus *Rhizophora*, adaptasi dilakukan melalui pembentukan akar tunjang (*stilt roots*) yang tidak hanya berfungsi menopang batang pada substrat lunak, tetapi juga membantu proses pertukaran gas dengan lingkungan. Sementara itu, spesies *Bruguiera* mengembangkan akar lutut (*knee roots*) yang berperan meningkatkan aerasi sistem perakaran (Duke, 1992).

Selain adaptasi morfologi, jaringan akar mangrove memiliki perkembangan aerenkima yang sangat baik. Aerenkima merupakan jaringan dengan ruang antar sel yang luas sehingga memungkinkan oksigen dari bagian atas tanaman ditransportasikan menuju akar yang berada di dalam sedimen anaerob. Mekanisme ini membantu mempertahankan respirasi akar dan mendukung penyerapan air serta unsur hara meskipun kondisi tanah kekurangan oksigen (Taiz *et al.,* 2018). Mangrove juga mampu menyesuaikan proses metabolismenya selama kondisi hipoksia. Pada saat suplai oksigen sangat terbatas, beberapa jaringan akar meningkatkan respirasi anaerob sebagai mekanisme sementara untuk mempertahankan produksi energi hingga kondisi lingkungan kembali normal. Selain itu, tanaman mampu mengurangi konsumsi energi melalui penurunan aktivitas metabolisme sehingga kerusakan sel dapat diminimalkan (Krauss *et al.,* 2008). Keberadaan sistem perakaran yang khas tersebut menjadikan mangrove mampu bertahan pada habitat pesisir yang secara alami memiliki kandungan oksigen tanah rendah. Adaptasi ini merupakan salah satu faktor utama yang membedakan mangrove dengan tumbuhan daratan lainnya serta memungkinkan mangrove mendominasi ekosistem pasang surut tropis dan subtropis.

3.3 Pengaruh Faktor Hidrologi

Faktor hidrologi merupakan salah satu komponen lingkungan yang sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan, distribusi, dan produktivitas ekosistem mangrove. Faktor ini meliputi pola pasang surut, frekuensi dan lama genangan, aliran air, serta ketersediaan air tawar yang secara langsung

memengaruhi kondisi fisik dan kimia habitat mangrove. Dinamika hidrologi berperan dalam mengatur salinitas, sedimentasi, aerasi tanah, distribusi unsur hara, serta penyebaran propagul, sehingga menjadi faktor penting yang menentukan keberhasilan pertumbuhan dan regenerasi mangrove (Alongi, 2009). Kondisi hidrologi yang sesuai akan mendukung pertumbuhan sistem perakaran, meningkatkan penyerapan air dan unsur hara, serta menjaga keseimbangan oksigen di dalam sedimen. Sebaliknya, perubahan pola hidrologi akibat reklamasi, pembangunan infrastruktur pesisir, perubahan penggunaan lahan, maupun perubahan iklim dapat mengganggu fungsi ekologis mangrove. Gangguan tersebut dapat menyebabkan perubahan salinitas, peningkatan genangan atau kekeringan, berkurangnya suplai sedimen, hingga penurunan pertumbuhan dan kelangsungan hidup vegetasi mangrove (Krauss *et al.,* 2008). Oleh karena itu, kondisi hidrologi yang stabil merupakan salah satu syarat utama bagi keberlangsungan ekosistem mangrove. Pengelolaan dan rehabilitasi mangrove perlu mempertimbangkan aspek hidrologi agar proses pertumbuhan, regenerasi alami, dan fungsi ekologis hutan mangrove dapat berlangsung secara optimal (Lovelock *et al.,* 2016).

3.3.1 Sirkulasi Air

Sirkulasi air merupakan proses pergerakan air secara terus-menerus yang mencakup aliran masuk dan keluar air melalui sistem pasang surut, aliran sungai, infiltrasi, serta pergerakan air tanah di kawasan pesisir. Pada ekosistem mangrove, sirkulasi air menjadi faktor hidrologi utama yang mengontrol dinamika lingkungan fisik dan kimia, termasuk salinitas, oksigenasi sedimen, serta distribusi bahan organik dan unsur hara (Alongi, 2009). Sirkulasi air di mangrove bersifat dinamis karena dipengaruhi oleh interaksi antara air laut dan air tawar. Perubahan volume air akibat pasang surut menyebabkan terjadinya proses pencampuran (mixing) yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan estuari. Proses ini juga menentukan tingkat konektivitas antara ekosistem mangrove dengan ekosistem pesisir lainnya seperti lamun dan terumbu karang (Nagelkerken *et al*., 2008).

Pergerakan air di kawasan mangrove terutama dikendalikan oleh siklus pasang surut yang menyebabkan terjadinya aliran air masuk (flood tide) dan aliran keluar (ebb tide) secara periodik. Pada saat pasang, air laut masuk ke kawasan mangrove membawa sedimen halus, bahan organik, serta nutrien terlarut. Sebaliknya, saat surut, air keluar membawa kembali sebagian material hasil dekomposisi dan kelebihan garam dari sistem mangrove (Tomlinson, 2016). Selain pasang surut, pergerakan air juga dipengaruhi oleh aliran sungai yang membawa air tawar dan sedimen dari daratan. Interaksi antara air tawar dan air laut menciptakan gradien salinitas yang sangat penting bagi distribusi spesies mangrove. Variasi arus mikro di dalam hutan mangrove juga dipengaruhi oleh kerapatan akar, topografi substrat, serta struktur vegetasi yang dapat memperlambat atau mengarahkan aliran air (Krauss *et al.,* 2008).

Struktur akar mangrove, seperti akar tunjang pada *Rhizophora* dan pneumatofore pada *Avicennia*, juga memengaruhi pola aliran air di dalam ekosistem. Akar-akar tersebut dapat memperlambat kecepatan arus, meningkatkan deposisi sedimen, serta menciptakan mikrohabitat yang mendukung regenerasi mangrove (Alongi, 2009).

Sirkulasi air memiliki peran penting dalam mendistribusikan unsur hara di ekosistem mangrove. Pergerakan air pasang surut memungkinkan transportasi nutrien seperti nitrogen, fosfor, kalium, dan bahan organik dari laut maupun daratan ke dalam kawasan mangrove. Nutrien tersebut kemudian dimanfaatkan oleh tanaman dan mikroorganisme untuk mendukung proses pertumbuhan dan dekomposisi (Kristensen *et al.,* 2008).

Pada saat air pasang, terjadi input nutrien dari laut dan estuari yang dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara di sedimen. Sebaliknya, saat air surut, sebagian nutrien yang larut dalam air dapat terbawa keluar, sehingga terjadi proses eksport nutrien dari ekosistem mangrove ke perairan sekitarnya. Proses ini menjadikan mangrove sebagai sistem yang sangat dinamis dalam siklus biogeokimia pesisir (Alongi, 2014).

Sirkulasi air juga memengaruhi proses aerasi sedimen yang berdampak pada ketersediaan nutrien. Aliran air yang baik

dapat meningkatkan difusi oksigen ke dalam tanah, sehingga mempercepat proses mineralisasi bahan organik dan pelepasan unsur hara. Sebaliknya, sirkulasi yang terbatas dapat menyebabkan kondisi anaerob yang memperlambat dekomposisi dan menghambat ketersediaan nutrien bagi tanaman (Krauss *et al*., 2008). Selain itu, pergerakan air juga berperan dalam mengontrol distribusi spasial nutrien di dalam hutan mangrove. Area dengan sirkulasi air yang lebih aktif cenderung memiliki ketersediaan nutrien yang lebih tinggi dibandingkan area yang tergenang stagnan. Oleh karena itu, sirkulasi air menjadi faktor penting dalam menentukan produktivitas dan struktur komunitas mangrove (Nagelkerken *et al.,* 2008).

3.3.2 Sedimentasi

Sedimentasi merupakan proses pengendapan partikel-partikel padat yang terbawa oleh air, baik berasal dari daratan maupun perairan laut, yang kemudian terakumulasi di suatu wilayah tertentu. Pada ekosistem mangrove, sedimentasi merupakan proses geomorfologi yang sangat penting karena berperan dalam pembentukan lahan baru, perubahan topografi pesisir, serta penyediaan substrat bagi pertumbuhan vegetasi mangrove (Alongi, 2009). Sumber sedimen di kawasan mangrove berasal dari erosi daratan yang dibawa oleh sungai, material organik dari vegetasi mangrove itu sendiri, serta partikel halus yang terbawa oleh arus laut dan pasang surut. Dinamika sedimentasi ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan arus, energi gelombang, serta struktur vegetasi mangrove yang mampu memerangkap sedimen dari arus pasang surut air.

Proses pengendapan sedimen di ekosistem mangrove terjadi ketika energi transport air, baik dari arus sungai maupun pasang surut, menurun sehingga partikel-partikel tersuspensi mulai mengendap ke dasar perairan. Partikel yang lebih berat akan mengendap lebih cepat, sedangkan partikel halus seperti lanau dan lempung dapat tetap tersuspensi lebih lama sebelum akhirnya mengendap (Nichols & Biggs, 2005). Vegetasi mangrove memainkan peran penting dalam mempercepat proses pengendapan sedimen. Akar-akar mangrove, seperti akar tunjang (*Rhizophora*) dan pneumatofore (*Avicennia*), berfungsi

memperlambat aliran air sehingga meningkatkan deposisi sedimen di sekitar kawasan hutan mangrove. Struktur akar tersebut juga bertindak sebagai perangkap alami yang menahan partikel sedimen agar tidak kembali terbawa arus (Krauss et al., 2008). Selain itu, proses pengendapan sedimen juga dipengaruhi oleh siklus pasang surut. Saat air pasang, sedimen terbawa masuk ke kawasan mangrove, sedangkan saat surut sebagian sedimen tertinggal dan terakumulasi di permukaan tanah. Proses berulang ini menyebabkan akumulasi sedimen secara bertahap yang berkontribusi terhadap pertumbuhan vertikal lahan mangrove (Alongi, 2009).

Sedimen memiliki peran yang sangat penting dalam pembentukan dan keberlanjutan habitat mangrove. Akumulasi sedimen secara bertahap memungkinkan terbentuknya substrat baru yang stabil sebagai media tumbuh vegetasi mangrove. Proses ini juga membantu mangrove beradaptasi terhadap kenaikan muka air laut melalui mekanisme penambahan elevasi permukaan tanah. Selain sebagai media fisik, sedimen juga berfungsi sebagai penyimpan air, unsur hara, dan bahan organik yang sangat penting bagi pertumbuhan mangrove. Sedimen berlumpur yang kaya bahan organik umumnya memiliki kapasitas tinggi dalam menyimpan nitrogen, fosfor, dan unsur mikro yang diperlukan oleh tanaman (Alongi, 2009). Keberadaan sedimen juga mendukung pembentukan mikrohabitat yang beragam di dalam ekosistem mangrove. Variasi tekstur dan kedalaman sedimen menciptakan kondisi lingkungan yang berbeda-beda sehingga mendukung keanekaragaman spesies mangrove serta organisme bentik lainnya (Krauss *et al.,* 2008). Selain itu, akumulasi sedimen berperan dalam penyimpanan karbon jangka panjang. Sedimen mangrove mampu mengunci karbon organik dalam jumlah besar melalui proses penguburan bahan organik yang lambat terurai akibat kondisi anaerob, sehingga menjadikan mangrove sebagai salah satu ekosistem *blue carbon* yang penting (Alongi, 2014).

Meskipun sedimentasi memiliki peran penting, sedimentasi yang berlebihan dapat memberikan dampak negatif terhadap ekosistem mangrove. Tingkat sedimentasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penimbunan yang berlebihan di

sekitar akar sehingga menghambat pertukaran gas dan menyebabkan kondisi hipoksia pada sistem perakaran. Sedimentasi berlebih juga dapat menutupi pneumatofore dan akar udara yang berfungsi dalam proses respirasi, sehingga mengganggu suplai oksigen ke jaringan akar. Kondisi ini dapat menurunkan pertumbuhan, meningkatkan stres fisiologis, dan bahkan menyebabkan kematian bibit mangrove apabila berlangsung dalam jangka panjang (Krauss *et al.*, 2008). Selain itu, perubahan cepat akibat sedimentasi tinggi dapat mengubah struktur habitat secara drastis sehingga memengaruhi komposisi spesies. Spesies yang tidak mampu beradaptasi terhadap perubahan elevasi substrat akan mengalami penurunan kelangsungan hidup, sementara spesies yang lebih toleran dapat mendominasi kawasan tersebut.

Sedimentasi yang terlalu tinggi juga dapat mengganggu proses regenerasi alami karena propagul yang jatuh ke substrat dapat tertimbun sebelum sempat berkecambah. Hal ini menyebabkan penurunan keberhasilan pembentukan anakan mangrove baru. Dengan demikian, keseimbangan laju sedimentasi sangat penting untuk menjaga stabilitas ekosistem mangrove. Sedimentasi yang optimal mendukung pertumbuhan dan ekspansi mangrove, sedangkan sedimentasi yang berlebihan dapat mengganggu fungsi ekologis dan struktur komunitas mangrove.

3.3.3 Ketersediaan Air Tawar

Ketersediaan air tawar merupakan salah satu faktor hidrologi penting yang memengaruhi keseimbangan ekosistem mangrove. Air tawar umumnya berasal dari aliran sungai, curah hujan, serta limpasan air tanah yang masuk ke kawasan pesisir. Keberadaan air tawar berperan dalam mengencerkan salinitas, menjaga keseimbangan osmotik tanah, serta mendukung ketersediaan air bagi tanaman mangrove (Alongi, 2009). Variasi ketersediaan air tawar sangat dipengaruhi oleh musim, terutama pada wilayah tropis yang memiliki pola hujan basah dan kering yang jelas. Pada musim hujan, masuknya air tawar meningkat sehingga salinitas menurun, sedangkan pada musim kemarau ketersediaan air tawar berkurang sehingga salinitas meningkat

akibat evaporasi (Tomlinson, 2016). Kondisi ini menyebabkan mangrove harus memiliki toleransi fisiologis yang tinggi terhadap fluktuasi hidrologi.

Ekosistem mangrove berada pada zona transisi antara daratan dan laut yang dikenal sebagai wilayah estuari, sehingga terjadi interaksi dinamis antara air tawar dan air laut. Interaksi ini menghasilkan gradien salinitas yang sangat bervariasi, baik secara spasial maupun temporal (Krauss et al., 2008). Percampuran air tawar dan air laut menghasilkan kondisi salinitas payau yang menjadi karakteristik utama habitat mangrove. Proses ini dipengaruhi oleh pasang surut, debit sungai, curah hujan, serta evaporasi. Pada saat debit air tawar tinggi, salinitas menurun dan kondisi lingkungan menjadi lebih segar, sedangkan saat pengaruh air laut dominan, salinitas meningkat (Alongi, 2009). Interaksi ini juga berperan dalam distribusi nutrien dan sedimen. Air tawar membawa sedimen dan nutrien dari daratan, sedangkan air laut dapat membawa ion-ion garam serta partikel tersuspensi. Proses pencampuran ini menjadikan estuari sebagai zona yang sangat produktif secara biologis (Day *et al.,* 1989).

Estuari merupakan ekosistem peralihan antara sungai dan laut yang memiliki dinamika hidrologi tinggi, termasuk variasi salinitas, pasang surut, serta aliran air yang kompleks. Kondisi ini menjadikan estuari sebagai habitat utama bagi ekosistem mangrove di wilayah tropis dan subtropis (Nagelkerken *et al.,* 2008). Pengaruh estuari terhadap pertumbuhan mangrove sangat signifikan karena menentukan ketersediaan air, nutrien, serta tingkat stres salinitas yang dialami tanaman. Estuari yang memiliki suplai air tawar cukup umumnya mendukung pertumbuhan mangrove yang lebih cepat karena tekanan osmotik lebih rendah dan ketersediaan air lebih stabil (Alongi, 2014).

Selain itu, estuari berperan dalam menyediakan sedimen halus yang kaya bahan organik. Sedimen ini menjadi media tumbuh yang ideal bagi mangrove karena memiliki kapasitas tinggi dalam menyimpan air dan unsur hara. Hal ini mendukung perkembangan sistem perakaran serta meningkatkan produktivitas biomassa (Krauss *et al.,* 2008).

Namun, perubahan pada sistem estuari seperti pengurangan aliran sungai akibat bendungan, reklamasi, atau perubahan iklim dapat mengganggu keseimbangan hidrologi. Penurunan suplai air tawar dapat meningkatkan salinitas secara ekstrem, yang pada akhirnya menghambat pertumbuhan, regenerasi, dan distribusi mangrove (Lovelock *et al.,* 2016). Sebaliknya, peningkatan suplai air tawar yang berlebihan juga dapat mengubah komposisi spesies mangrove karena beberapa spesies lebih toleran terhadap salinitas tinggi dibandingkan yang lain. Oleh karena itu, keseimbangan antara air tawar dan air laut sangat penting untuk menjaga stabilitas ekosistem mangrove di wilayah estuari (Tomlinson, 2016). Secara keseluruhan, estuari berfungsi sebagai sistem ekologis yang sangat penting bagi mangrove karena menyediakan kondisi lingkungan yang dinamis, kaya nutrien, dan mendukung produktivitas tinggi. Stabilitas interaksi antara air tawar dan air laut menjadi faktor kunci dalam menjaga pertumbuhan dan keberlanjutan ekosistem mangrove.

3.4 Pengaruh Faktor Biologis

Faktor biologis merupakan komponen lingkungan yang berasal dari interaksi antarorganisme di dalam ekosistem mangrove, baik antara tumbuhan, hewan, maupun mikroorganisme. Interaksi biologis ini mencakup kompetisi, simbiosis, herbivori, dekomposisi bahan organik, serta aktivitas mikroba tanah yang semuanya berperan dalam menentukan struktur, fungsi, dan produktivitas ekosistem mangrove (Alongi, 2009).

Vegetasi mangrove juga saling berinteraksi melalui kompetisi dalam memperoleh cahaya, ruang tumbuh, air, dan unsur hara, yang dapat memengaruhi pola regenerasi dan distribusi spesies. Selain itu, aktivitas fauna seperti kepiting, moluska, dan ikan berperan penting dalam proses bioturbasi yang dapat meningkatkan aerasi tanah dan mempercepat siklus nutrien (Kristensen et al., 2008). Mikroorganisme tanah juga memiliki peran penting dalam proses dekomposisi serasah dan mineralisasi unsur hara yang mendukung kesuburan substrat. Oleh karena itu, faktor biologis tidak hanya memengaruhi

pertumbuhan individu mangrove, tetapi juga berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem secara keseluruhan (Tomlinson, 2016).

3.4.1 Kompetisi Antar Tumbuhan

Kompetisi antar tumbuhan merupakan interaksi biologis ketika dua atau lebih individu atau spesies tumbuhan saling memperebutkan sumber daya yang terbatas, seperti cahaya, ruang tumbuh, air, dan unsur hara. Dalam ekosistem mangrove, kompetisi merupakan salah satu faktor penting yang menentukan struktur komunitas, pertumbuhan individu, serta pola distribusi spesies (Krauss *et al*., 2008). Kompetisi pada mangrove terjadi baik pada tingkat intraspesifik (antar individu dalam satu spesies) maupun interspesifik (antar spesies berbeda). Intensitas kompetisi sangat dipengaruhi oleh kerapatan vegetasi, kondisi substrat, serta ketersediaan sumber daya lingkungan (Tomlinson, 2016).

Cahaya merupakan faktor pembatas utama dalam ekosistem mangrove yang sangat dipengaruhi oleh struktur tajuk (kanopi). Vegetasi mangrove yang lebih tinggi dan rapat dapat menghalangi penetrasi cahaya ke lapisan bawah sehingga bibit dan tumbuhan bawah mengalami penurunan laju fotosintesis. Proses tersebut menjadikan spesies mangrove yang toleran terhadap naungan memiliki keunggulan kompetitif pada fase awal pertumbuhannya. Pada kondisi kanopi yang tertutup, intensitas cahaya di lantai hutan dapat berkurang secara signifikan, sehingga memengaruhi keberhasilan regenerasi alami mangrove. Hal ini menyebabkan kompetisi cahaya menjadi salah satu faktor utama dalam menentukan kelangsungan hidup bibit (Krauss *et al.,* 2008).

Ruang tumbuh merupakan sumber daya penting yang diperebutkan oleh tanaman mangrove, terutama dalam hal ruang untuk perkembangan sistem perakaran dan tajuk. Akar mangrove yang saling berinteraksi dapat menyebabkan kompetisi dalam memperoleh ruang di dalam substrat yang terbatas (Tomlinson, 2016). Spesies dengan sistem perakaran yang lebih agresif atau adaptif cenderung lebih unggul dalam mendominasi ruang tumbuh. Selain itu, ruang juga berkaitan

dengan posisi elevasi terhadap pasang surut, yang menentukan tingkat genangan dan salinitas lingkungan (Alongi, 2009).

Nutrien seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) merupakan sumber daya penting yang sering menjadi faktor pembatas dalam ekosistem mangrove. Kompetisi nutrien terjadi ketika beberapa individu atau spesies menyerap unsur hara dari sumber yang sama di dalam substrat (Reef *et al*., 2010). Spesies mangrove dengan efisiensi penyerapan nutrien yang tinggi atau kemampuan konservasi unsur hara yang baik memiliki keunggulan dalam kondisi lingkungan yang miskin nutrien. Selain itu, interaksi dengan mikroorganisme tanah juga dapat memengaruhi ketersediaan nutrien melalui proses mineralisasi dan dekomposisi bahan organik (Alongi, 2009).

Zonasi mangrove merupakan pola distribusi spesies yang tersusun secara bertingkat dari arah laut menuju daratan berdasarkan gradien lingkungan seperti salinitas, frekuensi genangan, jenis substrat, dan ketersediaan oksigen. Pola zonasi ini merupakan hasil dari interaksi antara toleransi fisiologis spesies dan kompetisi antar tumbuhan (Duke, 1992). Pada zona paling dekat dengan laut, umumnya didominasi oleh genus *Avicennia* dan *Sonneratia* yang memiliki toleransi tinggi terhadap salinitas dan genangan. Pada zona tengah, spesies seperti *Rhizophora* lebih dominan karena memiliki adaptasi akar tunjang yang kuat serta kemampuan tumbuh pada kondisi substrat berlumpur. Sementara itu, zona daratan atau transisi sering dihuni oleh *Bruguiera* dan *Xylocarpus* yang lebih toleran terhadap genangan yang lebih jarang (Tomlinson, 2016). Zonasi ini tidak hanya dipengaruhi oleh faktor lingkungan, tetapi juga oleh interaksi kompetitif antar spesies. Spesies yang lebih toleran terhadap kondisi ekstrem sering mendominasi zona tertentu dan membatasi penyebaran spesies lain melalui kompetisi sumber daya (Krauss *et al.,* 2008).

3.4.2 Interaksi dengan Mikroorganisme

Mikroorganisme merupakan komponen biotik yang memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan dan produktivitas ekosistem mangrove. Kelompok mikroorganisme yang banyak ditemukan di kawasan mangrove meliputi bakteri,

jamur, aktinomisetes, dan mikroalga yang hidup di dalam sedimen maupun pada sistem perakaran tanaman. Interaksi antara mangrove dan mikroorganisme bersifat saling menguntungkan karena mikroorganisme membantu menyediakan unsur hara melalui proses dekomposisi dan siklus biogeokimia, sedangkan tanaman mangrove menyediakan bahan organik dan habitat yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme (Alongi, 2009).

Lingkungan mangrove yang kaya akan serasah daun, ranting, akar, dan bahan organik menjadikan sedimen mangrove sebagai habitat yang sangat aktif secara mikrobiologis. Aktivitas mikroorganisme berperan dalam menguraikan bahan organik, mendaur ulang unsur hara, serta menjaga kesuburan tanah sehingga mendukung pertumbuhan vegetasi mangrove (Kristensen *et al.,* 2008). Keanekaragaman dan aktivitas mikroorganisme dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, seperti salinitas, pH, kandungan oksigen, suhu, dan kadar bahan organik. Perubahan kondisi lingkungan tersebut dapat memengaruhi laju dekomposisi, mineralisasi unsur hara, serta produktivitas ekosistem mangrove secara keseluruhan (Alongi, 2009).

Bakteri merupakan kelompok mikroorganisme yang berperan utama dalam siklus unsur hara di ekosistem mangrove. Bakteri heterotrof menguraikan sisa-sisa organisme menjadi senyawa sederhana yang dapat dimanfaatkan kembali oleh tanaman. Selain itu, bakteri berperan dalam proses mineralisasi nitrogen, nitrifikasi, denitrifikasi, serta fiksasi nitrogen sehingga meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi vegetasi mangrove (Holguin *et al.,* 2001).

Pada sedimen mangrove yang bersifat anaerob, bakteri pereduksi sulfat (*sulfate-reducing bacteria*) memiliki peran penting dalam proses respirasi anaerob dengan memanfaatkan sulfat sebagai akseptor elektron. Proses ini menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S) yang dalam konsentrasi tinggi dapat bersifat toksik bagi akar tanaman, tetapi juga merupakan bagian dari siklus sulfur yang penting dalam ekosistem mangrove (Alongi, 2009).

Jamur tanah memiliki peran penting dalam menguraikan bahan organik yang mengandung senyawa kompleks seperti lignin, selulosa, dan hemiselulosa yang sulit diuraikan oleh bakteri. Melalui aktivitas enzimatiknya, jamur mengubah senyawa kompleks tersebut menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga unsur hara dapat tersedia kembali bagi tanaman (Gessner *et al.,* 2010).

Beberapa jenis jamur juga membentuk hubungan simbiosis dengan akar tanaman melalui asosiasi mikoriza. Meskipun keberadaan mikoriza pada mangrove tidak seumum pada tanaman daratan, beberapa penelitian menunjukkan bahwa asosiasi ini dapat meningkatkan penyerapan fosfor, nitrogen, dan unsur mikro, terutama pada substrat yang miskin nutrien (Alongi, 2009). Jamur juga berperan dalam meningkatkan stabilitas struktur tanah melalui pembentukan hifa yang mengikat partikel-partikel sedimen sehingga membantu mempertahankan agregasi tanah dan mengurangi erosi di kawasan mangrove (Gessner *et al*., 2010).

Tabel 3.1. Penelitian tentang Pemanfaatan Akar Mangrove

Peneliti	**Judul**	**Hasil tama**
Krauss *et al.* (2003)	Differential rates of vertical accretion and elevation change among aerial root types in mangrove forests	Akar mangrove meningkatkan akumulasi sedimen dan menaikkan elevasi tanah sehingga memperkuat struktur pesisir
Kristensen (2008)	Mangrove crabs as ecosystem engineers	Interaksi akar dengan fauna meningkatkan aerasi tanah dan siklus nutrien
Dia *et al.*2020	Identification of active compounds from lindur root plants (*Bruguiera gymnorrhiza)* as α-glucosidase inhibitors	Ekstrak etanol dari batang dan kulit akar memiliki aktivitas penghambat enzim α-glukosidase yang dihitung dengan nilai

Peneliti	Judul	Hasil tama
		IC50 sebesar 171,31 ppm dan 153,07 ppm. Hasil fraksinasi menggunakan kromatografi cair kinerja tinggi (PTLC) menunjukkan 5 fraksi dalam ekstrak etanol kasar akar.
Hermialingga *et al.* (2024)	Estimasi biomassa dan simpanan karbon akar mangrove	Akar memiliki kontribusi besar terhadap stok karbon ekosistem mangrove

Dekomposisi bahan organik merupakan proses penguraian serasah daun, ranting, akar, dan sisa organisme menjadi senyawa yang lebih sederhana oleh aktivitas mikroorganisme. Proses ini merupakan salah satu mekanisme utama dalam siklus nutrien ekosistem mangrove karena menghasilkan unsur hara yang dapat diserap kembali oleh tanaman (Kristensen *et al.,* 2008).

Serasah daun mangrove merupakan sumber utama bahan organik yang memasok karbon dan nutrien ke dalam sedimen. Setelah gugur, serasah mengalami fragmentasi oleh fauna detritivor, kemudian diuraikan oleh bakteri dan jamur menjadi senyawa organik sederhana melalui proses dekomposisi. Selanjutnya, unsur-unsur seperti nitrogen, fosfor, dan sulfur dilepaskan kembali ke dalam tanah melalui proses mineralisasi sehingga dapat dimanfaatkan kembali oleh vegetasi mangrove (Alongi, 2009).

Selain menyediakan unsur hara, proses dekomposisi juga mendukung produktivitas primer dan sekunder di kawasan mangrove. Nutrien hasil dekomposisi dimanfaatkan oleh tanaman mangrove untuk pertumbuhan, sedangkan bahan organik terlarut dan partikel detritus menjadi sumber makanan bagi berbagai organisme akuatik, seperti zooplankton, moluska, kepiting, dan ikan. Oleh karena itu, aktivitas mikroorganisme

dalam proses dekomposisi memiliki peran sentral dalam menjaga fungsi ekologis dan keberlanjutan ekosistem mangrove (Alongi, 2009).

Secara keseluruhan, interaksi antara mangrove dan mikroorganisme membentuk hubungan ekologis yang sangat penting dalam menjaga kesuburan tanah, mendaur ulang unsur hara, mempercepat dekomposisi bahan organik, serta mendukung produktivitas ekosistem mangrove. Keberadaan komunitas mikroorganisme yang sehat menjadi salah satu faktor utama dalam mempertahankan stabilitas dan keberlanjutan fungsi ekosistem mangrove.

3.4.3 Peran Fauna dalam Ekosistem Mangrove

Ekosistem mangrove merupakan habitat bagi berbagai kelompok fauna yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekologis dan produktivitas ekosistem. Fauna mangrove meliputi berbagai jenis kepiting, moluska, ikan, udang, burung, reptil, dan mamalia yang memanfaatkan kawasan mangrove sebagai tempat mencari makan, berlindung, berkembang biak, maupun sebagai daerah asuhan (*nursery ground*) bagi berbagai organisme akuatik (Nagelkerken *et al.,* 2008). Selain berfungsi sebagai penghuni habitat, fauna mangrove berperan dalam berbagai proses ekologis, seperti dekomposisi serasah, bioturbasi sedimen, penyebaran propagul, pengendalian populasi organisme lain, serta siklus nutrien. Interaksi antara fauna, vegetasi, dan mikroorganisme membentuk jaringan trofik yang kompleks sehingga mendukung stabilitas dan produktivitas ekosistem mangrove (Alongi, 2009). Keanekaragaman fauna juga menjadi indikator penting kondisi kesehatan ekosistem mangrove. Semakin tinggi keanekaragaman fauna, umumnya semakin baik pula fungsi ekologis kawasan mangrove dalam mendukung produktivitas perairan pesisir dan menjaga keseimbangan lingkungan (Lee, 2008).

Fauna mangrove memiliki kontribusi besar dalam siklus nutrien melalui aktivitas makan, ekskresi, bioturbasi, dan dekomposisi bahan organik. Kepiting yang memakan serasah daun mempercepat penghancuran bahan organik menjadi partikel yang lebih kecil sehingga lebih mudah diuraikan oleh

bakteri dan jamur. Proses ini mempercepat pelepasan unsur hara seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan sulfur (S) ke dalam sedimen (Lee, 1998). Bioturbasi yang dilakukan oleh kepiting dan beberapa organisme bentik meningkatkan pertukaran oksigen antara sedimen dan air sehingga mempercepat proses mineralisasi bahan organik. Kondisi ini meningkatkan ketersediaan unsur hara yang dapat diserap kembali oleh akar mangrove (Kristensen, 2008). Moluska dan ikan juga berkontribusi terhadap siklus nutrien melalui ekskresi yang mengandung nitrogen dan fosfor dalam bentuk yang mudah dimanfaatkan oleh mikroorganisme dan tanaman. Selain itu, perpindahan organisme antarhabitat membawa nutrien dari satu ekosistem ke ekosistem lainnya sehingga mendukung konektivitas ekologi kawasan pesisir (Alongi, 2009).

Interaksi antara fauna, mikroorganisme, dan vegetasi membentuk siklus nutrien yang efisien di dalam ekosistem mangrove. Nutrien hasil dekomposisi dimanfaatkan kembali oleh tanaman untuk pertumbuhan, sedangkan sebagian lainnya diekspor ke perairan sekitar melalui pasang surut sehingga mendukung produktivitas ekosistem estuari dan pesisir (Kristensen *et al.,* 2008).

Secara keseluruhan, fauna mangrove memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga fungsi ekologis ekosistem melalui peningkatan dekomposisi bahan organik, perbaikan sifat fisik sedimen, percepatan siklus nutrien, serta peningkatan produktivitas primer dan sekunder. Oleh karena itu, keberadaan fauna merupakan salah satu komponen kunci dalam menjaga stabilitas dan keberlanjutan ekosistem mangrove.

3.5 Dampak Aktivitas Manusia terhadap Faktor Lingkungan Mangrove

Aktivitas manusia merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi kondisi lingkungan dan keberlanjutan ekosistem mangrove. Berbagai kegiatan seperti alih fungsi lahan menjadi tambak, permukiman, kawasan industri, pelabuhan, penebangan hutan, pencemaran, serta reklamasi pantai dapat mengubah kondisi fisik, kimia, dan biologis habitat mangrove. Perubahan tersebut berdampak pada terganggunya proses

hidrologi, meningkatnya sedimentasi atau erosi, perubahan salinitas, penurunan kualitas air, serta berkurangnya ketersediaan unsur hara yang mendukung pertumbuhan mangrove (Alongi, 2009).

Selain memengaruhi kondisi lingkungan, aktivitas manusia juga dapat menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati, terganggunya proses regenerasi alami, serta menurunnya produktivitas ekosistem mangrove. Fragmentasi habitat akibat pembangunan infrastruktur dan konversi lahan mengurangi konektivitas antarhabitat, sehingga memengaruhi distribusi flora dan fauna yang bergantung pada ekosistem mangrove (Friess *et al.,* 2019). Dalam jangka panjang, kerusakan lingkungan akibat aktivitas manusia dapat mengurangi kemampuan mangrove dalam memberikan jasa ekosistem, seperti perlindungan pantai dari abrasi, penyimpanan karbon (*blue carbon*), penyediaan habitat bagi berbagai organisme, serta mendukung produktivitas perikanan pesisir. Oleh karena itu, pengelolaan pesisir yang berkelanjutan, konservasi, dan rehabilitasi mangrove sangat diperlukan untuk menjaga keseimbangan faktor lingkungan dan kelestarian ekosistem mangrove (Alongi, 2015).

3.5.1 Pencemaran Lingkungan

Pencemaran lingkungan merupakan masuknya makhluk hidup, zat, energi, atau komponen lain ke dalam lingkungan akibat aktivitas manusia sehingga menurunkan kualitas lingkungan dan mengganggu fungsi ekosistem. Pada ekosistem mangrove, pencemaran dapat berasal dari kawasan permukiman, industri, pertanian, pertambangan, maupun kegiatan pelayaran yang menghasilkan berbagai jenis limbah ke wilayah pesisir (Alongi, 2009).

Mangrove memiliki kemampuan alami untuk menyerap, mengakumulasi, dan mengendapkan berbagai bahan pencemar sehingga sering disebut sebagai *buffer zone* atau penyaring alami bagi kawasan pesisir. Sistem perakaran yang rapat mampu memperlambat aliran air dan memerangkap sedimen yang mengandung bahan pencemar. Namun, apabila beban pencemar melebihi kapasitas alami ekosistem, kualitas lingkungan mangrove akan menurun dan mengganggu fungsi ekologisnya (Kathiresan & Bingham, 2001).

Pencemaran yang berlangsung secara terus-menerus dapat menyebabkan perubahan sifat fisik, kimia, dan biologis habitat mangrove. Dampaknya meliputi penurunan kualitas air dan sedimen, terganggunya siklus nutrien, berkurangnya keanekaragaman hayati, serta menurunnya produktivitas vegetasi mangrove (Alongi, 2009).

1. **Limbah Domestik**

   Limbah domestik berasal dari aktivitas rumah tangga, seperti air buangan, sampah organik, deterjen, plastik, serta limbah sanitasi. Pembuangan limbah domestik secara langsung ke kawasan pesisir dapat meningkatkan kandungan bahan organik, nutrien, dan mikroorganisme patogen di perairan mangrove (Alongi, 2009).

   Peningkatan bahan organik yang berlebihan dapat menyebabkan eutrofikasi, yaitu kondisi ketika konsentrasi nitrogen dan fosfor meningkat secara signifikan sehingga memicu pertumbuhan alga secara berlebihan. Proses ini dapat menurunkan kadar oksigen terlarut (*dissolved oxygen*) akibat meningkatnya respirasi dan dekomposisi biomassa alga, sehingga mengganggu kehidupan organisme akuatik dan sistem perakaran mangrove (Kristensen *et al.*, 2008).

   Selain itu, sampah anorganik seperti plastik dapat menutupi permukaan sedimen maupun akar mangrove, menghambat pertukaran gas, serta mengurangi kualitas habitat bagi berbagai organisme yang hidup di kawasan mangrove (Friess *et al*., 2019).

2. **Limbah Industri**

   Limbah industri umumnya mengandung berbagai senyawa kimia, seperti logam berat, hidrokarbon minyak, pestisida, pelarut organik, dan bahan kimia lainnya yang berpotensi mencemari lingkungan mangrove. Logam berat seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), dan kromium (Cr) dapat terakumulasi di dalam sedimen maupun jaringan tanaman mangrove melalui proses bioakumulasi (MacFarlane & Burchett, 2002). Selain logam berat, tumpahan minyak (*oil spill*) juga merupakan salah satu bentuk pencemaran yang sering terjadi di kawasan pesisir. Lapisan minyak yang menutupi permukaan akar udara dan

pneumatofor dapat menghambat pertukaran gas antara akar dan atmosfer sehingga mengganggu respirasi akar serta menurunkan kemampuan tanaman dalam menyerap air dan unsur hara (Duke et al., 2000). Akumulasi bahan pencemar industri dalam jangka panjang dapat mengubah sifat kimia sedimen, menghambat aktivitas mikroorganisme, serta mengganggu proses dekomposisi dan siklus nutrien yang sangat penting bagi keberlangsungan ekosistem mangrove (Kathiresan & Bingham, 2001).

Pencemaran lingkungan dapat memberikan berbagai dampak negatif terhadap pertumbuhan dan perkembangan mangrove. Salah satu dampak utama adalah terganggunya proses fotosintesis akibat akumulasi bahan pencemar pada daun dan jaringan tanaman. Logam berat dapat merusak kloroplas, menurunkan kandungan klorofil, serta menghambat aktivitas enzim yang berperan dalam proses fotosintesis sehingga laju pertumbuhan tanaman menurun (MacFarlane & Burchett, 2002). Pencemaran juga dapat menghambat perkembangan sistem perakaran. Senyawa toksik yang terakumulasi di dalam sedimen mengganggu respirasi akar, mengurangi penyerapan air dan unsur hara, serta meningkatkan stres fisiologis tanaman. Pada kondisi yang berat, paparan pencemar dapat menyebabkan nekrosis jaringan, gugurnya daun, hingga kematian bibit mangrove (Alongi, 2009).

Selain memengaruhi vegetasi, pencemaran juga menurunkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam dekomposisi bahan organik dan mineralisasi unsur hara. Penurunan aktivitas mikroba menyebabkan berkurangnya ketersediaan nitrogen, fosfor, dan unsur hara lainnya yang dibutuhkan untuk pertumbuhan mangrove (Kristensen *et al*., 2008). Dalam skala ekosistem, pencemaran dapat menyebabkan penurunan keanekaragaman flora dan fauna, terganggunya regenerasi alami, serta berkurangnya kemampuan mangrove dalam menyediakan jasa ekosistem, seperti perlindungan pantai, penyimpanan karbon (*blue carbon*), penyediaan habitat biota pesisir, dan dukungan terhadap produktivitas perikanan (Friess *et al.*, 2019).

Oleh karena itu, pengendalian sumber pencemar, pengelolaan limbah yang baik, serta konservasi kawasan pesisir sangat diperlukan untuk menjaga kualitas lingkungan dan mempertahankan pertumbuhan serta fungsi ekologis ekosistem mangrove.

3.5.2 Alih Fungsi Lahan

Alih fungsi lahan merupakan perubahan penggunaan kawasan mangrove menjadi bentuk pemanfaatan lain yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan ekonomi maupun pembangunan. Bentuk alih fungsi yang paling umum meliputi konversi menjadi tambak, kawasan permukiman, industri, pelabuhan, infrastruktur, serta lahan pertanian. Aktivitas tersebut menjadi salah satu penyebab utama berkurangnya luas dan kualitas hutan mangrove di berbagai wilayah pesisir dunia (Friess *et al*., 2019). Perubahan penggunaan lahan tidak hanya menyebabkan hilangnya tutupan vegetasi mangrove, tetapi juga mengubah kondisi hidrologi, sifat fisik dan kimia tanah, serta fungsi ekologis yang menopang keberlangsungan ekosistem pesisir (Alongi, 2009).

Secara global, konversi mangrove untuk akuakultur dan pertanian merupakan salah satu penyebab utama degradasi mangrove. Meskipun laju kehilangan mangrove di beberapa wilayah telah menurun, konversi lahan masih menjadi ancaman serius, terutama di kawasan Asia Tenggara yang memiliki luasan mangrove terbesar di dunia.

1. Konversi Menjadi Tambak

   Pengembangan tambak, terutama tambak udang dan bandeng, merupakan bentuk alih fungsi lahan yang paling banyak menyebabkan hilangnya hutan mangrove. Pembangunan tambak umumnya dilakukan dengan menebang vegetasi mangrove, membuat tanggul, serta mengubah sistem hidrologi alami. Akibatnya, pola pasang surut, sirkulasi air, dan proses sedimentasi mengalami perubahan sehingga menurunkan kemampuan mangrove untuk beregenerasi secara alami (Alongi, 2009). Selain mengurangi luas hutan mangrove, konversi menjadi tambak

juga menyebabkan penurunan cadangan karbon biomassa dan karbon tanah yang tersimpan dalam sedimen mangrove.

2. Perkembangan Permukiman

   Pertumbuhan kawasan permukiman di wilayah pesisir sering kali menyebabkan pembukaan lahan mangrove untuk pembangunan rumah, jalan, dan berbagai fasilitas pendukung. Aktivitas ini meningkatkan tekanan terhadap ekosistem mangrove melalui perubahan tata guna lahan, peningkatan limpasan permukaan, serta masuknya limbah domestik ke kawasan pesisir. Fragmentasi habitat akibat pembangunan permukiman juga mengurangi konektivitas antarhabitat sehingga mengganggu pergerakan fauna dan proses regenerasi vegetasi mangrove (Friess *et al.,* 2019).

3. Perkembangan Kawasan Industri

   Pembangunan kawasan industri di wilayah pesisir sering disertai reklamasi, pembangunan pelabuhan, dan infrastruktur pendukung yang menyebabkan hilangnya kawasan mangrove. Selain perubahan penggunaan lahan, aktivitas industri berpotensi menghasilkan limbah cair, logam berat, hidrokarbon, dan berbagai bahan pencemar lainnya yang dapat menurunkan kualitas air dan sedimen mangrove. Akumulasi bahan pencemar tersebut mengganggu aktivitas mikroorganisme tanah, menghambat penyerapan unsur hara, serta menurunkan produktivitas vegetasi mangrove (Kathiresan & Bingham, 2001; Alongi, 2009).

   Alih fungsi lahan menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap kondisi lingkungan mangrove. Salah satu dampak utama adalah terganggunya sistem hidrologi akibat terputusnya aliran pasang surut dan berkurangnya suplai air tawar. Perubahan hidrologi tersebut memengaruhi salinitas, distribusi sedimen, aerasi tanah, dan ketersediaan unsur hara yang sangat penting bagi pertumbuhan mangrove. alam jangka panjang, alih fungsi lahan dapat mengubah mangrove dari ekosistem penyerap karbon menjadi sumber emisi gas rumah kaca akibat hilangnya biomassa dan terganggunya cadangan karbon dalam sedimen. Oleh karena itu, upaya

konservasi, rehabilitasi, dan pengelolaan penggunaan lahan secara berkelanjutan sangat diperlukan untuk menjaga fungsi ekologis serta manfaat ekonomi ekosistem mangrove bagi masyarakat pesisir (Sasmito *et al*., 2019).

3.5.3 Perubahan Iklim

Perubahan iklim merupakan perubahan jangka panjang pada sistem iklim bumi yang ditandai oleh peningkatan suhu global, perubahan pola curah hujan, kenaikan muka air laut, meningkatnya frekuensi kejadian cuaca ekstrem, serta perubahan kondisi oseanografi. Ekosistem mangrove termasuk salah satu ekosistem pesisir yang paling rentan terhadap perubahan iklim karena berada pada zona peralihan antara daratan dan laut (Alongi, 2015). Perubahan iklim memengaruhi kondisi fisik, kimia, dan biologis habitat mangrove, sehingga berdampak pada pertumbuhan, produktivitas, regenerasi, serta distribusi spesies mangrove di berbagai wilayah dunia (Ward *et al*., 2016).

Meskipun mangrove memiliki kemampuan adaptasi terhadap perubahan lingkungan, laju perubahan iklim yang semakin cepat dapat melampaui kemampuan adaptasi alami ekosistem tersebut. Dampak perubahan iklim menjadi lebih besar apabila disertai tekanan lain, seperti alih fungsi lahan, pencemaran, dan perubahan hidrologi akibat aktivitas manusia (Godoy & de Lacerda, 2015).

Tabel 3.2. Dampak Perubahan Iklim terhadap Ekosistem Mangrove

Aspek	Penjelasan	Dampak terhadap Mangrove
Kenaikan Muka Air Laut	Kenaikan muka air laut terjadi akibat pemuaian termal air laut dan mencairnya lapisan es di kutub sebagai dampak perubahan iklim. Kondisi ini meningkatkan frekuensi	Apabila laju kenaikan muka air laut melebihi kemampuan akumulasi sedimen, mangrove dapat mengalami erosi, penenggelaman habitat (*submergence*), serta penurunan luas

Aspek	Penjelasan	Dampak terhadap Mangrove
	dan durasi genangan pada kawasan mangrove sehingga mengubah sistem hidrologi, salinitas, dan karakteristik sedimen (Alongi, 2015).	kawasan. Sebaliknya, jika tersedia suplai sedimen yang cukup dan ruang migrasi ke daratan, mangrove masih mampu beradaptasi melalui pembentukan habitat baru (Alongi, 2015; Ward et al., 2016).
Perubahan Pola Curah Hujan	Perubahan iklim menyebabkan perubahan intensitas, jumlah, dan distribusi curah hujan yang memengaruhi debit sungai, suplai air tawar, dan keseimbangan salinitas di kawasan estuari (Alongi, 2015).	Curah hujan tinggi dapat meningkatkan pasokan air tawar, sedimen, dan unsur hara, namun juga berpotensi meningkatkan limpasan dan pencemaran. Sebaliknya, curah hujan yang rendah meningkatkan evaporasi sehingga salinitas meningkat dan menyebabkan stres osmotik yang menghambat pertumbuhan mangrove (Godoy & de Lacerda, 2015; Ward et al., 2016).
Dampak terhadap Distribusi Mangrove	Perubahan suhu, salinitas, hidrologi, dan muka air laut akibat perubahan iklim memengaruhi distribusi geografis mangrove serta komposisi spesies penyusunnya (Ward et al., 2016).	Mangrove berpotensi memperluas penyebarannya ke wilayah lintang yang lebih tinggi akibat meningkatnya suhu global. Namun, di wilayah pesisir yang mengalami kenaikan

Aspek	Penjelasan	Dampak terhadap Mangrove
		muka air laut, penurunan muka tanah, atau terhambat oleh pembangunan pesisir, luas mangrove dapat berkurang. Perubahan kondisi lingkungan juga dapat mengubah dominansi spesies sesuai tingkat toleransinya terhadap salinitas dan genangan (Alongi, 2015; Godoy & de Lacerda, 2015).

3.6 Upaya Pengelolaan Lingkungan untuk Mendukung Pertumbuhan Mangrove

Pengelolaan lingkungan merupakan serangkaian upaya yang dilakukan untuk menjaga, memulihkan, dan meningkatkan kualitas lingkungan sehingga mampu mendukung pertumbuhan serta keberlanjutan ekosistem mangrove. Pengelolaan ini meliputi perlindungan kawasan mangrove, pengendalian pencemaran, pemulihan sistem hidrologi, rehabilitasi lahan yang terdegradasi, serta pemanfaatan sumber daya pesisir secara berkelanjutan. Upaya tersebut bertujuan untuk mempertahankan kondisi fisik, kimia, dan biologis habitat agar sesuai dengan kebutuhan pertumbuhan mangrove (Alongi, 2009). Selain aspek ekologis, keberhasilan pengelolaan mangrove juga dipengaruhi oleh keterlibatan masyarakat, pemerintah, dan berbagai pemangku kepentingan melalui penerapan pengelolaan pesisir terpadu (*Integrated Coastal Zone Management*). Pendekatan ini mendorong keseimbangan antara konservasi ekosistem dan pemanfaatan sumber daya pesisir secara berkelanjutan sehingga fungsi mangrove sebagai pelindung pantai, penyerap karbon (*blue carbon*), habitat berbagai organisme, dan penunjang produktivitas perikanan tetap terjaga (Friess *et al.,* 2019). Dengan demikian, pengelolaan

lingkungan yang berkelanjutan menjadi faktor penting dalam menjaga kualitas habitat mangrove, meningkatkan keberhasilan rehabilitasi, serta mendukung pertumbuhan dan regenerasi alami mangrove di tengah tekanan aktivitas manusia dan perubahan iklim (Lewis, 2005).

Tabel 3.3. Upaya Pengelolaan Lingkungan untuk Mendukung Pertumbuhan Mangrove

Upaya Pengelolaan	Penjelasan	Referensi
Rehabilitasi dan Restorasi Mangrove	Rehabilitasi dan restorasi dilakukan untuk memulihkan ekosistem mangrove yang mengalami degradasi melalui penanaman kembali, pemulihan hidrologi, serta perbaikan kondisi habitat agar fungsi ekologisnya dapat kembali optimal (Lewis, 2005; Alongi, 2009).	Lewis (2005); Alongi (2009)
Pengelolaan Kualitas Air	Pengelolaan kualitas air bertujuan menjaga salinitas, pH, oksigen terlarut, serta mengendalikan pencemaran sehingga tercipta kondisi lingkungan yang mendukung pertumbuhan mangrove (Alongi, 2009; Kathiresan & Bingham, 2001).	Alongi (2009); Kathiresan & Bingham (2001)
Konservasi Habitat Mangrove	Konservasi habitat dilakukan melalui perlindungan kawasan mangrove, pengendalian alih fungsi lahan, dan pengelolaan sumber daya pesisir secara berkelanjutan untuk mempertahankan keanekaragaman hayati dan fungsi ekosistem (*Friess et al.*, 2019).	Friess *et al*. (2019)

Upaya Pengelolaan	Penjelasan	Referensi
Keterlibatan Masyarakat dalam Pelestarian Mangrove	Partisipasi masyarakat dalam penanaman, pemeliharaan, pengawasan, dan pengelolaan mangrove berbasis masyarakat meningkatkan keberhasilan konservasi serta keberlanjutan pengelolaan ekosistem mangrove (Datta *et al.,* 2012; Primavera & Esteban, 2008).	Datta *et al.* (2012); Primavera & Esteban (2008)

D. RANGKUMAN

Pertumbuhan mangrove dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan yang saling berinteraksi, meliputi faktor fisik, kimia, hidrologi, dan biologis. Faktor fisik seperti suhu, intensitas cahaya matahari, pasang surut, jenis substrat, sedimentasi, serta sirkulasi air menentukan kondisi habitat yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan mangrove. Faktor kimia, seperti salinitas, derajat keasaman (pH), ketersediaan unsur hara, dan kandungan oksigen terlarut, berperan dalam mengatur proses fisiologis tanaman, termasuk penyerapan air, fotosintesis, respirasi, dan metabolisme. Sementara itu, faktor hidrologi, seperti ketersediaan air tawar, pola pasang surut, dan dinamika estuari, memengaruhi distribusi nutrien, tingkat genangan, serta keseimbangan salinitas di kawasan mangrove. Selain faktor abiotik, faktor biologis berupa kompetisi antar tumbuhan, interaksi dengan mikroorganisme, dan peran fauna juga berkontribusi terhadap siklus nutrien, dekomposisi bahan organik, regenerasi, serta produktivitas ekosistem mangrove.

Tingginya aktivitas manusia seperti pencemaran lingkungan, alih fungsi lahan, eksploitasi sumber daya pesisir, serta dampak perubahan iklim menjadi ancaman utama terhadap kelestarian ekosistem mangrove. Berbagai tekanan tersebut dapat mengubah kondisi fisik, kimia, biologis, dan hidrologi habitat sehingga menghambat pertumbuhan, menurunkan keanekaragaman hayati, serta mengurangi kemampuan mangrove dalam menyediakan jasa ekosistem. Oleh karena itu,

upaya pengelolaan lingkungan melalui rehabilitasi dan restorasi mangrove, pengelolaan kualitas air, konservasi habitat, serta pelibatan masyarakat dalam pengelolaan pesisir menjadi langkah penting untuk menjaga keberlanjutan ekosistem mangrove.

Dengan demikian, keseimbangan lingkungan pesisir perlu dipertahankan melalui pengelolaan yang berkelanjutan dan berbasis ekosistem. Kondisi lingkungan yang baik akan mendukung pertumbuhan mangrove secara optimal, mempertahankan fungsi ekologisnya sebagai pelindung pantai, penyerap karbon (*blue carbon*), penyedia habitat berbagai organisme, serta penunjang produktivitas perikanan. Keberhasilan menjaga keseimbangan faktor-faktor lingkungan tersebut akan menjadi kunci dalam mewujudkan kelestarian ekosistem mangrove dan manfaatnya bagi kehidupan manusia maupun lingkungan di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

Alongi, D. M. (2009). *The Energetics of Mangrove Forests*. Springer.

Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science, 6*, 195–219.

Alongi, D. M. (2015). The impact of climate change on mangrove forests. *Current Climate Change Reports, 1*(1), 30–39.

Alongi, D. M. (2018). Impact of global change on nutrient dynamics in mangrove forests. *Forests, 9*(10), 596. https://doi.org/10.3390/f9100596.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson.

Crawley, M., et al. (2024). Temperature responses of ecosystem respiration. *Nature Reviews Earth & Environment*.

Datta, D., Chattopadhyay, R. N., & Guha, P. (2012). Community based mangrove management: A review on status and sustainability. *Journal of Environmental Management, 107*, 84–95.

Day, J. W., Hall, C. A. S., Kemp, W. M., & Yáñez-Arancibia, A. (1989). *Estuarine Ecology*. Wiley.

Dia S P S , Nurjanah & A M Jacoeb. 2020. Identification of active compounds from lindur root plants (*Bruguiera gymnorrhiza*) as α-glucosidase inhibitors. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1-16. doi:10.1088/1755-1315/404/1/012062.

Duke, N. C. (1992). Mangrove floristics and biogeography. In A. I. Robertson & D. M. Alongi (Eds.), *Tropical Mangrove Ecosystems*. American Geophysical Union.

Duke, N. C., Burns, K. A., Swannell, R. P. J., Dalhaus, O., & Rupp, R. J. (2000). Dispersant use and mangroves: A review of impacts and management considerations. *Marine Pollution Bulletin, 41*(7–12), 397–406.

Feller, I. C., Lovelock, C. E., Berger, U., McKee, K. L., Joye, S. B., & Ball, M. C. (2010). Biocomplexity in mangrove ecosystems. *Annual Review of Marine Science, 2*, 395–417.

Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist, 179*(4), 945–963.

Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Hamilton, S. E., Lee, S. Y., Lucas, R., Primavera, J., Rajkaran, A., & Shi, S. (2019). The state of the world's mangrove forests: Past, present, and future. *Annual Review of Environment and Resources, 44*, 89–115.

Gessner, M. O., Swan, C. M., Dang, C. K., McKie, B. G., Bardgett, R. D., Wall, D. H., & Hättenschwiler, S. (2010). Diversity meets decomposition. *Trends in Ecology & Evolution, 25*(6), 372–380.

Gilman, E. L., Ellison, J., Duke, N. C., & Field, C. (2008). Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review. *Aquatic Botany, 89*(2), 237–250. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.009.

Jennerjahn, T. C., Gilman, E., Krauss, K. W., Lacerda, L. D., Nordhaus, I., & Wolanski, E. (2017). *Mangrove Ecosystems under Climate Change*. Springer.

Godoy, M. D. P., & de Lacerda, L. D. (2015). Mangroves response to climate change: A review of recent findings on mangrove extension and distribution. *Anais da Academia Brasileira de Ciências, 87*(2), 651–667.

Hermialingga, S., Suwignyo, R. A., & Ulqodry, T. Z. (2024). Estimasi biomassa dan simpanan karbon pada akar mangrove di Desa Ratatotok Muara, Kecamatan Ratatotok, Kabupaten Minahasa Tenggara, Provinsi Sulawesi Utara. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis, 12*(3), 170–176. https://doi.org/10.35800/jplt.12.3.2024.59883.

Holguin, G., Vazquez, P., & Bashan, Y. (2001). The role of sediment microorganisms in the productivity, conservation, and rehabilitation of mangrove ecosystems: An overview. *Biology and Fertility of Soils, 33*(4), 265–278.

Hossain, M. D., & Nuruddin, A. A. (2016). Soil and mangrove: A review. *Journal of Environmental Science and Technology, 9*(2), 198–207.

Jennerjahn, T. C., Gilman, E., Krauss, K. W., Lacerda, L. D., Nordhaus, I., & Wolanski, E. (2017). *Mangrove Ecosystems under Climate Change*. Springer.

Kathiresan, K., & Bingham, B. L. (2001). Biology of mangroves and mangrove ecosystems. *Advances in Marine Biology, 40*, 81–251.

Krauss, K. W., Lovelock, C. E., McKee, K. L., López-Hoffman, L., Ewe, S. M. L., & Sousa, W. P. (2008). Environmental drivers in mangrove establishment and early development: A review. *Aquatic Botany, 89*(2), 105–127.

Kristensen, E. (2008). Mangrove crabs as ecosystem engineers: With emphasis on sediment processes. *Journal of Sea Research, 59*(1–2), 30–43.

Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar, T., & Marchand, C. (2008). Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic Botany, 89*(2), 201–219.

Lee, S. Y. (2008). Mangrove macrobenthos: Assemblages, services, and linkages. *Journal of Sea Research, 59*(1–2), 16–29.

Lewis, R. R. (2005). Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests. *Ecological Engineering, 24*(4), 403–418.

Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Osland, M. J., Reef, R., & Ball, M. C. (2016). The physiology of mangrove trees with changing climate. Springer.

MacFarlane, G. R., & Burchett, M. D. (2002). Toxicity, growth and accumulation relationships of copper, lead and zinc in *Avicennia marina*. *Marine Environmental Research, 54*(1), 65–84.

Nagelkerken, I., Blaber, S. J. M., Bouillon, S., Green, P., Haywood, M., Kirton, L. G., et al. (2008). The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. *Aquatic Botany, 89*(2), 155–185.

Nichols, M. M., & Biggs, R. B. (2005). Estuaries. In M. L. Schwartz (Ed.), *Encyclopedia of Coastal Science*.

Parida, A. K., & Jha, B. (2010). Salt tolerance mechanisms in mangroves: A review. *Trees, 24*(2), 199–217. https://doi.org/10.1007/s00468-010-0417-x.

Primavera, J. H., & Esteban, J. M. A. (2008). A review of mangrove rehabilitation in the Philippines: Successes, failures and

future prospects. *Wetlands Ecology and Management, 16*(5), 345–358.
Reef, R., Feller, I. C., & Lovelock, C. E. (2010). Nutrition of mangroves. *Tree Physiology, 30*(9), 1148–1160. https://doi.org/10.1093/treephys/tpq048.
Sasmito, S. D., Taillardat, P., Clendenning, J. N., Cameron, C., Friess, D. A., Murdiyarso, D., & Hutley, L. B. (2019). Effect of land-use and land-cover change on mangrove blue carbon: A systematic review. *Global Change Biology, 25*(12), 4291–4302.
Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2018). *Plant Physiology and Development* (7th ed.). Sinauer Associates.
Tomlinson, P. B. (2016). *The Botany of Mangroves* (2nd ed.). Cambridge University Press.
Ward, R. D., Friess, D. A., Day, R. H., & MacKenzie, R. A. (2016). Impacts of climate change on mangrove ecosystems: A region by region overview. *Ecosystem Health and Sustainability, 2*(4), e01211.

BAB 4
ZONA BIOGEOGRAFIK UTAMA LAUT

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti pembelajaran materi "Zona Biogeografik Utama Laut", peserta didik diharapkan mampu:

1. **Menjelaskan** pengertian dan konsep zona biogeografik utama laut.
2. **Mengidentifikasi** berbagai zona biogeografik utama laut berdasarkan karakteristik geografis dan ekologisnya.
3. **Menjelaskan** karakteristik lingkungan pada masing-masing zona biogeografik laut.
4. **Mengidentifikasi** keanekaragaman organisme yang terdapat pada setiap zona biogeografik utama laut.
5. **Menganalisis** faktor lingkungan yang memengaruhi persebaran dan keanekaragaman organisme laut pada setiap zona.
6. **Membandingkan** karakteristik dan keanekaragaman hayati antar zona biogeografik utama laut.
7. **Menyajikan** hasil analisis mengenai zona biogeografik utama laut dalam bentuk tabel, peta, grafik, laporan, atau presentasi.
8. **Menunjukkan sikap peduli terhadap lingkungan laut** melalui pemahaman tentang pentingnya menjaga keanekaragaman dan keseimbangan ekosistem laut.

B. MATERI

4.1 Konsep Biogeografi Laut

4.1.1 Pengertian Biogeografi Laut

Biogeografi laut adalah cabang ilmu biogeografi yang mempelajari pola persebaran organisme di lingkungan laut serta proses-proses fisik, kimia, dan biologis yang membentuk pola tersebut dalam ruang dan waktu. Secara lebih spesifik, biogeografi laut menelaah bagaimana spesies dan komunitas laut

terdistribusi pada skala lokal, regional, hingga global, serta bagaimana sejarah evolusi, hambatan geografis, dan kondisi lingkungan memengaruhi distribusi tersebut.

Sebagai bagian dari biogeografi umum, biogeografi laut berakar pada prinsip bahwa distribusi organisme tidak acak, melainkan mencerminkan interaksi antara kemampuan dispersi organisme, sifat habitat, dan sejarah geologi–oseanografi wilayah bersangkutan. Dalam konteks kelautan, fokus kajiannya mencakup perairan pesisir, paparan benua, laut dalam, hingga wilayah oseanik terbuka, dengan perhatian khusus pada batas-batas biogeografik seperti provinsi biogeografi laut dan daerah endemisme.

4.1.2 Prinsip Dasar Distribusi Organisme Laut

Distribusi organisme laut diatur oleh sejumlah prinsip dasar yang menjadi landasan pemahaman pola biogeografik di laut.

1. **Prinsip provincialitas (kewilayahan)**

   Organisme laut cenderung membentuk kelompok-kelompok distribusi yang khas pada wilayah tertentu, yang dikenal sebagai provinsi biogeografi atau region biogeografik. Setiap provinsi dicirikan oleh komposisi taksonomi yang relatif unik dan tingkat endemisitas tertentu, misalnya provinsi *Indo-West Pacific*, Atlantik tropis, atau wilayah laut dingin di Pasifik utara.

2. **Prinsip zonality (zonasi)**

   Distribusi organisme menunjukkan pola zonasi baik secara latitudinal (berdasarkan garis lintang) maupun vertikal (berdasarkan kedalaman). Secara latitudinal, suhu permukaan laut menghasilkan zona tropis, subtropis, sedang, dan kutub yang masing-masing memiliki komunitas khas. Secara vertikal, gradien cahaya, suhu, tekanan, dan nutrien menghasilkan zona epipelagik, mesopelagik, batipelagik, dan seterusnya, dengan komunitas organisme yang berbeda.

3. **Prinsip sejarah dan hubungan genetik**

   Pola distribusi tidak hanya ditentukan oleh kondisi lingkungan saat ini, tetapi juga oleh sejarah perkembangan wilayah (paleogeografi), perubahan permukaan laut,

pergeseran lempeng, serta hubungan kekerabatan genetik antartakson. Bukti fosil dan data filogeografi sering digunakan untuk merekonstruksi bagaimana distribusi organisme laut berubah sepanjang waktu geologi.

4. **Prinsip dispersi dan hambatan**

   Sebaran organisme laut sangat dipengaruhi oleh kemampuan dispersi (misalnya melalui larva planktonik, migrasi dewasa, atau transportasi oleh arus) serta keberadaan hambatan fisik seperti daratan, palung dalam, atau pertemuan arus yang membatasi pergerakan. Daerah dengan hambatan kuat cenderung menjadi batas biogeografik yang jelas (Pepato et al., 2019).

5. **Prinsip hubungan dengan lingkungan abiotik**

   Distribusi organisme berkaitan erat dengan gradien faktor abiotik seperti suhu, salinitas, nutrien, cahaya, dan tipe substrat. Organisme umumnya memiliki kisaran toleransi tertentu terhadap faktor-faktor ini, sehingga pola sebarannya sering mengikuti "selubung lingkungan" (*environmental envelope*) yang sesuai dengan kebutuhan fisiologisnya.

4.1.3 Hubungan Biogeografi dengan Ekologi Laut

Biogeografi laut dan ekologi laut saling melengkapi dalam memahami kehidupan di laut, meskipun memiliki fokus skala yang berbeda.

Biogeografi laut menekankan pola distribusi organisme pada skala ruang yang luas (regional hingga global) dan skala waktu yang panjang (evolusi, sejarah geologi). Pertanyaan utamanya adalah: mengapa suatu spesies atau kelompok taksonomi hadir di wilayah tertentu dan tidak di wilayah lain?

Ekologi laut lebih menitikberatkan pada interaksi organisme dengan lingkungan dan antarspesies pada skala lokal hingga regional, serta bagaimana interaksi tersebut menentukan kelimpahan, struktur komunitas, dan fungsi ekosistem.

Dengan demikian, biogeografi laut dapat dipandang sebagai "ekologi dalam ruang dan waktu yang diperluas", sedangkan ekologi laut memberikan mekanisme proses yang menjelaskan pola-pola biogeografik.

4.1.4 Faktor Pembentuk Pola Biogeografik Laut

Pola biogeografik laut dibentuk oleh interaksi kompleks antara faktor fisik, kimia, biologis, dan historis. Secara umum, faktor-faktor tersebut dapat dikelompokkan sebagai berikut.

1. **Faktor Fisik–Oseanografik**
   a. **Suhu laut**
      Suhu merupakan faktor paling penting dalam menentukan pola distribusi organisme laut pada skala global. Garis isotherm sering kali berimpit dengan batas-batas biogeografik, karena organisme memiliki kisaran toleransi suhu tertentu.
   b. **Arus laut**
      Arus berperan dalam mendispersikan larva, nutrien, dan organisme, sekaligus dapat menjadi hambatan bila terjadi pertemuan arus yang membentuk front oseanografik. Daerah pertemuan arus (misalnya arus hangat dan dingin) sering menjadi batas biogeografik yang jelas.
   c. **Salinitas**
      Variasi salinitas, terutama di wilayah pesisir, estuaria, dan laut semi-tertutup, memengaruhi distribusi organisme yang memiliki toleransi salinitas sempit.
   d. **Kedalaman dan topografi dasar laut**
      Kedalaman menentukan gradien cahaya, tekanan, dan tipe habitat (paparan benua, lereng benua, laut dalam), sehingga membentuk zonasi vertikal komunitas. Struktur topografi seperti palung, punggung laut, dan kepulauan dapat berfungsi sebagai koridor atau hambatan dispersi.
   e. **Cahaya dan penetrasi radiasi**
      Ketersediaan cahaya membatasi zona fotosintesis (eufotik) dan memengaruhi distribusi fitoplankton serta organisme yang bergantung padanya.
2. **Faktor Kimia Lingkungan**
   a. **Nutrien (nitrat, fosfat, silikat)**
      Ketersediaan nutrien memengaruhi produktivitas primer dan struktur jaring makanan, yang pada

gilirannya memengaruhi distribusi organisme tingkat tinggi.

b. **Oksigen terlarut**
   Zona minim oksigen (OMZ) dapat menjadi hambatan bagi organisme yang membutuhkan oksigen tinggi, sehingga membentuk batas distribusi vertikal dan horizontal tertentu.

c. **Parameter kimia lain (pH, alkalinitas, polutan)**
   Perubahan kimiawi akibat pengasaman laut atau pencemaran dapat mengubah kesesuaian habitat bagi organisme tertentu, terutama yang memiliki cangkang atau struktur kalsium karbonat.

3. **Faktor Biologis**
   a. **Kemampuan dispersi dan siklus hidup**
      Organisme dengan tahap larva planktonik yang lama cenderung memiliki sebaran lebih luas dibanding organisme dengan perkembangan langsung atau larva berumur pendek.
   b. **Interaksi biologis (kompetisi, predasi, simbiosis)**
      Interaksi antarspesies dapat membatasi atau memperluas sebaran suatu spesies, misalnya melalui kompetisi ruang atau sumber daya, atau melalui hubungan mutualisme yang memungkinkan kolonisasi habitat baru.
   c. **Spesies invasif dan introduksi**
      Aktivitas manusia (pelayaran, akuakultur) dapat memperkenalkan spesies asing yang mengubah pola distribusi alami dan struktur komunitas (Briggs, 2006).
4. **Faktor Historis dan Geologis**
   a. **Perubahan permukaan laut dan paleogeografi**
      Fluktuasi permukaan laut pada masa glasial–interglasial mengubah luas paparan benua dan konektivitas antarwilayah laut, sehingga memengaruhi jalur dispersi dan isolasi populasi.
   b. **Pergeseran lempeng dan pembentukan hambatan fisik**
      Terbentuknya selat, kepulauan, atau penutupan jalur laut (misalnya Terusan Panama) dapat memisahkan atau

menghubungkan biota laut, menghasilkan pola endemisitas dan diferensiasi biogeografik.

c. **Sejarah evolusi dan filogeni**
   Hubungan kekerabatan antartakson dan waktu divergensi memberikan informasi tentang asal-usul dan jalur penyebaran organisme laut, yang sering kali selaras dengan pola biogeografik yang diamati saat ini.

Secara ringkas, pola biogeografik laut merupakan hasil integrasi antara kondisi lingkungan saat ini (faktor fisik-kimia-biologis) dan jejak sejarah geologi–evolusi wilayah tersebut.

4.2 Pembagian Zona Biogeografik Laut

Berdasarkan gradien suhu, intensitas cahaya, dan kondisi oseanografik lainnya, lingkungan laut dapat dibagi menjadi beberapa zona biogeografik utama. Pembagian ini membantu menjelaskan pola distribusi organisme laut pada skala global maupun vertikal. Secara horisontal (berdasarkan lintang), laut dibagi menjadi zona tropis, subtropis, sedang (temperate), dan kutub. Secara vertikal (berdasarkan kedalaman), dikenal zona laut dalam yang mencakup wilayah batipelagik, abisal, dan hadal.

4.2.1 Zona Tropis

Zona tropis merupakan wilayah laut yang terletak di antara Garis Balik Utara (Tropic of Cancer, 23,5° LU) dan Garis Balik Selatan (Tropic of Capricorn, 23,5° LS). Wilayah ini menerima penyinaran matahari hampir tegak lurus sepanjang tahun, sehingga suhu permukaan laut relatif tinggi dan stabil, umumnya berkisar antara 20–30°C.

Karakteristik utama zona tropis:

1. **Suhu tinggi dan stabil**
   Suhu permukaan laut jarang turun di bawah 20°C, bahkan di musim "dingin". Kondisi ini mendukung metabolisme organisme yang cepat dan produktivitas primer yang tinggi di wilayah tertentu(Sattuang & Wulandari, 2025).
2. **Keanekaragaman hayati tinggi**
   Zona tropis, khususnya Indo-Pasifik Barat dan Karibia, merupakan pusat keanekaragaman hayati laut global, terutama untuk terumbu karang, ikan karang, moluska, dan

krustasea. Terumbu karang menjadi ekosistem khas yang mendefinisikan lanskap biogeografik tropis.

3. **Struktur komunitas yang kompleks**
   Ekosistem seperti terumbu karang, hutan mangrove, dan padang lamun membentuk mosaik habitat yang mendukung rantai makanan kompleks dan banyak relung ekologis.
4. **Faktor pembatas**
   Meskipun kaya spesies, banyak wilayah tropis bersifat oligotrofik (miskin nutrien) di perairan oseanik terbuka, sehingga produktivitas primer sering terbatas pada daerah upwelling atau perairan pesisir.

Zona tropis menjadi fokus utama biogeografi laut karena tingginya endemisitas, kompleksitas biota, dan kerentanan terhadap perubahan iklim serta aktivitas manusia.

4.2.2 Zona Subtropis

Zona subtropis terletak di antara wilayah tropis dan zona sedang, umumnya pada lintang sekitar 23,5°–35° (beberapa literatur menggunakan 30°–40°) di kedua belahan bumi. Zona ini merupakan wilayah transisi antara kondisi tropis yang hangat dan stabil dengan kondisi sedang yang lebih musiman.

Karakteristik utama zona subtropis:

1. **Suhu permukaan laut sedang–hangat**
   Suhu lebih rendah daripada zona tropis, namun masih relatif hangat, dengan variasi musiman yang lebih nyata. Beberapa literatur membedakan subtropis hangat dan subtropis dingin berdasarkan rezim suhu.
2. **Dominasi gyre subtropis**
   Di wilayah oseanik terbuka, zona subtropis sering didominasi oleh gyre subtropis yang bersifat stabil, miskin nutrien, dan memiliki produktivitas primer rendah. Kondisi ini memengaruhi struktur komunitas plankton dan ikan oseanik.
3. **Komposisi biota campuran**
   Komunitas organisme di zona subtropis merupakan campuran antara spesies tropis dan spesies zona sedang,

dengan beberapa takson yang khas untuk wilayah transisi ini.

4. **Pentingnya sebagai wilayah transisi biogeografik**
   Zona subtropis sering menjadi batas halus antara provinsi biogeografi tropis dan sedang, sehingga penting dalam memahami gradien keanekaragaman dan batas persebaran spesies (Palomares et al., 2020)

Meskipun kurang menonjol dalam literatur populer dibanding zona tropis atau kutub, zona subtropis memiliki peran penting dalam dinamika biogeografik global, terutama terkait arus laut, gyre, dan perpindahan spesies.

4.2.3 Zona Sedang (*Temperate*)

Zona sedang (*temperate*) terletak di antara zona subtropis dan kutub, umumnya pada lintang sekitar 35°–66,5° di kedua belahan bumi. Wilayah ini mencakup sebagian besar perairan Atlantik Utara, Pasifik Utara, dan sebagian Samudra Selatan.

Karakteristik utama zona sedang:

1. **Suhu moderat dengan variasi musiman jelas**
   Suhu permukaan laut berkisar sekitar 5–20°C, dengan perbedaan nyata antara musim panas dan musim dingin. Variasi musiman ini memengaruhi siklus reproduksi, migrasi, dan produktivitas primer.
2. **Produktivitas primer tinggi**
   Banyak wilayah zona sedang mengalami upwelling atau pencampuran vertikal yang kuat pada musim tertentu, sehingga kaya nutrien dan mendukung blooming fitoplankton. Kondisi ini mendukung perikanan komersial penting (mis. kod, herring, salmon).
3. **Komunitas yang didominasi makroalga dan padang lamun**
   Di wilayah pesisir, ekosistem khas zona sedang sering didominasi oleh hutan rumput laut (*kelp forests*) dan padang lamun, yang menjadi habitat penting bagi ikan, invertebrata, dan mamalia laut.

4. **Keanekaragaman sedang, kelimpahan tinggi**
   Keanekaragaman spesies umumnya lebih rendah daripada zona tropis, tetapi kelimpahan individu dan biomassa sering sangat tinggi, terutama pada tingkat trofik rendah dan menengah.

Zona sedang menjadi model penting dalam studi biogeografi dan ekologi laut karena responsnya yang jelas terhadap perubahan iklim musiman dan jangka panjang.

4.2.4 Zona Kutub (Polar)

Zona kutub mencakup wilayah laut di sekitar Kutub Utara (Arktik) dan Kutub Selatan (Antartika), umumnya pada lintang lebih dari 66,5° LU/LS. Wilayah ini mengalami suhu sangat rendah, tutupan es laut yang luas, dan variasi cahaya ekstrem antara musim panas (siang terus-menerus) dan musim dingin (malam terus-menerus).

Karakteristik utama zona kutub:

1. **Suhu sangat rendah**
   Suhu permukaan laut sering mendekati titik beku air laut (sekitar –1,9°C), terutama di bawah tutupan es. Kondisi ini membatasi jenis organisme yang dapat bertahan dan memperlambat metabolisme.
2. **Tutupan es laut dan variasi cahaya ekstrem**
   Es laut memengaruhi penetrasi cahaya, stratifikasi kolom air, dan ketersediaan habitat bagi organisme yang bergantung pada es (*ice-associated species*). Variasi cahaya musiman yang ekstrem memengaruhi waktu blooming fitoplankton dan siklus hidup organisme.
3. **Produktivitas musiman yang tinggi**
   Meskipun rata-rata tahunan produktivitas mungkin rendah, pada musim panas terjadi blooming fitoplankton yang sangat intens akibat pencairan es dan peningkatan cahaya, yang mendukung rantai makanan singkat namun efisien.
4. **Komunitas khas dan endemisitas tinggi**
   Zona kutub memiliki komunitas unik, seperti krill Antartika, ikan kod Arktik, anjing laut, walrus, dan penguin (di Selatan),

dengan tingkat endemisitas yang signifikan, terutama di Antartika.

Zona kutub sangat sensitif terhadap perubahan iklim; pencairan es laut dan pemanasan suhu mengubah struktur komunitas, batas biogeografik, dan interaksi spesies secara cepat.

4.2.5 Zona Laut Dalam

Zona laut dalam merujuk pada wilayah kolom air dan dasar laut di bawah zona fotik (eufotik), umumnya mulai dari kedalaman sekitar 200 m hingga lebih dari 10.000 m di palung terdalam. Secara vertikal, zona pelagik laut dalam dibagi menjadi mesopelagik (200–1.000 m), batipelagik (1.000–4.000 m), abisopelagik (4.000–6.000 m), dan hadopelagik (>6.000 m). Zona bentik yang bersesuaian disebut batial, abisal, dan hadal (Faradiba, 2023).

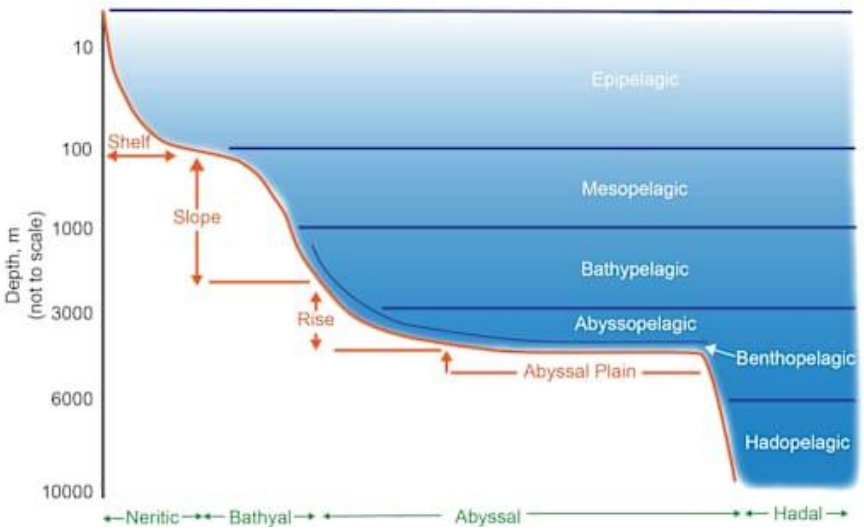
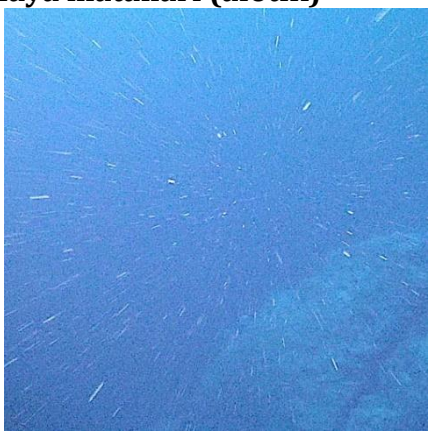


Diagram illustrating the ocean's pelagic and benthic zones defined

Karakteristik utama zona laut dalam:

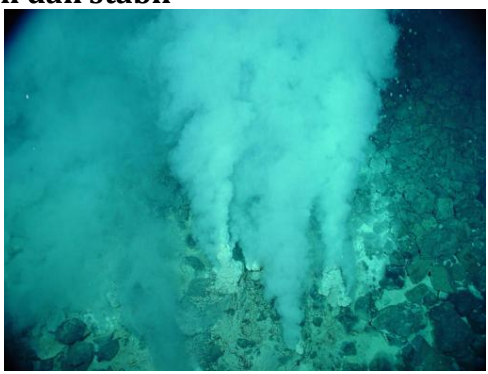
1. **Tidak ada cahaya matahari (afotik)**



Marine snow

Di bawah sekitar 1.000 m, cahaya matahari praktis tidak ada; zona batipelagik ke bawah sepenuhnya afotik(Hall, 2018) Organisme tidak dapat bergantung pada fotosintesis langsung, melainkan pada detritus yang jatuh dari atas ("marine snow") atau sumber energi kimia (mis. ventilasi hidrotermal).

2. **Suhu rendah dan stabil**



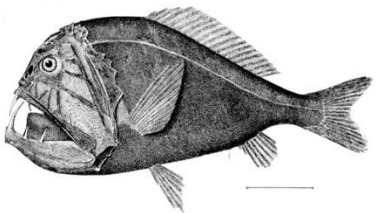
White smokers at Champagne Vent, Eifuku, Japan

Suhu di zona laut dalam umumnya sangat dingin, sekitar 1–4°C, dan relatif konstan sepanjang tahun. Kondisi ini memperlambat metabolisme dan pertumbuhan organisme.

3. **Tekanan hidrostatik sangat tinggi**
   Tekanan meningkat sekitar 1 atm setiap 10 m kedalaman; di zona abisal dan hadal, tekanan dapat mencapai ratusan hingga lebih dari 1.000 atm. Organisme laut dalam memiliki adaptasi fisiologis dan biokimia khusus untuk bertahan pada tekanan ekstrem.

4. **Ketersediaan makanan terbatas**
   Sebagian besar energi berasal dari materi organik yang jatuh dari zona atas (detritus, bangkai, kotoran), sehingga kelimpahan organisme umumnya lebih rendah daripada di zona fotik. Namun, di sekitar ventilasi hidrotermal dan rembesan dingin (*cold seeps*), terdapat ekosistem lokal yang sangat produktif yang berbasis kemosintesis bakteri.

5. **Adaptasi morfologis dan perilaku unik**



Anoplogaster cornuta

   Organisme laut dalam sering memiliki mata besar atau justru tidak bermata, mulut besar dengan gigi panjang, tubuh lunak, serta kemampuan bioluminesensi untuk menarik mangsa, berkomunikasi, atau kamuflase. Contoh khas termasuk ikan lentera (lanternfish), anglerfish, dan grenadier abisal.

Pembagian vertikal zona laut dalam:

1. **Mesopelagik (200–1.000 m)**
   Zona "twilight" dengan cahaya sangat redup; banyak organisme melakukan migrasi vertikal harian ke zona atas untuk mencari makan.
2. **Batipelagik (1.000–4.000 m)**

Zona tengah malam (midnight zone) yang sepenuhnya gelap; dihuni oleh ikan, krustasea, moluska, dan ubur-ubur yang beradaptasi dengan kegelapan dan tekanan tinggi.

3. **Abisopelagik (4.000–6.000 m)**
   Zona di atas dataran abisal; kondisi sangat stabil, dengan komunitas bentik yang didominasi oleh organisme pemakan detritus dan predator khusus.
4. **Hadopelagik (>6.000 m)**
   Zona di palung samudra terdalam; lingkungan ekstrem dengan tekanan sangat tinggi, suhu mendekati beku, dan komunitas yang sering terkait dengan ventilasi hidrotermal atau rembesan kimia.

Zona laut dalam mencakup sebagian besar volume dan luas dasar laut Bumi, sehingga memiliki peran penting dalam siklus karbon global dan keanekaragaman hayati tersembunyi yang masih banyak belum terdeskripsi.

4.3 Zona Berdasarkan Karakteristik Lingkungan Laut

Selain pembagian berdasarkan lintang (tropis–kutub) dan kedalaman vertikal (epipelagik–hadopelagik), lingkungan laut juga diklasifikasikan berdasarkan posisi relatif terhadap daratan, dasar laut, dan kolom air. (Wikipedia, 2023) Klasifikasi ini menghasilkan lima zona utama: litoral, neritik, oseanik, pelagik, dan bentik. Pembagian ini penting dalam biogeografi laut karena setiap zona memiliki karakteristik fisika–kimia dan komunitas organisme yang khas (Kon et al., 2020).

4.3.1 Zona Litoral

Zona litoral (sering disamakan dengan zona intertidal) adalah wilayah pantai yang terletak antara garis pasang tertinggi dan garis surut terendah, sehingga secara berkala terendam air laut saat pasang dan terpapar udara saat surut. Dalam beberapa literatur, zona litoral juga mencakup wilayah dangkal dekat pantai yang masih dipengaruhi oleh gelombang, arus pasang-surut, dan arus sepanjang pantai hingga kedalaman sekitar 5–10 m di bawah garis surut.

Karakteristik utama zona litoral:

1. **Paparan terhadap udara dan air secara bergantian**
   Organisme di zona ini harus mampu bertahan terhadap perubahan kondisi yang ekstrem: terendam air asin saat pasang, terpapar udara, sinar matahari, dan kemungkinan kekeringan saat surut.
2. **Variasi suhu, salinitas, dan kelembapan yang tinggi**
   Karena terpapar langsung terhadap atmosfer dan radiasi matahari, suhu dan salinitas dapat berfluktuasi secara tajam dalam waktu singkat.
3. **Energi gelombang dan gerakan air tinggi**
   Zona litoral mengalami gaya mekanik kuat dari gelombang pecah, arus pasang-surut, dan arus sepanjang pantai, sehingga hanya organisme dengan adaptasi khusus (cangkang keras, kemampuan melekat kuat, tubuh fleksibel) yang dapat bertahan.
4. **Keanekaragaman habitat**
   Zona litoral mencakup berbagai tipe habitat: pantai berbatu (*rocky shores*), pantai berpasir, lumpur (*mudflats*), rawa garam (*salt marshes*), dan hutan mangrove. Setiap subtipe memiliki komunitas organisme yang khas.
5. **Sub-zona dalam zona litoral**
   a. Secara vertikal, zona litoral sering dibagi menjadi:
   b. *Supralitoral* (di atas garis pasang tertinggi, hanya terkena percikan air),
   c. *Eulitoral/intertidal* (antara pasang tertinggi dan surut terendah), dan
   d. *Sublitoral atas* (di bawah surut terendah, hampir selalu terendam).

Zona litoral merupakan wilayah dengan produktivitas biologis tinggi dan sering menjadi tempat penting bagi pemijahan, pembesaran juvenil, dan pencarian makan bagi banyak spesies laut dan burung pantai.

4.3.2 Zona Neritik

Zona neritik (disebut juga zona sublitoral atau *coastal waters*) adalah wilayah laut dangkal yang terletak di atas paparan

benua (*continental shelf*), mulai dari batas bawah zona litoral (garis surut terendah) hingga tepi paparan benua pada kedalaman sekitar 200 m. Zona ini merupakan bagian dari lingkungan pelagik yang masih mendapat cukup cahaya untuk fotosintesis hingga ke dasar.

Karakteristik utama zona neritik:

1. **Kedalaman dangkal (hingga ~200 m)**
   Zona neritik umumnya tidak lebih dalam dari 200 m, sehingga cahaya matahari masih dapat mencapai dasar laut di sebagian besar wilayahnya.
2. **Cahaya melimpah dan fotosintesis aktif**
   Karena berada dalam zona fotik, zona neritik mendukung pertumbuhan fitoplankton, makroalga, lamun, dan bahkan terumbu karang di wilayah tropis.
3. **Kaya nutrien dan oksigen**
   Dekat dengan daratan, zona neritik menerima masukan nutrien dari sungai, limpasan darat, dan pencampuran vertikal, sehingga produktivitas primernya tinggi. Airnya juga umumnya well-oxygenated karena pencampuran oleh gelombang dan arus.
4. **Suhu dan salinitas relatif stabil**
   Dibandingkan zona litoral, kondisi fisika-kimia di zona neritik lebih stabil, meskipun masih dapat bervariasi menurut musim dan lintang.
5. **Pusat keanekaragaman dan perikanan**
   Zona neritik merupakan habitat penting bagi banyak spesies ikan, krustasea, moluska, dan mamalia laut; sebagian besar perikanan dunia beroperasi di zona ini.

Secara biogeografik, zona neritik sering dibagi lebih lanjut menjadi wilayah neritik tropis, sedang, dan kutub, yang masing-masing memiliki komunitas khas.

4.3.3 Zona Oseanik

Zona oseanik adalah wilayah laut terbuka yang terletak di luar tepi paparan benua, yaitu di luar zona neritik. Secara operasional, zona ini sering didefinisikan dimulai dari kedalaman lebih dari 200 m, di mana dasar laut sudah berada di luar paparan

benua dan masuk ke wilayah lereng benua hingga cekungan samudra (Wikipedia, 2019).

Karakteristik utama zona oseanik:

1. **Laut terbuka, jauh dari pengaruh langsung daratan**
   Zona oseanik mencakup sekitar 65% dari total luas lautan dunia dan merupakan wilayah open ocean yang sangat luas.
2. **Kedalaman besar dan dasar laut dalam**
   Di zona oseanik, kedalaman umumnya jauh melebihi 200 m, mencapai ribuan meter di cekungan samudra dan palung.
3. **Ketersediaan nutrien bervariasi**
   Di wilayah oseanik tropis dan subtropis, perairan sering bersifat oligotrofik (miskin nutrien) karena stratifikasi kuat dan minim pencampuran vertikal. Sebaliknya, di wilayah oseanik tertentu yang mengalami upwelling atau pertemuan arus, produktivitas dapat sangat tinggi.
4. **Komunitas didominasi organisme pelagik**
   Zona oseanik dihuni terutama oleh organisme pelagik seperti ikan tuna, hiu oseanik, ikan layang, cumi-cumi besar, dan berbagai jenis plankton.
5. **Penting dalam siklus karbon dan iklim global**
   Sebagai wilayah terluas di lautan, zona oseanik berperan penting dalam penyerapan CO_2, siklus nutrien global, dan regulasi iklim.

Zona oseanik menjadi fokus penting dalam biogeografi laut untuk memahami distribusi spesies oseanik, migrasi jarak jauh, serta dampak perubahan iklim terhadap ekosistem laut terbuka.

4.3.4 Zona Pelagik

Zona pelagik merujuk pada seluruh kolom air laut, dari permukaan hingga dasar, tanpa memperhitungkan dasar laut itu sendiri. Zona ini dibedakan dari zona bentik yang mencakup dasar laut dan sedimen di bawahnya. Zona pelagik selanjutnya dibagi berdasarkan kedalaman dan penetrasi cahaya menjadi beberapa subzona.

Pembagian utama zona pelagik:

1. **Epipelagik (0–200 m)**
   a. Disebut juga zona fotik atau euphotic karena cahaya matahari masih cukup untuk fotosintesis.
   b. Dihuni oleh fitoplankton, zooplankton, dan banyak spesies ikan pelagik (tuna, tenggiri, hiu).
   c. Zona ini tumpang-tindih dengan zona neritik (di atas paparan benua) dan zona oseanik (di laut terbuka).
2. **Mesopelagik (200–1.000 m)**
   a. Disebut "*twilight zone*" karena cahaya sangat redup dan tidak cukup untuk fotosintesis.
   b. Banyak organisme melakukan migrasi vertikal harian ke zona epipelagik untuk mencari makan.
   c. Dihuni oleh ikan lentera (lanternfish), cumi-cumi, dan krustasea tertentu.
3. **Batipelagik (1.000–4.000 m)**
   a. Zona sepenuhnya gelap (afotik), suhu rendah (~4°C), dan tekanan tinggi.
   b. Organisme sering memiliki adaptasi seperti bioluminesensi, mata besar, dan mulut besar dengan gigi panjang.
   c. Contoh: ikan fangtooth, anglerfish, dan grenadier.
4. **Abisopelagik (4.000–6.000 m)**
   a. Zona di atas dataran abisal, sepenuhnya gelap, suhu mendekati beku, tekanan sangat tinggi.
   b. Komunitas didominasi oleh organisme pemakan detritus dan predator khusus.
5. **Hadopelagik (>6.000 m)**
   a. Zona di palung samudra terdalam, kondisi ekstrem dengan tekanan sangat tinggi.
   b. Sering terkait dengan ventilasi hidrotermal dan komunitas kemosintetik.

Zona pelagik merupakan habitat bagi sebagian besar organisme laut yang hidup bebas di kolom air (plankton, nekton), dan menjadi fokus utama dalam studi distribusi vertikal organisme laut.

4.3.5 Zona Bentik

Zona bentik mencakup seluruh dasar laut dan sedimen di bawahnya, dari wilayah pantai hingga palung terdalam. Zona ini berbeda dari zona pelagik yang merupakan kolom air di atasnya. Organisme yang hidup di zona bentik disebut bentos, yang dapat bersifat sessile (melekat) atau mobile (bergerak) (Grassle, 2001).

Pembagian utama zona bentik:

1. **Supralitoral**
   a. Wilayah di atas garis pasang tertinggi, hanya terkena percikan air laut.
   b. Dihuni oleh organisme yang toleran terhadap kekeringan dan salinitas tinggi.
2. **Litoral (*intertidal*)**
   a. Wilayah antara garis pasang tertinggi dan surut terendah.
   b. Mengalami perubahan kondisi ekstrem antara terendam dan terpapar udara.
3. **Sublitoral (neritik bentik)**
   a. Dari garis surut terendah hingga tepi paparan benua (~200 m).
   b. Dihuni oleh terumbu karang, padang lamun, hutan rumput laut, dan berbagai invertebrata bentik.
4. **Batial (bathyal)**
   a. Dari tepi paparan benua (~200 m) hingga sekitar 2.000–4.000 m, mencakup lereng benua(Levin, 2013)
   b. Suhu rendah, cahaya tidak ada, tekanan tinggi; dihuni oleh organisme adaptif seperti ikan grenadier, krustasea, dan spons.
5. **Abisal (abyssal)**
   a. Kedalaman sekitar 4.000–6.000 m, mencakup dataran abisal.
   b. Kondisi sangat stabil, gelap, dingin, dan tekanan ekstrem; komunitas didominasi oleh pemakan detritus dan predator khusus.
6. **Hadal**
   a. Kedalaman lebih dari 6.000 m, terutama di palung samudra.

b. Lingkungan paling ekstrem di Bumi, dengan tekanan sangat tinggi dan komunitas yang sering terkait dengan ventilasi hidrotermal atau rembesan dingin.

Zona bentik memainkan peran penting dalam siklus nutrien, dekomposisi materi organik, dan sebagai habitat bagi keanekaragaman hayati yang masih banyak belum terdeskripsi, terutama di laut dalam (Bianchi et al., 2003).

4.4 Faktor Lingkungan dalam Pembentukan Zona Biogeografik

Pola biogeografik laut tidak terbentuk secara acak, melainkan merupakan hasil interaksi kompleks antara berbagai faktor lingkungan fisik, kimia, dan biologis (Brown & Thatje, 2013). Faktor-faktor utama yang membentuk zona biogeografik laut meliputi suhu, salinitas, intensitas cahaya, kedalaman, arus laut, dan ketersediaan nutrien (Devlin & Brodie, 2023; Stuart-Smith et al., 2017). Pemahaman terhadap faktor-faktor ini penting untuk menjelaskan mengapa suatu spesies atau komunitas hanya ditemukan di wilayah tertentu dan tidak di wilayah lain.

4.4.1 Suhu

Suhu merupakan salah satu faktor abiotik paling penting yang memengaruhi distribusi organisme laut dan pembentukan zona biogeografik pada skala global (Stuart-Smith et al., 2017). Suhu permukaan laut bervariasi secara latitudinal, dari perairan tropis yang hangat (>25°C) hingga perairan kutub yang sangat dingin (<5°C), dan variasi ini menjadi dasar pembagian zona biogeografik tropis, subtropis, sedang, dan kutub.

Peran suhu dalam biogeografi laut:

1. **Menentukan kisaran toleransi fisiologis**
   Setiap spesies memiliki kisaran suhu optimal untuk pertumbuhan, reproduksi, dan kelangsungan hidup (Stuart-Smith et al., 2017). Spesies tropis umumnya memiliki toleransi sempit terhadap suhu rendah, sedangkan spesies kutub tidak tahan terhadap suhu tinggi.

2. **Membentuk batas distribusi geografis**
   Studi terhadap 1.790 spesies laut dangkal menunjukkan bahwa batas distribusi spesies sangat terkait dengan batas termal (*thermal limits*) yang dapat ditoleransi. Spesies cenderung terdistribusi di wilayah di mana suhu berada dalam kisaran toleransi fisiologisnya.
3. **Mempengaruhi metabolisme dan laju proses biologis**
   Suhu memengaruhi laju metabolisme, pertumbuhan, dan reproduksi organisme laut. Di perairan hangat, metabolisme umumnya lebih cepat, sementara di perairan dingin proses biologis berlangsung lebih lambat.
4. **Berinteraksi dengan faktor lain**
   Suhu berinteraksi dengan salinitas, oksigen terlarut, dan ketersediaan makanan dalam menentukan kesesuaian habitat bagi organisme.

Perubahan suhu laut akibat perubahan iklim global sedang menggeser batas-batas biogeografik, dengan banyak spesies tropis memperluas sebarannya ke wilayah subtropis dan sedang yang semakin hangat (Morgan et al., 2016).

4.4.2 Salinitas

Salinitas (kadar garam) merupakan faktor kunci yang memengaruhi distribusi organisme laut, terutama di wilayah pesisir, estuaria, dan laut semi-tertutup (Franklin et al., 2026). Salinitas laut terbuka umumnya stabil sekitar 34–35 ppt (parts per thousand), namun dapat bervariasi secara signifikan di wilayah dekat daratan.

Peran salinitas dalam biogeografi laut:

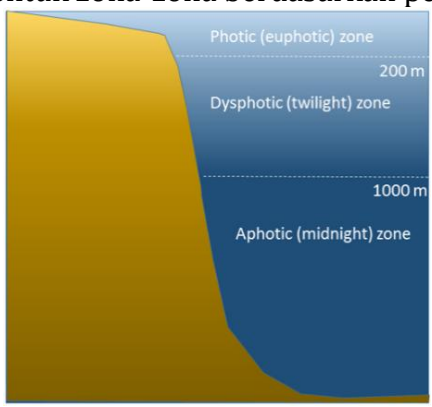
1. **Membedakan zona biogeografik berdasarkan toleransi salinitas**
   Organisme laut dapat dikategorikan menjadi:
   a. *Stenohalin*: organisme yang hanya toleran terhadap kisaran salinitas sempit (mis. kebanyakan organisme laut terbuka yang memerlukan salinitas >25 ppt).
   b. *Eurihalin*: organisme yang toleran terhadap variasi salinitas luas (mis. banyak spesies estuaria yang dapat hidup pada salinitas 5–30 ppt).

2. **Membentuk gradien distribusi di estuaria**
   Estuaria dibagi menjadi beberapa zona berdasarkan salinitas: limnetik (<0,5 ppt), oligohalin (0,5–5 ppt), mesohalin (5–18 ppt), polihalin (18–30 ppt), dan euhalin (>30 ppt). Keanekaragaman spesies umumnya menurun ke arah hulu estuaria seiring penurunan salinitas.
3. **Menjadi hambatan bagi dispersi spesies**
   Perbedaan salinitas yang tajam dapat menjadi hambatan bagi organisme stenohalin, sehingga membatasi sebarannya hanya pada wilayah dengan salinitas sesuai.
4. **Berinteraksi dengan faktor osmoregulasi**
   Organisme harus melakukan osmoregulasi untuk mempertahankan keseimbangan air dan garam dalam tubuh; biaya energi untuk osmoregulasi memengaruhi distribusi dan kelimpahan spesies.

Di wilayah dengan variasi salinitas tinggi (estuaria, laguna, laut semi-tertutup), salinitas sering menjadi faktor pembatas utama yang menentukan komposisi komunitas.

4.4.3 Intensitas Cahaya

Intensitas cahaya matahari yang menembus kolom air merupakan faktor penentu utama dalam pembagian zona vertikal laut dan distribusi organisme fotosintetik. Cahaya menurun secara eksponensial dengan bertambahnya kedalaman, sehingga membentuk zona-zona berdasarkan penetrasi cahaya.



Intensitas Cahaya

Peran intensitas cahaya dalam biogeografi laut:

1. **Mendefinisikan zona fotik (eufotik)**
   Zona eufotik adalah lapisan atas laut (umumnya hingga 150–200 m di perairan jernih) di mana intensitas cahaya masih cukup untuk mendukung fotosintesis bersih (laju fotosintesis > laju respirasi). Zona ini menjadi habitat utama fitoplankton, makroalga, dan lamun.
2. **Membatasi distribusi organisme fotosintetik**
   Fitoplankton dan tumbuhan laut hanya dapat hidup di zona eufotik karena memerlukan cahaya untuk fotosintesis. Di bawah zona ini, produktivitas primer bergantung pada detritus yang jatuh dari atas atau kemosintesis.
3. **Membentuk gradien vertikal komunitas**
   Penurunan cahaya dengan kedalaman membentuk zonasi vertikal komunitas: zona fotik (0–200 m), zona twilight (200–1.000 m), dan zona afotik (>1.000 m) yang sepenuhnya gelap. Setiap zona memiliki komunitas organisme yang khas.
4. **Mempengaruhi perilaku dan adaptasi organisme**
   Banyak organisme laut dalam memiliki adaptasi terhadap kegelapan, seperti mata besar, bioluminesensi, atau justru tidak bermata. Migrasi vertikal harian zooplankton dan ikan kecil juga terkait dengan perubahan intensitas cahaya.

Intensitas cahaya juga bervariasi secara horizontal berdasarkan lintang, musim, dan kekeruhan air, sehingga memengaruhi produktivitas primer dan struktur komunitas di berbagai wilayah laut.

4.4.4 Kedalaman

Kedalaman laut merupakan faktor integratif yang mencerminkan perubahan simultan dalam tekanan, cahaya, suhu, dan ketersediaan makanan, sehingga menjadi penentu utama zonasi biogeografik vertikal (Brown & Thatje, 2013). Kedalaman membagi lingkungan laut menjadi zona pelagik (kolom air) dan bentik (dasar laut) dengan subzona yang masing-masing memiliki karakteristik unik.

Peran kedalaman dalam biogeografi laut:

1. **Membentuk gradien tekanan hidrostatik**
   Tekanan meningkat sekitar 1 atm setiap 10 m kedalaman; di zona abisal dan hadal, tekanan dapat mencapai ratusan hingga lebih dari 1.000 atm. Organisme laut dalam memiliki adaptasi fisiologis dan biokimia khusus untuk bertahan pada tekanan ekstrem.
2. **Menentukan zonasi vertikal komunitas**
   Studi terhadap keanekaragaman bentik menunjukkan adanya transisi jelas antara fauna paparan benua (shelf), lereng benua (slope), dan dataran abisal (abyssal) pada kedalaman tertentu. Transisi antara shelf dan slope terjadi sekitar kedalaman 200–1.000 m, sedangkan transisi antara slope dan abyssal terjadi pada 2.000–3.000 m.
3. **Mempengaruhi pola keanekaragaman**
   Pola keanekaragaman bentik sering menunjukkan pola unimodal terhadap kedalaman, dengan puncak keanekaragaman pada kedalaman 1.000–3.000 m, meskipun area pada kedalaman ini relatif kecil.
4. **Membatasi distribusi spesies dangkal**
   Spesies laut dangkal umumnya tidak dapat bertahan di laut dalam karena efek kombinasi suhu rendah, tekanan tinggi, dan kegelapan. Sebaliknya, spesies laut dalam tidak dapat bertahan di perairan dangkal karena tekanan rendah dan kondisi lingkungan yang berbeda.

Kedalaman juga berinteraksi dengan topografi dasar laut (paparan benua, lereng, palung) dalam membentuk koridor atau hambatan dispersi bagi organisme bentik dan demersal.

4.4.5 Arus Laut

Arus laut merupakan faktor dinamis yang memengaruhi distribusi organisme laut melalui transport larva, dispersi spesies, dan pembentukan hambatan biogeografik. Arus laut berskala besar (gyre, arus batas barat) hingga skala kecil (eddies, gyre pesisir) memainkan peran penting dalam konektivitas populasi laut.

Peran arus laut dalam biogeografi laut:

1. **Memfasilitasi dispersi larva dan organisme**
   Arus laut mengangkut larva planktonik, telur, dan organisme kecil dalam jarak jauh, sehingga meningkatkan konektivitas antar populasi. Spesies dengan tahap larva planktonik yang lama cenderung memiliki sebaran lebih luas karena terbawa arus.
2. **Membentuk hambatan biogeografik**
   Arus laut juga dapat berfungsi sebagai hambatan bila terjadi pertemuan arus yang membentuk front oseanografik atau gyre yang mengisolasi wilayah tertentu. Misalnya, gyre Atlantik Utara dan Selatan dapat menghambat transport larva lintas samudra bagi spesies terumbu karang.
3. **Mempengaruhi retensi larva**
   Struktur arus skala kecil seperti gyre siklonik pesisir dapat memusatkan dan mempertahankan larva di wilayah tertentu, meningkatkan retensi lokal dan rekruitmen populasi.
4. **Mendistribusikan nutrien dan panas**
   Arus laut mendistribusikan nutrien dari laut dalam ke permukaan (*upwelling)* dan mendistribusikan panas dari khatulistiwa ke kutub, sehingga memengaruhi produktivitas dan suhu wilayah tertentu (Devlin & Brodie, 2023)
5. **Membentuk provinsi hidrodinamik**
   Pola arus laut membentuk provinsi hidrodinamik dengan konektivitas internal tinggi dan batas-batas yang relatif jelas, yang sering berimpit dengan batas biogeografik.

Perubahan pola arus laut akibat perubahan iklim dapat mengubah rute dispersi, konektivitas populasi, dan batas-batas biogeografik laut.

4.4.6 Ketersediaan Nutrien

Ketersediaan nutrien (nitrat, fosfat, silikat, besi, dan lainnya) merupakan faktor penentu utama produktivitas primer laut dan struktur komunitas pada berbagai skala ruang (Capblancq, 1990; Devlin & Brodie, 2023). Distribusi nutrien di laut sangat heterogen, dengan wilayah pesisir dan upwelling

yang kaya nutrien kontras dengan laut terbuka oligotrofik yang miskin nutrien.

Peran ketersediaan nutrien dalam biogeografi laut:

1. **Menentukan produktivitas primer**
   Produktivitas primer laut dibatasi oleh ketersediaan nutrien paling langka (hukum minimum Liebig). Di sebagian besar laut permukaan lintang rendah, nitrogen (nitrat) sering menjadi nutrien pembatas, sedangkan di wilayah tertentu besi menjadi pembatas utama.
2. **Membedakan wilayah oligotrofik dan eutrofik**
   a. *Oligotrofik*: wilayah dengan konsentrasi nutrien rendah, fitoplankton sedikit, dan produktivitas rendah (mis. gyre subtropis).
   b. *Eutrofik*: wilayah dengan nutrien tinggi, fitoplankton melimpah, dan produktivitas tinggi (mis. wilayah upwelling pesisir).
3. **Membentuk gradien produktivitas pesisir–oseanik**
   Nutrien terutama berasal dari limpasan darat (sungai), dekomposisi, dan upwelling, sehingga wilayah pesisir umumnya lebih eutrofik daripada laut terbuka.
4. **Mempengaruhi struktur komunitas plankton**
   Di sistem oligotrofik, fitoplankton kecil (pikoplankton) mendominasi dan materi organik lebih banyak didaur ulang(Gilbert et al., 2023) Di sistem eutrofik, fitoplankton besar (diatom) mendominasi dan mendukung rantai makanan yang lebih pendek menuju ikan kecil (Goldenberg et al., 2022).
5. **Mendorong pembentukan wilayah perikanan penting**
   Wilayah upwelling yang kaya nutrien (mis. Peru, Benguela, California) menjadi daerah perikanan produktif karena mendukung biomassa ikan yang tinggi.

Distribusi vertikal nutrien juga menunjukkan pola khas: konsentrasi minimum di permukaan (karena dikonsumsi fitoplankton) dan meningkat tajam pada kedalaman 100–500 m, kemudian relatif stabil di perairan dalam.

4.5 Pola Distribusi dan Adaptasi Organisme Laut

Distribusi organisme laut mencerminkan respons terhadap gradien lingkungan fisik, kimia, dan biologis yang telah dibahas pada bagian sebelumnya. Fitoplankton, zooplankton, ikan (nekton), dan organisme bentik menunjukkan pola distribusi horizontal dan vertikal yang khas, serta memiliki adaptasi khusus untuk bertahan pada kondisi lingkungan tertentu.

4.5.1 Distribusi Fitoplankton

Fitoplankton merupakan produsen primer utama di laut yang mendiami zona eufotik (fotik), yaitu lapisan atas laut hingga kedalaman sekitar 150–200 m di mana cahaya masih cukup untuk fotosintesis. Distribusi fitoplankton dikendalikan oleh interaksi antara ketersediaan cahaya, nutrien, dan suhu (Feberrito et al., 2025).

Pola distribusi fitoplankton:

1. **Distribusi vertikal**
   Fitoplankton umumnya terkonsentrasi di lapisan atas kolom air (0–100 m) di mana cahaya melimpah. Namun, di wilayah dengan stratifikasi kuat, nutrien di lapisan atas sering habis dikonsumsi, sehingga maksimum konsentrasi fitoplankton (deep chlorophyll maximum) dapat terjadi pada kedalaman 50–150 m di mana terdapat keseimbangan antara cahaya dan nutrien.
2. **Distribusi horizontal**
   Secara horizontal, fitoplankton menunjukkan variasi kelimpahan yang besar:
   a. *Wilayah pesisir dan upwelling*: kaya nutrien dari limpasan darat atau upwelling, sehingga konsentrasi klorofil-a dan biomassa fitoplankton tinggi.
   b. *Laut terbuka oligotrofik*: miskin nutrien karena stratifikasi kuat, sehingga biomassa fitoplankton rendah meskipun cahaya melimpah.
3. **Pengaruh suhu**
   Suhu laut yang lebih rendah (mis. di wilayah upwelling) umumnya merupakan kondisi optimal bagi pertumbuhan fitoplankton, sedangkan suhu terlalu tinggi dapat menghambat pertumbuhan dan menurunkan konsentrasi

klorofil-a. Fitoplankton umumnya berfotosintesis optimal pada suhu 20–35°C dengan optimum sekitar 25°C.

4. **Dinamika musiman**
   Di wilayah lintang sedang dan tinggi, fitoplankton mengalami blooming musiman (*spring bloom*) akibat peningkatan cahaya dan pencampuran vertikal yang membawa nutrien ke permukaan.

Distribusi fitoplankton menjadi dasar bagi distribusi zooplankton dan organisme tingkat tropik lebih tinggi, karena fitoplankton merupakan sumber energi utama dalam jaring makanan laut.

4.5.2 Distribusi Zooplankton

Zooplankton merupakan konsumen primer yang memanfaatkan fitoplankton dan menjadi penghubung energi antara produsen dengan organisme tingkat tropik lebih tinggi (ikan, udang, mamalia laut). Distribusi zooplankton sangat dinamis dan dipengaruhi oleh cahaya, suhu, oksigen, makanan, predator, serta arus laut.

Pola distribusi zooplankton:

1. **Distribusi vertikal dan migrasi vertikal harian (*Diel Vertical Migration*/DVM)**
   Pola paling khas pada zooplankton adalah migrasi vertikal harian: pada siang hari zooplankton berada di lapisan lebih dalam (100–200 m atau lebih), sedangkan pada malam hari naik ke permukaan (0–50 m) untuk mencari makan.
   a. *Faktor pendorong DVM*: cahaya matahari merupakan rangsangan utama; zooplankton menghindari predator visual dengan bersembunyi di lapisan gelap pada siang hari, dan naik ke permukaan yang kaya makanan pada malam hari.
   b. *Pola DVM*: terdapat beberapa tipe, yaitu nokturnal (paling umum), twilight, reverse, dan tidal (Tao et al., 2022).
   c. *Faktor lain*: suhu, oksigen terlarut, dan keberadaan predator juga memengaruhi skala dan pola DVM.

2. **Distribusi horizontal**
   Zooplankton sering mengikuti distribusi fitoplankton secara horizontal, karena fitoplankton merupakan sumber makanan utama. Kelimpahan zooplankton umumnya lebih tinggi di wilayah pesisir dan upwelling yang kaya fitoplankton, dan lebih rendah di laut terbuka oligotrofik.
3. **Pengaruh parameter fisika-kimia**
   Suhu, salinitas, pH, oksigen terlarut, dan kecerahan air memengaruhi kelimpahan dan komposisi zooplankton. Misalnya, zona minim oksigen (*oxygen minimum zone*) dapat berfungsi sebagai "hambatan ekologis" sekaligus "refuge" bagi zooplankton tertentu.
4. **Peran dalam pompa karbon biologis**
   Melalui DVM, zooplankton memediasi transport karbon dari permukaan ke laut dalam, sehingga berperan penting dalam siklus karbon global.

Distribusi zooplankton yang dinamis menjadikannya indikator penting perubahan lingkungan laut dan produktivitas ekosistem.

4.5.3 Distribusi Ikan dan Nekton

Nekton mencakup organisme laut yang mampu bergerak aktif melawan arus, terutama ikan, cumi-cumi, krustasea besar, dan mamalia laut. Distribusi ikan dan nekton sangat kompleks karena dipengaruhi oleh faktor fisik, kimia, biologis, serta perilaku (migrasi, pemijahan, pencarian makan).

Pola distribusi ikan dan nekton:

1. **Distribusi berdasarkan zona biogeografik**
   Spesies ikan menunjukkan pola distribusi yang terkait dengan zona biogeografik (tropis, sedang, kutub) dan zona kedalaman (neritik, oseanik, laut dalam). Misalnya, ikan terumbu karang mendominasi zona neritik tropis, sedangkan ikan kod (cod) dan herring mendominasi zona neritik sedang.
2. **Pengaruh suhu dan arus**
   Suhu laut menjadi faktor utama yang menentukan batas distribusi banyak spesies ikan; setiap spesies memiliki

kisaran suhu optimal untuk pertumbuhan dan reproduksi. Arus laut memengaruhi distribusi melalui transport larva dan penentuan lokasi daerah pemijahan serta pencarian makan.

3. **Habitat dan ketersediaan makanan**
   Ikan neritik sering terasosiasi dengan habitat tertentu seperti terumbu karang, padang lamun, hutan rumput laut, atau wilayah upwelling yang kaya nutrien dan mangsa. Ikan oseanik (tuna, hiu, ikan layang) tersebar luas di laut terbuka dan sering melakukan migrasi jarak jauh mengikuti arus dan konsentrasi mangsa.
4. **Migrasi horizontal dan vertikal**
   Banyak spesies ikan melakukan migrasi horizontal (mis. migrasi spawning, migrasi musiman) dan vertikal (mis. ikan mesopelagik yang melakukan DVM) (Pinti et al., 2019). Migrasi ini terkait dengan siklus reproduksi, pencarian makan, dan penghindaran predator.
5. **Daerah pemijahan dan pembesaran juvenil**
   Wilayah pesisir seperti estuaria, mangrove, dan padang lamun sering menjadi daerah pemijahan dan pembesaran juvenil bagi banyak spesies ikan komersial, sehingga distribusi ikan dewasa sering terkait dengan akses ke wilayah-wilayah ini.

Distribusi ikan dan nekton menjadi dasar pengelolaan perikanan dan konservasi laut, karena pola sebaran menentukan lokasi daerah penangkapan dan wilayah yang perlu dilindungi.

4.5.4 Distribusi Organisme Bentik

Organisme bentik (bentos) mencakup seluruh organisme yang hidup di atau dalam dasar laut, dari wilayah litoral hingga palung terdalam. Distribusi bentos sangat dipengaruhi oleh kedalaman, tipe substrat, ketersediaan makanan, oksigen, dan kondisi hidrodinamik.

Pola distribusi organisme bentik:

1. **Zonasi berdasarkan kedalaman**
   Distribusi bentos menunjukkan zonasi jelas berdasarkan kedalaman:

a. *Zona litoral (intertidal)*: organisme yang toleran terhadap paparan udara, variasi suhu dan salinitas tinggi, serta energi gelombang kuat (mis. teritip, kerang, alga makro).
b. *Zona sublitoral (neritik bentik)*: hingga ~200 m, kaya cahaya dan nutrien; dihuni oleh terumbu karang, padang lamun, hutan rumput laut, dan beragam invertebrata.
c. *Zona batial (200–2.000/4.000 m)*: lereng benua, suhu rendah, tanpa cahaya; dihuni oleh ikan grenadier, krustasea, spons, dan organisme adaptif lainnya.
d. *Zona abisal (4.000–6.000 m)*: dataran abisal, kondisi stabil, gelap, tekanan ekstrem; komunitas didominasi pemakan detritus dan predator khusus.
e. *Zona hadal (>6.000 m)*: palung samudra, lingkungan paling ekstrem; sering terkait dengan ventilasi hidrotermal dan komunitas kemosintetik.

2. **Pengaruh tipe substrat**
   Tipe substrat (batu, pasir, lumpur, karang) menentukan jenis organisme yang dapat hidup di suatu wilayah. Substrat keras mendukung organisme sesil yang melekat (karang, teritip, alga), sedangkan substrat lunak (pasir, lumpur) mendukung organisme infauna yang hidup dalam sedimen (cacing, kerang, krustasea kecil).
3. **Ketersediaan makanan dan oksigen**
   Bentos di laut dangkal mendapat pasokan makanan dari produktivitas primer lokal (fitoplankton, makroalga), sedangkan bentos laut dalam bergantung pada "marine snow" (detritus yang jatuh dari atas) dan sumber energi kimia (ventilasi hidrotermal, cold seeps). Oksigen terlarut juga menjadi faktor pembatas; zona minim oksigen dapat mengurangi kelimpahan dan keanekaragaman bentos.
4. **Pola keanekaragaman terhadap kedalaman**
   Studi keanekaragaman bentik menunjukkan pola unimodal terhadap kedalaman, dengan puncak keanekaragaman pada kedalaman 1.000–3.000 m, meskipun area pada kedalaman ini relatif kecil. Transisi fauna terjadi pada kedalaman tertentu (shelf–slope ~200–1.000 m; slope–abyssal ~2.000–3.000 m).

Distribusi organisme bentik menjadi indikator penting kondisi lingkungan dasar laut dan sering digunakan dalam monitoring dampak aktivitas manusia (penangkapan ikan dasar, penambangan laut dalam, pencemaran).

4.5.5 Adaptasi Organisme terhadap Kondisi Lingkungan

Organisme laut menunjukkan beragam adaptasi morfologis, fisiologis, dan perilaku untuk bertahan pada kondisi lingkungan yang bervariasi, dari zona litoral yang ekstrem hingga laut dalam yang gelap dan bertekanan tinggi.

Jenis-jenis adaptasi organisme laut:

1. **Adaptasi terhadap suhu**
   a. *Enzim dan membran sel*: organisme laut dingin memiliki enzim dengan aktivitas optimal pada suhu rendah dan membran sel dengan komposisi lipid yang menjaga fluiditas pada suhu rendah.
   b. *Protein antibeku*: ikan kutub menghasilkan protein antibeku (antifreeze proteins) untuk mencegah pembentukan kristal es dalam cairan tubuh.
   c. *Perilaku*: migrasi vertikal atau horizontal ke wilayah dengan suhu optimal.
2. **Adaptasi terhadap salinitas**
   a. *Osmoregulasi*: organisme laut stenohalin mempertahankan keseimbangan osmotik dengan mengatur konsentrasi ion dan senyawa organik dalam tubuh.
   b. *Eurihalinitas*: organisme estuaria (mis. ikan bandeng, udang) toleran terhadap variasi salinitas luas melalui mekanisme osmoregulasi yang fleksibel.
3. **Adaptasi terhadap tekanan tinggi (laut dalam)**
   a. *Struktur protein dan enzim*: protein organisme laut dalam stabil pada tekanan ratusan hingga ribuan atm.
   b. *Tubuh lunak dan tanpa rongga udara*: banyak ikan dan invertebrata laut dalam tidak memiliki gelembung renang atau rongga berisi gas yang dapat hancur akibat tekanan.

c. *Metabolisme lambat*: adaptasi terhadap keterbatasan makanan dengan laju metabolisme dan pertumbuhan yang rendah.

4. **Adaptasi terhadap kegelapan (zona afotik)**
   a. *Mata besar atau tidak bermata*: organisme mesopelagik sering memiliki mata besar untuk menangkap cahaya minimal, sedangkan beberapa spesies laut dalam justru tidak bermata karena cahaya sama sekali tidak ada.
   b. *Bioluminesensi*: banyak organisme laut dalam menghasilkan cahaya sendiri untuk menarik mangsa, berkomunikasi, atau kamuflase (counter-illumination).
   c. *Indra lain yang berkembang*: peningkatan sensitivitas terhadap getaran, bau, dan medan listrik untuk mendeteksi mangsa dan predator.
5. **Adaptasi terhadap cahaya (zona fotik)**
   a. *Pigmen fotosintetik*: fitoplankton dan makroalga memiliki berbagai pigmen (klorofil a, b, c; fikobilin; karotenoid) untuk menyerap spektrum cahaya yang berbeda sesuai kedalaman.
   b. *Perilaku migrasi*: zooplankton dan ikan kecil melakukan migrasi vertikal harian untuk menghindari predator visual pada siang hari dan mencari makan pada malam hari.
6. **Adaptasi terhadap energi gelombang dan arus (zona litoral)**
   a. *Struktur pelekatan kuat*: teritip, kerang, dan alga makro memiliki struktur pelekatan (semen alami, byssus, holdfast) untuk menahan gaya gelombang.
   b. *Tubuh fleksibel atau cangkang keras*: adaptasi untuk mengurangi kerusakan mekanik akibat gelombang dan abrasi.
7. **Adaptasi terhadap keterbatasan makanan (laut dalam)**
   a. *Mulut besar dan gigi panjang*: ikan laut dalam seperti fangtooth dan anglerfish memiliki mulut besar dan gigi panjang untuk menangkap mangsa yang jarang.
   Lambung elastis: kemampuan menelan mangsa yang hampir sebesar tubuhnya.

b. *Simbiosis dengan bakteri kemosintetik*: organisme di sekitar ventilasi hidrotermal (mis. cacing tabung raksasa, kerang vent) bersimbiosis dengan bakteri yang menghasilkan energi dari senyawa kimia (H_2S, metana).

Adaptasi-adaptasi ini memungkinkan organisme laut menempati relung ekologis yang sangat beragam, dari zona intertidal yang keras hingga lingkungan ekstrem laut dalam, sehingga membentuk pola biogeografik yang kompleks dan dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

Bianchi, A., Tholosan, O., Garcin, J., Polychronaki, T., Tselepides, A., Buscail, R., & Duineveld, G. (2003). Microbial activities at the benthic boundary layer in the Aegean Sea. *Progress in Oceanography*, *57*(2), 219–236. https://doi.org/10.1016/S0079-6611(03)00034-X

Briggs, J. C. (2006). Marine biogeography and ecology: Invasions and introductions. *Journal of Biogeography*, *34*(2), 193–198. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01632.x

Brown, A., & Thatje, S. (2013). Explaining bathymetric diversity patterns in marine benthic invertebrates and demersal fishes: Physiological contributions to adaptation of life at depth. *Biological Reviews*, *89*(2), 406–426. https://doi.org/10.1111/brv.12061

Capblancq, J. (1990). Nutrient dynamics and pelagic food web interactions in oligotrophic and eutrophic environments: An overview. *Hydrobiologia*, *207*(1), 1–14. https://doi.org/10.1007/bf00041435

Devlin, M., & Brodie, J. (2023). Nutrients and eutrophication. *Nutrients and Eutrophication*, 75–100. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10127-4_4

Faradiba, N. (2023). *4 Zona Kedalaman Laut Beserta Penjelasannya*. Kompas.Com. https://www.kompas.com/sains/read/2021/05/30/190200723/4-zona-kedalaman-laut-beserta-penjelasannya

Feberrito, J., Ismunarti, D. H., & Rifai, A. (2025). Kajian Korelasi Suhu Permukaan Laut Dan Konsentrasi Klorofil-a di Perairan Selatan Maluku Pada periode tahun 2015 -2023. *Indonesian Journal of Oceanography*, *07*(03), 252–264. https://doi.org/10.14710/ijoce.v7i3.25900

Franklin, T. S., Rosman, P. C. C., & Carvalho, R. C. (2026). Evaluating salinity alterations in estuaries through ecological mapping. *Discover Oceans*, *3*(1). https://doi.org/10.1007/s44289-026-00159-9

Gilbert, L., Jeanniard-du-Dot, T., Authier, M., Chouvelon, T., & Spitz, J. (2023). Composition of cetacean communities

worldwide shapes their contribution to ocean nutrient cycling. *Nature Communications*, *14*(1), 5823. https://doi.org/10.1038/s41467-023-41532-y

Goldenberg, S. U., Taucher, J., Fernández-Méndez, M., Ludwig, A., Arístegui, J., Baumann, M., Ortiz, J., Stuhr, A., & Riebesell, U. (2022). Nutrient composition (Si:N) as driver of plankton communities during artificial upwelling. *Frontiers in Marine Science*, *9*. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1015188

Grassle, J. F. (2001). Marine ecosystems. *Encyclopedia of Biodiversity*, 13–25. https://doi.org/10.1016/b0-12-226865-2/00186-3

Hall, D. (2018, December 18). *The Deep Sea*. Smithsonian. Smithsonian Ocean. https://ocean.si.edu/ecosystems/deep-sea/deep-sea

Kon, K., Shimanaga, M., & Horinouchi, M. (2020). Marine ecology: Intertidal/littoral zone. *Japanese Marine Life*, 241–254. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1326-8_20

Levin, S. A. (2013). *Marine Ecosystems* (2nd ed.). Academic Press. https://www.sciencedirect.com/referencework/9780123847201/encyclopedia-of-biodiversity

Morgan, E. A., Brown, A., Ciotti, B. J., & Panton, A. (2016). Effects of temperature stress on ecological processes. *OUP Academic*. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198718826.003.0012

Palomares, M. L. D., Froese, R., Derrick, B., Meeuwig, J. J., Nöel, S.-L., Tsui, G., Woroniak, J., Zeller, D., & Pauly, D. (2020). Fishery biomass trends of exploited fish populations in marine ecoregions, climatic zones and ocean basins. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *243*, 106896. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106896

Pepato, A. R., Vidigal, T. H. D. A., & Klimov, P. B. (2019). Evaluating the boundaries of marine biogeographic regions of the Southwestern Atlantic using halacarid mites (Halacaridae), meiobenthic organisms with a low dispersal potential. *Ecology and Evolution*, *9*(23), 13359–13374. https://doi.org/10.1002/ece3.5791

Pinti, J., Kiorboe, T., Thygesen, U. H., & Visser, A. W. (2019). Trophic interactions drive the emergence of diel vertical migration patterns: A game-theoretic model of copepod communities. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *286*(1911), 20191645. https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1645

Sattuang, H., & Wulandari, R. (2025). Dampak Pencemaran Laut terhadap Distribusi dan Adaptasi Terumbu Karang di Berbagai Zona Biogeografi. *Jurnal Multidisiplin West Science*, *04*(02), 201–209.

Stuart-Smith, R. D., Edgar, G. J., & Bates, A. E. (2017). Thermal limits to the geographic distributions of shallow-water marine species. *Nature Ecology & Evolution*, *1*(12), 1846–1852. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0353-x

Tao, Z., Xian, H., Luan, Z., Nan, F., Wang, Y., & Sun, S. (2022). The diel vertical distribution and carbon biomass of the zooplankton community in the Caroline Seamount area of the western tropical Pacific Ocean. *Scientific Reports*, *12*(1), 18908. PubMed Central. https://doi.org/10.1038/s41598-022-23522-0

Wikipedia. (2019, April 12). *Oceanic zone*. Wikimedia Foundation. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Oceanic_zone

Wikipedia. (2023, March 9). *Neritic zone*. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Neritic_zone

BAB 5
MENGENAL EKOSISTEM TERUMBU KARANG

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Pada bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Mendeskripsikan karang dan ekosistem terumbu karang.
2. Mendeskripsikan struktur morfologi karang keras dan berbagai macam bentuk pertumbuhan (*growth form*) karang keras.
3. Mendeskripsikan berbagai biota yang hidup di ekosistem terumbu karang.

B. PENDAHULUAN

Dalam ilmu biologi karang, terdapat beberapa istilah penyebutan, yaitu "karang", "terumbu", dan "terumbu karang", dimana setiap istilah itu bukan merupakan sinonim. "Karang" menunjuk pada organisme hewan avertebrata yang hidup dengan berkoloni—terutama karang penyusun ekosistem terumbu. Adapun "terumbu" menunjuk pada struktur "bangunan" fisik yang tersusun atas kalsium karbonat yang tahan gelombang dan arus laut. Kata "terumbu karang" merujuk pada ekosistem yang terbentuk dari hubungan atau koneksi beberapa terumbu. Hubungan beberapa terumbu itu terdiri dari beragam genera koral yang saling memengaruhi satu dan lainnya. Komunitas terumbu ini kemudian dihuni oleh komunitas biota laut yang sangat beranekaragam. Ekosistem terumbu karang ini menjadi 1 dari beberapa ekosistem penting di wilayah pesisir dan laut (Hatcher, 1997; Keeling *et al.*,2021).

C. MATERI

5.1 Terminologi Terumbu Karang

5.1.1 Etimologi dan Istilah Karang sebagai Organisme

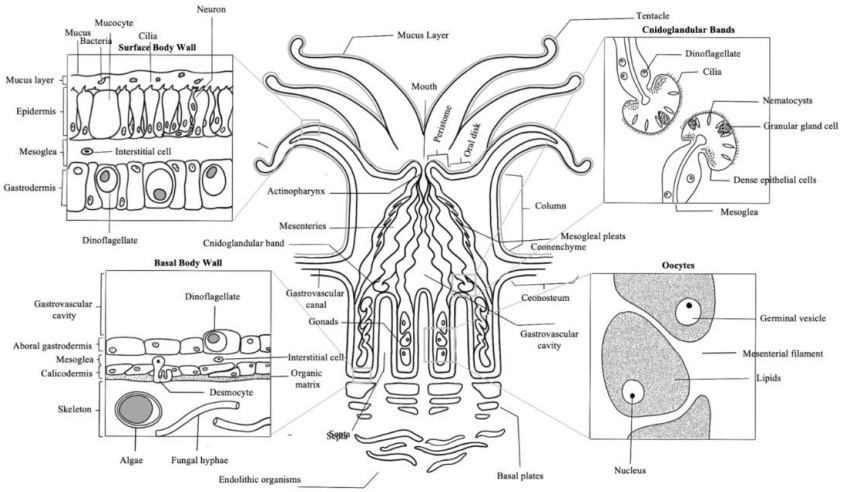
Secara istilah biologis, "karang" paling sering dipakai untuk menyebut hewan avertebrata laut dari Filum Anthozoa yang kita kenal sebagai koral, tetapi batasnya tidak selalu tegas. Dalam penggunaan umum modern, kata ini terutama diarahkan pada koral Scleractinia, yaitu koral yang mampu membentuk ekskeleton dari kalsium karbonat ($CaCO_3$), yang selanjutnya dapat disebut sebagai karang keras. Koral monofiletik yang mencakup karang pembangun terumbu, namun istilah "*coral*/karang" juga dipakai untuk beberapa anggota filum anthozoa lain seperti karang hitam (*black coral*) dan karang lunak (*soft coral*), sehingga maknanya bergantung konteks taksonomi (Hatcher, 1997).

Sebagai organisme, karang bukan batu dan bukan tumbuhan. Karang besar yang tampak saat menyelam sebenarnya adalah koloni hewan heterotrof yang tersusun atas polip-polip; unit dasarnya adalah polip yang bereproduksi seksual, tetapi pertumbuhan koloni terutama berlangsung lewat pertunasan aseksual (Sheppard, 2021).

Karang keras penyusun terumbu (hermatipik) memegang peran penting sebagai pembentuk ekosistem laut. Secara fungsional, polip karang ini secara konstan menyerap ion kalsium dan karbonat dari air laut untuk menyekresikan rangka $CaCO_3$. Rangka $CaCO_3$ ini dibentuk oleh jaringan khusus yaitu lapisan calicoblasltic (*calicoblastic layer*) yang terletak pada calicodermis (Gambar 5.1). Proses kalsifikasi yang berlangsung selama berabad-abad ini menghasilkan fondasi kokoh yang tidak hanya menopang koloni karang itu sendiri, tetapi juga membentuk struktur topografi tiga dimensi yang kompleks sebagai habitat, tempat berlindung, dan penyedia nutrisi bagi ribuan spesies biota laut (Sheppard, 2021).

Secara spesifik, kalsium karbonat yang diproduksi oleh karang keras ini disekresikan dalam bentuk kristal aragonit. Aragonit merupakan polimorf kalsium karbonat yang memiliki struktur ortorombik, memberikan kekuatan mekanis yang tinggi

untuk menahan energi gelombang laut, namun sekaligus menjadikannya lebih larut dan sensitif terhadap penurunan pH air laut akibat sementasi asam. Karakteristik pengendapan aragonit inilah yang memungkinkan terbentuknya matriks batuan terumbu yang padat, rigid, dan terakumulasi secara geologis dari generasi ke generasi menjadi struktur penghalang (*barrier*) alami pantai (Keeling, *et al.*,2021).



Gambar 5.1. Anatomi Mikroskopik Karang Hermatipik
Sumber: McDonald, 2023

Kondisi ini sangat kontras dengan keberadaan karang lunak (*Alcyonacea*) yang, meskipun tumbuh melimpah dan mendominasi ruang di berbagai fragmen terumbu, tidak membangun batuan terumbu dalam arti yang sama. Karang lunak tidak menyekresikan struktur aragonit yang masif dan kontinu, melainkan hanya memiliki elemen kapur mikroskopis berupa duri-duri kecil yang disebut sklerit di dalam jaringan tubuh mereka yang fleksibel. Ketika karang lunak mati, jaringan tubuhnya akan cepat terurai dan sklerit tersebut hanya akan menyumbang sedimen pasir halus ke dasar laut, tanpa meninggalkan warisan rangka struktural yang permanen bagi arsitektur terumbu karang (Perry *et al.*,2003).

Kata “karang” juga tidak identik dengan “pembentuk terumbu”. Literatur tentang lingkungan marginal menegaskan

perlunya membedakan komunitas karang, assemblage karang, dan framework reef, karena tidak semua komunitas karang menghasilkan akresi rangka yang cukup untuk membentuk terumbu (Perry *et al.*,2003).

1. Karang = hewan avertebrata berkoloni, bukan batu hidup (Keeling, *et al.*,2021).
2. Istilah ini sering berpusat pada Scleractinia, tetapi tidak eksklusif pada kelompok itu (Keeling, *et al.*,2021).
3. Tidak semua karang adalah pembentuk terumbu (Sheppard, 2021).

5.1.2 Terumbu sebagai Struktur Fisik

"Terumbu" secara ilmiah lebih tepat dipahami sebagai struktur fisik daripada organisme (Tabel 5.1). Literatur klasik mendefinisikan reef sebagai punggungan atau gundukan kapur dekat muka laut, dengan komposisi dominan kalsium karbonat yang disekresikan organisme; definisi ini sengaja menekankan bentuk geomorfik dan asal biogenik, bukan sekadar keberadaan karang sebagai taksa (Stoddart, 1969).

Sejak awal, istilah *reef* diperdebatkan karena sering disalahgunakan. Sudah pada 1932 ditekankan bahwa istilah *reef* perlu definisi yang tepat, dan beberapa ahli menolak langsung menambahkan kata "coral" agar nama strukturnya tidak memaksakan teori tentang penyusun utamanya .

Secara geobiologis, terumbu adalah struktur tahan gelombang yang ibangun organisme pembentuk kapur dan sisa-sisanya yang tersemen. Karena itu, *reef* tidak selalu harus *coral reef*: bioherm laut juga dapat dibangun oleh tiram, gastropoda vermetid, polychaeta serpulid, alga merah berkapur, hidrozoa, maupun karang; terumbu karang tropis hanya merupakan tipe yang paling luas (Knowlton et al., 2010).

5.1.3 Terumbu Karang sebagai Ekosistem

"Terumbu karang" juga dapat berarti sebuah ekosistem, bukan sekadar tumpukan koloni karang. Konsep ekosistem telah diterapkan pada terumbu sejak masa Darwin karena kuatnya keterpaduan komponen biotik dan abiotik, dan model modern memandang terumbu sebagai hierarki dengan sifat emergen:

struktur besar muncul dari organisme kolonial kecil, lalu menopang fungsi ekosistem yang tidak dapat dijelaskan hanya dari satu bagiannya (Hatcher, 1997).

Ekosistem ini berdiri di atas simbiosis dari beberapa mikro dan makroorganisme laut. Karang keras yang merupakan pembangun terumbu adalah fondasi makroskopik, tetapi kemampuan mereka membangun rangka besar bergantung pada simbiosis dengan dinoflagelata Symbiodiniaceae. Simbiosis mutualisme ini menyediakan karbon bagi produksi kalsium karbonat dan menjadi dasar trofik maupun struktural ekosistem (Hatcher, 1997).

Terumbu karang tidak lagi dipandang secara sederhana sebagai asosiasi linier tunggal antara karang pembentuk terumbu dan alga simbionnya semata. Secara ekologis, karang menampung komunitas mikroba yang sangat kaya dan kompleks, meliputi klan bakteri, arkaea, fungi, hingga virus yang berasosiasi padat di dalam jaringan maupun mukus karang. Keberadaan mikroorganisme ini menunjukkan bahwa fondasi ekosistem terumbu karang sejatinya bekerja dan berinteraksi hingga pada skala mikrobiologis yang sangat halus namun krusial (Sheppard, 2021).

Komposisi dan kelimpahan komunitas mikroba tersebut tidak bersifat statis, melainkan mengalami penyesuaian dinamis yang bervariasi menurut jenis inang, lokasi geografis, kedalaman perairan, fluktuasi musim, hingga tingkat kesehatan karang itu sendiri. Oleh karena itu, penerapan istilah modern seperti *holobiont* karang—yaitu kesatuan entitas biologis yang mencakup organisme inang bersama seluruh mikroorganisme simbionnya—menjadi sangat vital untuk memahami satuan biologis "karang" secara utuh dan nyata di dalam ekosistem (Sheppard, 2021).

Beranjak dari kompleksitas entitas biologis penyusunnya, batas evaluasi keberlanjutan terumbu karang secara fungsional kini tidak lagi didefinisikan hanya melalui parameter keanekaragaman taksonomi atau kekayaan spesies semata. Meskipun keanekaragaman hayati merupakan aspek penting, performa ekosistem sejati diukur dari bagaimana dinamika dan

kesinambungan proses-proses ekologis berlangsung di dalam sistem tersebut (Brandl et al., 2019).

Literatur ekologi laut mutakhir merumuskan bahwa fungsi ekosistem terumbu karang terpusat pada delapan proses ekologis inti. Kedelapan proses tersebut mencakup neraca produksi kalsium karbonat dan bioerosi, interaksi produksi primer dan aktivitas herbivori, akumulasi produksi sekunder dan hubungan predasi, serta dinamika pengambilan dan pelepasan unsur hara atau nutrien secara efisien dalam jaring makanan (Brandl et al., 2019).

Terumbu karang pada hakekatnya harus dipahami sebagai sebuah ekosistem laut yang utuh dan dinamis, bukan sekadar akumulasi atau bangunan kapur pasif di dasar laut. Meskipun struktur fisik kalsium karbonat membentuk arsitektur tiga dimensi yang megah bagi habitat biota perairan, fungsionalitas utamanya terletak pada jaringan interaksi biotik, aliran energi, dan daur materi yang berlangsung di dalamnya (Suggett et al., 2025).

Fondasi utama dari bangunan ekosistem yang kompleks ini bertumpu pada keberadaan karang keras (*Scleractinia*) yang menjalin hubungan simbiosis mutualisme yang erat dengan mikroalga fotosintetik (*Zooxanthellae*). Simbiosis mutualistik ini bertindak sebagai mesin penggerak metabolik utama yang menyediakan suplai energi efisien untuk proses kalsifikasi, sekaligus mendukung kestabilan fisiologis yang menjadi basis kehidupan entitas *holobiont* dan mikroba pendukungnya (Shah, 2021).

Pada akhirnya, keberlanjutan dan ketahanan fungsi ekosistem terumbu karang secara menyeluruh ditopang oleh keberlangsungan jaringan proses ekologi inti, bukan oleh ketergantungan pada satu takson atau spesies tunggal. Fleksibilitas fungsional yang terjalin antar-kelompok biota memastikan bahwa integritas ekosistem—seperti siklus nutrien dan kontrol trofik—tetap dapat berjalan dengan stabil meskipun terjadi fluktuasi populasi pada spesies tertentu (Bellwood et al., 2018).

5.1.4 Nuansa Istilah dan Batasannya

Perkembangan disiplin ilmu ekologi karang dalam beberapa dekade terakhir diiringi oleh tantangan mendasar pada aspek terminologi. Dalam kajian literatur modern, disadari bahwa istilah-istilah yang digunakan untuk menggambarkan komponen, struktur, dan proses pada terumbu karang masih bersifat sangat cair (*fluid*) serta rentan memicu multitafsir di antara para praktisi dan akademisi. Ketidakjelasan konseptual ini bukan sekadar masalah tata bahasa, melainkan hambatan epistemologis yang memengaruhi bagaimana data lapangan diinterpretasikan, dibandingkan, dan dikomunikasikan secara global.

Fenomena ini tampak sangat menonjol dalam sub-disiplin restorasi terumbu karang—sebuah bidang yang tumbuh pesat sebagai respons terhadap krisis koral dunia, namun belum memiliki leksikon formal yang mapan. Ketiadaan kerangka terminologi yang disepakati secara universal membuat istilah-istilah krusial seperti "restorasi", "rehabilitasi", atau "pembibitan karang" sering kali digunakan secara bergantian tanpa acuan metodologis yang presisi. Sebagaimana ditegaskan oleh Suggett et al. (2025), kondisi ini melahirkan kebutuhan yang sangat mendesak akan adanya definisi bersama guna membangun fondasi teoritis dan praktis yang kokoh dalam tindakan konservasi.

Dampak nyata dari ketiadaan leksikon baku ini berimbas langsung pada keterbandingan (*comparability*) hasil penelitian serta evaluasi efektivitas proyek restorasi antarwilayah. Tanpa batas-batas konseptual yang tegas, akumulasi pengetahuan ilmiah menjadi terhambat dan kebijakan tata kelola ekosistem berisiko salah arah akibat miskomunikasi antar-pemangku kepentingan. Oleh karena itu, penyusunan tata nama dan definisi baku menjadi langkah awal yang krusial agar disiplin ilmu restorasi terumbu karang dapat bertransformasi dari sekadar sekumpulan praktik lokal menjadi sains terapan yang terukur secara sistematis.

Permasalahan ambiguitas istilah ini tidak hanya terbatas pada dinamika restorasi, melainkan meluas ke dalam domain ekologi umum dan kajian habitat berkapur (*calcified habitats*)

lainnya. Dalam lanskap ilmiah, ketidakpastian linguistik sering kali secara langsung bertransformasi menjadi sumber ketidakpastian ekologis. Ketika suatu istilah tidak didefinisikan secara eksplisit, batas-batas spasial, taksonomis, dan fungsional dari objek yang diteliti menjadi kabur, yang pada akhirnya memicu bias dalam pemodelan populasi maupun analisis struktur komunitas (Jardim et al., 2025).

Hambatan konseptual ini terlihat jelas dalam upaya standarisasi nomenklatur pada kelompok alga koralin (*coralline algae*). Proses penyatuan istilah dalam ranah tersebut secara eksplisit mengambil inspirasi dari penyusunan istilah payung (*umbrella terms*) yang telah lama digunakan dalam ilmu kelautan, seperti kata "*coral*" dan "*kelp*" (Jardim et al., 2025). Penggunaan istilah payung ini membuktikan bahwa konstruksi bahasa ilmiah sering kali mengandalkan abstraksi guna menjembatani keberagaman hayati yang sangat kompleks ke dalam unit analisis yang lebih mudah dikelola.

Kendati demikian, Jardim et al. (2025) mengingatkan bahwa istilah-istilah yang berkesan mapan tersebut pada hakikatnya merupakan bentuk penyederhanaan ilmiah (*scientific simplification*) yang dirancang khusus demi memfasilitasi komunikasi lintas disiplin. Meskipun penyederhanaan ini mempermudah kolaborasi antara ahli ekologi, geologi, dan pembuat kebijakan, risikonya terletak pada potensi hilangnya nuansa ekologis spesifik dari masing-masing takson. Oleh sebab itu, peneliti dituntut untuk tetap bersikap kritis dalam mengidentifikasi batasan antara abstraksi bahasa dan realitas ekologis di lapangan.

Kompleksitas pemaknaan istilah terumbu karang semakin bertambah ketika kita memperhitungkan dimensi sosial dan budaya masyarakat pesisir. Makna kata-kata yang terikat pada ekosistem karang dalam konteks sosial sering kali tidak berimpit secara sempurna dengan definisi biologis murni. Perbedaan persepsi ini mencerminkan bagaimana interaksi historis manusia dengan lingkungan bahari membentuk cara pandang linguistik yang berbeda dari dikotomi taksonomi ilmiah modern.

Hasil tinjauan lintas budaya menunjukkan keberagaman yang signifikan dalam taksonomi rakyat (*folk taxonomy*). Bahasa

lokal di beberapa wilayah pesisir memiliki puluhan istilah spesifik untuk mendeskripsikan variasi morfologi karang, namun di wilayah lain, bahasa lokal hanya memiliki sangat sedikit istilah atau bahkan satu kata tunggal yang mencakup organisme individu, struktur batuan kapur, hingga keseluruhan bentang laut (Foale, 2023). Variasi ini menegaskan bahwa konstruksi bahasa lokal lebih dipengaruhi oleh nilai kegunaan pragmatis dan interaksi pemanfaatan sumber daya dibanding kategorisasi biologis yang kaku.

Dengan demikian, pemisahan yang tegas antara polip karang (sebagai organisme), struktur kapur (sebagai substrat), dan terumbu karang (sebagai ekosistem) merupakan kebiasaan ilmiah (*scientific convention*) yang sangat berguna secara analitis, namun bukanlah sesuatu yang bersifat universal secara budaya (Foale, 2023). Memahami dikotomi ini sangat penting dalam integrasi pengetahuan ekologi lokal (*traditional ecological knowledge*) dengan sains modern. Efektivitas konservasi di tingkat tapak sangat bergantung pada kemampuan peneliti dalam membangun jembatan penerjemahan antara terminologi ilmiah dan pemaknaan lokal.

Berpijak dari pemahaman terminologis dan etnobiologis tersebut, sains modern menekankan bahwa "terumbu karang" tidak boleh lagi dipandang sebagai sistem yang tertutup (*closed system*) atau homogen. Kajian ekosistem terkini membuktikan bahwa terumbu karang memiliki sifat-sifat emergen (*emergent properties*) yang lahir dari interaksi kompleks antar-komponennya, sekaligus beroperasi sebagai sistem terbuka yang sangat responsif terhadap fluks energi lintas-batas dan gaya-gaya eksternal, seperti arus samudra dan dinamika iklim global (Muruga et al., 2024).

Kompleksitas interaksi ini tecermin dalam keterikatan antar-spesies yang tidak selalu berpola linear atau deterministik. Sebagai contoh, analisis makroekologi terhadap asosiasi antara komunitas ikan dan struktur karang secara global menunjukkan kecenderungan hubungan yang positif namun tergolong lemah (Muruga et al., 2024). Temuan ini mendobrak paradigma klasik yang mengasumsikan adanya ketergantungan mutlak dan

langsung antara kelimpahan ikan tertentu dengan tutupan karang keras secara seragam di seluruh kawasan.

Implikasinya, konsep "ekosistem terumbu karang" dalam ekologi modern harus dipahami sebagai jaringan hubungan yang dinamis dan kompleks (*complex dynamic network*), bukan sekadar satu paket interaksi yang statis dan selalu terikat kuat (Muruga et al., 2024). Pemahaman berbasis jaringan yang non-linear ini memberikan kerangka berpikir yang lebih realistis bagi peneliti dan mahasiswa dalam menganalisis ketahanan (*resilience*), kerentanan, serta respons ekosistem karang terhadap ancaman perubahan lingkungan global saat ini.

Memahami pembedaan terminologi mendasar antara karang, terumbu, dan terumbu karang sangat penting dalam penulisan ilmiah, pengajaran, serta komunikasi konservasi (Sugget et al., 2025). Secara spesifik, karang merujuk pada organisme hewan kolonial, terutama koral batu yang berperan utama dalam proses pembentukan terumbu (Shah, 2021). Sementara itu, terumbu didefinisikan sebagai struktur fisik kapur biogenik tahan gelombang yang terbentuk di dekat permukaan laut (Tabel 5.1). Pembentukan ekosistem terumbu karang terjadi ketika karang pembentuk rangka dan organisme pengapur lainnya saling berintegrasi secara fungsional. Proses kompleks tersebut dipengaruhi oleh dinamika oseanografi, interaksi simbiosis mikroba, serta jejaring komunitas biologis yang saling terhubung (Brandl et al., 2019). Seluruh interaksi multidimensional ini pada akhirnya melahirkan struktur, fungsi ekologis, dan keanekaragaman hayati yang bersifat emergen. Dengan demikian, pembedaan konseptual bahwa karang adalah organisme, terumbu adalah struktur fisik, dan terumbu karang adalah ekosistem merupakan kerangka teoretis yang paling konsisten dalam literatur ekologi laut (Sugget et al., 2025).

Tabel 5.1. Perbedaan konseptual antara karang sebagai organisme, terumbu sebagai struktur, dan terumbu karang sebagai ekosistem.

Istilah	Objek Utama	Ciri Ilmiah Inti	Catatan
Karang	Organisme	Hewan Anthozoa yang berkoloni, sering merujuk pada Scleractinia	Tidak selalu pembentuk terumbu
Terumbu	Struktur fisik	Punggungan/gundukan kapur biogenik dekat muka laut	Tidak harus tersusun oleh karang saja
Terumbu karang	Ekosistem	Sistem hayati-fisik berbasis struktur kapur dan komunitas beragam	Memiliki sifat emergen di atas bagian-bagiannya

5.2 Sejarah Perkembangan Studi Terumbu Karang

5.2.1 Eksplorasi Karang di Indonesia

Eksplorasi ekosistem terumbu karang di Indonesia mengalami pembaruan pesat seiring dengan pengakuan global terhadap strategisnya posisi perairan Nusantara sebagai inti dari kawasan *Coral Triangle* (Segitiga Karang). Sejak dekade 1980-an, Indonesia secara aktif mengintegrasikan program pemantauan jangka panjang ke dalam jejaring *Global Coral Reef Monitoring Network* (GCRMN), sejajar dengan wilayah ekosistem karang utama dunia lainnya seperti *Great Barrier Reef* di Australia dan kawasan Karibia (Devantier and Turak, 2017). Keberadaan program pemantauan yang terstruktur ini menjadi fondasi krusial dalam memetakan dinamika kesehatan ekosistem laut dangkal di wilayah perairan Indonesia secara konsisten dari waktu ke waktu.

Peningkatan pemahaman taksonomi dan ekologi karang secara signifikan didorong oleh transformasi metode inventarisasi di lapangan. Penerapan teknik Penilaian Ekologis Cepat (*Rapid Ecological Assessment*—REA) yang diadaptasi dari metode botani terestrial terbukti mampu mencatatkan peningkatan rekaman spesies karang hingga dua sampai tiga kali

lipat dibandingkan penggunaan transek garis (*line transect*) konvensional (Devantier and Turak, 2017). Efektivitas metode ini terletak pada pendekatan pencarian aktif berbasis habitat pada seluruh area situs, sehingga mampu menghasilkan estimasi kekayaan spesies lokal dan regional yang jauh lebih representatif dibandingkan pembatasan kaku pada kuadrat atau garis transek tunggal (Devantier and Turak, 2017).

Secara biogeografis, perairan Indonesia berada di dalam kawasan Kepulauan Indo-Malaya (*Indo-Malay Archipelago*—IMA), sebuah wilayah kepulauan dengan konfigurasi topografi bawah laut yang sangat kompleks. Kawasan ini dicirikan oleh keberadaan ribuan pulau dan semenanjung dengan dimensi serta latar belakang geologis yang sangat beragam (Chi et al., 2025). Interaksi antara kerumitan topografi, struktur geografis yang heterogen, dan sirkulasi arus laut yang dinamis tersebut secara kolektif mentransformasi kawasan ini menjadi pusat keanekaragaman hayati (*hotspot*) laut perairan dangkal paling utama di tingkat global (Chi et al., 2025).

Tingginya keanekaragaman hayati di kawasan Segitiga Karang ini ditopang secara fundamental oleh kelimpahan komunitas terumbu karang yang memiliki tingkat produktivitas primer teramat tinggi. Komunitas karang batu tidak hanya berperan sebagai penyedia pasokan energi utama dalam jejaring makanan, tetapi juga membentuk arsitektur habitat tiga dimensi yang kompleks (Chi et al., 2025). Kompleksitas struktural inilah yang menyediakan relung ekologis (*ecological niches*) serta sumber daya vital bagi keberlangsungan hidup keanekaragaman hayati laut yang sangat luas di perairan tropis tersebut (Chi et al., 2025).

5.2.2 Kesenjangan Pengetahuan dan Prioritas Survei

Upaya pengidentifikasian kawasan pusat keanekaragaman hayati (*biodiversity hotspot*) laut sangat sensitif terhadap kesalahan komisi (*commission errors*) yang bersumber dari keterbatasan peta jangkauan (*range maps*) serta bias cakupan pengambilan sampel di lapangan (Kusumoto et al., 2020). Analisis komprehensif berbasis 109.296 data kejadian (*occurrence records*) dan peta sebaran untuk 697 spesies karang

Scleractinia menunjukkan bahwa estimasi pola spasial keanekaragaman sangat bergantung pada skala geografis yang digunakan; gradien keanekaragaman latitudinal dan longitudinal pada skala halus sering kali menunjukkan perbedaan nyata dari model *hotspot* berbasis peta jangkauan makro (Kusumoto et al., 2020).

Implikasi dari keterbatasan data ini adalah masih banyaknya wilayah perairan yang belum terjelajahi secara memadai, ditandai oleh rendahnya frekuensi insidensi spesies dan minimnya cakupan sampling (Kusumoto et al., 2020). Kesenjangan pengetahuan ekologis ini paling menonjol ditemukan di kawasan pusat Segitiga Karang, yang pada akhirnya menempatkan kawasan tersebut sebagai prioritas utama survei karang untuk mengisi ruang-ruang data yang belum terpetakan (Kusumoto et al., 2020).

Penetapan prioritas pemetaan ekologis secara eksplisit mengarah pada pusat Segitiga Karang dan kawasan pantai timur laut Australia sebagai lokasi prioritas survei untuk menutup kesenjangan keanekaragaman hayati tersebut (Kusumoto et al., 2020). Pengambilan sampel yang tidak merata (*sampling bias*) berisiko tinggi menghasilkan kesimpulan yang keliru mengenai pola keanekaragaman hayati global, yang pada gilirannya dapat memengaruhi keakuratan prioritas konservasi (Kusumoto et al., 2020).

Selain bias sampling di lapangan, keberadaan sumber data historis maupun lokal yang belum terdigitalisasi dan belum terintegrasi ke dalam basis data utama dunia turut memicu terjadinya subestimasi terhadap tingkat pengetahuan ekologis yang sebenarnya (Kusumoto et al., 2020). Oleh karena itu, konsolidasi data melalui digitalisasi koleksi museum dan laporan lokal menjadi langkah strategis yang tidak kalah penting dibanding ekspedisi lapangan baru dalam menyusun pemetaaan makroekologi yang akurat (Kusumoto et al., 2020).

5.2.3 Tantangan Fungsional dan Kesimpulan

Proses pemulihan tutupan karang hidup (*live coral cover*) secara kuantitatif ternyata tidak selalu sejalan dengan pemulihan fungsi fisik dan integritas struktural terumbu karang. Antara

tahun 2005 hingga 2018, laju pemulihan fungsi fisik terumbu tercatat lebih lambat dibandingkan dengan laju peningkatan persentase tutupan karangnya (González-Barrios, Cabral-Tena and Alvarez-Filip, 2020). Kondisi ini terjadi karena pemulihan tersebut didominasi oleh kelompok karang non-kerangka (*non-framework*) dan bentuk pertumbuhan daun-berjari (*foliose-digitate*), bukannya spesies karang pilar pembentuk kerangka utama (González-Barrios, Cabral-Tena and Alvarez-Filip, 2020).

Dominasi yang konsisten dari kelompok karang *non-framework* di berbagai kawasan terumbu menimbulkan ketidakpastian mengenai efek jangka panjang terhadap ketahanan arsitektur terumbu karang secara keseluruhan (González-Barrios, Cabral-Tena and Alvarez-Filip, 2020). Temuan ini menegaskan bahwa penilaian kesehatan ekosistem terumbu tidak dapat hanya mengandalkan pengukuran persentase tutupan karang secara umum, melainkan memerlukan pendekatan berbasis identitas spesies (*species-identity approach*) untuk memahami perubahan fungsionalitas terumbu secara rinci (González-Barrios, Cabral-Tena and Alvarez-Filip, 2020).

Dalam konteks hubungan antarkomunitas, persentase tutupan karang hidup terbukti menjadi faktor pendorong (*driver*) yang jauh lebih kuat terhadap biomassa kelompok trofik ikan terumbu dibandingkan dengan tekanan aktivitas penangkapan ikan (*fishing pressure*). Parameter tutupan karang ini mampu menjelaskan sekitar 30% dari total variabilitas struktur trofik komunitas ikan karang (Russ et al., 2020). Korelasi positif yang signifikan ditemukan antara tutupan karang hidup dengan total biomassa ikan, kelompok predator berukuran besar, dan ikan-ikan pemakan plankton (*planktivores*) (Russ et al., 2020).

Catatan Ekologis: Sebaliknya, asosiasi negatif terdeteksi pada kelompok ikan pemakan alga dengan fungsi penggaruk (*scrapers*) dan penggali (*excavators*) (Russ et al., 2020).

Fenomena makroekologi ini memberikan implikasi penting dalam tata kelola lingkungan laut: strategi manajemen terumbu karang tidak boleh hanya berfokus pada pembatasan aktivitas penangkapan ikan melalui kawasan lindung (seperti KKP), melainkan wajib memasukkan langkah-langkah aktif untuk

memelihara dan memulihkan kualitas struktur habitat terumbu karang itu sendiri (Russ et al., 2020).

5.3 Karakteristik Umum Ekosistem

5.3.1 Terumbu Karang: Struktur Organik Masif Terbesar di Bumi

Terumbu karang merepresentasikan biokonstruksi organik masif terbesar di Bumi yang terbentuk melalui aktivitas biologis berkelanjutan dari sekumpulan organisme pembentuk terumbu (*reef-building organisms*) (Corriero et al., 2019; Wang et al., 2021; Galand et al., 2023). Dalam ekosistem laut, karang batu dari ordo Scleractinia memegang peranan sentral sebagai perekayasa ekosistem (*ecosystem engineer*). Kelompok karang ini secara aktif mengendapkan matriks kalsium karbonat, yang kemudian membangun fondasi arsitektural kokoh serta menciptakan kompleksitas struktural tiga dimensi di dasar laut (Bourne, Morrow and Webster, 2016; Levy et al., 2021; Shinzato and Yoshioka, 2024).

Meskipun memiliki peranan ekologis yang sangat vital bagi laut global, ekosistem terumbu karang hanya menempati cakupan spasial yang relatif terbatas, yakni sekitar 280.000 km^2 di wilayah perairan tropis dan subtropis (Bourne, Morrow and Webster, 2016; Galand et al., 2023). Keterbatasan cakupan area ini berbanding terbalik dengan fungsi keanekaragaman hayatinya. Kompleksitas mikromorfologi yang dihasilkan oleh struktur tiga dimensi terumbu mampu menyediakan mikrohabitat yang menopang kehidupan kurang lebih 25% dari seluruh spesies laut yang telah teridentifikasi hingga saat ini (Bourne, Morrow and Webster, 2016; Galand et al., 2023).

5.3.2 Biokonstruksi dan Proses Kalsifikasi

Secara fungsional, karakteristik paling fundamental dari ekosistem terumbu karang terletak pada kapasitas biokonstruksinya melalui mekanisme kalsifikasi. Proses biomineralisasi ini mencakup presipitasi, deposisi, dan konsolidasi kalsium karbonat yang disintesis secara biologis oleh komunitas organisme bentik pembentuk terumbu (Corriero et al., 2019; Nelson, Kelly and Haas, 2022). Melalui sekresi mineral ini,

karang penyusun terumbu (Scleractinia) memproduksi kerangka tiga dimensi yang rumit, yang berfungsi sebagai substrat fisik, tempat perlindungan dari predator, serta ruang pemijahan bagi berbagai keanekaragaman ikan dan biota akuatik lainnya (Galand et al., 2023).

Dari sudut pandang evolusioner, kemampuan kalsifikasi pada garis keturunan Scleractinia diperkirakan mulai berkembang pada rentang waktu 308 hingga 265 juta tahun yang lalu. Munculnya sifat penulangan kapur ini dipicu oleh peristiwa duplikasi gen spesifik pada takson karang serta ko-opsi (*co-option*) dari gen-gen *ancestral* (leluhur) yang telah ada untuk dialihkan fungsinya ke dalam jalur kalsifikasi (Wang et al., 2021). Peristiwa evolusi kalsifikasi ini tidak memerlukan perubahan genomik secara ekstensif atau makroevolusi yang drastis, melainkan berlangsung melalui duplikasi genetik terarah serta optimisasi fungsional secara bertahap dari protein-protein *ancestral* tersebut (Wang et al., 2021).

5.3.3 Terumbu Karang: Struktur Organik Masif Terbesar di Bumi

Terumbu karang merepresentasikan struktur biogenik masif terbesar di Bumi yang dibentuk secara bertahap oleh aktivitas organisme hidup, utamanya melalui mekanisme biokonstruksi yang berlangsung secara berkesinambungan oleh biota pembentuk terumbu (Corriero et al., 2019; Wang et al., 2021; Galand et al., 2023). Dalam proses arsitektural alami ini, ordo Scleractinia atau karang batu bertindak sebagai insinyur ekosistem (*ecosystem engineer*) utama yang mendeposisikan kalsium karbonat untuk mengonstruksi kerangka basal masif, sehingga membentuk kompleksitas struktural tiga dimensi yang rumit dan menjadi fondasi penopang keanekaragaman hayati tertinggi di ekosistem marin (Bourne, Morrow and Webster, 2016; Levy et al., 2021; Shinzato and Yoshioka, 2024).

Meskipun memiliki peranan ekologis yang amat vital bagi keberlangsungan hayati di lautan, ekosistem terumbu karang ini secara geografis hanya menempati cakupan spasial yang sangat terbatas, yakni berkisar 280.000 km^2 di kawasan perairan tropis dan subtropis (Bourne, Morrow and Webster, 2016; Galand et al.,

2023). Disproporsi area ini memunculkan fenomena ekologis yang luar biasa, di mana luasan geografis yang relatif sempit tersebut mampu mengampu dan menyediakan mikrohabitat bagi kurang lebih 25% dari total keseluruhan spesies laut yang telah diidentifikasi hingga saat ini (Bourne, Morrow and Webster, 2016; Galand et al., 2023).

Secara fisiologis dan geologis, esensi paling mendasar dari ekosistem terumbu karang terletak pada kapabilitas biota utamanya untuk melakukan kalsifikasi, yaitu suatu mekanisme presipitasi, deposisi, dan konsolidasi kalsium karbonat secara simultan oleh organisme bentik pembangun terumbu (Corriero et al., 2019; Nelson, Kelly and Haas, 2022). Melalui sekresi kalsium karbonat yang terorganisir ini, kelompok karang Scleractinia membentuk matriks kerangka tiga dimensi berdinding keras yang menyediakan arsitektur mikrohabitat kompleks, ruang berlindung, serta penyedia area pemijahan bagi keanekaragaman iktiofauna dan invertebrata laut lainnya (Galand et al., 2023).

Dari sudut pandang evolusioner, kemampuan kalsifikasi pada Scleractinia ditengarai mulai berkembang sekitar 308 hingga 265 juta tahun lalu melalui mekanisme ko-opsi gen leluhur (*ancestral genes*) serta peristiwa duplikasi gen spesifik pada garis keturunan karang (Wang et al., 2021). Munculnya sifat biomineralisasi ini tidak menuntut perombakan genomik yang radikal atau ekstensif, melainkan dicapai melalui serangkaian duplikasi gen spesifik serta optimisasi fungsional secara bertahap terhadap protein-protein leluhur yang telah ada sebelumnya (Wang et al., 2021).

Proses pembentukan terumbu karang berlangsung secara gradual melalui tahapan pertumbuhan yang berurutan, di mana residu kalsium karbonat dari organisme bentik mati diendapkan dan disemen menjadi satu struktur padat (Corriero et al., 2019). Laju deposisi karbonat yang sangat masif pada habitat tropis ini dipicu dan ditingkatkan secara nyata oleh interaksi simbiosis mutualistik yang erat antara hewan karang dengan mikroalga endosimbiotik yang menetap dalam jaringan selnya (Corriero et al., 2019).

Menariknya, pada kondisi lingkungan tertentu atau pada beberapa sistem terumbu spesifik, komponen karang pembangun terumbu utama tidak selalu bergantung atau memiliki simbion mikroalga (Corriero et al., 2019). Fenomena ini menegaskan bahwa mekanisme heterotrofi—yaitu penangkapan partikel organik dan zooplankton langsung dari kolom air—memegang peranan metabolik yang tak kalah vital dalam memasok energi serta prekursor kimiawi untuk mendukung sintesis kalsium karbonat (Corriero et al., 2019).

5.3.4 Simbiosis dan Holobion Karang

Kunci keberhasilan ekologis karang dalam menguasai perairan tropis terletak pada jalinan asosiasi dinamis dengan berbagai konsorsium mikroorganisme, yang mencakup hubungan mutualisme bersama dinoflagelata fotosintetik serta kolaborasi erat dengan beragam komunitas bakteri, archaea, hingga fungi (Bourne, Morrow and Webster, 2016; Planes et al., 2019). Entitas fungsional karang dengan demikian diekspresikan sebagai suatu "holobion", yakni unit biologis tunggal yang mengintegrasikan inang hewan karang, dinoflagelata endosimbiotik, virus, bakteri, serta mikroeukariota lain ke dalam satu sistem kehidupan terpadu (Planes et al., 2019).

Jaringan interaksi metabolik yang sangat kompleks di dalam entitas konsorsium simbiotik holobion ini bertindak sebagai mesin penggerak utama dalam pemenuhan nutrisi dan fisiologi karang (Pernice et al., 2019). Sinergi fungsional antaranggota holobion menjadi landasan fundamental yang memungkinkan karang tidak hanya bertahan hidup, tetapi juga menghasilkan laju produktivitas primer ekosistem terumbu yang sangat tinggi di lingkungan yang cenderung miskin nutrisi (Pernice et al., 2019).

Dinoflagelata endosimbiotik, atau yang dikenal sebagai "zooxanthellae", merupakan pendorong utama laju kalsifikasi dan pertumbuhan karang yang telah berevolusi sejak pertengahan Era Mesozoikum sekitar 160 juta tahun yang lalu, bertepatan dengan momen radiasi adaptif karang dangkal modern (Lajeunesse et al., 2018). Melalui pendekatan marka molekuler modern, terungkap bahwa mikroalga simbiotik ini

memuat taksonomi dan keragaman genetik yang amat kaya serta terdiverifikasi, mematahkan pandangan klasik yang sebelumnya menganggap kelompok genus *Symbiodinium* sebagai satu spesies tunggal yang bersifat panmiktik (Lajeunesse et al., 2018).

Simbiosis ini memfasilitasi karang dalam memperoleh nutrisi esensial seperti nitrogen dan fosfor secara amat efisien melalui strategi "pembudidayaan simbion" (*symbiont farming*) (Wiedenmann et al., 2023). Dalam mekanisme unik ini, mikroalga endosimbiotik menyerap serta mengonsentrasi elemen anorganik dari air, yang kemudian ditranslokasikan secara konstan kepada jaringan inang karang melalui proses pencernaan sel-sel simbion yang berlebih secara terkontrol (Wiedenmann et al., 2023).

Keseluruhan materi genetik kolektif dari seluruh komponen penyusun holobion dirumuskan sebagai "hologenom karang", di mana interaksi intergenomik antarorganisme simbiotik ini pada akhirnya meregulasi ekspresi fenotipik, adaptasi, dan respons fisiologi karang (Bourne, Morrow and Webster, 2016). Mekanisme molekuler yang mendasari hubungan simbiosis karang-alga mencakup ketersediaan gen-gen umum yang dimiliki secara luas oleh berbagai spesies karang, sekaligus famili gen yang mengalami duplikasi secara unik pada garis keturunan spesifik, mengindikasikan tingginya variasi dan diversifikasi strategi simbiosis (Shinzato and Yoshioka, 2024).

Eksplorasi genomik terkini membongkar berbagai atribut genetik tak terduga yang menjadi fondasi bagi keunikan biologis serta radiasi adaptif takson karang (Shinzato and Yoshioka, 2024). Salah satu penemuan genomik penting tersebut mencakup ditemukannya kluster gen khusus yang mengodekan mekanisme biosintesis senyawa fotoprotektif, yang berfungsi melindungi jaringan karang dari paparan radiasi ultraviolet intensif di lingkungan laut dangkal (Shinzato and Yoshioka, 2024).

5.3.5 Produktivitas dan Daur Biogeokimia

Secara fungsional, ekosistem terumbu karang ditandai oleh laju produktivitas primer yang sangat tinggi, namun mempertahankan keseimbangan metabolik bersih yang relatif

konstan dan tingkat akumulasi materi organik berupa detritus yang amat rendah (Nelson, Kelly and Haas, 2022). Keberlanjutan ekosistem unik ini disokong oleh lima pilar proses inti, yaitu tingginya laju produktivitas, laju dekomposisi yang cepat, keanekaragaman takson yang masif, laju akresi kalsium karbonat yang pesat, serta perputaran daur biogeokimia yang kompleks dan beragam (Nelson, Kelly and Haas, 2022).

Tingginya fungsi fungsional ini menjawab teka-teki kuno yang dikenal sebagai Paradoks Darwin (*Darwin's Paradox*), yaitu pertanyaan bagaimana ekosistem dengan kelimpahan biologis luar biasa sanggup berkembang di perairan oligotrofik yang amat miskin unsur hara (Nelson, Kelly and Haas, 2022; Wiedenmann et al., 2023). Paradoks ini memformulasikan konsep dasar bahwa terumbu karang mengoperasikan daur biogeokimia internal yang sangat intensif demi memaksimalkan retensi dan efisiensi daur ulang nutrisi agar tidak hilang ke lingkungan laut terbuka (Nelson, Kelly and Haas, 2022; Wiedenmann et al., 2023).

Ekosistem terumbu karang mencatatkan salah satu angka produksi primer kotor (*gross primary production*) tertinggi di planet ini, di mana sebagian besar hasil eksudat fotosintesis dilepaskan oleh organisme produsen bentik ke dalam bentuk materi organik terlarut (*dissolved organic matter*/DOM) (Nelson, Kelly and Haas, 2022). Pelepasan DOM ini berfungsi sebagai fluks karbon utama yang mengalirkan energi kimiawi ke dalam jejaring makanan pesisir secara masif (Nelson, Kelly and Haas, 2022).

Asosiasi mikroba terumbu karang memegang peranan sentral melalui konversi dan konsumsi molekul DOM yang sangat labil hasil ekskresi karang dan alga, sehingga memungkinkan pemanfaatan kembali material organik tersebut secara amat cepat (Nelson, Kelly and Haas, 2022). Mekanisme perputaran mikroba ini menegaskan bahwa terumbu karang sejatinya merupakan ekosistem yang dikendalikan oleh mikroorganisme (*microbiologically-driven ecosystem*), di mana pemanfaatan cepat senyawa labil ini menyalurkan karbon terlarut kembali ke tingkatan trofik yang lebih tinggi serta membentuk struktur komunitas mikroba lokal (Nelson, Kelly and Haas, 2022; Vanwonterghem and Webster, 2020).

Meskipun kasatmata, komunitas mikroorganisme menempati posisi kunci sebagai komponen esensial yang memicu dan memelihara laju produktivitas serta kompleksitas biologis terumbu karang (Galand et al., 2023). Konsorsium bakteri yang menetap pada mukus dan jaringan karang secara langsung menyokong kebugaran (*fitness*) inang melalui penyediaan nutrisi, daur ulang metabolit sekunder, hingga perlindungan kekebalan tubuh pasif terhadap invasi organisme patogenik (Galand et al., 2023).

Skala diversitas mikroba yang berasosiasi dengan habitat terumbu terhitung sangat raksasa dan di luar perkiraan konvensional (Galand et al., 2023). Apabila ekstrapolasi variasi genetik mikroba dilakukan terhadap seluruh takson karang dan iktiofauna di Samudra Pasifik, kekayaan taksonomi prokariotik di terumbu karang ini diperkirakan mendekati totalitas keanekaragaman prokariota yang diproyeksikan berada di seluruh muka Bumi (Galand et al., 2023).

5.3.6 Kompleksitas Struktural dan Keanekaragaman Hayati

Arsitektur tiga dimensi skala halus (*fine-scale*) yang diproduksi oleh karang pembangun terumbu di perairan dangkal memberikan implikasi determinatif terhadap tingkat keanekaragaman hayati, komposisi rakitan spesies (*species assemblage*), hingga ekspresi sifat fungsional ekosistem (Price et al., 2019). Dalam kapasitasnya sebagai perekayasa ekosistem autogenik (*autogenic ecosystem engineers*), koloni karang mengonstruksi serta merawat konfigurasi fisik terumbu, yang tidak hanya menyediakan mikrositus perlindungan langsung dan tidak langsung, namun juga memodifikasi parameter abiotik lokal seperti dinamika arus dan pencahayaan (Zawada et al., 2019).

Penting untuk dicatat bahwa derajat kompleksitas struktural suatu terumbu tidak dapat diukur secara serampangan sebagai fungsi linear dari persentase tutupan karang semata (Richardson, Graham and Hoey, 2017). Sebaliknya, tingkat kerumitan fisik tersebut sangat ditentukan oleh komposisi dan variasi taksonomi spesies karang penyusunnya, di mana keberadaan morfologi karang yang

bercabang atau berongga memberikan kontribusi heterogenitas ruang yang jauh lebih tinggi (Richardson, Graham and Hoey, 2017).

Keanekaragaman bentuk pertumbuhan (*growth forms*) pada karang terbentuk dari interaksi antara strategi sejarah hidup (*life-history strategies*), diferensiasi genetik, serta tingkat plastisitas fenotipik terhadap tekanan lingkungan setempat (Richardson, Graham and Hoey, 2017). Derajat kompleksitas fisik beserta zonasi terumbu ini bertindak sebagai prediktor biologis terkuat dan paling konsisten dalam menentukan kelimpahan, biomassa, kekayaan spesies ikan, serta pengorganisasian struktur trofik di terumbu karang (Darling et al., 2017).

Peningkatan kerumitan fisik terumbu berbanding lurus dengan peningkatan kekayaan spesies serta kelimpahan organisme epifauna dan iktiofauna, karena tersedianya pembagian relung ekologis (*niche partitioning*), kelimpahan sumber pakan, perlindungan dari predasi, serta pembiasan pergerakan arus air (Price et al., 2019). Sementara itu, investigasi genomik terkini mengungkap keberadaan "keanekaragaman tersembunyi" (*cryptic diversity*) yang signifikan, di mana takson karang yang secara morfologis tampak identik ternyata terdiri dari garis keturunan independen yang sangat divergen secara ekologis dan fenotipik (Bongaerts et al., 2021).

5.3.7 Variasi Ekosistem: Dari Dangkal hingga Mesofotik dan Air Dalam

Secara geografis, ekosistem terumbu karang terutama terdistribusi di kawasan perairan jernih miskin hara (*oligotrofik*) di Samudra Atlantik Barat dan Indo-Pasifik, terbentang pada koordinat lintang 30° LU hingga 30° LS (Corriero et al., 2019). Pola sebaran vertikal terumbu karang ini sangat dipengaruhi oleh penetrasi radiasi cahaya matahari; kendati demikian, komunitas terumbu karang permukaan dangkal sebenarnya hanyalah sebagian kecil dari keseluruhan spektrum ekosistem terumbu karang utuh (Corriero et al., 2019).

Memasuki zonasi yang lebih dalam, Ekosistem Terumbu Karang Mesofotik (*Mesophotic Coral Ecosystems*/MCR) membentang dari kedalaman 30–40 meter hingga melampaui

batas zona fotik bawah yang mampu mencapai 200 meter jika kondisi penjernihan air memadai (Corriero et al., 2019). Komunitas MCR ini diampu oleh kelompok karang dependen-cahaya yang beradaptasi secara khusus, di mana simbion fotosintetiknya mengarahkan toleransi fisiologis terhadap kondisi intensitas cahaya remang (Corriero et al., 2019).

Berbeda jauh dari zona fotik tropis, Terumbu Karang Air Dingin (*Cold-Water Corals*/CWC) merepresentasikan "oase kehidupan" di dasar laut dalam yang sering kali mengalami keterbatasan pasokan nutrisi (Maier et al., 2023). Ekosistem CWC ini menopang tingkat keanekaragaman hayati yang sejajar dengan terumbu tropis dangkal, namun dengan biomassa dan aktivitas metabolik bersih yang jauh melampaui lingkungan bentik laut dalam di sekitarnya (Maier et al., 2023). Menariknya, derajat kekasaran permukaan atau rugositas struktur yang dibentuk oleh CWC terbukti setara dengan rugositas terumbu karang tropis dangkal (Price et al., 2019).

Dalam mempertahankan fungsinya, ekosistem CWC beroperasi mirip sistem penyaring raksasa yang menopang jaring-jaring makanan kompleks melalui jalur daur ulang yang amat efisien demi meminimalkan hilangnya nutrisi (Maier et al., 2023). Keberadaan terumbu air dingin ini terkonsentrasi di wilayah dengan fluktuasi dinamika makanan temporal, di mana denyut arus deras dan fenomena migrasi vertikal zooplankton memacu pasokan bahan organik secara berkala dari kolom air atas ke dasar laut (Maier et al., 2023).

Seiring dengan dinamika penurunan tutupan karang pembangun terumbu, takson spons (*Porifera*) merebak sebagai komponen fungsional yang semakin dominan dalam ekosistem terumbu karang modern (Pawlik and McMurray, 2020). Spons memompa volume air laut yang sangat masif dan mentransformasi komposisi kimiawi air tersebut melalui aktivitas filtrasi pakan, ekskresi metabolit, serta metabolisme komunitas mikroba simbiotiknya, memberikan efek fundamental pada fluks siklus karbon dan nutrisi terumbu (Pawlik and McMurray, 2020).

Di sisi lain, matriks kerangka kalsium karbonat karang bukanlah struktur inert yang kosong, melainkan dihunikan oleh

beragam alga endolitik, fungi, bakteri heterotropik, dan mikroeukariota pembor yang sering kali membentuk garis-garis mikroba terpigmentasi (Pernice et al., 2019). Sebagian mikroorganisme endolitik ini memproduksi asam atau mekanisme kimiawi untuk melarutkan matriks kalsium karbonat, yang secara bertahap memperlemah kekuatan mekanis kerangka karang dan berkontribusi secara substansial pada laju bioerosi terumbu (Pernice et al., 2019).

5.3.8 Ancaman dan Resiliensi Ekosistem

Saat ini, terumbu karang tergolong sebagai salah satu habitat yang terancam kritis di tingkat global akibat tekanan antropogenik lokal dan global yang bersifat sinergis (Bourne, Morrow and Webster, 2016; Vanwonterghem and Webster, 2020). Faktor lokal seperti penurunan kualitas air, konversi lahan pesisir, dan eksploitasi penangkapan ikan berlebih (*overfishing*), berinteraksi secara destruktif dengan krisis iklim global berupa peningkatan suhu permukaan laut dan pengasaman samudra (*ocean acidification*) (Bourne, Morrow and Webster, 2016; Vanwonterghem and Webster, 2020). Dampak akumulatif dari kombinasi stresor ini amat masif, di mana lebih dari separuh tutupan karang dunia telah lenyap sejak dekade 1950-an, yang disusul oleh penurunan keanekaragaman spesies biota terkait hingga melampaui 60% (Galand et al., 2023).

Degradasi skala luas pada ekosistem terumbu ini mengganggu keterkaitan kritis antara konsorsium mikroba dengan daur materi organik terlarut (DOM), memicu mekanisme umpan balik negatif yang meruntuhkan daya lenting (*resilience*) ekosistem terhadap perubahan lingkungan (Nelson, Kelly and Haas, 2022). Meskipun mikroorganisme berfungsi memelihara kesehatan holobion dan kapasitas adaptasi inang, perubahan komposisi mikroba yang tidak seimbang di bawah tekanan ekstrem justru dapat berubah menjadi siklus umpan balik positif yang mempercepat dan memperparah laju kerusakan terumbu karang (Vanwonterghem and Webster, 2020).

5.4 Biologi Dan Anatomi Organisme Karang (*Scleractinia*)

5.4.1 Posisi Taksonomi

Karang pembentuk terumbu secara filogenetik berkedudukan di dalam filum Cnidaria dan kelas Anthozoa. Secara tradisional, Anthozoa dipisahkan menjadi dua kelompok utama berdasarkan simetri dasar tubuhnya, yakni kelompok Hexacorallia dan Octocorallia. Hexacorallia, yang menaungi ordo Scleractinia atau karang batu (karang keras) modern, dicirikan oleh pola heksameral di mana susunan tentakel, septa, dan mesenterinya muncul dalam kelipatan enam. Pola simetri ini sangat fundamental karena bertindak sebagai dasar geometri bagi model pertumbuhan koloni. Sementara itu, kelompok Octocorallia yang mencakup berbagai jenis karang lunak dan gorgonian memiliki organisasi oktameral atau kelipatan delapan (Roy et al., 2021; Willmott et al., 2024).

Meskipun klasifikasi berbasis simetri rangka makroskopis ini telah lama digunakan, batasan taksonomi tingkat tinggi pada Anthozoa saat ini masih sangat dinamis. Pendekatan filogenomik dan molekuler memperlihatkan bahwa banyak famili tradisional karang keras sebenarnya bersifat polifiletik, sehingga mengharuskan adanya integrasi data molekuler dengan karakter morfologi dan mikrostruktur. Dinamika revisi ini memunculkan usulan untuk meningkatkan status taksonomi Octocorallia dan Hexacorallia menjadi setingkat kelas, yang merepresentasikan betapa aktifnya penataan ulang pohon evolusi karang untuk mencerminkan kekerabatan genetik yang sesungguhnya (McFadden et al., 2022).

5.4.2 Anatomi Polip

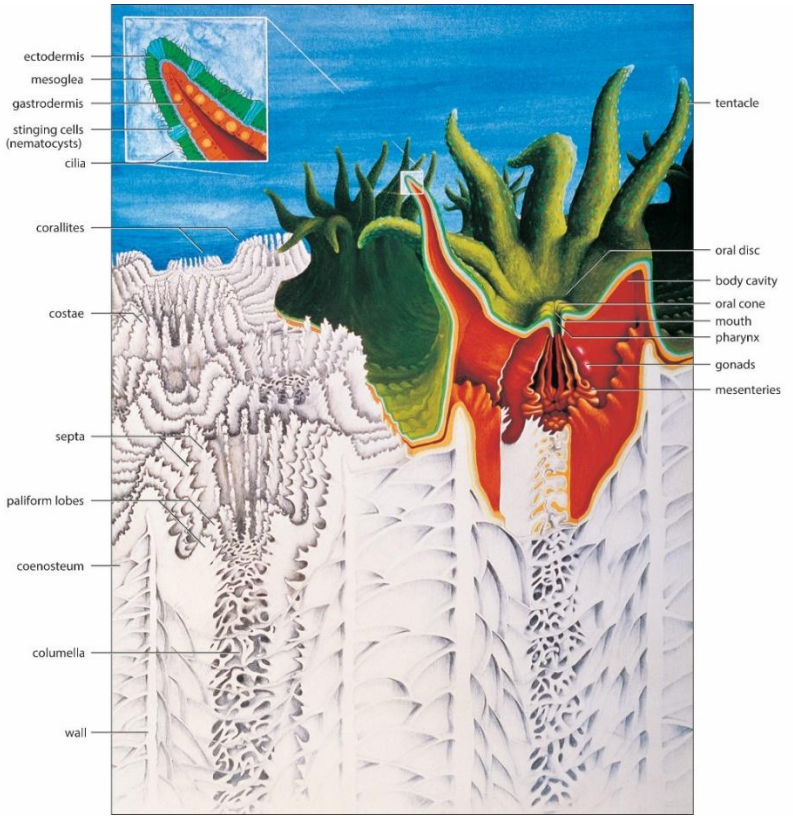
Polip merupakan unit fungsional dan struktural paling dasar yang membangun sebuah koloni karang. Secara histologis, jaringan polip tersusun atas tiga lapisan utama: epidermis (ektoderm) di bagian luar, gastrodermis (endoderm) (Gambar 5.4.) di bagian dalam, serta lapisan mesoglea yang menyisip di antara keduanya. Dalam tahapan perkembangan embrional, sel-sel endoderm akan berdiferensiasi membentuk gastrodermis dan filamen mesenterial, sementara mesoglea bertindak sebagai matriks perantara tempat sel-sel epitel tersebut melekat.

Struktur mikroanatomi dasar ini bersifat tetap dan dapat diidentifikasi secara konsisten, baik pada polip berukuran normal maupun pada area jaringan koralit yang mengalami pembesaran (Kawamura & Satoh, 2024; Rich et al., 2021).

Setiap bagian dari jaringan polip (Gambar 5.4.) memiliki spesialisasi fungsi yang sangat kompleks guna mendukung sintasan koloni. Bagian tentakel yang berbentuk tubular dilengkapi dengan nematosit yang padat pada lapisan epidermisnya untuk menunjang fungsi pertahanan dan predasi, serta menjadi inang utama bagi alga simbion (zooxanthellae) di lapisan gastrodermis. Rongga internal polip, atau coelenteron, bertindak sebagai pusat pencernaan sekaligus jalur distribusi nutrien yang terhubung ke seluruh bagian koloni, di mana filamen mesenterial secara aktif menyekresikan enzim-enzim pencernaan. Lebih lanjut, dinding tubuh bagian dasar memuat kalikodermis yang berikatan langsung dengan proses biomineralisasi rangka, sedangkan area mulut dan faring diketahui kaya akan reseptor neurotransmiter (Shikina et al., 2024).

5.4.3 Skeletogenesis dan Koralit

Pembentukan rangka koloni atau skeletogenesis pada karang keras sepenuhnya digerakkan oleh epitel kalikoblastik yang mengendapkan kalsium karbonat berupa kristal aragonit pada area basal tubuh polip. Pemahaman mengenai mekanisme biomineralisasi ini telah bergeser dari pandangan lama yang melihatnya sebagai proses dua tahap yang kaku, menuju model deposisi berlapis yang menunjukkan kesinambungan antara fase penambahan mineral cepat dan zona penebalan rangka. Dari sisi evolusi, analisis profil protein matriks organik menunjukkan perbedaan yang amat nyata antara mekanisme biomineralisasi pada kelompok Hexacorallia dan Octocorallia, yang mengindikasikan bahwa kemampuan membentuk rangka kalkareus pada kedua kelompok ini berevolusi secara independen (Roy et al., 2021; Stolarski, 2024).



Gambar 5.2. Anatomi Polip dan Kerangka Karang Keras
Sumber: (*Corals of the World*, n.d.)

Rangka aragonit hasil sekresi tersebut membentuk struktur mangkuk penyangga yang disebut koralit, tempat berdiamnya polip karang. Arsitektur koralit terdiri atas elemen-elemen penting seperti lempeng radial internal (septa), struktur sumbu di dasar kaliks (columella), dinding pembatas (theca), dan kerangka penghubung antarkoralit dalam satu koloni yang disebut coenosteum. Selain memberikan dukungan mekanis dan menjadi parameter diagnostik dalam identifikasi spesies, elemen skeletal ini memegang fungsi optik yang krusial. Susunan mikrostruktur pada koralit dan coenosteum dirancang untuk mampu memantulkan serta menyebarkan cahaya secara internal, menjadikan koralit sebagai perangkap cahaya yang sangat efisien

untuk mengoptimalkan aktivitas fotosintesis zooxanthellae (Swain et al., 2018; Zhao et al., 2021).

1. Morfologi Koloni

Morfologi koloni karang terwujud dari pertumbuhan klonal polip yang sifatnya sangat plastis dan amat responsif terhadap parameter lingkungan, seperti kedalaman laut dan hidrodinamika air. Secara makroskopis, karang dapat mendirikan arsitektur tiga dimensi yang bervolume tinggi, mulai dari bentuk masif (kubah atau bongkahan padat), sub-masif, hingga wujud bercabang (*branching*) yang kompleks (Gambar 5.3). Karang bermorfologi masif umumnya mendominasi substrat keras hingga kedalaman menengah, sedangkan karang bercabang biasanya lebih melimpah di perairan dangkal karena pertumbuhannya yang cepat mampu mengokupasi ruang secara agresif. Kajian pemodelan numerik membuktikan bahwa keragaman bentuk tiga dimensi yang kompleks ini dapat disimulasikan secara akurat hanya dengan memodifikasi beberapa parameter dasar terkait arah laju pertumbuhan polip (Willmott et al., 2024; Zapalski et al., 2021).

Gambar 5.3. *Lifeform* Karang *Massive, Sub-Massive*, dan *Branching*
Sumber: Syukra, Salihat and Nuraini, 2025; Swanson et al., 2018

Selain membangun wujud bervolume tebal, kelompok karang juga beradaptasi dengan mengembangkan morfologi yang tipis dan melebar, seperti bentuk kerak *(encrusting*), lembaran

(*foliose/laminar*), datar menyerupai meja (*tabular),* maupun wujud soliter yang tidak berkoloni (Gambar 5.4.).

Karang *encrusting* memiliki peran ekologis krusial sebagai pionir yang meluas secara lateral melapisi kontur substrat dasar. Sementara itu, karang dengan bentuk lembaran atau laminar cenderung lebih mendominasi wilayah perairan mesofotik, karena struktur bilah tipisnya merupakan adaptasi morfologis terbaik untuk memaksimalkan tangkapan cahaya di lingkungan yang redup. Dalam mengukur laju pertumbuhan berbagai variasi bentuk peralihan ini, metode linear konvensional kini mulai digantikan oleh pendekatan fotogrametri tiga dimensi yang mampu memberikan evaluasi struktur secara non-destruktif dan lebih presisi (Kramer et al., 2020; Lange & Perry, 2020).

Gambar 5.4. *Lifeforms* Karang *Encrusting*, *Foliose/Laminar*, dan *Tabular*
Sumber: Syukra, Salihat and Nuraini, 2025; Swanson et al., 2018

5.5 Zonasi Ekosistem Terumbu Karang

5.5.1 Prinsip Dasar Zonasi Ekosistem Laut

Zonasi pada ekosistem terumbu karang merujuk pada pembagian ruang ekologis menjadi unit-unit geomorfik dan biologis yang memiliki komposisi komunitas, bentuk substrat, serta fungsi ekologis yang spesifik (Gambar 5.5.). Pengklasifikasian yang paling mendasar membagi terumbu menjadi tiga zona utama: rataan terumbu (*reef flat*), pematang karang (*reef crest*), dan lereng terumbu (*reef slope*). Namun, dalam kajian ekologi tingkat lanjut, wilayah ini dipecah kembali menjadi sub-zona spasial seperti rataan terumbu bagian dalam

(*inner reef flat*), laguna dangkal (*shallow lagoon*), dan rataan terumbu luar (*outer reef flat*) (He et al., 2023).

Konsep sentral yang mendasari terbentuknya zonasi ini adalah heterogenitas lingkungan laut. Topografi dasar perairan yang bervariasi menciptakan ceruk-ceruk ekologis (*ecological niches*). Berdasarkan prinsip *niche optimum* dalam biologi, organisme bentik yang memiliki adaptasi fisiologis dan morfologis paling cocok dengan kondisi fisik mikronya akan mendominasi area tersebut. Distribusi organisme ini kemudian dipertajam oleh tekanan interaksi biologis, utamanya kompetisi ruang dan eksploitasi nutrisi (Turner et al., 2025). Sebagai implikasi klinisnya, struktur komunitas karang yang terpisah hanya dalam hitungan meter pada habitat yang berbeda acap kali memiliki diferensiasi komposisi yang jauh lebih ekstrem daripada dua habitat yang sejenis meski terpisah ribuan kilometer (Oakley-Cogan et al., 2020).

Pada skala bentang alam (geomorfik), besaran energi gelombang merupakan penentu distribusi ekologis. Gempuran ombak tidak sekadar mengerosi atau mengakresi struktur fisik kalsium karbonat, namun menyeleksi ketahanan mekanis setiap taksa. Sebagai contoh lapangan, zonasi distribusi karang keras Scleractinia di perairan dangkal Pulau Weno sangat didikte secara ketat oleh gradasi energi gelombang, kejernihan kolom air, dan dinamika laju sedimentasi lokal (Kim et al., 2022). Fenomena identik terepresentasikan di Pulau Yongxing, di mana pesisir yang menghadap langsung arah angin dominan (*windward*) berevolusi memiliki arsitektur geomorfik dan kecuraman lereng yang kontras jika disandingkan dengan pesisir terlindung (*leeward*) (Shen et al., 2018).

Zonasi ekosistem terumbu bukanlah sebuah cetak biru alam yang kaku. Variabilitas pola sirkulasi regional dan intervensi antropogenik (aktivitas manusia) mampu memodifikasi, memudarkan, atau membalikkan zonasi alamiah ini, sebagaimana dibuktikan secara empiris pada 33 pulau terumbu karang yang tersebar di Pasifik (Turner et al., 2025). Karenanya, zonasi adalah resultan dinamis dari pertautan intens antar faktor abiotik, biotik, dan spasial.

5.5.2 Profil Zonasi Horisontal (Dari Darat Menuju Laut Lepas)

1. **Zona Laguna dan Rataan Terumbu (*Reef Flat* / *Back Reef*)**

Laguna menduduki peran sebagai perairan penyangga semi-tertutup di belakang benteng rataan terumbu. Ekosistem laguna dangkal (kedalaman di bawah 5 meter) secara tipikal dilapisi oleh substrat lunak berupa sedimen vulkanik, pasir karbonat, atau lumpur silikat (He et al., 2023). Karakter benthik ini mengeliminir karang keras masif, namun memberikan karpet substrat yang sangat subur untuk kolonisasi padang lamun (*seagrass beds*) dan hamparan mikroalga (He et al., 2023).

Melangkah ke perairan yang lebih terekspos, kita menginjak rataan terumbu (*reef flat*). Ekosistem ini merupakan anjungan karbonat dangkal yang sangat rata dan sering menderita kekeringan (desikasi) parah selama fase surut ekuinoks. Memiliki gradien internal, zona ini terbagi menjadi area dalam (*inner*) yang melandai tenang ke laguna dan area luar (*outer*) yang menerima sisa hempasan ombak (He et al., 2023). Kondisi lingkungan di rataan terumbu terbilang sangat ekstrem; didominasi oleh ayunan drastis suhu air harian, fluktuasi salinitas dari limpasan hujan, dan penetrasi radiasi ultraviolet maksimal. Morfologi datar ini juga memicu arena pertempuran spasial antara pertumbuhan tunas karang (*coral recruits*) dan ekspansi rimpang lamun (Kim et al., 2022).

Dari perspektif arsitektur mikroskopis, *reef flat* memang miskin kompleksitas tiga dimensi bila dikomparasikan dengan lereng terumbu dalam (Oakley-Cogan et al., 2020). Kendati demikian, dataran dangkal ini menyuguhkan ladang substrat keras terbuka yang tiada habisnya bagi biomassa alga turf (*turf algae*). Melimpahnya sumber pakan primer ini menyulap rataan terumbu menjadi ladang penggembalaan (*grazing area*) yang sangat produktif bagi ikan herbivora herbivora, meneguhkan posisinya dalam piramida energi terumbu (Oakley-Cogan et al., 2020).

2. **Zona Pematang Karang (*Reef Crest* / *Algal Ridge*)**

Pematang karang atau *reef crest* merupakan sabuk transisi esensial yang bertindak selaku palang pintu hidrodinamis. Area ini adalah lokasi utama di mana energi kinetik dahsyat dari gelombang samudra pecah dan terdisipasi sebelum mencapai daratan (He et al., 2023). Adaptasi kehidupan di zona tumbukan ini melahirkan komposisi spesies yang berdaya tahan tingkat tinggi.

Fungsi mekanis *reef crest* sebagai tembok pemecah ombak laut (*breakwater*) sangat sentral dalam menstabilkan iklim mikro di laguna pesisir (Kim et al., 2022). Akibat hempasan energi yang brutal, hamparan substrat biasanya bersih dari sedimen halus, menyisakan batuan dasar padat (*pavement*) atau bongkahan karang mati patah (*rubble*). Dalam sistem biologi berenergi amat tinggi, pembangunan kerangka bergeser dari dominasi karang ke alga koralin kerak (*crustose coralline algae*). Alga spesifik ini mengendapkan jalinan kalsium karbonat padat tanpa rongga, mengkonstruksi benteng hidrolik alami yang tangguh—dikenal secara saintifik sebagai *algal ridge* atau pada kasus dominasi terumbu karang poros disebut *Porites ridge* (Kim et al., 2022).

Geomorfologi sekunder pada *crest* tidak bersifat universal. Terumbu di pesisir utara dan barat laut Pulau Yongxing menonjolkan fitur *spur-and-groove* (susunan parit dan punggung bukit bawah air) yang mahir meredam benturan ombak, sementara wilayah berarus tenang memperlihatkan evolusi ke arah *reef pools* pasang-surut yang terisolasi (Shen et al., 2018).

3. **Zona Lereng Terumbu (*Reef Slope* / *Fore Reef*)**

Bibir jurang dari terumbu yang menukik drastis memasuki perairan biru samudra dikenal sebagai lereng terumbu (*reef slope*). Sabuk atas dari lereng ini (biasanya di rentang kedalaman 0-6 meter) diistilahkan sebagai *reef front* (He et al., 2023). Perairan yang tersirkulasi dengan sangat baik, bebas dari cekaman sedimen yang mencekik, serta berlimpahnya cahaya, memicu zona lereng menjadi

inkubator terbaik bagi biodiversitas bentik dan pertumbuhan massal karang.

Lereng terumbu merupakan habitat pemegang rekor dalam parameter kompleksitas struktural (Oakley-Cogan et al., 2020). Konstruksi percabangan tumpang tindih menciptakan lorong-lorong mikro pelindung bagi keanekaragaman avertebrata. Analisis ekosistem lereng tepi di Punta Maroma membuktikan bahwa area puncak lereng ini bekerja aktif sebagai mesin akresi (penambahan tinggi dan massa terumbu), sementara ketika menukik jauh ke dalam, sifat perairan bertransformasi menjadi area dasar berkarang (*coral-ground*) yang lebih stabil secara massa (Medina-Valmaseda et al., 2020).

Bentuk kehidupan karang di *fore reef* tersortir rapi mengikuti tekanan ambien. Komunitas penghuni strata atas wajib berkarakter *robust* (berangka kokoh tebal) demi bertahan di bawah hantaman *surge* gelombang badai (Pilly et al., 2021). Hanya minoritas genera plastis—terutama *Acropora* dan *Porites*—yang terbukti sukses mereplikasi koloni dari wilayah cerah di permukaan fore reef merambat turun hingga ke ceruk teduh di dasar tebing (Pilly et al., 2021).

5.5.3 Profil Zonasi Vertikal dan Karakteristik Komunitas Dominan

Transisi vertikal melukiskan pergantian dramatis lanskap ekologis seiring perjalanan tenggelam melintasi kolom kedalaman (batimetri). Dalam disiplin ekologi laut tropis, 'kedalaman' bertindak sebagai proksi (indikator) absolut bagi ketersediaan gradien energi cahaya harian—yakni *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) yang mendasari fungsi klorofil, dan paparan radiasi mematikan *Ultraviolet* (UVR) (Williams et al., 2018; Tamir et al., 2019). Reduksi eksponensial foton cahaya ini memicu respons evolusioner mutlak pada wujud kerangka spesies karang.

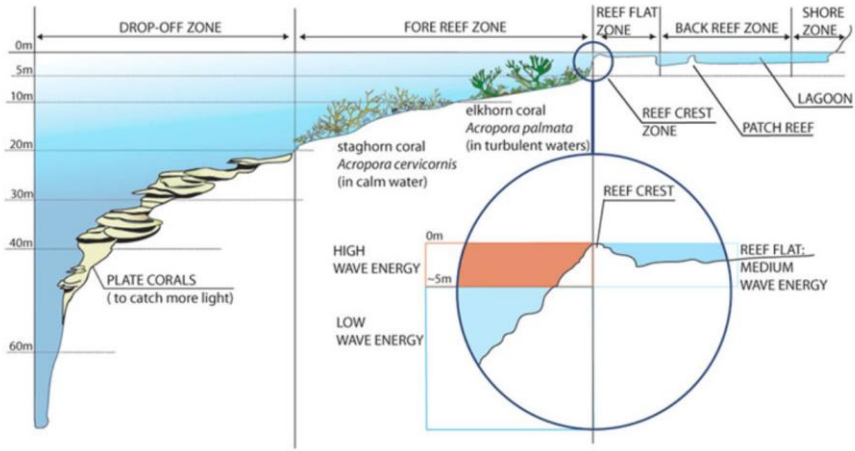
Analisis morfologis mengungkap pergeseran yang sangat konsisten: area paparan cahaya tinggi perairan dangkal (0-30 meter) dididuduki oleh koloni bercabang cepat (*branching*)

maupun bentuk sikat menyebar (*corymbose*). Di kedalaman ini, tumbuh meninggi dengan rimbun ialah senjata terbaik untuk memenangi perebutan wilayah dasar laut dan menghindari sedimentasi mematikan (Kramer et al., 2020; Pilly et al., 2021). Ekspedisi survei batimetri di kawasan Laut Merah menjustifikasi hipotesis ini; taksa dengan morfologi *branching* menghilang dengan cepat dari catatan spesies saat peneliti melampaui kedalaman 36 meter (Tamir et al., 2019).

Turun lebih dalam melewati ambang cahaya kritis, ancaman hidrodinamika pecah gelombang menguap, digantikan oleh defisit nutrisi sinar mentari. Mengatasi kondisi remang-remang ini, karang mengeksekusi transisi plastisitas struktural: bentuk membulat tebal bertransisi drastis menjadi karang lapisan tipis meluas (*encrusting*), melengkung serupa kubis (*foliose*), hingga menyerupai piringan lempeng pipih lebar (*laminar* / *plating*). Adaptasi meratakan diri ke formasi dua dimensi *laminar* merupakan strategi termodinamik paling rasional untuk mencegat jatuhan partikel foton vertikal tersisa menuju jaringan simbion *zooxanthellae* di dalam tentakel polip (Kramer et al., 2020; Pilly et al., 2021; Lesser et al., 2021).

Peralihan fenotipe fisik ini berdampak krusial pada efisiensi biokimia penyusunan kerangka karang purba (akresi karbonat). Observasi laju fisiologis memperlihatkan produksi massa kalsium karbonat koloni karang pembuat terumbu jauh lebih progresif di titik 10 meter—dipercepat oleh morfologi tabung dan masif—daripada di tingkat 17,5 meter, area komando karang *encrusting* yang bersiklus sangat lamban (Pilly et al., 2024).

Menyikapi kehilangan energi surya, mekanisme fisiologis karang (yang notabene merupakan mixotrof) memodulasi sistem pemenuhan gizi dengan melipatgandakan perburuan mangsa plankton (heterotrofi). Pada situs yang disuburkan oleh fenomena jatuhan perairan hangat dari laguna (*downwelling currents*), kelimpahan partikel pakan suspensi membuncah dari permukaan, memungkinkan karang di segala kedalaman mempertahankan rasio pemangsaan heterotrof tinggi dan akhirnya menyamarkan tapal batas gradien nutrisi vertikal (Williams et al., 2018).



Gambar 5.5. Zonasi Ekosistem Terumbu Karang
Sumber: (*Coral Reefs - Coastal Wiki*, n.d.)

5.5.4 Ekosistem Karang Mesofotik (*Mesophotic Coral Ecosystems* - MCEs)

Pencarian titik batas tergelap di mana terumbu karang penghasil energi fotosintetik masih sanggup tegak berdiri bermuara pada pendefinisian Ekosistem Karang Mesofotik (*Mesophotic Coral Ecosystems* - MCEs). Memanfaatkan sinar yang kian pudar (*twilight zone* laut), bioma mesofotik umumnya dijumpai mengakar di rentang kedalaman 30 hingga 150 meter—meskipun di beberapa kawasan perairan jernih nir-polutan murni, karang skleraktinia dapat hidup hingga menyentuh garis gelap melebihi 150 meter (Hoban et al., 2023; Loya et al., 2019). Bioma dasar ini dihuni oleh koral perintis naungan, karang lunak, serta aneka ragam spons (*sponges*) dan hamparan gulma laut (Loya et al., 2019).

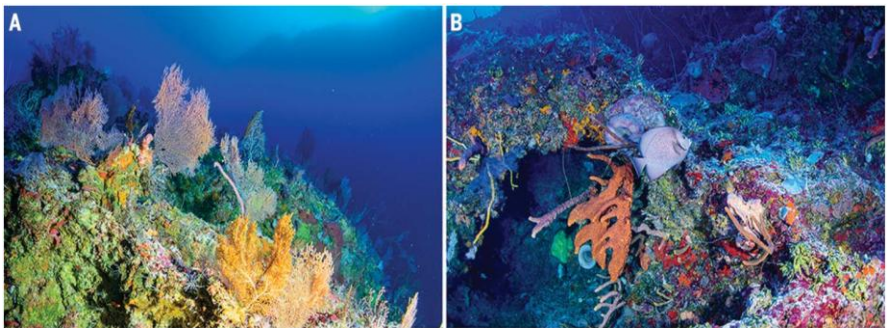
Dalam dikursus literatur ekologi masa silam, MCEs sering dipatok absolut berawal pada metrik kedalaman 30 meter. Pandangan modern menyanggah simplifikasi ini: batas tersebut tiada lain imbas hambatan administratif dan limitasi logistik sertifikasi kedalaman SCUBA konvensional yang tertancap sejak dekade terdahulu (Hoarau et al., 2024; Tamir et al., 2019). Pergeseran dari taksa 'dangkal' menuju 'mesofotik sejati' memiliki plastisitas spasial. Di kawasan perairan Utila,

pergantian komunitas unik ini tercatat pada batimetri sekecil 10 meter hingga selebar 50 meter (Laverick et al., 2017). Karang epipelagik dangkal mengalami kelumpuhan metabolisme saat foton merosot di ambang 1,25% PAR ambien, namun di saat yang sama koloni mesofotik bawah mensyukuri iradiasi 7,5% PAR sebagai puncak fungsi enzimatik fotosintesis (Tamir et al., 2019).

Ekosistem MCEs (Gambar 5.6.) diklasifikasikan secara dikotomi menjadi bilik mesofotik atas (*upper mesophotic*: kisaran 30-40 meter hingga sekitar 60-80 meter) dan mesofotik bawah (*lower mesophotic*: 80 meter menyelam menuju jurang 150 meter) (Hoarau et al., 2024). Terobosan pemetaan genetika forensik dari material organik air laut (*environmental DNA* atau eDNA) mengungkap keajaiban ekologi; pada pita kedalaman 45-60 meter terjadi pergolakan komunitas yang amat mencolok. Di koridor batimetri ini, kelompok hewan perairan dangkal mengalami pemusnahan biologis drastis dan arena kehidupan direbut alih oleh genera yang spesifik terisolir evolusinya di dasar laut dalam (*turnover ekstrem*) (Hoban et al., 2023). Taksa semacam *Leptoseris glabra* dan *Euphyllia paradivisa* mewakili bioma mesofotik atas, sedangkan kegelapan ekstrem mesofotik bawah senantiasa dipimpin oleh *Leptoseris fragilis* (Tamir et al., 2019).

Dimensi konservasi kelautan modern memosisikan MCEs pada panggung supremasi perlindungan baru. Merujuk kalkulasi luas lereng di penjuru dunia, bioma remang ini diklaim merepresentasikan porsi 80% dari luasan komprehensif populasi terumbu karang global yang masih menyembunyikan teka-teki biodiversitasnya (Hoarau et al., 2024; Loya et al., 2019). Signifikansi MCEs belakangan didorong oleh kemunculan hipotetika *Deep Reef Refuge*—gagasan brilian bahwa kedalaman air dingin mampu membentengi ekosistem dari pemutihan massal iklim (*coral bleaching*), lantas mentransformasi wilayah ini sebagai bahtera Nuh bawah laut. Namun demikian, realitas di lapangan tidak seindah angan-angan teoretis. Bukti populasi demografi di pesisir Reunion dan perairan Hawaii menggugurkan validitas universal hipotesis ini; taksa karang yang bersembunyi di perairan di bawah 45 meter rupanya didominasi mutlak oleh taksa endemis spesialis kedalaman yang sama sekali tidak

dibekali mekanisme genetis untuk bermigrasi naik merekolonisasi dan bertahan di reruntuhan perairan cerah gelombang dangkal (Hoarau et al., 2024; Hoban et al., 2023).



Gambar 5.6. Ekosistem Karang Mesofotik di Perairan Bahamas (A dan B)
Sumber: Rocha et al., 2018.

5.6 Ekologi Biota Non-Karang Keras pada Ekosistem Terumbu Karang

5.6.1 Dinamika dan Peran Ekologis *Octocorallia*

Subkelas *Octocorallia* mencakup karang lunak (*ordo Alcyonacea*), gorgonia, kipas laut (*sea fans*), dan pena laut (*sea pens*). Kelompok ini merupakan komponen krusial yang kerap kali mendominasi substrat terumbu, khususnya di kawasan Indo-Pasifik dan Karibia (Gómez-Gras et al., 2025; Reverter et al., 2021). Di wilayah biogeografi Indo-Pasifik, karang lunak bersimbion *zooxanthellae* sering memonopoli substrat keras, dengan pusat keanekaragaman spesies tertinggi terpusat di Kepulauan Indo-Australia dan Samudra Hindia Barat (McFadden et al., 2025). Secara ekosistem, komunitas bentik yang didominasi oleh karang lunak menjadi bentuk komunitas alternatif yang paling melimpah di Indo-Pasifik Barat dan Tengah, bahkan melampaui dominansi makroalga (Reverter et al., 2021).

Kelompok Octocorallia menempati ragam relung ekologis dengan fungsi yang spesifik. Karang lunak dari ordo Alcyonacea (seperti genus *Sinularia*, *Sarcophyton*, *Xenia*, dan *Litophyton*) umumnya memiliki keunggulan kompetitif untuk mendominasi ruang secara lokal serta menunjukkan toleransi yang adaptif

terhadap tekanan perubahan iklim (Alsharif et al., 2023; Stephenson et al., 2025). Di sisi lain, kelompok gorgonia atau cambuk laut (termasuk genus *Gorgonia*, *Eunicella*, *Antillogorgia*, dan *Ellisella*) bertindak sebagai spesies fondasi pada ekosistem terumbu dan terbukti mampu melakukan pertahanan serta kompetisi ruang melalui pelepasan senyawa kimia alelopati (Raghukumar, 2017; Slattery and Lesser, 2021). Terdapat pula karang merah seperti *Corallium rubrum* yang memegang peranan penting sebagai spesies komersial bernilai tinggi dengan struktur mikrobioma yang unik (Van De Water et al., 2017). Di wilayah perairan yang lebih dalam, kelompok oktokoral laut dalam seperti *Paramuricea*, *Primnoa*, dan *Anthothela* sangat penting dalam menciptakan struktur habitat tiga dimensi pada zona mesofotik maupun laut dalam (Kellogg, 2019).

Beberapa karang lunak diketahui memiliki resiliensi yang sangat baik dalam menghadapi dinamika perubahan iklim global. Sebagai contoh, *Sarcophyton* terbukti toleran terhadap asidifikasi perairan, *Xenia* memiliki kemampuan memanfaatkan kondisi perairan dengan eutrofikasi nitrat, dan *Veretillum* memperlihatkan adaptasi fisiologis yang tangguh terhadap pengasaman laut (Stephenson et al., 2025). Meskipun demikian, arsitektur tubuh karang lunak yang dapat mengalami retraksi atau penyusutan periodik menyebabkan organisme ini hanya mampu menyediakan struktur mikrohabitat secara temporer. Dampaknya, keragaman fauna bentik pada terumbu yang didominasi karang lunak cenderung lebih rendah dibandingkan dengan terumbu yang dipenuhi oleh percabangan karang skleraktinia (Stephenson et al., 2025). Berbeda halnya di perairan Karibia, kehadiran spesies fondasi seperti gorgonia di ekosistem terumbu karang mesofotik justru memfasilitasi peningkatan rekrutmen berbagai spesies invertebrata sekaligus mampu mengimbangi dominansi spons secara kimiawi (Slattery and Lesser, 2021).

5.6.2 Spons, Bryozoa, dan Kriptofauna Terumbu

Selain kelompok Cnidaria, filum Porifera (spons) dan Bryozoa memberikan kontribusi besar terhadap pembentukan kompleksitas topografi terumbu dan menjadi habitat inang bagi

mikroba maupun makro-simbion (Montano, 2020; Raghukumar, 2017). Pada ekosistem terumbu mesofotik Karibia, spons sering kali mendominasi biomassa bentik, di mana interaksinya dengan gorgonia turut meningkatkan kepadatan dan keanekaragaman komunitas spons itu sendiri (Slattery and Lesser, 2021). Spons menjalin interaksi mutualistik dengan beragam mikroorganisme, seperti khamir *Malassezia* dan beberapa jenis jamur lain yang menempati jaringan spons di sepanjang siklus hidupnya (Raghukumar, 2017). Bryozoa pun secara konsisten membangun asosiasi simbiotik yang erat dengan taksa biota laut lainnya (Montano, 2020).

Secara kuantitatif, sebagian besar biodiversitas terumbu yang belum banyak terungkap terdiri dari kriptofauna. Organisme berukuran renik ini hidup tersembunyi di dalam ceruk gua, sedimen dasar, maupun di antara pecahan karang mati (*coral rubble*). Ukurannya yang mikroskopis, dikombinasikan dengan perilaku kamuflase serta preferensi habitat yang sulit diakses, membuat kriptofauna di perairan dangkal maupun mesofotik sering terabaikan dalam studi ekologi dasar (Montano, 2020). Defisit literatur ini semakin lebar pada kelompok parasit laut, di mana mayoritas spesies parasit utama pemicu penyakit atau pengendali populasi inang di ekosistem terumbu belum diidentifikasi maupun dideskripsikan secara resmi (Montano, 2020).

1. Mikrobioma Karang: Kesatuan Sistem Holobion

Pendekatan biologi molekuler saat ini tidak lagi memandang karang sebagai satu individu tunggal, melainkan sebuah kesatuan ekosistem mikroskopis yang disebut holobion. Holobion merupakan kesatuan antara hewan inang (Cnidaria) beserta ribuan taksa komunitas bakteri, archaea, virus, dan eukariota bersel tunggal (Bourne, Morrow and Webster, 2016; Voolstra et al., 2024). Sebagai gambaran, bakteri dari genus *Endozoicomonas* (famili Hahellaceae) dapat menyusun hingga 90% dari total mikrobioma bakteri karang. Bakteri ini menetap di dalam jaringan endoderm inang dan bertanggung jawab menunjang kebugaran holobion melalui transpor karbohidrat serta sekresi protein untuk daur ulang nutrisi (Bourne, Morrow and Webster,

2016; Pootakham et al., 2017). Interaksi biokimiawi ini meluas ke perairan di sekitarnya, membentuk apa yang dinamakan "ekosfer karang", yaitu sebuah zona pelagis dinamis di mana mikroba secara aktif direkrut maupun dilepaskan oleh koloni karang (Weber et al., 2019).

Secara komposisi, komunitas mikrobiota pada karang bervariasi bergantung taksa dan letak geografis. Di Laut Merah, filum Proteobacteria menjadi bakteri yang paling dominan menyusun mikrobioma karang lunak, disusul oleh filum Bacteroidetes dan Firmicutes (Alsharif et al., 2023). Pada komunitas oktokoral di wilayah Mediterania, famili Spirochaetaceae dan Endozoicomonadaceae kerap ditemukan mendominasi jaringan inang. Dominansi yang menetap ini menunjukkan jejak filosimbiosis, yang merupakan bukti rekam jejak ko-evolusi panjang antara inang dan komunitas mikrobanya (Prioux et al., 2024). Di lingkungan laut dalam, kelompok bakteri fungsional yang ada pada filum Anthozoa terbukti memiliki gen untuk melakukan fiksasi siklus nitrogen, perombakan sulfur, hingga fungsi remediasi seperti degradasi hidrokarbon laut (Kellogg, 2019).

Dari kingdom Fungi, jamur endolitik yang dapat menguraika kapur—seperti ascomycetes, basidiomycetes, dan thraustochytrids—mampu berpenetrasi ke dalam matriks kerangka karang. Mereka dapat berperan sebagai simbion yang mutualistik di kondisi optimal, namun berubah menjadi patogen oportunistik pemicu bioerosi akut tatkala inang karang mengalami stres lingkungan. Salah satu contoh patogenesis terkenal adalah penyakit aspergillosis pada gorgonia yang disebabkan oleh *Aspergillus sydowii* (Raghukumar, 2017). Menariknya, terdapat corallicolous fungi obligat (seperti Koralionastaceae) yang benar-benar terspesialisasi pada ekosistem perairan terumbu, membuktikan adanya relung mikroba yang spesifik secara evolusioner (Raghukumar, 2017).

Di antara sekian banyak penghuni mikro, eukariota protista disebut-sebut sebagai "misteri terbesar" (*enigma*) dalam kajian mikrobioma karang karena hanya segelintir

yang telah berhasil dibiakkan dan dikarakterisasi di laboratorium (Bonacolta et al., 2023). Alga hijau pengikisan kapur *Ostreobium* (dengan prevalensi temuan 81%) serta alga merah *Calliarthron* (49%) tercatat sebagai genus mikroba fotosintetik pelengkap yang paling berlimpah pada sampel jaringan karang (Pires et al., 2025). Protista apicomplexa dari kelompok Corallicolidae (31,8% sampel)—yang eksklusif hanya ditemukan memarasit jaringan karang—bersama dengan diatom genus *Navicula* dan *Amphora*, sering dijadikan indikator biologis terhadap pergeseran kualitas kesehatan holobion (Pires et al., 2025). Diatom yang kaya akan lipid diyakini menyokong kebutuhan nutrisi inang pasca pemutihan (*bleaching*), meski beberapa varian mikroalga eukariotik justru berpotensi membahayakan inangnya akibat produksi senyawa oksigen reaktif penyebab stres oksidatif seluler (Pires et al., 2025).

2. Asosiasi Symbiodiniaceae dan Pergeseran Ekosistem (*Phase Shift*)

Dinoflagellata dari famili Symbiodiniaceae memegang peran vital sebagai simbion primer penyedia asupan karbon fotosintesis bagi inang (Bonacolta et al., 2023). Dinamika populasi komunitas bakteri dan tipe klade *Symbiodiniaceae* memiliki variabilitas yang dipengaruhi oleh letak zona habitat, mulai dari habitat dekat pesisir (*nearshore*) yang cenderung lebih hangat hingga terumbu lepas pantai (*offshore*). Pada ekosistem terumbu dekat pemukiman yang terpengaruh oleh run-off antropogenik, inang karang sering menunjukkan komposisi mikroba yang anomali, ditandai dengan hadirnya genus *Allorhizobium*, *Staphylococcus*, dan *Halomonas*, serta hubungan asosiasi *Symbiodiniaceae* yang kurang stabil (Gantt et al., 2024).

Perburukan kondisi lingkungan memicu sindrom pergeseran fase ekosistem bentik (*phase shift*), di mana dominansi karang keras tergantikan secara agresif oleh komunitas spesies non-pembangun terumbu, yang berimbas pada keruntuhan fungsi layanan ekosistem (Reverter et al., 2021). Kondisi kritis ini telah teramati di terumbu Bajo Nuevo, Karibia, di mana persentase tutupan karang keras

skleraktinia kini hanya mencakup 23,9%, sedangkan organisme non-pembangun terumbu mendominasi hingga 61,7% substrat. Laju degradasi ini juga diperparah oleh wabah penyakit karang (*coral disease*) yang endemik di wilayah tersebut (Gómez Cubillos et al., 2025). Mempertimbangkan ribuan spesies biota asosiasi yang akan hancur apabila ekosistem skleraktinia kolaps, urgensi untuk menutup rumpang pengetahuan (*knowledge gap*) mengenai ekologi biologi interaksi simbion laut menjadi semakin esensial sebagai landasan konservasi sumber daya pesisir di era antroposen (Montano, 2020).

D. RANGKUMAN

Terminologi dan Konsep Dasar

1. Terdapat perbedaan taksonomis dan ekologis yang mendasar: "karang" merujuk pada organisme hewan avertebrata kolonial (terutama Scleractinia), "terumbu" adalah struktur fisik bentik biogenik kalsium karbonat, sedangkan "terumbu karang" merupakan entitas ekosistem secara holistik.
2. Karang hermatipik merupakan perekayasa ekosistem (*ecosystem engineer*) utama yang menyekresikan kristal aragonit (kalsium karbonat) untuk membentuk kerangka 3D.
3. Karang dipandang sebagai kesatuan "holobion", yakni unit fungsional yang mengintegrasikan inang hewan (Cnidaria) dengan dinoflagelata endosimbiotik (Symbiodiniaceae), serta konsorsium mikrobioma (bakteri, arkaea, fungi, dan virus).

Perkembangan Studi Ekologi Terumbu Karang

1. Wilayah Indo-Pasifik, khususnya Kepulauan Indo-Malaya, ditetapkan sebagai pusat keanekaragaman hayati (*biodiversity hotspot*) utama global di kawasan Segitiga Karang (*Coral Triangle*).
2. Diperlukan pemetaan ekologis dan pendekatan berbasis identitas spesies (*species-identity approach*) untuk

membedakan antara sekadar persentase tutupan karang hidup dengan pemulihan fungsional dan integritas struktural terumbu.

Karakteristik Biogeokimiawi dan Produktivitas

1. Terumbu karang merepresentasikan biokonstruksi organik terbesar di Bumi yang beroperasi secara paradoksal (Paradoks Darwin): memiliki produktivitas primer bruto yang amat tinggi di lingkungan perairan tropis yang oligotrofik (miskin hara).
2. Tingginya produktivitas ini disokong oleh retensi nutrisi yang ketat dan efisiensi daur ulang materi organik terlarut (DOM) yang dimediasi oleh komunitas mikroorganisme.

Biologi dan Anatomi Scleractinia

1. Secara taksonomi, karang batu termasuk dalam filum Cnidaria, kelas Anthozoa, dan kelompok Hexacorallia (memiliki simetri tubuh heksameral atau kelipatan enam).
2. Unit dasar pembentuk koloni adalah polip, yang secara histologis terdiri dari tiga lapisan jaringan: epidermis luar, gastrodermis dalam (tempat bermukimnya alga simbion), dan mesoglea.
3. Proses biomineralisasi (skeletogenesis) digerakkan oleh epitel kalikoblastik yang membentuk mangkuk penyangga yang disebut koralit.
4. Pertumbuhan koloni memperlihatkan plastisitas fenotipik yang amat kaya, bermanifestasi dalam berbagai *lifeform* atau bentuk pertumbuhan (masif, *branching*, *encrusting*, *foliose*, dan *tabular*) sebagai bentuk adaptasi hidrodinamis dan fotobiologis.

Zonasi Ekosistem

1. **Zonasi Horisontal:** Distribusi spasial dari daratan ke laut lepas terbagi menjadi rataan terumbu (*reef flat* / habitat lamun dan alga), pematang karang (*reef crest* / zona peredam energi gelombang dominan alga koralin), dan lereng terumbu (*reef slope* / pusat diversitas karang dan kompleksitas struktural tertinggi).
2. **Zonasi Vertikal (Batimetri):** Gradasi densitas foton (*Photosynthetically Active Radiation*/PAR) secara vertikal memicu transisi bentuk karang; dari dominasi karang

branching di zona dangkal hingga bentuk adaptif *laminar* atau pipih di ekosistem karang mesofotik (30–150 meter).

Ekologi Biota Non-Karang Keras dan Dinamika Komunitas

1. Kelompok Octocorallia (karang lunak, gorgonia) sering mendominasi substrat terumbu dan terbukti memiliki resiliensi adaptif yang kuat terhadap tekanan perubahan iklim (seperti asidifikasi laut).
2. Bioturbator dan *filter feeder* bentik seperti porifera (spons) memainkan peran esensial dalam siklus fluks karbon dan modifikasi kualitas air.
3. Tekanan stresor lingkungan harian dan antropogenik dapat memicu sindrom *phase shift* (pergeseran fase ekosistem), di mana komposisi dominan karang keras pembangun terumbu secara merugikan digantikan oleh komunitas taksa non-pembangun, sehingga meruntuhkan fungsionalitas dan layanan ekosistem laut.

E. Soal Latihan

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat dari pilihan di bawah ini.

1. **Perbedaan mendasar secara ekologis antara istilah 'karang' dan 'terumbu' adalah...**
   A. Karang adalah struktur fisik, terumbu adalah hewannya
   B. Karang adalah hewan avertebrata pembangun, terumbu adalah struktur fisik biogenik kalsium karbonat
   C. Karang adalah sejenis tumbuhan laut bentik, terumbu adalah binatangnya
   D. Tidak ada perbedaan, keduanya merujuk pada objek sains yang sama
   E. Karang merupakan habitat air tawar, terumbu terbentuk di laut
2. **Kelompok karang keras yang menyekresikan kalsium karbonat secara masif serta berperan sentral sebagai pembangun kerangka 3D terumbu dikenal dengan sebutan karang...**
   A. Ahermatipik
   B. Oktokoralia
   C. Hermatipik

D. Gorgonia
E. Hidrozoid

3. **Paradigma ekologi terkini memandang entitas karang sebagai sebuah kesatuan 'holobion', yang maknanya adalah...**
   A. Karang bereproduksi sendiri tanpa partisipasi genetik spesies lain
   B. Karang bersifat parasit obligat yang menempel di tubuh ikan karang
   C. Karang adalah tumbuhan makroskopis raksasa penyokong laut
   D. Karang merupakan kesatuan unit integratif dari hewan inang, alga simbion, dan konsorsium mikrobioma pelengkap
   E. Karang tidak mensyaratkan proses fotosintesis melainkan seratus persen karnivora
4. **Area lautan yang ditetapkan sebagai pusat keanekaragaman hayati terumbu karang global tertinggi di mana Indonesia menjadi pemeran utamanya adalah kawasan...**
   A. Great Barrier Reef
   B. Karibia
   C. Segitiga Karang (*Coral Triangle*)
   D. Samudra Selatan
   E. Atol-atol di Mikronesia
5. **Apa yang dideskripsikan oleh teori yang dinamakan 'Paradoks Darwin'?**
   A. Suksesi terumbu karang yang terhambat di perairan bersalinitas rendah
   B. Tingginya angka produktivitas primer ekosistem karang yang berada di perairan bersuhu hangat namun miskin nutrisi (oligotrofik)
   C. Kedekatan genetik karang batu dengan moluska bercangkang
   D. Terumbu karang tidak bisa berevolusi pada saat level laut meninggi
   E. Kemampuan karang yang bertahan hidup pada saat iklim bumi dalam masa glasial dingin

6. **Bila ditelusuri lewat pendekatan taksonomi klasik, karang pembangun terumbu diklasifikasikan ke dalam filum...**
   A. Porifera
   B. Echinodermata
   C. Mollusca
   D. Cnidaria
   E. Arthropoda
7. **Secara spesifik, Scleractinia juga populer disebut kelomppok Hexacorallia dikarenakan...**
   A. Tubuhnya dibentuk melalui simetri heksameral atau tentakel berkelipatan enam
   B. Polipnya dibekali enam macam alat penyengat berbeda
   C. Tubuhnya dilindungi oleh enam lapis membran aseluler
   D. Daur hidupnya melewati enam fase larva sebelum bermetamorfosis
   E. Selalu berasosiasi hanya dengan enam jenis spesies bakteri mutlak
8. **Dinoflagelata fotosintetik yang hidup di sel-sel gastrodermis karang dan menyalurkan mayoritas kebutuhan energi sang karang adalah...**
   A. Spirulina
   B. Sargassum
   C. Symbiodiniaceae (Zooxanthellae)
   D. Halimeda
   E. Fitoplankton pelagis
9. **'Mangkuk' kerangka kapur tempat berdiamnya satu buah tubuh polip karang dinamakan...**
   A. Koralit
   B. Nematosista
   C. Mesoglea
   D. Planula
   E. Spikula
10. **Sel-sel spesifik pada tubuh polip yang berperan menggerakkan proses biomineralisasi (skeletogenesis) kerangka aragonit karang disebut...**
   A. Lapisan epidermis protektif
   B. Epitel kalikoblastik

C. Saluran rongga gastrovaskular
D. Tentakel pencengkeram
E. Jaringan mesogleal tebal

11. Bentuk modifikasi adaptif arsitektur koloni karang (lifeform) yang menempel erat merayap di atas substrat keras untuk sanggup bertahan dari gempuran energi gelombang laut terkuat adalah...

A. Foliose (Lembaran)
B. Encrusting (Mengerak)
C. Tabular (Meja)
D. Branching (Bercabang panjang)
E. Fungia (Bebas)

12. Bagian zonasi profil terumbu karang yang perannya paling signifikan membenturkan serta memecah energi gelombang samudra (seringkali dihuni oleh alga koralin kerak) disebut...

A. Rataan terumbu (Reef flat)
B. Padang terumbu dalam
C. Lereng terumbu (Reef slope)
D. Pematang karang (Reef crest)
E. Terumbu tubir pantai

13. Secara umum, dari seluruh zonasi profil sebuah terumbu, zona yang merangkum variasi relung ekologis terbanyak dan pusat dari tingginya ragam jenis karang ada di...

A. Lereng terumbu (Reef slope)
B. Pematang karang (Reef crest)
C. Rataan terumbu pinggir
D. Zona supratidal luar
E. Dasar laguna berlumpur

14. Transisi bentang alam terumbu karang di kawasan laut dengan penetrasi foton sangat minim pada kedalaman 30 hingga menembus 150 meter ke bawah diberi nama...

A. Zona hadal
B. Ekosistem terumbu karang mesofotik
C. Ekosistem terumbu dangkal pinggiran
D. Zona abisopelagik
E. Ekosistem perairan teritorial epipelagik

15. **Kelompok fauna bentik yang tidak membentuk kerangka batu masif (contoh: kipas laut/gorgonia) dan pada banyak kasus memperlihatkan resistensi lebih tinggi terhadap asidifikasi laut dikenal dengan...**
    A. Scleractinia
    B. Millepora
    C. Octocorallia
    D. Hexacorallia
    E. Ascidiacea
16. **Terminologi ekologis yang digunakan untuk menggambarkan malapetaka beralihnya lanskap dominasi terumbu karang menuju dominasi alga makro (makroalga) adalah...**
    A. Pemutihan masal
    B. Pergeseran fase (Phase shift)
    C. Transisi eukariotik
    D. Suksesi primer geologis
    E. Sinkronisasi reproduksi
17. **Bila diiris histologis, celah pemisah antara lapis epitel luar (epidermis) dan lapisan perut (gastrodermis) pada karang diisi oleh selaput kenyal nir-sel bernama...**
    A. Eksoskeleton
    B. Mesoglea
    C. Endoskeleton
    D. Kutikula keras
    E. Kalikoblas
18. **Meskipun laut perairan karang dangkal kekurangan nutrisi hara (N dan P), proses siklus daur ulang hara berlangsung dengan luar biasa efisien. Agen biologis utama yang memproses materi organik terlarut (DOM) tersebut adalah...**
    A. Komunitas bakteri bentik laut (Microbial loop)
    B. Hiu herbivora pengurai
    C. Predator puncak pelagis
    D. Zooplankton migrasi vertikal
    E. Paus dan lumba-lumba lepas pantai

19. **Selain karang, hewan berpori ini menempati posisi kunci sebagai agen *filter feeder* handal pengolah partikel terlarut dan *bioturbator* penyumbang material bagi terumbu karang. Fauna tersebut adalah...**
    A. Siput laut (Nudibranchia)
    B. Bintang laut (Asteroidea)
    C. Spons (Porifera)
    D. Landak laut (Echinoidea)
    E. Kuda laut (Hippocampus)
20. **Di zona ekosistem laut karang mesofotik yang mulai gelap gulita, bentuk adaptasi strategi fotobiologis yang dipamerkan karang agar menampung foton sesedikit mungkin umumnya berupa...**
    A. Menjadi lebih tebal dan menggumpal kaku
    B. Melebarkan tubuhnya menjadi plat tipis (laminar/pipih) yang sangat lebar
    C. Mematikan seluruh polip lalu hidup bagaikan bebatuan
    D. Berganti menjadi karnivora yang memburu paus
    E. Menciptakan percabangan jarum mikroskopis tipis

Kunci Jawaban

1. B
2. C
3. D
4. C
5. B
6. D
7. A
8. C
9. A
10. B
11. B
12. D
13. A
14. B
15. C
16. B
17. B
18. A
19. C
20. B

DAFTAR PUSTAKA

Alsharif, S.M., Waznah, M., Ismaeil, M. and El-Sayed, W.S. (2023). 16S rDNA-based diversity analysis of bacterial communities associated with soft corals of the Red Sea, Al Rayyis, White Head, KSA. *Journal of Taibah University for Science*, 17.

Bellwood D, Streit RP, Brandl S, Tebbett SB. The meaning of the term 'function' in ecology: A coral reef perspective. *Functional Ecology.* 2018. doi:10.1111/1365-2435.13265

Bonacolta, A., Weiler, B.A., Porta-Fitó, T., Sweet, M., Keeling, P. and Del Campo, J. (2023). Beyond the Symbiodiniaceae: diversity and role of microeukaryotic coral symbionts. *Coral Reefs*, 42, pp. 567-577.

Bongaerts, P., Cooke, I., Ying, H., Wels, D., Haan, D. S., Hernández-Agreda, A., Brunner, C. A., Dove, S., Englebert, N., Eyal, G., Forêt, S., Grinblat, M., Hay, K., Harii, S., Hayward, D., Lin, Y., Mihaljević, M., Moya, A., Muir, P., Sinniger, F., Smallhorn-West, P., Torda, G., Ragan, M., Van Oppen, M. J. H. and Hoegh-Guldberg, O. (2021). Morphological stasis masks ecologically divergent coral species on tropical reefs.. *Current biology : CB*. doi: 10.1016/j.cub.2021.03.028.

Bourne, D., Morrow, K. M. and Webster, N. (2016). Insights into the Coral Microbiome: Underpinning the Health and Resilience of Reef Ecosystems.. *Annual review of microbiology*, 70, pp. 317-40. doi: 10.1146/annurev-micro-102215-095440.

Bourne, D.G., Morrow, K.M. and Webster, N.S. (2016). Insights into the Coral Microbiome: Underpinning the Health and Resilience of Reef Ecosystems. *Annual Review of Microbiology*, 70, pp. 317-340.

Brandl, S.J., Rasher, D.B., Côté, I.M., Casey, J.M., Darling, E.S., Lefcheck, J.S. and Duffy, J.E., 2019. Coral reef ecosystem functioning: eight core processes and the role of biodiversity. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *17*(8), pp.445-454.

Cardone, F., Corriero, G., Longo, C., Mercurio, M., Tarantini, S. O., Gravina, M. F., Lisco, S., Moretti, M., De Giosa, F., Giangrande, A., Marzano, N. C. and Pierri, C. (2020). Massive bioconstructions built by Neopycnodonte cochlear (Mollusca, Bivalvia) in a mesophotic environment in the central Mediterranean Sea. *Scientific Reports*, 10. doi: 10.1038/s41598-020-63241-y.

Chi, H., Sha, Z., He, L. and Hui, M. (2025). Genetic Population Structure and Distribution of the Small Giant Clam Tridacna maxima in Indo-Pacific Coral Reefs: History Dynamics, Present Status and Future Trends. *Ecology and Evolution*, 15. doi: 10.1002/ece3.71965.

Coral reefs - Coastal Wiki. (n.d.). https://www.coastalwiki.org/wiki/Coral_reefs#Reef_zonation_.28WWC.29

Corals of the world. (n.d.). https://www.coralsoftheworld.org/page/structure-and-growth/

Corriero, G., Pierri, C., Mercurio, M., Marzano, N. C., Tarantini, S. O., Gravina, M. F., Lisco, S., Moretti, M., De Giosa, F., Valenzano, E., Giangrande, A., Mastrodonato, M., Longo, C. and Cardone, F. (2019). A Mediterranean mesophotic coral reef built by non-symbiotic scleractinians. *Scientific Reports*, 9. doi: 10.1038/s41598-019-40284-4.

Darling, E., Graham, N., Januchowski-Hartley, F. A., Nash, K., Pratchett, M. and Wilson, S. (2017). Relationships between structural complexity, coral traits, and reef fish assemblages. *Coral Reefs*, 36, pp. 561-575. doi: 10.1007/s00338-017-1539-z.

Devantier, L. and Turak, E. (2017). Species Richness and Relative Abundance of Reef-Building Corals in the Indo-West Pacific. *Diversity*, 9, pp. 25. doi: 10.3390/d9030025.

Foale S. Who cares about coral? The biological species concept and 'cumulative intrinsic value' in cross-cultural perspective. Journal of Tropical Futures. 2023;1:149 - 157. doi:10.1177/27538931231208079

Galand, P., Ruscheweyh, H., Salazar, G., Hochart, C., Henry, N., Hume, B., Oliveira, P. H., Perdereau, A., Labadie, K., Belser,

C., Boissin, É., Romac, S., Poulain, J., Bourdin, G., Iwankow, G., Moulin, C., Armstrong, E., Paz-García, D., Ziegler, M., Agostini, S., Banaigs, B., Boss, E., Bowler, C., De Vargas, C., Douville, E., Flores, M., Forcioli, D., Furla, P., Gilson, E., Lombard, F., Pesant, S., Reynaud, S., Thomas, O., Troublé, R., Zoccola, D., Voolstra, C., Thurber, R. V., Sunagawa, S., Wincker, P., Allemand, D. and Planes, S. (2023). Diversity of the Pacific Ocean coral reef microbiome. *Nature Communications*, 14. doi: 10.1038/s41467-023-38500-x.

Gantt, S.E., Kemp, K.M., Colin, P., Hoadley, K.D., Lajeunesse, T., Warner, M.E. and Kemp, D. (2024). Influence of reef habitat on coral microbial associations. *Environmental Microbiology Reports*, 16.

Gómez Cubillos, M.C., Daza Guerra, C.A., Lozano Mendoza, N.A. and Zea, S. (2025). Status of the coral formations of Bajo Nuevo Reef Complex, Western Caribbean, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 73(1).

Gómez-Gras, D., Linares, C., Viladrich, N., Zentner, Y., Grinyó, J., Gori, A., McFadden, C.S., Fabricius, K.E. and Madin, J.S. (2025). The Octocoral Trait Database: a global database of trait information for octocoral species. *Scientific Data*, 12.

González-Barrios, F., Cabral-Tena, R. and Alvarez-Filip, L. (2020). Recovery disparity between coral cover and the physical functionality of reefs with impaired coral assemblages. *Global Change Biology*, 27, pp. 640 - 651. doi: 10.1111/gcb.15431.

Hatcher B. Coral reef ecosystems: how much greater is the whole than the sum of the parts?. *Coral Reefs.* 1997;16:S77-S91. doi:10.1007/s003380050244

He, M., He, J., Zhou, Y., Sun, L., He, S., Liu, C., Gu, Y. & Li, P. (2023). Coral reef applications of Landsat-8: geomorphic zonation and benthic habitat mapping of Xisha Islands, China. *GIScience & Remote Sensing*, 60.

Hoarau, L., Guilhaumon, F., Bureau, S., Mangion, P., Labarrère, P., Bigot, L., Chabanet, P., Penin, L. & Adjeroud, M. (2024). Marked spatial heterogeneity of macro-benthic communities along a shallow-mesophotic depth gradient in Reunion Island. *Scientific Reports*, 14.

Hoban, M. L., Bunce, M. & Bowen, B. (2023). Plumbing the depths with environmental DNA (eDNA): Metabarcoding reveals biodiversity zonation at 45–60 m on mesophotic coral reefs. *Molecular Ecology*, 32, pp. 5590-5608.

Jardim, V.L., Grall, J., Barros-Barreto, M.B., Bizien, A., Benoit, T., Braga, J.C., Brodie, J., Burel, T., Cabrito, A., Diaz-Pulido, G. and Gagnon, P., 2025. A common terminology to unify research and conservation of coralline algae and the habitats they create. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *35*(3), p.e70121.

Keeling P, Mathur V, Kwong W. Corallicolids: The elusive coral-infecting apicomplexans. *PLoS Pathogens.* 2021;17. doi:10.1371/journal.ppat.1009845

Kellogg, C.A. (2019). Microbiomes of stony and soft deep-sea corals share rare core bacteria. *Microbiome*, 7.

Kim, T., Lee, D.-W., Kim, H., Jung, Y.-H., Choi, Y.-U., Oh, J.-H., Kim, T.-H., Kang, D.-H. & Park, H.-S. (2022). Estimation of the Benthic Habitat Zonation by Photo-Quadrat Image Analysis along the Fringing Reef of Weno Island, Chuuk, Micronesia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11).

Knowlton N, Brainard RE, Fisher R, Moews M, Plaisance L, Caley M. Coral Reef Biodiversity. 2010. doi:10.1002/9781444325508.ch4

Kramer, N., Tamir, R., Eyal, G. & Loya, Y. (2020). Coral Morphology Portrays the Spatial Distribution and Population Size-Structure Along a 5–100 m Depth Gradient. *Frontiers in Marine Science*, 7.

Kusumoto, B., Costello, M. J., Kubota, Y., Shiono, T., Wei, C., Yasuhara, M. and Chao, A. (2020). Global distribution of coral diversity: Biodiversity knowledge gradients related to spatial resolution. *Ecological Research*, 35, pp. 315-326. doi: 10.1111/1440-1703.12096.

Lajeunesse, T., Parkinson, J. E., Gabrielson, P., Jeong, H., Reimer, J., Voolstra, C. and Santos, S. R. (2018). Systematic Revision of Symbiodiniaceae Highlights the Antiquity and Diversity of Coral Endosymbionts.. *Current biology : CB*, 28 16, pp. 2570-2580.e6. doi: 10.1016/j.cub.2018.07.008.

Laverick, J. H., Andradi-Brown, D. A. & Rogers, A. (2017). Using light-dependent scleractinia to define the upper boundary of mesophotic coral ecosystems on the reefs of Utila, Honduras. *PLoS ONE*, 12.

Lesser, M., Slattery, M. & Mobley, C. (2021). Incident light and morphology determine coral productivity along a shallow to mesophotic depth gradient. *Ecology and Evolution*, 11, pp. 13445-13454.

Levy, S., Elek, A., Grau-Bové, X., Menéndez-Bravo, S., Iglesias, M., Tanay, A., Mass, T. and Sebé-Pedrós, A. (2021). A stony coral cell atlas illuminates the molecular and cellular basis of coral symbiosis, calcification, and immunity. *Cell*, 184, pp. 2973 - 2987.e18. doi: 10.1016/j.cell.2021.04.005.

Loya, Y., Puglise, K. A. & Bridge, T. (2019). *Mesophotic Coral Ecosystems*. Springer.

Maier, S., Brooke, S., De Clippele, L. D., De Froe, E., Van Der Kaaden, A., Kutti, T., Mienis, F. and Van Oevelen, D. (2023). On the paradox of thriving cold-water coral reefs in the food-limited deep sea. *Biological Reviews*, 98. doi: 10.1111/brv.12976.

McDonald, M. (2023, December 18). *Microscopic Anatomy - Coral Disease & Health Consortium*. Coral Disease & Health Consortium. Retrieved July 10, 2026, from https://cdhc.noaa.gov/coral-biology/microscopic-anatomy/

McFadden, C., Erickson, K. L., Lane, A., Nassongole, B., Aguilar, S., Dunakey, S., Durkin, K., Lalas, J. A. A., Kushida, Y., Macrina, L., Minor, N. P., Morales-Paredes, M., Nelson, J., Peddada, A., Poole, S., Porto, R., Purow-Ruderman, R., Snyder, K. E., Wismar, T., Samimi-Namin, K., Baria-Rodriguez, M., Benzoni, F., Huang, D., Reimer, J., Paulay, G., Quattrini, A., Ekins, M. and Benayahu, Y. (2025). Biodiversity and biogeography of zooxanthellate soft corals across the Indo-Pacific. *Scientific Reports*, 15. doi: 10.1038/s41598-025-98790-7.

McFadden, C.S., Erickson, K.L., Lane, A., Nassongole, B. et al. (2025). Biodiversity and biogeography of zooxanthellate soft corals across the Indo-Pacific. *Scientific Reports*, 15.

Medina-Valmaseda, A., Rodríguez-Martínez, R., Álvarez-Filip, L., Jordán-Dahlgren, E. & Blanchon, P. (2020). The role of geomorphic zonation in long-term changes in coral-community structure on a Caribbean fringing reef. *PeerJ*, 8.

Montano, S. (2020). The Extraordinary Importance of Coral-Associated Fauna. *Diversity*, 12(9).

Muruga P, Siqueira AC, Bellwood D. Meta-analysis reveals weak associations between reef fishes and corals. Nature Ecology & Evolution. 2024;8:676 - 685. doi:10.1038/s41559-024-02334-7

Nelson, C. E., Kelly, W. L. and Haas, A. (2022). Microbial Interactions with Dissolved Organic Matter Are Central to Coral Reef Ecosystem Function and Resilience.. *Annual review of marine science*. doi: 10.1146/annurev-marine-042121-080917.

Oakley-Cogan, A., Tebbett, S. B. & Bellwood, D. (2020). Habitat zonation on coral reefs: Structural complexity, nutritional resources and herbivorous fish distributions. *PLoS ONE*, 15.

Pawlik, J. and McMurray, S. (2020). The Emerging Ecological and Biogeochemical Importance of Sponges on Coral Reefs.. *Annual review of marine science*. doi: 10.1146/annurev-marine-010419-010807.

Pearman, J., Leray, M., Villalobos, R., Machida, R., Berumen, M., Knowlton, N. and Carvalho, S. (2018). Cross-shelf investigation of coral reef cryptic benthic organisms reveals diversity patterns of the hidden majority. *Scientific Reports*, 8. doi: 10.1038/s41598-018-26332-5.

Pernice, M., Raina, J.-B., Rädecker, N., Cárdenas, A., Pogoreutz, C. and Voolstra, C. (2019). Down to the bone: the role of overlooked endolithic microbiomes in reef coral health. *The ISME Journal*, 14, pp. 325 - 334. doi: 10.1038/s41396-019-0548-z.

Perry C, Larcombe P. Marginal and non-reef-building coral environments. *Coral Reefs.* 2003;22:427-432. doi:10.1007/s00338-003-0330-5

Pilly, S. S., Richardson, L. E., Turner, J. & Roche, R. (2021). Atoll-dependent variation in depth zonation of benthic

communities on remote reefs. *Marine Environmental Research*, 173, 105520.

Pilly, S. S., Roche, R., Lange, I. D., Perry, C. T., Mogg, A. O. M., Dawson, K. E. & Turner, J. R. (2024). Coral carbonate production across depth: homogenisation after bleaching?. *Coral Reefs*, 43, pp. 1803-1818.

Pires, C.P., Villela, L.B., Moura, R.L., Salomon, P.S. and Silva-Lima, A.W. (2025). Hidden microalgae diversity in reef systems: reanalysis of coral microbiomes reveals spatial patterns of coral-associated plastid communities in the Southwestern Atlantic Ocean (SWAO). *PeerJ*, 13.

Planes, S., Allemand, D., Agostini, S., Banaigs, B., Boissin, É., Boss, E., Bourdin, G., Bourdin, G., Bowler, C., Douville, E., Flores, J., Forcioli, D., Furla, P., Galand, P., Ghiglione, J., Gilson, E., Lombard, F., Moulin, C., Pesant, S., Poulain, J., Reynaud, S., Romac, S., Sullivan, M., Sunagawa, S., Thomas, O., Troublé, R., Vargas, C., Thurber, R. V., Voolstra, C., Wincker, P. and Zoccola, D. (2019). The Tara Pacific expedition—A pan-ecosystemic approach of the "-omics" complexity of coral reef holobionts across the Pacific Ocean. *PLoS Biology*, 17. doi: 10.1371/journal.pbio.3000483.

Pootakham, W., Mhuantong, W., Yoocha, T., Putchim, L. et al. (2017). High resolution profiling of coral-associated bacterial communities using full-length 16S rRNA sequence data from PacBio SMRT sequencing system. *Scientific Reports*, 7.

Price, D., Robert, K., Callaway, A., Lo Lacono, C., Hall, R. and Huvenne, V. (2019). Using 3D photogrammetry from ROV video to quantify cold-water coral reef structural complexity and investigate its influence on biodiversity and community assemblage. *Coral Reefs*, pp. 1-15. doi: 10.1007/s00338-019-01827-3.

Prioux, C., Ferrier-Pagès, C., Deter, J., Tignat-Perrier, R. et al. (2024). Insights into the occurrence of phylosymbiosis and co-phylogeny in the holobionts of octocorals from the Mediterranean Sea and Red Sea. *Animal Microbiome*, 6.

Raghukumar, S. (2017). The Coral Reef Ecosystem. In: *Fungi in Coastal and Oceanic Marine Ecosystems*. Springer, pp. 143-161.

Reverter, M., Helber, S., Rohde, S., De Goeij, J.M. and Schupp, P. (2021). Coral reef benthic community changes in the Anthropocene: Biogeographic heterogeneity, overlooked configurations, and methodology. *Global Change Biology*, 28(6), pp. 1956-1971.

Richardson, L. E., Graham, N. and Hoey, A. (2017). Cross-scale habitat structure driven by coral species composition on tropical reefs. *Scientific Reports*, 7. doi: 10.1038/s41598-017-08109-4.

Rocha, L.A., Pinheiro, H.T., Shepherd, B., Papastamatiou, Y.P., Luiz, O.J., Pyle, R.L. and Bongaerts, P., 2018. Mesophotic coral ecosystems are threatened and ecologically distinct from shallow water reefs. *Science*, *361*(6399), pp.281-284.

Russ, G., Rizzari, J., Abesamis, R. and Alcala, A. (2020). Coral cover a stronger driver of reef fish trophic biomass than fishing. *Ecological Applications*, 31. doi: 10.1002/eap.2224.

Shah SB. Coral Reef Ecosystem. *Heavy Metals in Scleractinian Corals.* 2021. doi:10.1007/978-3-030-73613-2_2

Shen, J.-W., Johnson, M. E., Fu, F., Wang, Y. & Jin, Y. (2018). Seasonal wind patterns influence the configuration and geomorphology of insular reef systems: Yongxing Island, Xisha Islands, China. *Geological Journal*, 53.

Sheppard C. 3. The architects of a reef. 2021. doi:10.1093/actrade/9780198869825.003.0003

Shinzato, C. and Yoshioka, Y. (2024). Genomic Data Reveal Diverse Biological Characteristics of Scleractinian Corals and Promote Effective Coral Reef Conservation. *Genome Biology and Evolution*, 16. doi: 10.1093/gbe/evae014.

Slattery, M. and Lesser, M.P. (2021). Gorgonians Are Foundation Species on Sponge-Dominated Mesophotic Coral Reefs in the Caribbean. *Frontiers in Marine Science*, 8.

Stephenson, N.P., Delahooke, K.M., Kenchington, C., Khan, T.M. et al. (2025). Community ecology dynamics on reefs in Fiji are dependent on soft coral density and depth. *bioRxiv*.

Stolarski, J. (2024). Three-dimensional micro- and nanostructural characteristics of the scleractinian coral skeleton: A biocalcification proxy. *Acta Palaeontologica Polonica, 48*.

Suggett, D., Goergen, E., Fraser, M., Hein, M.Y., Hoot, W., McLeod, I., Montoya-Maya, P.H., Moore, T., Ross, A.M. and Vardi, T., 2025. A user's guide to coral reef restoration terminologies.

Swanson, D.W., Bailey, H., Schumacher, B., Ferguson, M. and Vargas-Ángel, B., 2018. Ecosystem Sciences Division standard operating procedures: Data collection for rapid ecological assessment benthic surveys.

Syukra, R.A., Salihat, R.A. and Nuraini, M., 2025. Association of Coral Life Form with Megabenthos, Pasumpahan Island, Padang City. *Jurnal Biologi Tropis*, *25*(2), pp.1557-1565.

Tamir, R., Eyal, G., Kramer, N., Laverick, J. H. & Loya, Y. (2019). Light environment drives the shallow-to-mesophotic coral community transition. *Ecosphere*, 10(9).

Tavakoli-Kolour, P., Sinniger, F., Morita, M., Hazraty-Kari, S., Nakamura, T. & Harii, S. (2023). Plasticity of shallow reef corals across a depth gradient. *Marine Pollution Bulletin*, 197, 115792.

Turner, R., Richardson, L. E., Couch, C. S., Harvey, J. A. & Williams, G. J. (2025). Local human impacts interact with geography to drive benthic community depth zonation on contemporary coral reefs. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 292.

Van De Water, J., Voolstra, C.R., Rottier, C., Cocito, S. et al. (2017). Seasonal Stability in the Microbiomes of Temperate Gorgonians and the Red Coral Corallium rubrum Across the Mediterranean Sea. *Microbial Ecology*, 75, pp. 274-288.

Vanwonterghem, I. and Webster, N. (2020). Coral Reef Microorganisms in a Changing Climate. *iScience*, 23. doi: 10.1016/j.isci.2020.100972.

Voolstra, C.R., Raina, J.-B., Dörr, M., Cárdenas, A. et al. (2024). The coral microbiome in sickness, in health and in a changing world. *Nature Reviews Microbiology*, 22, pp. 460-475.

Wang, X., Zoccola, D., Liew, Y., Tambutté, É., Cui, G., Allemand, D., Tambutté, S. and Aranda, M. (2021). The Evolution of Calcification in Reef-Building Corals. *Molecular Biology and Evolution*, 38, pp. 3543 - 3555. doi: 10.1093/molbev/msab103.

Weber, L., González-Díaz, P., Armenteros, M. and Apprill, A. (2019). The coral ecosphere: A unique coral reef habitat that fosters coral–microbial interactions. *Limnology and Oceanography*, 64(1).

West, K. M., Stat, M., Harvey, E., Skepper, C., DiBattista, J., Richards, Z., Travers, M., Newman, S. and Bunce, M. (2020). eDNA metabarcoding survey reveals fine-scale coral reef community variation across a remote, tropical island ecosystem. *Molecular Ecology*, 29, pp. 1069 - 1086. doi: 10.1111/mec.15382.

Wiedenmann, J., D'Angelo, C., Mardones, M., Moore, S., Benkwitt, C. E., Graham, N. A., Hambach, B., Wilson, P., Vanstone, J., Eyal, G., Ben-Zvi, O., Loya, Y. and Genin, A. (2023). Reef-building corals farm and feed on their photosynthetic symbionts. *Nature*, 620, pp. 1018 - 1024. doi: 10.1038/s41586-023-06442-5.

Williams, G. J., Sandin, S., Zgliczynski, B., Fox, M., Gove, J., Rogers, J., Furby, K. A., Hartmann, A., Caldwell, Z., Price, N. & Smith, J. (2018). Biophysical drivers of coral trophic depth zonation. *Marine Biology*, 165.

Zapalski, M., Wrzołek, T., Skompski, S. & Berkowski, B. (2017). Deep in shadows, deep in time: the oldest mesophotic coral ecosystems from the Devonian of the Holy Cross Mountains (Poland). *Coral Reefs*, 36, pp. 847-860.

Zawada, K., Madin, J. S., Baird, A., Bridge, T. and Dornelas, M. (2019). Morphological traits can track coral reef responses to the Anthropocene. *Functional Ecology*. doi: 10.1111/1365-2435.13358.

Zhao, M., Zhang, H., Zhong, Y., Xu, X., Yan, H., Li, G., & Yan, W. (2021). Microstructural characteristics of the stony coral genus Acropora useful to coral reef paleoecology and modern conservation. Ecology and Evolution, 11, 3093 - 3109. https://doi.org/10.1002/ece3.7247

BAB 6
FAKTOR-FAKTOR YANG BERPERAN DALAM EKOSISTEM TERUMBU KARANG

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti pembelajaran materi "Faktor-Faktor yang Berperan dalam Ekosistem Terumbu Karang", peserta didik diharapkan mampu:

1. **Menjelaskan** konsep dan karakteristik ekosistem terumbu karang.
2. **Mengidentifikasi** faktor-faktor lingkungan yang berperan dalam kehidupan terumbu karang, seperti suhu, salinitas, cahaya, kedalaman, arus, kualitas air, dan ketersediaan nutrien.
3. **Menjelaskan** peran faktor biotik dan abiotik dalam mendukung pertumbuhan dan keberlangsungan ekosistem terumbu karang.
4. **Menganalisis** hubungan antara perubahan faktor lingkungan dengan kondisi dan kesehatan terumbu karang.
5. **Mengidentifikasi** berbagai aktivitas manusia yang dapat memengaruhi keseimbangan ekosistem terumbu karang.
6. **Menganalisis** dampak perubahan lingkungan terhadap keanekaragaman organisme yang hidup di ekosistem terumbu karang.
7. **Menyajikan** hasil pengamatan atau analisis mengenai faktor-faktor yang berperan dalam ekosistem terumbu karang dalam bentuk laporan, tabel, grafik, atau presentasi.
8. **Menunjukkan sikap peduli dan bertanggung jawab** terhadap kelestarian ekosistem terumbu karang melalui upaya menjaga kualitas lingkungan laut.

B. MATERI

6.1 Konsep Dasar Ekosistem Terumbu Karang

6.1.1 Pengertian Terumbu Karang

Terumbu karang (*coral reef*) adalah ekosistem bawah laut di perairan tropis yang dicirikan oleh keberadaan koral-koral pembangun terumbu (karang batu/hermatipik) yang menghasilkan kerangka kalsium karbonat ($CaCO_3$), bersama alga berkapur dan biota laut lain yang berasosiasi. Secara ekologis, terumbu karang merupakan struktur dasar lautan yang terbentuk dari deposit $CaCO_3$ hasil aktivitas hewan karang yang bersimbiosis dengan alga mikroskopis (*zooxanthellae*), sehingga mampu tumbuh menjadi formasi terumbu yang masif (Hermasyah & Febriani, 2020; Wikipedia, 2007).

Dalam literatur oseanografi, terumbu karang sering didefinisikan sebagai ekosistem laut tropis pada perairan dangkal, jernih, dan hangat (>20–22 °C), dengan komunitas yang didominasi karang keras penghasil kapur.

6.1.2 Karakteristik Ekosistem Terumbu Karang

Ekosistem terumbu karang memiliki karakteristik lingkungan yang khas dan relatif sempit, sehingga peka terhadap perubahan. Karakteristik utamanya meliputi:

1. Suhu: Pertumbuhan optimal pada suhu rata-rata tahunan 23–25 °C (kisaran ideal sering dilaporkan 25–29 °C); toleransi minimum ~18 °C dan maksimum hingga 36–40 °C.
2. Cahaya: Karang hermatipik memerlukan cahaya untuk fotosintesis zooxanthellae; pertumbuhan optimal pada zona dengan intensitas cahaya sekitar 15–20% dari permukaan, umumnya pada perairan dangkal dan jernih.
3. Salinitas: Kisaran optimal 30–36‰ (sering disebut 32–35‰); toleransi lebih luas 25–40‰, namun pertumbuhan terbaik pada salinitas stabil ~30–35‰.
4. Kedalaman dan kecerahan: Umumnya pada perairan dangkal dengan kecerahan tinggi (air jernih), karena penetrasi cahaya menentukan produktivitas primer melalui zooxanthellae.

5. Arus, gelombang, dan sedimentasi: Arus dan gelombang memengaruhi suplai nutrien dan oksigen serta bentuk pertumbuhan karang; sedimentasi tinggi dapat menutupi polip dan menghambat pertumbuhan.
6. Kimia perairan: pH dan saturasi karbonat yang memadai mendukung kalsifikasi; terumbu karang umumnya tumbuh baik pada perairan dengan kadar karbonat tinggi.

Karakteristik ini menjadikan terumbu karang sangat produktif namun rentan terhadap perubahan iklim, eutrofikasi, dan sedimentasi (Dewi et al., 2023).

6.1.3 Struktur Komunitas Terumbu Karang

Struktur komunitas terumbu karang mengacu pada susunan spasial dan fungsional biota dalam ekosistem terumbu, yang sering kali terbagi berdasarkan zona morfologi terumbu (reef crest, reef slope, lagoon, back reef) serta gradien substrat. Secara umum, struktur komunitas terumbu karang meliputi:

1. Komponen pembangun utama: Karang batu (Scleractinia) sebagai engineer ekosistem, bersama alga berkapur (mis. Halimeda, alga krustosa) yang ikut menyumbang deposisi $CaCO_3$.
2. Biota bentik lain: Mollusca, Crustacea, Echinodermata, Polychaeta, Porifera, dan Tunicata yang hidup di dasar terumbu dan berperan dalam jaring-jaring makanan serta siklus nutrien.
3. Komponen planktonik dan nektonik: Plankton (fitoplankton dan zooplankton) serta ikan-ikan terumbu yang memanfaatkan terumbu sebagai tempat mencari makan, pemijahan, dan perlindungan.
4. Zonasi komunitas: Komposisi jenis dan dominansi karang berubah sesuai zona (mis. Acropora sp. sering dominan di zona dangkal yang terpapar gelombang; karang masif lebih dominan di area dengan arus dan kekeruhan lebih tinggi) (Rusli et al., 2021).

Struktur komunitas ini bersifat dinamis dan dipengaruhi faktor fisik-kimia perairan, gangguan alami, dan tekanan antropogenik.

6.1.4 Keanekaragaman Organisme Terumbu Karang

Terumbu karang dikenal sebagai salah satu ekosistem dengan keanekaragaman hayati tertinggi di laut tropis, menyediakan habitat bagi ribuan spesies ikan, invertebrata, algae, dan mikroorganisme. Keanekaragaman organisme terumbu karang dapat dikelompokkan sebagai berikut (Dewi et al., 2023):

1. Karang (Cnidaria: Scleractinia): Ratusan spesies karang keras dan lunak, dengan genus seperti Acropora, Porites, Montipora, dan lainnya yang membentuk struktur tiga dimensi terumbu.
2. Ikan terumbu: Beragam famili ikan (mis. Chaetodontidae, Pomacentridae, Labridae) yang memanfaatkan terumbu untuk makan, berkembang biak, dan perlindungan; keanekaragaman ikan sering digunakan sebagai indikator kesehatan terumbu.
3. Invertebrata: Mollusca (kerang, siput), Crustacea (udang, kepiting), Echinodermata (bintang laut, bulu babi), Porifera (spons), dan cacing poliketa yang berperan dalam dekomposisi, filtrasi, dan siklus nutrien.
4. Algae dan tumbuhan laut: Alga makro (rumput laut) dan alga mikroskopis (termasuk zooxanthellae simbiotik) yang berkontribusi pada produktivitas primer dan stabilitas substrat.
5. Organisme lain: Penyu, hiu, pari, dan berbagai biota besar yang menggunakan terumbu sebagai area foraging dan migrasi.

Keanekaragaman ini menjadikan terumbu karang penting secara ekologis (penopang produktivitas perikanan, perlindungan pantai) dan ekonomis (perikanan, pariwisata).

6.2 Faktor Abiotik

Faktor abiotik merupakan komponen fisik-kimia perairan yang menentukan distribusi, pertumbuhan, dan kelangsungan hidup organisme terumbu karang. Perubahan parameter abiotik dapat memengaruhi proses fisiologis karang (fotosintesis zooxanthellae, respirasi, kalsifikasi) serta struktur komunitas terumbu secara keseluruhan.

6.2.1 Suhu Perairan

Suhu merupakan salah satu faktor lingkungan paling kritis bagi terumbu karang karena memengaruhi laju metabolisme, pertumbuhan, reproduksi, dan proses pengapuran (kalsifikasi). Suhu optimum untuk pertumbuhan karang berada pada kisaran 23–29 °C, dengan beberapa literatur menyebutkan 25–31 °C sebagai kisaran yang masih mendukung pertumbuhan. Karang umumnya tidak dapat bertahan pada suhu di bawah 18 °C, sementara suhu >30–32 °C dapat menyebabkan stres termal dan pemutihan karang (*coral bleaching*).

Secara global, sebaran terumbu karang dibatasi oleh perairan dengan suhu rata-rata tahunan >20 °C, sehingga terumbu karang dominan di wilayah tropis dan subtropis hangat. Penyimpangan suhu dari kisaran optimum dapat menurunkan laju fotosintesis zooxanthellae, meningkatkan respirasi, dan mengurangi deposisi $CaCO_3$, yang pada akhirnya menurunkan kesehatan terumbu (Yonar et al., 2021).

6.2.2 Intensitas dan Penetrasi Cahaya

Cahaya matahari merupakan sumber energi utama bagi proses fotosintesis zooxanthellae yang bersimbiosis dengan karang, sehingga intensitas dan penetrasi cahaya menjadi faktor pembatas utama pertumbuhan terumbu. Intensitas cahaya yang dibutuhkan zooxanthellae untuk berfotosintesis dilaporkan berkisar 50–90 $\mu E/m^2s$, dengan titik kompensasi cahaya pada kisaran 200–700 foot-candles (sekitar 2.150–7.535 lux) (Fuad et al., 2025).

Penetrasi cahaya ke kolom air dipengaruhi oleh kekeruhan, kekeruhan partikulat (TSS), dan kedalaman; semakin dalam perairan, intensitas cahaya yang mencapai dasar semakin berkurang. Zona kompensasi, di mana produksi primer sama

dengan respirasi, umumnya terjadi pada kedalaman dengan intensitas cahaya sekitar 15–20% dari permukaan. Penurunan intensitas cahaya akibat kekeruhan atau sedimentasi dapat menghambat fotosintesis zooxanthellae, menurunkan pasokan energi bagi karang, dan pada kondisi ekstrem memicu pemutihan karang.

6.2.3 Salinitas

Salinitas memengaruhi keseimbangan osmotik dan proses fisiologis organisme terumbu karang. Kisaran salinitas optimum bagi pertumbuhan karang adalah 30–36‰ (sering disebut 32–35‰), sementara karang masih dapat mentolerir salinitas dalam batas 25–40‰. Perairan dengan salinitas terlalu rendah (mis. akibat limpasan air tawar dari sungai atau hujan lebat) dapat menyebabkan stres osmotik, penurunan laju kalsifikasi, dan bahkan kematian karang.

Stabilitas salinitas juga penting; fluktuasi salinitas yang cepat dan ekstrem lebih berbahaya daripada nilai salinitas yang sedikit di luar optimum namun stabil.

6.2.4 Kedalaman Perairan

Kedalaman perairan berkaitan erat dengan penetrasi cahaya, tekanan hidrostatik, dan dinamika arus, sehingga memengaruhi distribusi vertikal terumbu karang. Terumbu karang umumnya tumbuh pada perairan dangkal (biasanya <30 m) di mana cahaya masih cukup untuk fotosintesis zooxanthellae. Pada kedalaman >30–40 m, intensitas cahaya sering kali terlalu rendah untuk mendukung pertumbuhan karang hermatipik secara optimal, meskipun beberapa jenis karang dapat ditemukan hingga kedalaman 50–60 m pada perairan sangat jernih (Yonar et al., 2021).

Kedalaman juga memengaruhi suhu, salinitas, dan paparan gelombang; terumbu di zona dangkal lebih terpapar fluktuasi suhu dan gelombang, sedangkan terumbu di zona lebih dalam lebih stabil tetapi mendapat cahaya lebih terbatas.

6.2.5 Kekeruhan dan Sedimentasi

Kekeruhan perairan, yang sering diukur sebagai nilai NTU atau konsentrasi *Total Suspended Solid* (TSS), menggambarkan jumlah partikel tersuspensi yang menghambat penetrasi cahaya. Kekeruhan tinggi mengurangi intensitas cahaya yang mencapai zooxanthellae, sehingga menurunkan laju fotosintesis dan pertumbuhan karang. Baku mutu kekeruhan yang layak bagi pertumbuhan terumbu karang dilaporkan <5 NTU.

Sedimentasi (laju pengendapan partikel ke dasar) memberikan dampak langsung dan tidak langsung terhadap terumbu karang:

1. Dampak langsung: Sedimen dapat menutupi permukaan karang, menyumbat polip, menghambat pengambilan makanan, dan meningkatkan energi yang dibutuhkan karang untuk membersihkan diri.
2. Dampak tidak langsung: Sedimentasi meningkatkan kekeruhan, mengurangi penetrasi cahaya, dan menghambat rekruitmen planula karang ke substrat.

Laju sedimentasi yang tinggi berkorelasi positif dengan penurunan tutupan karang hidup dan keanekaragaman spesies.

6.2.6 Arus dan Gelombang

Arus dan gelombang berperan dalam suplai nutrien, oksigen, dan larva, serta dalam membuang sisa metabolisme dan sedimen dari permukaan karang. Arus yang moderat meningkatkan produktivitas terumbu dengan membawa plankton dan nutrien, serta mencegah akumulasi sedimen. Namun, arus dan gelombang yang terlalu kuat dapat menyebabkan kerusakan fisik pada struktur terumbu dan fragmen karang.

Pola arus juga memengaruhi distribusi larva karang dan ikan, sehingga berdampak pada rekruitmen dan struktur komunitas terumbu. Di wilayah dengan arus kuat dan upwelling, produktivitas primer sering lebih tinggi karena suplai nutrien dari lapisan dalam (Riyantini et al., 2023).

6.2.7 Ketersediaan Oksigen

Oksigen terlarut (DO) diperlukan untuk respirasi karang, ikan, dan organisme lain dalam ekosistem terumbu. Konsentrasi DO yang mencukupi bagi pertumbuhan fitoplankton dan biota laut umumnya berkisar 1–6 mg/L, sementara perairan dengan DO ≥5 mg/L dianggap mendukung kehidupan biota terumbu karang.

Penurunan DO (hipoksia) dapat terjadi akibat dekomposisi bahan organik yang tinggi, eutrofikasi, atau stratifikasi perairan, dan berpotensi menyebabkan stres bahkan kematian massal organisme terumbu. DO juga berkorelasi dengan produktivitas primer; perairan dengan produktivitas tinggi cenderung memiliki fluktuasi DO harian yang lebih besar akibat fotosintesis dan respirasi.

6.2.8 Nutrien dan Produktivitas Perairan

Nutrien utama yang memengaruhi produktivitas perairan terumbu karang adalah nitrogen (dalam bentuk nitrat, nitrit, amonia) dan fosfat, yang dibutuhkan untuk sintesis klorofil dan pertumbuhan fitoplankton. Klorofil-a digunakan sebagai proksi biomassa fitoplankton dan indikator produktivitas primer; konsentrasi klorofil-a yang tinggi umumnya menunjukkan tingginya produktivitas primer akibat ketersediaan nutrien yang melimpah (Riyantini et al., 2023).

Perairan terumbu karang yang sehat cenderung bersifat oligotrofik (nutrien rendah) dengan klorofil-a rendah, karena kelebihan nutrien dapat memicu pertumbuhan algae makro yang bersaing dengan karang dan meningkatkan kekeruhan. Namun, produktivitas primer yang cukup tetap diperlukan untuk mendukung jaring-jaring makanan terumbu.

Korelasi antara nutrien (nitrat, fosfat, amonia) dan intensitas cahaya terhadap laju produktivitas primer telah dilaporkan signifikan, meskipun pola respons dapat bervariasi tergantung kondisi lokal.

6.2.9 Karbonat dan pH Perairan

Proses kalsifikasi karang (pembentukan kerangka $CaCO_3$) sangat bergantung pada kimia karbonat dan pH perairan. Karang

membangun kerangka terutama dalam bentuk aragonit, yang memerlukan ketersediaan ion karbonat (CO_3^{2-}) dan kondisi pH yang memadai (umumnya pH 7,8–8,5). Penurunan pH (asidifikasi laut) mengurangi saturasi aragonit dan menghambat kalsifikasi, sehingga memperlambat pertumbuhan terumbu dan meningkatkan kerapuhan struktur karang.

Perairan dengan kadar karbonat tinggi dan pH stabil mendukung laju pengapuran yang optimal, sementara perubahan kimiawi akibat peningkatan CO_2 atmosfer dan input asam dari daratan dapat mengganggu keseimbangan ini. Oleh karena itu, parameter karbonat (termasuk saturasi aragonit) dan pH menjadi indikator penting dalam menilai kerentanan terumbu karang terhadap perubahan iklim dan asidifikasi laut.

6.3 Faktor Biotik

Faktor biotik mencakup seluruh organisme hidup yang berinteraksi dalam ekosistem terumbu karang, mulai dari karang pembentuk terumbu, simbion mikroskopis, ikan, invertebrata, hingga mikroorganisme. Interaksi biotik ini menentukan struktur komunitas, aliran energi, siklus nutrien, dan ketahanan ekosistem terumbu terhadap gangguan alami maupun antropogenik.

Gambar 6.1. Terumbu Karang

6.3.1 Karang Pembentuk Terumbu

Karang pembentuk terumbu (*reef-building corals*) terutama berasal dari ordo Scleractinia (Anthozoa, Cnidaria) yang mampu menghasilkan kerangka kalsium karbonat ($CaCO_3$) dalam bentuk aragonit. Kelompok ini disebut karang hermatipik (*hermatypic coral*) karena peran utamanya dalam membangun struktur terumbu.

Karakteristik utama karang pembentuk terumbu meliputi:

1. Simbiosis dengan *zooxanthellae:* Sebagian besar karang hermatipik bersimbiosis dengan alga uniseluler dari genus *Symbiodinium* (*zooxanthellae*) yang hidup di jaringan gastrodermis polip (Purnomo et al., 2012).
2. Pertumbuhan dan morfologi beragam: Termasuk bentuk bercabang (mis. *Acropora* sp.), masif (mis. *Porites* sp.), meja, encrusting, dan sub-masif, yang memengaruhi kompleksitas habitat dan keanekaragaman biota terumbu.
3. Kontribusi terhadap deposisi $CaCO_3$: Melalui proses kalsifikasi yang dipercepat oleh hasil fotosintesis zooxanthellae, karang hermatipik menyumbang sebagian besar deposit kapur yang membentuk struktur terumbu.

Genus karang keras yang umum mendominasi terumbu karang Indonesia antara lain *Acropora*, *Porites*, *Montipora*, *Pocillopora*, dan *Stylophora*.

6.3.2 Zooxanthellae dan Simbiosis

Zooxanthellae adalah alga uniseluler mikroskopik dari kelompok Dinoflagellata (genus *Symbiodinium*) yang hidup bersimbiosis mutualisme dengan karang hermatipik dan beberapa invertebrata laut lain (anemon, moluska, tridacna). Simbiosis ini menjadi fondasi produktivitas dan pertumbuhan terumbu karang (Purnomo et al., 2012; Rembet, 2012).

Mekanisme simbiosis karang–zooxanthellae meliputi:

1. Transfer energi dan nutrien: Zooxanthellae menghasilkan senyawa organik (glukosa, asam amino, lipid) melalui fotosintesis, yang kemudian ditransfer ke jaringan karang; sekitar 90–95% hasil fotosintesis zooxanthellae dimanfaatkan oleh polip karang.

2. Suplai oksigen dan percepatan kalsifikasi: Oksigen hasil fotosintesis digunakan karang untuk respirasi, sementara peningkatan ketersediaan energi dan pengurangan CO_2 internal mendorong laju deposisi $CaCO_3$.
3. Perlindungan dan suplai nutrien bagi zooxanthellae: Karang menyediakan tempat perlindungan dari pemangsa, serta suplai CO_2 dan nutrien (nitrogen, fosfat) dari hasil metabolisme karang.

Gangguan terhadap simbiosis ini (mis. akibat stres suhu tinggi) dapat menyebabkan pemutihan karang (*coral bleaching*), yaitu pelepasan zooxanthellae dari jaringan karang yang berpotensi berujung pada kematian karang jika berlangsung lama.

6.3.3 Ikan Karang

Ikan karang merupakan komponen nektonik utama dalam ekosistem terumbu, dengan keanekaragaman spesies tinggi dan peran ekologi beragam (herbivor, karnivor, omnivor, planktivor). Famili ikan yang umum berasosiasi dengan terumbu karang meliputi Chaetodontidae (ikan kupu-kupu), Pomacentridae (ikan kepe-kepe), Labridae (ikan wrasse), Scaridae/Calotomidae (ikan kakatua), Acanthuridae (ikan surgeonfish), dan lain-lain.
Peran ekologi ikan karang meliputi:

1. Herbivori dan pengendalian algae: Ikan herbivor seperti surgeonfish dan parrotfish meng grazing algae makro yang bersaing dengan karang untuk ruang dan cahaya, sehingga membantu mempertahankan dominansi karang.
2. Predasi dan regulasi komunitas: Ikan karnivor mengontrol populasi invertebrata dan ikan kecil, menjaga keseimbangan jaring-jaring makanan.
3. Indikator kesehatan terumbu: Kelimpahan dan keanekaragaman ikan karang (terutama Chaetodontidae dan Pomacentridae) sering digunakan sebagai bioindikator kondisi terumbu.

Keberadaan terumbu karang yang sehat menyediakan ruang perlindungan dan tempat mencari makan bagi ikan karang,

sehingga meningkatkan keanekaragaman dan kelimpahan ikan di perairan tersebut.

6.3.4 Invertebrata

Invertebrata terumbu karang mencakup berbagai filum seperti Mollusca, Crustacea, Echinodermata, Porifera, Cnidaria (selain karang), Annelida, dan Tunicata. Kelompok ini memainkan peran penting dalam struktur dan fungsi ekosistem terumbu.

Beberapa kelompok invertebrata penting beserta perannya:

1. Mollusca: Kerang (termasuk kima raksasa *Tridacna* sp.), siput, dan nudibranch; beberapa bersimbiosis dengan zooxanthellae, sementara yang lain berperan sebagai filter feeder atau herbivor.
2. Crustacea: Udang, kepiting, lobster, dan krustasea kecil yang berasosiasi dengan karang; berperan dalam dekomposisi, pembersihan karang, dan sebagai mangsa bagi ikan dan invertebrata lain.
3. Echinodermata: Bintang laut, bulu babi (mis. *Diadema* sp.), dan teripang; bulu babi dan teripang berperan sebagai herbivor dan detritivor yang mengontrol algae dan bahan organik di dasar terumbu.
4. Porifera (spons): Filter feeder yang menyaring partikel organik dari air, berkontribusi pada siklus nutrien dan klarifikasi perairan.
5. Cnidaria lain: Anemon, karang lunak, dan gorgonian yang menambah kompleksitas habitat dan keanekaragaman struktural terumbu.

Beberapa invertebrata juga digunakan sebagai indikator kondisi terumbu dalam program pemantauan seperti Reef Check (mis. kelimpahan *Diadema*, kima, teripang, dan bintang laut mahkota duri).

6.3.5 Mikroorganisme

Mikroorganisme terumbu karang meliputi bakteri, archaea, fungi, protista, alga mikroskopis, dan virus yang membentuk mikrobioma karang. Mikrobioma ini berinteraksi

erat dengan jaringan karang dan zooxanthellae, serta berperan dalam berbagai fungsi fisiologis dan ekologis.
Peran utama mikroorganisme dalam ekosistem terumbu karang:

1. Siklus hara: Bakteri dan archaea terlibat dalam siklus nitrogen (nitrifikasi, denitrifikasi, fiksasi N_2), fosfor, dan karbon, sehingga mendukung ketersediaan nutrien bagi karang dan simbionnya.
2. Proteksi terhadap patogen: Mikroba komensal menghasilkan senyawa antimikroba dan bersaing dengan patogen, membantu melindungi karang dari penyakit.
3. Detoksifikasi dan adaptasi: Mikroorganisme membantu mendegradasi senyawa toksik dan berkontribusi pada respons adaptif karang terhadap perubahan lingkungan (mis. stres suhu, asidifikasi).
4. Struktur komunitas mikrobioma yang khas: Komunitas mikroba pada jaringan karang berbeda secara signifikan dari mikroba planktonik di air sekitarnya, dengan dominasi famili seperti Pseudomonadaceae, Moraxellaceae, dan Burkholderiaceae pada karang.

Komposisi mikrobioma karang dapat berubah sesuai kondisi lingkungan (suhu, cahaya, nutrien) dan status kesehatan karang, sehingga menjadi indikator potensial dalam pemantauan kesehatan terumbu.

6.3.6 Predator dan Herbivor

Predator Terumbu Karang

Predator utama terumbu karang adalah bintang laut mahkota duri (*Acanthaster planci*, Crown-of-Thorns Starfish/COTS), yang merupakan pemangsa polip karang keras (Scleractinia), terutama genus *Acropora* dan *Montipora*. COTS merupakan komponen alami ekosistem terumbu, namun peledakan populasinya dapat menyebabkan kerusakan masif (Houk, 2022).
Karakteristik dan dampak COTS:

1. Spesialisasi makanan: COTS dewasa adalah korallivora yang memakan polip karang dengan cara mengeluarkan lambung dan mencerna jaringan karang secara ekstraseluler.

2. Dampak kepadatan tinggi: Kepadatan >14 individu/1.000 m^2 dilaporkan memberikan dampak negatif signifikan terhadap tutupan karang hidup.
3. Peran ekologis dalam kondisi seimbang: Pada kepadatan normal, COTS membantu mengontrol karang yang tumbuh cepat (mis. *Acropora*), sehingga memberi ruang bagi karang masif yang tumbuh lebih lambat dan menjaga keanekaragaman karang.

Predator lain termasuk siput pemakan karang (*Drupella* sp., *Coralliophila* sp.) dan beberapa ikan karnivor yang memangsa invertebrata terumbu.

Herbivor Terumbu Karang

Herbivor terumbu karang terutama terdiri dari ikan (surgeonfish, parrotfish, rabbitfish) dan beberapa invertebrata (bulu babi *Diadema* sp., teripang). Peran ekologi herbivor meliputi:

1. Pengendalian algae makro: Grazing oleh herbivor mencegah dominasi algae yang dapat menutupi karang dan menghambat rekruitmen planula.
2. Pemeliharaan ruang untuk karang: Dengan mengurangi tutupan algae, herbivor membuka substrat untuk rekruitmen karang baru dan mempertahankan dominansi karang dalam ekosistem.
3. Siklus nutrien: Herbivor mengkonsumsi algae dan mengeluarkan nutrien dalam bentuk yang lebih tersedia bagi karang dan mikroorganisme.

Keseimbangan antara predator dan herbivor sangat penting untuk menjaga struktur komunitas terumbu yang sehat dan tahan terhadap gangguan.

6.4 Faktor Geomorfologi dan Hidrodinamika

Faktor geomorfologi dan hidrodinamika menentukan struktur fisik dasar perairan, pola aliran massa air, serta distribusi energi gelombang dan arus yang memengaruhi pertumbuhan, morfologi, dan ketahanan terumbu karang.

Pemahaman terhadap karakteristik geomorfologi dan hidrodinamika perairan terumbu penting untuk menilai produktivitas ekosistem, kerentanan terhadap gangguan, dan efektivitas strategi pengelolaan (Kumaat et al., 2012)

6.4.1 Bentuk dan Struktur Dasar Perairan

Bentuk dan struktur dasar perairan terumbu karang dicirikan oleh variasi topografi bentukan biogenik (hasil aktivitas organisme) yang menghasilkan zonasi geomorfologi khas. Secara umum, terumbu karang dapat diklasifikasikan menjadi tiga tipe utama berdasarkan morfologinya: terumbu karang tepi (*fringing reef*), terumbu karang penghalang (*barrier reef*), dan terumbu karang cincin (*atoll*).

Tipe terumbu karang:

1. Fringing reef (terumbu karang tepi): Tumbuh melekat pada pulau atau pantai benua, tanpa laguna yang dalam antara terumbu dan daratan; jika ada laguna, kondisinya dangkal. Tipe ini paling umum dijumpai dan berkembang di perairan dengan kedalaman tidak lebih dari 40 m.
2. Barrier reef (terumbu karang penghalang): Terletak beberapa ratus meter hingga beberapa kilometer dari pantai, dipisahkan oleh laguna yang dalam (40–70 m); contoh terkenal adalah Great Barrier Reef di Australia.
3. Atoll (terumbu karang cincin): Berbentuk cincin yang muncul dari perairan dalam, jauh dari daratan, dengan laguna di tengah; terbentuk melalui proses subsiden pulau vulkanik dan pertumbuhan terumbu ke atas.

Zonasi geomorfologi terumbu karang (pada penampang melintang) umumnya meliputi:

1. *Reef flat* (rataan terumbu): Zona datar di bagian atas terumbu yang sering terpapar saat surut terendah; menerima energi gelombang tinggi dan didominasi karang yang tahan terhadap gelombang.
2. *Reef crest* (puncak terumbu): Zona puncak terumbu yang paling menonjol dan menerima gempuran gelombang terbesar; berfungsi sebagai pelindung alami bagi zona di belakangnya.

3. *Reef slope / front reef* (lereng terumbu): Zona miring di sisi luar terumbu yang menghadap laut lepas; sering memiliki keanekaragaman karang tinggi dan gradien kedalaman curam.
4. *Back reef* / lagoon (terumbu belakang / laguna): Zona di belakang reef crest yang relatif terlindung dari gelombang besar, dengan energi rendah dan sering didominasi lamun, makrofita, atau endapan sedimen halus.

Struktur dasar perairan ini memengaruhi distribusi cahaya, sedimentasi, dan pola arus, sehingga menentukan zonasi komunitas karang dan biota terkait.

6.4.2 Arus Laut

Arus laut merupakan gerakan massa air yang dipengaruhi oleh angin, pasang surut, gradien densitas, dan topografi dasar perairan. Di perairan terumbu karang, arus berperan dalam suplai nutrien, oksigen, larva, serta pembuangan sisa metabolisme dan sedimen (Ariyanti et al., 2022)

Karakteristik arus di perairan terumbu karang:

1. Pola arus kompleks: Dipengaruhi oleh interaksi antara arus laut skala besar (mis. arus geostropik dan ageostropik) dengan topografi terumbu, garis pantai, dan fenomena pasang surut.
2. Upwelling dan downwelling: Di beberapa wilayah pesisir, fenomena upwelling (naiknya air dalam yang kaya nutrien) dan downwelling (turunnya massa air permukaan) memengaruhi produktivitas primer dan distribusi klorofil-a. Upwelling kuat dilaporkan di pesisir selatan Jawa, yang berpotensi meningkatkan produktivitas perikanan.
3. Arus pasang surut: Di teluk dan muara, pola arus sangat bergantung pada siklus pasang surut, yang memengaruhi sirkulasi dan distribusi larva serta nutrien.

Arus yang moderat meningkatkan kesehatan terumbu dengan membawa plankton dan nutrien, serta mencegah

akumulasi sedimen; namun arus yang terlalu kuat dapat menyebabkan kerusakan fisik pada struktur terumbu.

6.4.3 Gelombang

Gelombang merupakan faktor hidrodinamika utama yang menentukan energi mekanik yang diterima terumbu karang, terutama di zona reef crest dan reef flat. Energi gelombang memengaruhi morfologi karang, distribusi spesies, dan kemampuan terumbu sebagai pelindung alami pantai.

Peran gelombang dalam ekosistem terumbu karang:

1. Attenuasi energi gelombang: Struktur terumbu karang yang masif dan kompleks mampu meredam energi gelombang sebelum mencapai pantai, sehingga mengurangi risiko erosi dan abrasi.
2. Pembentukan morfologi karang: Gelombang tinggi di reef crest mendorong pertumbuhan karang dengan bentuk masif dan encrusting yang tahan terhadap gaya mekanik, sementara zona yang lebih terlindung (back reef) didominasi karang bercabang yang lebih rapuh.
3. Breaking wave dan reef flat: Gelombang yang pecah (*breaking wave*) di reef crest menghasilkan turbulensi dan aerasi yang meningkatkan suplai oksigen dan nutrien, namun juga berpotensi merusak karang jika intensitasnya berlebihan.

Parameter gelombang (tinggi, periode, arah) dan karakteristik struktur bawah air (panjang, kemiringan, kekasaran permukaan terumbu) menentukan besarnya disipasi energi gelombang yang terjadi.

6.4.4 Sirkulasi dan Pertukaran Massa Air

Sirkulasi dan pertukaran massa air (*water exchange*) di perairan terumbu karang mengacu pada proses pergerakan air masuk dan keluar dari sistem terumbu, yang memengaruhi waktu residensi (*residence time*), flushing rate, dan distribusi sifat fisika-kimia perairan.

Aspek penting sirkulasi dan pertukaran massa air:

1. Flushing rate dan waktu residensi: Flushing rate yang tinggi (pertukaran air cepat) mengurangi akumulasi polutan dan sedimen, serta menjaga kualitas air tetap optimal bagi karang. Sebaliknya, waktu residensi yang panjang dapat meningkatkan risiko eutrofikasi dan hipoksia.
2. Sirkulasi laguna dan back reef: Laguna dan zona back reef sering memiliki sirkulasi lebih terbatas dibandingkan reef front, sehingga lebih rentan terhadap akumulasi nutrien dan sedimen jika tidak ada mekanisme pertukaran air yang memadai (mis. melalui saluran pasang surut).
3. Interaksi arus–pasang surut–topografi: Sirkulasi perairan terumbu merupakan hasil interaksi kompleks antara arus laut, pasang surut, dan topografi dasar (termasuk keberadaan saluran, celah terumbu, dan bentuk laguna).

Sirkulasi yang baik mendukung suplai nutrien dan oksigen, pembuangan limbah metabolisme, serta dispersi larva karang dan ikan, sehingga berkontribusi pada produktivitas dan ketahanan ekosistem terumbu (Kushadiwijayanto et al., 2024).

6.5 Faktor Antropogenik

Faktor antropogenik mencakup seluruh dampak aktivitas manusia yang memengaruhi kesehatan, struktur, dan fungsi ekosistem terumbu karang, baik secara langsung maupun tidak langsung. Tekanan antropogenik telah menjadi pendorong utama degradasi terumbu karang global, sering kali berinteraksi dengan perubahan iklim dan faktor alami lainnya (Sattuang & Wulandari, 2025).

6.5.1 Pencemaran Laut

Pencemaran laut merupakan ancaman serius bagi terumbu karang, berasal dari berbagai sumber antropogenik seperti limbah domestik, industri, pertanian, dan sampah plastik. Dampak pencemaran terhadap terumbu karang bervariasi tergantung jenis polutan, konsentrasi, durasi paparan, dan kondisi oseanografi lokal.

Jenis dan dampak pencemaran laut terhadap terumbu karang:

1. Limbah domestik dan industri: Mengandung bahan organik, logam berat, dan senyawa toksik yang dapat mengganggu fisiologi karang, menurunkan kualitas air, dan meningkatkan risiko penyakit karang.
2. Limpasan nutrien (nitrogen dan fosfor): Berasal dari limbah pertanian (pupuk) dan domestik, menyebabkan eutrofikasi yang memicu ledakan populasi algae (*algal blooms*). Algae yang tumbuh berlebihan bersaing dengan karang untuk ruang dan cahaya, menurunkan ketersediaan oksigen, dan menghambat pertumbuhan terumbu.
3. Mikroplastik dan makroplastik: Partikel plastik dari makro hingga nano dapat menempel pada jaringan atau rangka karang, mengganggu performa makan, pertumbuhan kerangka, dan proses simbiosis dengan zooxanthellae. Mikroplastik juga meningkatkan risiko pemutihan (*bleaching*), nekrosis, dan penurunan kapasitas fotosintesis karang.
4. Tumpahan minyak dan polutan kimia: Dapat menutupi permukaan karang, menghambat pertukaran gas, dan menyebabkan stres fisiologis yang berujung pada kematian karang.

Pencemaran laut yang berkelanjutan menyebabkan degradasi terumbu karang secara signifikan di berbagai wilayah, dengan dampak yang bervariasi antar zona biogeografi tergantung faktor oseanografi dan tingkat tekanan lingkungan.

6.5.2 Penangkapan Ikan Destruktif

Penangkapan ikan destruktif (*destructive fishing*) merujuk pada praktik penangkapan ikan yang membawa dampak negatif bagi populasi biota dan ekosistem pesisir laut, termasuk penggunaan bahan peledak (bom ikan) dan racun (potasium sianida). Praktik ini masih marak di berbagai wilayah Indonesia, seperti Maluku Utara, Sulawesi Tenggara, dan Bali Barat.

Dampak penangkapan ikan destruktif terhadap terumbu karang:

1. Kerusakan fisik masif: Bom seukuran botol bir dapat merusak terumbu karang seluas 5 m^2 dalam sekali ledak; dalam satu kali pengeboman ikan, kerusakan dapat mencapai sekitar 500 m^2 terumbu karang. Ledakan bom menyebabkan terumbu karang terkoyak, terpecah, dan hancur secara struktural.
2. Kematian biota laut: Racun potasium sianida tidak hanya membunuh ikan target, tetapi juga menyebabkan kematian massal karang, lamun, dan biota laut lain di area penyemprotan. Karang yang terpapar racun potas mengalami pemutihan dan kematian akibat terganggunya simbiosis dengan zooxanthellae.
3. Kerusakan habitat pemijahan dan asuhan ikan: Penangkapan destruktif merusak *spawning* dan *nursery areas*, daerah migrasi, dan ruaya ikan, sehingga menurunkan produktivitas perikanan jangka panjang.
4. Dampak sosial-ekonomi: Selain kerusakan ekologis, praktik ini mengancam mata pencaharian nelayan tradisional dan keberlanjutan sumber daya perikanan.

Upaya penanggulangan mencakup penegakan hukum, pengawasan sumber daya kelautan dan perikanan (PSDKP), serta pemberdayaan masyarakat pesisir untuk beralih ke praktik penangkapan ikan yang ramah lingkungan.

6.5.3 Perubahan Tata Guna Lahan Pesisir

Perubahan tata guna lahan pesisir akibat aktivitas antropogenik (deforestasi, konversi lahan, pembangunan infrastruktur, pertambangan) meningkatkan sedimentasi dan pencemaran yang berdampak pada terumbu karang. Deforestasi mangrove dan vegetasi pesisir mengurangi kemampuan alami wilayah pesisir dalam menahan sedimentasi dan menyaring polutan sebelum masuk ke perairan laut.

Dampak perubahan tata guna lahan terhadap terumbu karang:

1. Peningkatan sedimentasi: Aktivitas konstruksi, pertambangan, dan pembukaan lahan meningkatkan erosi tanah dan limpasan sedimen ke perairan pesisir. Sedimentasi berlebihan menyebabkan kekeruhan tinggi, mengurangi penetrasi cahaya untuk fotosintesis zooxanthellae, dan menutupi permukaan karang.
2. Penurunan kualitas air: Limbah dari aktivitas daratan (pertanian, permukiman, industri) meningkatkan beban nutrien dan polutan kimia di perairan pesisir, memicu eutrofikasi dan stres pada karang.
3. Kerusakan habitat penyangga: Konversi mangrove dan lamun menjadi tambak, permukiman, atau infrastruktur mengurangi fungsi ekologis habitat tersebut sebagai pelindung terumbu karang dari sedimentasi dan gelombang.

Sedimentasi dan pencemaran dari daratan menjadi penyebab utama kerusakan terumbu karang di berbagai wilayah pesisir Indonesia, sering kali berinteraksi dengan praktik penangkapan ikan destruktif dan tekanan pariwisata.

6.5.4 Pariwisata dan Aktivitas Pesisir

Pariwisata bahari (snorkeling, diving, wisata kapal) merupakan sumber pendapatan penting bagi banyak wilayah pesisir, namun aktivitas ini juga berpotensi merusak terumbu karang jika tidak dikelola dengan baik. Destinasi wisata super prioritas nasional, seperti Labuan Bajo dan Taman Nasional Bali Barat, menghadapi tekanan meningkat akibat padatnya lalu lintas kapal wisata, aktivitas snorkeling dan diving, serta limbah domestik.

Dampak pariwisata dan aktivitas pesisir terhadap terumbu karang:

1. Kerusakan fisik langsung: Sentuhan langsung, menginjak, dan mematahkan karang oleh wisatawan snorkeling dan diving menyebabkan kerusakan struktur terumbu. Dampak aktivitas snorkeling dilaporkan mencapai 5,05% kerusakan

terumbu, sementara diving berlisensi memiliki dampak lebih rendah (2,36%) karena adanya panduan dan regulasi.
2. Jangkar kapal: Kapal wisata yang membuang jangkar di area karang tanpa tambatan dermaga berpotensi merusak terumbu karang secara signifikan (Wijaya & Prasita, 2024).
3. Sedimentasi dan pencemaran: Aktivitas pariwisata meningkatkan sedimentasi akibat konstruksi infrastruktur, serta pencemaran dari limbah domestik dan plastik yang terbawa arus dari daratan.
4. Tekanan akumulatif: Kombinasi antara kerusakan fisik, sedimentasi, dan pencemaran dari aktivitas pariwisata dapat menurunkan kesehatan terumbu karang secara keseluruhan, terutama di lokasi dengan keterpaparan tinggi dan tanpa batasan jumlah pengunjung.

Pengelolaan pariwisata berkelanjutan memerlukan penerapan daya dukung kawasan, edukasi wisatawan, penggunaan mooring buoy (pelampung tambat) alih-alih jangkar, serta pelibatan operator wisata dan masyarakat lokal dalam konservasi terumbu karang.

6.5.5 Perubahan Iklim

Perubahan iklim merupakan ancaman global terbesar bagi ekosistem terumbu karang, terutama melalui peningkatan suhu permukaan laut, pengasaman laut (asidifikasi), dan fenomena cuaca ekstrem. Terumbu karang sangat rentan terhadap perubahan iklim karena proses pemutihan (*bleaching*) dapat terjadi dengan cepat ketika suhu laut meningkat melebihi ambang batas toleransi karang (Hadiyanti et al., 2024).

Dampak perubahan iklim terhadap terumbu karang:

1. Pemutihan karang (*coral bleaching*): Terjadi ketika karang mengalami stres termal akibat peningkatan suhu laut 1–2 °C di atas rata-rata bulanan, menyebabkan karang mengeluarkan zooxanthellae dari jaringan dan berubah warna menjadi putih. Jika stres berlangsung lama, karang dapat mengalami kematian massal. Dunia saat ini sedang mengalami fenomena pemutihan karang global keempat, yang dipicu oleh kenaikan suhu laut akibat perubahan iklim.

2. Asidifikasi laut: Penyerapan karbon dioksida (CO_2) atmosfer oleh lautan menurunkan pH air laut dan mengurangi saturasi aragonit, sehingga menghambat proses kalsifikasi dan pertumbuhan kerangka karang.
3. Fenomena cuaca ekstrem: Badai dan siklon tropis yang semakin intens dapat menyebabkan kerusakan fisik pada struktur terumbu karang.
4. Interaksi dengan tekanan lokal: Polusi laut, sedimentasi, dan penangkapan ikan destruktif memperburuk dampak perubahan iklim dengan menurunkan ketahanan (resiliensi) terumbu karang terhadap stres termal dan asidifikasi.

Peningkatan suhu permukaan laut di atas 29 °C dilaporkan memicu pemutihan karang massal di berbagai wilayah, termasuk Indonesia. Mitigasi perubahan iklim global dan pengelolaan tekanan lokal secara terpadu menjadi kunci untuk mempertahankan ketahanan ekosistem terumbu karang.

6.6 Keterkaitan Faktor Lingkungan terhadap Stabilitas Terumbu Karang

Stabilitas ekosistem terumbu karang ditentukan oleh interaksi kompleks antara faktor abiotik, biotik, geomorfologi, hidrodinamika, dan tekanan antropogenik. Pemahaman terhadap keterkaitan faktor-faktor lingkungan ini penting untuk menilai kerentanan terumbu karang terhadap gangguan, kapasitas adaptasi, dan potensi pemulihan (resiliensi) ekosistem.

6.6.1 Faktor Pembatas

Faktor pembatas (*limiting factor*) adalah kondisi lingkungan yang mendekati atau melampaui ambang batas toleransi suatu organisme, sehingga membatasi pertumbuhan, reproduksi, atau kelangsungan hidupnya. Konsep faktor pembatas dalam ekologi perairan didasarkan pada Hukum Toleransi Shelford (*Shelford's Law of Tolerance*) yang menyatakan bahwa organisme mempunyai batas minimum dan maksimum ekologis yang merupakan batas atas dan batas bawah dari kisaran toleransi (Aini et al., 2013).

Faktor pembatas utama bagi terumbu karang:

1. Suhu: Suhu ideal untuk pertumbuhan karang berkisar 25–30 °C (sering disebut 23–29 °C), dengan toleransi maksimum hingga 36–40 °C. Suhu di luar kisaran optimum dapat menghambat fotosintesis zooxanthellae, metabolisme karang, dan proses kalsifikasi.
2. Cahaya: Intensitas dan penetrasi cahaya membatasi distribusi vertikal karang hermatipik karena zooxanthellae memerlukan cahaya untuk fotosintesis. Perairan keruh atau terlalu dalam mengurangi cahaya yang mencapai karang, sehingga membatasi pertumbuhan.
3. Salinitas: Salinitas ideal bagi pertumbuhan terumbu karang berkisar 30–36‰ (sering disebut 32–35‰), dengan toleransi 25–40‰ tergantung jenis dan letak geografis. Salinitas disebut faktor pembatas karena terumbu karang hanya mampu hidup pada rentang salinitas tertentu.
4. Kedalaman: Kedalaman perairan membatasi penetrasi cahaya, sehingga karang hermatipik umumnya tumbuh pada perairan dangkal (<30–40 m).
5. Sedimentasi dan kekeruhan: Sedimentasi tinggi dan kekeruhan membatasi pertumbuhan karang dengan mengurangi cahaya, menutupi polip, dan menghambat rekruitmen.
6. pH dan karbonat: pH dan saturasi karbonat membatasi proses kalsifikasi; penurunan pH (asidifikasi) menghambat pembentukan kerangka $CaCO_3$.
7. Arus dan sirkulasi air: Arus yang terlalu lemah atau terlalu kuat dapat membatasi suplai nutrien, oksigen, dan larva, serta meningkatkan akumulasi sedimen.

Faktor-faktor pembatas ini berinteraksi secara sinergis; misalnya, suhu tinggi yang dikombinasikan dengan salinitas rendah atau sedimentasi tinggi dapat memperparah stres pada karang.

6.6.2 Toleransi Ekologis Karang

Toleransi ekologis merujuk pada kemampuan karang untuk bertahan hidup dan berfungsi dalam kisaran kondisi

lingkungan tertentu, sesuai dengan Hukum Toleransi Shelford. Setiap spesies karang memiliki kisaran toleransi yang berbeda terhadap parameter lingkungan, yang menentukan distribusi dan dominansinya dalam ekosistem terumbu.

Kisaran toleransi ekologis karang terhadap parameter utama:

1. **Suhu**: Suhu optimum untuk pertumbuhan karang 23–25 °C, dengan toleransi terhadap fluktuasi suhu hingga 36–40 °C. Suhu tahunan rata-rata 23–25 °C dianggap optimal untuk pertumbuhan terumbu karang.
2. **Salinitas**: Terumbu karang memiliki toleransi terhadap perubahan salinitas berkisar 25–40 ppt, dengan pertumbuhan optimal pada salinitas 30–33‰ (sering disebut 32–35‰). Salinitas air laut daerah tropis rata-rata sekitar 35‰, dan binatang karang hidup subur pada salinitas 34–36%.
3. **pH**: Nilai pH ideal bagi kehidupan terumbu karang berkisar 7,8–8,5, dengan salinitas ideal 30–36%.
4. **Cahaya**: Karang hermatipik memerlukan intensitas cahaya yang cukup untuk fotosintesis zooxanthellae; penetrasi cahaya membatasi distribusi karang hingga kedalaman tertentu.
5. **Sedimentasi**: Karang memiliki toleransi terbatas terhadap sedimentasi; laju sedimentasi tinggi dapat menghambat pertumbuhan dan rekruitmen.

Toleransi ekologis karang bervariasi antar spesies dan lokasi geografis; karang di daerah dengan rezim suhu lebih bervariasi cenderung lebih tahan terhadap tekanan termal daripada karang di lingkungan yang kurang bervariasi.

6.6.3 Respons Terumbu terhadap Perubahan Lingkungan

Terumbu karang menunjukkan berbagai respons terhadap perubahan lingkungan, mulai dari respons fisiologis jangka pendek (aklimatisasi) hingga perubahan struktural komunitas jangka panjang (adaptasi). Respons ini ditentukan oleh intensitas, durasi, dan frekuensi gangguan, serta karakteristik ekologi komunitas terumbu setempat.

Jenis respons terumbu karang terhadap perubahan lingkungan:

1. **Respons fisiologis**: Peningkatan suhu laut 1–2 °C di atas rata-rata bulanan dapat menyebabkan stres termal dan pemutihan karang (*coral bleaching*), yaitu pelepasan zooxanthellae dari jaringan karang. Jika stres berlangsung singkat, karang dapat pulih; namun jika berkepanjangan, karang mengalami kematian.
2. **Perubahan struktur komunitas**: Gangguan berulang (mis. pemutihan massal, badai, penangkapan destruktif) dapat mengubah dominansi spesies karang, mengurangi keanekaragaman, dan meningkatkan tutupan makroalga. Kehadiran makroalga pada awal fase pemulihan dapat merusak jaringan karang, mencegah rekruitmen, dan menyebabkan kematian pasca pemukiman.
3. **Adaptasi dan aklimatisasi**: Populasi karang yang mengalami pemutihan selama peristiwa pemanasan besar (mis. 1998) dilaporkan telah beradaptasi dan/atau menyesuaikan diri dengan tekanan termal, sehingga menunjukkan kerentanan lebih rendah pada pemutihan berikutnya (mis. 2010). Karang di daerah dengan rezim suhu lebih bervariasi cenderung lebih tahan terhadap stres termal.
4. **Rekruitmen dan pemulihan**: Setelah gangguan, terumbu karang dapat pulih melalui rekruitmen larva karang yang menempel pada substrat dan tumbuh menjadi koloni dewasa. Tingkat rekruitmen karang merupakan salah satu mekanisme kunci yang memungkinkan terumbu karang melakukan pemulihan setelah terjadinya gangguan (Alam et al., 2021).

Respons terumbu terhadap perubahan lingkungan juga dipengaruhi oleh faktor lokal seperti kualitas air, ketersediaan substrat, dan tekanan antropogenik yang dapat mempercepat atau menghambat pemulihan.

6.6.4 Resiliensi Ekosistem Terumbu Karang

Resiliensi (*resilience*) ekosistem terumbu karang merupakan kemampuan ekosistem untuk menghadapi

(mengabsorbsi) gangguan dan membangun kembali sistem yang didominasi oleh karang. Resiliensi terumbu karang dapat dilihat melalui densitas rekruitmen karang anakan secara spasial maupun temporal, serta kemampuan ekosistem untuk pulih dengan cepat pada spesies pembentuk habitat (karang).

Faktor-faktor yang memengaruhi resiliensi terumbu karang:

1. Faktor intrinsik: Ditentukan oleh karakteristik ekologi komunitas terumbu karang tertentu, seperti kapasitas karang yang tersisa untuk menghasilkan larva yang melimpah dan/atau kuat, interaksi ekologis yang mendukung survivorship dan pertumbuhan rekruitmen, serta keberadaan genus karang yang resisten.
2. Faktor ekstrinsik: Meliputi kualitas air (suhu, TSS), tekanan gangguan (polusi, penangkapan destruktif, pariwisata), dan kondisi sosial-ekonomi masyarakat pesisir yang memengaruhi pengelolaan terumbu.
3. Indikator resiliensi utama: Enam indikator utama yang direkomendasikan untuk monitoring resiliensi adalah tutupan karang, rekruitmen karang, biomassa ikan herbivora, tutupan makroalga, suhu, dan TSS, dengan pendukung biomassa invertebrata herbivora serta prevalensi penyakit karang.
4. Kriteria resiliensi tinggi vs rendah: Ekosistem terumbu karang dengan tutupan *fleshy seaweed* (FS) <3%, tutupan pecahan karang (*rubble*) <60%, dan tutupan karang hidup >5% dianggap memiliki resiliensi tinggi; sebaliknya, FS >3%, *rubble* >60%, dan karang hidup <5% menunjukkan resiliensi rendah.

Studi kasus resiliensi:

1. Di pesisir Amed, Bali, pasca pemutihan karang 2010, komunitas karang keras mengalami pemulihan dengan peningkatan tutupan karang menjadi 49% pada 2013 dan penurunan makroalga menjadi 0,67%. Lokasi dengan resiliensi tertinggi (Lipah) direkomendasikan sebagai prioritas daerah kelola, sementara lokasi dengan resiliensi rendah (Jemeluk) memerlukan rehabilitasi terumbu buatan.

2. Di Perairan Siantan Selatan, sebagian besar lokasi memiliki resiliensi tinggi, kecuali satu stasiun dengan tutupan pecahan karang hingga 59,03% yang menyulitkan rekruitmen karang tumbuh stabil.

Resiliensi terumbu karang dapat ditingkatkan melalui pengelolaan berbasis ekosistem yang mengurangi tekanan lokal (polusi, penangkapan destruktif, pariwisata berlebihan) dan melindungi fungsi ekologis kunci (ikan herbivora, rekruitmen karang).

DAFTAR PUSTAKA

Aini, M., Suryanti, & Ain, C. (2013). Profil Kandungan Nitrat Dan Fosfat Pada polip Karang Acropora SP. di Pulau Menjangan Kecil Taman Nasional Karimunjawa. *Jurnal Management of Aquatic Resources*, *2*(4), 118–126. https://www.neliti.com/publications/190623/

Alam, B. F., Wijayanti, D. P., & Munasik, M. (2021). Rekruitmen Juvenil Karang Terumbu Pasca Tertabrak Kapal Di Perairan Ujung Gelam, Taman Nasional Karimunjawa. *Buletin Oseanografi Marina*, *11*(1), 41–50. https://doi.org/10.14710/buloma.v11i1.38199

Ariyanti, L. A. S., Novitasari, H., Insafitri, I., & Nugraha, W. A. (2022). Penutupan, Rugositas Terumbu Karang Dan Kelimpahan Ikan Karang Di Perairan Utara Bangkalan. *Jurnal Kelautan Tropis*, *25*(2), 202–212. https://doi.org/10.14710/jkt.v25i2.13769

Dewi, K. V. C., Pradesti, R., Nurlaela, S., Murnisari, Y., Suryanda, A., & Aulya, N. (2023). Dampak Perubahan Iklim Dan Aktivitas Manusia Terhadap Kerusakan Ekosistem Terumbu Karang Dan Biota Laut Di Sekitarnya. *Panthera : Jurnal Ilmiah Pendidikan Sains Dan Terapan*, *3*(1). https://doi.org/10.36312/pjipst.v3i1.138

Fuad, M., Ramdani, H., Rauf, A., Hamsiah, & Arwin. (2025). Strategi Pengelolaan Terumbu Karang Dengan Pendekatan Transplantasi di Pulau Samalona (coral reef management strategy using a transplantation approach in Samalona Island.). *Journal of Indonesian Tropical Fisheries (JOINT-FISH*, *8*(2), 2655–5883. https://doi.org/10.33096/joint-fish.v8i2.650

Hadiyanti, A. R., Wiyanto, D. B., & Darmendra, I. P. Y. (2024). Analisis Kesesuaian Dan Daya Dukung Kawasan Wisata Selam Dan snorkeling di Pantai Jemeluk, Karangasem, Bali. *Rekayasa*, *17*(3), 508–525. https://doi.org/10.21107/rekayasa.v17i3.27498

Hermasyah, & Febriani, F. (2020). Dampak Kerusakan Lingkungan Ekosistem Terumbu Karang. *Jurnal Kependudukan Dan Pembangunan Lingkungan*, *1*(3).

Houk, P. (2022, July). *Kawasan Konservasi Laut Berbasis Masyarakat yang Dikembangkan dengan Baik membuktikan Tangguh terhadap Wabah Bintang Laut Duri*. Reefresilience.Org. https://reefresilience.org/id/case-studies/micronesia-predator-outbreaks/

Kumaat, J., Haluan, J., Wiryawan, B., Hari Wisudo, S., & Monintja, D. R. (2012). Geometri Terumbu Pulau Kecil: Model Perencanaan Kawasan Konservasi Berbasis Perikanan Tangkap di Kabupaten Kepulauan Sitaro (reef geometri of small islands : A model conservation planning based on fisheries capture in Sitaro Archipelagic Regency). *Buletin PSP*, *20*(2), 155–165. https://www.neliti.com/publications/241827/

Kushadiwijayanto, A., Nurrahman, Y., Sofiana, M. S. J., & Safitri, I. (2024). Pasang Surut dan Arus di Muara Sungai Kapuas Sepok Pangkalan, Teluk Bengkolan, Kalimantan Barat. *MANFISH Journal Marine, Environment and Fisheries*, *5*(1), 43–47.

Purnomo, P. W., Soedharma, D., Zamani, N. P., & Sanusi, H. S. (2012). Zooxanthellae life model and massalization growth in the artificial environment waters. *Saintek Perikanan : Indonesian Journal of Fisheries Science and Technology*, *6*(1), 46–54. https://doi.org/10.14710/ijfst.6.1.46-54

Rembet, U. N. W. J. (2012). Simbiosis zooxanthellae Dan Karang Sebagai Indikator Kualitas ekosistem Terumbu Karang. *Jurnal Ilmiah PLATAX*, *1*(1), 37–44. https://doi.org/10.35800/jip.1.1.2012.502

Riyantini, I., Harahap, S. A., Kostaman, A. N., Aufaadhiyaa, P. A., MS, Y., Zallesa, S., & Faizal, I. (2023). Kelimpahan, Keanekaragaman Dan Distribusi Ikan Karang Dan megabentos serta Hubungannya Dengan Kondisi Terumbu Karang Dan Kualitas Perairan Di Gosong Pramuka, Taman Nasional Kepulauan Seribu. *Buletin*

Oseanografi Marina, *12*(2), 179–191. https://doi.org/10.14710/buloma.v12i2.48793

Rusli, M. A. R., Idiawati, N., & Nurrahman, Y. A. (2021). Condition of Coral Reef Community in Palembang Bay Lemukutan Island West Kalimantan. *Jurnal Laut Khatulistiwa*, *4*(3), 2614–8005.

Sattuang, H., & Wulandari, R. (2025). Dampak pencemaran laut terhadap distribusi Dan Adaptasi Terumbu Karang Di Berbagai Zona Biogeografi. *Jurnal Multidisiplin West Science*, *4*(02), 201–209. https://doi.org/10.58812/jmws.v4i02.2060

Wijaya, N. I., & Prasita, V. D. (2024). Dampak Aktivitas Wisata Bahari Terhadap Kondisi ekosistem Terumbu Karang di Gili Labak, Madura. *Samakia : Jurnal Ilmu Perikanan*, *15*(2), 163–171. https://doi.org/10.35316/jsapi.v15i2.5789

Wikipedia. (2007, July 28). *Terumbu karang*. Wikimedia Foundation, Inc. Wikipedia.Org. https://id.wikipedia.org/wiki/Terumbu_karang

Yonar, M., Luthfi, O., & Isdianto, A. (2021). Dinamika total suspended solid (TSS) di sekitar terumbu Karang Pantai Damas, Trenggalek Dynamics of total suspended solid (TSS) around coral reef Beach Damas, Trenggalek. *Journal of Marine and Coastal Science*, *10*(1).

BAB 7
FUNGSI DAN PERANAN PADANG LAMUN

A. CAPAIAN PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti pembelajaran materi "Fungsi dan Peranan Padang Lamun", peserta didik diharapkan mampu:

1. **Menjelaskan** pengertian dan karakteristik ekosistem padang lamun.
2. **Mengidentifikasi** fungsi dan peranan padang lamun bagi ekosistem pesisir dan organisme laut.
3. **Menjelaskan** peranan padang lamun sebagai habitat, tempat mencari makan, tempat pemijahan, dan tempat pembesaran berbagai organisme laut.
4. **Menganalisis** peranan padang lamun dalam menjaga kualitas perairan, mengurangi erosi, serta menyimpan karbon.
5. **Menganalisis** hubungan antara keberadaan padang lamun dengan keanekaragaman dan keseimbangan ekosistem pesisir.
6. **Mengidentifikasi** berbagai faktor yang dapat menyebabkan kerusakan ekosistem padang lamun.
7. **Menyajikan** hasil pengamatan atau analisis mengenai fungsi dan peranan padang lamun dalam bentuk laporan, tabel, gambar, atau presentasi.
8. **Menunjukkan sikap peduli dan bertanggung jawab** terhadap kelestarian padang lamun sebagai bagian penting dari ekosistem pesisir.

B. PENDAHULUAN

Wilayah pesisir merupakan kawasan yang memiliki tingkat produktivitas biologis tinggi dan menjadi tempat berlangsungnya berbagai proses ekologis yang penting bagi kehidupan organisme laut maupun manusia. Di kawasan ini

terdapat beberapa ekosistem utama yang saling berhubungan, seperti mangrove, terumbu karang dan padang lamun. Ekosistem tersebut sering disebut sebagai Trilogi Ekosistem Pesisir karena membentuk suatu kesatuan yang berperan dalam menjaga stabilitas lingkungan pesisir. Meskipun sering kali kurang mendapatkan perhatian dibandingkan mangrove dan terumbu karang, padang lamun memiliki kontribusi yang sangat besar dalam mendukung fungsi ekologis perairan pesisir.

Dalam konteks ekologi laut, padang lamun memiliki posisi strategis sebagai penghubung antara ekosistem mangrove dan terumbu karang. Banyak organisme laut memanfaatkan lebih dari satu ekosistem selama siklus hidupnya. Contohnya, beberapa jenis ikan menghabiskan fase juvenil di padang lamun sebelum berpindah ke terumbu karang saat dewasa. Keterkaitan ini menunjukkan bahwa kesehatan padang lamun dapat memengaruhi kondisi ekosistem pesisir lainnya. Kerusakan yang terjadi pada padang lamun berpotensi mengganggu aliran energi, siklus materi, serta keberlangsungan berbagai organisme yang bergantung pada ekosistem tersebut.

Pemahaman mengenai fungsi dan peranan padang lamun menjadi sangat penting dalam upaya pengelolaan wilayah pesisir yang berkelanjutan. Pengelolaan sumber daya pesisir yang hanya berfokus pada pemanfaatan tanpa mempertimbangkan fungsi ekologis padang lamun dapat menyebabkan penurunan kualitas lingkungan dan berkurangnya jasa ekosistem yang diberikan. Oleh karena itu, informasi mengenai berbagai fungsi dan peranan padang lamun perlu menjadi dasar dalam penyusunan kebijakan konservasi, pengelolaan sumber daya pesisir, serta perencanaan pembangunan di kawasan pantai dan laut.

Melalui pemahaman yang komprehensif mengenai fungsi dan peranan padang lamun, diharapkan mampu melihat ekosistem lamun bukan hanya sebagai kumpulan tumbuhan yang hidup di dasar perairan dangkal, tetapi juga sebagai sistem ekologis yang memiliki kontribusi besar terhadap keberlangsungan ekosistem pesisir dan kesejahteraan manusia. Pengetahuan tersebut juga diharapkan mampu meningkatkan kesadaran akan pentingnya menjaga dan melestarikan padang lamun sebagai salah satu aset ekologis yang bernilai tinggi.

C. MATERI

7.1 Padang Lamun Sebagai Penyedia Jasa Ekosistem

Padang lamun merupakan salah satu ekosistem yang memiliki kontribusi besar terhadap keberlangsungan kehidupan di wilayah pantai maupun laut dangkal. Ekosistem padang lamun disebut juga sebagai "jasa ekosistem" pesisir yang krusial. Keberadaannya tidak hanya memberikan manfaat bagi organisme yang hidup di dalamnya, tetapi juga mendukung berbagai aktivitas manusia yang bergantung pada sumber daya pesisir, baik secara langsung maupun tidak langsung dari keberadaan suatu ekosistem.

Konsep jasa ekosistem berkembang sebagai pendekatan untuk memahami bahwa ekosistem bukan hanya sekumpulan komponen biotik dan abiotik yang saling berinteraksi, tetapi juga memiliki nilai ekologis, sosial, dan ekonomi yang penting bagi kehidupan manusia. Dalam konteks padang lamun, jasa ekosistem mencakup berbagai fungsi yang mendukung produktivitas perairan, menjaga stabilitas lingkungan pesisir, hingga memberikan manfaat ekonomi dan budaya bagi masyarakat.

Secara umum, jasa ekosistem (*ecosystem services*) dapat dikelompokkan menjadi empat kategori, yaitu jasa penyedia (*provisioning services*), jasa pengaturan (*regulating services*), jasa pendukung (*supporting services*), dan jasa budaya (*cultural services*). Keempat kategori tersebut dapat saling melengkapi dan membentuk suatu sistem yang berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem pesisir sekaligus meningkatkan kesejahteraan masyarakat.

1. **Jasa Penyedia (*Provisioning Services*)**

   Jasa penyedia merupakan manfaat yang dapat dirasakan secara langsung oleh manusia dalam bentuk sumber daya atau produk yang dihasilkan oleh suatu ekosistem. Meskipun padang lamun tidak menghasilkan komoditas utama sebagaimana hutan atau lahan pertanian, keberadaannya berkontribusi besar dalam menyediakan berbagai sumber daya yang bernilai ekonomi.

Salah satu bentuk jasa penyedia yang paling nyata adalah sebagai pendukung sumber daya perikanan. Banyak spesies ikan, udang, kepiting, kerang, dan biota laut lainnya memanfaatkan padang lamun sebagai tempat mencari makan, berlindung, maupun menjalani fase awal kehidupannya. Tidak hanya menjadi tempat berlindung bagi berbagai organisme, daun lamun juga berfungsi sebagai media alami yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan komunitas epifit (Ghazi, 2022). Kondisi tersebut secara tidak langsung meningkatkan ketersediaan sumber daya perikanan yang menjadi mata pencaharian masyarakat pesisir. Dengan kata lain, hasil tangkapan nelayan tidak hanya bergantung pada populasi ikan di laut lepas, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi ekosistem padang lamun yang sehat.

Selain mendukung sektor perikanan, beberapa jenis lamun juga dimanfaatkan secara terbatas sebagai bahan baku kerajinan, kompos, maupun pakan ternak di beberapa daerah. Walaupun pemanfaatan tersebut belum berkembang secara luas, hal ini menunjukkan bahwa lamun memiliki potensi sebagai sumber daya hayati yang dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan apabila dikelola dengan baik.

Padang lamun juga menyimpan sumber daya genetik yang memiliki potensi untuk dikembangkan dalam berbagai bidang, seperti bioteknologi, farmasi, maupun penelitian. Berbagai senyawa bioaktif yang terkandung pada beberapa spesies lamun telah dilaporkan memiliki aktivitas antibakteri, antioksidan, hingga antijamur, sehingga membuka peluang pemanfaatan yang lebih luas di masa mendatang.

2. Jasa Pengaturan (*Regulating Services*)

Padang lamun berperan penting dalam mengatur berbagai proses alami yang menjaga stabilitas lingkungan pesisir. Peran ini dikenal sebagai jasa pengaturan, yaitu kemampuan ekosistem dalam mempertahankan kondisi

lingkungan agar tetap seimbang dan mendukung kehidupan berbagai organisme.

Salah satu jasa pengaturan yang paling dikenal adalah kemampuannya dalam menstabilkan sedimen dasar perairan. Sistem perakaran dan rimpang lamun mampu mengikat partikel sedimen sehingga mengurangi terjadinya pengadukan dasar perairan akibat gelombang maupun arus. Kondisi tersebut membantu menjaga kejernihan air dan menciptakan lingkungan yang lebih stabil bagi berbagai organisme laut (Merly and Pane, 2023)

Padang lamun juga berperan dalam meredam energi gelombang dan memperlambat kecepatan arus, sehingga mampu mengurangi risiko abrasi di wilayah pesisir. Hamparan daun lamun yang rapat bekerja layaknya penghalang alami yang menyerap sebagian energi gelombang sebelum mencapai garis pantai. Fungsi ini menjadi semakin penting sebagai pelindung pantai yang rentan mengalami erosi ataupun abrasi (Supriharyono, 2022).

Di samping itu, padang lamun memiliki kemampuan menyerap dan menyimpan karbon dalam jumlah yang relatif besar melalui proses fotosintesis. Karbon tersebut tidak hanya tersimpan pada jaringan tumbuhan, tetapi terakumulasi dalam sedimen pada waktu yang sangat lama. Kemampuan ini menjadikan padang lamun sebagai salah satu ekosistem *blue carbon* yang berperan dalam mengurangi konsentrasi karbon di atmosfer dan mendukung upaya mitigasi perubahan iklim.

3. **Jasa Pendukung (*Supporting Services*)**

Jasa pendukung merupakan fungsi dasar yang memungkinkan berbagai proses ekologis berlangsung secara berkesinambungan. Berbeda dengan jasa penyedia maupun jasa pengaturan yang manfaatnya dapat dirasakan secara langsung, jasa pendukung bekerja secara tidak langsung dengan menciptakan kondisi yang memungkinkan ekosistem tetap berfungsi secara optimal.

Padang lamun menyediakan ruang hidup berbagai kelompok organisme, mulai dari mikroorganisme, makrozoobenthos, hingga berbagai jenis ikan dan avertebrata laut. Komponen kehidupan yang ada pada lamun seperti daun, akar, rhizome mendukung keberlangsungan siklus hidup berbagai spesies, sehingga secara tidak langsung berkontribusi terhadap tingginya keanekaragaman hayati di kawasan pesisir (Supriharyono, 2022).

Selain sebagai habitat, lamun juga berperan dalam mendukung siklus unsur hara di lingkungan pesisir. Melalui proses penyerapan, penyimpanan, dan pelepasan kembali unsur hara, lamun membantu menjaga ketersediaan nutrien yang dibutuhkan oleh berbagai organisme perairan. Siklus tersebut menjadi salah satu fondasi penting dalam mempertahankan produktivitas ekosistem pesisir secara keseluruhan.

4. Jasa Budaya (*Cultural Services*)

Berbagai manfaat yang dimiliki padang lamun tidak hanya dilihat dari sisi ekologi dan ekonomi, padang lamun juga memiliki nilai sosial, budaya, serta pendidikan yang tidak kalah penting. Beberapa macam manfaat non material tersebut masuk ke dalam kategori jasa budaya, yaitu manfaat yang diperoleh manusia melalui pengalaman, pengetahuan, maupun nilai-nilai yang berkembang dari keberadaan suatu ekosistem.

Bagi masyarakat pesisir, padang lamun merupakan bagian dari lingkungan yang telah lama mendukung kehidupan sehari-hari. Pengetahuan lokal mengalami musim penangkapan ikan, keberadaan biota laut, hingga cara memanfaatkan sumber daya pesisir sering kali berkembang berdasarkan pengalaman masyarakat dalam berinteraksi dengan ekosistem lamun.

Di bidang pendidikan, padang lamun menjadi laboratorium alam yang sangat penting untuk mendukung kegiatan pembelajaran, praktikum, dan penelitian. Berbagai aspek mengenai ekologi, keanekaragaman hayati, konservasi, hingga perubahan iklim dapat dipelajari secara

langsung melalui pengamatan di ekosistem ini. Oleh karena itu, padang lamun memiliki peran strategis dalam meningkatkan pemahaman masyarakat terhadap pentingnya pelestarian lingkungan pesisir.

Kawasan padang lamun juga banyak dimanfaatkan sebagai bagian dari kegiatan ekowisata, seperti wisata edukasi, snorkeling, pengamatan biota laut, dan interpretasi lingkungan. Apabila dikelola secara berkelanjutan, kegiatan tersebut tidak hanya meningkatkan apresiasi masyarakat terhadap ekosistem pesisir, tetapi juga dapat memberikan manfaat ekonomi bagi masyarakat lokal tanpa mengurangi fungsi ekologisnya.

7.2 Peranan Padang Lamun Terhadap Stabilitas Ekosistem Pesisir

Wilayah pesisir merupakan ruang peralihan yang mempertemukan daratan dan lautan, sehingga karakter lingkungannya cenderung lebih dinamis dibandingkan dengan ekosistem lainnya. Perubahan pasang surut, variasi salinitas, gelombang, arus, hingga masuknya material dari daratan berlangsung hampir setiap hari dan membentuk kondisi lingkungan yang terus berubah. Dalam situasi yang demikian, keberadaan padang lamun berperan sebagai salah satu komponen yang membantu menjaga agar dinamika tersebut tetap berada dalam kisaran yang dapat ditoleransi oleh berbagai organisme pesisir.

Stabilitas suatu ekosistem tidak selalu ditandai oleh kondisi yang tetap atau tidak berubah. Sebaliknya, ekosistem yang stabil adalah ekosistem yang mampu menyesuaikan diri terhadap berbagai gangguan tanpa kehilangan fungsi utamanya. Padang lamun menunjukkan kemampuan tersebut melalui berbagai proses ekologis yang berlangsung secara alami. Hamparan daun, rimpang, dan sistem perakarannya bekerja secara terpadu dalam memengaruhi kondisi fisik maupun biologis perairan, sehingga tercipta lingkungan yang lebih kondusif bagi keberlangsungan berbagai bentuk kehidupan.

Salah satu bentuk kontribusi padang lamun terhadap stabilitas pesisir tampak dari kemampuannya menjaga

keseimbangan proses-proses ekologis yang berlangsung di perairan dangkal. Keberadan lamun membantu mengurangi perubahan lingkungan yang terjadi secara tiba-tiba, seperti meningkatnya kekeruhan akibat sedimen tersuspensi atau terganggunya substrat dasar karena energi gelombang yang tinggi. Kondisi tersebut memungkinkan berbagai organisme bentuk maupun nektonik tetap memperoleh habitat yang sesuai untuk menjalankan siklus hidupnya. Apabila fungsi penyangga ini berkurang akibat degradasi padang lamun, perubahan lingkungan cenderung berlangsung lebih cepat dan berdampak pada menurunnya kualitas ekosistem secara keseluruhan.

Peranan padang lamun juga tidak dapat dipisahkan dari keberadaan ekosistem pesisir lainnya. Mangrove, padang lamun, dan terumbu karang sering kali membentuk suatu bentang alam yang saling terhubung, baik melalui proses fisik maupun perpindahan organisme. Material yang berasal dari mangrove dapat menjadi sumber nutrien bagi padang lamun, sementara padang lamun berperan memperlambat aliran sedimen sehingga mampu menjaga kejernihan perairan yang dibutuhkan oleh terumbu karang. Di sisi lain, terumbu karang berfungsi sebagai pemecah gelombang alami yang mengurangi energi gelombang sebelum mencapai kawasan lamun. Hubungan timbal balik tersebut menunjukkan bahwa keberlanjutan masing-masing ekosistem sangat bergantung pada kondisi ekosistem lainnya.

Lingkungan yang stabil memungkinkan berbagai organisme memperoleh ruang hidup yang sesuai untuk bertumbuh, berkembang, dan bereproduksi. Hal ini, padang lamun juga berkontribusi dalam mempertahankan kualitas habitat. Keberadaan lamun menciptakan kondisi mikrohabit yang lebih terlindungi dibandingkan perairan terbuka, sehingga mampu mengurangi tekanan lingkungan yang dialami organisme, terutama pada fase-fase kehidupan yang masih rentan. Habitat yang berkualitas pada akhirnya tidak hanya mendukung kelangsungan hidup individu, tetapi juga menjaga keberlangsungan populasi serta komunitas organisme di kawasan pesisir.

Dalam perspektif ekologi, kemampuan suatu ekosistem untuk tetap menjalankan fungsi-fungsinya setelah mengalami

gangguan dikenal sebagai ketahanan ekosistem (*ecosystem resilience*). Padang lamun merupakan salah satu komponen yang memperkuat ketahanan tersebut melalui kemampuannya menjaga proses ekologis tetap berlangsung secara berkesinambungan. Meskipun ekosistem pesisir menghadapi tekanan alami maupun aktivitas manusia, keberadaan padang lamun dapat membantu mempercepat proses pemulihan lingkungan selama kondisi ekosistemnya masih terjaga. Namun, ketika luasan maupun kualitas padang lamun mengalami penurunan, kemampuan ekosistem pesisir untuk pulih dari gangguan juga akan ikut melemah.

7.3 Peranan Padang Lamun Dalam Mendukung Keanekaragaman Hayati

Keanekaragaman hayati di wilayah pesisir tidak hanya ditentukan oleh banyaknya spesies yang menghuni suatu kawasan, tetapi juga oleh tersedianya habitat yang mampu mendukung kebutuhan hidup setiap organisme. Dalam hal ini, padang lamun berperan sebagai salah satu lanskap bawah air yang menyediakan ruang bagi berbagai kelompok biota untuk menjalankan tahapan kehidupannya. Hamparan lamun menghadirkan lingkungan yang relatif stabil, kaya sumber daya, serta memiliki struktur vegetasi yang mampu menciptakan beragam kondisi mikrohabitat. Kombinasi inilah yang menjadikan padang lamun dihuni oleh organisme dari berbagai tingkat trofik dan kelompok taksonomi.

Keberadaan padang lamun sering diibaratkan sebagai sebuah "kota bawah laut" yang menyediakan berbagai fasilitas bagi penghuninya. Di antara helaian daun, rimpang, dan sedimen, berbagai organisme menemukan ruang untuk berlindung, mencari makan, tumbuh, maupun melewati fase-fase penting dalam siklus hidupnya. Semakin baik kondisi padang lamun, semakin besar pulang peluang berbagai spesies untuk memanfaatkan kawasan tersebut sesuai dengan kebutuhan ekologisnya. Oleh karena itu, tingginya keanekaragaman hayati pada padang lamun merupakan hasil dari kemampuan ekosistem ini dalam menyediakan lingkungan yang mendukung kehidupan berbagai organisme secara bersamaan.

Salah satu kelompok organisme yang paling banyak memanfaatkan padang lamun adalah ikan. Bagi banyak spesies ikan, hamparan lamun menawarkan kondisi perairan yang lebih tenang dibandingkan perairan terbuka, sehingga memberikan peluang yang lebih besar untuk menghemat energi selama beraktivitas. Struktur vegetasi lamun yang rapat juga menciptakan ruang-ruang kecil yang sesuai bagi ikan berukuran juvenil maupun spesies berukuran kecil untuk tumbuh sebelum bermigrasi ke habitat lain. Melimpahnya organisme kecil yang hidup di sekitar daun dan dasar padang lamun menjadikan kawasan ini sebagai tempat yang kaya akan sumber pakan. Tidak heran apabila padang lamun sering dijumpai sebagai kawasan dengan kepadatan ikan yang relatif tinggi, baik bagi spesies yang menetap maupun yang hanya memanfaatkan pada periode tertentu dalam siklus hidupnya.

Kelompok dari fillum Moluska juga menunjukkan sifat ketergantungan yang cukup besar terhadap keberadaan padang lamun. Berbagai jenis kerang, siput laut, maupun gastropoda memanfaatkan kawasan ini karena karakter substratnya cenderung lebih stabil dan kaya bahan organik. Endapan sedimen yang terlindungi oleh sistem perakaran lamun menyediakan lingkungan yang sesuai bagi organisme bentik untuk hidup dan berkembang. Bagi beberapa spesies, hamparan lamun juga menawarkan kondisi lingkungan yang lebih terlindung dari gangguan fisik, sehingga mendukung proses pertumbuhan dan reproduksi. Keberadaan padang lamun secara tidak langsung memperluas ruang hidup bagi berbagai jenis moluska yang memiliki kebutuhan habitat berbeda-beda.

Hal serupa juga dijumpai pada kelompok Krustasea, seperti udang dan kepiting yang banyak ditemukan di kawasan padang lamun. Bagi organisme ini, struktur vegetasi lamun membentuk ruang ekologis yang mendukung aktivitas sehari-hari, mulai dari mencari makan hingga menghindari tekanan lingkungan. Dasar perairan yang relatif stabil memudahkan berbagai spesies krustasea melakukan aktivitas menggali, berpindah tempat, maupun memanfaatkan sedimen sebagai bagian dari habitatnya. Tidak sedikit spesies yang menjadikan

padang lamun sebagai lokasi utama selama fase awal kehidupannya sebelum bermigrasi ke habitat lain.

Kelompok Echinodermata, seperti bulu babi, teripang, dan bintang laut, juga banyak dijumpai pada kawasan padang lamun. Kondisi dasar perairan yang kaya material organik serta tersedianya ruang yang cukup luas menjadikan habitat ini sesuai bagi berbagai spesies echinodermata dengan karakter hidup yang beragam. Bagi beberapa spesies, hamparan lamun menyediakan area yang mendukung aktivitas mencari makan, sedangkan bagi spesies lainnya kawasan ini memberikan kondisi lingkungan yang lebih stabil dibandingkan dasar perairan yang terbuka. Kehadiran kelompok Echinodermata turut memperkaya komposisi komunitas organisme bentik yang menjadi bagian penting dalam menjaga dinamika ekosistem pesisir.

Peranan padang lamun dalam mendukung keanekaragaman hayati tidak hanya terbatas pada kelompok avertebrata dan ikan, tetapi juga mencakup berbagai reptil laut, terutama penyu hijau (*Chelonia mydas*). Bagi spesies ini, padang lamun merupakan salah satu habitat yang memiliki arti penting karena menyediakan sumber pakan utama pada fase dewasa. Hamparan lamun yang luas memungkinkan penyu memperoleh kebutuhan energinya secara berkelanjutan, sehingga keberadaan padang lamun sering kali berkaitan erat dengan lokasi penting bagi populasi penyu di berbagai wilayah pesisir.

Beberapa mamalia laut, khususnya duyung (*Dugong dugon*), juga memperlihatkan hubungan yang sangat erat dengan ekosistem padang lamun. Duyung dikenal sebagai herbivora yang sebagian besar kebutuhan pakannya dipenuhi oleh berbagai jenis lamun. Oleh karena itu, distribusi duyung di alam sering kali mengikuti keberadaan padang lamun yang masih dalam kondisi baik. Bagi mamalia laut ini, padang lamun bukan sekadar tempat memperoleh makanan, tetapi juga bagian dari ruang hidup yang mendukung keberlangsungan populasinya. Kondisi tersebut menjadikan duyung sebagai salah satu spesies yang paling rentan terhadap degradasi ekosistem lamun.

Struktur vegetasi yang kompleks, kondisi perairan yang relatif lebih tenang, karakter substrat yang stabil, serta ketersediaan sumber daya menjadikan padang lamun sebagai

ruang ekologis yang mampu mengakomodasi kebutuhan hidup berbagai spesies dalam satu kawasan. Semakin beragam kondisi habitat yang tersedia, semakin besar pula peluang suatu kawasan untuk mendukung tingginya keanekaragaman hayati.

7.4 Peranan Padang Lamun Terhadap Perikanan

Keberhasilan suatu sektor perikanan tidak hanya ditentukan oleh kemampuan manusia dalam menangkap atau membudidayakan ikan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi ekosistem yang menopang kehidupan sumber daya tersebut. Di antara berbagai ekosistem pesisir, padang lamun menempati posisi yang cukup strategis karena menjadi salah satu ruang ekologis tempat berbagai spesies ikan memulai, menjalani, maupun melanjutkan fase kehidupannya. Oleh sebab itu, keberadaan padang lamun sesungguhnya memiliki keterkaitan yang erat dengan keberlangsungan produksi perikanan, meskipun hubungan tersebut sering kali tidak terlihat secara langsung.

Hubungan antara padang lamun dan sektor perikanan dapat dianalogikan seperti hubungan antara lahan yang subur dengan hasil panen. Hasil tangkapan nelayan yang melimpah bukan hanya ditentukan oleh kondisi perairan tempat ikan ditangkap, tetapi juga oleh kualitas habitat yang mendukung pertumbuhan populasi ikan sebelum mencapai ukuran yang layak dimanfaatkan. Dalam hal ini padang lamun berperan sebagai salah satu fondasi ekologis yang menjaga keberlangsungan sumber daya ikan di wilayah pesisir.

1. **Mendukung Ketersediaan Stok Ikan**

   Salah satu kontribusi utama padang lamun terhadap sektor perikanan adalah kemampuannya untuk mendukung ketersediaan stok ikan. Berbagai spesies ikan memanfaatkan kawasan padang lamun selama fase-fase tertentu dalam siklus hidupnya, terutama ketika masih berukuran kecil dan membutuhkan lingkungan yang relatif aman serta kaya akan sumber daya. Kondisi tersebut memberikan peluang yang lebih besar bagi ikan untuk tumbuh hingga mencapai ukuran dewasa, sehingga pada akhirnya dapat memperkuat populasi yang tersedia di alam.

Keberadaan padang lamun juga berkontribusi terhadap keberlangsungan proses rekrutmen populasi ikan. Semakin banyak individu muda yag mampu bertahan hidup hingga memasuki fase dewasa, semakin besar pula peluang suatu populasi untuk mempertahankan jumlah individunya dari waktu ke waktu. Dengan demikian, padang lamun tidak secara langsung menghasilkan ikan, tetapi menciptakan kondisi yang memungkinkan stok ikan tetap tersedia secara alami.

Dari sudut pandang pengelolaan sumber daya perikanan, fungsi ini memiliki arti yang sangat penting. Penurunan luas maupun kualitas padang lamun dapat mengurangi daya dukung habitat bagi berbagai spesies ikan, sehingga dalam jangka panjang berpotensi memengaruhi jumlah stok yang tersedia di perairan. Sebaliknya, jika ekosistem lamun terus terjaga maka akan memperkuat kemampuan kawasan dalam menopang produktivitas sumber daya ikan secara berkesinambungan.

2. **Mendukung Perikanan Tangkap**

Manfaat padang lamun juga tercermin pada aktivitas perikanan tangkap yang dilakukan masyarakat pesisir. Banyak kawasan penangkapan ikan berada tidak jauh dari hamparan lamun karena wilayah tersebut umumnya memiliki kelimpahan organisme yang lebih tinggi dibandingkan perairan terbuka. Kondisi lingkungan yang mendukung keberadaan berbagai jenis ikan menjadikan kawasan di sekitar padang lamun sebagai salah satu lokasi yang produktif bagi kegiatan penangkapan.

Bagi nelayan tradisional, keberadaan padang lamun sering kali menjadi penanda alami dalam menentukan daerah penangkapan. Pengalaman yang diwariskan secara turun-temurun membuat masyarakat pesisir memahami bahwa kawasan dengan kondisi lamun yang baik umumnya memiliki peluang lebih besar untuk memperoleh hasil tangkapan yang beragam. Pengetahuan lokal tersebut berkembang melalui pengamatan jangka panjang terhadap dinamika sumber daya pesisir, jauh sebelum konsep jasa ekosistem dikenal secara luas dalam kajian ilmiah.

Kontribusi padang lamun terhadap sektor perikanan tangkap tidak selalu tampak dalam bentuk peningkatan hasil tangkapan pada waktu tertentu. Peran yang lebih penting justru terletak pada kemampuannya menjaga kesinambungan ketersediaan sumber daya ikan sehingga aktivitas penangkapan dapat berlangsung dalam jangka panjang. Dengan kata lain, padang lamun berfungsi sebagai penyangga produktivitas perikanan yang bekerja secara perlahan, namun memberikan dampak yang berkelanjutan.

3. **Mendukung Kegiatan Budidaya Perikanan**

Padang lamun memiliki keterkaitan dengan kegiatan budidaya perikanan, khususnya yang berkembang di kawasan pesisir. Keberadaan padang lamun dapat membantu menjaga kualitas lingkungan perairan melalui berbagai proses alami, seperti menstabilkan sedimen, memperbaiki kejernihan air, serta menyerap sebagian unsur hara yang berlebih. Kondisi lingkungan yang lebih stabil tersebut secara tidak langsung mendukung kegiatan budidaya yang memerlukan kualitas perairan yang baik.

Di beberapa wilayah, kawasan padang lamun juga berada berdekatan dengan lokasi budidaya ikan, kerang, maupun rumput laut. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa keberadaan lamun dapat menjadi bagian dari sistem pesisir yang saling mendukung. Ekosistem yang masih terjaga mampu memberikan lingkungan yang lebih kondusif bagi berbagai aktivitas budidaya, sekaligus membantu mempertahankan keseimbangan ekologis kawasan sekitarnya.

Pemanfaatan kawasan pesisir untuk budidaya tetap perlu memperhatikan daya dukung lingkungan.

Pemanfaatan kawasan pesisir untuk budidaya tetap perlu memperhatikan daya dukung lingkungan. Pengembangan budidaya yang tidak terencana dapat berpotensi mengganggu keberadaan padang lamun, sehingga manfaat ekologis yang selama ini diperoleh justru dapat mengalami penurunan. Oleh karena itu, pengelolaan budidaya dan konservasi lamun perlu berjalan secara

seimbang agar keduanya dapat memberikan manfaat yang berkelanjutan.

4. **Menjaga Keberlanjutan Sumber Daya Ikan**

   Persepsi pengelolaan perikanan modern, memiliki tujuan utama bukan hanya untuk meningkatkan produksi, tetapi juga memastikan bahwa sumber daya ikan tetap tersedia bagi generasi mendatang. Upaya tersebut memerlukan dukungan ekosistem yang mampu mempertahankan proses-proses alami pembentuk populasi ikan. Padang lamun menjadi komponen yang berperan dalam menjaga proses tersebut tetap berlangsung secara berkesinambungan.

   Keberlanjutan sumber daya ikan tidak hanya bergantung pada pengaturan jumlah tangkapan atau penerapan kebijakan penangkapan yang bertanggung jawab. Di balik itu semua, terdapat kebutuhan untuk menjaga habitat-habitat penting yang menjadi bagian dari siklus hidup ikan. Ketika kualitas habitat menurun, kemampuan populasi untuk memperbarui dirinya juga akan ikut melemah. Sebaliknya, habitat yang tetap terpelihara akan memberikan peluang yang lebih besar bagi populasi ikan untuk bertahan menghadapi berbagai tekanan lingkungan maupun aktivitas pemanfaatan.

   Konservasi padang lamun tidak semata-mata berkaitan dengan perlindungan vegetasi laut, tetapi juga menjadi bagian dari strategi menjaga keberlanjutan sektor perikanan. Pelestarian padang lamun pada hakikatnya merupakan investasi terhadap keberlangsungan sumber daya ikan yang menopang kehidupan masyarakat pesisir, mendukung ketahanan pangan, serta memperkuat ekonomi kelautan dalam jangka panjang.

7.5 Peranan Padang Lamun Bagi Kehidupan Masyarakat Pesisir

Bagi masyarakat yang tinggal di wilayah pesisir, laut bukan hanya sekadar bentang alam yang membatasi daratan dengan samudera, melainkan ruang kehidupan yang menyediakan berbagai kebutuhan sehari-hari. Di dalam ruang

kehidupan tersebut, hamparan padang lamun sering kali tidak sepopuler dengan terumbu karang atau mangrove, padahal berbagai manfaat yang dihasilkan secara perlahan menopang aktivitas sosial dan ekonomi masyarakat pesisir. Kehadirannya membentuk hubungan yang erat antara fungsi ekologis dengan kesejahteraan manusia, sehingga menjaga kelestarian padang lamun sama halnya dengan menjaga keberlanjutan kehidupan masyarakat yang bergantung pada wilayah pesisir.

Manfaat padang lamun bagi masyarakat tidak selalu dapat diukur dari besarnya nilai ekonomi yang dihasilkan. Sebagian manfaat hadir dalam bentuk lingkungan yang tetap produktif, sumber daya yang tersedia secara berkelanjutan, hingga kesempatan belajar yang terus berkembang dari waktu ke waktu. Kontribusi padang lamun terhadap masyarakat pesisir perlu dipahami sebagai rangkaian manfaat yang saling berkaitan, mulai dari pemenuhan kebutuhan dasar hingga peningkatan kualitas hidup.

1. **Mendukung Ketahanan Pangan Masyarakat Pesisir**

   Ketahanan pangan di wilayah pesisir sangat dipengaruhi oleh kemampuan masyarakat dalam memperoleh sumber pangan yang cukup, aman, dan berkelanjutan. Dalam hal tersebut, padang lamun memiliki kontribusi yang tidak selalu terlihat secara langsung, tetapi sangat penting dalam menjaga ketersediaan bahan pangan yang berasal dari laut. Beberapa spesies lamun juga telah dimanfaatkan oleh masyarakat sebagai bahan pangan (Marhayana *et al.*, 2021). Pemanfaatan tersebut menunjukkan bahwa padang lamun tidak hanya memiliki nilai ekologis, tetapi juga memberikan manfaat langsung bagi kehidupan masyarakat pesisir.

   Berbagai jenis ikan, kerang, kepiting, udang, maupun biota laut lainnya yang dimanfaatkan sebagai sumber protein oleh masyarakat pesisir memiliki keterkaitan dengan keberadaan padang lamun selama siklus hidupnya. Di banyak daerah, hasil laut bukan hanya menjadi komoditas perdagangan, tetapi juga sumber pemenuhan kebutuhan gizi keluarga. Oleh karena itu, menjaga kesehatan ekosistem padang lamun secara tidak langsung turut menjaga

keberlangsungan sumber pangan yang menopang kehidupan masyarakat.

2. Menopang Mata Pencaharian Masyarakat

Bagi sebagian masyarakat pesisir, hubungan dengan padang lamun tidak berhenti pada aspek ekologis, tetapi juga terjalin melalui berbagai aktivitas ekonomi yang dilakukan setiap hari. Kawasan padang lamun menjadi bagian dari ruang kerja bagi nelayan tradisional, pencari kerang, pembudidaya, maupun masyarakat yang menggantungkan pendapatannya pada sumber daya pesisir.

Pendapatan yang diperoleh masyarakat sering kali berasal dari berbagai aktivitas yang memanfaatkan hasil laut yang keberadaannya didukung oleh ekosistem lamun. Dalam perspektif pembangunan pesisir, menjaga padang lamun berarti menjaga salah satu modal alam (*natural capital*) yang menopang aktivitas ekonomi masyarakat. Modal tersebut tidak hanya menghasilkan manfaat pada saat ini, tetapi juga menyediakan peluang bagi keberlanjutan mata pencaharian di masa mendatang.

3. Mendukung Pengembangan Wisata Bahari

Padang lamun mulai dipandang sebagai salah satu aset yang memiliki potensi untuk dikembangkan dalam kegiatan wisata bahari seiring meningkatnya minat masyarakat terhadap wisata berbasis alam. Kejernihan perairan, keunikan lanskap bawah laut, serta keberagaman biota yang menghuni kawasan lamun memberikan pengalaman yang berbeda bagi wisatawan yang ingin mengenal ekosistem pesisir secara lebih dekat.

Berbeda dengan wisata yang berorientasi pada eksploitasi sumber daya, pemanfaatan padang lamun melalui pendekatan ekowisata lebih menekankan pada pengalaman belajar, apresiasi terhadap alam, dan upaya menjaga kelestarian lingkungan. Kegiatan seperti snorkeling, jelajah pesisir, pengamatan dugong atau penyu di habitat alaminya, hingga wisata edukasi mengenai ekosistem pesisir merupakan contoh pemanfaatan yang dapat memberikan manfaat ekonomi sekaligus meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap pentingnya konservasi. Apabila

dikelola secara bijaksana, wisata bahari berbasis padang lamun ini dapat menjadi alternatif pengembangan ekonomi lokal yang tetap sejalan dengan prinsip keberlanjutan. Pendekatan ini memberikan kesempatan kepada masyarakat untuk memperoleh manfaat ekonomi tanpa mengurangi fungsi ekologis yang dimiliki oleh ekosistem tersebut.

5. **Sebagai Sarana Pendidikan dan Penelitian**

   Padang lamun juga memiliki nilai yang sangat penting sebagai ruang pembelajaran dan pengembangan ilmu pengetahuan. Kompleksitas proses ekologis yang berlangsung di dalamnya menjadikan ekosistem ini sebagai laboratorium alam yang memungkinkan berbagai fenomena lingkungan dipelajari secara langsung. Bagi mahasiswa, peneliti, maupun praktisi di bidang kelautan dan perikanan, padang lamun menyediakan kesempatan untuk memahami berbagai aspek ekologi pesisir, mulai dari struktur komunitas, dinamika lingkungan, konservasi, hingga pengelolaan sumber daya pesisir. Lebih dari sekadar lokasi penelitian, padang lamun juga berperan sebagai media untuk menumbuhkan kepedulian terhadap lingkungan. Pengalaman mengamati secara langsung kehidupan yang berkembang di antara hamparan lamun sering kali menghadirkan pemahaman bahwa keberlanjutan ekosistem pesisir bukan hanya tanggung jawab ilmuwan atau pemerintah, tetapi juga menjadi tanggung jawab seluruh lapisan masyarakat.

D. RANGKUMAN

Padang lamun merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki peranan strategis dalam menjaga keberlangsungan fungsi lingkungan sekaligus mendukung kehidupan manusia. Keberadaan padang lamun berperan dalam menjaga stabilitas ekosistem pesisir melalui kemampuannya dalam mempertahankan keseimbangan lingkungan; menghubungkan ekosistem mangrove, lamun, dan terumbu karang; menjaga kualitas habitat, serta meningkatkan ketahanan

ekosistem terhadap berbagai tekanan alami maupun aktivitas manusia.

Padang lamun menyediakan ruang hidup bagi berbagai kelompok organisme, seperti ikan, moluska, krustasea, echinodermata, reptil laut, dan mamalia laut. Karakter habitat yang kompleks serta kondisi lingkungan yang relatif stabil menjadikan ekosistem ini mampu mendukung tingginya keanekaragaman hayati di wilayah pesisir. Peranan padang lamun juga berkaitan erat dengan sektor perikanan melalui dukungannya terhadap ketersediaan stok ikan, keberlangsungan perikanan tangkap, kegiatan budidaya, serta pemanfaatan sumber daya ikan secara berkelanjutan. Di sisi lain, manfaat yang dihasilkan turut memperkuat ketahanan pangan masyarakat pesisir, menopang mata pencaharian, membuka peluang wisata bahari, serta menjadi sarana pendidikan dan penelitian.

E. EVALUASI / SOAL LATIHAN

1. Jelaskan mengapa padang lamun dikategorikan sebagai penyedia jasa ekosistem. Uraikan keempat jenis jasa ekosistem yang dihasilkan oleh padang lamun beserta masing-masing contoh manfaatnya.
2. Suatu desa di daerah pesisir mengalami penurunan luas padang lamun akibat aktivitas reklamasi. Menurut Anda, bagaimana kondisi tersebut dapat memengaruhi pada:
   a. keanekaragaman hayati;
   b. sektor perikanan;
   c. kehidupan masyarakat pesisir
3. Di suatu kawasan pesisir, direncanakan pembangunan pelabuhan yang akan mengonversi sekitar 40% kawasan padang lamun. Sebagai seorang calon pengelola sumber daya pesisir, analisislah dampak pembangunan tersebut terhadap stabilitas ekosistem pesisir, konektivitas mangrove-lamun-terumbu karang, dan keberlanjutan sumber daya ikan.

F. KUNCI JAWABAN DAN PEMBAHASAN

1. **Kunci Jawaban :**
   a. Jasa penyedia, contohnya menyediakan sumber daya ikan yang dimanfaatkan masyarakat
   b. Jasa pengaturan, contohnya menyerap karbon dan mengurangi abrasi pantai
   c. Jasa pendukung, contohnya menyediakan habitat bagi berbagai organisme laut
   d. Jasa budaya, contohnya mendukung kegiatan pendidikan, penelitian, dan ekowisata

   Pembahasan : Jasa ekosistem merupakan seluruh manfaat yang diperoleh manusia dari suatu ekosistem. Padang lamun memberikan manfaat ekologis, ekonomi, sosial, budaya sehingga keberadaannya memiliki nilai yang sangat penting bagi wilayah pesisir.
2. **Kunci Jawaban :**
   a. Keanekaragaman hayati : dapat menyebabkan habitat organisme menjadi berkurang, jumlah spesies dapat menurun, keseimbangan ekosistem dapat terganggu
   b. Sektor perikanan : dapat menyebabkan stok ikan menurun, hasil tangkapan nelayan berkurang, dan produktivitas perikanan menurun
   c. Kehidupan masyarakat pesisir : menyebabkan pendapatan masyarakat menurun, ketahanan pangan terganggu, dan peluang wisata menurun

   Pembahasan : Kerusakan padang lamun menyebabkan hilangnya berbagai fungsi ekologis yang akhirnya berdampak pada aspek sosial dan ekonomi masyarakat pesisir.
3. **Kunci Jawaban :** Dampak dari pembangunan pelabuhan tersebut dapat memengaruhi aspek berikut yaitu: stabilitas ekosistem yang kian menurun, sedimentasi meningkat, kualitas habitat menurun, konektivitas antar ekosistem menjadi terganggu, habitat ikan berkurang, stok ikan menurun dan keberlanjutan perikanan menjadi terganggu. **Pembahasan :** Padang lamun merupakan bagian dari sistem pesisir yang saling terhubung dengan mangrove dan terumbu karang. Hilangnya sebagian padang lamun akan memengaruhi fungsi keseluruhan ekosistem.

DAFTAR PUSTAKA

Ghazi, F. (2022) *Pentingnya Lamun untuk Ekosistem Laut*. Jakarta: Elementa Agro Lestari.

Marhayana, S. *et al.* (2021) *Pengelolaan dan Pola Pemanfaatan Ekosistem Lamun untuk Perikanan Baronang Lingkis Berkelanjutan*. Sleman: Deepublish.

Merly, S.L. and Pane, L.R. (2023) *Buku Ajar Ekosistem Padang Lamun*. Edited by E.D. Widyawaty. Malang: Penerbit Rena Cipta Mandiri.

Supriharyono (2022) *Ekosistem Padang Lamun; Potensi Sumberdaya Perairan yang Terabaikan*. Yogyakarta: Plantaxia.

BIODATA PENULIS

Ir. Darius Arkwright, S.T., M.T.
(Dosen)

Ir. Darius Arkwright, S.T., M.T. lahir di Loloda, Maluku Utara, pada 17 Oktober 1982. Ia menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kelautan, Universitas Hasanuddin, pada tahun 2005, kemudian memperoleh gelar Magister Teknik Kelautan dengan peminatan Teknik dan Manajemen Pantai dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2011. Pada tahun 2019, ia menyelesaikan Program Profesi Insinyur di Universitas Hasanuddin. Saat ini, ia berkarier sebagai dosen pada Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Ilmu Alam dan Teknologi Rekayasa, Universitas Halmahera, sekaligus menempuh pendidikan doktoral dalam bidang manajemen sumber daya pantai. Bidang kajian yang dikembangkan meliputi pengelolaan pesisir dan laut, teknik dan manajemen pantai, oseanografi terapan, ekologi spasial, konservasi biodiversitas laut, serta pengelolaan habitat spesies endemik. Penelitiannya dalam beberapa tahun terakhir berfokus pada ekobiologi dan distribusi spasial *Hemiscyllium halmahera*. Publikasi terbarunya mencakup artikel tentang ekobiologi dan distribusi spasial *H. halmahera* di *AACL Bioflux* (2025) dan kajian pemodelan hidrodinamika *Giant Sea Wall* di SIPIL (2026). Ia juga menulis sejumlah buku, antara lain *Numerik Mangrove* (2022), *Penelitian Operasional* (2023), *Ekologi Pesisir dan Laut* (2025), *Manajemen Sumber Daya Perairan* (2025),

Metode Penelitian Kualitatif: Konsep dan Aplikasi (2026), *Biologi Mangrove: Ekologi, Adaptasi dan Pengelolaan Berkelanjutan* (2026).

BIODATA PENULIS

Sri Herlina,S.PI.,M.P
(Dosen)

Penulis lahir di Samuda tanggal 13 Oktober 1982. Penulis dosen tetap Pada Program Studi Budidaya Ikan Politeknik Seruyan. Menyelesaikan Pendidikan sarjana perikanan S1 pada jurusan Budidaya Perairan Fakultas Pertanian Universitas Palangkaraya pada tahun 2005 dan Melanjutkan pendidikan Magister Perikanan S2 pada Jurusan Ilmu Perikan dalam bidang Penyakit Ikan di Universitas Lambung Mangkurat tahun 2011. Karya tulis yang sudah di hasilkan, baik berupa karya ilmiah di jurnal nasional terakreditasi maupun buku yang diterbitkan di Penerbit Get Press dan Pustaka Buku Nusantara.

BIODATA PENULIS

Siluh Putu Sri Dia Utari
(Dosen)

Siluh Putu Sri Dia Utari, S.Pi., M.Si. lahir di Tabanan, Bali 15 Januari 1990. Penulis menempuh S1 pada program Studi Teknologi Hasil Perairan, FPIK, IPB. Penulis melanjutkan pendidikan S2 pada program Studi Teknologi Hasil Perairan, FPIK, IPB (Institut Pertanian Bogor) pada tahun 2013-2016. Penulis telah mengabdikan dirinya sebagai pendidik di Politeknik KP Jembrana sejak tahun 2017 hingga sekarang. Kampus tempat penulis bekerja berada di bawah naungan Pusat Pendidikan, BPPSDM, Kementerian Kelautan dan Perikanan. Penulis juga aktif menulis artikel hasil penelitian yang telah dipublikasikan di beberapa jurnal ilmiah. Selain itu penulis juga aktif melaksanakan kegiatan pengabdian kepada masyarakat sejak tahun 2017 hingga sekarang. Penulis juga telah menghasilkan karya buku dengan judul Minyak Ikan Hasil Pengalengan dan Penepungan pada tahun 2024, Manajemen Industri Hasil Perikanan, Tata Kelola Ekonomi Laut, Pengantar Penginderaan Jauh Kelautan, Kewirausahaan Sosial dan Inovasi pada tahun 2025

BIODATA PENULIS

Philipus Uli Basa Hutabarat, S.Kel., M.Sc., PhD.
(Dosen)

Penulis lahir di Medan, pada tanggal 4 Maret 1992. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Magister Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman , Purwokerto. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Ilmu Kelautan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Diponegoro, pendidikan S2 pada *Department of Chemistry, Biology, and Marine Science, Graduate School of Science and Engineering* University of The Ryukyus, Okinawa, Jepang, dan pendidikan S3 pada *Department of Marine and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering,* University of The Ryukyus, Okinawa, Jepang. Penulis menyelesaikan Program S2 dan S3 dibawah Program *Coral Reefs Advanced Biology Systematic* (CRABS) dengan beasiswa *Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology* (MEXT) dari Pemerintah Jepang. Pada tahun 2016-2017, Penulis bekerja sebagai *Teaching Assistant* di *Graduate School of Science and Engineering,* University of The Ryukyus, Okinawa, Japan. Pada tahun 2017-2022, Penulis pernah bekerja sebagai *Research Assistant Assistant* di *Graduate School of Science and Engineering,* University of The Ryukyus, Okinawa, Japan

BIODATA PENULIS

(Avisha Fauziah Erzad, S.Pi., M.Pi.)
(Dosen)

Avisha Fauziah Erzad adalah seorang dosen tetap pada Program Studi S1 Akuakultur, Fakultas Pertanian, Universitas Tidar sejak tahun 2024 hingga sekarang. Menamatkan pendidikan S1 pada Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan pada tahun 2017 dan S2 pada Program Studi Manajemen Sumber Daya Perairan di Universitas Diponegoro pada tahun 2020. Penulis memiliki minat di bidang pengelolaan sumber daya perairan, khususnya terkait dengan lingkungan budidaya perikanan berkelanjutan dan ekologi perairan. Saat ini aktif dalam kegiatan akademik maupun pengembangan keilmuan. Selain mengajar, penulis juga terlibat dalam berbagai kegiatan penelitian yang berkaitan dengan lingkungan budidaya perikanan dan ekologi perairan, serta penulis juga melakukan kegiatan pengabdian kepada masyarakat. Karya ini disusun sebagai bentuk kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan serta upaya meningkatkan pemahaman masyarakat di bidang yang ditekuni.