

# BIOLOGI LAUT

LSO  
CREATIVE

STRUKTUR, FUNGSI, DAN  
EKOLOGI ORGANISME LAUT

Editor  
Siti Balqis Huriyah

Jacomina Tahapary, Juharni, Andika Putriningtias,  
Didha Andini Putri, Nurul Fatimah Yunita, Irwan  
Ismail, Nur Ikhsan, Ummu Salma, Iwan Kuncoro,  
Vidya Octaverina, Emmy Syafitri

# **BIOLOGI LAUT : STRUKTUR, FUNGSI, DAN EKOLOGI LAUT**

## **Penulis**

Jacomina Tahapary  
Juharni  
Andika Putriningtias  
Didha Andini Putri  
Nurul Fatimah Yunita  
Irwan Ismail  
Nur Ikhsan  
Ummu Salma  
Iwan Kuncoro  
Vidya Octaverina  
Emmy Syafitri

## **Editor**

Siti Balqis Huriyah



PENERBIT

**CV. LSO CREATIVE**

# **BIOLOGI LAUT : STRUKTUR, FUNGSI, DAN EKOLOGI LAUT**

**Penulis :** Jacomina Tahapary, Juharni, Andika Putriningtias, Didha Andini Putri, Nurul Fatimah Yunita, Iwan Kuncoro Ismail, Nur Ikhsan, Ummu Salma, Iwan, Vidya Octaverina, Emmy Syafitri

**Editor** : Siti Balqis Huriyah

**ISBN** : 978-634-04-5015-6 (PDF)

**Desain Sampul dan Tata Letak** : Siti Balqis Huriyah

**Penerbit** :

CV. LSO Creative

**Redaksi** :

Jl. Pendidikan (Pipa Sungai Lais) No. 42, Jakabaring Selatan, Kec. Rambutan, Kab. Banyuasin, Sumatera Selatan. 30967

Telp : 083141616988

Email : cvlsocreative@gmail.com

Website : <https://lsocreative.id/>

**Distributor** :

CV. LSO Creative

**Cetakan Pertama:** November 2025

**Hak Cipta dilindungi undang-undang**

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun dan dengan cara apapun, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya tanpa seizin tertulis dari penerbit.

## **PRAKATA**

Puji syukur kehadiran Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala rahmat dan karunia-Nya, akhirnya buku yang berjudul "Biologi Laut: Struktur, Fungsi, dan Ekologi Laut" dapat kami selesaikan. Buku ini hadir sebagai wujud kepedulian terhadap kondisi ekosistem laut yang kian menghadapi tekanan akibat aktivitas manusia dan perubahan iklim global.

Buku ini terdiri dari sebelas bab yang membahas berbagai aspek penting struktur, fungsi, dan ekologi laut, dimulai dari Laut sebagai Lingkungan Hidup, Keanekaragaman Organisme Laut, Struktur dan Anatomi Organisme Laut, Perilaku Organisme laut, Hubungan Antar Organisme, Adaptasi Organisme Laut terhadap Lingkungan, Perubahan Lingkungan Laut dan Dampaknya, hingga Biologi Laut di Masa Depan. Setiap bab ditulis dengan pendekatan ilmiah dan reflektif, menggabungkan hasil-hasil penelitian terkini dengan pandangan kritis terhadap tantangan dan peluang dalam pengelolaan sumber daya laut berkelanjutan.

Palembang, November 2025

Penulis

# DAFTAR ISI

<b>PRAKATA</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>iv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>Bab 1. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Pendahuluan .....	1
1.2. Biologi .....	2
1.3. Biologi Laut .....	5
1.4. Manfaat Biologi Laut .....	6
<b>Bab 2. LAUT SEBAGAI LINGKUNGAN HIDUP</b> .....	<b>12</b>
2.1. PENDAHULUAN .....	12
2.2. Pengertian Laut sebagai Ekosistem.....	13
2.3. Karakteristik Lingkungan Laut .....	14
2.4. Struktur Fisik Laut .....	40
<b>Bab 3. KEANEKARAGAMAN ORGANISME LAUT</b> .....	<b>41</b>
3.1. Pendahuluan .....	41
3.2. Tingkatan Keanekaragaman Hayati Laut.....	44
3.3. Sebaran Vertikal Dan Horizontal Organisme Laut .....	46
3.4. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Distribusi Organisme Laut	52
3.5. Teknologi dan Metode Penelitian Terbaru .....	54
<b>Bab 4. STRUKTUR DAN ANATOMI ORGANISME LAUT</b> .....	<b>58</b>
4.1. Pendahuluan .....	58
4.2. Tingkatan Struktur Kehidupan di Laut.....	59
4.3. Struktur Luar (Morfologi) Organisme Laut.....	61
4.4. Anatomi Internal dan Sistem Organ .....	68
4.5. Adaptasi Anatomi terhadap Lingkungan Laut .....	70
4.6. Signifikansi dan Aplikasi Ilmu Anatomi Laut .....	71
<b>Bab 5. FISILOGI ORGANISME LAUT</b> .....	<b>72</b>
5.1. Pendahuluan .....	72
5.2. Sistem Pernapasan .....	72

5.3. Sistem Pencernaan .....	75
5.4. Sirkulasi dan Sistem Peredaran Darah .....	77
<b>Bab 6. PERILAKU ORGANISME LAUT .....</b>	<b>79</b>
6.1. Pendahuluan .....	79
6.2. Teknologi dan Metode Pemantauan Perilaku .....	80
6.3. Perilaku Pencarian Makan dan Foraging .....	82
6.4. Efek Perubahan Lingkungan terhadap Perilaku Organisme.....	84
6.5. Perilaku Sosial, Komunikasi, dan Interaksi .....	86
6.6. Migrasi dan Orientasi .....	87
6.7. Pertahanan Diri, Kamufase, dan Strategi Hindar .....	89
6.8. Implikasi Konservasi dan Perilaku sebagai Indikator .....	90
6.9. Perilaku Reproduksi dan Parental Care .....	92
<b>Bab 7. EKOLOGI LAUT: HUBUNGAN ANTAR ORGANISME .....</b>	<b>95</b>
7.1. Pengertian dan Ruang Lingkup Ekologi Laut .....	96
7.2. Komponen Biotik dan Abiotik Ekosistem Laut.....	98
7.3. Jenis-Jenis Interaksi Antarorganisme di Laut .....	101
7.4. Rantai Makanan dan Jaring-Jaring Makanan Laut.....	106
<b>Bab 8. STRUKTUR DAN DINAMIKA EKOSISTEM LAUT .....</b>	<b>111</b>
8.1. Definisi dan Lingkup Ekosistem Laut.....	111
8.2. Komponen Ekosistem Laut.....	112
8.3. Tipe-Tipe Ekosistem Laut.....	118
8.4. Struktur dan Fungsi Ekosistem Laut.....	124
8.5. Dinamika Ekosistem Laut.....	129
8.6. Studi dan Pemodelan Ekosistem Laut.....	134
8.7. Sintesis Ekosistem Laut .....	139
<b>Bab 9. ADAPTASI ORGANISME LAUT TERHADAP LINGKUNGAN LAUT</b> .....	<b>141</b>
9.1. Kondisi Lingkungan Laut.....	141
9.2. Jenis-Jenis Adaptasi Organisme Laut .....	146
9.3. Adaptasi Terhadap Faktor Lingkungan.....	150
9.4. Studi Kasus Adaptasi Organisme Laut .....	153
9.5. Dampak Perubahan Lingkungan Terhadap Adaptasi .....	155

<b>Bab 10. PERUBAHAN LINGKUNGAN LAUT DAN DAMPAKNYA .....</b>	<b>156</b>
10.1. Pendahuluan .....	156
10.2. Konsep dan Karakteristik Lingkungan Laut .....	157
10.3. Proses Kunci dalam Kerangka Perubahan Lingkungan Laut .	159
10.4. Kerentanan Ekosistem Laut .....	161
10.5. Strategi Mitigasi dan Adaptasi .....	162
10.6. Implikasi Kebijakan dalam Perluasan Kawasan Konservasi Laut ( <i>Marine Protected Areas</i> ) .....	165
 <b>Bab 11. BIOLOGI LAUT DI MASA DEPAN.....</b>	<b>167</b>
11.1. Dampak Perubahan Iklim Global dan Adaptasi Organisme Laut .....	167
11.2. Bioteknologi Kelautan dan Sumber Daya Genetik Biru .....	169
11.3. Ekologi Laut dalam Perspektif 'Satu Kesehatan' ( <i>One Health</i> )	172
11.4. Penerapan Teknologi Digital dan Pengelolaan Berbasis Data	175
11.5. Konservasi Laut Inovatif dan Ekonomi Biru Berkelanjutan ...	177
 <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>182</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>225</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Perkembangan zaman kuno dan era explorasi biologi laut ....	3
Tabel 1.2. Era modern dan perkembangan biologi laut .....	4
Tabel 8. 1. Perkiraan Komposisi Nutrien Organisme Laut .....	114
Tabel 8. 2. Efisiensi Transfer Energi pada Berbagai Jenis Ekosistem Laut .....	126
Tabel 8. 3. Jumlah Spesies Laut per Kelompok Taksonomi Utama .....	127
Tabel 8. 4. Dampak Fenomena Iklim Global terhadap Ekosistem Laut .....	132
Tabel 8. 5. Contoh Model Spasial Ekosistem Laut .....	138

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Ekosistem Laut .....	14
Gambar 2.2. Sifat fisik Air laut .....	14
Gambar 2.3. Gelombang laut .....	23
Gambar 2.4. Pasang Surut air laut .....	24
Gambar 2.5. Proses pertukaran Karbon dioksida dalam laut.....	26
Gambar 2.6. Pertukaran Gas dala laut .....	27
Gambar 2.7. Proses daur Nitrogen dan Fosfor dalam perairan laut .....	28
Gambar 2.8. fitoplankton berperan dalam siklus karbon .....	31
Gambar 2.9. Zooplankton.....	32
Gambar 2.10. Ikan laut.....	33
Gambar 2.11. Jenis moluska .....	34
Gambar 2.12. Mamalia laut .....	35
Gambar 2.13. Terumbu karang .....	35
Gambar 2.14. Mangrove .....	38
Gambar 5.1. Sistem pernapasan pada ikan.....	75
Gambar 5.2. Sistem pencernaan ikan .....	76
Gambar 5.3. Sistem sirkulasi pada Ikan .....	77
Gambar 5.4. Sistem sirkulasi pada mamalia .....	78
Gambar 7.1. Interaksi Antar Makhluk Hidup di Ekosistem Laut .....	97
Gambar 7.2. Faktor biotik dan abiotik yang mengatur ekosistem laut..	99
Gambar 7.3. Terumbu karang yang berwarna warni .....	101
Gambar 7.4. Simbiosis komensalisme antara ikan remora dan hiu ...	102
Gambar 7.5. Sea lamprey yang menempel pada ikan .....	103
Gambar 7.6. Terumbu karang yang awalnya mati (bleaching).....	104
Gambar 7.7. Ilustrasi rantai makanan di laut.....	106
Gambar 7.8. Ilustrasi jaring-jaring makanan di laut.....	108
Gambar 8.1. Piramida trofik dalam ekosistem laut.....	116
Gambar 8.2. Skema penyimpanan dan siklus karbon biru .....	117
Gambar 8.3. Pneumatofor (akar napas) pada mangrove .....	121
Gambar 8.4. Struktur morfologi lamun (seagrass) .....	122
Gambar 8.5. Struktur anatomi polip karang dan kerangka kapurnya..	123
Gambar 8.6. Tahapan pembentukan terumbu karang.....	124
Gambar 8.7. Skema proses upwelling di perairan pesisir .....	131
Gambar 8.8. Skema konseptual pemodelan ekosistem laut .....	135

# Bab 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Pendahuluan

Lautan Adalah badan air asin yang luas, dikelilingi sebagian atau seluruhnya oleh daratan dan saling terhubung membentuk samudera global di bumi. Laut memengaruhi iklim, siklus air, karbon, dan nitrogen serta menjadi habitat kehidupan di laut. Seperti halnya di Indonesia yang memiliki luasan perairan dengan keanekaragaman sumber daya yang tinggi.

Lautan penuh dengan organisme yang beragam, saling bergantung dalam ekosistem. Secara garis besar, dibagi menjadi 3 (tiga) kelompok utama berdasarkan cara hidupnya, yakni:

1. **Plankton.** Plankton merupakan organisme kecil yang terapung di laut, pasif, dan dibawa oleh arus laut. Plankton sendiri terdiri dari fitoplankton dan zooplankton. Fitoplankton merupakan plankton tumbuhan mikro seperti diatom dan alga yang memproduksi oksigen lewat proses fotosintesis. Sedangkan zooplankton merupakan hewan kecil seperti larva ikan, copepoda, dan organisme lain yang menjadi makanan dasar dalam rantai makanan di laut.
2. **Nekton.** Nekton merupakan hewan aktif yang berenang bebas di kolom air. Contohnya Adalah ikan, cumi-cumi, gurita, paus, penyu, dan mamalia laut seperti lumba-lumba. Mereka merupakan predator atau konsumen tingkat tinggi.
3. **Bentos.** Bentos merupakan organisme yang hidup di dasar laut. Pada dasar laut organisme tersebut menempel, merayap atau menggali. Termasuk tumbuhan seperti rumput laut, hewan seperti kerrang, siput, Bintang laut, bulu babi, terumbu

karang, dan fauna dalam seperti ikan abyssal atau cacing tabung.

4. Selain itu terdapat pula mikroba (bakteri dan virus) yang vital untuk siklus nutrisi.

Di Indonesia biodiversitas ini mencapai 80% spesies global, namun spesies tersebut terancam polusi dan perubahan iklim. Biodiversitas laut di Indonesia sangat tinggi, biodiversitas tersebut terbagi atas:

1. Spesies ikan. Terdapat sekitar 4.782 spesies ikan asli yang tersebar di seluruh perairan Indonesia.
2. Terumbu karang. Ekosistem terumbu karang memiliki 300 – 500 jenis karang (terluas dan terbanyak di dunia).
3. Biota lainnya. Terdapat ratusan jenis mangrove, puluhan jenis lamun, lebih dari 2.500 spesies moluska (kerrang-kerangan) dan 1.500 spesies krustasea (kepiting, udang dan lain sebagainya).

## **1.2. Biologi**

Biologi adalah ilmu yang mempelajari kehidupan dan makhluk hidup, termasuk struktur, fungsi, pertumbuhan, evolusi, penyebaran dan taksonominya. Secara harafiah istilah "biologi" berasal dari bahasa Yunani: *bios* (hidup) dan *logos* (ilmu atau studi). Objek kajiannya meliputi segala sesuatu yang berkaitan dengan kehidupan, mulai dari mikro organisme, tumbuhan, hewan, hingga manusia. Dalam perkembangan ilmu dan teknologi, bidang kajian ilmu biologi kini mengalami perkembangan secara pesat sehingga menjadi cabang ilmu biologi besar, dan kini menjadi konsentrasi dalam ilmu pengetahuan dan kepakaran dalam dunia ilmu pengetahuan.

Beberapa percabangan ilmu biologi yang diklasifikasikan secara umum menjadi zoologi (ilmu tentang hewan) dan botani (ilmu tentang tumbuhan), namun juga mencakup studi tentang mikro organisme seperti mikrobiologi dan virologi, serta bidang lain seperti genetika, ekologi, anatomi, dan paleontologi. Cabang-cabang ini mempelajari aspek-aspek spesifik dari kehidupan, mulai dari struktur tubuh hingga

perilaku dan hubungan antar organisme. Namun dalam perkembangannya untuk spesifikasi percabangan ilmu biologi dalam kajian yang mempelajari hubungan dan perilaku antar organisme dan lingkungannya biologi Laut menjadi salah satu pecabangan ilmu pengetahuan yang cukup berkembang pesat dan kini menjadi salah satu tarket bagi dunia perikanan dan ilmu kelautan. Namun biologi laut sendiri sudah dimulai sejak zaman Yunani kuno dengan Bapak Aristoteles yang mengamati dan mengkatalogkan 180 spesies hewan laut. Studi mengenai biologi laut ini berkembang pesat selama era eksplorasi dengan tokoh seperti Kapten James Cook dan Charles Darwin yang mengumpulkan spesimen dan membuat observasi penting (Marine Life, 2025). Perkembangan selanjutnya dipelopori oleh Ekspedisi Challenger pada abad ke-19, yang membuktikan keberadaan kehidupan di laut dalam dan memicu penelitian ilmiah modern yang lebih canggih hingga saat ini.

Tabel 1.1. Perkembangan zaman kuno dan era explorasi biologi laut

<b>Zaman Kuno</b>	<b>Era Eksplorasi (abad ke-18 dan ke-19)</b>
<b>Aristoteles:</b> Disebut sebagai bapak biologi kelautan karena mengkatalogkan 180 spesies hewan laut dan memahami konsep seperti mamalia laut dan perkembangbiakan yang berbeda (ovipar dan vivipar).	<b>Kapten James Cook:</b> Melakukan pelayaran luas untuk memetakan perairan dunia dan mencatat deskripsi tumbuhan dan hewan laut.
<b>Edward Forbes:</b> Mengajukan "hipotesis azoik" pada tahun 1843, menyatakan bahwa tidak ada kehidupan yang dapat ditemukan di kedalaman laut yang sangat dalam, sebuah gagasan yang kemudian terbukti salah	<b>Charles Darwin:</b> Berperan sebagai naturalis dalam ekspedisi HMS Beagle dan mempelajari spesimen laut yang membantunya mengembangkan teori evolusi

Tabel 1.2. Era modern dan perkembangan biologi laut

<p>Era modern dan perkembangan selanjutnya</p>	<p><b>Ekspedisi Challenger (1872-1876):</b> Dipimpin oleh Charles Wyville Thomson, ekspedisi ini membuktikan salah hipotesis azoik dengan menemukan 4.717 spesies baru dan memberikan dasar bagi oseanografi modern.</p> <p><b>Pendirian institusi penelitian:</b> Stasiun penelitian permanen untuk perikanan didirikan, yang pertama di Woods Hole, Massachusetts, AS pada tahun 1885, yang kemudian menjadi <i>Marine Biological Laboratory</i>.</p> <p><b>Perkembangan teknologi:</b> Evolusi peralatan eksplorasi seperti sonar dan wahana kendali jarak jauh (ROV) telah merevolusi cara para ilmuwan mempelajari kehidupan laut.</p> <p><b>Biologi kelautan modern:</b> Saat ini, bidang ini mencakup studi tentang berbagai subdisiplin, dari skala mikro hingga skala besar, dan berperan penting dalam konservasi sumber daya laut serta pemahaman tentang dampak perubahan iklim.</p>
--	--

### 1.3. Biologi Laut

Biologi laut adalah cabang ilmu biologi yang mempelajari tentang kehidupan dan organisme di perairan laut seperti samudera, muara, dan lahan basah. Fokusnya pada adaptasi, interaksi ekosistem, distribusi, evolusi, serta dampak lingkungan terhadap biota laut mulai dari mikroskopis seperti plankton hingga paus. Biologi laut merupakan ilmu yang krusial di Indonesia karena biodiversitas di laut Indonesia yang luas.

Biodiversitas laut di Indonesia Adalah yang tertinggi di dunia, dengan kekayaan hayati yang luar biasa di wilayah 70% lautan. Data biodiversitas laut di Indonesia yakni:

1. Spesies ikan laut. Spesies ikan laut di Indonesia sekitar 4.782 spesies asli, termasuk 3.478 yang terdata hingga 2022 (Mongabay, 2020).
2. Terumbu karang. Terumbu karang di Indonesia terdapat 300 – 500 jenis yang menjadikan Indonesia sebagai pemilik terluas dan terbanyak di dunia (Alamsyah, 2024).
3. Krustasea laut. Terdapat 1.869 spesies (3.12%) seperti udang dan kepiting (Rahayu et al., 2017)
4. Cnidaria (termasuk karang dan ubur-ubur) yang terdapat sejumlah 1.159 spesies (Rahmadina dan Ananda, 2018)
5. Biota lainnya. Total hampir 8.500 biota laut, ratusan jenis mangrove, puluhan lamun, lebih dari 2.500 moluska (kerang, siput), ditambah habitat penyu (Mujiono dan Isnaningsih, 2022).

Cara mempelajari biologi laut dapat dilakukan dengan pendekatan gabungan teori, praktik, dan teknologi. Berikut garis besar Langkah garis besarnya, terutama yang relevan dengan biodiversitas lautnya yang kaya.

1. Studi lapangan dan observasi. Mempelajari biologi laut dapat dilakukan dengan melakukan studi lapangan dan observasi. Dilakukan dengan metode pengamatan, hipotesis, uji, dan analisis data.
2. Alat dan teknologi. Penggunaan instrument modern seperti drone bawah air, remote operated vehicle (ROV), sonar, atau

AI untuk mapping habitat. Di laboratorium, menggunakan Analisa DNA spesies,

3. Penelitian dan sumber belajar.

#### **1.4. Manfaat Biologi Laut**

Manfaat biologi laut sangat luas, mencakup keberlanjutan lingkungan, ketahanan pangan melalui perikanan, pengembangan ekonomi biru, serta perlindungan spesies dan ekosistem. Studi ini membantu dalam pemahaman ekosistem laut, pengelolaan sumber daya, pengembangan obat-obatan, energi terbarukan, dan pencegahan penyakit pada ikan.

Biologi laut juga bermanfaat dalam beberapa aspek seperti keberlanjutan lingkungan, dalam hal membantu dalam mengatasi masalah lingkungan seperti polusi, perubahan iklim, dan degradasi habitat. Manfaat bagi lingkungan lainnya adalah mengembangkan solusi untuk pemulihan terumbu karang menerapkan bioremediasi untuk membersihkan tumpahan minyak dengan menggunakan bakteri. Dalam hal keberlanjutan lingkungan, biologi laut merupakan suatu hal penting karena menjaga keseimbangan ekosistem laut seperti pengendalian populasi dan rantai makanan.

Mikroorganisme laut berperan dalam proses fotosintesis, yang menghasilkan oksigen dan menyerap karbondioksida. Mikroorganisme laut terutama fitoplankton berperan besar dalam fotosintesis yang menghasilkan oksigen dan mengurangi karbondioksida. Mereka menangkap energi matahari lewat pigmen klorofil untuk mengubah air dan karbondioksida menjadi glukosa, sambil melepaskan oksigen sebagai produk sampingan. Proses ini berlangsung di zona eufotik laut yang mendapat cukup Cahaya. Fitoplankton menghasilkan sekitar 50 – 80% oksigen atmosfer bumi dan menyerap banyak karbondioksida, membantu mengurangi efek gas rumah kaca. Selain itu, Ketika mikroorganisme ini mati, karbon yang mereka serap terbawa ke dasar laut, disimpan dalam sedimen, yang mendukung pengaturan iklim secara alami. Jadi mikroorganisme laut adalah kunci dalam menjaga

keseimbangan oksigen dan karbon, sangat vital untuk keberlanjutan lingkungan dan manusia.

Organisme laut membantu menjaga kestabilan terumbu karang dan habitat lain yang melindungi daratan dari erosi. Organisme laut seperti karang keras membentuk terumbu karang yang jadi pelindung alami Pantai. Terumbu ini meredam gelombang laut sehingga mengurangi erosi daratan. Organisme lain seperti lamun dan mangrove juga membantu menstabilkan sedimen dan tanah di pesisir dengan akarnya yang kuat. Selain itu, keberagaman hayati di habitat ini mendukung ekosistem yang sehat, menjaga keseimbangan lingkungan laut dan pesisir. Jadi organisme laut itu seperti perisai alami yang menjaga pantai tetap aman dari kerusakan dan erosi.

Keberadaan spesies laut yang sehat mendukung sumber daya perikanan yang berkelanjutan, karena:

1. Menjaga rantai makanan tetap seimbang, sehingga populasi ikan tidak berlebih atau punah.
2. Spesies predator dan mangsa saling mengontrol agar stok ikan tetap stabil
3. Keanekaragaman tinggi menjadikan ekosistem lebih tahan terhadap gangguan, seperti perubahan cuaca atau polusi.
4. Spesies reproduksi yang sehat menjamin regenerasi stok ikan untuk tangkapan masa depan.

Dalam bidang ketahanan pangan, upaya untuk mendukung sektor perikanan secara berkelanjutan yakni membantu dalam pengelolaan populasi ikan untuk menjaga ketersediaan dan kualitas tangkapan. Menyediakan sumber protein utama seperti ikan, kerang, dan rumput laut. Membantu menjaga ekosistem laut agar tetap sehat dan berkelanjutan. Membantu menemukan lokasi dan pengembangan budidaya ikan yang tepat sehingga menambah produksi pangan. Mengembangkan produk olahan ikan yang lebih awet dan bernilai gizi dan memberikan pemahaman tentang siklus hidup organisme laut untuk pengelolaan sumber daya yang tepat.

Bagi pengembangan ekonomi, biologi laut menjadi dasar untuk inovasi dan pembangunan ekonomi biru (*blue economy*). Biologi laut mendukung *blue economy* dengan cara:

1. **Keanekaragaman hayati sebagai sumber daya.** Organisme laut seperti terumbu karang, ikan, dan mikro alga menjadi basis untuk perikanan berkelanjutan, akuakultur, dan bioprospeking yang menciptakan nilai ekonomi hingga US\$ 280 milyar/tahun di Indonesia.
2. **Bioteknologi kelautan.** Ekstraksi senyawa bioaktif dari biota laut untuk industri obat, kosmetik, biofuel, dan nutraceutical, sambil menjaga ekosistem agar produksi efisien tanpa limbah.
3. **Konservasi dan lapangan kerja.** Menjaga habitat laut sehat lewat Kawasan konservasi (target 30% lautan Indonesia) untuk perikanan yang stabil, pariwisata, dan energi biru yang membuka 45 juta lapangan kerja hingga 2045.
4. **Pengelolaan berkelanjutan.** Pemahaman siklus hidup spesies laut dapat membantu mengurangi *over fishing* dan degradasi dan mendorong pertumbuhan ekonomi sambil melindungi lingkungan.

Dukungan biologi laut dalam bidang konservasi adalah melindungi keanekaragaman hayati dan spesies langka, dan juga membantu memahami perilaku hewan laut untuk melestarikan spesies yang terancam punah, serta mengevaluasi dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan laut. Biologi laut berperan secara krusial dalam konservasi dengan cara:

1. **Memahami keanekaragaman hayati.** Studi tentang spesies, habitat seperti terumbu karang, mangrove, dan padang lamun bantu identifikasi area prioritas konservasi, terutama di Indonesia yang memiliki 80% biodiversitas laut dunia.
2. **Melindungi ekosistem.** Pengetahuan siklus hidup organisme laut mendorong restorasi habitat, seperti pembibitan karang dan pencegahan *over fishing* untuk mencegah kepunahan spesies.

3. **Pengelolaan berbasis sains.** Data biologi laut dapat digunakan untuk membuat kebijakan seperti Taman Laut di Raja Ampat, mengurangi polusi, perubahan iklim, dan aktivitas manusia.
4. **Pendidikan dan kolaborasi.** Biologi laut mendukung penelitian, pelatihan nelayan, dan edukasi komunitas untuk menjaga keseimbangan ekosistem secara berkelanjutan.

Dalam bidang penelitian, biologi laut berperan dalam beberapa hal, antara lain:

1. **Penemuan senyawa bioaktif.** Mikroorganisme laut menjadi sumber obat anti kanker, antivirus, dan biofuel melalui bioprospecting seperti ekstraksi dari spons laut untuk bioteknologi ramah lingkungan.
2. **Inovasi teknologi.** Eksplorasi laut menggunakan peralatan canggih dapat mengungkapkan ventilasi hidrotermal dan indikator kualitas air dan kontribusi *citizen science* untuk data lapangan.

Dalam bidang kesehatan, peranan biologi laut adalah menemukan potensi obat-obatan dari organisme laut dan mengembangkan strategi pencegahan penyakit pada ikan. Peranan tersebut secara garis besar antara lain:

1. **Sumber obat baru.** Organisme laut seperti sponge, rumput laut, dan mikroorganisme menyediakan senyawa bioaktif untuk obat anti kanker, anti virus, dan anti inflamasi.
2. **Nutrisi dan makanan sehat.** Biota laut kaya protein, vitamin, dan mineral dari ikan, kerang, serta rumput laut. Biota laut tersebut mendukung kekebalan tubuh, mencegah diabetes, dan mengurangi resiko penyakit jantung.
3. **Indikator kesehatan lingkungan.** Studi tentang plankton laut mengungkapkan polusi kimia yang mempengaruhi kesehatan manusia, seperti resiko asma atau demensia. Selain itu, memantau dan mencegah penyakit.

4. **Bioprospekting berkelanjutan.** Lebih dari 30% obat modern berasal dari senyawa biota laut, Dimana memiliki potensi besar dari sekitar 200 spesies laut yang dapat digunakan untuk keperluan terapi.

Peranan biologi laut selanjutnya adalah peranan dalam bidang bioteknologi. Dalam bidang bioteknologi, secara krusial peranan biologi laut antara lain:

1. **Pemanfaatan senyawa bioaktif.** Organisme laut seperti sponge, mikroba, dan rumput laut menjadi sumber enzim, protein, dan metabolit untuk obat kanker, bahan kosmetik, biofuel, serta nutraceutical. Contohnya, riset di Indonesia yang mengekstrak enzim bakteri laut untuk bioremediasi dan produk kecantikan senilai miliaran USD.
2. **Rekayasa genetik.** Modifikasi genetik udang, ikan, dan moluska untuk produksi benih unggul di bidang akuakultur dan meningkatkan hasil panen secara berkelanjutan tanpa adanya *over fishing*.
3. **Konservasi dan restorasi.** Bioteknologi membantu desain terumbu karang bionik yang menggunakan CRISPR untuk adaptasi iklim, bioremediasi polusi, dan pemantauan ekosistem laut.
4. **Inovasi industri.** Mendorong ekonomi biru lewat bioprospecting, menciptakan lapangan kerja dan produksi ramah lingkungan terutama di Indonesia sebagai negara maritim terbesar.

Saat ini biologi laut menjadi solusi global untuk pelestarian dan inovasi. Biologi laut memiliki peranan penting dan cara yang dilakukan untuk menjadi solusi global tersebut adalah:

1. **Pelestarian ekosistem.** Dalam hal ini pemahaman tentang siklus hidup spesies laut dapat membantu restorasi habitat seperti terumbu karang (degradasi mencapai 50% akibat

perubahan cuaca) dan dapat mencegah kepunahan terumbu karang, menjaga oksigen dunia dari fitoplankton.

2. **Adaptasi perubahan iklim.** Dalam hal ini studi tentang asidifikasi dan pemanasan laut yang menggunakan AI dan genomic (CRISPR) dapat membantu mengembangkan spesies yang tahan terhadap perubahan cuaca, dapat memantau karbon biru dari mangrove untuk mengurangi emisi global.
3. **Kolaborasi global.** Riset-riset yang dilakukan mengarah kepada keberlanjutan perikanan dan penangkapan ikan berlebih (*over fishing*)

# Bab 2

## LAUT SEBAGAI LINGKUNGAN HIDUP

### 2.1. PENDAHULUAN

Laut merupakan komponen utama dalam sistem kehidupan di Bumi, menutupi lebih dari 70% permukaan planet ini. Perairan laut berperan penting sebagai penopang kehidupan, penyedia berbagai sumber daya, sekaligus pengatur iklim global. Sebagai lingkungan hidup, laut menjadi habitat bagi beragam organisme, mulai dari mikroorganisme hingga hewan berukuran besar. Selain itu, laut juga memberikan manfaat besar bagi manusia melalui kegiatan perikanan, transportasi, pariwisata, serta eksplorasi sumber daya alam.

Keanekaragaman hayati laut sangat tinggi dan kompleks, ekosistem seperti terumbu karang, padang lamun, dan hutan mangrove berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekologi serta menyediakan layanan ekosistem yang vital. Laut juga berfungsi sebagai penyerap karbon dioksida, penghasil oksigen, serta penyeimbang siklus air di bumi. Oleh karena itu, kesehatan laut berbanding lurus dengan keberlanjutan kehidupan manusia dan makhluk hidup lainnya.

Namun, perkembangan zaman dan meningkatnya aktivitas manusia membawa tantangan besar terhadap kelestarian laut. Pencemaran, eksploitasi berlebihan, perubahan iklim, dan kerusakan habitat merupakan ancaman serius yang dapat menurunkan fungsi ekologis laut. Kondisi ini menuntut adanya kesadaran, pengelolaan berkelanjutan, serta kerja sama antar pihak dalam menjaga laut sebagai lingkungan hidup.

Dengan memahami laut sebagai lingkungan hidup, manusia diharapkan mampu menempatkan dirinya tidak hanya sebagai pemanfaat sumber daya, tetapi juga sebagai penjaga keberlanjutan

ekosistem laut. Kesadaran ini penting untuk mewariskan ekosistem laut yang sehat dan produktif bagi generasi mendatang.

Dalam menghadapi berbagai ancaman terhadap ekosistem laut, upaya konservasi menjadi sangat krusial. Beragam pihak, termasuk organisasi nasional maupun internasional, telah melakukan berbagai inisiatif untuk menjaga kelestarian laut. Salah satu langkah nyata adalah pembentukan kawasan konservasi laut yang bertujuan melindungi habitat penting serta spesies yang terancam punah. Saat ini, lebih dari 15% wilayah laut di dunia telah ditetapkan sebagai kawasan konservasi, (IUCN, 2021).

## **2.2. Pengertian Laut sebagai Ekosistem**

Laut merupakan salah satu ekosistem terbesar di bumi yang menutupi kurang lebih dari 70% permukaan planet. Sebagai lingkungan hidup, laut menyediakan ruang, sumber daya, dan energi yang sangat penting bagi keberlangsungan makhluk hidup, baik organisme laut maupun manusia yang bergantung pada hasil laut. Laut mengandung lebih dari 97% dari total air di planet ini dan memiliki peran krusial dalam menjaga keseimbangan iklim global. Laut bukan sekadar hamparan air asin, melainkan ekosistem yang kompleks, dinamis, dan saling terhubung, di mana berbagai komponen biotik dan abiotik berinteraksi membentuk keseimbangan kehidupan. Ekosistem laut terdiri dari berbagai komponen biotik, seperti ikan, mamalia laut, plankton, serta komponen abiotik seperti air, mineral, dan cahaya matahari. Ekosistem laut dapat dibedakan menjadi beberapa zona, termasuk zona intertidal, neritik, dan pelagik. Zona intertidal adalah area yang terletak di antara garis pasang surut, yang memiliki keanekaragaman hayati yang tinggi karena pengaruh air laut yang terus berubah. Di sisi lain, zona neritik, yang terletak di atas landas kontinen, memiliki produktivitas tinggi berkat adanya sinar matahari yang cukup untuk fotosintesis. Zona pelagik mencakup bagian laut yang lebih dalam dan lebih jauh dari pantai, di mana kehidupan laut seperti ikan besar dan mamalia laut dapat ditemukan. Ekosistem laut menyimpan lebih dari 30% karbon dioksida di atmosfer, berfungsi sebagai penyerap karbon yang penting untuk mitigasi perubahan iklim. Selain itu, ekosistem laut juga berperan dalam

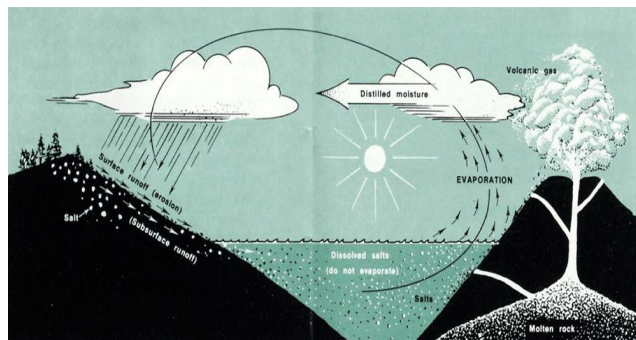
menyediakan sumber daya alam yang vital, seperti ikan dan bahan baku obat-obatan. Contoh nyata dari kekayaan laut adalah terumbu karang, yang merupakan habitat bagi lebih dari 25% spesies ikan laut dan berkontribusi terhadap perekonomian global melalui pariwisata dan perikanan (Hughes *et al.*, 2017).



Gambar 2. 1. Ekosistem Laut  
(<https://share.google/images/TbizcZOtxsrWRYBdt>)

### 2.3. Karakteristik Lingkungan Laut

Karakteristik laut meliputi sifat fisik air laut seperti salinitas (kadar garam), suhu, tekanan, densitas, warna, serta fenomena dinamis seperti gelombang, arus, dan pasang surut. Laut juga memiliki karakteristik geografis seperti kedalaman yang bervariasi dari perairan dangkal hingga palung dalam dan merupakan habitat keanekaragaman hayati yang kaya.



Gambar 2. 2. Sifat fisik Air laut  
(<https://share.google/images/cYgnOBzsCjFaocP9E>)

### **2.3.1. Karakteristik fisik air laut**

#### **A. Suhu**

Suhu merupakan salah satu faktor fisik yang sangat berpengaruh terhadap ekosistem laut. Suhu air laut bervariasi tergantung pada lokasi dan kedalaman. Misalnya, suhu permukaan laut di daerah tropis dapat mencapai 30°C, sementara di daerah kutub bisa turun hingga -2°C (Levitus *et al.*, 2012). Distribusi spesies, metabolisme, dan reproduksi organisme laut. Meningkatnya suhu diperairan laut itu karena adanya pemanasan global dapat mengakibatkan migrasi spesies ikan ke daerah yang lebih dingin, mengganggu ekosistem lokal dan industri perikanan, Helm *et al.* (2017).

Selain itu, suhu juga berpengaruh pada proses fisik dan kimia di laut. Misalnya, suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan laju penguapan, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi salinitas. Fenomena pemutihan terumbu karang, yang sering terjadi akibat suhu air laut yang meningkat. Hughes *et al.* (2017), sekitar 30% terumbu karang di seluruh dunia mengalami pemutihan akibat suhu tinggi yang berkepanjangan. Pemutihan ini tidak hanya mempengaruhi keanekaragaman hayati, tetapi juga berdampak pada ekonomi lokal yang bergantung pada pariwisata dan perikanan.

#### **B. Salinitas**

Salinitas adalah konsentrasi garam terlarut dalam air laut dan merupakan faktor fisik penting yang mempengaruhi kehidupan laut. Salinitas bervariasi secara alami tergantung pada lokasi dan kondisi lingkungan. Di daerah pesisir, salinitas dapat dipengaruhi oleh aliran sungai, curah hujan, dan penguapan. Misalnya, salinitas di muara sungai dapat jauh lebih rendah dibandingkan dengan salinitas di laut terbuka (Kumar *et al.*, 2018). Salinitas berperan penting dalam menentukan distribusi serta kelangsungan hidup berbagai spesies laut, karena tingkat kadar garam memengaruhi proses fisiologis, adaptasi, dan interaksi antarorganisme di lingkungan perairan.. Organisme seperti ikan dan krustasea memiliki toleransi tertentu terhadap salinitas. Sebagai contoh, ikan salmon dapat bertahan di lingkungan air tawar dan air laut, tetapi perubahan salinitas yang drastis dapat mempengaruhi migrasi dan

reproduksi mereka (McCormick *et al.*, 2013). Perubahan iklim, perubahan pola curah hujan dan penguapan dapat menyebabkan fluktuasi salinitas yang ekstrem, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi ekosistem perairan.

Salinitas juga berperan dalam proses fisik dan kimia di lautan, seperti densitas air dan sirkulasi laut. Air dengan salinitas yang lebih tinggi memiliki densitas lebih tinggi, yang mempengaruhi arus laut dan stratifikasi lapisan air. Perubahan salinitas dapat mengganggu pola sirkulasi laut global, yang memiliki implikasi besar terhadap iklim global (Bryden *et al.*, 2005).

### **C. Tekanan air laut**

Tekanan air laut adalah salah satu faktor penting dalam studi oseanografi yang berhubungan dengan kedalaman laut. Tekanan ini meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman, dengan rata-rata peningkatan sekitar 1 atmosfer untuk setiap 10 meter kedalaman. Hal ini disebabkan oleh berat air yang berada di atasnya, yang memberikan tekanan pada lapisan air di bawahnya. Tekanan air laut memiliki pengaruh signifikan terhadap kehidupan laut, termasuk distribusi spesies, metabolisme, dan adaptasi organisme terhadap lingkungan yang berbeda. Selain itu, tekanan ini juga berperan dalam proses fisik dan kimia di lautan, seperti larutan gas dan reaksi biokimia yang terjadi di dalam air. Pemahaman yang mendalam tentang tekanan air laut sangat penting untuk penelitian kelautan, eksplorasi sumber daya bawah laut, dan pengelolaan ekosistem laut secara berkelanjutan.

Tekanan air laut merupakan fenomena fisik yang dihasilkan oleh kolom air yang berada di atas titik tertentu di dalam laut. Dengan bertambahnya kedalaman, tekanan ini meningkat secara signifikan, sehingga dapat mencapai ratusan hingga ribuan atmosfer di kedalaman yang ekstrem. Tekanan ini tidak hanya berdampak pada struktur fisik air itu sendiri, tetapi juga pada berbagai proses biologis dan geologis yang terjadi di dalam laut. Organisme laut, misalnya, telah berevolusi untuk dapat bertahan hidup dalam kondisi tekanan yang bervariasi, dan banyak dari mereka memiliki adaptasi khusus untuk mengatasi tekanan tinggi,

seperti struktur tubuh yang fleksibel dan sistem biokimia yang efisien. Selain itu, tekanan air laut juga mempengaruhi sifat-sifat fisik air, seperti densitas dan viskositas, yang pada gilirannya memengaruhi arus laut dan pola sirkulasi global.

Tekanan air laut juga dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti salinitas dan suhu air. Salinitas yang lebih tinggi akan meningkatkan densitas air, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi tekanan. Salinitas dan suhu memiliki dampak signifikan terhadap sifat fisik air laut, termasuk tekanan. Hal ini menjadi penting dalam studi mengenai perubahan iklim, di mana variasi salinitas dapat terjadi akibat pencairan es dan peningkatan curah hujan. Selain itu, tekanan air laut juga berperan dalam proses-proses geologis dan biologis. Misalnya, tekanan yang tinggi di dasar laut memungkinkan adanya kehidupan unik, seperti organisme ekstremofilik yang dapat bertahan dalam kondisi yang tidak memungkinkan bagi banyak spesies lainnya (Danovaro *et al.*, 2008). Hal ini menegaskan bahwa pemahaman mengenai tekanan air laut tidak hanya relevan dalam bidang fisika, tetapi juga memiliki peran penting dalam studi biologi dan ekologi laut.

Organisme yang hidup di kedalaman laut harus beradaptasi dengan tekanan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan organisme yang hidup di permukaan. Sebagai contoh, ikan yang hidup di kedalaman lebih dari 1000 meter, seperti ikan angler, memiliki tubuh yang elastis dan struktur internal yang dapat menahan tekanan tinggi (Yancey, 2005).

Salah satu contoh organisme yang menarik adalah ikan lantern (*Myctophidae*), yang dapat ditemukan pada kedalaman hingga 2000 meter. Ikan ini memiliki sistem bioluminesensi yang membantu mereka berkomunikasi dan menarik mangsa di lingkungan yang gelap. Tekanan tinggi di kedalaman tersebut mempengaruhi metabolisme dan perilaku ikan ini, serta dapat mempengaruhi distribusi populasinya (Hulley, 1981). Organisme lain seperti krustasea dan moluska juga menunjukkan adaptasi unik terhadap tekanan tinggi. Misalnya, udang laut dalam (*Pandalus borealis*) memiliki kemampuan untuk mengatur tekanan osmotik dalam tubuhnya agar tetap stabil di bawah tekanan tinggi

sehingga dapat bertahan hidup di kedalaman lebih dari 2000 meter, berkat mekanisme adaptasi yang kompleks.

#### **D. Densitas**

Densitas air laut adalah massa jenis air laut yang biasanya diukur dalam satuan kilogram per meter kubik ( $\text{kg/m}^3$ ). Densitas ini sangat penting dalam berbagai aspek ilmu kelautan, termasuk sirkulasi laut, ekosistem, dan perubahan iklim. Secara umum, densitas air laut bervariasi tergantung pada suhu, salinitas, dan tekanan. Densitas air laut pada suhu  $0^\circ\text{C}$  dan salinitas 35 ppt (*parts per thousand*) adalah sekitar  $1027 \text{ kg/m}^3$ .

Suhu memiliki pengaruh yang signifikan terhadap densitas air laut. Air yang lebih hangat memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan dengan air yang lebih dingin. Hal ini disebabkan oleh ekspansi termal, di mana molekul air bergerak lebih cepat dan menjauh satu sama lain saat suhu meningkat. Sebaliknya, salinitas juga berperan penting; air laut dengan salinitas lebih tinggi memiliki densitas lebih tinggi. Stratifikasi ini dapat mempengaruhi distribusi nutrisi dan organisme laut, serta mempengaruhi pola sirkulasi air di lautan. Perubahan kecil dalam salinitas dan suhu dapat menghasilkan perubahan besar dalam densitas, yang pada gilirannya mempengaruhi dinamika laut.

Berubahnya nilai densitas air laut dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu suhu, salinitas, dan tekanan. Suhu adalah faktor yang paling mudah dipahami; semakin tinggi suhu air, semakin rendah densitasnya. Sebaliknya, air dingin memiliki densitas yang lebih tinggi. Perbedaan suhu antara permukaan dan kedalaman laut dapat menghasilkan lapisan-lapisan air yang berbeda densitas, yang dikenal sebagai stratifikasi termal. Salinitas, yang merupakan konsentrasi garam dalam air laut, juga berperan penting dalam menentukan densitas. Air laut dengan salinitas tinggi, seperti yang ditemukan di wilayah tropis yang mengalami penguapan tinggi, memiliki densitas yang lebih tinggi. Setiap peningkatan salinitas sebesar 1 ppt, densitas air laut dapat meningkat sekitar  $0,8 \text{ kg/m}^3$ . Ini menunjukkan betapa signifikan pengaruh salinitas terhadap densitas air laut, Millero (2006).

Tekanan juga berkontribusi terhadap densitas air laut, meskipun efeknya lebih kecil dibandingkan dengan suhu dan salinitas. Tekanan meningkat seiring dengan kedalaman laut, sehingga air di kedalaman yang lebih dalam memiliki densitas yang lebih tinggi. Peningkatan tekanan sebesar 1000 dbar dapat meningkatkan densitas air laut sekitar  $0,1 \text{ kg/m}^3$ . Kombinasi dari ketiga faktor ini menciptakan variasi densitas yang kompleks di seluruh lautan. Misalnya, di daerah yang mengalami arus dingin dari kutub, densitas air laut dapat meningkat secara signifikan, yang dapat memicu sirkulasi laut yang lebih dalam dan kompleks. Perubahan densitas ini dapat berkontribusi pada sirkulasi termohalin, yang merupakan komponen penting dari sistem iklim global, Fofonoff dan Millard (1983).

Selain itu, densitas air laut juga mempengaruhi pola sirkulasi laut yang pada gilirannya mempengaruhi distribusi nutrisi dan oksigen di dalam air. Dalam sistem yang stratifikasi, lapisan air dengan densitas yang berbeda dapat terpisah dan tidak bercampur, yang dapat mengakibatkan kekurangan nutrisi di lapisan yang lebih dalam menyebabkan perubahan dalam populasi ikan, yang pada akhirnya mempengaruhi keseluruhan ekosistem laut.

Densitas air laut juga berperan dalam fenomena upwelling, di mana air dingin dan kaya nutrisi dari kedalaman laut naik ke permukaan. Proses ini sangat penting untuk produktivitas laut, terutama di daerah pesisir yang menjadi tempat berkumpulnya berbagai spesies ikan dan mamalia laut. Perubahan densitas air laut akibat perubahan iklim, seperti pemanasan global dan pencairan es, juga dapat mempengaruhi ekosistem laut secara keseluruhan. Peningkatan suhu air dapat mengubah pola migrasi spesies, mempengaruhi pola reproduksi, dan pada akhirnya dapat mengancam kelangsungan hidup spesies tertentu.

## **E. Warna**

Warna air laut merupakan fenomena yang menarik sekaligus kompleks, yang terbentuk akibat pengaruh berbagai faktor fisik maupun biologis. Secara umum, air laut dapat terlihat dalam berbagai warna, mulai dari biru tua, hijau, hingga coklat. Warna ini tidak hanya

memberikan informasi visual yang menarik, tetapi juga mencerminkan kondisi lingkungan dan ekosistem laut. Warna air laut dapat dipengaruhi oleh penyerapan dan penyebaran cahaya, serta keberadaan partikel dan organisme dalam kolom air, Morel dan Prieur (1977).

Salah satu faktor utama yang mempengaruhi warna air laut adalah panjang gelombang cahaya yang diserap oleh air. Air laut menyerap cahaya merah dan kuning lebih efektif dibandingkan dengan cahaya biru. Hal ini menyebabkan cahaya biru yang lebih sedikit diserap dan lebih banyak dipantulkan, sehingga membuat air laut tampak biru (Kirk, 1994).

Selain itu, keberadaan berbagai zat terlarut dan partikel dalam air juga mempengaruhi warna. Misalnya, air yang kaya akan fitoplankton dapat terlihat hijau karena klorofil yang terdapat dalam organisme tersebut. Konsentrasi klorofil dapat diukur untuk memperkirakan produktivitas primer di lautan, yang berhubungan langsung dengan warna air dan hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, termasuk kedalaman, keberadaan partikel, dan organisme. Kedalaman air merupakan salah satu faktor terpenting yang mempengaruhi penyerapan dan penyebaran cahaya. Pada kedalaman yang lebih dangkal, cahaya matahari dapat menembus lebih dalam, sehingga memberikan warna yang lebih cerah dan bervariasi. Sebaliknya, pada kedalaman yang lebih dalam, cahaya menjadi lebih terbatas, dan warna biru menjadi lebih dominan. Keberadaan partikel terlarut dalam air juga berkontribusi terhadap warna. Misalnya, air yang mengandung banyak sedimen atau kotoran akan tampak lebih keruh dan cenderung berwarna coklat. Konsentrasi partikel terlarut dapat mempengaruhi warna dan kejernihan air, yang dapat berdampak pada ekosistem laut. Kekeruhan air dapat menurunkan tingkat penetrasi cahaya ke dalam laut, sehingga menghambat proses fotosintesis organisme laut. Selain itu, keberadaan organisme seperti fitoplankton, zooplankton, dan alga turut berperan penting dalam menentukan variasi warna air laut.

Fitoplankton, misalnya, mengandung klorofil yang menyerap cahaya merah dan biru, sehingga air yang kaya akan fitoplankton cenderung terlihat hijau. Perubahan dalam konsentrasi fitoplankton dapat mempengaruhi warna air dan produktivitas primer di lautan.

Fenomena "red tide" atau pasang merah, yang terjadi akibat ledakan populasi alga beracun. Fenomena ini tidak hanya mengubah warna air menjadi merah atau coklat, tetapi juga dapat memiliki dampak ekologis dan ekonomi yang signifikan, seperti kematian ikan dan penutupan area perikanan (Anderson *et al.*, 2002).

Warna air laut sebagai indikator kesehatan ekosistem laut. Peningkatan warna hijau yang disebabkan oleh pertumbuhan fitoplankton dapat menunjukkan peningkatan nutrisi di perairan, yang sering kali disebabkan oleh pencemaran. Kondisi lingkungan yang buruk, seperti pencemaran dan perubahan iklim, dapat mempengaruhi warna air laut dan dampaknya terhadap ekosistem. Pencemaran nutrisi dapat menyebabkan eutrofikasi, yang berujung pada ledakan populasi fitoplankton dan perubahan warna air. Eutrofikasi ini dapat mengakibatkan penurunan oksigen di perairan, yang berbahaya bagi kehidupan laut.

### **2.3.2. Fenomena dinamis**

#### **A. Arus Laut**

Arus laut adalah pergerakan air yang terjadi di lautan, yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk angin, suhu, salinitas, dan topografi dasar laut. Arus ini memainkan peran penting dalam distribusi suhu, nutrisi, dan organisme di lautan. Arus laut memiliki dampak signifikan terhadap iklim global. Perubahan dalam arus laut dapat mempengaruhi pola cuaca, termasuk frekuensi dan intensitas badai tropis (Koster *et al.*, 2010). Selain itu, arus laut juga berperan dalam transportasi nutrisi dan plankton, yang merupakan dasar dari rantai makanan laut.

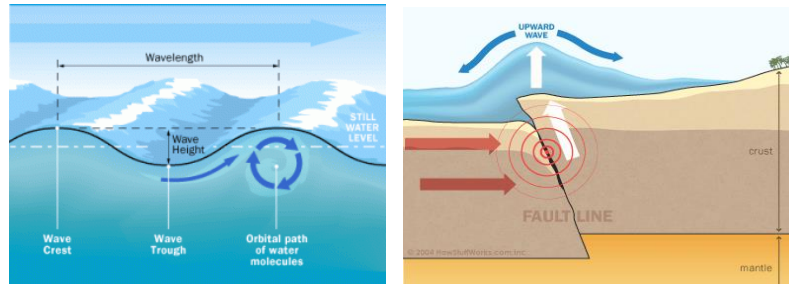
Arus laut juga berperan dalam distribusi spesies. Beberapa spesies ikan dan mamalia laut menggunakan arus untuk migrasi dan mencari makanan. Larva ikan dapat terdistribusi jauh dari tempat pemijahan mereka berkat arus laut, yang mempengaruhi dinamika populasi dan keanekaragaman hayati. Ekosistem laut yang mempengaruhi iklim, distribusi spesies, dan dinamika ekosistem. Pemahaman yang lebih baik tentang arus laut dan interaksinya dengan faktor fisik lainnya sangat

penting untuk pengelolaan dan konservasi sumber daya laut, Thorrold et al. (2001).

## **B. Gelombang**

Gelombang laut adalah pergerakan permukaan air yang disebabkan oleh angin, pasang surut, dan aktivitas seismik. Gelombang ini dapat dipicu oleh berbagai faktor, seperti angin, gempa bumi, dan aktivitas manusia. gelombang yang dihasilkan oleh angin dapat mencapai tinggi hingga 30meter dalam kondisi ekstrem, seperti badai. Gelombang laut tidak hanya berfungsi sebagai indikator kondisi cuaca, tetapi juga memiliki dampak yang signifikan terhadap ekosistem laut dan kehidupan manusia. Gelombang memiliki dampak yang signifikan terhadap ekosistem pantai dan kehidupan laut. Gelombang yang kuat dapat mengubah bentuk pantai, mempengaruhi habitat, dan mengganggu kehidupan organisme di daerah pesisir (Short dan Wright, 1983).

Gelombang juga berperan dalam proses erosi dan sedimentasi. Ketika gelombang menghantam pantai, energi yang dihasilkan dapat mengikis tanah dan batuan, mengubah bentuk garis pantai. Dalam jangka panjang, proses ini dapat menciptakan formasi geologis baru dan mempengaruhi ekosistem yang ada. McLachlan dan Brown (2006) Perubahan pola gelombang akibat perubahan iklim dapat mempengaruhi habitat pesisir dan spesies yang bergantung pada lingkungan tersebut. Selain itu, gelombang juga berperan dalam sirkulasi air di lautan. Gelombang yang bergerak di permukaan dapat mempengaruhi arus bawah dan distribusi nutrisi di lautan. Kundu dan Cohen (2004) gelombang dapat meningkatkan pencampuran air, yang penting untuk distribusi oksigen dan nutrisi bagi organisme laut.



Gambar 2.3. Gelombang laut  
(<https://share.google/images/myX0W2zUoQQAGcxG8>)

Proses pembentukan gelombang juga dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kedalaman laut dan topografi dasar laut. Gelombang yang bergerak di perairan dalam akan memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan gelombang yang bergerak di perairan dangkal. Ketika gelombang memasuki perairan dangkal, kecepatan dan bentuk gelombang dapat berubah secara signifikan, yang dapat menyebabkan fenomena seperti gelombang pecah.

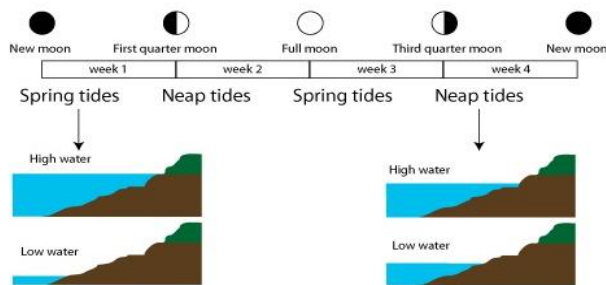
### C. Pasang surut

Pasang surut air laut adalah fenomena alami yang terjadi akibat interaksi gravitasi antara bumi, bulan, dan matahari. Proses ini menghasilkan perubahan tinggi permukaan air laut yang dapat diprediksi secara periodik. Pasang surut terjadi dua kali sehari di sebagian besar lokasi di bumi, dengan variasi yang tergantung pada posisi bulan dan matahari. Fenomena ini juga dapat dijelaskan melalui konsep gaya tarik gravitasi. Bulan, yang memiliki massa lebih kecil dibandingkan dengan bumi, namun berfungsi sebagai pengaruh utama dalam menciptakan pasang surut. Ketika bulan berada di dekat bumi, gaya tariknya menyebabkan air laut tertarik ke arahnya, menjadilah "pasang" di sisi bumi yang menghadap bulan. Sebaliknya, di sisi bumi yang berlawanan, terjadi "surut" akibat kurangnya gaya tarik (Pugh, 2014).

Variasi tinggi pasang surut dapat mencapai hingga 15 meter di lokasi tertentu, sebagaimana yang terjadi di wilayah seperti di Teluk Fundy, Kanada, yang dikenal sebagai lokasi dengan pasang surut tertinggi di dunia (Zhang, *et al*, 2019). Hal ini menunjukkan bahwa faktor geografi dan topografi dapat mempengaruhi besaran pasang surut di

suatu wilayah. Selain itu, pasang surut juga dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti cuaca dan arus laut. Badai dapat menyebabkan peningkatan tinggi air laut yang disebut "*storm surge*," yang dapat berkontribusi pada risiko banjir di daerah pesisir. Faktor lain yang mempengaruhi pasang surut adalah bentuk dan kedalaman dasar laut. Teluk yang sempit dan dangkal dapat memperkuat fenomena pasang surut, sementara laut yang dalam dan terbuka cenderung mengalami pasang surut yang lebih kecil.

Pasang surut berperan dalam mengatur tingkat salinitas serta sirkulasi air di ekosistem seperti estuari dan mangrove, yang menjadi habitat penting bagi beragam spesies ikan dan organisme laut lainnya. Namun, pasang surut juga dapat membawa dampak negatif. Di daerah pesisir, perubahan tinggi air laut dapat menyebabkan erosi pantai yang signifikan sehingga erosi pantai yang diperparah oleh peningkatan frekuensi dan intensitas pasang surut dapat mengancam infrastruktur dan habitat alami. Di sisi lain, pasang surut juga dapat berkontribusi pada proses sedimentasi yang penting untuk pembentukan pulau-pulau kecil dan pengayaan tanah di daerah pesisir.



Gambar 2.4. Pasang Surut air laut  
(<https://share.google/images/CCLuofd2phRrPsmqd>)

### 2.3.3. Faktor Kimia

Faktor kimia lingkungan laut meliputi komposisi air laut (salinitas, pH, nitrogen dan fosfor, oksigen terlarut, dan unsur-unsur lainnya), serta kontaminasi kimia akibat polusi dari aktivitas manusia dan alam. Faktor-faktor ini sangat penting karena memengaruhi kehidupan organisme laut, keseimbangan ekosistem, dan sifat air laut secara keseluruhan

## **A. Kandungan Oksigen Terlarut**

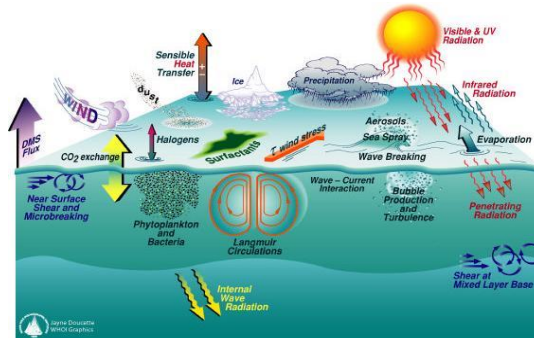
Kandungan oksigen terlarut (OT) dalam air laut merupakan salah satu faktor kimia yang sangat penting bagi kehidupan akuatik. Oksigen terlarut adalah oksigen yang terdapat dalam bentuk gas dan larut dalam air, yang diperlukan oleh organisme laut untuk respirasi. kadar oksigen terlarut di lautan bervariasi tergantung pada kedalaman, suhu, dan salinitas. Di permukaan laut, kadar oksigen terlarut dapat mencapai 8-14 mg/L, sementara di kedalaman yang lebih dalam, kadar ini dapat menurun drastis akibat proses respirasi organisme dan penguraian bahan organik (NOAA, 2020).

Salah satu contoh nyata dari dampak rendahnya kadar oksigen terlarut adalah terjadinya zona mati (dead zones) di perairan pesisir. Zona mati adalah area di mana kadar oksigen terlarut sangat rendah, sehingga tidak dapat mendukung kehidupan akuatik. Eutrofikasi ini mengakibatkan ledakan alga yang mengonsumsi oksigen saat mereka mati dan terurai, menciptakan kondisi yang tidak layak bagi banyak spesies ikan dan organisme lainnya.

Kadar oksigen terlarut di laut sejalan dengan keberadaan suhu air yang lebih tinggi dapat mengurangi kemampuan air untuk melarutkan oksigen, yang dapat memperburuk kondisi zona mati. Schmidtke *et al.* (2017).

## **B. Karbon Dioksida dalam Air Laut**

Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) adalah gas yang memiliki peran penting dalam proses biogeokimia di lautan. Ketika CO<sub>2</sub> larut dalam air, ia bereaksi dengan air membentuk asam karbonat, yang dapat mempengaruhi pH dan keseimbangan kimia air laut. Peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> di lautan dapat berdampak negatif pada organisme laut, terutama yang memiliki cangkang kalsium karbonat, seperti kerang dan terumbu karang. Fabry *et al.* (2008) peningkatan keasaman dapat mengganggu proses kalsifikasi, yang berakibat pada penurunan pertumbuhan dan kelangsungan hidup organisme tersebut. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan pada ekosistem terumbu karang yang merupakan habitat bagi banyak spesies laut.



Gambar 2.5. Proses pertukaran Karbon dioksida dalam laut (<https://share.google/images/lotqoQSZ1iU0TdRX9>)

Dampak peningkatan  $\text{CO}_2$  adalah pergeseran distribusi spesies ikan. perubahan suhu dan keasaman air laut akibat perubahan iklim dapat memaksa beberapa spesies ikan untuk berpindah ke daerah yang lebih dingin dan lebih dalam, yang berpotensi mengganggu keseimbangan rantai makanan serta ekosistem laut secara keseluruhan. Ini menunjukkan bahwa perubahan kimia dalam air laut dapat memiliki dampak yang luas dan kompleks, Cheung *et al.* (2010).

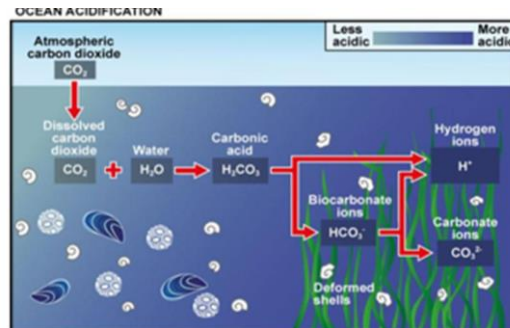
Selain itu, karbon dioksida juga berperan dalam siklus nutrisi di lautan. Proses fotosintesis yang dilakukan oleh fitoplankton bergantung pada ketersediaan  $\text{CO}_2$ , yang merupakan sumber karbon bagi organisme tersebut. Dengan meningkatnya konsentrasi  $\text{CO}_2$ , diharapkan akan ada peningkatan produktivitas primer di beberapa daerah.

### C. pH Air Laut

pH air laut adalah ukuran keasaman atau kebasaan air, yang dapat mempengaruhi berbagai proses biogeokimia dan kehidupan akuatik. Rata-rata pH air laut saat ini berkisar antara 7,5 hingga 8,4, tetapi nilai ini dapat bervariasi tergantung pada lokasi dan kondisi lingkungan. Penelitian menunjukkan bahwa pH air laut telah menurun sebesar 0,1 hingga 0,3 unit sejak awal Revolusi Industri, yang sebagian besar disebabkan oleh penyerapan karbon dioksida (Doney *et al.*, 2009).

Penurunan pH ini memiliki implikasi serius bagi kehidupan laut, terutama bagi organisme yang membentuk cangkang. penurunan pH dapat menghambat kemampuan moluska dan terumbu karang untuk

membentuk struktur kalsium karbonat mereka. Hal ini dapat menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati dan mengganggu fungsi ekosistem, seperti perlindungan pantai dan penyediaan habitat bagi berbagai spesies ikan, Orr et al. (2005).



Gambar 2.6. Pertukaran Gas dalam laut  
(<https://share.google/images/DLId1eetkQqTVVimc>)

Dampak perubahan pH yang terpengaruh oleh eutrofikasi, di mana akumulasi nutrisi dapat menyebabkan ledakan alga yang mengubah komposisi kimia air. Ketika alga mati dan terurai, proses ini dapat mengakibatkan penurunan pH yang lebih lanjut, menciptakan umpan balik negatif yang merugikan ekosistem. Perubahan pH dapat mempengaruhi interaksi antara spesies, termasuk predator dan mangsa, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi rantai makanan di lautan.

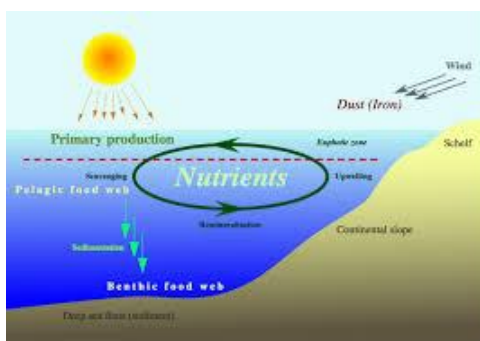
#### D. Nutrien: Nitrogen dan Fosfor

Nutrien seperti nitrogen dan fosfor adalah komponen penting dalam ekosistem laut yang mendukung pertumbuhan organisme. Nitrogen sering kali menjadi faktor pembatas dalam produktivitas primer di lautan, sementara fosfor juga memiliki peran penting dalam siklus nutrisi. Nitrogen dan fosfor memiliki peran yang sangat penting dalam ekosistem laut. Kedua unsur ini merupakan komponen utama dalam proses fotosintesis, yang dilakukan oleh fitoplankton, organisme mikroskopis yang menjadi dasar rantai makanan di lautan. Fitoplankton menyuplai sekitar 50% oksigen yang ada di atmosfer bumi melalui proses fotosintesis. Ketersediaan nitrogen dan fosfor sangat mempengaruhi produktivitas primer di lautan, yang pada gilirannya mempengaruhi seluruh ekosistem laut, Behrenfeld *et al.* (2006).

Ketersediaan nitrogen di lautan umumnya berasal dari proses alami seperti fiksasi nitrogen oleh bakteri, serta dari limpasan pupuk pertanian yang masuk ke laut. Ketidakseimbangan ini dapat menyebabkan fenomena eutrofikasi, yang ditandai dengan pertumbuhan alga yang berlebihan, yang dapat merusak ekosistem laut.

Fosfor, di sisi lain, juga memiliki sumber yang mirip, tetapi lebih sering ditemukan dalam bentuk senyawa anorganik. Fosfor adalah salah satu faktor pembatas utama dalam produktivitas fitoplankton di banyak ekosistem laut, terutama di perairan dangkal. Dalam lingkungan yang kaya akan fosfor, pertumbuhan alga dapat meningkat pesat, yang sering kali berujung pada pembentukan zona mati akibat penurunan oksigen di dasar laut.

Peran nitrogen dan fosfor dalam ekosistem laut, kita dapat semakin menyadari pentingnya pengelolaan sumber daya laut secara berkelanjutan. Upaya untuk mengurangi pencemaran serta menjaga keseimbangan unsur hara akan sangat berpengaruh terhadap kesehatan ekosistem laut. Namun, limpasan nutrisi dari daratan akibat aktivitas pertanian dan industri sering kali memicu terjadinya eutrofikasi, yaitu peningkatan kadar nutrisi berlebih yang menyebabkan ledakan populasi alga dan penurunan kualitas air. Kondisi eutrofikasi ini dapat menimbulkan terbentuknya zona mati yang berbahaya bagi kehidupan akuatik.



Gambar 2.7 . Proses daur Nitrogen dan Fosfor dalam perairan laut (<https://share.google/images/cdgNau44GUhbueRvI>)

Dengan mengurangi jumlah nutrisi yang masuk ke perairan, kita dapat membantu menjaga keseimbangan ekosistem laut dan mencegah

terjadinya eutrofikasi. Nitrogen dan fosfor adalah nutrisi yang sangat penting bagi kesehatan ekosistem laut. Dengan demikian, faktor-faktor kimia seperti kadar oksigen terlarut, karbon dioksida, pH air laut, serta kandungan nutrisi seperti nitrogen dan fosfor sangat berperan penting dalam menjaga keseimbangan dan kesehatan ekosistem laut. Setiap faktor tersebut saling berinteraksi dan memengaruhi satu sama lain, membentuk dinamika yang kompleks dalam sistem kehidupan laut.

#### **2.3.4. Karakteristik geografis**

##### **A. Kedalaman**

Kedalaman laut memiliki pengaruh besar terhadap kondisi lingkungan dan kehidupan laut. Lautan dibagi menjadi beberapa zona berdasarkan kedalaman, yaitu zona epipelagik (0-200 m), mesopelagik (200-1000 m), batipelagik (1000-4000 m), dan abisal (lebih dari 4000 m). Setiap zona memiliki karakteristik fisik dan biologi yang unik. Misalnya, zona epipelagik, yang merupakan lapisan permukaan, memiliki cahaya yang cukup untuk fotosintesis, sedangkan zona abisal gelap dan memiliki tekanan yang sangat tinggi (Gage dan Tyler, 1991).

Kedalaman juga mempengaruhi suhu dan salinitas. Suhu menurun seiring bertambahnya kedalaman, dengan lapisan termoklin yang jelas terlihat di antara zona epipelagik dan mesopelagik. Suhu rata-rata laut menurun sekitar 0,5°C per 100 m kedalaman. Hal ini mempengaruhi distribusi spesies, di mana banyak spesies ikan dan krustasea ditemukan di lapisan yang lebih dangkal, sedangkan spesies lain yang lebih adaptif dapat ditemukan di kedalaman yang lebih besar, Levitus et al. (2000). Kehidupan di zona abisal sangat menarik, di mana tekanan dapat mencapai 1100 atm dan suhu mendekati titik beku. Organisme di zona ini, seperti ikan lantern dan berbagai jenis krustasea, telah mengembangkan adaptasi unik untuk bertahan hidup dalam kondisi ekstrem. Kedalaman juga berperan dalam proses sirkulasi laut. Arus laut yang dalam, dipengaruhi oleh perbedaan densitas yang disebabkan oleh salinitas dan suhu. Perubahan dalam sirkulasi laut dapat memiliki dampak besar pada iklim global, termasuk pola cuaca dan distribusi nutrisi di lautan. Dalam konteks konservasi, pemahaman tentang

kedalaman dan zonasi laut sangat penting untuk melindungi spesies dan habitat yang rentan.

## **B. Keanekaragaman Organisme Laut**

Keanekaragaman hayati laut mencakup berbagai spesies organisme yang hidup di lautan, termasuk ikan, mamalia laut, invertebrata, dan tumbuhan laut. Lautan diperkirakan menjadi rumah bagi lebih dari 230.000 spesies yang telah teridentifikasi, dengan banyak spesies lainnya yang belum ditemukan. Salah satu contoh penting dari keanekaragaman hayati laut adalah terumbu karang, yang dikenal sebagai "hutan hujan laut" karena keanekaragaman spesies yang tinggi. Terumbu karang mendukung sekitar 25% dari semua spesies ikan laut dan menyediakan habitat bagi berbagai organisme lainnya. Namun, sekitar 50% terumbu karang di seluruh dunia telah mengalami kerusakan akibat perubahan iklim, polusi, dan penangkapan ikan yang berlebihan.

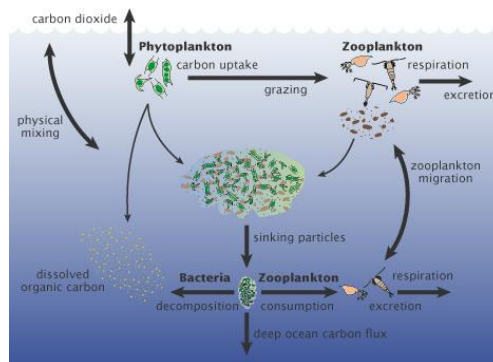
Selain terumbu karang, ekosistem laut lainnya seperti hutan bakau dan padang lamun juga memiliki peran penting dalam mendukung keanekaragaman hayati. Hutan bakau, misalnya, berfungsi sebagai tempat berlindung bagi banyak spesies ikan dan burung migran, serta berperan dalam melindungi garis pantai dari erosi. Hutan bakau dapat mengurangi dampak gelombang hingga 66%.

### **1. Fitoplankton**

Fitoplankton merupakan komponen dasar dalam ekosistem laut yang berfungsi sebagai produsen primer. Mereka adalah organisme mikroskopis yang melakukan fotosintesis dan mengkonversi energi matahari menjadi energi kimia. Fitoplankton menyuplai sekitar 50% oksigen yang kita hirup, menjadikannya vital bagi kehidupan di Bumi. Keanekaragaman fitoplankton sangat tinggi, dengan lebih dari 5.000 spesies yang teridentifikasi, termasuk di antaranya *diatom*, *dinoflagellata*, dan *cyanobacteria*. Salah satu contoh penting dari fitoplankton adalah diatom, yang memiliki dinding sel silika. Diatom berperan penting dalam rantai makanan laut, menjadi sumber makanan bagi zooplankton, yang pada gilirannya menjadi makanan bagi ikan. Populasi diatom dapat berfluktuasi secara musiman, yang dipengaruhi

oleh faktor lingkungan seperti suhu dan ketersediaan nutrisi. Misalnya, di perairan dingin, diatom dapat berkembang biak secara masif selama musim semi, menciptakan bloom fitoplankton yang mendukung ekosistem lokal. Namun, perubahan iklim dan polusi dapat mempengaruhi keanekaragaman dan distribusi fitoplankton. Peningkatan suhu laut dapat mengubah komposisi spesies fitoplankton, yang berpotensi mengganggu rantai makanan laut. Ini menunjukkan bahwa fitoplankton tidak hanya penting untuk ekosistem, tetapi juga sangat rentan terhadap perubahan lingkungan.

Selain itu, fitoplankton juga berperan dalam siklus karbon global. Mereka menyerap karbon dioksida dari atmosfer dan mengubahnya menjadi biomassa, yang kemudian dapat terakumulasi di dasar laut setelah kematian. Proses ini dikenal sebagai "pompa biologis" dan sangat penting untuk mitigasi perubahan iklim.



Gambar 2.8. fitoplankton berperan dalam siklus karbon (<https://share.google/images/oW17PaWcVFfxYDtQs>)

Dengan demikian, fitoplankton adalah elemen kunci dalam keanekaragaman organisme laut, berfungsi sebagai dasar dari rantai makanan dan berkontribusi pada keseimbangan ekosistem serta mitigasi perubahan iklim.

## 2. Zooplankton

Zooplankton adalah organisme mikroskopis yang mengapung di lautan dan berfungsi sebagai konsumen primer dalam rantai makanan laut. Mereka terdiri dari berbagai jenis, termasuk krustasea, larva ikan, dan protozoa. Zooplankton memainkan peran penting dalam transfer

energi dari fitoplankton ke hewan laut yang lebih besar, seperti ikan dan mamalia laut. Keanekaragaman spesies zooplankton dapat mencapai ribuan, tergantung pada lokasi dan kondisi lingkungan.

Salah satu kelompok zooplankton yang paling dikenal adalah *copepoda*, yang merupakan penyusun utama biomassa zooplankton di banyak ekosistem laut. *Copepoda* dapat menyumbang hingga 70% dari total biomassa zooplankton di beberapa perairan. Karena berperan sebagai makanan bagi berbagai spesies ikan dan mamalia laut, sehingga keberadaannya sangat penting untuk kesehatan ekosistem laut, Hirst dan Boucher (2000). Zooplankton juga berperan dalam siklus nutrisi di lautan. Zooplankton mengkonsumsi fitoplankton dan mengeluarkan kotoran yang kaya nutrisi, yang kemudian digunakan oleh fitoplankton lainnya. Proses ini menciptakan siklus yang berkelanjutan di mana energi dan nutrisi terus berputar dalam ekosistem. Keberadaan zooplankton yang sehat dapat meningkatkan produktivitas laut secara keseluruhan, yang penting bagi industri perikanan.



Gambar 2.9. Zooplankton  
(<https://share.google/images/hi0WXc3MrLNYvD7vF>)

Namun, zooplankton juga terpengaruh oleh perubahan lingkungan, termasuk pemanasan global dan perubahan pH laut. Perubahan suhu dapat mempengaruhi siklus hidup dan distribusi zooplankton, yang dapat berdampak pada seluruh ekosistem laut. Misalnya, migrasi zooplankton ke daerah yang lebih dingin dapat mengganggu rantai makanan dan mempengaruhi spesies yang bergantung pada mereka, Hays et al. (2005).

### 3. Ikan

Ikan merupakan salah satu kelompok organisme laut yang paling beragam dan penting, baik dari segi ekologi maupun ekonomi. Lebih dari 32% dari total populasi ikan di dunia ditangkap untuk konsumsi manusia, menjadikannya sumber protein utama bagi lebih dari 1 miliar orang di seluruh dunia. Keanekaragaman spesies ikan sangat tinggi, dengan lebih dari 34.000 spesies yang teridentifikasi, mulai dari ikan kecil hingga ikan besar. Ikan berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem laut. Berperan sebagai predator sekaligus mangsa, yang membantu mengatur populasi spesies lain dan menjaga keseimbangan ekosistem. Ikan predator berperan dalam mengendalikan jumlah ikan kecil dan zooplankton, yang secara tidak langsung memengaruhi pertumbuhan fitoplankton. (Pauly *et al.*, 2002).



Gambar 2.10. Ikan laut  
(<https://share.google/images/62HI53oG5JOuhLhiL>)

Namun, penangkapan ikan berlebihan dan pencemaran laut mengancam keanekaragaman ikan. Sekitar 34% dari populasi ikan dunia mengalami overfishing, yang dapat mengakibatkan penurunan populasi dan bahkan kepunahan spesies.

### 4. Moluska

Moluska adalah kelompok organisme laut yang sangat beragam, mencakup berbagai spesies seperti kerang, cumi-cumi, dan siput laut, diperkirakan ada lebih dari 200.000 spesies moluska di seluruh dunia, menjadikannya salah satu kelompok hewan paling beragam di lautan. Moluska memiliki peran penting dalam ekosistem laut, baik sebagai

produsen maupun konsumen, dan memiliki nilai ekonomi yang signifikan, Bouchet et al. (2011).

Moluska juga memiliki peran dalam rantai makanan laut. Mereka sering menjadi mangsa bagi ikan, burung laut, dan mamalia laut. Penurunan populasi moluska dapat mengganggu rantai makanan dan berdampak negatif pada spesies pemangsa yang bergantung pada mereka, Jackson et al. (2001). Namun, moluska juga menghadapi ancaman akibat perubahan lingkungan, seperti pemanasan global dan pencemaran. Dengan adanya peningkatan kadar karbon dioksida dapat mempengaruhi kemampuan moluska untuk membentuk cangkang, yang dapat mengurangi populasi mereka.



Gambar 2.11. Jenis moluska  
(<https://share.google/images/EaEDFZJ20O9yWg8iU>)

## 5. Mamalia Laut

Mamalia laut, seperti paus, lumba-lumba, dan anjing laut, merupakan bagian integral dari keanekaragaman organisme laut. Mereka memiliki peran penting dalam ekosistem laut dan memiliki nilai budaya serta ekonomi yang signifikan. Lebih dari 90 spesies mamalia laut telah teridentifikasi, dengan populasi yang bervariasi dari spesies yang terancam punah hingga yang stabil. Mamalia laut berfungsi sebagai predator puncak dalam ekosistem laut, membantu mengontrol populasi spesies lain dan menjaga keseimbangan ekosistem. Misalnya, paus pembunuh (*Orcinus orca*) dikenal sebagai predator yang efisien, yang dapat mempengaruhi populasi ikan dan mamalia laut lainnya. Keberadaan mamalia laut dapat meningkatkan kesehatan ekosistem, berkontribusi pada siklus nutrisi dan energi. Namun, mamalia laut juga

menghadapi ancaman serius akibat aktivitas manusia, seperti penangkapan ikan berlebihan, pencemaran, dan perubahan iklim. banyak spesies mamalia laut mengalami penurunan populasi akibat kehilangan habitat dan perburuan. Contoh nyata adalah paus biru (*Balaenoptera musculus*), yang terancam punah akibat perburuan yang dilakukan pada abad ke-20, World Wildlife Fund (WWF, 2021).



Gambar 2.12. Mamalia laut  
(<https://share.google/images/iVsHt4iMAAcPILw0n>)

## 6. Ekosistem Terumbu Karang

Ekosistem terumbu karang terdiri dari berbagai komponen yang saling berinteraksi, termasuk karang, alga, dan organisme laut lainnya. Struktur fisik terumbu karang yang kompleks memberikan berbagai tempat berlindung dan sumber makanan bagi spesies ikan. Karang membentuk struktur tiga dimensi yang menyediakan habitat bagi ikan kecil, sementara alga yang tumbuh di permukaan karang menyediakan makanan bagi herbivora (Hughes et al., 2017).



Gambar 2.13. Terumbu karang  
(<https://share.google/images/nQhf2PKVLUSrIfXdf>)

Salah satu fungsi utama dari terumbu karang adalah sebagai tempat berkembang biak bagi banyak spesies ikan. Banyak spesies ikan, seperti ikan clownfish, memilih untuk bertelur di antara cabang-cabang karang, di mana telur mereka akan terlindungi dari predator. Penelitian menunjukkan bahwa keberadaan terumbu karang dapat meningkatkan kelangsungan hidup larva ikan hingga 50% dibandingkan dengan habitat lain (Hixon dan Beets, 1993).

Selain itu, terumbu karang juga berfungsi sebagai sumber makanan bagi spesies ikan yang lebih besar. Spesies predator seperti ikan barracuda dan ikan tuna sering kali ditemukan di dekat terumbu karang, di mana mereka dapat memangsa ikan yang lebih kecil. Ini menciptakan jaringan makanan yang kompleks di mana setiap spesies memiliki peran tertentu dalam menjaga keseimbangan ekosistem. (Polunin dan Roberts, 1996). Namun, struktur terumbu karang yang kompleks ini juga membuatnya rentan terhadap kerusakan dapat mengurangi keanekaragaman spesies yang tinggal di dalamnya. Penurunan keanekaragaman spesies ikan dapat menyebabkan hilangnya fungsi ekosistem yang penting, seperti pemulihan terumbu karang dan stabilitas ekosistem.

Ekosistem terumbu karang merupakan rumah bagi ribuan spesies ikan, masing-masing dengan peran ekologis yang unik. Terdapat lebih dari 1.500 spesies ikan yang teridentifikasi di perairan terumbu karang, termasuk spesies endemik yang hanya ditemukan di daerah tertentu. Keanekaragaman spesies ini mencakup berbagai kelompok, mulai dari ikan karang kecil hingga predator besar. Ikan badut (*Amphiprioninae*) adalah contoh spesies yang sangat tergantung pada terumbu karang. Ikan ini hidup dalam simbiosis dengan anemon laut, yang memberikan perlindungan dari predator. Ikan badut dapat meningkatkan kelangsungan hidup anemon dengan membersihkan dan merawatnya, sementara anemon memberikan tempat perlindungan bagi ikan badut. Interaksi ini menunjukkan pentingnya hubungan simbiotik dalam ekosistem terumbu karang. Di sisi lain, ikan parrot (*Scaridae*) berperan penting dalam menjaga kesehatan terumbu karang dengan memakan alga yang tumbuh di permukaan karang. Keberadaan ikan parrot dapat

membantu mencegah pertumbuhan alga yang berlebihan, yang dapat merusak terumbu karang.

Penangkapan ikan yang berlebihan juga merupakan ancaman yang tidak dapat diabaikan. Praktik penangkapan ikan yang merusak, seperti penggunaan jaring insang dan bom ikan, dapat menghancurkan struktur terumbu karang dan mengurangi populasi ikan sekitar 30% dari populasi ikan di dunia telah ditangkap secara berlebihan, yang dapat berdampak negatif pada keseimbangan ekosistem terumbu karang.

Restorasi terumbu karang juga merupakan strategi yang semakin populer dalam upaya konservasi. Metode restorasi, seperti transplantasi karang dan pemulihan habitat, dapat membantu mempercepat pemulihan ekosistem yang telah rusak. Transplantasi karang dapat meningkatkan kelangsungan hidup dan pertumbuhan karang, yang pada gilirannya dapat mendukung populasi ikan.

#### **G. Ekosistem mangrove sebagai pelindung pantai dan tempat pemijahan ikan.**

Ekosistem mangrove adalah ekosistem pesisir yang terdiri dari berbagai jenis pohon dan semak yang tumbuh di daerah payau, yang terletak di antara batas pasang dan surut. Mangrove memiliki adaptasi khusus yang memungkinkan mereka bertahan di lingkungan yang ekstrem, seperti salinitas tinggi dan genangan air. Diperkirakan ada lebih dari 15 juta hektar hutan mangrove di seluruh dunia, dengan Indonesia menjadi negara dengan luas hutan mangrove terbesar, mencapai sekitar 3,5 juta hektar, FAO (2018).

Karakteristik utama dari ekosistem mangrove meliputi akar yang menjalar dan sistem perakaran yang kompleks, yang tidak hanya berfungsi untuk menopang pohon, tetapi juga untuk memperkuat tanah dan mencegah erosi. Akar ini juga menyediakan habitat bagi berbagai spesies ikan dan invertebrata, yang menjadikan mangrove sebagai tempat pemijahan yang ideal. Selain itu, mangrove memiliki kemampuan untuk menyerap karbon dioksida dari atmosfer, menjadikannya sebagai salah satu penyerap karbon yang paling efektif di dunia (Alongi, 2014).

Mangrove juga memiliki keanekaragaman hayati yang tinggi, di mana lebih dari 1.000 spesies flora dan fauna dapat ditemukan di dalamnya. Contoh yang mencolok adalah burung, reptil, mamalia, dan berbagai jenis ikan yang bergantung pada ekosistem ini untuk bertahan hidup. Keberadaan mangrove berkontribusi pada stabilitas ekosistem pesisir dan kesehatan laut secara keseluruhan, menjadikannya sangat penting bagi keseimbangan ekosistem (Dahdouh-Guebas et al., 2000).



Gambar 2.14. Mangrove  
(<https://share.google/images/fMLCuENG4R48zZmg2>)

Hutan mangrove memiliki peran penting dalam melindungi wilayah pesisir dari berbagai ancaman seperti abrasi, banjir, dan badai. Sistem akar mangrove yang kuat berfungsi sebagai penghalang alami yang mampu meredam energi gelombang, sehingga mengurangi dampak kerusakan akibat hantaman gelombang laut yang besar.. Keberadaan hutan mangrove dapat mengurangi tinggi gelombang hingga 66%, yang sangat signifikan dalam melindungi garis pantai, Möller et al. (2014).

Selain itu, mangrove juga berfungsi sebagai penyerap air hujan dan limpasan, sehingga membantu mencegah banjir di daerah pesisir. Ketika terjadi hujan lebat, sistem akar mangrove dapat menyerap dan menampung air, mengurangi risiko banjir yang dapat merusak infrastruktur dan mengancam kehidupan masyarakat pesisir. Perubahan iklim, mangrove juga berperan sebagai penyangga alami (buffer) yang melindungi kawasan pesisir dari dampak kenaikan permukaan laut dan perubahan kondisi lingkungan ekstrem. Dengan kemampuannya menyerap karbon, mangrove berkontribusi dalam mitigasi perubahan iklim, yang pada gilirannya membantu menjaga stabilitas ekosistem

pesisir. Ekosistem mangrove mampu menyimpan karbon lebih dari 3-5 kali lipat dibandingkan dengan hutan daratan, menjadikannya sebagai salah satu solusi alam yang efektif untuk mengatasi perubahan iklim. World Bank (2016).

Mangrove merupakan habitat yang ideal untuk berbagai spesies ikan, terutama sebagai tempat pemijahan. Akar mangrove yang kompleks menyediakan tempat berlindung bagi larva ikan, yang sangat rentan terhadap predator. Lebih dari 80% spesies ikan komersial di daerah tropis memanfaatkan ekosistem mangrove untuk pemijahan dan pertumbuhan awal, Nagelkerken et al. (2008). Ekosistem mangrove juga berperan sebagai sumber makanan penting bagi berbagai jenis ikan dan organisme laut lainnya, sekaligus menjadi tempat berlindung dan berkembang biak bagi banyak spesies.. Daun dan detritus yang jatuh dari pohon mangrove menyediakan nutrisi penting bagi kehidupan bawah laut. Produktivitas primer di ekosistem mangrove dapat mencapai 1.200 g C/m<sup>2</sup>/tahun, yang sangat tinggi dibandingkan dengan ekosistem lainnya. Hal ini menjadikan mangrove sebagai salah satu ekosistem yang paling produktif di dunia, (Alongi, 2014).

Selain itu, pencemaran laut dan sungai juga menjadi ancaman serius bagi ekosistem mangrove. Limbah industri, plastik, dan bahan kimia yang masuk ke dalam ekosistem mangrove dapat merusak kualitas air dan mengancam kehidupan biota laut. (Setiawan et al., 2018).

Perubahan iklim juga memberikan dampak yang signifikan terhadap ekosistem mangrove. Kenaikan suhu dan permukaan laut dapat mengubah kondisi lingkungan di mana mangrove tumbuh, sehingga mengancam keberadaan mereka. Jika tren saat ini berlanjut, diperkirakan 30-50% hutan mangrove di dunia dapat hilang jika tidak ada tindakan mitigasi yang dilakukan.

Salah satu pendekatan yang efektif adalah melalui restorasi mangrove, yang melibatkan penanaman kembali pohon mangrove di area yang telah terdegradasi. Restorasi mangrove dapat meningkatkan keanekaragaman hayati dan produktivitas ekosistem dalam waktu yang relatif singkat.

## **2.4. Struktur Fisik Laut**

Struktur fisik laut terdiri dari berbagai lapisan yang memiliki karakteristik unik dan berperan dalam mendukung kehidupan akuatik. Lautan dibagi menjadi tiga zona utama: zona litoral, zona neritik, dan zona pelagik. Zona litoral adalah area yang terletak dekat dengan pantai, di mana airnya dangkal dan terpengaruh oleh pasang surut. Zona neritik, yang terletak di luar zona litoral hingga kedalaman sekitar 200 meter, merupakan area yang kaya akan keanekaragaman hayati, (Mumby et al., 2014).

Sementara itu, zona pelagik mencakup seluruh bagian laut yang lebih dalam dan lebih jauh dari pantai. Zona ini dibagi lagi menjadi beberapa lapisan, termasuk epipelagik (hingga kedalaman 200 meter), mesopelagik (200-1000 meter), dan batipelagik (lebih dari 1000 meter). Glover dan Smith, (2003). Yang sangat menarik dari struktur fisik laut adalah keberadaan palung laut, seperti Palung Mariana yang merupakan titik terdalam di Bumi dengan kedalaman sekitar 11.034 meter. Ekosistem di palung ini memiliki spesies unik yang dapat bertahan hidup dalam kondisi ekstrem, seperti tekanan tinggi dan suhu rendah.

# Bab 3

## KEANEKARAGAMAN ORGANISME LAUT

### 3.1. Pendahuluan

Lautan, yang meliputi lebih dari 70% permukaan Bumi, merupakan gudang keanekaragaman hayati yang belum sepenuhnya tergali. Dari zona pasang surut yang mudah diakses hingga palung laut dalam yang gelap dan bertekanan tinggi, setiap relung di lautan dihuni oleh organisme dengan adaptasi yang unik dan menakjubkan. Keanekaragaman organisme laut (*marine biodiversity*) tidak hanya merujuk pada jumlah spesies (keanekaragaman genetik dan spesies), tetapi juga pada variasi ekosistem, mulai dari terumbu karang, hutan lamun, keragaman bentuk kehidupan, fungsi ekologis, serta kompleksitas ekosistem yang di huni mulai dari terumbu karang tropis yang dinamis hingga komunitas hidrotermal laut dalam yang ekstrem (Appeltans et al., 2012). Indonesia, yang terletak di jantung Segitiga Terumbu Karang (*Coral Triangle*), memegang peran krusial sebagai pusat keanekaragaman hayati laut global, sekaligus menjadi area prioritas untuk konservasi dan penelitian.

Dalam lima tahun terakhir, pendekatan eksplorasi biodiversitas telah mengalami transformasi paradigma. Teknik konvensional yang mengandalkan morfologi kini diperkuat dan seringkali tergantikan oleh pendekatan molekuler yang revolusioner. Metode seperti *DNA barcoding* dan *metabarcoding* telah membuka jendela baru untuk mengungkap keragaman yang tersembunyi (*cryptic diversity*), di mana spesies yang tampak identik secara morfologis ternyata merupakan kompleks beberapa spesies yang berbeda secara genetik.

Namun, di tengah gencarnya kemajuan ilmu pengetahuan untuk mendokumentasikan keanekaragaman ini, tekanan terhadap ekosistem

laut justru meningkat pada laju yang mengkhawatirkan. Ancaman klasik seperti polusi, penangkapan ikan berlebihan (*overfishing*), dan perusakan habitat fisik (contohnya penambangan karang dan pengurukan pesisir) kini diperparah oleh dampak perubahan iklim global. Pemutihan karang di perairan Indonesia, terutama dipengaruhi oleh kenaikan suhu permukaan laut (SST) dan peristiwa El Niño, telah menjadi semakin lazim, dengan kejadian signifikan dicatat pada tahun 2010 dan 2016. Studi menunjukkan bahwa anomali SST selama peristiwa ini mencapai ambang batas kritis, dengan pemutihan 2016 lebih parah daripada pada tahun 2010, mempengaruhi sekitar 39,4% area karang dibandingkan dengan 31,3% pada tahun 2010 (Wouthuyzen et al., 2017). Gelombang Panas Laut (MHW) di daerah seperti Laut Savu telah memperburuk kondisi ini, dengan MHW bertahan hingga 1.170 hari dan secara signifikan berdampak pada ekosistem karang (Attaqwa et al., 2025). (Wouthuyzen et al., 2020)]. Penelitian terbaru di Karimunjawa juga mengungkapkan bahwa sementara ini pemutihan karang rendah, persentase tinggi karang *Acropora* yang terkena dampak menunjukkan potensi penurunan keanekaragaman karang di masa depan (Munasik et al., 2025). Dengan demikian, fenomena pemutihan karang di Indonesia merupakan interaksi kompleks dari stresor lingkungan, dengan implikasi signifikan bagi keanekaragaman hayati laut. Ancaman lain yang tak kalah mengintai adalah pengasaman laut (*ocean acidification*) yang disebabkan oleh penyerapan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) atmosfer oleh lautan. Proses ini menurunkan pH air laut dan mengganggu proses biomineralisasi organisme-organisme bercangkang kapur, seperti karang, kerang, dan plankton kelompok tertentu seperti pteropods. Penurunan pH berdampak buruk pada tingkat klasifikasi penting untuk kelangsungan hidup organisme ini, dan mengganggu ekosistem laut, yang menyebabkan berubahnya komposisi spesies dan terganggunya jaring makanan (Sun, 2024).

Pada sisi lain, potensi ekonomi yang tersimpan dalam keanekaragaman hayati laut begitu besar, terutama dalam bidang bioteknologi kelautan (*marine biotechnology*). Organisme laut telah berevolusi selama jutaan tahun untuk menghasilkan senyawa bioaktif

unik guna bertahan hidup dalam kompetisi dan kondisi yang keras. Senyawa-senyawa ini menawarkan peluang besar untuk pengembangan obat-obatan baru, kosmetik, dan bahan industri. Organisme laut, terutama ganggang, adalah sumber senyawa bioaktif yang menjanjikan dengan potensi signifikan untuk pengembangan antibiotik dan produksi biofuel. Berbagai senyawa turunan laut, seperti didemnin, bryostatin, dan hapalindoles, menunjukkan sifat antimikroba dan antivirus yang kuat, mengatasi tantangan kesehatan kritis seperti resistensi antibiotik dan infeksi virus yang muncul (Mynderse et al., 1989; Selvaraj, 2024).

Alga yang mencakup varietas mikro dan makro, adalah sumber yang kaya senyawa bioaktif seperti polifenol, karotenoid, dan polisakarida, yang menunjukkan potensi terapeutik yang signifikan karena sifat anti-inflamasi, antioksidan, dan antimikroba. Senyawa ini telah terbukti memodulasi jalur inflamasi, mengurangi stres oksidatif, dan menghambat pertumbuhan mikroba, membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi dalam kedokteran dan nutrasetikal (Adetunji et al., 2023; Matin et al., 2024). Misalnya, polifenol dan karotenoid yang berasal dari ganggang dapat menekan produksi sitokin pro-inflamasi dan mengaktifkan jalur antioksidan, sehingga menawarkan efek perlindungan terhadap penyakit kronis seperti kanker dan gangguan kardiovaskular (Matin et al., 2024; Singh et al., 2023). Selanjutnya, kemajuan dalam teknik ekstraksi, seperti ekstraksi fluida superkritis, meningkatkan hasil dan kemurnian senyawa ini, memfasilitasi penggunaannya dalam farmasi, nutraceuticals, dan biofuel (Andhere & Jayasri, 2024). Integrasi bioaktif laut ke dalam pengobatan modern dan produksi biofuel berkelanjutan menggarisbawahi perlunya penelitian dan inovasi berkelanjutan di bidang ini (Selvaraj, 2024). Oleh karena itu, terdapat kesenjangan dan urgensi yang nyata. Di satu sisi, kita masih berada dalam fase awal untuk sepenuhnya memahami dan mendokumentasikan kekayaan hayati laut. Di sisi lain, keanekaragaman yang belum sempat kita kenal ini sedang terdegradasi dengan cepat sebelum kita sempat mempelajari dan memanfaatkannya secara berkelanjutan.

### **3.2. Tingkatan Keanekaragaman Hayati Laut**

Pemahaman tentang keanekaragaman hayati laut tidak hanya terbatas pada jumlah spesies yang menghuni perairan, tetapi mencakup berbagai tingkat organisasi kehidupan yang saling berkaitan. Konsep tingkatan keanekaragaman hayati laut memberikan kerangka kerja penting untuk memahami kompleksitas kehidupan di laut dan bagaimana berbagai komponen ini berinteraksi membentuk sistem yang dinamis. Keanekaragaman hayati laut dapat diklasifikasikan ke dalam empat tingkatan utama yang membentuk hierarki ekologis: keanekaragaman genetik, keanekaragaman spesies, keanekaragaman fungsional, dan keanekaragaman ekosistem. Setiap tingkatan memiliki peran khusus dan saling mempengaruhi dalam menjaga kestabilan dan ketahanan ekosistem laut.

#### **3.2.1. Keanekaragaman Genetik**

Keragaman genetik organisme laut merupakan komponen penting dari keanekaragaman hayati, mempengaruhi ketahanan spesies dan fungsi ekosistem. Penelitian menunjukkan bahwa keragaman genetik di lingkungan laut menunjukkan pola spasial yang berbeda, terutama didorong oleh faktor ekologis seperti suhu dan produktivitas. Studi pada ikan laut mengungkapkan bahwa keragaman genetik mitokondria mengikuti gradien lintang dan longitudinal, memuncak di dekat khatulistiwa, terutama di Segitiga Karang, dan berkorelasi positif dengan suhu permukaan laut dan konsentrasi klorofil. Ini mendukung hipotesis energi kinetik, yang menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi meningkatkan tingkat metabolisme dan mutasi, sehingga meningkatkan keragaman mitokondria, dan hipotesis kekayaan produktivitas, yang menyatakan bahwa daerah kaya sumber daya mendukung populasi yang lebih besar dengan keragaman genetik yang lebih besar (Clark & Pinsky, 2023, 2024). Keragaman genetik secara signifikan juga berdampak pada fungsi ekosistem di seluruh tingkat trofik seringkali mencerminkan efek keanekaragaman spesies tetapi dalam arah yang berlawanan. Sementara keragaman genetik berkorelasi positif dengan berbagai fungsi ekosistem, keanekaragaman spesies sering menunjukkan korelasi

negatif (Fargeot et al., 2024, 2025). Selain itu, keragaman genetik pada spesies pembentuk habitat laut, seperti karang dan lamun, menunjukkan tren lintang bimodal yang dipengaruhi oleh taksonomi dengan korelasi positif antara kekayaan spesies dan keragaman genetik pada skala ekoregion (Barreiro et al., 2023). Gradien kedalaman juga berperan dalam perubahan genetik, seperti yang terlihat pada populasi gorgonian merah. Dimana menunjukkan bahwa lokasi yang lebih dalam memiliki keragaman genetik yang lebih tinggi karena berkurangnya tekanan termal (Pilczynska et al., 2019).

### **3.2.2. Keanekaragaman Spesies**

Keanekaragaman spesies laut merupakan aspek penting dari keanekaragaman hayati global, yang mencakup beragam organisme dan ekosistem. Perkiraan saat ini menunjukkan bahwa sekitar 226.000 spesies laut telah dijelaskan, namun jumlah totalnya mungkin berkisar antara 2 hingga 100 juta, menyoroti kesenjangan yang signifikan dalam pemahaman kita (Sun, 2018). Sensus Kehidupan Laut telah mendokumentasikan lebih dari 6,5 juta entri, mengungkapkan titik panas keanekaragaman hayati, terutama di Asia Tenggara, di mana karang dan ikan pesisir tumbuh subur (Pennisi, 2010). Namun, keanekaragaman hayati laut menghadapi ancaman parah dari kerusakan habitat dan eksploitasi berlebihan, dengan hanya 11% spesies yang secara resmi dijelaskan, yang mengarah pada potensi remeh risiko kepunahan (Luypaert et al., 2020) (Snelgrove & Danovaro, 2023). Kekayaan spesies lokal tampak stabil, tetapi perubahan komposisi spesies karena spesies invasif menjadi prihatin (Luypaert et al., 2020). Upaya konservasi yang komprehensif sangat penting, karena keanekaragaman hayati laut mendukung fungsi dan layanan ekosistem yang penting bagi kesejahteraan manusia (Snelgrove & Danovaro, 2023) (Sun, 2018).

### **3.2.3. Keanekaragaman Fungsional**

Keanekaragaman fungsional laut menekankan variasi peran ekologis organisme yang diukur melalui sifat-sifat fungsional (*traits*) ketimbang hanya taksonomi, dan dapat dinilai pada tingkat individu,

komunitas, atau seascape untuk menautkan struktur komunitas ke fungsi ekosistem. Konsep ini melengkapi definisi biodiversitas konvensional dan mendorong penilaian yang kontekstual sesuai tujuan pengelolaan.

#### **3.2.4. Keanekaragaman Ekosistem**

Keanekaragaman ekosistem laut merupakan komponen penting dari keanekaragaman hayati global, mencakup berbagai habitat seperti terumbu karang, hutan bakau, dan hamparan lamun, yang secara kolektif mendukung beragam spesies dan fungsi ekologis (Snelgrove & Danovaro, 2023) (Salayan et al., 2024). Ekosistem ini menyediakan layanan penting, termasuk regulasi iklim, siklus nutrisi, dan sumber daya untuk mata pencaharian manusia. Menyoroti pentingnya mereka bagi keseimbangan ekologis dan kesejahteraan manusia, keanekaragaman hayati laut menghadapi ancaman signifikan dari perubahan iklim, polusi, penangkapan ikan yang berlebihan, dan degradasi habitat sehingga memerlukan upaya konservasi yang mendesak (Judijanto, 2025; Snelgrove & Danovaro, 2023). Strategi pengelolaan yang efektif, termasuk pembentukan kawasan lindung laut dan peningkatan kolaborasi internasional, sangat penting untuk mengurangi ancaman ini dan melestarikan keanekaragaman hayati laut untuk generasi masa depan (Judijanto, 2025; Salayan et al., 2024) Meskipun penelitian dan inisiatif konservasi sedang berlangsung, masih ada kesenjangan dalam memahami pendorong hilangnya keanekaragaman hayati dan konsekuensi ekologis dari perubahan ini, menggarisbawahi perlunya penyelidikan ilmiah yang berkelanjutan dan integrasi kebijakan (Judijanto, 2025; Snelgrove & Danovaro, 2023)

### **3.3. Sebaran Vertikal Dan Horizontal Organisme Laut**

#### **3.3.1. Sebaran Vertikal Organisme Laut**

Sebaran vertikal organisme laut, khususnya dalam ekosistem perairan, sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor fisik, kimia, dan lingkungan. Organisme memiliki empati lapisan air yang berbeda, dari permukaan hingga dasar, tergantung pada kebutuhan dan adaptasi

mereka terhadap lingkungan. Distribusi ini mencakup berbagai kelompok organisme, dari organisme hingga ikan.

### **Distribusi Berdasarkan Kelompok Organisme**

- 1. Plankton** : terdiri dari fitoplankton dan zooplankton merupakan komponen penting dari ekosistem perairan yang memainkan peran penting di lingkungan laut dan air tawar. Fitoplankton atau mikroalga adalah produsen utama yang melakukan fotosintesis dan memiliki kontribusi pada sekitar setengah dari produksi primer dunia dan membentuk dasar jaring makanan akuatik (Brierley, 2017; Jahan, 2023). Mereka membutuhkan sinar matahari untuk fotosintesis, yang membatasi mereka ke lapisan atas lautan di mana penetrasi cahaya cukup (Siregar et al., 2014; Zainuri et al., 2022). Zooplankton, di sisi lain, adalah hewan mikroskopis yang terutama memakan fitoplankton, menghubungkan produsen primer dengan tingkat trofik yang lebih tinggi dan membantu dalam daur ulang nutrisi (Pereira, 2025) Distribusi dan kelimpahan fitoplankton dan zooplankton dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti cahaya, suhu, dan ketersediaan nutrisi (Pereira, 2025; Zainuri et al., 2022)
- 2. Perifiton** : Periphyton adalah komunitas mikroorganisme yang kompleks, termasuk ganggang, bakteri, jamur, dan protozoa, yang menempel pada permukaan yang terendam di lingkungan perairan, membentuk ekosistem mikro yang vital. Komunitas ini memainkan peran penting dalam produksi primer dan siklus nutrisi melintasi berbagai badan air, dari kolam kecil hingga sungai besar dan lautan, beradaptasi dengan berbagai kondisi trofik (Bauk, 2020). Periphyton berfungsi sebagai indikator biologis yang sangat baik untuk menilai kualitas air dan status ekologis karena keanekaragaman taksonominya yang tinggi, respons yang cepat terhadap perubahan lingkungan, dan kemudahan pengambilan sampel. Dalam ekosistem seperti Everglades, periphyton juga memainkan peran penting dalam proses biogeokimia, mempengaruhi fluks material dan kesehatan ekosistem, terutama dalam kondisi eutrofikasi (Hagerthey et al., 2011).

- 3. Nekton :** Nekton merupakan kelompok organisme akuatik yang mampu berenang secara independen dari arus air. Hal ini yang membedakannya dari plankton, yang melayang bersama arus. Kelompok ini mencakup beragam spesies seperti ikan, cephalopoda, mamalia laut, reptil, dan beberapa krustasea, yang menghuni berbagai zona kedalaman samudera dari lapisan epipelagik hingga lapisan bathypelagik (Elomari, 2022)] (Gong-zhao & Wen-lian, 1994). Ikan, terutama yang berasal dari kelas Chondrichthyes dan Osteichthyes, adalah yang paling keanekaragaman hayati dan banyak di antara nekton, diikuti oleh cephalopoda dan mamalia laut seperti cetacea dan pinnipeds (Elomari, 2022; Xu & Zheng, 1994). Distribusi spasial dan kelimpahan nekton dipengaruhi oleh migrasi musiman, seperti yang terlihat pada populasi salmon Pasifik di Pasifik Barat Laut, di mana biomassa mereka dapat merupakan bagian signifikan dari komunitas nekton selama migrasi pra-pemijahan (Khoruzhiy et al., 2013; Starovoytov, 2024). Komunitas nekton mengalami penurunan kekayaan spesies dan pergeseran spesies dominan karena aktivitas manusia dan perubahan iklim (F. Li et al., 2014; Song et al., 2012). Dinamika komunitas nekton juga dipengaruhi oleh variasi antar tahunan, seperti yang diamati di cekungan Aleutian dan Commander, di mana perubahan iklim telah menyebabkan fluktuasi signifikan dalam biomassa nekton dan komposisi spesiesnya (Somov, 2015). Secara keseluruhan, nekton memainkan peran penting dalam ekosistem laut, dengan distribusi dan kelimpahannya mencerminkan perubahan lingkungan yang lebih luas dan dampak antropogenik di berbagai wilayah samudera (Khoruzhiy, 2011; Starovoytov, 2024).
- 4. Makroinvertebrata dan Makrobentos :** Makroinvertebrata dan makrobentos laut memainkan peran penting dalam ekosistem perairan yang berfungsi sebagai bioindikator dan berkontribusi pada layanan ekosistem. Makroinvertebrata yang meliputi organisme seperti krustasea, polychaetes, dan bivalvia, sangat penting untuk siklus nutrisi, oksigenasi sedimen, dan sebagai sumber makanan untuk tingkat trofik yang lebih tinggi (Cacciatore et al., 2025).

Distribusi dan kelimpahan makroinvertebrata dipengaruhi oleh faktor abiotik seperti salinitas, suhu, dan komposisi sedimen, serta interaksi biotik seperti persaingan dan predasi (Cacciatore et al., 2025; Strayer, 2009)

Secara keseluruhan, sebaran vertikal organisme laut menciptakan struktur komunitas yang kompleks. Fitoplankton dan zooplankton mendominasi zona permukaan yang kaya cahaya, sementara perifiton, makroinvertebrata, dan bentos menghambat substrat dasar. Ikan, sebagai nekton, bergerak di antara lapisan lapisan ini, menghubungkan berbagai bagian ekosistem perairan.

### **3.3.2. Sebaran Horisontal Organisme Laut**

Pola distribusi horizontal organisme laut, terutama plankton dan echinodermata, menunjukkan variabilitas signifikan yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Di perairan Bawean, kepadatan fitoplankton tertinggi di wilayah utara, sedangkan zooplankton menunjukkan distribusi acak, dengan genera dominan termasuk *Caetoceros* dan *Ceratium* (Djumanto et al., 2009). Pola distribusi horizontal organisme laut dipengaruhi oleh interaksi kompleks faktor lingkungan, ekologi, dan perilaku. Orientasi dan kedalaman pesisir secara signifikan mempengaruhi distribusi kumpulan bentik subtidal dengan mengubah gerakan air dan ketersediaan cahaya, yang pada gilirannya mempengaruhi kelimpahan dan distribusi makroalga dan invertebrata (Martins et al., 2013). Variasi spatio-temporal dalam komunitas bentik didorong oleh gradien lingkungan seperti perubahan latitudinal dan batimetri, serta fenomena periodik seperti fluktuasi pasang surut dan perubahan musiman dalam pelepasan air tawar (Abdul Jaleel et al., 2022). Di zona pesisir, faktor-faktor seperti fitur geomorfologi, paparan gelombang, dan suhu air memainkan peran penting dalam distribusi habitat, dengan berbagai faktor yang mempengaruhi zona infralittoral mediolittoral dan atas secara berbeda (Cefalì et al., 2016). Perilaku mencari makan juga berdampak pada penyebaran dan konektivitas organisme laut, menunjukkan bahwa perilaku skala halus dapat menyebabkan populasi yang lebih terisolasi daripada yang diperkirakan

sebelumnya (Woodson & McManus, 2007). Distribusi plankton dibentuk oleh parameter hidroiklim seperti suhu dan arus samudera, dengan pola biogeografi yang berbeda diamati di berbagai wilayah iklim (Beaugrand, 2017). Terlepas dari dampak manusia, faktor abiotik terus mendukung pola biogeografi yang konsisten di seluruh kehidupan laut (Holman et al., 2020).

### **A. Gradien Latitudinal dan Longitudinal**

Gradien latitudinal dan longitudinal secara signifikan mempengaruhi berbagai pola ekologi dan biologis, termasuk plastisitas fenotipik, kekayaan spesies, dan variasi suhu. Penelitian menunjukkan bahwa populasi di garis lintang yang lebih tinggi menunjukkan plastisitas fenotipik yang lebih besar sebagai respons terhadap fluktuasi suhu, sedangkan populasi di sepanjang gradien longitudinal menunjukkan variasi dalam menanggapi perubahan presipitasi (J. Li et al., 2016). Secara keseluruhan, interaksi antara lintang, bujur, dan variabilitas iklim sangat penting untuk memahami respons adaptif spesies terhadap perubahan lingkungan, terutama dalam konteks perubahan iklim global (Pearce-Higgins et al., 2015; Willig & Presley, 2013).

### **B. Bioregionalisasi dan Batas Biogeografis**

Bioregionalisasi dan batas biogeografi organisme laut dibentuk oleh interaksi kompleks faktor lingkungan dan proses sejarah. Studi terbaru telah mengidentifikasi batas-batas biogeografi yang berbeda di sepanjang garis pantai, mengungkapkan 52 ekoregion dan 23 provinsi biogeografi, terutama dipengaruhi oleh gradien termohalin dan fitur geomorfologi yang membatasi penyebaran spesies (Tosetto et al., 2025). Di Belahan Bumi Utara, pengelompokan berbasis jaringan komunitas ikan demersal telah menggambarkan delapan partisi biogeografis utama, menyoroti area kekayaan spesies dan endemisitas tinggi, sementara juga mengatasi keterbatasan kriteria biogeografi tradisional (MacNeil & Scotti, 2025) Selanjutnya, stabilitas biogeografi bentik pesisir selama 10 juta tahun terakhir menunjukkan bahwa gradien suhu sangat penting dalam mendefinisikan bioregion modern, dengan catatan fosil menunjukkan konsistensi dalam pola biogeografi meskipun ada

perubahan iklim (Kocsis et al., 2018). Secara keseluruhan, alam biogeografi laut mencakup habitat yang beragam, dengan implikasi signifikan untuk konservasi keanekaragaman hayati dan studi perubahan iklim, karena mencerminkan konteks evolusi distribusi spesies laut (Costello et al., 2017).

### **C. Pengaruh Sistem Sirkulasi Laut**

Sistem sirkulasi laut secara signifikan mempengaruhi keanekaragaman organisme laut dengan mempengaruhi penyebaran spesies, perakitan komunitas, dan pola biogeografi. Arus laut memainkan peran penting dalam mengangkut organisme laut, terutama selama tahap awal kehidupan mereka, yang sering bersifat planktonik dan dibawa secara pasif oleh pergerakan air. Mekanisme transportasi ini dapat mengarah pada pembentukan metakomuni besar dan berdampak pada keanekaragaman hayati lokal dengan memperkenalkan spesies alokton, yang terkadang dapat mengalahkan spesies asli, sehingga mengurangi keanekaragaman lokal. Namun, interaksi arus dengan topografi dan perubahan musiman dapat menciptakan hotspot keanekaragaman hayati dengan mempertahankan spesies asli dan mempromosikan diferensiasi ceruk (Tosetto et al., 2025).

#### **Penyebaran Spesies dan Perkumpulan Komunitas**

- Arus laut yang kuat, seperti yang ada di Sirkulasi Terbalik Meridian Atlantik, dapat dengan cepat mengangkut spesies pesisir menjauh dari habitatnya, menantang perekrutan mereka dan mengarah ke komunitas homogen yang didominasi oleh penyebar terbaik (Tosetto et al., 2025).
- Sebaliknya, fitur oseanografi dinamis seperti pusaran dan arus balik dapat menciptakan zona retensi yang mendukung keanekaragaman hayati lokal yang lebih tinggi dengan memungkinkan penyortiran spesies berdasarkan ceruk ekologis (Tosetto et al., 2025).

#### **Pola Biogeografis**

- Arus laut dan faktor abiotik, seperti suhu, secara signifikan mempengaruhi distribusi biogeografis spesies laut. Misalnya,

pergerakan massa air dapat mempengaruhi tingkat dan keragaman pemukiman larva, seperti yang diamati di sepanjang Pulau Santa Cruz, di mana front dinamis antara massa air meningkatkan keragaman pemukiman (Gosnell et al., 2014).

- Di Mediterania, sirkulasi laut dan variabilitas abiotik ditemukan untuk menyusun populasi laut, dengan spesies yang berbeda merespons faktor-faktor ini berdasarkan sifat ekologisnya (Rwawi et al., 2025).

#### **Keanekaragaman Spesies Langka**

- Arus laut dapat meningkatkan keanekaragaman spesies langka, terutama di komunitas planktonik. Penelitian telah menunjukkan bahwa adveksi kacau oleh arus menyebabkan peningkatan yang lebih curam dalam jumlah spesies langka yang diamati, menunjukkan bahwa arus berdampak positif pada keragaman mikroba akuatik langka (Martín et al., 2020).

### **3.4. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Distribusi Organisme Laut**

Distribusi organisme laut dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara faktor fisik, kimia, dan biologis. Faktor-faktor ini, termasuk didalamnya parameter lingkungan seperti suhu, salinitas, arus laut, dan cahaya, serta proses biologis dan sifat spesifik spesies. Memahami faktor-faktor ini sangat penting untuk memprediksi perubahan keanekaragaman hayati laut dan dinamika ekosistem, terutama dalam konteks perubahan iklim.

#### **3.4.1. Faktor Fisika-Kimia**

- **Suhu dan Salinitas** : Suhu dan salinitas sangat penting dalam menentukan distribusi organisme laut. Suhu mempengaruhi laju metabolisme dan proses fisiologis, sedangkan salinitas mempengaruhi regulasi osmotik dan kesesuaian habitat (Manokaran et al., 2022).
- **Oksigen Terlarut dan pH** : Kadar oksigen dan pH dapat membatasi kelangsungan hidup dan distribusi spesies laut, terutama di lingkungan bentik di mana parameter ini berfluktuasi secara signifikan (Manokaran et al., 2022).

- **Nutrisi dan Kekeruhan** : Ketersediaan nutrisi mempengaruhi produktivitas primer yang pada gilirannya mempengaruhi ketersediaan makanan untuk tingkat trofik yang lebih tinggi. Kekeruhan dapat memengaruhi penetrasi cahaya sehingga akan mempengaruhi organisme dalam melakukan fotosintesis (Manokaran et al., 2022).

### 3.4.2. Faktor Biologis dan Ekologis

- **Ciri Spesies** : Sifat-sifat seperti toleransi termal dan strategi reproduksi berperan dalam bagaimana spesies merespons perubahan lingkungan dan mendistribusikan dirinya (Molinos et al., 2022).
- **Interaksi Biologis** : Predasi, persaingan, dan hubungan simbiosis dapat mempengaruhi distribusi spesies dan struktur komunitas (Satheesh & El-Sherbiny, 2022). Persaingan, baik eksploitatif maupun interferensi, mempengaruhi distribusi geografis spesies dan ukuran populasi, seringkali mengarah pada diferensiasi ceruk di mana spesies hidup berdampingan dengan mengeksplorasi sumber daya yang berbeda secara efisien (Price, 2023). Hubungan simbiosis, termasuk mutualisme, parasitisme, dan komensalisme, selanjutnya berkontribusi pada dinamika komunitas dengan memfasilitasi atau menghambat interaksi spesies. Misalnya, interaksi mutualistik dapat meningkatkan keanekaragaman hayati dengan mempromosikan koeksistensi, sementara parasitisme dapat mengatur populasi inang (Lohnes, 2022; Scott et al., 2022). Kekuatan dan sifat interaksi ini dapat bervariasi di berbagai habitat dan wilayah biogeografi. Hal ini dapat mempengaruhi penyusunan komunitas dan distribusi sifat, seperti yang diamati pada krustasea epifauna di mana intensitas predasi dan garis lintang mempengaruhi dispersi sifat komunitas (Gross et al., 2022). Selain itu, interaksi tidak langsung, seperti pengurangan herbivora melalui kehadiran predator, menyoroiti kompleksitas jaringan ekologi dan perannya dalam struktur komunitas (Lohnes, 2022).

### 3.4.3. Faktor Oseanografi Fisik

- **Arus dan Pasang Lautan:** Ini mempengaruhi penyebaran larva dan transportasi nutrisi, mempengaruhi distribusi dan kelimpahan organisme laut (Elomari, 2022).
- **Cahaya dan Tekanan:** Ketersediaan cahaya mempengaruhi fotosintesis dan migrasi vertikal diel, sedangkan tekanan mempengaruhi fisiologi organisme laut dalam (Elomari, 2022).

### 3.5. Teknologi dan Metode Penelitian Terbaru

Kemajuan terbaru dalam teknologi dan metode untuk mempelajari keanekaragaman organisme laut telah secara signifikan mengubah bidang ini, terutama melalui pendekatan biologi molekuler dan omik. Inovasi ini telah memungkinkan para peneliti untuk mengeksplorasi keanekaragaman mikroba yang luas dan sebagian besar tidak berbudaya di lingkungan laut, yang mengarah pada pemahaman yang lebih dalam tentang dinamika ekologi dan interaksi spesies. Bagian berikut menguraikan kemajuan utama di bidang ini.

#### A. Teknik Biologi Molekuler

**Ekologi Molekuler :** Ketergantungan pada biologi molekuler telah menjadi penting karena sifat sebagian besar mikroba laut yang tidak dapat dibudidayakan, memungkinkan eksplorasi keanekaragaman mikroba melalui pengurutan DNA dan studi filogenetik (X. Li et al., 2007; Tian, 2013).

**Metagenomik :** Pendekatan ini memfasilitasi studi materi genetik yang dipulihkan langsung dari sampel lingkungan, memberikan wawasan tentang reservoir genetik mikroba laut tanpa perlu budidaya (X. Li et al., 2007).

#### B. Teknologi Omics

**Genomik dan Transkriptomik :** Teknik-teknik ini telah meningkatkan pemahaman tentang keanekaragaman dan ekologi zooplankton,

menyempurnakan identifikasi spesies dan penilaian struktur komunitas (Matos et al., 2020).

**Investigasi Lapangan** : Inovasi terbaru dalam strategi pengambilan sampel dan analisis molekuler in situ telah meningkatkan kesetiaan data yang dikumpulkan dari ekosistem laut, memungkinkan penilaian ekologi yang lebih akurat (Huang et al., 2023).

### **C. Alat untuk Manajemen Ekosistem**

Alat yang muncul untuk pengelolaan ekosistem laut merevolusi cara para ilmuwan dan pembuat kebijakan memahami dan melindungi lingkungan laut. Alat-alat ini berupa teknologi pemantauan hingga sistem pemodelan canggih, masing-masing berkontribusi pada strategi manajemen yang lebih komprehensif dan efektif. Integrasi teknologi ini sangat penting untuk mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh perubahan iklim, tekanan antropogenik, dan kebutuhan untuk eksploitasi sumber daya laut yang berkelanjutan.

### **D. Teknologi Pemantauan Tingkat Lanjut**

- **Pemantauan dan Otomasi Cerdas** : Penggunaan jaringan pelampung pintar (SBN), kendaraan bawah air otonom (AUV), dan mikrosistem multi-sensor (MSM) memungkinkan pemantauan waktu nyata dan manajemen adaptif lingkungan laut. Teknologi ini dapat secara mandiri merespons perubahan lingkungan dan mengirim peringatan untuk intervensi manusia (Glaviano et al., 2022). AUV, dilengkapi dengan sistem penginderaan cerdas, memfasilitasi analisis on-board dan perencanaan adaptif, melampaui metode pengambilan sampel tradisional dengan memberikan wawasan langsung ke dalam kondisi ekologi (Woodward et al., 2017). Selanjutnya, penyebaran AUV terkoordinasi untuk pemantauan skala besar mengatasi tantangan pencemaran laut, memungkinkan penilaian komprehensif kontaminan bawah air (Flores et al., 2020).
- **Pemantauan Satelit dan Drone** : Pemantauan satelit dan penggunaan drone udara dan bawah air menyediakan data

resolusi tinggi di area yang luas, meningkatkan kemampuan untuk memantau ekosistem pesisir dan laut dalam. Teknologi ini didukung oleh kemajuan kecerdasan buatan dan pembelajaran mendalam, yang membantu memproses volume data besar (Cavanaugh et al., 2024). Kemajuan dalam kecerdasan buatan dan pembelajaran mendalam merupakan bagian integral dari teknologi ini, memungkinkan pemrosesan volume data yang besar dan menggambar wawasan yang sebelumnya tidak dapat dicapai. Kemajuan teknologi ini, ditambah dengan tren dalam cloud dan edge computing, menawarkan peluang yang menjanjikan untuk masa depan pemetaan dan pemantauan drone, memfasilitasi pemahaman yang lebih baik dan interaksi berkelanjutan dengan ekosistem pesisir (Cavanaugh et al., 2024; Joyce et al., 2022).

#### **E. Pemodelan Ekosistem dan Perencanaan Tata Ruang**

- **Model Ekosistem Laut (MEM)** : Model Ekosistem Laut (MEM) adalah alat penting untuk memahami dinamika ekosistem dan memprediksi perubahan di masa depan, memainkan peran penting dalam perencanaan tata ruang laut (MSP) dengan menyeimbangkan manfaat ekonomi dengan kesehatan ekosistem. Terlepas dari potensinya, MEM kurang dimanfaatkan karena tantangan teknis dan kurangnya validasi formal, kalibrasi, dan kuantifikasi ketidakpastian, yang merusak kredibilitas mereka di arena pembuatan kebijakan (Steenbeek, 2024).
- **Sistem Informasi Geografis (GIS)** : GIS dan kartografi diagnostik sangat penting untuk mengelola kawasan lindung laut (MPA). Alat-alat ini memfasilitasi visualisasi heterogenitas spasial dan variabilitas temporal, membantu pengambilan keputusan yang efektif dan perencanaan konservasi (Meidinger et al., 2013)

#### **F. Teknologi Restorasi dan Konservasi**

- Platform Robot untuk Restorasi Laut Masa Depan : Kendaraan yang dioperasikan dari jarak jauh (ROV) dan AUV yang dilengkapi

dengan sensor canggih digunakan untuk restorasi ekosistem laut dalam. Platform ini dapat melakukan pemetaan resolusi tinggi dan pemantauan real-time, penting untuk memulihkan habitat seperti terumbu karang air dingin (Aguzzi et al., 2024).

# Bab 4

## STRUKTUR DAN ANATOMI ORGANISME LAUT

### 4.1. Pendahuluan

Laut merupakan ekosistem yang sangat luas dan kompleks, dihuni oleh beragam organisme dengan bentuk tubuh, ukuran, dan struktur yang unik. Setiap organisme laut memiliki struktur dan anatomi yang dirancang secara khusus untuk bertahan hidup dalam lingkungan yang dinamis mulai dari permukaan laut yang penuh cahaya hingga kedalaman laut yang gelap dan bertekanan tinggi (Anggoro dan Ridlo, 2019).

Secara umum, struktur mengacu pada bentuk luar dan susunan tubuh suatu organisme, sedangkan anatomi menjelaskan bagian-bagian dalam tubuh serta hubungan antarorgan yang membentuk sistem kehidupan. Dalam konteks biologi laut, pemahaman terhadap struktur dan anatomi organisme laut menjadi dasar untuk memahami fungsi fisiologis, adaptasi ekologis, serta peran organisme tersebut dalam ekosistem laut.

Setiap kelompok organisme laut mulai dari plankton, invertebrata, ikan, mamalia laut, hingga tumbuhan laut seperti lamun dan alga memiliki keunikan morfologi dan anatomi yang merefleksikan strategi hidupnya. Misalnya, bentuk tubuh ikan yang aerodinamis memungkinkannya berenang cepat di arus laut, sementara gurita memiliki lengan fleksibel dengan ribuan penghisap untuk membantu bergerak dan menangkap mangsa di dasar laut. Sementara itu, paus dan lumba-lumba yang tergolong mamalia laut menunjukkan adaptasi anatomi berupa lapisan lemak tebal (blubber) yang berfungsi untuk menjaga suhu tubuh di perairan dingin serta sistem pernapasan yang efisien untuk menyelam dalam waktu lama (Daryono dkk., 2025)

Selain itu, anatomi organisme laut juga mencerminkan adaptasi fisiologis terhadap tekanan, salinitas, dan suhu air laut. Contohnya, ikan laut memiliki sistem osmoregulasi yang memungkinkan mereka menjaga keseimbangan ion dan air di dalam tubuh, sementara hewan laut dalam (deep-sea organisms) mengembangkan struktur sel dan jaringan yang tahan terhadap tekanan ekstrem.

Pemahaman tentang struktur dan anatomi organisme laut tidak hanya penting dalam konteks akademik, tetapi juga memiliki aplikasi praktis dalam bidang perikanan, konservasi, bioteknologi laut, dan pengelolaan sumber daya kelautan. Dengan mengetahui bagaimana tubuh organisme laut berfungsi dan beradaptasi, para ilmuwan dan pengelola sumber daya dapat merancang strategi yang lebih efektif untuk menjaga keberlanjutan ekosistem laut, mencegah eksploitasi berlebihan, serta melestarikan keanekaragaman hayati laut yang menjadi penopang kehidupan di bumi.

#### **4.2. Tingkatan Struktur Kehidupan di Laut**

Setiap organisme laut tersusun dari unit terkecil kehidupan yang disebut sel. Sel merupakan struktur dasar yang menjalankan berbagai fungsi vital seperti metabolisme, pertumbuhan, dan reproduksi. Di lingkungan laut yang beragam mulai dari perairan dangkal yang kaya cahaya hingga laut dalam yang gelap dan bertekanan tinggi sel-sel organisme laut telah mengalami berbagai adaptasi morfologis dan fisiologis agar dapat bertahan. Misalnya, sel-sel pada alga memiliki kloroplas yang efisien dalam menangkap cahaya untuk fotosintesis, sementara sel-sel hewan laut dalam mampu berfungsi optimal pada tekanan ekstrem dan suhu rendah (Djumanto dan Triyanto, 2020).

Kumpulan sel yang memiliki bentuk dan fungsi serupa kemudian membentuk jaringan. Pada hewan laut, terdapat beberapa jenis jaringan utama seperti jaringan epitel (pelapis tubuh), jaringan otot (penggerak), jaringan saraf (penghantar impuls), dan jaringan ikat (penyokong tubuh). Setiap jaringan memiliki peran khusus dalam mendukung kehidupan organisme. Misalnya, jaringan epitel pada ikan bertanggung jawab untuk

pertukaran gas dan ion melalui insang, sedangkan jaringan otot berperan penting dalam pergerakan dan migrasi di laut (Luthfi, 2017).

Beberapa jaringan yang bekerja sama dalam melaksanakan fungsi tertentu akan membentuk organ. Contohnya, pada ikan, organ seperti jantung, insang, hati, dan ginjal memiliki struktur dan fungsi yang kompleks. Insang berfungsi untuk mengambil oksigen dari air laut dan membuang karbon dioksida, sementara hati berperan dalam metabolisme dan detoksifikasi zat. Setiap organ memiliki anatomi khas yang menyesuaikan dengan kondisi lingkungan laut, seperti tekanan air, kadar garam, dan ketersediaan oksigen.

Selanjutnya, organ-organ yang saling berhubungan dan bekerja bersama untuk melaksanakan fungsi yang lebih luas akan membentuk sistem organ. Misalnya, sistem pernapasan pada ikan terdiri dari insang, mulut, dan sistem sirkulasi darah yang membawa oksigen ke seluruh tubuh. Sistem pencernaan berfungsi untuk mengolah makanan menjadi energi, sementara sistem reproduksi memastikan keberlanjutan populasi spesies di lautan.

Contohnya, pada ikan, sel otot membentuk jaringan otot yang berperan dalam pergerakan sirip dan tubuh. Jaringan ini berkoordinasi dengan sistem rangka, yang memberikan dukungan struktural, sistem saraf yang mengatur gerakan melalui impuls listrik, serta sistem sirkulasi yang menyediakan oksigen dan nutrisi ke jaringan otot. Koordinasi antar sistem ini memungkinkan ikan untuk berenang dengan efisien, menghindari predator, dan mencari makanan di berbagai lapisan laut.

Tingkatan struktur kehidupan ini menunjukkan bahwa kehidupan di laut tersusun secara terorganisir dan saling bergantung. Dari sel yang mikroskopis hingga organisme besar seperti paus, setiap tingkat organisasi berperan penting dalam menjaga keseimbangan dan keberlanjutan ekosistem laut. Pemahaman terhadap hierarki struktur kehidupan ini menjadi dasar penting dalam mempelajari anatomi, fisiologi, dan ekologi organisme laut, sekaligus membuka wawasan tentang bagaimana kehidupan mampu beradaptasi dan berkembang di salah satu lingkungan paling dinamis di bumi laut.

### **4.3. Struktur Luar (Morfologi) Organisme Laut**

Struktur luar atau morfologi merupakan bentuk fisik dan penampilan eksternal organisme laut yang mencerminkan hasil adaptasi terhadap lingkungan hidupnya. Morfologi memiliki peran penting dalam mendukung kelangsungan hidup, pergerakan, perlindungan, pencarian makanan, hingga reproduksi. Setiap organisme laut mengembangkan bentuk tubuh yang unik sesuai dengan gaya hidup (life style) dan habitatnya baik di perairan dangkal, zona pasang surut, kolom air pelagis, maupun laut dalam (Meinita *dkk.*, 2022).

Morfologi tidak hanya berfungsi secara mekanis atau fisiologis, tetapi juga menjadi indikator evolusi dan dasar penting dalam taksonomi, yaitu pengelompokan dan identifikasi spesies berdasarkan kesamaan ciri fisik dan anatomi luar. Melalui morfologi, para ilmuwan dapat menelusuri hubungan kekerabatan antarorganisme, proses evolusi, serta adaptasi yang terjadi akibat perubahan lingkungan laut dari waktu ke waktu (Natsir *dkk.*, 2022).

Pada organisme laut, variasi morfologi sangat luas dan sering kali berkaitan erat dengan fungsi ekologisnya. Misalnya, bentuk tubuh streamline (torpedo) pada ikan pelagis seperti tuna dan cakalang memungkinkan mereka berenang cepat menembus arus kuat di laut terbuka. Sebaliknya, ikan demersal seperti kerapu atau pari memiliki tubuh pipih dorsoventral, yang membantu mereka bersembunyi di dasar perairan dan memanfaatkan substrat sebagai kamuflase terhadap predator.

Hewan invertebrata laut seperti krustasea (udang, kepiting, dan lobster) memiliki eksoskeleton keras dari kitin atau kalsium karbonat sebagai perlindungan dan penopang tubuh. Moluska seperti siput laut dan kerang mengembangkan cangkang spiral atau bilateral simetris, berfungsi sebagai rumah dan pelindung diri dari gelombang maupun predator. Ubur-ubur dan anemon laut memiliki struktur tubuh hidrostatis yang lentur dan transparan, memungkinkan mereka mengapung serta bergerak mengikuti arus air.

Morfologi juga mencerminkan strategi hidup dan adaptasi terhadap tekanan lingkungan. Organisme yang hidup di laut dalam

misalnya, umumnya memiliki tubuh lembek, mata besar, atau bahkan menghasilkan bioluminesensi untuk menarik mangsa dan berkomunikasi di lingkungan gelap. Sebaliknya, hewan yang hidup di daerah pasang surut seperti bintang laut dan bulu babi memiliki tubuh berduri dan alat gerak berupa kaki tabung (tube feet) yang mampu menempel kuat pada batu karang meski diterpa ombak.

Selain itu, struktur morfologi pada tumbuhan laut dan alga juga menunjukkan adaptasi fungsional. Rumput laut memiliki bagian penempel yang disebut holdfast, menggantikan fungsi akar sejati untuk melekat pada substrat. Bagian batangnya (stipe) dan daunnya (blade) berperan langsung dalam penyerapan nutrisi dan fotosintesis, tanpa memerlukan jaringan vaskular kompleks seperti pada tumbuhan darat. Morfologi yang sederhana namun efisien ini menjadikan alga mampu bertahan di lingkungan laut yang berfluktuasi (Pramesti *dkk.*, 2016)

Dalam konteks ilmiah, studi morfologi berperan sebagai dasar utama dalam sistematika dan identifikasi spesies laut. Ciri-ciri morfologis seperti bentuk sirip, pola sisik, struktur mulut, warna tubuh, hingga bentuk organ eksternal lainnya digunakan sebagai parameter taksonomi untuk membedakan satu spesies dengan spesies lain. Melalui analisis morfologi pula, ilmuwan dapat mengidentifikasi spesies endemik, mendeteksi perubahan populasi akibat tekanan lingkungan, serta melacak proses spesiasi (pembentukan spesies baru) di ekosistem laut (Riniatsih dan Suryono, 2018).

Lebih jauh lagi, pemahaman terhadap morfologi tidak hanya memiliki nilai akademis, tetapi juga nilai terapan. Dalam bidang perikanan, bentuk tubuh ikan menentukan efisiensi pergerakan, cara berenang, dan kecepatan, yang semuanya berpengaruh terhadap strategi penangkapan dan budidaya. Dalam konservasi, ciri morfologis menjadi acuan untuk mengenali spesies yang terancam punah maupun mendeteksi spesies invasif yang mengganggu keseimbangan ekosistem laut.

Dengan demikian, struktur luar atau morfologi bukan sekadar penampilan fisik, tetapi merupakan hasil evolusi dan interaksi dinamis antara organisme dengan lingkungannya. Setiap bentuk tubuh, warna,

atau pola anatomi eksternal adalah refleksi dari jutaan tahun adaptasi yang membentuk keanekaragaman luar biasa di dunia laut. Pemahaman mendalam terhadap morfologi menjadi kunci penting dalam menjaga keberlanjutan sumber daya hayati laut serta memperkuat dasar ilmiah bagi pengelolaan ekosistem pesisir dan perairan secara berkelanjutan.

#### **4.3.1 Bentuk Tubuh (Body Shape)**

Bentuk tubuh organisme laut menunjukkan strategi adaptasi terhadap arus, tekanan air, dan pola hidup:

Bentuk tubuh streamline (torpedo) dimiliki oleh ikan pelagis seperti tuna (*Thunnus sp.*), tongkol, dan tenggiri (*Scomberomorus sp.*). Bentuk tubuh yang memanjang dan meruncing di kedua ujung ini berfungsi untuk meminimalkan hambatan air (drag) ketika bergerak. Struktur tersebut memungkinkan mereka berenang cepat, efisien, dan stabil dalam menembus arus laut yang kuat. Adaptasi hidrodinamis ini sangat penting bagi ikan pelagis yang hidup di perairan terbuka, karena mereka membutuhkan kecepatan tinggi untuk mengejar mangsa seperti ikan kecil atau cumi-cumi, serta untuk bermigrasi dalam jarak yang jauh mengikuti pergerakan massa air dan ketersediaan makanan. Selain itu, otot-otot merah pada tubuh bagian lateral ikan pelagis sangat berkembang, berperan penting dalam mempertahankan stamina berenang jarak jauh. Sirip ekor yang kuat dan bercabang (forked tail) juga membantu menghasilkan gaya dorong maksimal saat berenang cepat (Syamsuddin Rachmawati, 2021).

Sementara itu, bentuk tubuh pipih dorsoventral (rata dari atas ke bawah) ditemukan pada ikan-ikan demersal seperti pari, ikan sebelah (flatfish), dan belut pasir. Adaptasi bentuk tubuh ini memungkinkan mereka hidup efektif di dasar laut, baik di substrat pasir maupun lumpur. Dengan tubuh yang pipih, ikan-ikan ini dapat bersembunyi dengan menempel di dasar laut dan menyamarkan diri (kamouflase) dari predator maupun mangsa. Warna tubuh bagian dorsal yang menyerupai warna dasar laut merupakan bentuk adaptasi morfologis dan perilaku untuk melindungi diri sekaligus memudahkan menangkap mangsa secara tiba-tiba. Ikan pari, misalnya, sering menimbun dirinya di bawah pasir dengan hanya menyisakan mata dan spirakel untuk bernapas, sementara ikan

sebelah memiliki kedua mata yang berpindah ke satu sisi tubuh suatu hasil evolusi unik yang mendukung gaya hidup bentik.

Bentuk tubuh bulat atau globular, seperti yang ditemukan pada ikan buntal (pufferfish), adalah contoh luar biasa dari adaptasi pertahanan diri terhadap predator. Dalam keadaan normal, ikan buntal memiliki tubuh kecil dan tampak tidak berbahaya. Namun, ketika merasa terancam, ikan ini mampu mengembangkan tubuhnya menjadi bola besar dengan cara menelan air atau udara ke dalam perut elastisnya. Bentuk tubuh yang membesar secara tiba-tiba ini membuat predator kesulitan menelan atau menggigitnya. Selain itu, beberapa spesies ikan buntal juga memiliki duri tajam di permukaan tubuh yang akan berdiri tegak ketika tubuhnya mengembang, menambah efektivitas pertahanan. Beberapa jenis bahkan mengandung racun tetrodotoksin zat neurotoksik mematikan yang membuatnya semakin tidak disukai oleh predator.

Selain ketiga bentuk tubuh utama tersebut, terdapat pula variasi bentuk tubuh lain yang mencerminkan keragaman ekologis organisme laut. Misalnya, bentuk tubuh ribbon-like (memanjang dan lentur) pada belut laut dan ular laut memungkinkan mereka bergerak lincah di celah-celah karang atau sedimen dasar laut. Bentuk laterally compressed (pipih dari samping) pada ikan karang seperti kepe-kepe (Chaetodontidae) dan angel fish (Pomacanthidae) memudahkan mereka bermanuver di antara celah sempit terumbu karang untuk mencari makanan dan menghindari predator.

Sementara itu, ikan laut dalam seperti anglerfish atau gulper eel memiliki bentuk tubuh yang tidak simetris dan sering tampak aneh. Adaptasi ekstrem ini berhubungan dengan lingkungan laut dalam yang gelap, bertekanan tinggi, dan minim makanan. Tubuh mereka biasanya lembek dengan otot tipis untuk menghemat energi, mulut besar untuk menangkap mangsa dalam berbagai ukuran, serta organ bioluminesen yang berfungsi menarik perhatian mangsa di kegelapan.

Dengan demikian, variasi bentuk tubuh organisme laut merupakan hasil adaptasi morfologis terhadap tekanan lingkungan dan gaya hidup. Bentuk tubuh tidak hanya menentukan efisiensi pergerakan, tetapi juga berkaitan dengan strategi bertahan hidup, mencari makan,

dan reproduksi. Evolusi anatomi tubuh yang beragam ini menjadi bukti bahwa kehidupan di laut telah mengalami penyempurnaan fisiologis dan morfologis selama jutaan tahun, menyesuaikan diri dengan tantangan ekologis yang unik di setiap lapisan laut.

#### **4.3.2 Struktur Pelindung Tubuh (Protective Structures)**

Perlindungan tubuh merupakan faktor penting bagi kelangsungan hidup organisme laut, terutama karena lingkungan laut penuh dengan predator dan tekanan ekologis (Tihurua *dkk.*, 2020).

- Cangkang keras (exoskeleton) pada moluska seperti kerang, siput laut, dan abalone melindungi tubuh lunak di dalamnya. Cangkang ini tersusun dari kalsium karbonat yang kuat dan tahan terhadap ombak maupun tekanan fisik.
- Karapas pada krustasea seperti kepiting, udang, dan lobster berfungsi sebagai pelindung sekaligus tempat melekatnya otot-otot.
- Beberapa spesies memiliki duri atau sisik keras, seperti ikan lepu (lionfish) dan bulu babi laut (sea urchin) yang menjadi alat pertahanan efektif terhadap predator.

#### **4.3.3. Warna dan Pola Tubuh (Coloration and Pattern)**

Warna tubuh organisme laut memiliki banyak fungsi ekologis, mulai dari kamuflase hingga komunikasi.

- Kamuflase (cryptic coloration) membantu organisme berbaur dengan lingkungannya, seperti ikan batu (stonefish) yang tubuhnya menyerupai karang atau batuan dasar laut.
- Warna peringatan (aposematic coloration) dimiliki oleh hewan beracun seperti nudibranch (siput laut tanpa cangkang) yang menunjukkan warna mencolok untuk memperingatkan predator.
- Kemampuan perubahan warna seperti pada gurita, cumi-cumi, dan sotong (cuttlefish) disebabkan oleh sel pigmen khusus (*chromatophore*), yang memungkinkan mereka menyesuaikan diri dengan lingkungan atau berkomunikasi satu sama lain.

#### **4.3.4 Struktur Sensorik dan Adaptasi Lingkungan**

Selain bentuk tubuh, struktur morfologi organisme laut juga meliputi berbagai organ sensorik eksternal yang berfungsi untuk mengenali dan merespons perubahan lingkungan laut. Organ sensorik ini memiliki peran penting dalam navigasi, mencari makan, mendeteksi bahaya, hingga komunikasi antarindividu. Setiap kelompok organisme laut memiliki bentuk dan fungsi sensorik yang beragam sesuai habitat dan perilaku hidupnya.

##### **1. Sistem Garis Rusuk (Lateral Line System)**

Sistem garis rusuk adalah jaringan sensorik yang membentang di sepanjang sisi tubuh ikan. Sistem ini tersusun atas serangkaian pori-pori dan kanal kecil yang berisi reseptor mekanik yang disebut *neuromast*. Reseptor ini peka terhadap getaran dan perubahan tekanan air di sekitar tubuh ikan. Melalui sistem ini, ikan mampu mendeteksi gerakan air akibat kehadiran mangsa, predator, atau anggota kelompoknya. Fungsi sistem ini sangat penting bagi ikan yang hidup di perairan keruh atau gelap, di mana penglihatan terbatas. Sebagai contoh, ikan lele dan hiu menggunakan sistem garis rusuk untuk mendeteksi mangsa yang bergerak di dasar perairan bahkan tanpa melihat secara langsung.

##### **2. Antena dan Setae (Rambut Halus) pada Krustasea**

Krustasea seperti udang, kepiting, dan lobster memiliki antena serta rambut halus (*setae*) di berbagai bagian tubuhnya, terutama di kepala dan kaki. Struktur ini berfungsi sebagai alat peraba dan perasa yang sangat sensitif terhadap rangsangan mekanik maupun kimia. Melalui antena dan *setae*, krustasea dapat mengenali arus air, mendeteksi bahan kimia dari mangsa atau feromon dari sesama jenisnya, serta memahami arah pergerakan air di lingkungannya. Adaptasi ini memungkinkan mereka berinteraksi efektif dengan lingkungannya, mencari makanan di dasar laut, dan menghindari predator.

##### **3. Fotofor (Organ Penghasil Cahaya)**

Fotofor adalah organ khusus yang mampu menghasilkan cahaya melalui proses bioluminesensi. Struktur ini banyak ditemukan pada

organisme laut dalam seperti ikan lentera (lanternfish), cumi-cumi laut dalam, dan beberapa jenis udang laut dalam.

Cahaya yang dihasilkan fotofor memiliki berbagai fungsi, antara lain untuk menarik mangsa, menyamarkan diri dengan cahaya dari permukaan (counter-illumination), menarik pasangan saat musim kawin, atau berkomunikasi dalam kegelapan laut dalam di mana sinar matahari tidak dapat menembus. Fenomena bioluminesensi ini merupakan contoh adaptasi luar biasa terhadap lingkungan ekstrem laut dalam, di mana tekanan tinggi dan kegelapan menjadi tantangan utama bagi kehidupan.

#### **4. Fungsi Morfologi dalam Taksonomi dan Ekologi**

Morfologi luar merupakan salah satu aspek terpenting dalam taksonomi, yaitu ilmu yang mempelajari klasifikasi dan identifikasi organisme. Ciri-ciri morfologi seperti bentuk tubuh, warna, susunan sirip, struktur cangkang, jumlah ruas, atau pola permukaan kulit digunakan oleh ahli biologi laut untuk mengenali, mengelompokkan, dan membedakan spesies.

Misalnya:

- Susunan sirip dan bentuk rahang digunakan untuk mengidentifikasi spesies ikan.
- Bentuk dan pola cangkang menjadi penanda utama dalam klasifikasi moluska.
- Struktur karapas dan jumlah ruas pada kaki menjadi ciri pembeda krustasea.

Dalam konteks ekologi, morfologi berperan dalam menentukan niche ekologis, yaitu peran dan posisi spesies dalam ekosistem laut. Morfologi memengaruhi perilaku makan, habitat yang dipilih, serta interaksi antarorganisme.

Sebagai contoh:

- Bentuk mulut dan rahang ikan menentukan jenis makanan yang dikonsumsi ikan pemangsa memiliki rahang besar dan gigi tajam, sementara ikan herbivora memiliki gigi kecil dan datar untuk menggigit alga.

- Bentuk tubuh streamline pada ikan pelagis memungkinkan mereka hidup di perairan terbuka, sedangkan bentuk pipih pada ikan demersal membuatnya cocok hidup di dasar laut.

## **5. Signifikansi Ekologis dan Evolusioner**

Adaptasi morfologis yang dimiliki oleh organisme laut merupakan hasil dari proses evolusi panjang yang berlangsung selama jutaan tahun. Melalui seleksi alam, setiap spesies mengalami perubahan struktur tubuh sesuai dengan tekanan lingkungan yang dihadapinya, seperti suhu, salinitas, arus laut, serta adanya predator dan kompetitor. Perubahan ini dapat terjadi secara bertahap dan diwariskan, menghasilkan bentuk tubuh yang paling efisien untuk bertahan hidup di habitat tertentu. Misalnya:

- Bentuk tubuh streamline berkembang pada spesies yang hidup di perairan terbuka dan bergerak cepat.
- Cangkang tebal atau duri pertahanan muncul pada organisme yang hidup di lingkungan dengan banyak predator.
- Organ fotofor berevolusi pada organisme laut dalam untuk mengatasi kegelapan total.

Secara ekologis, adaptasi morfologis memungkinkan organisme laut memanfaatkan berbagai niche ekologis, mengurangi persaingan, dan menjaga keseimbangan ekosistem. Evolusi morfologi juga mencerminkan hubungan kekerabatan antarspesies, sehingga menjadi bukti penting dalam studi filogeni (sejarah evolusi makhluk hidup). Dengan demikian, mempelajari morfologi organisme laut tidak hanya memberikan pemahaman tentang bentuk fisik dan penyesuaian diri terhadap lingkungan, tetapi juga membuka wawasan tentang fungsi biologis, dinamika ekosistem, dan proses evolusi yang membentuk keanekaragaman hayati laut yang luar biasa.

### **4.4. Anatomi Internal dan Sistem Organ**

Organisme laut memiliki sistem rangka dan otot yang beragam sesuai dengan jenis dan habitatnya. Terdapat tiga tipe rangka utama, yaitu hidrostatik pada hewan lunak seperti ubur-ubur dan anemon laut

yang mengandalkan tekanan cairan tubuh, eksoskeleton pada krustasea dan moluska yang memiliki pelindung keras dari kitin atau kalsium karbonat, serta endoskeleton pada ikan dan mamalia laut yang tersusun dari tulang atau tulang rawan. Sistem otot bekerja selaras dengan rangka untuk memungkinkan berbagai bentuk gerakan, mulai dari renang cepat hingga gerakan merayap di dasar laut.

#### **a. Sistem Pencernaan**

Sistem pencernaan organisme laut bervariasi tergantung jenis makanannya.

- Ikan karnivora memiliki gigi tajam dan usus pendek.
- Ikan herbivora memiliki gigi tumpul dan usus panjang untuk mencerna selulosa dari alga atau lamun.
- Invertebrata seperti bintang laut memiliki lambung yang dapat dikeluarkan untuk mencerna mangsa di luar tubuhnya.

#### **b. Sistem Respirasi**

Sebagian besar hewan laut bernapas melalui insang yang mengekstrak oksigen dari air laut. Mamalia laut seperti paus dan lumba lumba bernapas dengan paru-paru, dan karena itu harus muncul ke permukaan untuk mengambil udara. Beberapa invertebrata kecil bernapas melalui difusi langsung di permukaan tubuhnya.

#### **c. Sistem Sirkulasi**

Sistem sirkulasi pada organisme laut menunjukkan tingkat kompleksitas yang berbeda tergantung pada tingkat evolusinya. Invertebrata laut seperti moluska dan krustasea umumnya memiliki sistem sirkulasi terbuka, di mana cairan tubuh atau hemolimfa tidak selalu berada dalam pembuluh darah, melainkan langsung membasahi jaringan dan organ. Hal ini cukup efisien bagi hewan yang bergerak lambat dan memiliki metabolisme rendah.

Sebaliknya, vertebrata laut seperti ikan memiliki sistem sirkulasi tertutup, di mana darah selalu mengalir di dalam pembuluh darah dan dipompa oleh jantung dua ruang (atrium dan ventrikel). Sistem ini memungkinkan distribusi oksigen dan nutrisi yang lebih efisien.

Sementara itu, mamalia laut seperti paus dan lumba-lumba memiliki jantung empat ruang, mirip dengan mamalia darat. Struktur ini memungkinkan pemisahan sempurna antara darah beroksigen dan tidak beroksigen, sehingga mendukung metabolisme tinggi. Selain itu, otot mamalia laut mengandung banyak mioglobin, yang berfungsi menyimpan oksigen dan memungkinkan mereka menyelam dalam waktu lama tanpa harus sering naik ke permukaan untuk bernapas.

#### **d. Sistem Saraf dan Indra**

Organisme laut menunjukkan adaptasi sensorik luar biasa:

Organisme laut memiliki berbagai adaptasi sensorik yang luar biasa untuk bertahan hidup di lingkungan perairan yang dinamis. Ikan dilengkapi dengan garis rusuk (lateral line), yaitu organ sensorik yang mampu mendeteksi getaran dan arus air di sekitarnya, membantu mereka mengenali gerakan predator atau mangsa. Hiu memiliki ampula Lorenzini, reseptor listrik yang sangat sensitif terhadap medan listrik yang dihasilkan oleh makhluk hidup, sehingga memungkinkan hiu mendeteksi mangsa meskipun tersembunyi di pasir.

#### **e. Sistem Reproduksi**

Reproduksi organisme laut sangat beragam, meliputi:

- Fertilisasi eksternal, seperti pada ikan dan karang, di mana telur dan sperma dilepaskan ke air.
- Fertilisasi internal, seperti pada hiu dan mamalia laut. Banyak spesies memiliki siklus hidup kompleks dengan fase larva planktonik sebelum menjadi dewasa.

### **4.5. Adaptasi Anatomi terhadap Lingkungan Laut**

Organisme laut menghadapi tekanan lingkungan ekstrem. Adaptasi anatomi muncul untuk menjaga keseimbangan osmotik (osmoregulasi), tekanan hidrostatik, serta efisiensi energi.

- Ikan laut mengeluarkan garam berlebih melalui insang dan urin pekat.
- Hewan laut dalam memiliki enzim dan protein yang tahan tekanan tinggi.

- Struktur sirip dan otot dikembangkan agar efisien untuk berenang melawan arus.

Adaptasi anatomi ini merupakan hasil evolusi panjang yang memastikan kelangsungan hidup di berbagai zona laut, dari permukaan hingga palung terdalam.

#### **4.6. Signifikansi dan Aplikasi Ilmu Anatomi Laut**

Kajian struktur dan anatomi organisme laut memiliki banyak manfaat praktis:

- Dalam perikanan, untuk memahami pertumbuhan, reproduksi, dan kesehatan ikan.
- Dalam ekologi, untuk menentukan peran organisme dalam rantai makanan.
- Dalam konservasi, untuk mengenali spesies langka melalui karakter anatominya.
- Dalam bioteknologi laut, untuk mengembangkan bahan bioaktif dan sistem rekayasa jaringan dari organisme laut.

# Bab 5

## FISIOLOGI ORGANISME LAUT

### 5.1. Pendahuluan

Organisme yang hidup dilaut akan memberikan respon terhadap setiap perubahan lingkungan yang terjadi. Bentuk respon tersebut dapat melalui perilaku, fisiologis, imunologis, humoral dan genetic (National Research Council, 1994). Pada akhirnya respon tersebut pada tingkat organisme individu yang berkoloni untuk mengasilkan efek pada tingkat populasi. Dimana, pengetahuan mengenai respons organisme terhadap lingkungan biotik maupun abiotik adalah aspek fundamental biologi kelautan dan diperlukan untuk memahami bagaimana perubahan lingkungan baik secara alami dan yang disebabkan oleh manusia berpengaruh terhadap ekosistem laut (Pane et al, 2023). Perubahan lingkungan oleh dua faktor tersebut selain berdampak secara ekologi, juga berdampak dari segi ekonomi. Fisiologis sebagai salah satu bentuk respon organisme laut berkontribusi dalam pengelolaan spesies yang penting secara komersial dan terancam punah serta dapat digunakan untuk pemantauan spesies lain. Sebagai contoh banyak alga laut menghasilkan bahan kimia bernilai komersial sebagai respon terhadap kondisi lingkungan eksternal yang penuh tekanan. Pada fisiologi berfokus pada proses fisika maupun kimia yang memungkinkan adanya kehidupan seperti sistem pernapasan, pencernaan hingga sirkulasi darah (National Research Council, 1994; Costa & Favilla, 2023).

### 5.2. Sistem Pernapasan

Sistem pernapasan pada organisme laut sangat beragam, tergantung pada jenis serta karakteristik taksonominya. Mamalia laut yang sebagian besar hidupnya dihabiskan di laut ataupun dilingkungan

akuatik memiliki karakteristik khas yang dimiliki mamalia pada umumnya. Sistem pernapasan pada mamalia laut terdiri dari bagian-bagian yang sama mulai dari hidung dan lubang hidung hingga paru-paru. Bentuk anatomi ini, juga berpengaruh pada adaptasi fisiologisnya. Kemampuan mamalia laut menyelam dalam jangka waktu yang lama sangat mencolok (Diego et al, 2023). Selain itu juga, pada kelompok cetacea menunjukkan sistem penapasan yang merupakan bentuk dari adaptasi fisiologis dan anatomi yang khusus dan sesuai untuk kehidupan akuatik sepenuhnya (Bert et al, 2024). Dan mamalia laut yang menyelam dalam dan lama cenderung memiliki paru-paru yang lebih kecil dibanding yang menyelam di daerah yang dangkal (Mulyani et al, 2014). Dimana mereka menghabiskan sebagian besar hidupnya di lingkungan akuatik, mereka memiliki karakteristik yang sangat mirip dengan mamalia darat. Namun, dikarenakan habitatnya di lingkungan perairan, maka organ respirasinya memiliki karakteristik spesifik (Diego et al, 2023). Pada mamalia, pertukaran gas dan pengaturan asam-basa respirasi merupakan fungsi paru-paru (Zaccone et al, 2018).

Kelompok moluska dalam sistem pernapasannya kebanyakan bergantung pada organ *ctenidium* (insang sisir) untuk melakukan respirasi meskipun ada beberapa jenis dalam kelompok yang termasuk dalam pengecualian seperti siput darat dan lintah laut. Filamen insang ctenidial (yang ditopang oleh batang kerangka) menonjol dari sumbu pusat yang terletak di dalam rongga mantel. Silia di dalam rongga mantel menghasilkan arus yang berfungsi untuk membawa air masuk ke dalam rongga mantel dari bagian bawah *ctenidia*, serta arus yang mengeluarkan air di atas insang sisir tersebut. Pertukaran gas pernapasan terjadi melalui sistem pertukaran arus berlawanan (*countercurrent exchange system*), di mana air dan darah mengalir dalam arah yang berlawanan. Secara khusus, darah yang tidak mengandung oksigen mencapai filamen *ctenidial* melalui pembuluh *afere*n, sementara air masuk dari bawah *ctenidia*. Pertukaran gas kemudian terjadi saat air mengalir di atas pembuluh darah, dan darah yang telah mengandung oksigen meninggalkan *ctenidia* melalui pembuluh *efere*n untuk diedarkan ke seluruh tubuh (Spencer & Rothwell, 2013).

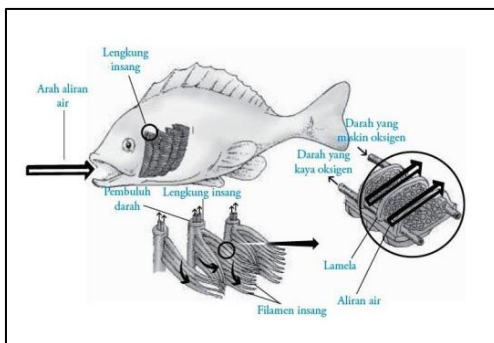
Sama halnya dengan kelompok moluska, insang memiliki peran yang penting dalam sistem respirasi ikan. Pada insang terjadi proses respirasi hingga pertukaran dan air. Mekanisme dalam sistem ini adalah air yang masuk melalui mulut kemudian melewati lembaran insang, pada proses tersebut oksigen diserap dan karbon dioksida dilepaskan melalui proses difusi (Zaccone et al, 2018; Foyle et al, 2020; Balcher et al, 2020).

Sistem pernapasan pada kelompok krustasea laut juga melibatkan insang sebagai organ pernapasannya. Pada organ ini terjadi pertukaran gas yang dibutuhkan dalam pernapasan secara simultan. Yakni terjadi penyerapan O<sub>2</sub> dari udara dan terjadi eksresi CO<sub>2</sub> dari insang ke perairan yang dilepaskan melalui insang (Bacci et al, 2023). Pada krustasea laut, insang diidentifikasi sebagai lokasi utama untuk proses regulasi ionik (Hu et al, 2011). Pada udang mantis (ordo Stomatopoda), misalnya, insang ditemukan pada eksopodita pleopoda. Pada euphausiidae, rangkaian tunggal insang epipodial bercabang sepenuhnya terbuka. Pada dekapoda, insang, yang dilindungi oleh karapas yang menjorok, tersusun dalam tiga rangkaian di atau dekat pangkal tungkai. Sebagai adaptasi terhadap respirasi udara, ruang insang membesar secara signifikan pada beberapa kepiting darat dan berfungsi sebagai paru-paru, dengan membran bagian dalam yang kaya akan pembuluh darah. Pada isopoda, fungsi pernapasan telah diambil alih oleh apendiks abdomen (Greem & Gordon, 2025).

Namun pada kelompok cnidaria atau coelenterata, dalam sistem pernapasannya tidak memiliki organ khusus baik insang maupun paru-paru. Pertukaran gas yang dibutuhkan untuk pernapasan terjadi di seluruh permukaan tubuhnya secara difusi dikarekan tubuhnya yang tipis serta mengandung kadar air yang cukup tinggi (Zhang et al, 2025). Dan pada kelompok Echinodermata, organ sistem pernapasannya adalah paru-paru kulit yaitu peonjolan dinding rongga tubuh yang tipis yang dilindungi oleh silia dan pediseloria. Dimana pada bagian inilah terjadi pertukaran oksigen dan karbondioksida. Namun tidak semua echinodermata bernapas dengan organ ini. Ada beberapa jenis Echinodermata yang bernapas dengan kaki tabung. Pada prosesnya, sisa-sisa metabolisme yang terjadi di dalam sel – sel tubuh akan diangkut

oleh sel – sel ameboid ke dermal branchiae untuk selanjutnya dilepas ke luar tubuh (Suryanti, 2019).

Sementara itu, sistem pernapasan pada ikan terjadi pada organ insang. Insang pada ikan berbentuk lembaran-lembaran tipis berwarna merah muda dan selalu lembab. Tiap lembaran tersebut terdapat sepasang filamen yang mengandung banyak lapisan tipis. Pada filamen ini terdapat pembuluh darah yang memiliki banyak kapiler sehingga terjadi difusi O<sub>2</sub> yang masuk dan CO<sub>2</sub> yang keluar (Ngarofah, 2018). Dalam prosesnya, pernapasan pada ikan berlangsung dalam 2 tahap. Tahap pertama mulut ikan akan membuka dan insang menutup sehingga air akan masuk melalui rongga mulut kemudian menuju rongga insang. Pada saat ini oksigen dalam air diambil oleh darah dan juga melepaskan karbondioksida. Tahap kedua, mulut menutup dan insang terbuka sehingga air dari rongga mulut keluar melalui insang. Air yang dikeluarkan telah bercampur dengan CO<sub>2</sub> yang dilepaskan dari darah (Purnamasari & Santi, 2017)

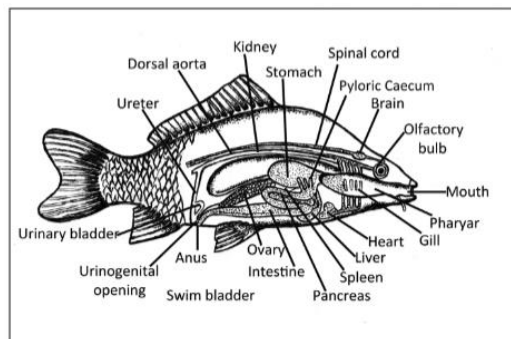


Gambar 5.1. Sistem pernapasan pada ikan (Ngarofah, 2018)

### 5.3. Sistem Pencernaan

Secara umum sistem pencernaan organisme laut melibatkan beberapa organ seperti mulut, lambung, usus hingga anus. Dalam sistem pencernaan meliputi saluran pencernaan dan organ-organ lain yang membantu proses dalam pencernaan dalam sistem ini (Ezraneti & Windarti, 2015; Nikhlani & Sukarti, 2016). Dalam proses pencernaan, organ pencernaan bukan hanya berperan sebagai alat kerja untuk mekanik (pencabikan dan penggerusan makanan) tetapi juga

unmenghasilkan cairan yang berfungsi sebagai katalisator dalam proses tersebut (Ezraneti & Windarti, 2015). Dan perkembangan organ pencernaan sejalan dengan pertumbuhan larva organisme (Nikhilani & Sukarti, 2016). Pada sistem pencernaan ikan, makanan yang dikonsumsi oleh ikan akan mengalami proses pencernaan sebelum untuk menghasilkan nutrisi yang bermanfaat untuk keperluan biologis ikan. Proses ini melibatkan enzim – enzim pencernaan. Laju pencernaan ikan biasanya berkorelasi dengan laju metabolisme ikan yang dipengaruhi parameter suhu lingkungan (Ezraneti & Windarti, 2015; Nikhlani & Sukarti, 2016). Gambar organ dalam sistem pencernaan ikan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 5.2. Sistem pencernaan ikan (CMFRI, 2013)

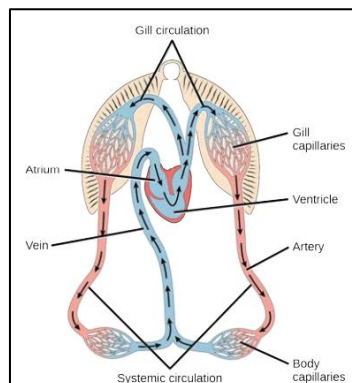
Pada kelompok mamalia, sistem pencernaannya merupakan salah satu bentuk adaptasi secara fisiologis yang dilakukan yaitu dengan menunda proses pencernaan selama beberapa jam ketika sedang menyelam. Pada proses ini konsumsi oksigen dapat dicegah dan sebaliknya oksigenasi otot serta organ vital sapat ditingkatkan sehingga waktu penyelaman dapat diperpanjang dengan aman (Orti et al, 2022). Hal ini juga merupakan bentuk respon terhadap perubahan lingkungan akuatik dari waktu ke waktu. Dalam kelompok mamalia laut, jenis cetacea dan sirenia adalah yang sudah mencapai adaptasi lengkap terhadap kehidupan akuatik (Marcos et al, 2024).

Sistem pencernaan kelompok moluska hampir sama dengan kelompok ikan dan mamalia yaitu termasuk pada sistem pencernaan yang lengkap. Pada sistem ini saluran pencernaan yang dimulai di mulut terdiri dari rongga bukal, esofagus, lambung, dan usus yang berakhir di

anus. Beberapa jenis kelenjar terkait, yaitu kelenjar oral dan saliva, kelenjar esofagus, kelenjar pencernaan, dan, dalam beberapa kasus, kelenjar anal (Rodrigo & Costa, 2017). Moluska memiliki jenis yang sangat beragam yang terbagi dalam omnivora perumput, herbivora, karnivora pemakan bangkai dan predator, bahkan beberapa spesies parasite. Akibatnya, sistem pencernaan mereka memiliki banyak variasi adaptif (Arrigheti et al, 2015). Sementara pada Echinodermata, makanan yang masuk dari mulut yang posisinya berada di bawah permukaan tubuh diteruskan ke melalui faring ke kerongkongan, kemudian ke lambung berlanjut ke usus dan terakhir anus (Suryanti, 2019).

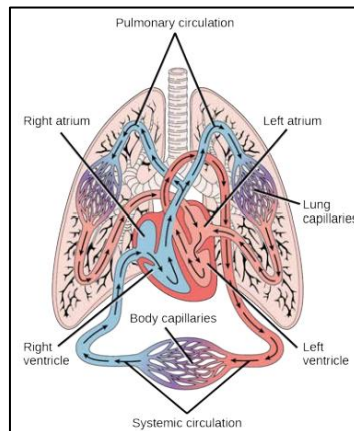
#### 5.4. Sirkulasi dan Sistem Peredaran Darah

Sirkulasi dan peredaran darah pada organisme laut sangat beragam, tergantung pada tingkat kompleksitas organisme serta jenisnya. Umumnya sistem ini mengangkut oksigen, nutrisi serta sisa metabolisme ke seluruh tubuh organisme laut. Sistem peredaran darah berpusat pada jantung dengan pembuluh darahnya yang berkaitan erat dengan fungsi pernapasan, keseimbangan cairan tubuh, ekskresi dan pencernaan (Manik & Arleston, 2020). Pada ikan, sistem ini hanya berisi satu sirkuit, di mana darah dipompa melalui kapiler insang dan masuk ke kapiler jaringan tubuh. Ini dikenal sebagai siklus tunggal. Dengan demikian, jantung ikan hanyalah satu pompa (terdiri dari dua ruangan). Jantung memompa darah ke dalam satu putaran ke seluruh tubuh. Pada sebagian besar ikan, jantung terdiri dari empat bagian, meliputi dua ruang, pintu masuk dan pintu keluar (Morad, 2020).



Gambar 5.3. Sistem sirkulasi pada Ikan (Clark et al, 2018)

Disisi lain, sistem peredaran darah pada mammalia, darah terdeoksigenasi memasuki jantung dan dipompa ke paru-paru untuk oksigenasi. Darah yang mengandung oksigen kemudian dikembalikan ke jantung dari paru-paru kemudian diangkut ke seluruh tubuh. Pada kelompok ini sistem peredaran darahnya tertutup ganda seperti pada mamalia darat. Jantung terbagi dalam 4 ruang yaitu dua atrium dan dua ventrikel (Ngarofah, 2020).



Gambar 5.4. Sistem sirkulasi pada mamalia (Clark et al, 2018)

Sistem peredaran darah pada organisme yang termasuk dalam kelompok Echinodermata umumnya tereduksi, sulit diamati. Sistem peredaran darahnya meliputi pembuluh darah yang mengelilingi mulut dan dihubungkan dengan 5 buah pembuluh radial ke setiap lengan (Suryanti, 2019). Sementara itu, pada Krustasea memiliki sistem peredaran darah terbuka, tempat nutrisi, oksigen, hormon, dan sel didistribusikan dalam hemolimfa. Mereka tidak memiliki sistem imun adaptif dan hanya bergantung pada mekanisme imun bawaan mereka yang mencakup respons seluler dan humoral (Fredrick & Ravichandran, 2012).

# Bab 6

## PERILAKU ORGANISME LAUT

### 6.1. Pendahuluan

Perilaku organisme laut mencerminkan rangkaian respons adaptif terhadap tekanan lingkungan yang bersifat fisik, biologis, maupun antropogenik. Dengan kemajuan teknologi pemantauan modern seperti *bio-logging*, sensor multi-fungsi, dan telemetri satelit, kini para peneliti mampu memperoleh data yang jauh lebih detail mengenai bagaimana organisme merespons dinamika suhu, tingkat keasaman, gangguan suara, polusi, serta pergeseran habitat. Data ini menegaskan bahwa perilaku organisme laut bukan sekadar reaksi spontan, melainkan juga melibatkan plastisitas fisiologis dan kemampuan adaptasi lintas generasi, baik dalam skala waktu singkat maupun panjang (Amorim, 2025).

Dalam satu dekade terakhir, perilaku organisme laut semakin dipandang sebagai indikator biologis penting untuk menilai kesehatan ekosistem laut. Misalnya, mamalia laut terutama paus dan lumba-lumba menjadi bioindikator yang efektif karena perubahan perilaku mereka sering kali berkorelasi langsung dengan paparan polusi kimia, degradasi habitat, hingga dampak perubahan iklim global. Respons fisiologis dan perilaku kelompok ini mencerminkan tekanan yang juga dialami organisme di tingkat trofik bawah, sehingga memberi gambaran holistik tentang kondisi ekosistem (Plön et al., 2024).

Selain itu, sejumlah studi terbaru menunjukkan bahwa perubahan lingkungan, khususnya pemanasan laut dan pengasaman, dapat memengaruhi fungsi sensorik dan perilaku organisme laut. Sebagai contoh, penelitian menunjukkan bahwa larva ikan yang hidup pada

perairan dengan kadar CO<sub>2</sub> tinggi mengalami gangguan dalam orientasi dan kesulitan mengenali bau predator maupun habitat yang sesuai. Kondisi ini membuat respons gerak mereka menjadi tidak terarah sehingga peluang untuk menetap di habitat yang semestinya berkurang (Rossi et al., 2016). Temuan ini memperkuat pandangan bahwa pemantauan perilaku tidak hanya relevan untuk kajian ekologi, tetapi juga sangat penting dalam upaya konservasi dan pengelolaan sumber daya laut secara berkelanjutan.

## **6.2. Teknologi dan Metode Pemantauan Perilaku**

Kemajuan teknologi dalam sepuluh tahun terakhir telah mengubah cara para ilmuwan meneliti perilaku organisme laut. Salah satu teknologi penting adalah *bio-logging*, yaitu pemasangan alat kecil pada hewan laut untuk merekam aktivitas mereka. Alat ini bisa berupa penanda dengan GPS untuk mengetahui lokasi, sensor suhu untuk mencatat kondisi air, dan sensor kedalaman untuk mengetahui seberapa dalam hewan tersebut berenang. Perangkat terbaru yang dikembangkan tahun 2024 bahkan lebih canggih karena menggabungkan beberapa sensor sekaligus: sensor suhu, sensor tekanan air, dan *Miniature Inertial Measurement Unit* (MIMU), yaitu sensor kecil yang bisa mendeteksi gerakan dan posisi tubuh hewan. Dengan teknologi ini, perilaku hewan laut dapat direkam terus-menerus selama beberapa hari.

Keunggulan alat ini adalah tingkat ketelitiannya sangat tinggi. Misalnya, suhu air bisa diukur dengan ketepatan hingga 0,01°C (sangat kecil perbedaannya), dan tekanan air dapat diukur dengan kesalahan hanya sekitar ±0,5% dari rentang pengukuran. Artinya, data yang dihasilkan sangat akurat dan dapat dipercaya, sehingga membantu peneliti memahami perilaku hewan laut dengan lebih detail (Tian et al., 2024).

Selain teknologi alat (*hardware*), cara untuk menganalisis data juga berkembang dengan cepat. Salah satunya adalah telemetri akustik (*acoustic telemetry*), yaitu metode menggunakan sinyal suara untuk melacak pergerakan hewan laut di habitat yang sulit dijangkau, seperti terumbu karang atau laut dalam. Ketika dikombinasikan dengan analisis

jejaring sosial seperti *leader-follower networks* (jaringan pemimpin-pengikut), metode ini bisa membantu peneliti memahami bagaimana hewan berinteraksi satu sama lain dan kapan mereka hadir di suatu lokasi. Penelitian terbaru pada manta ray, misalnya, menunjukkan bahwa betina sering mengikuti pola aktivitas betina lain atau jantan pada waktu tertentu. Pola ini dapat dipetakan dengan melihat jejak kedatangan mereka (*presence trajectories*) di lokasi berkumpul, sehingga membuka wawasan baru tentang struktur sosial yang sebelumnya tidak terlihat (Fernández-Gracia et al., 2024).

Kemajuan lain adalah penggunaan kecerdasan buatan (AI) untuk menganalisis data yang dikumpulkan dari *bio-logging*. Dengan metode *machine learning*, komputer bisa mengenali pola perilaku yang sulit dideteksi secara manual, misalnya kapan hewan sedang beristirahat, mencari makan, atau melakukan perjalanan jauh. Studi terbaru bahkan menunjukkan bahwa algoritme AI bisa mencapai akurasi lebih dari 90% dalam mengklasifikasikan perilaku paus hanya dari data gerakan tubuh (akselerometer). Model ini memberikan gambaran tentang bagaimana paus kemungkinan akan berpindah lokasi saat musim hujan atau kemarau tiba (Chambault et al., 2021).

Selain itu, perkembangan teknologi pemantauan juga membuka peluang baru melalui integrasi antara data sensor yang dipasang pada hewan dengan citra satelit (*remote sensing*). Pendekatan ini memungkinkan peneliti melihat hubungan langsung antara perilaku organisme laut dan kondisi lingkungan secara lebih luas. Misalnya, pada penelitian terhadap penyu laut, data pergerakan yang direkam melalui perangkat sensor kemudian dikaitkan dengan informasi lingkungan dari satelit, seperti suhu permukaan laut dan tingkat produktivitas primer. Hasilnya menunjukkan bahwa faktor-faktor lingkungan tersebut berpengaruh besar terhadap pola perilaku, termasuk waktu penyu berada di permukaan air yang sangat penting untuk aktivitas migrasi maupun mencari makan (Roberts et al., 2022).

Melalui kombinasi berbagai sumber data ini, perilaku organisme laut kini tidak hanya dipandang sebagai respons sesaat terhadap lingkungannya, tetapi juga sebagai jendela untuk memprediksi

bagaimana hewan-hewan tersebut akan beradaptasi terhadap perubahan iklim dan dinamika ekosistem di masa depan.

### **6.3. Perilaku Pencarian Makan dan Foraging**

Perilaku pencarian makan (foraging behavior) pada organisme laut merupakan hasil adaptasi evolusi yang kompleks terhadap lingkungan yang selalu berubah. Strategi ini sangat beragam, mulai dari migrasi vertikal harian (diel vertical migration) pada zooplankton hingga pergerakan lintas samudra yang dilakukan oleh predator puncak seperti tuna dan hiu. Faktor lingkungan seperti cahaya, suhu, arus laut, dan ketersediaan nutrisi menjadi penentu utama kapan dan di mana organisme mencari makan. Sebagai contoh, zooplankton menampilkan pola diel vertical migration (DVM): mereka biasanya turun ke kedalaman saat siang untuk menghindari predator, lalu naik ke permukaan pada malam hari untuk memanfaatkan ledakan makanan fitoplankton. Pola ini terdokumentasi luas dalam kajian ekologi dan berperan penting pada siklus energi serta ekspor karbon di lautan (Hernandez-Leon, 2023). Selain faktor lingkungan, strategi foraging juga melibatkan perilaku individu maupun kelompok. Ikan pelagis kecil biasanya membentuk kawanan besar yang membantu menemukan sumber makanan lebih cepat sekaligus mengurangi risiko dimangsa. Sebaliknya, predator besar seperti hiu dan paus menempuh migrasi jarak jauh untuk mengikuti pergeseran distribusi mangsa yang berubah secara musiman. Sebagai contoh lain, pada komunitas pelagis di Teluk Benggala, perubahan musiman pada kelimpahan copepod dan krustasea memaksa ikan pelagis kecil mengubah diet mereka dan mengikuti distribusi mangsa. Pola ini menunjukkan bahwa untuk predator besar, keberhasilan foraging sangat tergantung pada kemampuan mengikuti perubahan spasial dan temporal mangsa (Iglesias et al., 2023).

Perubahan iklim kini menambah tantangan baru bagi organisme laut dalam mencari makan. Peningkatan suhu laut mempercepat metabolisme sehingga kebutuhan energi meningkat. Akibatnya, predator sering kali harus memperluas area jelajah atau menyesuaikan kedalaman berburu. Kondisi ini terlihat jelas pada ikan dan mamalia laut

yang harus mengubah jalur migrasi sesuai dengan distribusi mangsa yang bergeser akibat pemanasan laut (Nagelkerken & Munday, 2016).

Mamalia laut seperti paus biru memperlihatkan fleksibilitas tinggi dalam menghadapi perubahan produktivitas primer. Ketika kelimpahan krill rendah, paus memperluas jarak jelajah atau meningkatkan intensitas menyelam. Sebaliknya, saat mangsa berlimpah, mereka memusatkan aktivitas makan di area yang relatif kecil. sebagian besar waktu menyelam dihabiskan untuk foraging, dan paus dapat menyesuaikan pola menyelam (antara menyelam dangkal atau dalam) tergantung distribusi mangsa dan kondisi lingkungan (Fonseca et al., 2022)

Selain pemanasan, pengasaman laut (ocean acidification) juga memberikan tekanan besar terhadap rantai makanan dasar di ekosistem laut. Organisme kecil yang memiliki cangkang kalsium, seperti pteropoda, sangat rentan terhadap kondisi CO<sub>2</sub> tinggi. Penelitian menunjukkan bahwa telur dan larva pteropoda kehilangan kemampuan optimal dalam membentuk cangkang ketika berada pada perairan yang lebih asam, sehingga tingkat kelangsungan hidupnya menurun drastis (Manno et al., 2016). Penurunan populasi pteropoda ini berimplikasi luas karena mereka merupakan sumber makanan penting bagi predator tingkat menengah hingga predator puncak. Akibatnya, berkurangnya ketersediaan pteropoda dapat memaksa organisme pemangsa untuk menyesuaikan perilaku mencari makan (foraging behavior), baik dengan memperluas area jelajah maupun mengubah strategi berburu. Dengan demikian, perubahan kimia laut akibat pengasaman tidak hanya berdampak pada satu jenis organisme, tetapi dapat memicu efek berantai yang memengaruhi perilaku makan di seluruh tingkatan trofik dalam ekosistem laut.

Di samping faktor iklim, ancaman akibat aktivitas manusia seperti polusi plastik dan kerusakan habitat makin memperburuk kondisi foraging. Sebagai contoh, ikan pelagis kecil dan ikan demersal di Laut Mediterania Barat ditemukan memiliki banyak partikel mikroplastik dalam tubuhnya, yang berkorelasi dengan kenaikan stres fisiologis dan penurunan kondisi tubuh mereka, sehingga efisiensi makan dan

pertumbuhan terganggu (Giani et al., 2023). Selain itu, ikan predator terumbu di Great Barrier Reef menunjukkan perubahan mangsa karena berkurangnya tutupan karang beberapa grouper yang biasanya berburu dengan penyergapan di terumbu kini berubah menjadi berburu aktif di perairan terbuka agar bisa menemukan mangsa (Hempson et al., 2017).

#### **6.4. Efek Perubahan Lingkungan terhadap Perilaku Organisme**

Perubahan lingkungan laut akibat aktivitas manusia (*anthropogenic activities*) dan dinamika iklim global memberikan dampak besar terhadap perilaku organisme laut. Fenomena seperti pemanasan laut (*ocean warming*), pengasaman laut (*ocean acidification*), dan penurunan oksigen (*deoxygenation*) tidak hanya memengaruhi kondisi fisiologis, tetapi juga mengubah aktivitas harian, pola migrasi, hingga interaksi sosial antar spesies. Studi eksperimental menunjukkan bahwa invertebrata laut pada fase larva mengalami peningkatan kebutuhan energi ketika hidup pada suhu tinggi dan pH rendah. Dampaknya terlihat pada perilaku penting, seperti penurunan kemampuan berenang, keterlambatan metamorfosis, serta perubahan strategi mencari makan (Kroeker et al., 2020).

Selain faktor kimia-fisik, gangguan suara (*anthropogenic noise*) kini menjadi isu penting dalam ekologi perilaku laut. Organisme laut, termasuk invertebrata, memiliki reseptor sensitif yang mudah terganggu oleh kebisingan dari kapal, pengeboran lepas pantai, maupun sonar militer. Gangguan akustik ini dapat memicu respons menghindar, menurunkan efisiensi mencari makan (*foraging*), bahkan mengurangi peluang reproduksi akibat stres fisiologis yang meningkat. Penelitian terbaru membuktikan bahwa paparan suara berintensitas tinggi dapat mengganggu komunikasi bioakustik pada krustasea serta mengubah pola orientasi mereka di habitat alami (Popper & Hawkins, 2018).

Lebih jauh, kombinasi berbagai tekanan lingkungan (*multiple stressors*) memperparah dampak terhadap perilaku organisme laut. Sebagai contoh, penelitian Riza et al. (2019) menunjukkan bahwa ikan karang yang hidup di perairan dengan pH rendah dan peningkatan suhu air laut mengalami perubahan perilaku yang lebih drastis dibanding

mereka yang hanya mengalami satu stresor saja seperti peningkatan respons menghindar dan penurunan kemampuan mendeteksi predator. Efek-efek tersebut menegaskan bahwa penelitian perilaku organisme laut ke depan harus mempertimbangkan efek kumulatif dari berbagai tekanan lingkungan, bukan hanya satu variabel secara terpisah.

Dampak tersebut juga berimplikasi luas pada ekologi ekosistem laut. Misalnya, perubahan perilaku mencari makan (*foraging*) pada spesies kunci dapat mengganggu aliran energi dalam jaring makanan. Pergeseran pola migrasi mamalia laut dapat memengaruhi distribusi nutrisi antar-ekosistem, sementara perubahan perilaku reproduksi ikan karang dapat menurunkan perekrutan larva. Akumulasi dari perubahan ini pada akhirnya mengancam keberlanjutan populasi dan stabilitas ekosistem laut jangka panjang.

Di samping aspek ekologis, konsekuensi sosial dan ekonomi juga menjadi nyata dari perubahan perilaku organisme laut. Penurunan efisiensi makan pada ikan komersial akibat paparan mikroplastik telah terbukti membuat kondisi tubuh ikan menurun, yang bisa berdampak langsung pada produktivitas perikanan tangkap (Cañón-Bastidas et al., 2025). Demikian pula, pada terumbu karang, perubahan akibat pemanasan laut dan degradasi habitat menurunkan produktivitas ikan lokal dan tingkat pergantian populasi ikan, mengancam stabilitas stok ikan dan ketahanan ekonomi masyarakat pesisir (Hamilton et al., 2022). Oleh karena itu, memahami perilaku organisme laut menjadi bagian penting dalam merancang konservasi dan pengelolaan laut yang berkelanjutan.

Untuk menghadapi tantangan tersebut, para ilmuwan mendorong pendekatan lintas disiplin yang menggabungkan teknologi *bio-logging*, eksperimen laboratorium, serta pemodelan ekologi. Pendekatan ini memungkinkan prediksi respons perilaku secara lebih akurat di bawah skenario perubahan iklim ekstrem. Selain itu, hasil penelitian dapat menjadi dasar ilmiah bagi kebijakan adaptasi ekosistem laut di masa depan. Upaya integratif semacam ini sangat penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem sekaligus menjamin keberlanjutan sumber daya hayati laut (Amorim, 2025).

## 6.5. Perilaku Sosial, Komunikasi, dan Interaksi

Interaksi sosial merupakan aspek fundamental dalam kehidupan organisme laut, dari karang yang hidup berkoloni hingga mamalia laut. Komunikasi dalam kelompok membantu membentuk struktur sosial, mempertahankan hierarki, dan mengoordinasikan strategi kolaboratif seperti berburu bersama. Dalam beberapa tahun terakhir, studi perilaku agresif mulai menyoroti bagaimana ikan menggunakan komunikasi penuh modalitas dari visual, mekanik, hingga kimiawi untuk menandai wilayah atau mempertahankan dominasi. Misalnya, studi *Physiology, Endocrinology and Chemical Communication in Aggressive Behaviour of Fishes* mendokumentasikan bahwa beberapa ikan menggunakan sinyal kimia sebagai bagian dari agresi territorial (Silva et al., 2021).

Selain komunikasi agresif, komunikasi kolaboratif juga memainkan peran penting dalam strategi bertahan hidup organisme laut. Ikan predator seperti tuna dan spesies serupa sering merespons objek apung seperti *fish aggregating devices* (FADs) yang mempengaruhi pola pergerakan kelompok mereka ini menunjukkan bahwa mereka tidak bertindak sepenuhnya sendiri, melainkan menunjukkan adaptasi terhadap lingkungan melalui koordinasi kolektif dan gerakan terintegrasi (Pérez et al., 2020).

Fenomena komunikasi yang lebih kompleks ditemukan pada mamalia laut, khususnya cetacea. Lumba-lumba hidung botol, misalnya, memiliki “*signature whistles*” yang berfungsi sebagai identitas akustik masing-masing individu, mirip dengan nama panggilan pada manusia. Penelitian menunjukkan bahwa lumba-lumba bahkan mampu menirukan siulan individu lain sebagai bentuk interaksi sosial, menandakan kecerdasan sosial yang tinggi sekaligus kemampuan membangun hubungan jangka panjang (King et al., 2018).

Lebih unik lagi, perilaku penggunaan alat (*tool use*) kini juga ditemukan dalam konteks sosial pada mamalia laut. Terkini, pada populasi *Southern Resident killer whales di Salish Sea*, para peneliti mendokumentasikan perilaku yang disebut *allokelping*, di mana mereka menggigit batang *bull kelp*, memotongnya, dan menggunakannya sebagai alat untuk saling menggosok atau menghilangkan kulit mati

antar rekan mereka. Aktivitas ini tidak hanya membantu menjaga kesehatan kulit dan mengurangi parasit, tetapi juga memperkuat ikatan sosial dalam kelompok. Temuan ini menunjukkan bahwa interaksi sosial mamalia laut dapat melibatkan manipulasi objek eksternal, mirip dengan perilaku alat pada primata (Weiss et al., 2025).

Pada akhirnya, perilaku sosial dan komunikasi organisme laut memiliki fungsi ganda: menjaga stabilitas kelompok serta meningkatkan peluang bertahan hidup dalam ekosistem yang penuh tekanan. Kompleksitas interaksi ini memperlihatkan bahwa organisme laut tidak hanya bereaksi terhadap lingkungan secara individual, tetapi juga membentuk jaringan sosial adaptif yang bertindak sebagai penyangga terhadap perubahan iklim maupun gangguan manusia. Penelitian *Marine Mammal Behavior: A Review of Conservation Implications* menegaskan bahwa kelompok mamalia laut yang memiliki struktur sosial kuat dan pembelajaran sosial lebih mampu bertahan terhadap tekanan lingkungan dibanding spesies yang lebih soliter atau dengan perilaku kaku (Brakes & Dall, 2016). Sebagai tambahan, ulasan *Animal Culture Suggests Lessons for Conservation* menyebut bahwa budaya dan interaksi sosial di antara paus baleen dan spesies cetacea lainnya harus dipertimbangkan dalam strategi konservasi agar kebijakan perlindungan dan manajemen habitat lebih efektif (Brakes et al., 2021).

## **6.6. Migrasi dan Orientasi**

Migrasi laut merupakan salah satu fenomena paling menakjubkan dalam ekologi laut. Perilaku ini mencakup perjalanan jarak jauh lintas samudra maupun pergerakan harian yang dikenal sebagai migrasi vertikal diel. Migrasi musiman banyak dijumpai pada ikan mesopelagik dan spesies pelagis lainnya, yang berpindah mengikuti perubahan produktivitas primer serta distribusi mangsa. Sementara itu, pada zooplankton dan ikan kecil, migrasi vertikal diel memainkan peran penting dalam siklus energi laut: setiap malam mereka naik ke permukaan untuk makan dan menjauhkan diri ke kedalaman saat siang hari untuk menghindari predator. Pola migrasi semacam ini telah

didokumentasikan di berbagai lautan dengan pengukuran akustik global dan data biokimia laut (Bianchi & Mislan, 2016).

Mekanisme orientasi dalam migrasi awalnya banyak dikaitkan dengan pemanfaatan medan magnet bumi (*geomagnetic orientation*) dan petunjuk kimiawi (*chemical cues*). Namun, penelitian dekade terakhir menunjukkan bahwa organisme laut juga memanfaatkan pola arus, gradien suhu, serta posisi cahaya matahari dan bintang sebagai panduan. Sayangnya, berbagai gangguan antropogenik seperti polusi cahaya dari pesisir, kebisingan kapal, hingga perubahan arus akibat pembangunan infrastruktur laut dapat mengacaukan mekanisme orientasi ini. Sayangnya, berbagai aktivitas manusia seperti polusi cahaya di wilayah pesisir terbukti dapat mengganggu mekanisme orientasi alami penyusut laut. Studi menunjukkan bahwa tukik penyusut loggerhead yang baru menetas kerap salah arah karena tertarik pada cahaya buatan dari pemukiman atau kawasan wisata, bukannya menuju cahaya alami bulan di atas laut. Akibatnya, perjalanan mereka menuju laut menjadi lebih lama, meningkatkan kelelahan, serta memperbesar risiko predasi maupun kematian sebelum mencapai habitat alaminya (E. Silva et al., 2017).

Perkembangan teknologi pemantauan modern seperti *bio-logging* dan *remote tracking* telah memperluas pemahaman tentang migrasi laut. Studi terbaru mengungkap bahwa harbor seal di wilayah subarktik dapat bergerak cepat antara habitat air tawar dan laut dalam dalam satu hari, menunjukkan bahwa beberapa mamalia laut mampu melakukan perjalanan yang jauh dan adaptif terhadap kondisi lingkungan yang berubah (Florko et al., 2024). Perubahan jalur ini sering kali dipengaruhi oleh tekanan predator atau gangguan manusia, menegaskan bahwa faktor antropogenik kini menjadi variabel penting dalam pola migrasi. Temuan ini sekaligus memperlihatkan fleksibilitas perilaku organisme laut dalam menyesuaikan diri ke lingkungan baru.

Lebih dari sekadar fenomena biologis, migrasi dan orientasi memiliki implikasi besar bagi upaya konservasi. Jalur migrasi sering kali melintasi batas yurisdiksi negara, sehingga pengelolaan yang efektif menuntut adanya kerja sama internasional. Pemahaman tentang

bagaimana gangguan lingkungan memengaruhi orientasi dapat membantu dalam penetapan zona perlindungan laut (*Marine Protected Areas*) yang lebih adaptif, serta dalam menentukan periode penutupan jalur pelayaran guna menurunkan risiko tabrakan dengan mamalia laut. Dengan demikian, penelitian migrasi dan orientasi bukan hanya memperkaya pengetahuan dasar ekologi perilaku, tetapi juga memberikan landasan ilmiah penting dalam menjaga keberlanjutan ekosistem laut global (Harrison et al., 2018).

### **6.7. Pertahanan Diri, Kamuflase, dan Strategi Hindar**

Organisme laut telah berevolusi dengan berbagai strategi pertahanan diri untuk meningkatkan peluang bertahan hidup di lingkungan yang penuh ancaman. Kamuflase adalah salah satu mekanisme yang paling umum, di mana organisme menyesuaikan warna tubuh, pola, atau bahkan tekstur kulitnya agar menyatu dengan lingkungan sekitar. Contohnya, cumi-cumi dan gurita yang dapat mengubah warna dan pola kulitnya dalam sekejap berkat sel khusus bernama kromatofor. Kemampuan ini bukan hanya berfungsi untuk melindungi diri dari predator, tetapi juga membantu mereka saat berburu mangsa (Hanlon, 2007).

Selain kamuflase, terdapat juga strategi respons pelarian cepat (*escape response*). Ikan kecil atau udang mampu melesat hanya dalam sepersekian detik setelah mendeteksi ancaman melalui rangsangan visual maupun mekanik. Respons ini ditunjang oleh sistem sensorik yang sangat peka, sehingga mereka dapat menghindari predator bahkan ketika ancaman datang secara tiba-tiba. Pada kelompok yang lebih besar, strategi pertahanan kolektif muncul melalui pembentukan kawanan (*schooling*), yang membuat predator kesulitan memilih target tunggal. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa respons kolektif dalam kawanan ini terbukti meningkatkan peluang bertahan hidup, karena koordinasi pelarian bersama dapat mengurangi risiko serangan predator (Rodriguez-Pinto et al., 2024).

Ada juga strategi yang lebih halus yaitu mimikri. Beberapa spesies, seperti mimic octopus atau ikan fangblenny, mampu meniru

penampilan maupun perilaku spesies lain yang lebih berbahaya. Dengan cara ini, mereka bisa mengecoh predator agar mengira mereka adalah makhluk yang beracun atau berbahaya. Strategi ini menunjukkan tingkat kecerdasan perilaku adaptif, karena melibatkan kemampuan membaca lingkungan dan memanfaatkan informasi sensorik yang ada (Friedman, 2020).

Namun, efektivitas strategi pertahanan alami tersebut kini menghadapi tantangan akibat aktivitas manusia. Kebisingan buatan, seperti dari kapal atau pengeboran lepas pantai, dapat mengacaukan sistem sensorik organisme laut. Salah satu studi mendemonstrasikan bahwa invertebrata laut merespons suara keras dengan reaksi “startle” yang tertunda dan kemampuan berkamuflase yang menurun, meningkatkan risiko predasi (Solé et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa tekanan antropogenik tidak hanya merusak habitat fisik, tetapi juga melemahkan pertahanan alami organisme laut.

Sebagai bentuk adaptasi terhadap ancaman yang terus berubah, beberapa organisme mengubah waktu aktivitasnya. Ada ikan yang biasanya aktif di siang hari, lalu beralih menjadi lebih aktif di malam hari untuk menghindari predator yang berburu dengan penglihatan. Pergeseran perilaku semacam ini menunjukkan bahwa strategi pertahanan diri bukanlah sesuatu yang kaku, melainkan respons yang terus berkembang mengikuti kondisi lingkungan dan tekanan predator (Yeoh et al., 2017).

### **6.8. Implikasi Konservasi dan Perilaku sebagai Indikator**

Organisme laut memiliki berbagai strategi pertahanan diri yang berevolusi untuk meningkatkan peluang bertahan hidup di lingkungan yang penuh ancaman. Salah satu strategi yang paling umum adalah kamuflase, yaitu kemampuan organisme untuk menyesuaikan warna tubuh, pola, atau bahkan tekstur kulitnya agar menyerupai lingkungan sekitar. Contoh yang paling terkenal adalah cumi-cumi dan gurita. Dengan bantuan sel khusus bernama kromatofor, mereka dapat mengubah warna dan pola kulit hanya dalam hitungan detik.

Kemampuan ini bukan hanya melindungi dari predator, tetapi juga membantu mereka saat berburu mangsa (Hanlon, 2007).

Selain kamuflase, strategi pertahanan seperti respons pelarian cepat (*escape response*) juga sangat penting. Misalnya, ikan kecil atau udang bisa melesat dalam sekejap saat mendeteksi ancaman visual atau mekanik. Sistem sensorik yang sangat sensitif membuat mereka mampu menghindari meskipun predator mendekat secara tiba-tiba. Dalam kelompok besar, pertahanan kolektif melalui pembentukan kawanan (*schooling*) membuat predator kesulitan memilih satu target. Studi seperti Herbert-Read et al. (2015) menunjukkan bahwa gelombang pelarian (*escape waves*) menyebar secara kolektif dalam kawanan ikan sebagai respons terhadap ancaman, sedangkan Rodriguez-Pinto et al. (2024) menemukan bahwa persepsi visual yang buruk (misalnya karena lingkungan berkontras rendah) mengurangi kecepatan dan keketatan respons sekolah dalam menghadapi predator.

Strategi lain yang lebih halus adalah mimikri. Beberapa spesies, seperti *mimic octopus* dan ikan *fangblenny*, mampu meniru penampilan maupun perilaku spesies lain yang lebih berbahaya. Dengan menyamar, mereka berhasil mengecoh predator agar mengira dirinya beracun atau berbahaya. Mimikri ini mencerminkan perilaku adaptif yang cerdas, karena membutuhkan kemampuan mengenali lingkungan sekaligus mengolah informasi sensorik yang kompleks (Cheney et al., 2009).

Namun, strategi-strategi pertahanan alami tersebut kini menghadapi tantangan akibat perubahan lingkungan yang dipicu aktivitas manusia. Contohnya, kebisingan kapal dan naiknya suhu laut secara bersamaan telah terbukti mengganggu kemampuan kepiting pantai dalam mengubah warna tubuh (kamuflase) dan memperlambat respons mereka terhadap ancaman predator, sehingga meningkatkan kerentanan terhadap serangan (Coles et al., 2024).

Sebagai bentuk adaptasi terhadap ancaman yang terus berubah, beberapa organisme laut juga mengatur kembali waktu aktivitasnya. Sebagai contoh, banyak ikan di komunitas estuaria dekat pantai meningkatkan aktivitas malam atau senja dibanding siang hari, terutama ketika predator atau risiko predasi lebih tinggi di siang hari. Pergeseran

perilaku ini menunjukkan bahwa strategi pertahanan diri bukanlah sesuatu yang tetap, melainkan respons yang fleksibel yang terus menyesuaikan diri dengan kondisi ekosistem dan tekanan predator (Yeoh et al., 2017).

### **6.9. Perilaku Reproduksi dan Parental Care**

Perilaku reproduksi organisme laut termasuk salah satu aspek paling kompleks dalam ekologi perilaku, karena sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang terus berubah. Banyak invertebrata laut, seperti karang dan bulu babi (echinodermata), menggunakan strategi pemijahan massal (mass spawning). Dalam strategi ini, banyak individu melepaskan sel telur dan sperma ke laut secara serentak, biasanya mengikuti siklus bulan, suhu air, dan pola arus laut. Cara ini meningkatkan peluang terjadinya pembuahan meski risiko telur dimakan predator tetap sangat tinggi (Pen et al., 2020). Sinkronisasi pemijahan juga sering digunakan sebagai tanda kestabilan ekosistem laut tropis.

Di ekosistem terumbu karang, fenomena coral spawning adalah salah satu contoh paling terkenal. Hampir semua koloni karang di suatu area melepaskan gamet (sel telur dan sperma) bersamaan, biasanya setelah bulan purnama pada musim panas. Mekanisme ini bukan hanya meningkatkan peluang reproduksi, tetapi juga menunjukkan betapa pentingnya faktor lingkungan dalam mengatur siklus reproduksi. Namun, penelitian terbaru menemukan bahwa pemanasan laut dapat mengganggu sinkronisasi ini, sehingga menurunkan efisiensi pembuahan dan regenerasi terumbu karang (Kerry et al., 2018).

Sementara itu, berbagai ikan laut menunjukkan strategi reproduksi yang lebih beragam. Beberapa spesies melakukan fertilisasi internal, dan peran unik jantan juga sangat terlihat, seperti pada seahorse (*Hippocampus* spp.) di mana jantan membawa telur di dalam brood pouch sampai menetas; cara ini membantu melindungi telur dari predator dan meningkatkan peluang hidup larva. Sayangnya, kerusakan habitat terutama rusaknya vegetasi laut seperti padang lamun atau substrat kompleks tempat seahorse bertelur telah terbukti mengurangi keberhasilan reproduksi mereka secara signifikan. Foster & Vincent,

(2004) melaporkan bahwa seahorse sangat peka terhadap kehilangan vegetasi laut dan bahwa habitat yang rusak menyebabkan penurunan yang nyata dalam jumlah individu dan reproduksi.

Bentuk lain dari strategi reproduksi adalah **parental care** atau perawatan keturunan. Beberapa ikan karang seperti **damsel fish** dan **gobiid** menjaga sarang telur mereka dengan cara membersihkan dari kotoran dan memastikan telur mendapat cukup oksigen dengan mengipasi sirip. Walaupun membutuhkan energi besar, perilaku ini terbukti penting untuk meningkatkan kelangsungan hidup embrio. Namun, penelitian menemukan bahwa **kebisingan bawah laut** akibat aktivitas manusia dapat mengurangi lamanya parental care, sehingga meningkatkan risiko kematian telur (Nedelec et al., 2017).

Perubahan lingkungan global menambah tantangan baru bagi strategi reproduksi. Misalnya, **pemanasan laut** dapat mempercepat perkembangan embrio, tetapi sering menyebabkan kelainan pada larva. Sementara itu, **pengasaman laut** mengganggu sinyal kimiawi yang penting bagi ikan untuk memilih pasangan. Eksperimen dengan ikan karang menunjukkan bahwa kombinasi perairan asam dan suhu tinggi menurunkan keberhasilan pemijahan serta meningkatkan stres pada induk. Karena itu, perilaku reproduksi dapat dianggap sebagai **bioindikator**, yaitu penanda penting untuk melihat dampak perubahan iklim terhadap kelangsungan populasi laut.

Dari sisi konservasi, memahami perilaku reproduksi dan parental care sangat penting untuk menjaga sumber daya laut tetap berkelanjutan. Gangguan terhadap siklus pemijahan baik akibat penangkapan ikan maupun kerusakan habitat dapat menyebabkan stok ikan menurun drastis. Misalnya, studi global terhadap terumbu karang menunjukkan bahwa kawasan yang sepenuhnya dilindungi memiliki potensi reproduksi ikan (termasuk dari famili yang bernilai komersial) jauh lebih tinggi daripada area yang dieksploitasi, yang artinya kebijakan perlindungan pemijahan dan regulasi perikanan dapat secara nyata meningkatkan pembaharuan populasi ikan (Bucol et al., 2021). Oleh sebab itu, perlindungan kawasan pemijahan, pengaturan musim tangkap, dan rehabilitasi habitat menjadi langkah penting dalam

pengelolaan populasi laut. Dengan menggabungkan pengetahuan ekologi perilaku dan kebijakan konservasi, strategi pengelolaan ekosistem bisa lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan.

# Bab 7

## EKOLOGI LAUT: HUBUNGAN ANTAR ORGANISME

Laut bisa dibayangkan seperti sebuah kota yang sangat luas, tetapi bukan dihuni oleh manusia, melainkan oleh jutaan makhluk hidup. Ada makhluk yang ukurannya kecil sekali seperti plankton yang tidak bisa dilihat dengan mata telanjang, dan ada juga yang besar seperti paus biru yang panjangnya bisa melebihi ukuran bus sekolah. Semua makhluk itu hidup bersama di dalam air laut. Mereka tidak bisa hidup sendirian karena saling membutuhkan satu sama lain. Ada ikan yang makan ganggang, ada penyu yang makan ubur-ubur, ada udang yang membersihkan tubuh ikan besar, bahkan ada bakteri kecil yang membantu mengurai sisa-sisa makhluk laut yang mati agar laut tetap bersih. Itulah sebabnya laut disebut rumah besar bagi semua makhluk laut.

Kalau kita memperhatikan lebih dalam, kehidupan di laut ternyata sangat teratur. Setiap makhluk laut punya tugasnya masing-masing. Ada yang menjadi pembuat makanan, ada yang menjadi pemakan, dan ada yang menjadi pengurai. Semua tugas itu membuat laut bisa terus hidup dan seimbang. Ada makhluk yang saling membantu supaya bisa bertahan hidup, ada juga yang saling bersaing mencari tempat tinggal atau makanan. Misalnya, dua ikan bisa berebut tempat di antara karang, sementara ikan badut dan anemon justru bekerja sama agar keduanya tetap aman. Hubungan antara makhluk-makhluk itu dipelajari dalam ilmu yang disebut **ekologi laut**. Ilmu ini membantu manusia memahami bagaimana semua makhluk di laut saling terhubung dan memengaruhi satu sama lain.

Dalam ekologi laut, para ilmuwan tidak hanya meneliti hewan atau tumbuhan laut saja. Mereka juga mempelajari air laut, arus, suhu, sinar matahari, kadar garam, bahkan zat-zat kecil yang larut di dalam air. Semua hal itu bekerja seperti potongan puzzle yang harus disusun agar gambarnya terlihat utuh. Jika satu potongan puzzle hilang, gambarnya jadi rusak. Begitu juga dengan laut. Bila satu bagian dari laut rusak, seperti terumbu karang yang mati atau air yang tercemar, maka bagian lain juga ikut terganggu. Ikan kehilangan tempat tinggalnya, alga kehilangan tempat tumbuh, dan manusia pun kehilangan sumber makanan dari laut. Karena itu, menjaga semua bagian laut agar tetap sehat sangatlah penting.

Hubungan antar makhluk laut ibarat jalinan tali yang saling mengikat. Bila satu tali putus, tali lainnya akan ikut terlepas. Makhluk laut yang saling membantu menciptakan keseimbangan agar tidak ada yang hidup berlebihan atau kekurangan. Manusia juga termasuk bagian dari keseimbangan itu, karena manusia mengambil banyak manfaat dari laut mulai dari ikan untuk dimakan, garam untuk bumbu, hingga udara bersih yang dihasilkan dari tumbuhan laut. Jika laut rusak, maka kehidupan manusia juga ikut terganggu.

Oleh sebab itu, mengenal cara hidup dan hubungan antarorganisme laut sangat penting bagi kita semua. Dengan memahami bagaimana mereka saling membantu dan beradaptasi, manusia bisa menjaga laut supaya tetap bersih, aman, dan seimbang. Laut yang sehat berarti udara di bumi lebih segar, sumber makanan lebih banyak, dan kehidupan di planet ini bisa terus berjalan dengan baik. Menjaga laut berarti menjaga kehidupan kita sendiri.

### **7.1. Pengertian dan Ruang Lingkup Ekologi Laut**

Ekologi laut adalah ilmu yang membantu kita memahami bagaimana makhluk hidup di laut bisa hidup, tumbuh, dan saling berhubungan dengan lingkungan di sekitarnya. Setiap makhluk laut, baik yang kecil maupun besar, hidup dalam kondisi yang berbeda-beda dan semuanya bergantung pada lingkungan laut tempat mereka tinggal. Lingkungan laut mencakup air asin, suhu air, sinar matahari, arus laut,

pasir, batu karang, hingga makhluk lain di sekitarnya. Semua hal itu bekerja bersama agar kehidupan laut bisa berjalan dengan baik.



Gambar 7.1. Interaksi Antar Makhluk Hidup di Ekosistem Laut  
(Sumber: NOAA, 2025)

Contohnya, ikan tidak bisa hidup di semua tempat. Ada ikan yang hanya bisa hidup di air yang hangat, dan ada juga ikan yang lebih suka di air dingin. Beberapa ikan memerlukan kadar garam tertentu dalam air supaya tubuhnya bisa berfungsi dengan baik. Jika air laut berubah terlalu asin atau terlalu tawar, ikan itu bisa mati. Ganggang laut atau alga juga punya kebutuhan khusus. Mereka memerlukan sinar matahari agar bisa membuat makanannya sendiri lewat proses yang disebut **fotosintesis**. Jika air laut terlalu keruh dan cahaya matahari tidak bisa menembus, ganggang tidak bisa membuat makanan, dan akhirnya banyak hewan yang bergantung pada ganggang juga akan kesulitan makan. Dari sini, kita bisa melihat bahwa makhluk hidup laut sangat bergantung pada keadaan lingkungannya.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Jaya (2024), ekologi laut tidak hanya membahas satu jenis hewan saja, seperti ikan atau terumbu karang, tetapi juga semua hal yang berkaitan dengan kehidupan laut. Penelitian mereka menjelaskan bahwa untuk mengetahui apakah ekosistem laut dalam keadaan sehat, para ilmuwan perlu melihat hubungan antara makhluk hidup dan lingkungan secara menyeluruh. Artinya, mereka mempelajari bagaimana ikan, ganggang, terumbu karang, air, suhu, cahaya, dan arus laut saling terhubung dan saling memengaruhi. Jadi, ekologi laut membantu manusia memahami bahwa

laut adalah sistem yang sangat luas dan rumit, tetapi semuanya bekerja bersama membentuk kehidupan yang indah.

Agar lebih mudah dibayangkan, laut bisa dianggap seperti sebuah kota besar yang sibuk. Dalam kota itu, setiap penduduk punya peran dan pekerjaan masing-masing. Ada “tukang bersih-bersih” seperti udang yang membersihkan kotoran ikan, ada “pembuat makanan” seperti ganggang yang menghasilkan oksigen, dan ada “penjaga keamanan” seperti ikan besar yang menjaga keseimbangan jumlah ikan kecil. Semua penduduk kota laut ini hidup berdampingan dan saling membantu supaya kota tetap berjalan dengan baik. Bila salah satu jenis makhluk laut hilang, misalnya terumbu karang rusak atau plankton menurun jumlahnya, maka keseimbangan kota itu ikut terganggu.

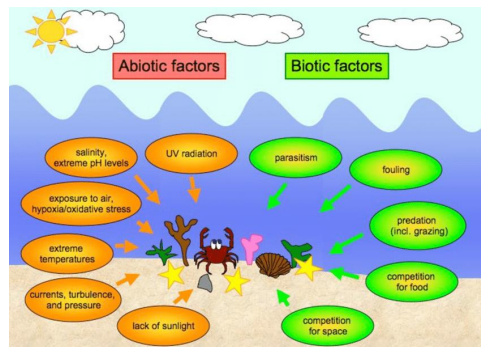
Ekologi laut juga memiliki ruang lingkup yang sangat luas. Tidak hanya di tepi pantai tempat ombak berdebur, tetapi juga sampai ke laut dalam yang gelap dan sunyi. Di tempat yang dalam itu pun ada kehidupan meski bentuknya aneh dan berbeda dari makhluk di permukaan. Ada hewan yang bisa memancarkan cahaya sendiri, ada yang hidup tanpa cahaya matahari, dan ada yang memakan sisa-sisa dari atas laut. Semua itu termasuk dalam pembahasan ekologi laut. Ilmu ini membantu kita memahami bahwa kehidupan di laut sangat beragam, dan semua makhluk punya tempat dan fungsi yang penting bagi keseimbangan alam.

Dengan mempelajari ekologi laut, manusia dapat belajar menghargai betapa berharganya laut bagi kehidupan di bumi. Laut bukan hanya tempat berenang atau mencari ikan, tetapi juga tempat di mana udara bersih dan keseimbangan alam terbentuk. Setiap makhluk, sekecil apa pun, memiliki peran yang berarti dalam menjaga kehidupan laut tetap harmoni.

## **7.2. Komponen Biotik dan Abiotik Ekosistem Laut**

Laut adalah tempat yang sangat luas dan penuh kehidupan. Di dalamnya, ada makhluk besar seperti paus dan hiu, serta makhluk kecil seperti plankton dan bakteri yang tidak bisa dilihat dengan mata biasa. Semua makhluk itu hidup berdampingan dan saling bergantung satu

sama lain. Kehidupan di laut tidak hanya ditentukan oleh makhluk hidup, tetapi juga oleh hal-hal yang tidak hidup seperti air, cahaya matahari, suhu, dan arus. Kedua hal ini, makhluk hidup dan benda tak hidup bekerja bersama membentuk keseimbangan yang membuat laut tetap menjadi rumah yang nyaman bagi jutaan organisme.



Gambar 7.2. Faktor biotik dan abiotik yang mengatur ekosistem laut (Sumber: Diederich, 2009)

Di laut, setiap unsur memiliki perannya masing-masing. Makhluk hidup berfungsi menjaga keberlanjutan kehidupan, sedangkan unsur tak hidup membantu menciptakan kondisi yang cocok agar kehidupan itu bisa terus berlangsung. Jika salah satu terganggu, maka seluruh ekosistem laut dapat terpengaruh. Oleh karena itu, memahami bagaimana komponen biotik dan abiotik bekerja bersama sangat penting agar kita bisa menjaga kelestarian laut.

### 7.2.1. Makna Komponen Biotik

Di dalam laut yang sangat luas, terdapat jutaan makhluk hidup yang saling berinteraksi. Semua makhluk hidup itu disebut sebagai komponen biotik. Komponen biotik mencakup semua bentuk kehidupan di laut, baik yang besar maupun yang sangat kecil. Misalnya, ikan-ikan yang berenang bebas di air, udang yang hidup di dasar pasir, kepiting yang bersembunyi di balik batu, hingga rumput laut yang bergoyang lembut mengikuti arus. Bahkan, makhluk kecil yang tidak bisa dilihat mata seperti bakteri juga termasuk bagian dari komponen biotik.

Walaupun ukurannya kecil, mereka memiliki peran penting menjaga kebersihan dan keseimbangan laut.

Makhluk hidup di laut tidak hanya hidup begitu saja, tetapi punya tugas berbeda-beda. Ada yang bertugas sebagai **produsen**, yaitu pembuat makanan sendiri seperti rumput laut dan fitoplankton. Mereka menggunakan sinar matahari untuk membuat makanan melalui proses yang disebut fotosintesis. Ada pula **konsumen**, yaitu makhluk hidup yang makan makhluk lain untuk mendapatkan energi, contohnya ikan, cumi-cumi, atau paus. Terakhir, ada **pengurai**, yaitu makhluk seperti bakteri yang bertugas memecah sisa-sisa makhluk mati agar bisa menjadi zat berguna kembali bagi laut. Semua peran itu penting agar kehidupan di laut tetap berjalan dengan baik, seperti roda yang terus berputar tanpa henti.

### **7.2.2. Makna Komponen Abiotik**

Selain makhluk hidup, laut juga memiliki unsur-unsur yang tidak hidup, disebut **komponen abiotik**. Komponen ini meliputi hal-hal seperti suhu air, kadar garam, sinar matahari, arus laut, tekanan air, serta oksigen yang terlarut di dalam air. Walaupun benda-benda itu tidak bernyawa, mereka sangat berpengaruh terhadap kehidupan di laut. Misalnya, bila suhu air terlalu panas karena cuaca ekstrem, ikan bisa merasa tidak nyaman bahkan mati. Jika kadar garam berubah, beberapa makhluk laut mungkin tidak bisa bertahan hidup.

Sinar matahari juga berperan penting, terutama bagi rumput laut dan fitoplankton yang membuat makanan sendiri. Tanpa cahaya, mereka tidak bisa berfotosintesis. Arus laut membantu menyebarkan makanan, oksigen, dan telur-telur ikan ke berbagai tempat. Karena itu, komponen abiotik dapat diibaratkan seperti “alat pendukung kehidupan” yang membuat semua makhluk laut bisa tumbuh dan hidup sehat.

### **7.2.3. Hubungan antara Biotik dan Abiotik**

Menurut penelitian Assan et al. (2020), perubahan kecil pada lingkungan laut bisa membawa dampak besar. Misalnya, bila suhu air meningkat karena pemanasan global, banyak makhluk hidup di laut akan

kesulitan beradaptasi. Beberapa jenis ikan akan berpindah ke daerah yang lebih dingin, sementara terumbu karang bisa mengalami pemutihan dan akhirnya mati. Pencemaran dari limbah pabrik atau sampah plastik juga membuat air laut menjadi kotor dan beracun. Kondisi ini membuat ikan, udang, serta biota laut lainnya kehilangan tempat hidup yang aman.

Keseimbangan antara komponen biotik dan abiotik sangat penting. Jika salah satu terganggu, kehidupan laut akan ikut terganggu juga. Seperti sebuah orkestra musik, semua pemainnya harus bekerja sama agar suara yang dihasilkan indah didengar. Bila salah satu pemain tidak mengikuti irama, lagu itu akan terdengar kacau. Hal yang sama terjadi di laut. Biotik dan abiotik harus “bermain” bersama dengan seimbang agar ekosistem laut tetap sehat.

### **7.3. Jenis-Jenis Interaksi Antarorganisme di Laut**

Di dalam laut yang luas, setiap makhluk hidup saling berhubungan satu sama lain. Tidak ada yang benar-benar bisa hidup sendirian. Ada hubungan yang membawa manfaat bagi kedua pihak, ada yang hanya menguntungkan salah satu, dan ada pula yang melibatkan persaingan atau pemangsaan. Semua bentuk hubungan ini disebut **interaksi antarorganisme**. Interaksi tersebut sangat penting karena membantu menjaga keseimbangan kehidupan di laut. Tanpa adanya kerja sama dan keseimbangan, laut bisa menjadi tempat yang sulit untuk dihuni oleh makhluk hidup.

#### **7.3.1. Makhluk Laut yang Saling Membantu (Mutualisme)**



Gambar 7.3. Terumbu karang yang berwarna warni akibat bersimbiosis dengan Zooxanthellae (Sumber : Amira, 2021)

Di lautan yang luas, setiap makhluk hidup tidak bisa hidup sendirian. Semua saling bergantung satu sama lain agar bisa bertahan. Ada yang saling membantu, ada yang hidup berdampingan tanpa saling mengganggu, dan ada pula yang berkompetisi. Salah satu hubungan yang sangat menarik disebut mutualisme, yaitu hubungan saling menguntungkan antara dua makhluk hidup. Contohnya adalah ikan badut dan anemon laut. Ikan badut hidup di antara tentakel anemon untuk berlindung dari hewan pemangsa, karena tentakel anemon bisa menyengat. Sebagai balasannya, ikan badut membantu membersihkan anemon dari kotoran atau sisa makanan. Keduanya seperti sahabat yang saling menjaga agar tetap aman dan sehat.

Bila dilihat lebih dekat, hubungan seperti ini menunjukkan betapa hebatnya cara alam bekerja. Setiap makhluk punya peran dan tugas yang berbeda, tetapi semuanya saling terhubung. Seandainya ikan badut menghilang, anemon bisa lebih mudah kotor dan sakit. Sebaliknya, tanpa anemon, ikan badut tidak memiliki tempat aman untuk tinggal. Hubungan saling membantu ini mengajarkan bahwa kerja sama membuat kehidupan di laut menjadi lebih seimbang dan damai.

### **7.3.2. Makhluk yang Hidup Berdampingan Tanpa Merugikan (Komensalisme)**



Gambar 7.4. Simbiosis komensalisme antara ikan remora dan hiu  
(Sumber : Sindonews, 2023)

Ada juga jenis hubungan yang disebut komensalisme, yaitu ketika satu makhluk hidup mendapatkan keuntungan, tetapi yang lain tidak dirugikan. Contohnya adalah ikan remora yang sering menempel di tubuh

hiu. Ikan remora memiliki alat pengisap di kepala yang membantunya menempel dengan kuat pada hiu tanpa melukainya. Dengan cara itu, remora bisa ikut berenang ke mana pun hiu pergi tanpa harus mengeluarkan tenaga banyak. Selain itu, remora juga memakan sisa-sisa makanan dari hiu, sehingga mendapatkan makanan dengan mudah.

Hiu sendiri tidak dirugikan oleh kehadiran remora, karena ikan kecil itu hanya menempel tanpa mengambil darah atau dagingnya. Hubungan seperti ini membuat remora bisa bertahan hidup lebih lama tanpa harus berburu. Hubungan komensalisme mengajarkan bahwa dalam kehidupan, terkadang kita bisa mendapatkan manfaat tanpa menyakiti makhluk lain.

### 7.3.3. Hubungan yang Merugikan Salah Satu Pihak (Parasitisme)



Gambar 7.5. Sea lamprey yang menempel pada ikan menggunakan giginya (Sumber: Chen, 2014)

Tidak semua hubungan di laut membawa kebaikan bagi keduanya. Ada juga hubungan yang disebut parasitisme, yaitu ketika satu makhluk hidup mengambil keuntungan tetapi membuat yang lain rugi. Contohnya adalah lintah laut yang menempel di tubuh ikan. Lintah laut mengisap darah ikan untuk mendapatkan makanan, sedangkan ikan menjadi lemah karena kehilangan darah. Meskipun terlihat kecil, parasit seperti lintah bisa membuat ikan sakit dan lambat berenang.

Di alam, parasit memang memiliki peran tersendiri, tetapi bila jumlahnya terlalu banyak, ekosistem bisa terganggu. Misalnya, jika banyak ikan yang terkena parasit, maka populasi ikan akan menurun. Hal itu bisa memengaruhi rantai makanan di laut karena hewan pemangsa seperti hiu akan kesulitan mencari mangsa. Hubungan parasitisme

mengajarkan bahwa mengambil sesuatu secara berlebihan dari makhluk lain bisa membawa kerugian besar bagi semua pihak.

#### 7.3.4. Hubungan Persaingan (Kompetisi) dan Pemangsaan (Predasi)



Gambar 7.6. Terumbu karang yang awalnya mati (bleaching) kemudian ditumbuhi alga di Greet Barrier Reef Australia (Sumber : Ecologise, 2016)

Ekosistem laut bekerja dengan cara yang sangat teratur. Di dalamnya, makhluk hidup saling berinteraksi, ada yang bersaing untuk mendapatkan makanan, ruang hidup, atau cahaya. Ada pula yang hidup dengan cara memangsa makhluk lain untuk bertahan. Hubungan seperti ini membantu alam laut tetap seimbang, karena setiap peran memiliki fungsi penting dalam menjaga kehidupan bersama.

##### 7.3.4.1. Kompetisi

Di lautan yang luas, makhluk hidup harus berjuang untuk bisa bertahan. Salah satu bentuk perjuangan itu disebut **kompetisi**, yaitu saat dua atau lebih makhluk hidup saling bersaing untuk mendapatkan hal yang sama. Persaingan bisa terjadi karena mereka membutuhkan sumber daya yang terbatas, seperti makanan, tempat tinggal, atau pasangan. Contohnya, ikan-ikan kecil yang tinggal di sekitar terumbu karang sering berebut tempat untuk bersembunyi agar terhindar dari pemangsa. Begitu juga gurita dan kepiting yang sama-sama mencari makanan di dasar laut, mereka harus bersaing untuk mendapatkan makanan terbaik agar bisa tetap hidup dan tumbuh dengan baik.

Walaupun terlihat seperti pertarungan, kompetisi sebenarnya memiliki manfaat bagi kehidupan laut. Melalui persaingan, makhluk laut belajar untuk beradaptasi, menjadi lebih kuat, dan mencari cara baru

untuk bertahan hidup. Ikan yang lebih cepat atau lebih pintar biasanya akan lebih mudah mendapatkan makanan. Persaingan seperti ini membantu menjaga keseimbangan populasi di laut, karena tidak semua makhluk bisa mendominasi satu wilayah. Dengan adanya kompetisi, laut menjadi tempat yang penuh dinamika, di mana setiap makhluk belajar berjuang tanpa harus saling memusnahkan.

#### **7.3.4.2. Predasi**

Selain persaingan, di laut juga terjadi hubungan yang disebut predasi, yaitu hubungan antara makhluk hidup pemangsa dan makhluk hidup yang dimangsa. Contohnya adalah hiu yang memangsa ikan kecil, paus yang memakan plankton, atau penyu yang memakan ubur-ubur. Hubungan ini tampak kejam, tetapi sebenarnya sangat penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem laut. Bila tidak ada pemangsa seperti hiu, jumlah ikan kecil bisa meningkat terlalu banyak. Akibatnya, makanan di laut seperti plankton atau rumput laut akan habis dimakan, dan kehidupan laut menjadi tidak seimbang.

Predasi juga berperan besar dalam menjaga kualitas kehidupan laut. Pemangsa biasanya memilih mangsa yang lemah, sakit, atau lambat, sehingga hanya makhluk yang kuat dan sehat yang bertahan. Dengan cara ini, alam secara alami menjaga agar generasi makhluk laut tetap sehat dan tangguh. Selain itu, predasi membantu mengatur rantai makanan agar tidak ada satu jenis makhluk yang jumlahnya terlalu banyak. Hubungan ini menunjukkan bahwa meskipun tampak keras, laut sebenarnya memiliki sistem keseimbangan yang adil agar semua makhluk bisa hidup berdampingan dengan perannya masing-masing.

#### **7.3.5. Pentingnya Keseimbangan Hubungan di Laut**

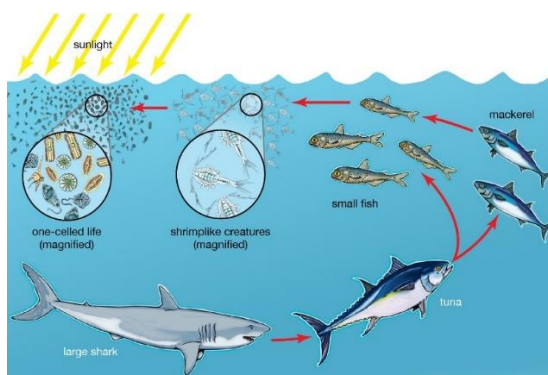
Menurut penelitian Motivarash et al. (2020), berbagai jenis hubungan di laut seperti mutualisme, komensalisme, parasitisme, kompetisi, dan predasi membuat kehidupan laut tetap teratur. Semua hubungan itu membentuk keseimbangan komunitas di laut. Bila salah satu jenis interaksi berubah, misalnya karena pencemaran atau penangkapan ikan berlebihan, maka ekosistem laut bisa terganggu.

Contohnya, jika ikan kecil habis ditangkap, hewan pemangsa seperti hiu akan kesulitan mencari makanan. Akibatnya, hiu bisa punah dan rantai makanan laut menjadi tidak seimbang.

Setiap makhluk laut, besar atau kecil, memiliki peran penting untuk menjaga kehidupan di laut agar tetap harmonis. Manusia juga menjadi bagian dari tanggung jawab itu. Dengan menjaga laut tetap bersih dan tidak merusaknya, manusia ikut membantu menjaga semua hubungan antarorganisme laut tetap berjalan dengan baik.

## 7.4. Rantai Makanan dan Jaring-Jaring Makanan Laut

### 7.4.1. Pengertian Rantai Makanan di Laut



Gambar 7.7. Ilustrasi rantai makanan di laut (Sumber: Muda, 2025)

Rantai makanan laut adalah hubungan makan dan dimakan antar makhluk hidup di laut yang membuat energi dapat berpindah dari satu makhluk ke makhluk lain. Misalnya, makhluk kecil bernama fitoplankton membuat makanannya sendiri dengan bantuan sinar matahari. Fitoplankton dimakan oleh hewan kecil seperti zooplankton, lalu zooplankton dimakan oleh ikan kecil. Ikan kecil bisa dimakan oleh ikan yang lebih besar, dan akhirnya ikan besar bisa menjadi santapan hiu atau paus. Ketika hiu atau paus mati maka akan dimakan atau diuraikan oleh organisme pengurai yang disebut dekomposer. Semua proses itu adalah bagian dari rantai makanan laut yang menjaga kehidupan di dalam laut agar tetap berjalan seimbang. Menurut penelitian oleh Smith et al. (2011), rantai makanan membantu menjaga kestabilan populasi hewan

laut karena setiap makhluk memiliki peran penting dalam sistem energi laut.

Disebut rantai karena setiap makhluk di dalamnya saling terhubung seperti mata rantai. Jika satu bagian hilang, maka bagian lainnya juga akan terpengaruh. Misalnya, jika plankton berkurang akibat polusi, ikan kecil tidak punya cukup makanan, lalu ikan besar ikut menurun jumlahnya. Keadaan ini membuat predator seperti hiu sulit mencari mangsa. Hubungan sederhana ini memperlihatkan betapa pentingnya setiap makhluk laut, baik yang kecil maupun besar. Tanpa keseimbangan di antara mereka, laut bisa kehilangan kemampuan alaminya untuk menyehatkan diri.

Perubahan lingkungan, seperti suhu laut yang meningkat atau pencemaran air, bisa menyebabkan rantai makanan terganggu. Neelmani et al. (2019) menjelaskan bahwa perubahan suhu dan pencemaran menyebabkan aliran energi di laut tidak stabil, karena banyak spesies sulit beradaptasi. Oleh sebab itu, menjaga rantai makanan berarti juga menjaga keseimbangan seluruh kehidupan laut agar tetap kuat menghadapi perubahan alam dan kegiatan manusia.

#### **7.4.2. Peran Produsen, Konsumen, dan Pengurai dalam Laut**

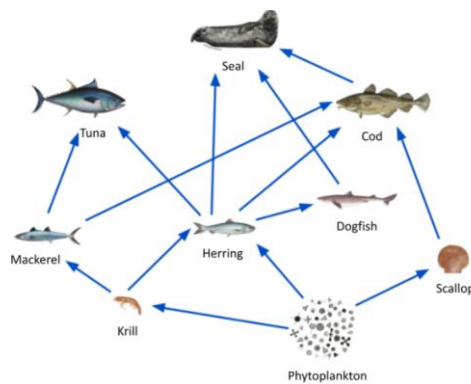
Setiap makhluk di laut memiliki tugas penting dalam rantai makanan. Ada yang membuat makanan sendiri, ada yang memakan makhluk lain, dan ada pula yang bertugas membersihkan sisa-sisa makhluk yang mati. Semua bekerja seperti tim besar agar energi bisa terus berputar. Kelompok utama dalam proses ini adalah produsen, konsumen, dan pengurai. Tanpa ketiganya, laut tidak akan bisa menopang kehidupan makhluk yang tinggal di dalamnya.

Produsen adalah makhluk yang bisa membuat makanannya sendiri, biasanya dengan bantuan sinar matahari. Fitoplankton dan alga laut termasuk produsen penting di laut. Walaupun ukurannya kecil, mereka menghasilkan sebagian besar oksigen di bumi dan menjadi makanan utama bagi banyak hewan laut. Paerl & Justic (2011) menyebutkan bahwa fitoplankton memiliki peran besar dalam menjaga energi di laut karena mereka menjadi dasar dari semua jaring makanan

laut. Dari energi yang dihasilkan oleh produsen inilah semua makhluk laut mendapatkan kehidupan.

Konsumen adalah makhluk yang tidak bisa membuat makanannya sendiri. Mereka memakan makhluk lain untuk mendapatkan energi. Misalnya, zooplankton memakan fitoplankton, lalu dimakan oleh ikan kecil seperti ikan teri. Ikan kecil bisa dimakan oleh ikan besar atau mamalia laut seperti lumba-lumba. Di sisi lain, pengurai seperti bakteri dan jamur bekerja memecah sisa-sisa tubuh hewan mati menjadi zat hara. Zat hara ini akan digunakan kembali oleh fitoplankton untuk membuat makanan baru. Siklus ini menunjukkan bahwa di laut tidak ada yang benar-benar terbuang karena semuanya memiliki fungsi masing-masing.

### 7.4.3. Jaring-Jaring Makanan Laut



Gambar 7.8. Ilustrasi jaring-jaring makanan di laut (Sumber: NOAA, 2025)

Jaring-jaring makanan laut (*food web*) terbentuk ketika banyak rantai makanan saling terhubung. Tidak seperti rantai makanan yang hanya menggambarkan satu urutan makan dan dimakan, jaring makanan memperlihatkan bahwa satu makhluk bisa memiliki lebih dari satu jenis makanan dan bisa juga dimakan oleh lebih dari satu predator. Contohnya, ikan kecil bisa memakan plankton dan alga, tetapi juga bisa dimakan oleh ikan besar, cumi-cumi, atau burung laut. Hal ini membuat jaring makanan lebih rumit, tetapi juga lebih kuat terhadap perubahan.

Gagne et al. (2018) menjelaskan bahwa jaring makanan di laut bersifat dinamis, artinya selalu berubah sesuai dengan kondisi lingkungan. Jika salah satu spesies berkurang, spesies lain bisa menyesuaikan diri dengan mencari sumber makanan yang berbeda. Misalnya, ketika jumlah ikan kecil menurun, burung laut bisa beralih memakan hewan lain seperti udang kecil atau larva ikan. Hal ini membantu ekosistem laut tetap berjalan meskipun ada perubahan di salah satu bagian.

Walaupun begitu, jaring makanan juga bisa menjadi rapuh jika perubahan yang terjadi terlalu besar. Jika manusia menangkap ikan secara berlebihan, banyak hewan lain akan kehilangan sumber makanan utamanya. Menurut Ávila-Thieme et al. (2021), jaring makanan yang tidak seimbang bisa menimbulkan dampak ekonomi dan sosial bagi manusia karena hasil laut menjadi berkurang. Oleh karena itu, memahami jaring makanan laut bukan hanya penting untuk menjaga alam, tetapi juga untuk menjaga kehidupan manusia yang bergantung pada laut.

#### **7.4.4. Pentingnya Menjaga Keseimbangan Rantai dan Jaring Makanan Laut**

Keseimbangan dalam rantai dan jaring makanan laut adalah hal yang sangat penting agar laut tetap sehat. Jika satu jenis makhluk terlalu banyak atau terlalu sedikit, seluruh sistem bisa terganggu. Misalnya, ketika hiu terlalu sering ditangkap, ikan kecil akan tumbuh tanpa kendali dan memakan terlalu banyak plankton. Akibatnya, plankton bisa habis, lalu seluruh kehidupan di laut terganggu. Hammerschlag (2019) menyebutkan bahwa predator besar seperti hiu berperan penting dalam menjaga populasi agar tidak berlebihan, sehingga keseimbangan tetap terjaga.

Keseimbangan laut juga bisa rusak akibat aktivitas manusia. Pembuangan limbah, penggunaan jaring pukat harimau, dan polusi minyak membuat banyak hewan laut mati. Ketika jumlah produsen seperti fitoplankton berkurang, seluruh jaring makanan ikut terganggu. Waite et al. (2003) menekankan bahwa perlindungan terhadap spesies

dasar seperti plankton dan alga adalah langkah penting untuk mencegah kerusakan besar pada ekosistem laut.

Menjaga keseimbangan laut tidak selalu harus dilakukan dengan cara besar. Hal-hal sederhana, seperti membuang sampah pada tempatnya, tidak menggunakan plastik sekali pakai, atau ikut dalam kegiatan bersih pantai, juga membantu menjaga rantai dan jaring makanan laut. Ketika laut bersih dan sehat, semua makhluk di dalamnya bisa hidup dengan baik, dan manusia pun mendapat manfaat berupa udara bersih, hasil laut, serta keindahan alam yang tetap terjaga.

# Bab 8

## STRUKTUR DAN DINAMIKA EKOSISTEM LAUT

### 8.1. Definisi dan Lingkup Ekosistem Laut

Ekosistem laut mencakup beragam organisme hidup dan lingkungan fisiknya di samudra, laut, dan wilayah pesisir. Ekosistem ini meliputi perairan pesisir dangkal hingga laut dalam, termasuk terumbu karang, estuari, hutan bakau, padang lamun, dan habitat laut lepas. Sekitar 70% permukaan bumi didominasi oleh laut dan memainkan peran penting dalam pengaturan iklim global, siklus nutrisi, dan keanekaragaman hayati (Wu & Xuan, 2023). Lingkup ekosistem laut meliputi interaksi kompleks antara faktor biotik dan abiotik, serta dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan yang rentan ini. Ekosistem ini mendukung beragam bentuk kehidupan, mulai dari plankton mikroskopis hingga mamalia laut besar, dan menyediakan layanan penting seperti produksi pangan, penyerapan karbon, dan perlindungan pesisir. Berbeda dengan ekosistem terestrial, ekosistem laut bersifat cair dan saling terhubung, dipengaruhi oleh arus laut, pasang surut, dan sistem iklim global. Karakteristik fisik dan kimia ekosistem laut secara langsung memengaruhi distribusi, perilaku, dan adaptasi organisme laut yang berkaitan dengan jaring-jaring makanan dan transfer energi. Proses biologis laut berkontribusi pada jasa ekosistem esensial, seperti siklus nutrisi dan penyerapan karbon.

Ekosistem laut mencakup beragam habitat, mulai dari zona pesisir dangkal hingga palung laut terdalam. Ekosistem pesisir seperti mangrove, rawa asin, dan padang lamun memiliki fungsi sebagai tempat pembibitan yang penting bagi spesies laut dan memberikan perlindungan terhadap erosi pantai. Terumbu karang, yang sering disebut

sebagai "hutan hujan laut", menyimpan keanekaragaman hayati yang luar biasa dan berkontribusi signifikan terhadap perikanan dan perlindungan pesisir (Mogalekar et al., 2015). Laut terbuka, atau zona pelagis, membentang dari perairan permukaan yang disinari matahari hingga kedalaman yang gelap, dengan plankton yang membentuk fondasi jaring makanan kompleks yang menopang ikan, mamalia laut, dan burung laut. Lebih jauh lagi, ekosistem laut dalam seperti ventilasi hidrotermal dan dataran abisal mendukung organisme yang sangat terspesialisasi yang beradaptasi dengan kondisi tekanan ekstrem, kegelapan, dan suhu rendah (Hull, 2017). Ekosistem laut kutub, yang dibentuk oleh lapisan es musiman, sama pentingnya, mendukung spesies seperti udang krill yang berfungsi sebagai dasar rantai makanan kutub (Ward et al., 2020).

Kesehatan dan stabilitas ekosistem laut semakin terancam oleh aktivitas manusia, termasuk penangkapan ikan berlebihan, polusi, dan perubahan iklim (Harley et al., 2006; Ward et al., 2020). Tekanan-tekanan ini telah menyebabkan penurunan signifikan keanekaragaman hayati laut, kerusakan habitat, serta perubahan kimia dan suhu laut. Upaya untuk melindungi dan memulihkan ekosistem laut telah mendapatkan perhatian besar dalam beberapa tahun terakhir, dengan inisiatif-inisiatif seperti kawasan lindung laut, praktik penangkapan ikan berkelanjutan, dan perjanjian internasional untuk mengurangi polusi dan memitigasi dampak perubahan iklim (Agardy et al., 2011; Roberts et al., 2003).

## **8.2. Komponen Ekosistem Laut**

Ekosistem laut terdiri oleh interaksi faktor abiotik dan biotik, yang bersama-sama mengatur proses ekologi, keanekaragaman hayati, dan produktivitas. Faktor abiotik, seperti suhu, salinitas, ketersediaan nutrisi, dan cahaya, membentuk kerangka lingkungan tempat kehidupan berada. Faktor biotik meliputi produsen, konsumen, dan pengurai yang berinteraksi secara dinamis dalam jaring-jaring makanan.

### **8.2.1. Faktor Abiotik**

Faktor abiotik menentukan batas fisik dan kimia ekosistem laut. Penetrasi cahaya menurun seiring kedalaman, sehingga membentuk

zona eufotik tempat fotosintesis berlangsung hingga kedalaman sekitar 200 meter di perairan jernih (Kirk, 2010; Longhurst, 2007; Morel & Maritorena, 2001). Di dalam zona ini, fitoplankton seperti *Prochlorococcus* dan *Synechococcus* membentuk dasar jaring-jaring makanan laut, yang mendorong produktivitas primer (Ducklow, 2001). Lamun (misalnya, *Zostera marina*) dan karang pembentuk terumbu (misalnya, *Acropora* spp.) juga bergantung pada cahaya yang cukup untuk fotosintesis, sementara karang bergantung pada alga simbiotiknya (*Symbiodinium*) untuk energi. Sebaliknya, organisme di "zona senja" mesopelagik (200–1.000 m), seperti ikan lentera (*Myctophidae*) dan ikan mulut berbulu (*Gonostomatidae*), memiliki bioluminesensi untuk beradaptasi dengan kurangnya cahaya, sementara ekosistem di bawah 1.000 m di zona afotik bergantung pada bakteri kemosintetik yang mendukung komunitas seperti cacing tabung raksasa (*Riftia pachyptila*) di sekitar ventilasi hidrotermal (Van Dover, 2000).

Gradien suhu juga membentuk distribusi spesies, dengan perairan tropis mendukung keanekaragaman hayati terumbu karang tempat karang (misalnya, *Acropora millepora*) dan ikan karang (misalnya, *Chaetodon* spp.) tumbuh subur dalam kondisi hangat dan stabil. Sebaliknya, perairan kutub didominasi oleh organisme yang beradaptasi dengan suhu dingin seperti krill Antartika (*Euphausia superba*), ikan es (*Channichthyidae*), dan ikan kod Arktik (*Boreogadus saida*), yang memiliki protein antibeku sehingga memungkinkan hidup di lingkungan bersuhu di bawah nol derajat (Peck, 2018; Somero, 2010). Perubahan iklim telah mengubah dinamika ini, yang menyebabkan pergeseran komunitas plankton dan migrasi spesies ke arah kutub seperti ikan kod Atlantik (*Gadus morhua*) (Somero, 2010).

Salinitas, yang umumnya berkisar antara 34–36 ppt di lautan terbuka, semakin memengaruhi osmoregulasi dan batas toleransi spesies. Spesies euryhaline, seperti ikan killifish bakau (*Kryptolebias marmoratus*) dan belut Eropa (*Anguilla anguilla*), memiliki toleransi rentang salinitas yang luas dan bermigrasi antara sistem laut dan air tawar. Sebaliknya, spesies stenohalin seperti kebanyakan ikan karang (*Pomacentridae*) dan tuna pelagis (*Thunnus* spp.) membutuhkan kondisi

salinitas yang relatif stabil. Ekosistem estuari, dengan salinitas yang berfluktuasi, mendukung organisme yang tangguh seperti tiram (*Crassostrea virginica*) dan kepiting bakau (*Scylla serrata*), sementara lingkungan ekstrem seperti Laut Merah yang hipersalin menampung karang dan ikan yang beradaptasi dengan salinitas di atas 40 ppt (Kültz, 2015).

Nutrien juga memainkan peran penting. Rata-rata, organisme laut memiliki rasio Redfield klasik 106C:16N:1P, yang berarti sekitar 50% dari berat keringnya adalah karbon, 7–10% nitrogen, dan sekitar 1% fosfor, dengan kontribusi yang lebih kecil namun signifikan dari sulfur, kalsium, magnesium, dan unsur-unsur renik seperti besi dan zinc (R. W. Sterner & Elser, 2002). Distribusi nutrisi sangat tidak merata, dengan zona arus naik seperti Arus Humboldt menopang beberapa perikanan paling produktif di dunia (Bertrand et al., 2011).

Tabel 8. 1. Perkiraan Komposisi Nutrien Organisme Laut (berdasarkan berat kering)

Nutrien	Rata-rata % dari Berat Kering	Peran Biologis
Karbon (C)	~50%	Tulang punggung struktural molekul organik
Nitrogen (N)	~7–10%	Protein, asam nukleat, klorofil
Fosfor (P)	~1%	ATP, asam nukleat, fosfolipid
Sulfur (S)	~0.5%	Asam amino (sistein, metionin)
Kalsium (Ca)	~0.1–1% (variatif)	Cangkang, rangka (CaCO <sub>3</sub> )
Magnesium (Mg)	<0.1%	Atom sentral dalam klorofil
Besi (Fe)	Sedikit (<0.01%)	Enzim, transpor elektron
Zinc (Zn), Tembaga (Cu), dll.	Sedikit (<0.01%)	Kofaktor dalam enzim

Sumber: (Bertrand et al., 2013; Nordeide et al., 2011; R. Sterner & Elser, 2002)

Selain itu, faktor hidrodinamik seperti arus laut, pasang surut, dan gelombang sangat memengaruhi distribusi nutrisi, larva, dan sedimen. Arus bertindak sebagai sistem transportasi utama, menghubungkan ekosistem yang berjauhan dan mengatur distribusi panas di seluruh dunia, sementara gaya pasang surut mendorong pencampuran berkala perairan pesisir, meningkatkan siklus nutrisi dan produktivitas. Gelombang laut, terutama di perairan dangkal, membentuk morfologi

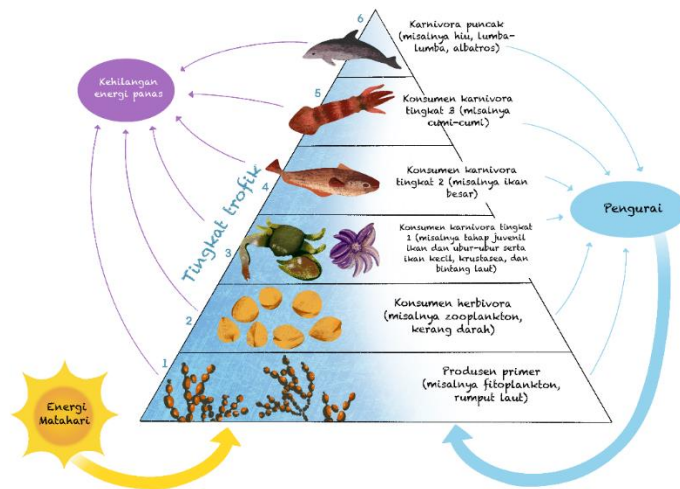
pesisir, memengaruhi pertukaran gas, dan berdampak pada penyebaran organisme planktonik. Spesies laut tertentu menunjukkan ketergantungan yang jelas pada proses-proses ini: terumbu karang (misalnya, *Acropora* spp.) tumbuh subur di daerah yang terpapar gelombang di mana pergerakan air memberikan oksigen dan nutrisi sekaligus mencegah akumulasi sedimen; hutan kelp (*Macrocystis pyrifera*) bergantung pada arus naik yang kaya nutrisi untuk pertumbuhan; bivalvia seperti kerang (*Mytilus edulis*) dan tiram (*Crassostrea gigas*) mengandalkan pasang surut untuk memasok makanan planktonik; dan banyak spesies ikan, seperti belut Eropa (*Anguilla anguilla*) dan sarden (*Sardinops sagax*), menggunakan arus laut selama fase pemijahan dan penyebaran larva (Cowen & Sponaugle, 2009; Gaylord & Gaines, 2000; Woodson & Litvin, 2015).

### **8.2.2. Faktor Biotik**

Faktor biotik dalam ekosistem laut mencakup semua komponen hidup yang berinteraksi satu sama lain untuk membentuk struktur dan fungsi ekosistem. Di tingkat dasar terdapat produsen primer fitoplankton, yang merupakan salah satu organisme paling melimpah di Bumi, serta makroalga seperti kelp (*Macrocystis pyrifera*), lamun (*Thalassia testudinum*), dan pohon bakau (*Rhizophora* spp., *Avicennia* spp.). Secara kolektif, produsen-produsen ini menyumbang hampir 50% dari produksi primer global, mendorong fiksasi karbon dan pelepasan oksigen dalam skala planet (M. J. Behrenfeld & Falkowski, 1997). Hutan mangrove, khususnya, berperan sebagai ekosistem "karbon biru", yang menyerap sejumlah besar karbon baik dalam biomassa maupun sedimen (Valiela et al., 2009), sementara padang lamun seperti yang dibentuk oleh *Thalassia* menyediakan habitat pembibitan yang esensial dan menstabilkan sedimen di zona pesisir dangkal (Duarte et al., 2013).

Produsen-produsen ini menopang konsumen primer, termasuk zooplankton (misalnya, copepoda, krill), ikan herbivora seperti ikan kakatua (Scaridae), dan detritivor bakau seperti kepiting biola (*Uca* spp.) yang mengolah serasah daun. Mereka menopang konsumen sekunder dan tersier. Ikan predator seperti tuna (*Thunnus* spp.), hiu

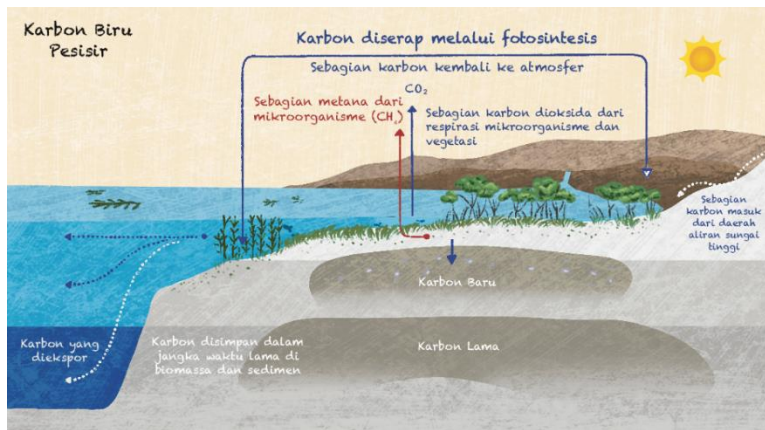
(Carcharhinidae), dan kerapu (Epinephelidae), serta burung laut seperti albatros (Diomedidae) dan mamalia laut tingkat tinggi seperti orca (*Orcinus orca*), menempati tingkat trofik yang lebih tinggi. Transfer energi vertikal ini, biasanya hanya ~10% energi yang berpindah antar tingkat trofik yang mempertahankan struktur dan fungsi jaring makanan laut (Hutchinson, 1959; Paine, 1969).



Gambar 8.1. Piramida trofik dalam ekosistem laut yang menunjukkan aliran energi dari produsen primer hingga ke karnivora puncak, serta peran pengurai dalam mendaur ulang materi organik. Hanya sekitar 10% energi yang berpindah antar tingkat trofik, sedangkan sisanya hilang sebagai panas. (Sumber: Science Learning Hub – University of Waikato (<https://www.sciencelearn.org.nz/resources/174-marine-food-webs>), telah diterjemahkan dan dimodifikasi ke dalam Bahasa Indonesia)

Pengurai dan detritivor, termasuk bakteri heterotrofik, fungi, dan invertebrata benthik seperti teripang (Holothuroidea), memainkan peran penting dalam daur ulang bahan organik. Dalam ekosistem mangrove dan lamun, pengurai mikroba menguraikan daun-daun gugur dan detritus organik, memperkaya perairan estuari di sekitarnya dengan nutrisi yang menyuplai plankton dan ekosistem di sekitarnya, meregenerasi nutrisi esensial seperti nitrogen dan fosfor, yang kembali memasuki zona fotik melalui pencampuran dan arus naik, menopang produksi primer (Polis et al., 1997).

Interaksi spesies, kompetisi, simbiosis, dan mutualisme semakin membentuk dinamika komunitas laut. Contohnya terumbu karang, karang pembentuk terumbu (*Acropora* spp.) bergantung pada hubungan mutualistik dengan alga simbiotik (*Symbiodinium*), sementara komunitas ikan karang terstruktur oleh eksklusi kompetitif dan dinamika predator-mangsa. Demikian pula, mangrove, lamun, dan terumbu karang menciptakan habitat yang saling terhubung di mana ikan karang muda sering kali menggunakan akar mangrove dan padang lamun *Thalassia* sebagai tempat berlindung sebelum bermigrasi ke terumbu karang, yang menunjukkan adanya keterkaitan lintas ekosistem (Paine, 1969).



**Gambar 8.2.** Skema penyimpanan dan siklus karbon biru pada ekosistem pesisir, termasuk lamun, mangrove, dan rawa garam. Karbon diserap melalui fotosintesis oleh vegetasi, sebagian kembali ke atmosfer, sementara sebagian besar disimpan dalam biomassa dan sedimen dalam jangka waktu lama. Sebagian karbon juga diekspor ke laut lepas dan berperan dalam mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon jangka Panjang (Sumber: International Union for Conservation of Nature (IUCN, 2017), telah diterjemahkan dan dimodifikasi ke dalam Bahasa Indonesia)

Eksplorasi manusia menunjukkan rapuhnya interaksi biotik ini. Penangkapan krill yang berlebihan di Samudra Selatan telah mengganggu ketersediaan makanan bagi predator yang bergantung seperti penguin (*Pygoscelis* spp.) dan paus balin (*Balaenoptera* spp.),

yang menyebabkan pergeseran ekologis yang berjenjang (Atkinson et al., 2004; Nicol et al., 2012). Demikian pula, deforestasi mangrove yang meluas untuk kegiatan akuakultur dan pembangunan pesisir telah mengurangi habitat pembibitan ikan dan krustasea, melemahkan perlindungan pesisir dari badai, dan menurunkan kapasitas penyimpanan karbon (Valiela et al., 2009). Kaskade trofik serupa telah diamati di Atlantik Utara, di mana penipisan ikan kod (*Gadus morhua*) memungkinkan spesies mangsa seperti ikan haring (*Clupea harengus*) dan udang berkembang biak, yang secara fundamental mengubah keseimbangan ekosistem (Pauly et al., 1998).

### **8.3. Tipe-Tipe Ekosistem Laut**

#### **8.3.1. Ekosistem Pelagis**

Ekosistem pelagis mengacu pada wilayah laut terbuka yang tidak secara langsung dipengaruhi oleh dasar laut. Zona yang luas ini didominasi oleh plankton (fitoplankton dan zooplankton), nekton (organisme yang berenang bebas seperti ikan, cumi-cumi, dan mamalia laut), dan spesies yang bermigrasi tinggi seperti tuna, hiu, dan paus. Sebagai ekosistem laut terbesar, ekosistem ini memainkan peran sentral dalam produksi primer global dan siklus biogeokimia melalui aktivitas fitoplankton, yang membentuk dasar jaring makanan laut dan menyumbang hampir setengah dari produksi oksigen global (Falkowski, 2012; Field et al., 1998).

Di kepulauan Indonesia, zona pelagis sangat penting untuk mendukung salah satu perikanan tuna terbesar di dunia. Laut Banda, yang terletak di dalam Wilayah Pengelolaan Perikanan (WPP) 714, merupakan jalur migrasi utama bagi cakalang (*Katsuwonus pelamis*), tuna sirip kuning (*Thunnus albacares*), dan tuna mata besar (*Thunnus obesus*). Indonesia merupakan produsen tuna terbesar di dunia, menyumbang lebih dari 16% pasokan tuna global (Sunoko & Huang, 2014). Tuna cakalang mendominasi tangkapan tuna Indonesia, mencapai 239.039 metrik ton pada tahun 2016, sementara tuna sirip kuning mencapai 103.291 metrik ton, yang secara bersama-sama mewakili lebih dari 40% produksi tuna nasional (Handl & Svendsen,

2019). Arus naik musiman dan pusaran air di Laut Banda meningkatkan ketersediaan nutrisi, memicu ledakan fitoplankton yang menopang populasi tuna yang besar dan menarik predator seperti paus dan burung laut (Horhoruw et al., 2020).

Perikanan ini tidak hanya menyediakan protein penting bagi jutaan penduduk Indonesia tetapi juga menghasilkan nilai ekonomi yang signifikan. Ekspor tuna menghasilkan lebih dari USD 760 juta pada tahun 2012, dengan mayoritas bersumber dari Indonesia bagian timur, termasuk Laut Banda (Sunoko & Huang, 2014). Namun, penilaian terkini menyoroti tekanan penangkapan ikan yang berlebihan pada tuna sirip kuning dan tuna mata besar, sehingga meningkatkan kekhawatiran akan keberlanjutan bagi stabilitas ekosistem dan mata pencaharian nelayan (Handl & Svendsen, 2019; ISSF, 2021).

### **8.3.2. Ekosistem Bentik**

Ekosistem bentik terletak di dasar laut, mulai dari sedimen pesisir dangkal hingga palung terdalam, yang mencakup hampir 60% permukaan bumi (Snelgrove, 1999). Ekosistem ini menjadi rumah bagi beragam organisme, termasuk teripang, bivalvia, cacing polikaeta, echinodermata, dan krustasea, yang masing-masing beradaptasi dengan kondisi tekanan, cahaya, dan suhu yang unik (Levin et al., 2001). Di perairan dangkal, komunitas bentik mendaur ulang hingga 50% bahan organik yang tenggelam dari permukaan, menjadikannya penting bagi regenerasi nutrisi global (Middelburg, 2019). Organisme bentik laut dalam seperti spons dan karang tertentu dapat hidup selama berabad-abad hingga ribuan tahun, dengan karang hitam (*Leiopathes* sp.) diperkirakan berusia lebih dari 4.000 tahun, menjadikannya salah satu hewan dengan umur terpanjang di Bumi (Roark et al., 2009).

Ekosistem unik berkembang pesat di sekitar ventilasi hidrotermal dan rembesan dingin, yang suhunya dapat melebihi 350°C. Namun, bakteri kemolitotik menggunakan sulfur atau metana untuk memicu jaring makanan yang sepenuhnya independen dari sinar matahari (Van Dover, 2000). Lebih dari 500 spesies hewan baru telah ditemukan di ventilasi tersebut sejak eksplorasi pertama mereka pada tahun 1977,

termasuk cacing tabung raksasa (*Riftia pachyptila*), yang panjangnya dapat mencapai 2,4 meter tanpa mulut atau sistem pencernaan, dan hanya bergantung pada bakteri symbiosis (Ramirez-Llodra et al., 2011).

Habitat bentik juga memainkan peran penting dalam pompa karbon biologis, dengan sedimen laut dalam menyimpan sekitar 1.750 gigaton karbon organik, lebih banyak daripada tanah terestrial (Middelburg, 2019). Secara ekonomi, habitat ini menyediakan sumber makanan seperti bivalvia dan krustasea, serta sumber potensial senyawa dan mineral biomedis. Namun, mereka sangat rentan terhadap gangguan manusia: pukot dasar mengganggu lebih dari 3,9 juta km<sup>2</sup> dasar laut setiap tahunnya (Amoroso et al., 2018), sementara penambangan laut dalam yang baru muncul mengancam keanekaragaman hayati ventilasi hidrotermal sebelum sepenuhnya dipahami. Pemulihan dari dampak tersebut dapat memakan waktu berabad-abad karena laju pertumbuhan yang lambat dari banyak karang dan spons laut dalam (Jones et al., 2017).

### **8.3.2. Ekosistem Pesisir**

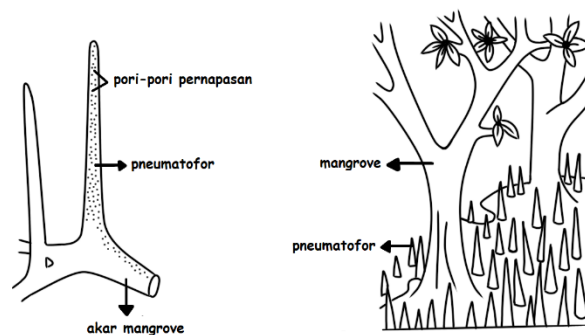
Zona peralihan antara laut dan darat yang memiliki produktivitas tinggi serta fungsi ekologis penting, mulai dari penahan abrasi, tempat pemijahan ikan, hingga penyimpan karbon biru. Tiga ekosistem utama yang termasuk ke dalam kategori ini adalah mangrove, padang lamun, dan terumbu karang.

#### **Ekosistem Mangrove**

Hutan mangrove tumbuh di daerah pasang surut tropis dan subtropis, dan Indonesia menjadi negara dengan mangrove terluas di dunia, yakni sekitar 3,31 juta ha atau hampir 20% dari total global (Giri et al., 2011; KLHK, 2021). Vegetasi mangrove seperti *Rhizophora mucronata*, *Avicennia marina*, *Bruguiera gymnorhiza*, dan *Sonneratia alba* berfungsi sebagai benteng alami melawan abrasi dan tsunami. Peristiwa tsunami Aceh 2004 menunjukkan desa-desa yang terlindungi mangrove mengalami kerusakan lebih kecil dibanding desa tanpa mangrove (Danielsen et al., 2005). Selain itu, mangrove menyimpan karbon dalam jumlah besar, mencapai 1.023 Mg C ha<sup>-1</sup>, menjadikannya

salah satu ekosistem penyerap karbon paling efektif (Donato et al., 2011).

Mangrove memiliki karakteristik khas yang membedakannya dari ekosistem lain, akar napas (*pneumatophore*) pada *Avicennia* berfungsi menyerap oksigen di tanah anaerob, sedangkan akar tunjang *Rhizophora* menstabilkan tanah berlumpur dan menahan sedimen. Buah vivipar, seperti pada *Rhizophora*, tumbuh menjadi kecambah sebelum jatuh ke tanah, meningkatkan peluang hidup bibit di lingkungan ekstrem (Alongi, 2012).



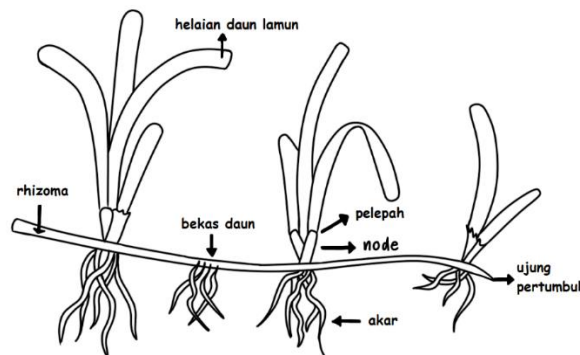
Gambar 8.3. Pneumatofor (akar napas) pada mangrove berperan penting dalam respirasi, memungkinkan tumbuhan menyerap oksigen dari udara (Sumber: Salma & Larasati, 2025, telah diterjemahkan ke dalam Bahasa Indonesia)

Di Indonesia, mangrove memperlihatkan pola zonasi dari laut ke darat. Zona depan biasanya dihuni *Avicennia marina* dan *Sonneratia alba* yang tahan salinitas tinggi; zona tengah oleh *Rhizophora spp.* dengan akar tunjang khas; dan zona belakang oleh *Bruguiera spp.*, *Xylocarpus spp.*, serta *Nypa fruticans* yang lebih toleran terhadap kondisi payau. Zonasi ini menciptakan gradasi habitat yang mendukung keragaman ikan, udang, kepiting, dan burung pesisir. Contohnya, di Teluk Bintuni, Papua Barat, hutan mangrove menopang perikanan kepiting bakau (*Scylla serrata*), dengan produksi mencapai 32,7 ton pada tahun 2023 (BPS Teluk Bintuni, 2023).

## Ekosistem Lamun

Padang lamun adalah tumbuhan berbunga laut (*angiosperma*) yang hidup terendam di dasar perairan dangkal. Indonesia memiliki sedikitnya 13 spesies lamun dari ±60 spesies global, menjadikannya pusat keanekaragaman lamun dunia (Short et al., 2011). Spesies umum meliputi *Thalassia hemprichii*, *Enhalus acoroides*, *Cymodocea rotundata*, dan *Halophila ovalis*. Ekosistem ini menjadi habitat penting bagi penyu hijau (*Chelonia mydas*) dan dugong (*Dugong dugon*).

Karakteristik utama lamun adalah daunnya yang lentur untuk mengurangi kerusakan akibat arus laut, rimpang (*rhizome*) yang menjalar di dalam sedimen untuk menstabilkan substrat, serta kemampuan fotosintesis di bawah air berkat jaringan berisi aerenkim (seperti spons udara). Padang lamun sering dijuluki sebagai “padang rumput laut tropis” karena fungsinya mirip savana, menjadi tempat penggembalaan bagi herbivora laut seperti dugong dan penyu.



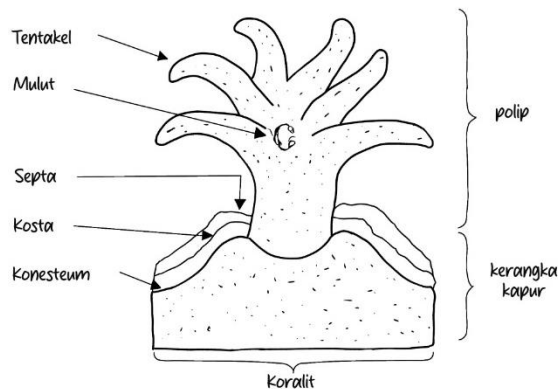
Gambar 8.4. Struktur morfologi lamun (seagrass) yang menunjukkan bagian-bagian utama seperti rhizoma, akar, helaian daun, ruas (node), dan ujung pertumbuhan (Sumber: Salma & Larasati, 2025, telah diterjemahkan ke dalam Bahasa Indonesia)

Zonasi lamun dipengaruhi kedalaman dan substrat. Lamun pionir seperti *Halodule uninervis* dan *Halophila ovalis* tumbuh di daerah dangkal berpasir; *Enhalus acoroides* berkembang di perairan lebih dalam dengan daun panjang hingga 2 meter, sedangkan padang lamun campuran (lebih dari 5 spesies sekaligus) banyak ditemukan di Maluku dan Papua. Studi di Papua menunjukkan 7 spesies lamun di beberapa pulau (Nugraha et al., 2021; Supriyadi et al., 2024). Cadangan karbon

lamun di Kepulauan Seribu tercatat 83–110 Mg C ha<sup>-1</sup> (Rahmawati et al., 2014). Sayangnya, sekitar 30–40% padang lamun Indonesia telah terdegradasi (Cullen-Unsworth, 2018).

### Ekosistem Terumbu Karang

Terumbu karang dibangun oleh karang hermatipik penghasil kalsium karbonat yang bersimbiosis dengan alga *zooxanthellae*. Indonesia, yang berada di dalam kawasan *Coral Triangle*, memiliki sekitar 39.500 km<sup>2</sup> terumbu karang atau 16% dari total dunia (Burke et al., 2012).

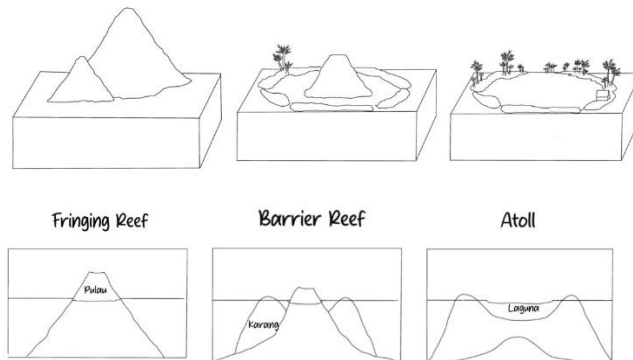


Gambar 8.5. Struktur anatomi polip karang dan kerangka kapurnya (koralit). Polip terdiri atas mulut yang dikelilingi tentakel, septa, dan kosta yang berfungsi dalam penopangan jaringan hidup. Bagian bawah membentuk kerangka kapur yang disebut koralit.

Karakteristik terumbu karang adalah kemampuannya membangun struktur tiga dimensi padat yang menyediakan tempat berlindung bagi ribuan spesies. Warna-warni karang berasal dari alga *zooxanthellae* yang hidup di jaringan karang, menyediakan hingga 90% energi melalui fotosintesis (Veron, 2009). Zonasi terumbu karang meliputi:

- *Fringing reef* (karang tepi): dekat pantai, banyak dihuni karang bercabang seperti *Acropora* spp.
- *Barrier reef* (karang penghalang): lebih jauh dari pantai, dengan laguna di belakangnya, sering ditempati karang masif seperti *Porites* spp. dan *Favia* spp.

- *Reef crest* (karang tubir): zona paling terkena gelombang, dihuni karang rapat yang mampu meredam energi gelombang hingga 90% (Ferrario et al., 2014).
- Atol: terbentuk di laut dalam, berbentuk cincin dengan laguna di tengah.



Gambar 8.6. Tahapan pembentukan terumbu karang menurut teori Darwin. Fringing reef (karang tepi) terbentuk menempel di pantai pulau vulkanik, kemudian berkembang menjadi barrier reef (karang penghalang) seiring penurunan daratan, dan akhirnya membentuk atoll (karang cincin) setelah pulau sepenuhnya tenggelam, meninggalkan laguna di tengahnya.

Indonesia adalah pusat keanekaragaman karang, di Raja Ampat tercatat lebih dari 550 spesies karang keras dan sekitar 1.400 spesies ikan karang (Veron, 2009). Di Taman Nasional Wakatobi, tutupan karang hidup rata-rata mencapai 41%, mendukung ikan kerapu (*Epinephelus* spp.) dan napoleon (*Cheilinus undulatus*) yang bernilai ekonomi tinggi (Hadi et al., 2020). Namun, secara nasional hanya sekitar 6,4% terumbu karang Indonesia masih dalam kondisi sangat baik, dengan ancaman utama berupa bleaching, penangkapan ikan destruktif, dan pencemaran (Hadi et al., 2020).

## 8.4. Struktur dan Fungsi Ekosistem Laut

### 8.4.1. Rantai Makanan dan Jaring-Jaring Makanan

Rantai makanan laut dapat didefinisikan sebagai aliran energi dan materi melalui urutan organisme yang saling memangsa dan dimangsa, dimulai dari produsen primer hingga predator puncak. Produsen utama

dalam ekosistem laut adalah fitoplankton, organisme mikroskopis fotosintetik yang berperan penting dalam produktivitas primer. Secara global, fitoplankton menyumbang sekitar 50–60 Gt C per tahun, atau hampir setengah dari produktivitas primer biosfer (M. J. Behrenfeld et al., 2001; Field et al., 1998b). Energi hasil fotosintesis ini kemudian dimanfaatkan oleh zooplankton sebagai konsumen primer, lalu diteruskan ke ikan kecil dan predator besar seperti tuna, hiu, serta paus bergigi.

Walaupun konsep rantai makanan linier mudah dipahami, kenyataannya ekosistem laut lebih sering tersusun dalam bentuk jaring-jaring makanan. Jaring makanan didefinisikan sebagai jaringan kompleks hubungan trofik yang melibatkan banyak spesies sekaligus, di mana satu organisme dapat memiliki beberapa mangsa dan predator. Sebagai contoh, zooplankton tidak hanya memakan fitoplankton, tetapi juga bakteri dan detritus; sementara ikan kecil dapat menjadi santapan bagi predator menengah maupun mamalia laut. Kompleksitas jaring makanan ini meningkatkan stabilitas ekosistem, karena hilangnya satu jalur energi dapat digantikan oleh jalur lain (Cury et al., 2000).

Keberadaan rantai makanan dan jaring makanan tidak hanya menentukan aliran energi, tetapi juga memengaruhi dinamika populasi. Predator puncak seperti hiu sering disebut sebagai “*keystone species*” karena perannya yang besar dalam menjaga keseimbangan komunitas meski jumlahnya sedikit (Bornatowski et al., 2014). Penurunan populasi predator puncak terbukti dapat memicu ledakan populasi konsumen menengah yang pada akhirnya merusak struktur ekosistem. Dengan demikian, jaring makanan laut bukan sekadar skema teoretis, melainkan kerangka nyata yang menentukan resiliensi dan kestabilan ekosistem laut (Brechtel et al., 2019; Dedman et al., 2024).

#### **8.4.2. Transfer Energi**

Transfer energi dalam ekosistem laut adalah perpindahan energi biomassa dari satu tingkat trofik ke tingkat berikutnya dalam rantai makanan. Konsep klasik dari Lindeman (1942) menjelaskan bahwa hanya sekitar 10% energi dari satu tingkat trofik yang dapat diteruskan,

sementara sisanya hilang sebagai panas, respirasi, dan proses metabolisme. Contoh sederhananya, dari 1.000 unit energi yang ditangkap fitoplankton, hanya 100 unit yang mencapai zooplankton, 10 unit ke ikan kecil, dan 1 unit ke predator puncak. Hal ini menjelaskan mengapa predator besar jumlahnya relatif sedikit di laut.

Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa efisiensi transfer energi (*trophic transfer efficiency*, TTE) di laut bervariasi antara 5–20% tergantung ekosistem dan struktur jaring makanan (Barnes et al., 2010; Straile, 1997a). Dalam ekosistem laut tropis, tingginya keragaman spesies dan panjangnya jalur trofik sering menurunkan efisiensi transfer energi. Sebaliknya, di sistem *upwelling* dengan produktivitas tinggi, efisiensi dapat mendekati batas atas karena energi cepat diteruskan dari fitoplankton ke ikan pelagis. Dengan demikian, variasi efisiensi ini menentukan kapasitas dukung (*carrying capacity*) predator besar di suatu wilayah laut.

Tabel 8. 2. Efisiensi Transfer Energi pada Berbagai Jenis Ekosistem Laut

Jenis Ekosistem Laut	Ciri Utama Ekosistem	Efisiensi Transfer Energi (%)	Keterangan Ekologis	Sumber
<i>Upwelling</i> (Peru, Namibia, California)	Produktivitas primer tinggi; dominasi fitoplankton besar (diatom)	15–20	Transfer energi efisien karena rantai trofik pendek (fitoplankton → ikan pelagis → predator)	(Cury et al., 2000; Ryther & Dunstan, 1971)
Laut Tropis ( <i>Coral Triangle</i> , Indo-Pasifik)	Perairan oligotrofik, nutrisi rendah; rantai trofik panjang	5–10	Efisiensi rendah karena dominasi mikroplankton dan jalur mikroba ( <i>microbial loop</i> )	(Barnes et al., 2010; Longhurst & Pauly, 1987)
Laut <i>Temperate</i> (Atlantik Utara, Jepang)	Variasi musiman tinggi; dominasi fitoplankton berukuran sedang	10–15	Efisiensi sedang karena struktur jaring makanan seimbang antara mikro dan makroplankton	(Calbet & Saiz, 2005; Straile, 1997b)
Laut Dalam (Bathypelagik dan Abisal)	Tidak ada cahaya, sumber energi dari detritus	2–5	Energi hilang banyak karena panjangnya jalur trofik dan respirasi	(Rex & Etter, 2011; Smith et al., 2008)

	(“ <i>marine snow</i> ”)		tinggi di tekanan besar	
Estuari dan Pesisir	Nutrien tinggi dari daratan; fluktuatif secara fisik	10–20	Efisiensi tinggi bila eutrofik, tetapi dapat menurun bila terjadi hipoksia	(Cloern et al., 2013; Nixon et al., 1996)

Selain itu, keberadaan *microbial loop* menambah kompleksitas transfer energi. Jalur ini didefinisikan sebagai aliran energi melalui bakteri heterotrofik dan protozoa mikroskopis sebelum mencapai konsumen lebih tinggi. Meskipun memperluas jalur aliran energi, *microbial loop* justru menurunkan efisiensi transfer karena energi banyak terbuang di tingkat mikroba (Azam et al., 1983). Hal ini menegaskan bahwa fungsi transfer energi di laut bukan hanya fenomena sederhana, tetapi dipengaruhi oleh interaksi ekologi yang sangat kompleks.

#### 8.4.3. Keanekaragaman Hayati

Keanekaragaman hayati laut dapat didefinisikan sebagai variasi spesies, genetik, dan fungsi ekologi yang ditemukan di ekosistem laut, mulai dari mikroorganisme hingga megafauna. Menurut data *World Register of Marine Species* (WoRMS), hingga Januari 2023 terdapat sekitar 241.521 spesies laut valid yang telah dideskripsikan (Horton et al., 2023). Namun, jumlah ini diyakini hanya sebagian kecil dari total spesies laut, karena estimasi global menyebutkan lautan dapat menampung antara 0,3 hingga 2,2 juta spesies (Mora et al., 2011). Tingginya keanekaragaman ini menjadikan laut sebagai salah satu pusat kehidupan dengan kontribusi penting bagi stabilitas biosfer.

Tabel 8. 3. Jumlah Spesies Laut per Kelompok Taksonomi Utama (berdasarkan World Register of Marine Species, 2023)

Kelompok Taksonomi	Jumlah Spesies Laut yang Valid	Persentase dari Total (%)	Contoh Organisme
Crustacea	52.146	21,6	Krill, copepoda, kepiting, udang
Mollusca	45.982	19,0	Kerang, siput laut, cumi-cumi
Pisces (Ikan)	34.084	14,1	Ikan karang, tuna, hiu

Cnidaria	13.419	5,5	Karang, ubur-ubur, anemon laut
Echinodermata	7.036	2,9	Bintang laut, teripang, bulu babi
Porifera (Spons)	9.543	4,0	Spons laut, demospongiae
Annelida (Polichaeta)	18.201	7,5	Cacing laut, lugworm
Bryozoa	5.931	2,5	Hewan lumut laut
Protozoa dan Protista laut	19.870	8,2	Foraminifera, radiolaria
Mamalia Laut (Cetacea, Pinnipedia, Sirenia)	132	0,05	Paus, anjing laut, dugong
Reptil Laut	62	0,03	Penyu, ular laut
Burung Laut	344	0,14	Albatros, camar laut
Lainnya (takson minor)	±5.000	2,1	Tunicata, chaetognatha, hemichordata
<b>Total Spesies Laut Terdeskripsi (2023)</b>	<b>≈ 241.521</b>	<b>100%</b>	—

Selain jumlah spesies, interaksi antarorganisme juga menjadi penentu utama fungsi keanekaragaman hayati laut. Kompetisi terjadi antar karang hermatipik untuk mendapatkan cahaya dan ruang; predasi mengendalikan populasi ikan kecil agar tidak melampaui kapasitas lingkungan; sementara mutualisme karang dengan *zooxanthellae* mampu menyediakan hingga 70–95% energi bagi karang melalui fotosintesis (Muscatine & Porter, 1977). Hubungan komensalisme juga banyak ditemukan, misalnya ikan remora yang menempel pada hiu untuk mendapatkan sisa makanan tanpa merugikan inangnya. Interaksi beragam ini membentuk jaring ekologi yang menopang stabilitas komunitas.

Keanekaragaman hayati juga berfungsi sebagai penopang resiliensi ekosistem. Semakin banyak spesies yang hadir, semakin tinggi pula redundansi fungsional, yaitu kemampuan spesies lain menggantikan peran ekologis yang hilang. Hal ini berarti ekosistem laut dengan biodiversitas tinggi lebih tahan terhadap perubahan lingkungan dan gangguan antropogenik seperti penangkapan berlebih atau perubahan iklim. Oleh karena itu, konservasi keanekaragaman hayati

laut menjadi landasan penting dalam pengelolaan sumber daya kelautan secara berkelanjutan (Worm et al., 2006).

### **8.5. Dinamika Ekosistem Laut**

Ekosistem laut merupakan sistem dinamis yang terus mengalami perubahan sebagai hasil interaksi antara faktor fisik, kimia, dan biologis. Dinamika ini mencerminkan kemampuan laut untuk beradaptasi terhadap variasi lingkungan yang terjadi secara temporal maupun spasial. Faktor-faktor seperti perubahan suhu, arus, dan pola iklim global memiliki dampak langsung terhadap struktur komunitas biotik dan produktivitas primer di lautan. Menurut (Kaiser et al., 2020) dinamika ini penting untuk menjaga homeostasis ekosistem, yaitu kemampuan laut mempertahankan fungsi ekologis meskipun terjadi gangguan. Namun, dinamika ekosistem tidak hanya ditentukan oleh proses alami, tetapi juga oleh aktivitas manusia yang dapat mempercepat atau memperburuk perubahan yang terjadi.

Perubahan ekosistem laut bersifat multifaktor dan saling terhubung, di mana satu komponen yang terganggu dapat menimbulkan efek domino terhadap sistem lainnya. Misalnya, peningkatan suhu laut akibat perubahan iklim global memengaruhi stratifikasi air laut, menghambat sirkulasi vertikal, dan pada akhirnya menurunkan pasokan nutrisi ke lapisan permukaan. Dampak ini kemudian berlanjut pada penurunan produktivitas fitoplankton dan perubahan distribusi zooplankton serta ikan pelagis (M. Behrenfeld et al., 2007). Oleh karena itu, memahami dinamika ekosistem laut tidak hanya berarti mempelajari fluktuasi organisme, tetapi juga hubungan sistemik antara fisika laut, biogeokimia, dan ekologi komunitas.

Secara umum, dinamika ekosistem laut dapat diklasifikasikan menjadi dua faktor utama, yaitu proses alami dan tekanan antropogenik. Proses alami seperti upwelling dan variabilitas iklim global berperan penting dalam mempertahankan keseimbangan ekosistem dan siklus nutrisi. Sebaliknya, tekanan antropogenik seperti polusi, eksploitasi berlebihan, dan perubahan iklim akibat emisi gas rumah kaca sering kali mempercepat degradasi ekosistem. Kedua faktor ini berinteraksi secara

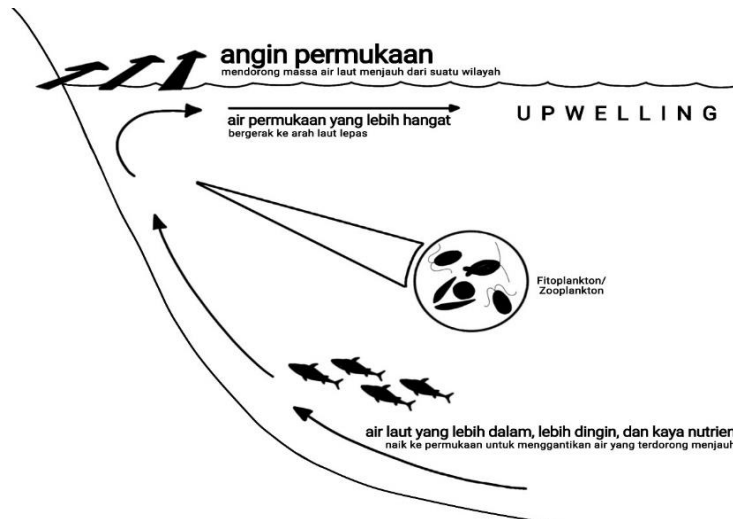
kompleks dan menentukan arah perubahan jangka panjang ekosistem laut di masa depan (Halpern et al., 2008).

### 8.5.1. Proses Alami

Secara definisi, proses alami dalam konteks ekosistem laut adalah mekanisme fisik dan biogeokimia yang terjadi tanpa campur tangan manusia dan berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekologis. Salah satu proses alami yang paling signifikan adalah *upwelling*, yaitu naiknya massa air dari lapisan dalam laut menuju permukaan. Air laut yang terangkat ini membawa serta berbagai nutrisi penting seperti nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), fosfat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), dan silikat ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ) yang sebelumnya terperangkap di dasar laut, sehingga merangsang pertumbuhan fitoplankton di lapisan eufotik. Fitoplankton tersebut menjadi dasar produktivitas primer yang menopang rantai makanan laut. Daerah-daerah *upwelling* seperti *Peru–Chile Current*, *Benguela Current* (Afrika Barat Daya), dan *California Current* merupakan kawasan perikanan terbesar dunia karena produktivitas primernya yang tinggi, dapat mencapai  $300\text{--}500 \text{ g C/m}^2/\text{tahun}$ , jauh di atas perairan oligotrofik yang hanya sekitar  $50\text{--}100 \text{ g C/m}^2/\text{tahun}$  (Chavez & Messié, 2009; Ryther, 1969).

Selain *upwelling*, dinamika ekosistem laut juga sangat dipengaruhi oleh fenomena iklim global seperti ENSO (*El Niño–Southern Oscillation*). Fenomena El Niño ditandai oleh peningkatan suhu permukaan laut di wilayah Pasifik tropis bagian timur, yang menekan aktivitas *upwelling* dan mengurangi ketersediaan nutrisi di lapisan permukaan. Akibatnya, produktivitas fitoplankton dapat menurun hingga 40% di beberapa wilayah tropis (M. Behrenfeld et al., 2007). Dampak ekologisnya meluas, mulai dari perubahan distribusi ikan pelagis seperti tuna dan *anchovy*, penurunan hasil tangkapan ikan di Samudra Pasifik timur, hingga peristiwa pemutihan karang (*coral bleaching*) akibat stres termal di berbagai kawasan tropis (Glynn, 1993). Sebaliknya, fase La Niña menyebabkan pendinginan suhu permukaan laut dan peningkatan suplai nutrisi ke lapisan eufotik, sehingga meningkatkan produktivitas primer

di wilayah pesisir, termasuk di kawasan Indonesia bagian timur (Sprintall et al., 2014).



Gambar 8.7. Skema proses upwelling di perairan pesisir. Angin permukaan yang berhembus sejajar pantai mendorong massa air permukaan menjauh dari garis pantai, sehingga air laut dari lapisan dalam yang lebih dingin dan kaya nutrisi naik ke permukaan untuk menggantikannya. Proses ini meningkatkan konsentrasi fitoplankton dan zooplankton di lapisan euphotik, menjadikan daerah upwelling sebagai wilayah dengan produktivitas primer dan perikanan yang tinggi.

Selain ENSO, dua fenomena iklim jangka panjang lain yang berpengaruh besar terhadap dinamika laut global adalah *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD). PDO merupakan variasi suhu permukaan laut (SST) di Samudra Pasifik bagian utara dengan periode osilasi sekitar 20–30 tahun, ditandai oleh fase “hangat” (*positive phase*) dan “dingin” (*negative phase*) (Mantua et al., 1997). Pada fase positif PDO, perairan tropis Pasifik bagian barat cenderung mendingin, sementara bagian timur menghangat, yang menyebabkan pola iklim mirip El Niño menjadi lebih sering dan intens. Sebaliknya, fase negatif memperkuat kondisi mirip La Niña, meningkatkan curah hujan dan produktivitas di wilayah Indonesia dan Pasifik barat.

Tabel 8. 4. Dampak Fenomena Iklim Global terhadap Ekosistem Laut

<b>Fenomena</b>	<b>Mekanisme Utama</b>	<b>Dampak Ekologis</b>	<b>Dampak di Indonesia</b>
El Niño	Pemanasan SST Pasifik Timur, melemahkan upwelling	Penurunan fitoplankton & hasil tangkapan ikan	Kekeringan, penurunan produktivitas di Laut Jawa & Selat Makassar
La Niña	Pendinginan SST Pasifik Timur	Peningkatan nutrisi & produktivitas	Kenaikan hasil tangkapan ikan di selatan Jawa–NTT
PDO	Variabilitas SST jangka panjang (20–30 tahun)	Pergeseran distribusi spesies	Variasi curah hujan & migrasi ikan pelagis
IOD	Perbedaan SST barat–timur Samudra Hindia	Pergeseran curah hujan & suhu laut	Kemarau ekstrem (IOD positif) atau hujan tinggi (IOD negatif)

Sementara itu, *Indian Ocean Dipole* (IOD) adalah fenomena osilasi suhu permukaan laut di Samudra Hindia bagian barat dan timur (Hameed et al., 1999). Dalam fase positif IOD, suhu perairan di Samudra Hindia bagian barat (dekat Afrika) meningkat, sedangkan bagian timur (sekitar Indonesia dan Australia) mendingin. Kondisi ini melemahkan konveksi awan di wilayah Indonesia, menyebabkan kemarau lebih kering di sebagian besar wilayah barat dan tengah Indonesia. Sebaliknya, negatif IOD menghasilkan perairan hangat di sisi timur Samudra Hindia, meningkatkan curah hujan di Indonesia bagian barat dan tengah, serta memperkuat upwelling di perairan selatan Jawa dan Nusa Tenggara (Ashok et al., 2007; Yamagata et al., 2004).

Kedua fenomena tersebut memiliki dampak nyata terhadap ekosistem dan perikanan Indonesia. Kombinasi antara El Niño kuat dan IOD positif, seperti yang terjadi pada tahun 1997–1998, menyebabkan kekeringan ekstrem di daratan dan penurunan hasil tangkapan ikan di Laut Jawa dan Selat Makassar akibat berkurangnya produktivitas fitoplankton (Susanto et al., 2001). Sebaliknya, fase negatif IOD dan La Niña cenderung meningkatkan suplai nutrisi melalui intensifikasi *upwelling* di pesisir selatan Jawa–Sumba, yang berujung pada peningkatan biomassa ikan pelagis kecil.

### 8.5.2. Tekanan Antropogenik

Salah satu bentuk paling serius adalah pencemaran laut yang berasal dari plastik, logam berat, hidrokarbon, serta limbah pertanian dan industri. Menurut Jambeck et al. (Jambeck et al., 2015), setiap tahun sekitar 8 juta ton plastik memasuki laut, menjadikan polusi plastik sebagai ancaman global bagi organisme laut. Mikroplastik berukuran kurang dari 5 mm kini ditemukan pada hampir seluruh tingkatan trofik, mulai dari zooplankton hingga ikan konsumsi manusia (Cole et al., 2011). Akumulasi polutan ini dapat menyebabkan gangguan fisiologis, toksisitas jaringan, dan bahkan kematian organisme laut.

Selain polusi, penangkapan ikan berlebihan (*overfishing*) juga menjadi tekanan besar yang mengubah struktur komunitas dan keseimbangan trofik ekosistem. FAO (2022) melaporkan bahwa lebih dari 35% stok ikan dunia kini dieksploitasi secara berlebihan. Hilangnya spesies kunci seperti predator puncak (hiu, tuna besar) atau herbivora penting (ikan *parrotfish*) dapat memicu perubahan trofik besar-besaran atau trophic cascade, di mana ledakan populasi spesies tertentu mengganggu kestabilan ekosistem (Myers et al., 2007). Dalam sistem terumbu karang, penurunan ikan herbivora menyebabkan pertumbuhan alga berlebih yang menghambat regenerasi karang, menurunkan keanekaragaman, dan pada akhirnya mengubah seluruh struktur habitat (Hughes et al., 2017).

Tekanan antropogenik lainnya adalah perubahan iklim akibat emisi gas rumah kaca, yang meningkatkan suhu laut, menurunkan pH (pengasaman laut), dan memperburuk kondisi oksigen terlarut. IPCC (2019) mencatat bahwa laut telah menyerap sekitar 90% panas berlebih akibat pemanasan global dan mengalami penurunan pH sekitar 0,1 unit sejak era praindustri, setara peningkatan keasaman 26%. Akibatnya, organisme penghasil kalsium karbonat seperti karang, moluska, dan plankton kalsit mengalami kesulitan dalam membentuk cangkang atau rangka. Jika tren ini berlanjut, banyak ekosistem pesisir akan kehilangan kemampuan alaminya untuk menopang produktivitas dan perlindungan pantai. Untuk memahami dan mengantisipasi dampak berbagai tekanan

ini secara ilmiah, diperlukan pendekatan observasi dan pemodelan yang akan dibahas pada bagian berikut (8.6).

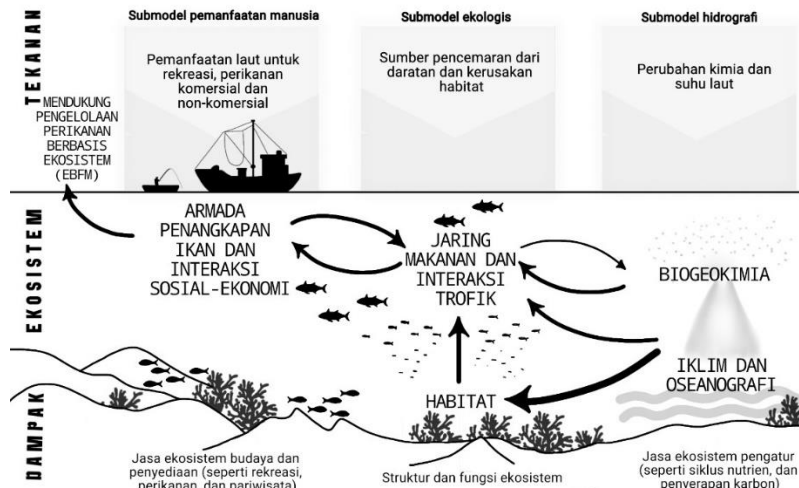
### **8.6. Studi dan Pemodelan Ekosistem Laut**

Perubahan ekologis yang terjadi di laut menuntut pemantauan yang presisi dan prediksi berbasis data spasial. Oleh karena itu, studi dan pemodelan ekosistem laut menjadi instrumen penting dalam ekologi modern untuk memahami struktur, fungsi, serta perubahan yang terjadi di lingkungan laut akibat faktor alami maupun antropogenik. Kajian ini melibatkan pengumpulan data biotik dan abiotik, analisis interaksi antar komponen, serta pengembangan model yang dapat memprediksi dinamika ekosistem. Perkembangan teknologi observasi laut dalam dua dekade terakhir telah merevolusi cara ilmuwan memahami laut, dari pendekatan in situ berbasis lapangan hingga pemantauan berbasis satelit dengan cakupan global. Dengan menggabungkan berbagai pendekatan ini, para peneliti kini dapat memperoleh gambaran yang lebih komprehensif tentang kondisi laut dan hubungannya dengan sistem bumi yang lebih luas (Traon et al., 2017).

Selain itu, studi ekosistem laut tidak hanya terbatas pada pengamatan, tetapi juga pada interpretasi data untuk membangun model ekosistem, yang berfungsi sebagai alat untuk memahami proses kompleks seperti produktivitas primer, siklus karbon, dan dinamika populasi ikan. Model ini memungkinkan ilmuwan mensimulasikan dampak perubahan iklim, eutrofikasi, maupun penangkapan ikan berlebih terhadap sistem laut (E. Fulton et al., 2014). Pendekatan integratif semacam ini menjadi semakin penting di era perubahan global, karena laut berperan sebagai penyerap panas dan karbon terbesar di planet ini, sehingga memiliki pengaruh langsung terhadap iklim global (IPCC, 2019).

Dalam konteks praktis, studi dan pemodelan ekosistem laut juga menjadi dasar bagi kebijakan pengelolaan sumber daya laut secara berkelanjutan. Informasi dari observasi dan model digunakan untuk menetapkan kawasan konservasi laut, memperkirakan stok ikan, serta mengidentifikasi area yang rentan terhadap degradasi lingkungan.

Pendekatan ilmiah ini menghubungkan penelitian akademik dengan kebijakan publik dan ekonomi biru (*blue economy*), memastikan bahwa eksploitasi sumber daya laut tidak melebihi kapasitas ekosistem untuk pulih (Halpern et al., 2015).



*Gambar 8.8. Skema konseptual pemodelan ekosistem laut terintegrasi yang mencakup tiga komponen utama: human uses submodel, ecological submodel, dan hydrographic submodel. Model ini menghubungkan aktivitas manusia (seperti perikanan dan polusi), proses ekologis (rantai makanan dan interaksi trofik), serta faktor oseanografi (kimia dan suhu laut). Ketiga submodel tersebut digunakan untuk menilai tekanan (pressures), kondisi ekosistem (ecosystem state), dan dampak terhadap jasa ekosistem (ecosystem services), sebagai dasar pendekatan Ecosystem-Based Fisheries Management (EBFM).*

### 8.6.1. Metode Observasi

Metode observasi merupakan fondasi utama dalam studi ekosistem laut. Teknik dasar seperti transek, kuadrat, dan survei lapangan telah digunakan sejak awal abad ke-20 untuk mengukur keanekaragaman hayati, kerapatan populasi, dan tutupan habitat di ekosistem seperti terumbu karang, lamun, dan mangrove (English et al., 1997). Metode transek dilakukan dengan menarik garis lurus di area studi untuk mencatat spesies yang ditemui di sepanjang jalur, sedangkan kuadrat digunakan untuk mengestimasi kepadatan organisme pada area yang lebih kecil. Teknik ini memungkinkan peneliti memperoleh data

kuantitatif tentang struktur komunitas, yang kemudian dapat dibandingkan antar lokasi dan waktu.

Selain parameter biotik, pengamatan lapangan juga mencakup pengukuran parameter fisik-kimia, seperti suhu, salinitas, oksigen terlarut, pH, dan konsentrasi nutrien. Data ini dikumpulkan menggunakan sensor seperti CTD (*Conductivity–Temperature–Depth*) atau sonde multiparameter. Informasi fisik-kimia tersebut sangat penting untuk memahami kondisi lingkungan tempat organisme hidup. Sebagai contoh, penurunan oksigen terlarut di perairan pesisir akibat eutrofikasi telah terbukti memicu kejadian hipoksia yang menyebabkan kematian massal ikan di berbagai wilayah seperti Teluk Meksiko dan Laut Cina Timur (Diaz Briz et al., 2017).

Dalam dekade terakhir, observasi laut juga mengalami revolusi melalui penggunaan autonomous platforms seperti ARGO floats, gliders, dan drifters yang dapat mengumpulkan data secara kontinu tanpa kehadiran manusia di lapangan. Saat ini terdapat lebih dari 4000 ARGO floats yang aktif di seluruh dunia, mengirimkan data suhu, salinitas, dan arus setiap 10 hari (Riser et al., 2016). Teknologi ini memungkinkan pemantauan global yang sebelumnya mustahil dicapai hanya dengan kapal riset. Dengan kombinasi data in situ dan sensor otomatis, ilmuwan kini memiliki kemampuan untuk mengamati laut secara tiga dimensi dan temporal, yang penting dalam memahami dinamika ekosistem secara menyeluruh.

### **8.6.2 Remote Sensing dan SIG**

Penginderaan jauh (*remote sensing*) merupakan salah satu metode paling revolusioner dalam studi ekosistem laut modern. Dengan memanfaatkan sensor pada satelit seperti MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*), dan Sentinel-3 OLCI, ilmuwan dapat memantau berbagai parameter seperti klorofil-a, suhu permukaan laut (SST), dan kekeruhan air dalam skala global (M. J. Behrenfeld & Falkowski, 1997). Pengukuran klorofil-a dari satelit digunakan sebagai indikator produktivitas primer, yang mencerminkan aktivitas fotosintesis fitoplankton di permukaan

laut. Misalnya, data dari SeaWiFS memperlihatkan bahwa selama peristiwa El Niño 1997–1998, produktivitas laut global menurun sekitar 6%, menunjukkan betapa sensitifnya ekosistem laut terhadap variabilitas iklim (Behrenfeld et al., 2006).

Selain itu, Sistem Informasi Geografis (SIG) berperan penting dalam integrasi data spasial untuk analisis ekosistem laut. SIG memungkinkan penggabungan berbagai lapisan data seperti topografi dasar laut, sebaran spesies, suhu, salinitas, dan konsentrasi nutrisi dalam satu peta digital (Goodchild & Haining, 2003). Dalam konteks konservasi, SIG digunakan untuk menentukan lokasi optimal bagi kawasan konservasi laut (*Marine Protected Areas/MPA*) berdasarkan kombinasi faktor ekologis dan sosial-ekonomi (Ky Vinh, 2008). Integrasi antara data satelit dan SIG telah menghasilkan peta produktivitas laut global yang kini digunakan oleh lembaga internasional seperti FAO dan UNEP dalam pengelolaan sumber daya laut.

Di Indonesia, penggunaan penginderaan jauh dan SIG juga berkembang pesat. Data satelit seperti Landsat 8, Sentinel-2, dan MODIS Aqua telah dimanfaatkan untuk memantau tutupan lamun, kondisi terumbu karang, dan penyebaran plankton di wilayah perairan tropis (Nurdin et al., 2022). Misalnya, di perairan Bali dan Nusa Tenggara, analisis citra multispektral berhasil mendeteksi perubahan tutupan lamun akibat aktivitas wisata pantai dan peningkatan suhu permukaan laut. Teknologi ini membantu ilmuwan dan pemerintah dalam mengambil kebijakan berbasis bukti ilmiah (*evidence-based management*) untuk melindungi ekosistem pesisir yang rentan terhadap perubahan lingkungan.

### **8.6.3 Pemodelan Spasial**

Pemodelan spasial adalah pendekatan ilmiah yang digunakan untuk menggambarkan, menganalisis, dan memprediksi distribusi ekosistem laut berdasarkan variabel lingkungan dan biologis. Dalam ekologi laut, pemodelan spasial digunakan untuk memahami hubungan antar komponen ekosistem dan memprediksi responsnya terhadap perubahan iklim, pencemaran, atau aktivitas manusia (Robinson et al.,

2011). Model spasial seperti *Ecopath with Ecosim* (EwE), Atlantis, dan MARXAN digunakan untuk mensimulasikan aliran energi, interaksi antar spesies, serta efektivitas kawasan konservasi laut (Christensen & Walters, 2004; E. A. Fulton et al., 2014). Melalui model ini, peneliti dapat mengevaluasi berbagai skenario pengelolaan dan menilai dampaknya terhadap produktivitas dan keanekaragaman hayati laut.

Tabel 8. 5. Contoh Model Spasial Ekosistem Laut

<b>Nama Model</b>	<b>Fokus Analisis</b>	<b>Data Masukan</b>	<b>Output Utama</b>	<b>Contoh Aplikasi</b>
<i>Ecopath with Ecosim</i> (EwE)	Aliran energi & interaksi trofik	Biomassa, diet, hasil tangkapan	Simulasi dinamika ekosistem perikanan	Evaluasi kebijakan MPA
Atlantis	Ekosistem 3D terintegrasi	Data biologi, fisika, sosial-ekonomi	Prediksi dampak perubahan iklim & kebijakan	Pemodelan laut Australia
MARXAN	Perencanaan konservasi spasial	Peta habitat, data biodiversitas, biaya sosial	Rekomendasi lokasi MPA optimal	Studi konservasi di Vietnam
AI/ML (CNN, RF)	Klasifikasi habitat & prediksi distribusi	Data satelit multi-sensor	Peta prediksi lamun & terumbu	Riset AI kelautan

Salah satu aplikasi penting pemodelan spasial adalah dalam peramalan perubahan habitat akibat perubahan iklim. Misalnya, model prediktif berbasis data suhu dan salinitas digunakan untuk memetakan potensi pergeseran distribusi lamun dan karang akibat kenaikan suhu laut global (Yamano et al., 2011). Di wilayah tropis, pemodelan berbasis SIG telah memprediksi bahwa kenaikan suhu sebesar 2°C dapat menyebabkan hilangnya hingga 30% area lamun di perairan dangkal yang sensitif terhadap pemanasan. Selain itu, model spasial juga digunakan dalam pemetaan potensi penangkapan ikan berbasis *location intelligence*, yang menggabungkan data satelit SST, klorofil-a, dan arus permukaan untuk memperkirakan lokasi potensial ikan pelagis (Sarangi et al., 2023).

Pemodelan spasial tidak hanya membantu penelitian tetapi juga menjadi alat penting dalam perencanaan wilayah laut (*marine spatial planning*). Melalui pendekatan ini, konflik penggunaan ruang laut antara sektor perikanan, pariwisata, konservasi, dan energi dapat diminimalkan. Data pemodelan spasial kini juga menjadi dasar dalam implementasi *One Data Ocean Policy* yang dikembangkan di berbagai negara, termasuk Indonesia. Menariknya, model modern bahkan mulai menggunakan kecerdasan buatan (*machine learning*) untuk mengolah data laut berskala besar dari satelit dan sensor otomatis (Sarangi et al., 2023; Veeranjanyulu et al., 2024).

Trivia: Fitoplankton mikroskopis *Emiliania huxleyi* sering digunakan dalam model ekosistem laut global karena kemampuannya menyerap karbon melalui fotosintesis dan pembentukan pelat kalsium karbonat (*kokolit*). Spesies ini dapat menyerap hingga 1,5 gigaton karbon per tahun (Tyrrell & Young, 2009). Ledakan populasinya (*coccolithophore bloom*) tampak dari satelit sebagai pusaran putih besar yang memantulkan cahaya matahari dan menurunkan suhu permukaan laut secara lokal.

### 8.7. Sintesis Ekosistem Laut

Ekosistem laut merupakan sistem yang kompleks dan saling terhubung, di mana struktur biotik dan abiotik bekerja secara sinergis untuk mempertahankan keseimbangan ekologis. Komponen seperti suhu, salinitas, nutrisi, serta cahaya membentuk dasar kondisi lingkungan yang menentukan distribusi organisme laut dan tingkat produktivitas primer. Faktor biotik seperti produsen primer, konsumen, dan pengurai kemudian berinteraksi dalam jaring-jaring makanan yang rumit, memastikan terjadinya aliran energi dan siklus materi yang menopang seluruh kehidupan di laut. Pemahaman terhadap struktur dan fungsi dasar ini memberikan fondasi bagi analisis dinamika ekosistem laut yang terus berubah seiring waktu dan ruang.

Dinamika ekosistem laut tidak dapat dilepaskan dari pengaruh proses alami maupun tekanan antropogenik. Fenomena alam seperti *upwelling*, ENSO, IOD, dan PDO berperan besar dalam mengatur sirkulasi nutrisi, produktivitas fitoplankton, dan pola migrasi ikan. Namun, aktivitas manusia, mulai dari polusi, penangkapan ikan berlebih,

hingga perubahan iklim, telah mempercepat degradasi ekosistem dan mengancam stabilitas laut global. Kombinasi antara pemanasan laut, pengasaman, dan kehilangan habitat menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati serta gangguan pada fungsi ekologis laut. Dalam konteks Indonesia, yang memiliki keanekaragaman laut tertinggi di dunia, tantangan ini menjadi semakin signifikan karena ketergantungan ekonomi masyarakat pesisir terhadap sumber daya laut yang rentan.

Kemajuan teknologi dalam observasi, penginderaan jauh, dan pemodelan spasial telah membuka peluang baru untuk memahami dan mengelola ekosistem laut secara lebih akurat dan berkelanjutan. Penggunaan satelit seperti Sentinel-2, MODIS Aqua, dan Landsat 8 memungkinkan pemantauan habitat laut dalam resolusi tinggi, sementara Sistem Informasi Geografis (SIG) memfasilitasi integrasi data spasial untuk analisis ekologis dan perencanaan kawasan konservasi laut. Lebih jauh lagi, penerapan kecerdasan buatan (*machine learning*) dalam pemrosesan data oseanografi berskala besar mempercepat kemampuan ilmuwan dalam mendeteksi pola ekologis dan memprediksi perubahan masa depan. Integrasi antara ilmu ekologi klasik dan teknologi digital ini menandai era baru dalam riset kelautan berbasis data.

Bagi Indonesia, pemahaman menyeluruh terhadap struktur, dinamika, dan model ekosistem laut bukan hanya aspek akademik, tetapi juga kebutuhan strategis untuk mewujudkan pengelolaan laut berkelanjutan. Laut Indonesia merupakan penopang ekonomi biru (*blue economy*), sumber pangan, dan sistem penyangga iklim global. Oleh karena itu, penelitian ekosistem laut harus terus dikembangkan dengan pendekatan multidisipliner yang menggabungkan sains, kebijakan, dan teknologi. Upaya konservasi, mitigasi perubahan iklim, serta penerapan *One Data Ocean Policy* di tingkat nasional menjadi langkah penting menuju keseimbangan antara pemanfaatan dan perlindungan laut untuk generasi mendatang.

# Bab 9

## ADAPTASI ORGANISME LAUT TERHADAP LINGKUNGAN LAUT

### 9.1. Kondisi Lingkungan Laut

Lingkungan laut merupakan sistem ekologis yang sangat kompleks, dinamis, dan saling berinteraksi antara komponen abiotik dan biotiknya. Kondisi fisik, kimia, dan biologis laut berperan penting dalam menentukan distribusi, fisiologi, dan adaptasi organisme laut. Setiap parameter lingkungan memiliki gradien vertikal maupun horizontal yang bervariasi secara spasial dan temporal, sehingga memunculkan beragam strategi adaptasi di antara biota laut. Pemahaman terhadap karakteristik lingkungan laut menjadi dasar dalam kajian ekologi kelautan, biologi organisme laut, serta manajemen sumber daya pesisir.

#### 9.1.1 Karakteristik Fisik Laut

Karakteristik fisik laut meliputi suhu, tekanan, salinitas, arus, serta ketersediaan cahaya, yang seluruhnya berperan menentukan kondisi habitat dan produktivitas ekosistem laut. Faktor-faktor ini saling berinteraksi membentuk struktur vertikal kolom air dan zonasi biogeografis di lautan dunia.

##### a. Suhu Laut

Suhu merupakan parameter lingkungan utama yang memengaruhi laju metabolisme, distribusi geografis, dan produktivitas primer di laut. Suhu air laut menurun dengan bertambahnya kedalaman. Lapisan atas (epipelagik, 0–200 m) menerima pemanasan langsung dari radiasi matahari dengan kisaran suhu 25–30°C di daerah tropis dan 5–10°C di daerah subtropis. Lapisan tengah (mesopelagik, 200–1.000 m)

menunjukkan penurunan suhu drastis yang disebut lapisan termoklin, yaitu zona transisi dengan gradien suhu tinggi. Lapisan bawah (batipelagik hingga abisal, >1.000 m) memiliki suhu relatif konstan antara 2–4°C di seluruh samudra dunia. Suhu laut dipengaruhi oleh lintang geografis, arus laut, dan pola musiman. Laut tropis cenderung hangat sepanjang tahun, sedangkan laut lintang tinggi mengalami pembekuan musiman. Arus hangat seperti Gulf Stream dan Kuroshio membawa panas dari daerah ekuator ke lintang tinggi, sementara arus dingin seperti Peru Current menurunkan suhu pesisir tropis bagian timur samudra. Suhu menentukan aktivitas enzimatik, metabolisme, serta komposisi lipid membran organisme laut. Spesies stenothermal seperti karang hanya toleran terhadap kisaran suhu sempit, sementara ikan pelagik dan plankton eurythermal mampu bertahan pada fluktuasi lebih luas.

### **b. Tekanan Hidrostatik**

Tekanan hidrostatik meningkat sekitar 1 atmosfer setiap 10 meter kedalaman, sehingga pada kedalaman 4.000 meter tekanan dapat mencapai 400 atmosfer. Kondisi ini menimbulkan tantangan fisiologis besar bagi organisme laut dalam. Organisme laut dalam seperti ikan famili Macrouridae (rattail) dan udang *Benthesicymus* beradaptasi dengan:

- Tidak memiliki organ berisi gas seperti gelembung renang.
- Memiliki kandungan lipid tinggi untuk mengurangi densitas tubuh.
- Struktur enzim dan protein yang stabil terhadap tekanan tinggi.
- Membran sel dengan proporsi tinggi asam lemak tak jenuh yang menjaga fluiditas.

Tekanan juga memengaruhi proses biokimia seperti difusi gas dan aktivitas enzim. Oleh karena itu, spesies laut dalam sering kali memiliki laju metabolisme rendah dan pertumbuhan lambat sebagai bentuk efisiensi energi.

### **c. Salinitas**

Salinitas adalah ukuran jumlah garam terlarut dalam air laut, umumnya dinyatakan dalam satuan ‰ (permil). Salinitas rata-rata laut terbuka berkisar antara 33–37‰, namun nilai ini dapat berubah

tergantung penguapan, curah hujan, dan aliran air tawar. Laut Merah memiliki salinitas tinggi (>40‰) akibat penguapan tinggi. Laut Baltik memiliki salinitas rendah (<10‰) karena pengaruh air tawar besar. Daerah estuaria mengalami fluktuasi harian salinitas (5–35‰). Salinitas memengaruhi keseimbangan osmotik dan tekanan internal cairan tubuh. Organisme di laut memiliki dua strategi utama:

- Osmokonformer, seperti bintang laut dan ubur-ubur, yang menyesuaikan cairan tubuh sesuai lingkungan.
- Osmoregulator, seperti ikan laut dan udang, yang mengontrol keseimbangan ion dan air melalui insang dan ginjal.

Adaptasi osmoregulasi ini penting terutama bagi spesies yang hidup di lingkungan salinitas fluktuatif seperti estuaria atau mangrove, di mana mereka melakukan pertukaran ion aktif ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ) menggunakan sel klorida di insang.

#### **d. Arus Laut**

Arus laut merupakan gerakan massa air yang dihasilkan oleh kombinasi gaya angin, rotasi bumi (efek Coriolis), perbedaan densitas air, serta pasang surut. Arus dapat dibedakan menjadi:

- Arus permukaan yang digerakkan angin, seperti arus ekuatorial dan arus musiman.
- Arus dalam (*thermohaline circulation*) yang digerakkan oleh perbedaan suhu dan salinitas.

Arus berperan penting dalam distribusi nutrisi dan plankton, migrasi ikan pelagik (misalnya tuna dan sarden), dan juga transportasi panas dari daerah tropis ke kutub. Fenomena seperti upwelling di pantai barat Amerika Selatan dan Afrika membawa nutrisi dari dasar laut ke permukaan, meningkatkan produktivitas fitoplankton dan menarik konsentrasi ikan besar.

#### **e. Cahaya Matahari**

Cahaya merupakan sumber energi utama bagi proses fotosintesis di laut. Penetrasi cahaya menurun eksponensial dengan kedalaman karena penyerapan dan hamburan oleh partikel air.

- Zona eufotik (0–200 m): intensitas cahaya cukup untuk fotosintesis. Fitoplankton, makroalga, dan lamun hidup di zona ini.
- Zona disfotik (200–1.000 m): cahaya redup, tidak cukup untuk fotosintesis.
- Zona afotik (>1.000 m): tanpa cahaya, dihuni organisme heterotrof dan bioluminesen.

Spektrum cahaya juga berubah: panjang gelombang merah diserap lebih cepat, sementara biru menembus lebih dalam. Oleh karena itu, banyak organisme laut dalam berwarna merah (tidak terlihat di kegelapan) atau transparan sebagai bentuk kamuflase.

### 9.1.2 Faktor Kimia dan Biologis

Parameter faktor kimia dan biologis laut memiliki peran penting dalam menentukan struktur komunitas biota laut serta produktivitas ekosistem.

#### a. Faktor Kimia Laut

Air laut merupakan larutan kompleks yang mengandung unsur utama seperti natrium ( $\text{Na}^+$ ), klorida ( $\text{Cl}^-$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), serta unsur minor seperti silikat, besi, dan nitrat yang berperan dalam produktivitas primer. Parameter kimia utama meliputi:

- **Oksigen Terlarut (Dissolved Oxygen, DO)**

Kandungan oksigen tinggi di lapisan permukaan (sekitar 5–8 mg/L) karena difusi dari atmosfer dan hasil fotosintesis. Namun, di lapisan kedalaman menengah, terjadi zona minimum oksigen akibat dekomposisi bahan organik oleh bakteri. Kekurangan oksigen (*hipoksia*) dapat membatasi keberadaan organisme aerobik dan mendorong dominasi mikroba anaerob.

- **pH Air Laut**

Nilai pH laut umumnya berkisar antara 7,5–8,4, menjadikannya lingkungan basa lemah. Penurunan pH akibat peningkatan  $\text{CO}_2$  atmosfer menyebabkan asamifikasi laut (*ocean acidification*) yang menghambat pembentukan kalsium karbonat pada organisme seperti terumbu karang, moluska, dan foraminifera.

- **Nutrien (Nitrat, Fosfat, Silikat)**

Nutrien anorganik berperan penting dalam mendukung pertumbuhan fitoplankton. Di perairan tropis, konsentrasi nutrisi rendah karena stratifikasi kuat yang menghambat pencampuran vertikal, sedangkan di daerah upwelling dan lintang tinggi, konsentrasi nutrisi tinggi sehingga produktivitasnya besar.

- **Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) dan Alkalinitas**

Laut berperan sebagai penyerap karbon global. CO<sub>2</sub> yang larut di laut mengalami keseimbangan kimia menjadi ion bikarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dan karbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), yang menjadi sumber utama dalam proses kalsifikasi organisme pembentuk terumbu.

## **b. Faktor Biologis Laut**

Faktor biologis mencakup semua bentuk interaksi antarorganisme dalam ekosistem laut. Interaksi ini membentuk keseimbangan populasi, distribusi trofik, dan struktur komunitas.

Bentuk interaksi utama antara lain:

- Predasi : hubungan pemangsa dan mangsa yang mengatur keseimbangan populasi, contohnya ikan karnivora yang memangsa zooplankton.
- Kompetisi : terjadi antarspesies dengan kebutuhan sumber daya sama, misalnya kompetisi ruang antara karang dan spons di terumbu.

Simbiosis – hubungan erat antarspesies, meliputi:

- Mutualisme: kedua pihak diuntungkan, seperti ikan badut (*Amphiprion sp.*) dengan anemon laut (*Actiniaria*).
- Komensalisme: satu pihak diuntungkan tanpa merugikan pihak lain, misalnya ikan remora yang menempel pada hiu untuk mendapatkan sisa makanan.
- Parasitisme: satu pihak diuntungkan sementara lainnya dirugikan, contohnya copepoda parasit pada insang ikan.

Selain itu, aktivitas biologis organisme laut berperan penting dalam siklus biogeokimia, seperti daur karbon, nitrogen, dan fosfor yang menjaga keseimbangan ekosistem laut secara global.

### **c. Hubungan antara Faktor Fisik, Kimia, dan Biologis**

Ketiga komponen lingkungan laut yaitu komponen fisik, kimia, dan biologis yang saling berinteraksi secara dinamis. Perubahan suhu dan arus memengaruhi distribusi nutrisi dan oksigen. Variasi salinitas dan pH dapat menentukan keanekaragaman spesies tertentu. Aktivitas fotosintesis fitoplankton meningkatkan oksigen dan menurunkan CO<sub>2</sub> di lapisan permukaan. Keseimbangan interaksi ini menjadi dasar kestabilan ekosistem laut. Gangguan antropogenik seperti polusi, eksploitasi berlebihan, dan perubahan iklim dapat mengubah keseimbangan tersebut dan mengancam keberlanjutan keanekaragaman hayati laut.

## **9.2. Jenis-Jenis Adaptasi Organisme Laut**

Organisme laut hidup dalam kondisi lingkungan yang sangat beragam dan sering kali ekstrem, sehingga mereka harus mengembangkan berbagai bentuk adaptasi untuk bertahan hidup. Secara umum, adaptasi tersebut dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama, yaitu adaptasi morfologis, adaptasi fisiologis, dan adaptasi perilaku. Masing-masing kategori saling berkaitan dan berperan dalam menjaga keseimbangan hidup (*homeostasis*) organisme laut di habitatnya.

### **9.2.1 Adaptasi Morfologis**

Adaptasi morfologis merupakan perubahan atau penyesuaian pada bentuk dan struktur tubuh organisme untuk mendukung fungsi tertentu sesuai kondisi lingkungan. Adaptasi jenis ini biasanya bersifat evolusioner, hasil seleksi alam dalam jangka waktu yang panjang.

#### **a. Bentuk Tubuh dan Gerak**

Bentuk tubuh ikan pelagis seperti tuna (*Thunnus albacares*) dan makarel (*Scomber japonicus*) bersifat fusiform (*torpedo*), yang mengurangi hambatan air dan memungkinkan perenangan cepat pada arus kuat. Sementara itu, ikan dasar laut (bentik) seperti pari (*Dasyatidae*) dan ikan pipih (*Pleuronectiformes*) memiliki tubuh dorsoventral pipih, membantu mereka berkamuflase di dasar pasir atau lumpur. Hewan sesil seperti spons dan karang memiliki struktur tubuh yang porous atau berpori, yang

memungkinkan sirkulasi air untuk pertukaran zat dan pengambilan makanan.

### **b. Struktur Pelindung**

Beberapa organisme laut memiliki cangkang keras atau eksoskeleton sebagai perlindungan terhadap predator dan arus kuat. Contohnya adalah moluska seperti kerang (*Anadara granosa*) dan gastropoda (*Turbo marmoratus*). Krustasea seperti kepiting dan udang memiliki eksoskeleton kitin yang diperkuat kalsium karbonat. Selain itu, ikan seperti hiu (*Carcharhinus sp.*) memiliki kulit berlapis dentikel dermal yang kasar dan berfungsi mengurangi turbulensi air sekaligus melindungi dari parasit dan luka.

### **c. Organ Penyesuaian Spesifik**

Organisme laut dalam sering kali menunjukkan modifikasi ekstrem. Misalnya, Anglerfish memiliki tonjolan tubuh bercahaya (*esca*) untuk menarik mangsa. Cumi-cumi raksasa memiliki mata besar dengan diameter mencapai 30 cm, membantu mereka mendeteksi cahaya lemah di kedalaman lebih dari 1.000 meter. Pada bivalvia, kaki (*muscular foot*) berkembang untuk menggali substrat lunak, sedangkan pada karang dan anemon, tentakel bersel nematosis digunakan untuk menangkap plankton.

### **d. Warna dan Kamufase**

Adaptasi warna merupakan strategi penting. Banyak ikan laut dangkal memiliki warna cerah sebagai bentuk mimikri atau kamufase terhadap lingkungan karang. Contoh, ikan kupu-kupu (*Chaetodon sp.*) memiliki pola menyerupai karang. Sebaliknya, ikan laut dalam cenderung berwarna gelap atau transparan untuk menyembunyikan diri di perairan minim cahaya. Cumi-cumi dan gurita mampu mengubah warna kulit melalui sel kromatofor untuk berkomunikasi, menakuti predator, atau berkamufase.

## **9.2.2 Adaptasi Fisiologis**

Adaptasi fisiologis mencakup penyesuaian fungsi internal tubuh terhadap kondisi fisik dan kimia lingkungan laut. Mekanisme ini

memungkinkan organisme mempertahankan keseimbangan internal meskipun faktor eksternal berubah.

#### **a. Osmoregulasi**

Osmoregulasi merupakan salah satu adaptasi fisiologis paling penting. Ikan laut memiliki tekanan osmotik tubuh lebih rendah dibanding air laut. Untuk menghindari kehilangan air, mereka meminum air laut dan mengeluarkan kelebihan garam melalui insang dengan bantuan sel klorida (*chloride cells*). Sebaliknya, ikan air tawar menghadapi tekanan osmotik sebaliknya: mereka menyerap air melalui osmosis dan mengeluarkan urin encer. Spesies yang hidup di daerah estuaria seperti *Mugil cephalus* (ikan belanak) disebut euryhaline, karena mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan salinitas ekstrem.

#### **b. Regulasi Suhu Tubuh**

Sebagian besar ikan bersifat poikilotermik (suhu tubuh mengikuti suhu lingkungan). Namun, beberapa spesies seperti tuna dan hiu putih (*Carcharodon carcharias*) menunjukkan kemampuan endoterm parsial, yaitu mempertahankan suhu otot lebih tinggi dari suhu air sekitar, sehingga meningkatkan efisiensi berenang di perairan dingin. Mamalia laut seperti paus memiliki lapisan lemak tebal (*blubber*) yang berfungsi sebagai isolator termal, serta sistem sirkulasi darah countercurrent exchange yang mencegah kehilangan panas berlebih di sirip dan ekor.

#### **c. Respirasi dan Adaptasi terhadap Kekurangan Oksigen**

Ketersediaan oksigen menurun di laut dalam. Untuk mengatasinya, ikan dan invertebrata laut mengembangkan pigmen respirasi dengan afinitas tinggi terhadap oksigen. Misalnya, cacing laut (*Arenicola marina*) menggunakan hemoglobin larut dalam plasma, sementara krustasea dan moluska menggunakan hemocyanin yang mengandung tembaga. Mamalia penyelam seperti paus sperma (*Physeter macrocephalus*) memiliki kadar mioglobin otot yang jauh lebih tinggi daripada mamalia darat, memungkinkan penyimpanan oksigen lebih banyak untuk penyelaman lama.

#### **d. Adaptasi terhadap Tekanan dan Cahaya**

Pada kedalaman ekstrem, tekanan air dapat mencapai ribuan atmosfer. Organisme laut dalam menyesuaikan diri dengan mengurangi ruang berisi gas, memiliki enzim dan membran sel fleksibel, serta kadar asam lemak tak jenuh yang tinggi. Banyak spesies laut dalam juga menghasilkan bioluminesensi, yakni cahaya yang dihasilkan dari reaksi kimia antara luciferin dan enzim luciferase. Fungsi bioluminesensi meliputi kamuflase, komunikasi, dan penangkapan mangsa.

#### **e. Adaptasi terhadap Kekurangan Nutrien**

Beberapa organisme laut seperti cyanobacteria *Trichodesmium* mampu mengikat nitrogen atmosfer (*N<sub>2</sub> fixation*) di daerah oligotrofik (miskin nutrien). Sementara itu, di daerah hidrotermal, organisme kemolitotrofik seperti bakteri sulfur memanfaatkan energi dari reaksi kimia, bukan dari cahaya matahari sebagai sebuah bentuk adaptasi ekstrem terhadap lingkungan tanpa cahaya dan oksigen.

### **9.2.3 Adaptasi Perilaku**

Adaptasi perilaku mencerminkan strategi tindakan atau respon aktif organisme terhadap kondisi lingkungan untuk meningkatkan peluang bertahan hidup, mencari makan, dan bereproduksi.

#### **a. Migrasi Vertikal Harian**

Zooplankton melakukan migrasi vertikal harian (*diel vertical migration*) yaitu naik ke permukaan laut pada malam hari untuk makan fitoplankton, dan turun ke kedalaman pada siang hari guna menghindari predator visual. Strategi ini membantu menjaga keseimbangan energi sekaligus mengatur distribusi karbon laut secara global.

#### **b. Migrasi Reproduksi dan Musiman**

Penyu laut (*Chelonia mydas*) dan paus bungkuk (*Megaptera novaeangliae*) melakukan migrasi ribuan kilometer antara daerah makan dan bertelur. Fenomena ini dipicu oleh siklus suhu, arus laut, dan ketersediaan makanan. Ikan salmon (*Oncorhynchus sp.*) bahkan bermigrasi dari laut ke air tawar untuk bertelur, menunjukkan adaptasi

fisiologis dan perilaku yang sangat kompleks terhadap perubahan salinitas.

### **c. Pola Makan dan Interaksi Sosial**

Beberapa ikan karang seperti Amphiprion ocellaris (ikan badut) hidup secara simbiosis mutualistik dengan anemon laut — ikan memperoleh perlindungan dari tentakel penyengat anemon, sedangkan anemon mendapat pembersihan dan sisa makanan. Lumba-lumba menunjukkan perilaku sosial tinggi seperti berburu secara berkelompok, komunikasi melalui klik sonar (*echolocation*), serta kerja sama dalam menjaga anak.

### **d. Perilaku Kamuflase dan Pertahanan Diri**

Cumi-cumi dan gurita dapat mengeluarkan tinta hitam (*ink sac defense*) untuk mengaburkan pandangan predator. Beberapa ikan seperti Histrio histrio (*frogfish*) meniru bentuk dan warna lingkungan karang atau rumput laut untuk menipu mangsa dan predator. Selain itu, bintang laut dan teripang mampu meregenerasi bagian tubuh yang hilang sebagai strategi bertahan hidup setelah serangan predator.

## **9.2.4 Signifikansi Ekologis dan Evolusioner Adaptasi**

Adaptasi bukan hanya memungkinkan kelangsungan hidup individu, tetapi juga memengaruhi struktur komunitas dan pola keanekaragaman hayati laut. Adaptasi menentukan niche ekologi, memengaruhi interaksi trofik, serta menjadi dasar dalam proses spesiasi di laut. Organisme yang memiliki kemampuan adaptasi tinggi cenderung mendominasi ekosistem yang berubah, sedangkan yang memiliki toleransi sempit berisiko menurun populasinya akibat tekanan lingkungan seperti pemanasan global, polusi, atau asidifikasi laut. Pemahaman terhadap mekanisme adaptasi ini menjadi kunci dalam biologi konservasi, pengelolaan sumber daya hayati laut, dan prediksi respon ekosistem terhadap perubahan iklim global.

## **9.3. Adaptasi Terhadap Faktor Lingkungan**

Organisme laut telah berevolusi selama jutaan tahun untuk beradaptasi terhadap berbagai kondisi lingkungan laut yang ekstrem dan

dinamis. Faktor-faktor seperti suhu, salinitas, tekanan, dan intensitas cahaya menjadi penentu utama distribusi, perilaku, dan fisiologi organisme laut. Setiap adaptasi merupakan hasil seleksi alam yang memungkinkan spesies mempertahankan fungsi fisiologis dan keberlangsungan hidupnya di berbagai zona laut.

### **9.3.1 Adaptasi terhadap Suhu**

Suhu merupakan salah satu faktor lingkungan paling berpengaruh terhadap aktivitas metabolisme, laju pertumbuhan, reproduksi, serta distribusi organisme laut. Organisme laut dikategorikan menjadi dua kelompok utama berdasarkan toleransi suhunya: eurythermal (dapat bertahan pada rentang suhu luas) dan stenothermal (hanya mampu hidup pada kisaran suhu sempit). Contoh organisme eurythermal adalah ikan cod (*Gadus morhua*) yang mampu bertahan pada suhu antara 0–20°C. Sebaliknya, karang tropis seperti *Acropora* spp. bersifat stenothermal, hanya dapat hidup pada suhu stabil 26–30°C.

Pada tingkat fisiologis, adaptasi terhadap suhu melibatkan perubahan komposisi lipid membran sel. Pada suhu rendah, organisme laut meningkatkan proporsi asam lemak tak jenuh ganda (PUFA) untuk menjaga fluiditas membran. Sebaliknya, pada suhu tinggi, komposisi lipid diubah menjadi lebih jenuh agar struktur membran tetap stabil. Selain itu, banyak organisme laut menghasilkan protein kejutan panas (Heat Shock Proteins, HSPs) yang berfungsi mencegah denaturasi protein akibat fluktuasi suhu ekstrem. Pada karang, peningkatan suhu laut dapat menyebabkan keluarnya zooxanthellae dari jaringan inangnya, menimbulkan fenomena coral bleaching. Proses ini menyebabkan hilangnya sumber energi utama bagi karang dan berujung pada kematian massal jika stres termal berlangsung lama.

### **9.3.2 Adaptasi terhadap Salinitas**

Salinitas menentukan keseimbangan osmotik antara tubuh organisme dan lingkungannya. Laut memiliki salinitas rata-rata sekitar 35‰, namun nilai ini dapat berubah akibat penguapan, curah hujan,

atau aliran air tawar di estuaria. Organisme laut mengembangkan dua strategi utama:

- Osmokonformer, yaitu organisme yang menyesuaikan konsentrasi cairan tubuh dengan lingkungan (misalnya, invertebrata laut seperti bintang laut).
- Osmoregulator, yaitu organisme yang mempertahankan keseimbangan internal melalui mekanisme aktif, seperti ikan laut dan krustasea.

Organisme euryhaline di ekosistem estuaria seperti ikan belanak (*Mugil cephalus*) mampu bertahan pada perubahan salinitas dari 0 hingga 35‰. Mereka memiliki insang khusus (chloride cells) yang berperan dalam mengeluarkan kelebihan ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  saat berada di air asin, serta menyerap ion tersebut saat berada di air tawar. Sebaliknya, organisme stenohaline seperti ikan karang hanya mampu hidup pada salinitas stabil, karena mekanisme osmoregulasinya tidak fleksibel. Adaptasi terhadap salinitas juga melibatkan produksi senyawa organik kompatibel seperti taurin dan glisin betain untuk menyeimbangkan tekanan osmotik tanpa mengganggu fungsi enzimatis sel.

### 9.3.3 Adaptasi terhadap Tekanan

Tekanan hidrostatik meningkat sekitar 1 atmosfer setiap 10 meter kedalaman. Di kedalaman 4000–6000 meter, tekanan bisa mencapai 400–600 atmosfer, kondisi yang dapat merusak struktur biologis organisme jika tidak diimbangi oleh adaptasi khusus. Organisme laut dalam seperti anggota ordo Stomiiformes dan Bathypelagic memiliki struktur tubuh lunak, fleksibel, serta kandungan air dan lipid tinggi untuk menahan tekanan ekstrem. Mereka umumnya tidak memiliki gelembung renang (*swim bladder*) karena gas di dalamnya akan terkompresi dan merusak organ tubuh pada tekanan tinggi.

Selain itu, membran sel organisme laut dalam kaya akan asam lemak tak jenuh yang menjaga fluiditas membran tetap stabil meskipun pada tekanan tinggi dan suhu rendah. Enzim metabolik mereka juga dimodifikasi agar tetap aktif dalam kondisi viskositas tinggi, misalnya enzim lactate dehydrogenase yang tetap berfungsi optimal pada tekanan

ekstrem. Pada tingkat genetik, beberapa spesies menunjukkan ekspresi gen khusus yang mengatur stabilitas protein tekanan tinggi, misalnya gen *piezo1* yang berperan dalam mekanosensasi sel terhadap tekanan mekanik.

### **9.3.4 Adaptasi terhadap Cahaya**

Cahaya merupakan sumber energi utama di laut, namun intensitasnya menurun drastis seiring bertambahnya kedalaman. Berdasarkan penetrasi cahaya, laut dibagi menjadi:

- Zona eufotik (0–200 m): cukup cahaya untuk fotosintesis.
- Zona disfotik (200–1000 m): cahaya redup, tidak cukup untuk fotosintesis.
- Zona afotik (>1000 m): tanpa cahaya sama sekali.

Organisme fotosintetik seperti fitoplankton, makroalga, dan cyanobacteria hanya dapat hidup di zona eufotik. Mereka menyesuaikan pigmen fotosintetik seperti klorofil-a, fukosantin, atau peridinin untuk menangkap cahaya pada panjang gelombang tertentu sesuai kedalaman. Di zona afotik, adaptasi terhadap kegelapan diwujudkan dalam bentuk bioluminesensi, yaitu kemampuan menghasilkan cahaya melalui reaksi kimia enzimatik antara luciferin dan luciferase. Contohnya pada ikan lentera (*Myctophidae*) dan cumi-cumi *Watasenia scintillans*, cahaya digunakan untuk menarik mangsa, komunikasi, atau kamuflase melalui mekanisme counter-illumination.

## **9.4. Studi Kasus Adaptasi Organisme Laut**

### **9.4.1 Adaptasi Ikan Laut Dalam**

Ikan laut dalam merupakan contoh ekstrem dari adaptasi fisiologis dan morfologis. Salah satu spesies ikonik adalah anglerfish (famili *Lophiiformes*), yang memiliki organ bercahaya (*esca*) di ujung antena hasil simbiosis dengan bakteri *Photobacterium phosphoreum*. Adaptasi ini digunakan untuk menarik mangsa di lingkungan tanpa cahaya. Tubuh anglerfish sangat elastis, dengan rahang dan perut yang dapat mengembang besar untuk menelan mangsa seukuran tubuhnya sendiri. Beberapa spesies jantan bahkan menunjukkan adaptasi reproduksi

parasitik, menempel permanen pada tubuh betina untuk berbagi sistem peredaran darah, sehingga menjamin fertilisasi di lingkungan dengan populasi jarang.

#### **9.4.2 Adaptasi Terumbu Karang**

Terumbu karang adalah contoh simbiosis mutualistik antara inang karang (*Cnidaria*) dan alga fotosintetik *Symbiodinium* (*zooxanthellae*). Hubungan ini merupakan adaptasi ekologis yang memungkinkan karang hidup di perairan tropis yang miskin nutrisi. *Zooxanthellae* menyuplai hingga 90% kebutuhan energi karang melalui hasil fotosintesis berupa glukosa dan asam amino, sedangkan karang menyediakan tempat hidup, perlindungan, dan senyawa nitrogen bagi alga.

Namun hubungan ini sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan. Kenaikan suhu 1–2°C saja dapat menyebabkan stres termal dan mengakibatkan bleaching. Selain suhu, penurunan pH laut akibat peningkatan CO<sub>2</sub> atmosfer menghambat pembentukan kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>), sehingga menurunkan kekuatan struktur terumbu dan laju pertumbuhannya.

#### **9.4.3 Adaptasi Mamalia Laut**

Mamalia laut seperti paus (*Balaenoptera musculus*), lumba-lumba (*Delphinidae*), dan anjing laut (*Phocidae*) menunjukkan adaptasi morfologis dan fisiologis untuk hidup akuatik penuh.

Ciri khas adaptasi mereka antara lain:

- Lapisan lemak subkutan tebal (*blubber*) sebagai isolator termal dan cadangan energi.
- Paru-paru elastis dan kapasitas darah besar, yang memungkinkan pertukaran oksigen lebih efisien.
- Konsentrasi tinggi hemoglobin dan mioglobin, meningkatkan penyimpanan oksigen selama menyelam.
- Kemampuan bradikardia refleks, yaitu penurunan denyut jantung untuk menghemat oksigen saat penyelaman panjang.

Selain itu, struktur tubuh mereka streamline untuk mengurangi hambatan air, dan sistem pendengaran mereka beradaptasi untuk

mendeteksi gelombang suara bawah air melalui mekanisme echolocation, seperti pada lumba-lumba.

### **9.5. Dampak Perubahan Lingkungan Terhadap Adaptasi**

Perubahan iklim global telah memengaruhi kondisi laut secara signifikan. Pemanasan global, asidifikasi laut, penurunan oksigen terlarut, dan pencemaran mikroplastik mengubah dinamika adaptasi organisme laut. Kenaikan suhu laut mendorong pergeseran distribusi spesies ke lintang yang lebih tinggi. Misalnya, beberapa ikan tropis kini ditemukan di wilayah subtropis akibat meningkatnya suhu perairan. Namun, bagi spesies stenothermal seperti karang, perubahan kecil saja dapat menyebabkan keruntuhan ekosistem akibat bleaching masif. Asidifikasi laut yang disebabkan oleh peningkatan CO<sub>2</sub> atmosfer mengganggu proses kalsifikasi pada organisme pembentuk cangkang dan kerangka seperti moluska, karang, dan foraminifera.

Penurunan pH juga memengaruhi kelarutan mineral dan ketersediaan ion karbonat yang penting bagi pertumbuhan terumbu. Selain itu, hipoksia (penurunan oksigen) di beberapa perairan pesisir memperburuk stres fisiologis organisme, terutama bagi spesies dengan kebutuhan metabolik tinggi. Organisme yang tidak mampu beradaptasi atau bermigrasi menghadapi risiko penurunan populasi bahkan kepunahan lokal. Pemahaman terhadap mekanisme adaptasi ini sangat penting untuk perencanaan konservasi, restorasi ekosistem, dan mitigasi perubahan iklim di wilayah laut. Integrasi pendekatan ekologi, fisiologi, dan bioteknologi kelautan menjadi kunci dalam mempertahankan keberlanjutan biodiversitas laut di masa depan.

# Bab 10

## PERUBAHAN LINGKUNGAN LAUT DAN DAMPAKNYA

### 10.1. Pendahuluan

Lingkungan laut memainkan peran sentral dalam sistem bumi dari pengaturan iklim, siklus karbon, hingga keberlangsungan ekosistem dan layanan ekosistem bagi manusia. Laut Indonesia merupakan salah satu sistem oseanografi paling kompleks di dunia, letaknya yang strategis di antara Samudra Hindia dan Pasifik menjadikan laut Indonesia sangat rentan terhadap perubahan iklim global dan aktivitas antropogenik. Perubahan lingkungan laut mencakup fluktuasi suhu, pH, salinitas, dan oksigen terlarut yang mempengaruhi ekosistem seperti terumbu karang, mangrove, dan padang lamun. Dalam dua dekade terakhir, pemanasan global, pengasaman laut, dan pencemaran pesisir telah menjadi isu utama yang mengancam keberlanjutan keanekaragaman hayati laut Indonesia.

Perubahan-perubahan ini membawa dampak yang meluas: mulai dari penurunan keanekaragaman hayati, kerusakan habitat penting seperti terumbu karang dan lamun, hingga gangguan terhadap mata pencaharian masyarakat pesisir. Sebagai contoh, kajian global menunjukkan bahwa pemanasan laut, penggunaan lahan yang intensif dan polusi mikroplastik merupakan pemicu utama perubahan tersebut (Hsieh et al., 2023). Sementara itu, fenomena seperti pengasaman laut, deoksigenasi dan gelombang panas laut muncul sebagai ancaman serius terhadap stabilitas ekosistem laut (Maggioni et al., 2023).

Di konteks Indonesia khususnya, sebuah negara maritim dengan garis pantai panjang dan keanekaragaman biota laut yang tinggi,

tantangan terhadap lingkungan laut sangat nyata. Oleh karena itu, sangat penting untuk menjabarkan secara sistematis bentuk-bentuk perubahan lingkungan laut, memahami dampaknya, serta menetapkan kerangka mitigasi dan adaptasi yang berbasis sains.

## **10.2. Konsep dan Karakteristik Lingkungan Laut**

### **a) Definisi dan Ruang Lingkup**

Lingkungan laut merupakan suatu sistem ekologis yang sangat luas dan kompleks, mencakup seluruh wilayah perairan yang memiliki salinitas signifikan dan tempat organisme (baik makroorganisme maupun mikroorganisme) menjalani siklus hidupnya dalam interaksi berkelanjutan dengan faktor-fisik, kimia dan biologis. Dalam konteks ini, lingkungan laut meliputi berbagai zona habitat seperti ekosistem pelagik (kolom air atau laut lepas), ekosistem bentik (dasar laut), zona pesisir (kontinental, estuari, laguna) serta laut dalam (*deep sea*) yang masing-masing memiliki karakteristik dan dinamika tersendiri (Tuaputty & Alimudi, 2022).

Ekosistem pelagik biasanya didefinisikan sebagai zona kolom air dari permukaan hingga ke dasar (atau zona hadal jika dalam) dimana organisme hidup bebas bergerak atau melayang di dalam air. Sebaliknya, ekosistem bentik merujuk pada zona yang langsung berada di atas dan dalam sedimen dasar laut-sungai, termasuk sedimen aktif dan biota yang melekat maupun bergerak di sana. Zona pesisir merupakan area transisi yang sangat dinamis antara daratan dan laut, mencakup pantai, mangrove, lamun, terumbu karang dan delta sungai. Setiap zona memiliki kondisi fisik, kimia dan biologis yang berbeda, namun saling terkait melalui proses umpan-balik (*feedback*) dan pertukaran materi maupun energi (*coupling*) antara zona-zona tersebut (Griffiths et al., 2017).

### **b) Karakteristik Ruang Lingkup**

Untuk memahami lingkup lingkungan laut secara lebih rinci, perlu dikaji berbagai komponen utama yang menentukan ruang lingkungannya:

### 1. Dimensi fisik

Variabel fisik dalam lingkungan laut meliputi suhu air, stratifikasi kolom air (lapisan suhu/salinitas berbeda), arus laut, gelombang, turbulensi, tekanan hidrostatis (naik seiring bertambahnya kedalaman), cahaya yang menuruni kolom air, dan salinitas. Misalnya, cahaya matahari yang menembus kolom air akan sangat mempengaruhi zona epipelagik ( $\pm 0-200\text{m}$ ) dibandingkan zona mesopelagik/bathypelagik yang gelap; serta tekanan dan temperature yang berubah drastis seiring kedalaman (Kendall, 2017).

### 2. Dimensi kimia

Aspek kimia terdiri dari pH (tingkat keasaman), konsentrasi oksigen terlarut (DO), nutrisi utama seperti nitrogen, fosfor, silikat, unsur garam, dan substansi terlarut (termasuk karbon organik terlarut). Rangkaian proses kimia ini sangat menentukan produktivitas primer laut dan ketersediaan habitat bagi organisme laut. Misalnya, laut mempunyai pH sekitar 8,1 tetapi perubahan kecil dalam pH dapat mempengaruhi organisme pengkalsifikasi. Salinitas juga memengaruhi kerapatan air, aliran, dan kemampuan larutan oksigen—jika salinitas naik maka kelarutan oksigen menurun (Kendall, 2017).

### 3. Dimensi biologis

Komponen biologis mencakup keanekaragaman spesies (*species richness, species evenness*), tingkat produktivitas primer (fitoplankton, makroalga), komunitas hewan dan tumbuhan laut, struktur trofik (rantai dan jaringan makanan), interaksi predator-mangsa, simbiosis, dan siklus hidup organisme (pelagik maupun bentik). Sebagai contoh, zona pesisir sering kali memiliki keanekaragaman tinggi karena cahaya, nutrisi dan habitat yang kompleks, namun zona laut dalam juga memiliki biota unik yang menyesuaikan dengan kondisi ekstrem tempat hidupnya (Kendall, 2017).

Lingkungan laut merupakan sistem terbuka dan dinamis, yang mana perubahan pada satu variabel sering menimbulkan efek pada variabel lainnya. Lingkungan laut mencakup ekosistem pelagik (laut lepas) dan bentik (dasar laut), serta zona pesisir dan laut dalam. Ekosistem ini ditandai oleh interaksi antara variabel fisik (misalnya suhu, stratifikasi air, arus), kimia (pH, oksigen terlarut, nutrisi) dan biologis (keanekaragaman spesies, struktur komunitas) (Tuaputty & Alimudi, 2022). Perubahan pada salah satu aspek tersebut di atas akan berimplikasi pada aspek lain melalui rangkaian interaksi dan umpan balik.

### **10.3. Proses Kunci dalam Kerangka Perubahan Lingkungan Laut**

Beberapa proses penting yang menggerakkan perubahan lingkungan laut antara lain:

1. Pemanasan laut (*ocean warming*)

Kenaikan suhu permukaan maupun kolom air laut mengubah stratifikasi, arus dan metabolisme organisme. Suhu laut meningkat rata-rata 0,11°C per dekade sejak 1970-an. Peningkatan ini berdampak pada migrasi biota laut, perubahan pola reproduksi, serta degradasi habitat (Mulya, 2023). Fenomena *coral bleaching* atau pemutihan karang terjadi ketika suhu laut melampaui ambang toleransi karang (biasanya 30–32°C), menyebabkan karang kehilangan zooxanthellae yang merupakan alga simbiosis penting bagi fotosintesis dan pertumbuhan terumbu karang (Siringoringo et al., 2023).

2. Pengasaman laut (*ocean acidification*)

Kenaikan CO<sub>2</sub> atmosfer berdampak pada penurunan pH laut, yang mempengaruhi organisme pengkalsifikasi. Laut menyerap sekitar 30% emisi karbon dioksida dari atmosfer. Reaksi kimia antara CO<sub>2</sub> dan air laut membentuk asam karbonat (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), yang menurunkan pH laut dari rata-rata 8,2 menjadi 8,05 dalam 200 tahun terakhir. Kondisi ini menghambat pembentukan kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>) pada organisme laut seperti karang dan moluska (Lumuindong et al., 2023).

### 3. Pencemaran laut

Aktivitas manusia menghasilkan polutan anorganik (logam berat, mikro plastik, pestisida) dan organik (limbah rumah tangga, minyak). Pencemaran logam berat seperti Pb, Cd, As dan Ni menyebabkan bioakumulasi dalam jaringan biota laut yang dapat menimbulkan risiko toksik bagi manusia dan biota laut lainnya. Risiko toksik yang muncul antara lain kerusakan organ hati dan ginjal, anemia, gangguan sistem imun dan saraf, serta kanker kulit (Damayanty et al., 2023; Farizky et al., 2022). Pencemaran laut lainnya adalah mikroplastik yang kini ditemukan di hampir seluruh perairan pesisir Indonesia, dengan kepadatan tertinggi di Teluk Jakarta dan Selat Makassar (Manalu et al., 2017; Wicaksono et al., 2020).

### 4. Eutrofikasi dan Limpasan nutrisi

Input nutrisi dan senyawa organik dapat mengganggu sirkulasi bahan dan fungsi ekosistem. Peningkatan konsentrasi nitrogen (N) dan fosfor (P) dari pupuk pertanian memicu ledakan populasi fitoplankton (*algae bloom*). Dalam studi di wilayah Teluk Jakarta, ditemukan bahwa zona hiper-eutrofik meningkat dari ~75,1 km<sup>2</sup> tahun 2001 menjadi ~114,0 km<sup>2</sup> pada tahun 2019, sehingga kondisi hipoksia (DO rendah) serta bloom alga sering muncul sebagai konsekuensinya (Damar et al., 2020).

### 5. Eksploitasi Sumber Daya dan Aktivitas Antropogenik Penangkapan ikan berlebih (*overfishing*), reklamasi, konversi habitat pesisir menjadi pelabuhan dan daerah pariwisata, sedimentasi, dan lain-lain mempercepat perubahan yang terjadi di lingkungan laut (He, 2024).

- Penangkapan Ikan Berlebih (*Overfishing*) merupakan salah satu bentuk eksploitasi sumber daya laut yang paling menonjol dan berdampak luas terhadap ekosistem laut Indonesia. Praktik ini telah menyebabkan penurunan jumlah stok ikan, bahkan hingga kehabisan spesies target dan non-target di ekosistem terumbu karang baik secara global maupun Indonesia tidak terkecuali. Dampak dari *overfishing* tidak hanya

bersifat biotik, tetapi juga terhadap kesejahteraan masyarakat pesisir yang bergantung pada perikanan sebagai mata pencaharian.

- Kegiatan reklamasi pantai, pembangunan pelabuhan, serta pengembangan kawasan pariwisata pesisir merupakan bentuk aktivitas antropogenik yang mengubah morfologi pantai, mengurangi habitat alami, dan menimbulkan tekanan terhadap ekosistem pesisir dan laut. Studi di kawasan Teluk Jakarta menunjukkan bahwa reklamasi pantai dengan pembangunan pulau-pulau buatan, tanggul raksasa, dan tanggul laut, berdampak negatif terhadap kualitas air, hasil tangkapan nelayan, dan kemampuan ekosistem untuk mendukung *nursery ground* kehidupan laut (Puspasari et al., 2017). Dampak lingkungan dari reklamasi dan pembangunan pesisir lainnya juga mencakup kerusakan mangrove dan padang lamun yang berfungsi sebagai penahan gelombang, dan penyerapan karbon.

#### **10.4. Kerentanan Ekosistem Laut**

Kerentanan (*vulnerability*) ekosistem laut merujuk pada tingkat kepekaan dan kemampuan adaptif suatu ekosistem dalam menghadapi perubahan lingkungan yang disebabkan oleh tekanan alami maupun antropogenik. Ekosistem laut terutama yang berada di wilayah pesisir tropis memiliki kerentanan yang tinggi terhadap perubahan gabungan (*multiple stressors*). Oleh karena itu, penting untuk memandang lingkungan laut sebagai sistem dinamis yang terpapar berbagai tekanan secara simultan.

Ekosistem pesisir seperti terumbu karang, padang lamun, dan hutan mangrove adalah sistem yang paling rentan karena berada pada zona transisi antara laut dan darat. Zona ini menerima limpasan nutrisi dari darat, pencemaran, dan pemanasan suhu permukaan laut yang signifikan. Berdasarkan laporan Pearce-Kelly et al. (2025), menunjukkan bahwasanya kenaikan suhu 1–2°C di atas ambang normal telah cukup untuk memicu pemutihan massal karang (*coral bleaching*). Selain

tekanan suhu, pengasaman laut (*ocean acidification*) juga menjadi ancaman kronis jangka panjang. Kadar pH laut global telah menurun sekitar 0,1 unit sejak era pra-industri. Penurunan pH ini berdampak pada kemampuan organisme pengkalsifikasi (karang, moluska, foraminifera) untuk membentuk struktur kalsium karbonat, sehingga dapat mengancam integritas ekosistem karang secara keseluruhan (Kubota et al., 2017).

Dampak perubahan lingkungan laut memiliki implikasi luas terhadap jasa ekosistem (*ecosystem services*) dan kesejahteraan masyarakat pesisir. Kerusakan ekosistem laut global menyebabkan potensi kehilangan jasa ekosistem yang terdiri atas :

1. Jasa penyediaan (*provisioning services*) seperti hasil perikanan menurun drastis akibat degradasi habitat pemijahan dan *nursery ground*.
2. Jasa pengatur (*regulating services*) seperti penyerapan karbon dan perlindungan pantai menurun seiring berkurangnya mangrove dan lamun.
3. Jasa budaya (*cultural services*) seperti pariwisata bahari juga terancam, terutama di wilayah berbasis terumbu karang seperti Bali, Bunaken, dan Wakatobi.

Kondisi ini menciptakan kerentanan sosial-ekonomi baru di komunitas pesisir. Cinner et al. (2018) menegaskan bahwa masyarakat pesisir tropis memiliki kemampuan adaptasi yang terbatas terhadap kehilangan sumber daya laut karena ketergantungan ekonomi yang tinggi. Dengan demikian, partisipasi aktif masyarakat pesisir dalam upaya pelestarian ekosistem laut serta pemeliharaan jasa ekosistemnya menjadi faktor kunci untuk mewujudkan keberlanjutan sosial dan ekologis.

## **10.5. Strategi Mitigasi dan Adaptasi**

### **1. Penguatan Sistem Konservasi Laut**

Penguatan sistem konservasi laut merupakan fondasi utama untuk mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan lingkungan laut. Dua

strategi utama dalam hal ini adalah perluasan kawasan konservasi laut dan penerapan pengelolaan berbasis ekosistem.

Perluasan Kawasan Konservasi Laut (*Marine Protected Areas*) memiliki peran penting sebagai kawasan referensi untuk pemulihan stok ikan, perlindungan habitat kritis, dan penyimpanan karbon biru. Studi oleh Jankowska et al. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan perlindungan laut secara signifikan dapat berkontribusi terhadap mitigasi iklim dan konservasi keanekaragaman hayati. Berikut adalah beberapa pilar utama dalam implementasi perluasan Kawasan Konservasi Laut (*Marine Protected Areas*):

a) Penataan Zonasi dan Integrasi Tata Ruang Laut

Kawasan Konservasi Laut (*Marine Protected Areas*) harus dikembangkan berdasarkan prinsip *spatial connectivity*, yaitu keterhubungan ekologis antarhabitat (mangrove–lamun–karang). Menurut Carr et al. (2017), konektivitas spasial penting untuk memastikan keberlangsungan populasi ikan dan aliran genetik antar area perlindungan. Dalam konteks Indonesia, penyusunan Rencana Zonasi Wilayah Laut (RZWP3K) di tingkat provinsi menjadi instrumen hukum utama yang memastikan setiap kawasan memiliki batas, fungsi, dan mekanisme pengelolaan yang jelas.

b) Sinergi Antar Kementerian dan Lembaga

Upaya ini memerlukan kolaborasi lintas lembaga terutama antara Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), serta pemerintah daerah. Tata kelola laut yang efektif menuntut adanya integrasi antara kebijakan konservasi, perikanan berkelanjutan, dan mitigasi perubahan iklim (Franco et al., 2022; OECD, 2017).

c) Keterlibatan Masyarakat Pesisir

Keberhasilan Kawasan Konservasi Laut (*Marine Protected Areas*) sangat bergantung pada dukungan sosial-ekonomi masyarakat pesisir. *Community-based marine management* (CBMM) terbukti meningkatkan kepatuhan terhadap aturan konservasi dan mempercepat pemulihan stok ikan (Cinner et al., 2018).

Di Indonesia, konsep “Kawasan Konservasi Perairan Berbasis Masyarakat (KKP-BM)” telah diterapkan di Wakatobi, Raja Ampat, dan Kei Kecil, di mana nelayan lokal terlibat langsung dalam perencanaan, patroli, dan evaluasi Kawasan Konservasi Laut.

d) **Monitoring Efektivitas dan Adaptasi**

Peningkatan luasan Kawasan Konservasi Laut (*Marine Protected Areas*) tidak berarti peningkatan efektivitas otomatis. Menurut Edgar et al. (2014), hanya sekitar 10% MPA global yang berfungsi efektif secara ekologi karena lemahnya sistem pemantauan dan pendanaan. Oleh sebab itu, penerapan *Marine Biodiversity Observation Network* (MBON-Indonesia) yang memantau keanekaragaman hayati dan kondisi fisik laut secara real-time melalui satelit, drone, dan survei lapangan yang dilakukan oleh BRIN perlu untuk dilakukan.

Pengelolaan Adaptif Berbasis Ekosistem (*Ecosystem-Based Management*) mengacu pada pendekatan yang mempertimbangkan seluruh komponen ekosistem, konektivitas antar habitat (misalnya ekosistem mangrove-lamun-karang), dan interaksi antara manusia-ekosistem. Pendekatan pengelolaan ini menekankan keseimbangan antara kebutuhan manusia dan kapasitas ekologis laut. Long et al. (2015) menggarisbawahi bahwa pengelolaan laut tidak boleh hanya berbasis spesies atau zona tangkapan, melainkan sistem sosial-ekologi secara holistik.

## **2. Transisi Ekonomi Biru (*Blue Economy*)**

Pendekatan ekonomi biru mengintegrasikan konservasi laut dengan pembangunan berkelanjutan dan kesejahteraan sosial-ekonomi. *Blue economy* melibatkan pemanfaatan laut secara berkelanjutan seperti perikanan yang ditata, pariwisata berbasis ekosistem, dan bioteknologi laut tanpa mengorbankan fungsi ekosistem. Seperti pendapat Jankowska et al. (2022) yang menyatakan bahwa pemanfaatan laut yang berkelanjutan harus disertai perlindungan habitat dan pemulihan karbon biru.

## **10.6. Implikasi Kebijakan dalam Perluasan Kawasan Konservasi Laut (*Marine Protected Areas*)**

Kawasan Konservasi Laut tidak hanya berfungsi untuk melindungi biodiversitas, tetapi juga menjadi laboratorium alam untuk memahami prinsip-prinsip ekologi laut yang kompleks. Konsep ekologi disini berarti penerapan teori dan metode ekologi dalam merancang, memantau, dan mengevaluasi kebijakan pengelolaan laut. Berikut adalah beberapa fungsi ekologis dan akademik dari kawasan konservasi laut :

### **1. Menilai resiliensi ekosistem laut terhadap perubahan iklim**

Kawasan konservasi laut dapat digunakan untuk mengukur kemampuan ekosistem seperti terumbu karang, lamun, dan mangrove dalam memulihkan diri dari gangguan suhu ekstrem, pencemaran dan lain-lain. Berdasarkan hasil studi yang telah dilakukan, hasilnya menunjukkan bahwa kawasan konservasi laut dengan konektivitas tinggi memiliki daya pulih atau *resilience* (kemampuan mempertahankan atau memulihkan fungsi setelah adanya gangguan) yang lebih kuat terhadap pemutihan karang dibandingkan area terbuka (Hughes et al., 2017). Kawasan konservasi laut dengan konektivitas habitat yang baik, misalnya terumbu karang yang berhubungan dengan padang lamun atau mangrove cenderung memiliki tingkat pemulihan yang lebih tinggi karena adanya suplai larva yang efektif, habitat pendukung, dan struktur komunitas yang belum terlalu terdegradasi (Hock et al., 2017).

### **2. Mempelajari interaksi biotik–abiotik**

Hubungan antara komponen fisik (arus, suhu, salinitas) dan biotik (produktivitas primer, rantai makanan, simbiosis) dapat dipelajari lebih akurat di kawasan konservasi laut karena tekanan antropogenik yang rendah. Kawasan konservasi laut menyediakan kondisi yang relatif terkendali dari tekanan antropogenik langsung sehingga interaksi antara faktor fisik dan faktor biotik dapat diteliti dengan lebih jelas. Sebagai contoh menurut laporan McCook et al. (2010), zona larangan tangkap di *Great Barrier Reef* dimanfaatkan sebagai area penelitian ekologi alami di mana pengaruh manusia

diminimalkan. Kondisi ini memungkinkan para peneliti untuk mengamati proses ekologi secara lebih alami dan menyeluruh, serta mempelajari berbagai interaksi antara faktor fisik dan biotik di dalam kawasan tersebut seperti :

- a) Pengaruh suhu dan arus terhadap produktivitas primer *zooxanthellae* dan karang,
- b) Hubungan trofik alami (herbivori dan predator) tanpa gangguan penangkapan,
- c) Dampak variabilitas salinitas dan arus terhadap penyebaran larva dan rantai makanan.

# Bab 11

## BIOLOGI LAUT DI MASA DEPAN

Bab ini akan mengeksplorasi tantangan dan peluang penelitian biologi laut yang muncul seiring perubahan lingkungan global dan kemajuan teknologi. Fokus utama adalah pada bagaimana pemahaman kita tentang struktur, fungsi, dan ekologi organisme laut akan beradaptasi dan berkembang untuk mendukung konservasi, pengelolaan sumber daya, dan pemanfaatan berkelanjutan di masa depan.

### 11.1. Dampak Perubahan Iklim Global dan Adaptasi Organisme Laut

Perubahan iklim global merupakan tantangan paling mendesak dan kompleks yang dihadapi oleh biologi laut. Sub-bab ini tidak hanya berfokus pada manifestasi permukaan fenomena ini, tetapi juga menggali mekanisme biologis di balik respons organisme terhadap tekanan lingkungan yang kian intens. Tiga stresor utama yang saling berinteraksi-pemanasan laut, pengasaman laut, dan deoksigenasi-secara fundamental membentuk kembali kondisi habitat laut dan memengaruhi fisiologi, perilaku, reproduksi, dan interaksi ekologis spesies. Peningkatan suhu perairan, misalnya, melampaui batas toleransi termal banyak spesies laut, yang menyebabkan peningkatan stres metabolisme, penurunan laju pertumbuhan, dan perubahan rasio jenis kelamin pada beberapa taksa. Pembahasan akan mencakup studi kasus mengenai pergeseran jangkauan spesies (*range shifts*), kerentanan ekosistem kunci seperti terumbu karang dan hutan bakau, dan potensi evolusi cepat sebagai respons terhadap tekanan lingkungan baru (Poloczanska et al., 2016).

Salah satu dampak yang paling signifikan adalah pergeseran jangkauan geografis spesies (*range shifts*). Organisme laut dengan mobilitas tinggi, seperti ikan pelagis dan beberapa invertebrata, merespons pemanasan dengan bermigrasi menuju kutub atau perairan yang lebih dalam dan lebih dingin. Pergeseran ini bukan sekadar perubahan lokasi, melainkan juga menimbulkan konsekuensi ekologis yang besar, termasuk perubahan dalam struktur komunitas, gangguan pada hubungan predator-mangsa, dan persaingan baru di habitat yang sebelumnya tidak terjamah. Pemodelan iklim ekologis, yang mengintegrasikan data lingkungan dan fisiologi spesies, menjadi alat penting untuk memprediksi skenario pergeseran jangkauan ini dan implikasinya terhadap pengelolaan perikanan dan konservasi (Pecl et al., 2017).

Secara bersamaan, lautan menyerap sekitar seperempat dari karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) antropogenik, yang memicu pengasaman laut melalui penurunan pH. Dampak ini sangat merusak organisme dengan kerangka kalsium karbonat, seperti karang, moluska, dan pteropoda ("siput laut"). Penurunan pH mengurangi ketersediaan ion karbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), mempersulit proses kalsifikasi (pembentukan cangkang atau kerangka). Di terumbu karang, pengasaman menghambat laju pertumbuhan kerangka, membuat ekosistem menjadi lebih rentan terhadap erosi dan badai (Hoegh-Guldberg & Bruno, 2010). Selain itu, pengasaman juga memengaruhi fungsi sensorik, perilaku navigasi, dan kemampuan penciuman pada beberapa spesies ikan, mengganggu interaksi vital mereka dengan lingkungan dan spesies lain (Ashur et al., 2017).

Di sisi biologi molekuler dan evolusioner, fokus diarahkan pada mekanisme adaptasi dan aklimatisasi. Aklimatisasi melibatkan penyesuaian fisiologis atau perilaku jangka pendek (misalnya, perubahan ekspresi gen atau produksi protein kejut panas), sementara adaptasi melibatkan perubahan genetik yang diwariskan dari generasi ke generasi (evolusi cepat). Penelitian genomik konservasi menunjukkan bahwa beberapa populasi dengan variasi genetik yang tinggi mungkin memiliki kemampuan adaptif yang lebih baik terhadap suhu ekstrem dan

kondisi pH rendah (Poloczanska et al., 2020). Studi eksperimental mesocosm dan laboratorium yang mensimulasikan kondisi laut di masa depan menjadi instrumen krusial untuk mengidentifikasi "spesies pemenang" dan "spesies pecundang," serta untuk memahami batas toleransi ekologis kritis (batas toleransi kritis) yang dapat memicu kepunahan lokal. Data ini memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk intervensi konservasi, seperti seleksi karang yang toleran terhadap panas untuk upaya restorasi.

## **11.2. Bioteknologi Kelautan dan Sumber Daya Genetik Biru**

Bioteknologi kelautan merupakan disiplin ilmu perbatasan yang memanfaatkan potensi biologis unik dari organisme laut, atau komponennya, untuk menghasilkan produk dan jasa yang bernilai tinggi, memberikan solusi inovatif di berbagai sektor seperti farmasi, energi, dan akuakultur. Samudra, yang mencakup lebih dari 80% keanekaragaman hayati planet ini, adalah reservoir Sumber Daya Genetik Kelautan (MGR) yang sangat besar dan sebagian besar belum dimanfaatkan. Revolusi dalam teknologi sekuensing DNA berdaya tinggi (Next-Generation Sequencing - NGS) dan bioinformatika telah membuka gerbang menuju era baru yang disebut "Genomik Biru", memungkinkan eksplorasi genom organisme laut secara mendalam dan cepat.

### **11.2.1. Bio-prospekting dan Senyawa Bioaktif Baru**

Jantung dari bioteknologi kelautan adalah bio-prospekting, pencarian sistematis untuk menemukan senyawa bioaktif novel dari organisme laut. Organisme yang hidup di lingkungan ekstrem, seperti ventilasi hidrotermal laut dalam, palung samudera yang bertekanan tinggi, atau perairan kutub yang sangat dingin, telah mengembangkan mekanisme adaptif unik yang sering kali melibatkan produksi metabolit sekunder yang luar biasa. Senyawa-senyawa ini memiliki struktur kimia yang kompleks dan fungsi biologis yang ampuh, menjadikannya kandidat utama untuk pengembangan obat-obatan baru.

Potensi farmasi dari laut sangat besar. Sebagai contoh, produk alami laut telah menghasilkan agen antikanker, seperti dolastatin dari

siput laut dan trabeatedin dari ascidian (tunicates). Dalam konteks krisis global resistensi antimikroba, laut menjadi harapan baru. Bakteri dan jamur laut sering menghasilkan antibiotik novel sebagai respons terhadap persaingan yang intens di lingkungan mikroba yang padat. Data terbaru menunjukkan bahwa isolat mikroba dari sedimen laut dalam dan spons menunjukkan aktivitas yang kuat terhadap patogen yang resisten terhadap banyak obat (*multidrug-resistant pathogens*) (Celcia Gnana Rathinam et al., 2024). Selain farmasi, senyawa laut juga dimanfaatkan dalam kosmetik (peptida kolagen dari ikan dan alga), nutrisi fungsional (asam lemak omega-3 dari mikroalga), dan bahkan bahan bakar hayati (biofuel) generasi ketiga dari mikroalga yang tumbuh cepat.

### **11.2.2. Genomik untuk Konservasi dan Akuakultur Berkelanjutan**

Aplikasi genomik tidak hanya terbatas pada penemuan produk; ia juga merupakan alat esensial dalam konservasi dan pengelolaan sumber daya. Genomik konservasi memanfaatkan data genomik untuk menilai kesehatan genetik suatu populasi, mengidentifikasi unit-unit evolusioner yang penting untuk dilindungi, dan memprediksi bagaimana spesies kunci akan merespons perubahan iklim. Misalnya, dengan menganalisis single nucleotide polymorphisms (SNPs) pada populasi ikan karang, peneliti dapat mengidentifikasi stok yang secara genetik lebih tangguh terhadap pemanasan atau pengasaman laut, memberikan prioritas pada upaya perlindungan habitat mereka.

Di sektor perikanan dan akuakultur, genomik menjadi kunci untuk mendorong keberlanjutan. Melalui teknik pemuliaan selektif yang dimediasi oleh genomik, spesies budidaya dapat dimodifikasi secara genetik (atau dipilih secara alami) untuk meningkatkan sifat-sifat yang diinginkan. Ini termasuk kecepatan pertumbuhan yang lebih tinggi, efisiensi konversi pakan yang lebih baik (mengurangi dampak lingkungan), dan yang paling penting, peningkatan resistensi terhadap penyakit (Gjedrem & Robinson, 2014). Penerapan genomik membantu mengurangi kebutuhan akan antibiotik dalam budidaya dan meminimalkan kerugian ekonomi akibat wabah penyakit, yang

merupakan pilar penting dalam mewujudkan akuakultur yang benar-benar berkelanjutan.

### **11.2.3. Metagenomik dan Eksplorasi Dunia Mikroba Laut**

Pendekatan metagenomik telah mengubah pemahaman kita tentang keanekaragaman dan fungsi mikroorganisme laut. Dengan menganalisis DNA total yang diekstrak langsung dari sampel lingkungan (misalnya, air, es, atau sedimen) tanpa perlu isolasi dan kultur individu mikroba, metagenomik telah mengungkap "materi gelap" keanekaragaman hayati laut—triliunan mikroorganisme dan gen yang sebelumnya tidak diketahui. Data dari proyek global seperti *Tara Oceans Expedition* telah mengkatalogkan jutaan gen baru, yang banyak di antaranya mengkodekan enzim unik.

Mikroba laut, yang mendominasi biomassa dan proses biogeokimia di lautan, memiliki potensi bioteknologi yang tak terbatas. Enzim ekstrem (ekstremzim) dari mikroorganisme yang hidup di lingkungan suhu tinggi atau pH rendah sangat bernilai dalam biokatalisis industri (misalnya, dalam deterjen atau proses industri lainnya). Selain itu, pemahaman metagenomik tentang komunitas mikroba juga krusial dalam bidang bioremediasi, di mana konsorsium mikroba laut dapat dimanfaatkan untuk mendegradasi polutan persisten seperti tumpahan minyak dan mikroplastik, menjanjikan solusi ekologis untuk masalah polusi global (Handelsman, 2007).

### **11.2.4. Tantangan Etika, Tata Kelola, dan Pembagian Manfaat**

Eksplorasi dan pemanfaatan Sumber Daya Genetik Kelautan yang intensif memunculkan tantangan etika dan tata kelola yang serius. Isu utama adalah Akses dan Pembagian Manfaat (ABS - Access and Benefit-Sharing). Karena sebagian besar penemuan genetik terjadi di perairan internasional (Area di Luar Yurisdiksi Nasional - ABNJ), kerangka regulasi global diperlukan untuk memastikan bahwa manfaat moneter dan non-moneter yang timbul dari pemanfaatan MGR dibagi secara adil dan merata, terutama dengan negara-negara berkembang yang mungkin memiliki kekayaan keanekaragaman hayati tetapi kapasitas riset terbatas.

Kesepakatan bersejarah di bawah Perserikatan Bangsa-Bangsa, yaitu Perjanjian BBNJ (*Biodiversity Beyond National Jurisdiction*) yang baru-baru ini disahkan, merupakan upaya global untuk membangun kerangka hukum yang kohesif. Perjanjian ini bertujuan untuk mengatur pemanfaatan MGR secara berkelanjutan dan menetapkan mekanisme ABS yang adil (Gjerde et al., 2019). Tanpa tata kelola yang kuat dan berkeadilan, potensi bioteknologi kelautan dapat meningkatkan kesenjangan antara negara maju dan berkembang. Oleh karena itu, masa depan biologi laut menuntut para ilmuwan, pembuat kebijakan, dan industri untuk bekerja sama guna memastikan bahwa inovasi bioteknologi berkontribusi pada konservasi laut, bukan eksploitasi yang tidak merata.

### **11.3. Ekologi Laut dalam Perspektif 'Satu Kesehatan' (*One Health*)**

Konsep "Satu Kesehatan" (*One Health*) adalah kerangka kerja yang mengakui bahwa kesehatan manusia, hewan, dan lingkungan (termasuk ekosistem laut) saling terhubung dan bergantung satu sama lain. Dalam konteks biologi laut di masa depan, perspektif ini menjadi sangat penting karena ancaman lingkungan modern, seperti polusi, perubahan iklim, dan eksploitasi berlebihan, secara langsung menerjemahkan kerusakan ekosistem laut menjadi risiko kesehatan publik. Kesehatan laut bukan hanya isu konservasi; ia adalah isu kesehatan global.

#### **11.3.1. Laut sebagai Reservoir Patogen dan Vektor Penyakit**

Lautan berfungsi sebagai reservoir alami bagi berbagai patogen, termasuk bakteri, virus, dan parasit. Perubahan lingkungan, terutama pemanasan laut, dapat secara signifikan memperluas jangkauan geografis dan meningkatkan virulensi patogen tertentu. Contoh klasik adalah bakteri genus *Vibrio*, termasuk *Vibrio cholerae*, yang insiden kasusnya sering berkorelasi dengan kenaikan suhu permukaan laut dan peristiwa cuaca ekstrem (Roux et al., 2015). Pemanasan air laut memungkinkan patogen ini berkembang biak lebih cepat dan menyebar ke wilayah baru, meningkatkan risiko penyakit zoonosis. Selain itu,

kerusakan ekosistem pesisir seperti terumbu karang dan hutan bakau dapat mengurangi penyaringan alami air, sehingga meningkatkan paparan patogen dan kontaminan kepada hewan laut dan manusia yang mengonsumsi atau berinteraksi dengan perairan tersebut. Pendekatan *One Health* memerlukan pengawasan terintegrasi yang melacak patogen tidak hanya pada inang manusia tetapi juga pada vektor perantara di lingkungan laut dan hewan laut.

### **11.3.2. Polusi Laut dan Jalur Paparan Rantai Makanan**

Dampak polusi laut terhadap kesehatan merupakan pilar utama dari perspektif *One Health*. Penekanan utama ada pada mikroplastik dan kontaminan kimia persisten (PCCs). Mikroplastik, partikel plastik berukuran kurang dari 5 mm, tersebar luas di seluruh kolom air, dan dapat terakumulasi di jaringan organisme laut, mulai dari zooplankton hingga ikan predator puncak. Meskipun efek fisik langsungnya pada manusia masih diteliti, mikroplastik bertindak sebagai vektor untuk PCCs, seperti pestisida, Polychlorinated Biphenyls (PCBs), dan logam berat. Kontaminan ini berpotensi mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi saat bergerak melalui rantai makanan, akhirnya mencapai manusia melalui konsumsi makanan laut (Huang et al., 2021). Tingkat keracunan kronis dari paparan PCCs, yang dapat memengaruhi sistem saraf, endokrin, dan reproduksi, merupakan risiko kesehatan jangka panjang yang terkait langsung dengan degradasi ekosistem laut.

### **11.3.3. Ancaman Harmful Algal Blooms (HABs) dan Ketahanan Pangan**

Peristiwa *blooming* Alga Berbahaya (HABs), yang sering disebut "pasang merah," merupakan ancaman kesehatan lingkungan yang meningkat, diperparah oleh eutrofikasi dan perubahan iklim. HABs diproduksi oleh dinoflagelata dan diatom tertentu yang menghasilkan toksin kuat, seperti saxitoxin (penyebab *Paralytic Shellfish Poisoning* - PSP) dan domoic acid (penyebab *Amnesic Shellfish Poisoning* - ASP). Ketika filter feeder seperti kerang dan tiram mengonsumsi alga ini, toksin tersebut terakumulasi. Konsumsi makanan laut yang terkontaminasi

secara langsung mengancam kesehatan manusia dan dapat melumpuhkan industri perikanan dan akuakultur (Moore et al., 2008). Perubahan suhu laut dan pola nutrisi memicu frekuensi, durasi, dan intensitas HABs, yang membutuhkan sistem pemantauan yang canggih dan respons cepat. Dalam konteks *One Health*, ini menuntut kolaborasi antara ahli biologi laut, toksikolog, dan pejabat kesehatan masyarakat untuk melindungi sumber makanan dan komunitas pesisir.

#### **11.3.4. Laut sebagai Sumber Nutrisi dan Kesejahteraan Manusia**

Di sisi lain, laut adalah sumber nutrisi yang tak tergantikan bagi miliaran orang, menyediakan protein, vitamin, dan mikronutrien penting (terutama Iodium, Selenium, dan Asam Lemak Omega-3) yang krusial untuk perkembangan kognitif dan pencegahan penyakit (Golden et al., 2021). Oleh karena itu, penurunan kesehatan ekosistem laut, yang menyebabkan penurunan stok ikan atau kontaminasi sumber makanan, memiliki konsekuensi besar terhadap ketahanan pangan dan nutrisi global. Pendekatan *One Health* harus mengadvokasi pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan (termasuk akuakultur yang bertanggung jawab) untuk memastikan laut tetap menjadi sumber daya pangan yang aman dan bergizi. Kesejahteraan manusia juga meluas ke manfaat psikologis dan sosial dari lautan yang sehat seperti rekreasi, pariwisata, dan mata pencaharian yang semuanya terancam oleh kerusakan ekologis.

#### **11.3.5. Integrasi Data dan Respons Kebijakan**

Untuk secara efektif menerapkan perspektif *One Health* dalam biologi laut, diperlukan integrasi data interdisipliner yang kuat. Ini mencakup menggabungkan data lingkungan (suhu, pH, polusi) dengan data kesehatan hewan (prevalensi penyakit pada ikan dan mamalia laut) dan data kesehatan manusia (kasus keracunan makanan laut atau penyakit menular) (Roux et al., 2015). Pemodelan risiko spasial-temporal berbasis data ini dapat mengidentifikasi hotspot penyakit dan kontaminasi. Masa depan biologi laut menuntut para ilmuwan perikanan untuk secara aktif berinteraksi dengan ahli epidemiologi dan pembuat

kebijakan untuk mengembangkan strategi mitigasi yang mengatasi akar masalah di lingkungan laut, bukan hanya merespons konsekuensi kesehatan di darat.

#### **11.4. Penerapan Teknologi Digital dan Pengelolaan Berbasis Data**

Masa depan penelitian biologi laut sepenuhnya bergantung pada konvergensi revolusioner antara teknologi digital canggih dan fenomena Data Besar (*Big Data*). Samudra kini menghasilkan data dalam volume yang belum pernah terjadi sebelumnya, berasal dari berbagai platform seperti citra satelit, sensor in-situ yang tersebar di seluruh kolom air, sistem pelacakan elektronik pada hewan, dan armada robotik. Tantangan utama saat ini bergeser dari sekadar pengumpulan data ke kemampuan untuk mengelola, memproses, dan, yang terpenting, mengekstrak wawasan yang dapat ditindaklanjuti dari himpunan data yang masif, heterogen, dan dinamis ini.

##### **11.4.1. Peran Kecerdasan Buatan (AI) dalam Akuisisi dan Penafsiran Data**

Inti dari transformasi ini adalah penerapan Kecerdasan Buatan (AI) dan Pembelajaran Mesin (*Machine Learning*). Algoritma ini memungkinkan otomatisasi tugas identifikasi dan klasifikasi ekologi yang sebelumnya sangat intensif waktu dan bergantung pada keahlian manusia. Contoh paling jelas terlihat dalam analisis citra dan akustik. Jaringan Saraf Tiruan Konvolusional (CNN), sebuah bentuk Deep Learning, dilatih menggunakan jutaan gambar untuk secara otomatis mengidentifikasi dan menghitung kepadatan spesies ikan, menilai kondisi terumbu karang (misalnya, tingkat pemutihan), atau mengklasifikasikan invertebrata bentik dari rekaman yang diambil oleh *Remotely Operated Vehicles* (ROVs) atau kamera tunda (Beery et al., 2021). Otomatisasi ini memungkinkan identifikasi spesies dan pemetaan habitat laut secara real-time dan dalam skala geografis yang luas, melampaui keterbatasan survei tradisional.

Selain citra, AI merevolusi Pemantauan Akustik Pasif (PAM). Dengan memproses rekaman hidrofone yang berkelanjutan, algoritma

Machine Learning dapat secara otomatis mengidentifikasi panggilan spesifik mamalia laut, melacak pergerakan mereka, dan membedakan antara suara biologis dan kebisingan antropogenik, memberikan wawasan ekologis non-invasif tentang spesies yang sulit dipelajari dan menilai dampak polusi suara.

#### **11.4.2. Robotika Bawah Air dan Penginderaan Jauh Skala Besar**

Akuisisi data fisik di lingkungan laut yang keras kini didominasi oleh Robotika Bawah Air dan Penginderaan Jauh Satelit. Kendaraan Bawah Air Otonom (AUVs) dan ROVs dilengkapi dengan sensor multi-parameter (mengukur pH, oksigen terlarut, suhu, dan kedalaman) serta perangkat sonar resolusi tinggi. Teknologi ini memungkinkan pemetaan habitat laut dalam yang presisi, termasuk detail topografi dan komposisi substrat pada resolusi sentimeter. Data geospasial resolusi tinggi ini esensial untuk memahami struktur komunitas bentik dan memandu desain Kawasan Konservasi Perairan (KKP) yang efektif (Sala et al., 2021).

Sementara itu, satelit menyediakan gambaran makroskopis dan dinamis mengenai kondisi permukaan laut. Sensor satelit melacak parameter kunci seperti Suhu Permukaan Laut (SST), konsentrasi Klorofil-a (indikator biomassa fitoplankton), dan pola arus. Kombinasi data in-situ dari sensor robotik dengan data satelit memungkinkan peneliti untuk menghubungkan perubahan lingkungan skala besar dengan respons ekologis di tingkat lokal.

#### **11.4.3. Pengelolaan Berbasis Ekosistem (EBFM) dan Model Adaptif.**

Tujuan utama dari integrasi teknologi digital ini adalah untuk mewujudkan Pengelolaan Perikanan Berbasis Ekosistem (EBFM) yang lebih akurat dan adaptif. EBFM menuntut pemahaman dinamis tentang interaksi kompleks antara target spesies, lingkungan, dan aktivitas manusia.

Data Besar memungkinkan terciptanya Model Ekologi Spasial-Temporal yang diperbarui secara near-real-time. Data dari Sistem Identifikasi Otomatis (AIS) kapal, log penangkapan ikan elektronik, dan

tagging satelit pada ikan diintegrasikan. Algoritma Machine Learning memproses aliran data ini untuk:

1. Memprediksi Dinamika Populasi Ikan: Memodelkan pergeseran stok ikan sebagai respons terhadap anomali suhu atau arus, memungkinkan prediksi hotspot penangkapan ikan.
2. Mengidentifikasi Aktivitas IUU: Mendeteksi pola penangkapan ikan ilegal, tidak dilaporkan, dan tidak diatur (IUU Fishing) dengan membandingkan pergerakan kapal dengan zona terlarang dan izin operasional.

Kemampuan untuk memodelkan dan memprediksi perubahan secara cepat ini mendukung implementasi Pengelolaan Dinamis, di mana batas-batas zona penangkapan ikan atau area lindung dapat disesuaikan secara adaptif. Strategi ini, yang didukung oleh data akurat dari sensor dan AI, jauh lebih responsif terhadap tekanan iklim dan ekologis dibandingkan dengan rencana pengelolaan statis yang digunakan di masa lalu (Kühn et al., 2025).

Integrasi data dari berbagai sumber termasuk kontribusi Sains masyarakat umum (*Citizen Science*) melalui aplikasi digital melengkapi gambaran ilmiah dengan konteks sosial dan spasial, menjadikan Data Besar sebagai fondasi fundamental bagi biologi laut dan konservasi di abad ke-21.

### **11.5. Konservasi Laut Inovatif dan Ekonomi Biru Berkelanjutan**

Masa depan lautan bergantung pada pergeseran paradigma dari model eksploitasi konvensional menuju kerangka Ekonomi Biru Berkelanjutan. Sub-bab ini mengintegrasikan temuan biologi laut terkini (dari perubahan iklim, genomik, dan teknologi digital) untuk merancang strategi konservasi yang lebih cerdas, adaptif, dan berorientasi pada pemulihan. Ekonomi Biru tidak sekadar tentang memanfaatkan sumber daya laut; ia menekankan pada nilai jangka panjang yang dihasilkan dari ekosistem laut yang sehat, termasuk penyediaan jasa ekosistem penting seperti penyerapan karbon, perlindungan garis pantai, dan ketahanan pangan.

### **11.5.1. Desain Kawasan Konservasi Perairan (KKP) Adaptif**

Kawasan Konservasi Perairan (KKP) atau Kawasan Perlindungan Laut (Marine Protected Areas - MPAs) telah lama menjadi alat konservasi utama. Namun, efektivitas KKP tradisional dengan batas statis kini dipertanyakan di tengah perubahan iklim yang cepat. Peningkatan suhu laut memaksa spesies untuk mengubah distribusi geografis mereka (range shifts), menyebabkan KKP statis menjadi tidak selaras dengan lokasi populasi target yang dilindungi (Maxwell et al., 2015).

Konservasi Laut Inovatif menanggapi tantangan ini dengan mengembangkan konsep KKP Adaptif atau Pengelolaan Laut Dinamis (*Dynamic Ocean Management*). Pendekatan ini memanfaatkan Data Besar dan AI (seperti dibahas dalam Sub-bab 12.4) untuk mendefinisikan batas-batas perlindungan yang fleksibel. KKP Adaptif menggunakan data real-time dari pelacakan satelit, sensor suhu, dan model oseanografi untuk memindahkan zona perlindungan guna mencocokkan pergerakan sementara agregasi ikan yang sedang memijah, koridor migrasi mamalia laut, atau hotspot penyu laut. Penerapan KKP Dinamis tidak hanya meningkatkan perlindungan spesies yang bergerak, tetapi juga berpotensi mengurangi konflik dengan sektor perikanan karena area yang dilarang dapat dibuka kembali setelah spesies migran meninggalkan lokasi tersebut.

Di tingkat global, inisiatif untuk melindungi minimal 30% lautan memerlukan desain KKP yang didasarkan pada prinsip konektivitas ekologis. Studi biologi laut menggunakan model hidrodinamik dan genetika populasi untuk melacak penyebaran larva dan aliran gen antar kawasan. Desain jaringan KKP yang terhubung secara ekologis sangat penting untuk memastikan bahwa populasi di dalam area terlindungi dapat memasok anakan dan larva ke kawasan lain, meningkatkan ketahanan (resiliensi) dan pemulihan spesies di seluruh bentang laut (Sala et al., 2021). Keberhasilan KKP di masa depan akan diukur bukan hanya dari luas wilayahnya, tetapi dari fungsionalitas ekologis jaringan KKP tersebut.

### **11.5.2. Restorasi Ekosistem Berbasis Ilmu Pengetahuan**

Konservasi saat ini harus melangkah melampaui perlindungan semata menuju upaya restorasi ekosistem berskala besar. Perhatian khusus diberikan pada ekosistem pesisir yang dikenal sebagai penyerap Karbon Biru (Karbon yang diserap dan disimpan oleh ekosistem laut dan pesisir). Hutan bakau, padang lamun, dan rawa-rawa garam sangat efisien dalam mengubur karbon di dalam sedimen selama ribuan tahun. Degradasi ekosistem ini melepaskan karbon tersimpan kembali ke atmosfer, memperburuk perubahan iklim (IPCC, 2019). Program restorasi Karbon Biru, yang didukung oleh pembiayaan berbasis pasar karbon, tidak hanya memberikan manfaat mitigasi iklim tetapi juga menyediakan co-benefit penting, seperti peningkatan habitat perikanan dan perlindungan garis pantai dari erosi dan badai yang intensif.

Dalam konteks Terumbu Karang, restorasi menjadi krusial mengingat kerentanan mereka terhadap pemutihan massal. Biologi molekuler menawarkan solusi melalui restorasi berbantuan genetik. Para ilmuwan sedang mengidentifikasi dan membiakkan karang yang secara alami menunjukkan toleransi yang lebih tinggi terhadap suhu air yang meningkat dan pengasaman laut—sering dijuluki karang super (*super-coral*). Teknik seperti micro-fragmentation (mempercepat pertumbuhan koloni) dan penanaman karang yang toleran ini di lokasi yang terdegradasi bertujuan untuk meningkatkan laju pemulihan terumbu karang yang telah hilang. Upaya ini memerlukan pemahaman mendalam tentang simbiosis antara karang inang dan alga Symbiodiniaceae, yang merupakan kunci penentu toleransi termal karang (Hughes et al., 2017). Restorasi di masa depan adalah intervensi ekologis yang didorong oleh data biologi molekuler dan genomic.

### **11.5.3. Inovasi Akuakultur dan Ketahanan Pangan**

Untuk mengurangi tekanan penangkapan ikan liar dan meningkatkan pasokan protein yang aman dan berkelanjutan, sektor akuakultur harus bertransformasi. Ekonomi Biru menuntut praktik akuakultur yang meminimalkan jejak ekologis, terutama terkait dengan polusi nutrisi dan ketergantungan pada pakan berbasis ikan liar.

Solusi inovatif terletak pada sistem Akuakultur Multi-Trofik Terintegrasi (IMTA). IMTA adalah sistem yang meniru ekosistem alami dengan membudidayakan spesies dari tingkat trofik yang berbeda bersama-sama dalam satu sistem (misalnya, membudidayakan ikan finfish, kerang-kerangan sebagai penyaring, dan makroalga atau rumput laut). Dalam sistem ini, limbah organik dan anorganik (nutrien) yang dihasilkan oleh ikan (trofik tinggi) diserap oleh kerang (penyaring) dan alga (penyerap anorganik), secara efektif mendaur ulang nutrisi dan secara substansial mengurangi pelepasan polutan ke lingkungan perairan (Chopin *et al.*, 2010). IMTA tidak hanya meningkatkan efisiensi lingkungan, tetapi juga mendiversifikasi pendapatan petani melalui berbagai produk panen.

Selain itu, bioteknologi berperan penting dalam pengembangan pakan berkelanjutan. Riset terus berfokus pada penggantian tepung ikan (yang berasal dari penangkapan ikan liar) dengan sumber protein alternatif seperti serangga, ragi, atau mikroalga. Pengembangan galur mikroalga yang kaya akan asam lemak omega-3 yang dapat dibudidayakan secara efisien sangat penting untuk mempertahankan nilai gizi produk akuakultur sambil mengurangi tekanan pada stok ikan tangkap.

#### **11.5.4. Tata Kelola Laut Global yang Terintegrasi**

Konservasi laut inovatif dan Ekonomi Biru yang berkelanjutan memerlukan kerangka tata kelola laut global yang kuat dan adil. Secara historis, laut lepas (Area di Luar Yurisdiksi Nasional - ABNJ) sering dianggap sebagai wilayah bebas (*res nullius*), yang menyebabkan eksploitasi yang tidak teratur. Tonggak sejarah dicapai dengan adopsi Perjanjian BBNJ (*Biodiversity Beyond National Jurisdiction*) PBB pada tahun 2023. Perjanjian ini menyediakan landasan hukum untuk:

1. Menetapkan KKP di Laut Lepas: Memungkinkan perlindungan formal atas ekosistem laut dalam dan perairan terbuka yang melintasi yurisdiksi nasional.
2. Mengatur Pemanfaatan Sumber Daya Genetik Kelautan (MGR): Memastikan bahwa manfaat yang berasal dari bioprospeking MGR

dibagi secara adil dan merata, terutama dengan negara-negara berkembang.

Bagi ahli biologi laut, Perjanjian BBNJ menegaskan kembali kewajiban untuk menyediakan data ilmiah berkualitas tinggi untuk mendukung keputusan kebijakan. Hal ini menuntut ilmuwan untuk bekerja secara interdisipliner dengan pembuat kebijakan, ahli hukum, dan ekonom. Biologi laut di masa depan adalah jembatan antara penemuan ilmiah dan implementasi kebijakan, bertujuan untuk menciptakan sistem manajemen yang tidak hanya melindungi keanekaragaman hayati, tetapi juga memastikan laut terus memberikan kontribusi vitalnya bagi kemakmuran dan ketahanan planet.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Jaleel, K. U., Parameswaran, U. V, Gopal, A., Manokaran, S., & Joydas, T. V. (2022). Chapter 8 - Spatio-temporal variations of benthic communities along the coast. In P. S. Godson, S. G. T. Vincent, & S. Krishnakumar (Eds.), *Ecology and Biodiversity of Benthos* (pp. 287–313). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821161-8.00003-9>
- Adetunji, J. B., Agbolade, A. O., Adewale, O. O., Ejidike, I. P., Adetunji, C. O., & Oyewole, I. O. (2023). Pharmacological and Antioxidant Attributes of Significant Bioactives Constituents Derived from Algae. 197–221. <https://doi.org/10.1002/9781119857860.ch24>
- Agardy, T., di Sciara, G. N., & Christie, P. (2011). Mind the gap: Addressing the shortcomings of marine protected areas through large scale marine spatial planning. *Marine Policy*, 35(2), 226–232.
- Aguzzi, J., Laurenz, T., Flögel, S., Robinson, N. J., Picardi, G., Chatzievangelou, D., Bahamon, N., Stefanni, S., Grinyó, J., Fanelli, E., Corinaldesi, C., del Río Fernandez, J., Calisti, M., Mienis, F., Chatzidouros, E., Costa, C., Violino, S., Tangherlini, M., & Danovaro, R. (2024). New Technologies for Monitoring and Upscaling Marine Ecosystem Restoration in Deep-Sea Environments. *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.012>
- Alamsyah, F., Nugraha, W.A., & Insafitri. 2024. Struktur Komunitas dan Tutupan Terumbu Karang di Pulau Gili Labak dan Gili Genting, Sumenep Indonesia. *Buletin Oseanografi Marina* 13(3):363-374.
- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3), 313–322. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- Alongi, D. M. (2014). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 5(3), 239-251.
- Amira, A. 2021. Mengapa terumbu karang dalam laut memiliki warna yang beraneka ragam. <https://adjar.grid.id/read/542878662/mengapa-terumbu-karang-dalam-laut-memiliki-warna-yang-beraneka-ragam>.

- Amorim, M. C. P. (2025). Bringing animal behaviour into marine conservation: insights and future directions. *Acta Ethologica*, 1–9.
- Amoroso, R., Pitcher, C., Rijnsdorp, A., Mcconnaughey, R., Parma, A., Suuronen, P., Eigaard, O., Bastardie, F., Hintzen, N., Althaus, F., Baird, S., Black, J., Buhl-Mortensen, L., Campbell, A., Catarino, R., Collie, J., Cowan, J., Durholtz, D., Engstrom, N., & Jennings, S. (2018). Bottom trawl fishing footprints on the world's continental shelves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115, 201802379.
- Anderson, PO., James, EK, & William, GT., 2002. *Handbook of Clinical Drug Data*. (10thEd.). New York: McGraw-Hill Companies.
- Andhere, A., & Jayasri, M. A. (2024). Unveiling Nature's Treasures: Exploring Bioactive Compounds from Algae for Extraction, Refinement, and Diverse Applications (pp. 421–461). [https://doi.org/10.1007/978-981-97-1662-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-97-1662-3_17)
- Anggoro, S., & Ridlo, A. (2019). *Ekologi dan Adaptasi Organisme Laut*. Semarang: Universitas Diponegoro Press.
- Appeltans, W., Ahyong, S. T., Anderson, G., Angel, M. V., Artois, T., Bailly, N., Bamber, R., Barber, A., Bartsch, I., Berta, A., Błazewicz-Paszkowycz, M., Bock, P., Boxshall, G., Boyko, C. B., Brandão, S. N., Bray, R. A., Bruce, N. L., Cairns, S. D., Chan, T. Y., ... Costello, M. J. (2012). The Magnitude of Global Marine Species Diversity. *Current Biology*, 22(23), 2189–2202. <https://doi.org/10.1016/J.CUB.2012.09.036>
- Arrighetti, F., Teso, V & Penchazadeh, P.E. 2015. Ultrastructure and histochemistry of digestive gland of the giant predator snail *Ademelon beckii* (Caenogastropoda: Volutidae) from the SW Atlantic. *Tissue and Cell*, 47, 171 – 177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tice.2015.01.002>
- Ashok, K., Nakamura, H., & Yamagata, T. (2007). Impacts of ENSO and Indian Ocean Dipole Events on the Southern Hemisphere Storm-Track Activity during Austral Winter. *Journal of Climate - J CLIMATE*, 20.

- Ashur, M. M., Johnston, N. K., & Dixon, D. L. (2017). Impacts of Ocean Acidification on Sensory Function in Marine Organisms. *Integrative and Comparative Biology*, 57(1), 63–80. <https://doi.org/10.1093/icb/icx010>
- Assan, D., Kuebutornye, F. K. A., Mustapha, U. F., Chen, H., & Li, G. (2020). Effects of Climate Change on Marine Organisms. *American Journal of Climate Change*. 9, 204-216.
- Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E., & Rothery, P. (2004). Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432(7013), 100–103. <https://doi.org/10.1038/nature02996>
- Attaqwa, R., Respati, D. N. R., Juviani, D., Susilodewi, S. D., Saragih, L. A., Mustaqim, I., Wirasatriya, A., & Ismunarti, D. H. (2025). Spatio-Temporal Characteristic Analysis of Marine Heatwaves in the Savu Sea (1982-2021). *Buloma: Buletin Oseanografi Marina*, 14(2), 309–321. <https://doi.org/10.14710/buloma.v14i2.70846>
- Ávila-Thieme, M. I., Ávila-Thieme, M. I., Ávila-Thieme, M. I., Corcoran, D., Corcoran, D., Pérez-Matus, A., Wieters, E. A., Navarrete, S. A., Marquet, P. A., & Valdovinos, F. S. (2021). Alteration of coastal productivity and artisanal fisheries interact to affect a marine food web. *Scientific Reports*, 11(1), 1765.
- Azam, F., Fenchel, T., Field, J., Gray, J. S., Meyer, L., & Thingstad, T. F. (1983). The Ecological Role of Water-Column Microbes in the Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 10, 257–263.
- Bacci, G., Meriggi, N., Cheng, C.L.Y., Ng, K.H., Ianucci, A., Mengoni, A., Cavalieri, D., Canicci, S & Fratini, S. 2023. Species – specific gill’s microbiome of eight crab species with different breathing adaptations. *Scientific Reports*, 13, 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48308-w>
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Teluk Bintuni. (2023). Kabupaten Teluk Bintuni dalam Angka 2023.
- Balcher, A., Cook, K., Juez, D.B., Stowasser, G., Fielding, S., Saunders, R.A., Mayor, D.J & Tarling G.A. 2020. Respiration of mesopelagic fish: a comparison of respiratory electron transport system (ETS)

measurements and allometrically calculated rates in the Southern Ocean and Banguela Current. *ICES Journal of Marine Science*, 77(5): 1- 13.

- Barnes, C., Maxwell, D., Reuman, D., & Jennings, S. (2010). Global patterns in predator–prey size relationships reveal size dependency of trophic transfer efficiency. *Ecology*, 91, 222–232.
- Barreiro, A., Montero-Serra, I., Pagès-Escolà, M., Garrabou, J., Linares, C., & Ledoux, J.-B. (2023). Global patterns and drivers of genetic diversity among marine habitat-forming species. *Global Ecology and Biogeography*, 32(7), 1218–1229. <https://doi.org/10.1111/geb.13685>
- Bauk, K. (2020). Periphyton – Function And Application In Ecosystem Status Assessment [Faculty of Science, University of Zagreb]. <https://dabar.srce.hr/en/islandora/object/pmf%3A8869>
- Beaugrand, G. (2017). Plankton Biodiversity And Biogeography. In C. Castellani & Edward. Martin (Eds.), *Marine Plankton: A practical guide to ecology, methodology, and taxonomy*. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199233267.003.0002>
- Beery, S., Cole, E., Parker, J., Perona, P., & Winner, K. (2021). Species Distribution Modeling for Machine Learning Practitioners: A Review. *ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies*, 329–348. <https://doi.org/10.1145/3460112.3471966>
- Behrenfeld, M. J., & Falkowski, P. G. (1997). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 42(1), 1–20.
- Behrenfeld, M. J., Malley, R. T. O., Siegel, D. A., McClain, C. R., Sarmiento, J. L., Feldman, G. C., Milligan, A. J., Falkowski, P. G., Letelier, R. M., dan Boss, E. S. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444: 752– 755. <https://doi.org/10.1038/nature05317>
- Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., McClain, C. R., Feldman, G. C., Los, S. O., Tucker, C. J., Falkowski, P. G., Field, C. B., Frouin, R., Esaias, W. E., Kolber, D. D., & Pollack, N. H. (2001). Biospheric Primary

- Production During an ENSO Transition. *Science*, 291(5513), 2594–2597.
- Behrenfeld, M., O'Malley, R., Siegel, D., McClain, C., Sarmiento, J., Feldman, G., Milligan, A., Falkowski, P., Letelier, R., & Boss, E. (2007). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444, 752–755. <https://doi.org/10.1038/nature05317>
- Bert, C.R.L., Mitchell, G.S & Reznikov, L.R. 2024. Cardiopulmonary adaptations of a diving marine mammal, the bottlenose dolphin: physiology during anesthesia. *Physiological Reports*, 12, 1 – 12. <https://doi.org/10.14814/phy2.16183>
- Bertrand, A., Chaigneau, A., Peraltilla, S., Ledesma, J., Graco, M., Monetti, F., & Chavez, F. P. (2011). Oxygen: A Fundamental Property Regulating Pelagic Ecosystem Structure in the Coastal Southeastern Tropical Pacific. *PLOS ONE*, 6(12), e29558-.
- Bertrand, A., Grados, D., Habasque, J., Fablet, R., Ballón, M., CASTILLO, R., Gutiérrez, M., Chaigneau, A., Josse, E., Roudaut, G., Lebourges-Dhaussy, A., & Brehmer, P. (2013). Routine acoustic data as new tools for a 3D vision of the abiotic and biotic components of marine ecosystem and their interactions. 2013 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium, RIO Acoustics 2013, 1–3.
- Bianchi, D., & Mislán, K. A. S. (2016). Global patterns of diel vertical migration times and velocities from acoustic data. *Limnology and Oceanography*, 61(1), 353–364. <https://doi.org/10.1002/lno.10219>
- Bornatowski, H., Navia, A., Braga, R., Abilhoa, V., & Correa, M. (2014). Ecological importance of sharks and rays in a structural foodweb analysis in southern Brazil. *ICES Journal of Marine Science*, x, x.
- Bouchet, P., Kantor, Y.I, & Puillandre N. “A New Operational Classification Of The Conoidea (Gastropoda)” *Journal of Molluscan Studies: Oxford University Press*, 77. (Juli, 2011): 273-308. [doi:10.1093/mollus/eyr017](https://doi.org/10.1093/mollus/eyr017)
- Brakes, P., & Dall, S. R. X. (2016). Marine mammal behavior: A review of conservation implications. *Frontiers in Marine Science*, 3(JUN), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00087>

- Brakes, P., Carroll, E. L., Dall, S. R. X., Keith, S. A., McGregor, P. K., Mesnick, S. L., Noad, M. J., Rendell, L., Robbins, M. M., Rutz, C., Thornton, A., Whiten, A., Whiting, M. J., Aplin, L. M., Bearhop, S., Ciucci, P., Fishlock, V., Ford, J. K. B., Notarbartolo Di Sciara, G., ... Garland, E. C. (2021). A deepening understanding of animal culture suggests lessons for conservation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 288(1949). <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.2718>
- Brechtel, A., Gross, T., & Drossel, B. (2019). Far-ranging generalist top predators enhance the stability of meta-foodwebs. *Scientific Reports*, 9. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:90261066>
- Brierley, A. S. (2017). Plankton. *Current Biology*, 27(11), R478–R483. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.045>
- Bryden, H. L., & et al. (2005). "Shifting Patterns of Ocean Circulation." *Nature*.
- Bucol, A. A., Abesamis, R. A., Stockwell, B. L., Lowe, J. R., & Russ, G. R. (2021). Development of reproductive potential in protogynous coral reef fishes within Philippine no-take marine reserves. *Journal of Fish Biology*, 99(5), 1561–1575.
- Burke, L., Reytar, K., Spalding, M., & Perry, A. (2012). *Reefs At Risk Revisited in the Coral Triangle*.
- Cacciatore, F., Cornello, M., Bernarello, V., Oselladore, F., Novello, M., Girolimetto, A., Zorzi, M., Bon, D., Strazzabosco, F., Bonometto, A., & Brusà, R. B. (2025). Macrozoobenthos and environmental changing in the Venice Lagoon (Italy). *Frontiers in Marine Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1603523>
- Calbet, A., & Saiz, E. (2005). The Ciliate-Copepod Link in Marine Ecosystems. *Aquatic Microbial Ecology*, 38, 157–167.
- Cañón-Bastidas, J., Molina, A., & Duque, G. (2025). Impact of Microplastic Ingestion on Commercial Fish: A Trophic-Level Analysis. *International Journal of Environmental Research*, 19(4), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s41742-025-00798-4>
- Carr, M. H., Robinson, S. P., Wahle, C., Davis, G., Kroll, S., Murray, S., Schumacker, E. J., & Williams, M. (2017). The central importance of

ecological spatial connectivity to effective coastal marine protected areas and to meeting the challenges of climate change in the marine environment. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 27(May), 6–29. <https://doi.org/10.1002/aqc.2800>

Cavanaugh, K. C., Bell, T. W., Aerni, K. E., Byrnes, J. E. K., McCammon, S., & Smith, M. M. (2024). New Technologies for Monitoring Coastal Ecosystem Dynamics. *Annual Review of Marine Science*. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-040523-020221>

Cefali, M. E., Cebrian, E., Chappuis, E., Pinedo, S., Terradas, M., Mariani, S., Mariani, S., & Ballesteros, E. (2016). Life on the boundary: Environmental factors as drivers of habitat distribution in the littoral zone. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 172, 81–92. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2016.01.043>

Celcia Gnana Rathinam, W. V., Bragadeeswaran, S., Kumaresan, S., Gunamathy, K., Visnu, B., Mohamed Asarudeen, J., Sasidharan, T., & Srikavibharathi, S. (2024). Marine Resources: A Sustainable and Promising Source for Cosmetic Industries. In *Multidisciplinary Applications of Marine Resources* (pp. 103–140). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-5057-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-97-5057-3_6)

Central Marine Fisheries Institute. 2013. Methodologies for studying finfish & shellfish biology. CMFRI, Kerala, India.

Chambault, P., Fossette, S., Heide-Jørgensen, M. P., Jouannet, D., & Vély, M. (2021). Predicting seasonal movements and distribution of the sperm whale using machine learning algorithms. *Ecology and Evolution*, 11(3), 1432–1445.

Chavez, F. P., & Messié, M. (2009). A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Progress in Oceanography*, 83(1), 80–96.

Chen, S.Y. 2014. Lampreys: Sea Lamprey & Freshwater Lamprey Facts, Species, & Pictures. <https://discover.hubpages.com/education/Lampreys>

Cheney, K. L., Skogh, C., Hart, N. S., & Marshall, N. J. (2009). Mimicry, colour forms and spectral sensitivity of the bluestriped fangblenny, *Plagiotremus rhinorhynchus*. *Proceedings of the Royal Society B*:

- Biological Sciences, 276(1662), 1565–1573.  
<https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1819>
- Cheung, W. W. L., et al. (2010). Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global Change Biology*.
- Chopin, T., Troell, M., Reid, G. K., & Knowler, D. (2010). ADVANCING THE AQUACULTURE AGENDA: WORKSHOP PROCEEDINGS. In *Policies to Ensure a Sustainable Aquaculture Sector* (pp. 195–217).
- Christensen, V., & Walters, C. (2004). Ecopath With Ecosim: Methods, Capabilities and Limitations. *Ecological Modelling*, 172, 109–139.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.09.003>
- Cinner, J. E., Adger, W. N., Allison, E. H., Barnes, M. L., Brown, K., Cohen, P. J., Gelcich, S., Hicks, C. C., Hughes, T. P., Lau, J., Marshall, N. A., & Morrison, T. H. (2018). Building adaptive capacity to climate change in tropical coastal communities. *Nature Climate Change*, 8(2), 117–123. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0065-x>
- Clark, M.A., Choi, J & Douglas, M. 2018. *Biology 2e*. Openstax: Houston, US.
- Clark, R., & Pinsky, M. (2023). Global patterns of genetic diversity in marine fishes. Authorea.  
<https://doi.org/10.22541/au.168726266.68173061/v1>
- Clark, R., & Pinsky, M. (2024). Global patterns of nuclear and mitochondrial genetic diversity in marine fishes. *Ecology and Evolution*, 14. <https://doi.org/10.1002/ece3.11365>
- Cloern, J., Foster, S., & Kleckner, A. (2013). Phytoplankton primary production in the world’s estuarine-coastal ecosystems. *Biogeosciences Discussions*, 10, 17725–17783.  
<https://doi.org/10.5194/bgd-10-17725-2013>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 2588–2597.
- Coles, L., Tregenza, T., & Stevens, M. (2024). Interaction between anthropogenic stressors affects antipredator defense in an

- intertidal crustacean. *Behavioral Ecology*, 35(6).  
<https://doi.org/10.1093/beheco/arae085>
- Costa, D.P., & Favilla, A.B. 2023. Field physiology in the aquatic realm: ecological energetics and diving behaviour provide context for elucidating patterns and deviations. *Journal of Experimental Biology*, 26(20). <https://doi.org/10.1242/jeb.245832>
- Costello, M. J., Tsai, P., Wong, P. S., Cheung, A. K. L., Basher, Z., Basher, Z., & Chaudhary, C. (2017). Marine biogeographic realms and species endemism. *Nature Communications*, 8(1), 1057. <https://doi.org/10.1038/S41467-017-01121-2>
- Cowen, R. K., & Sponaugle, S. (2009). Larval Dispersal and Marine Population Connectivity. *Annual Review of Marine Science*, 1(Volume 1, 2009), 443–466.
- Cullen-Unsworth, L. (2018). Indonesia’s globally significant seagrass meadows are under widespread threat. [osf.io](https://osf.io).
- Cunha, A.L.D. 2019. Structure and function of the digestive system in molluscs. *Cell and Tissue Research*, 377(3), 475 – 503. <https://doi.org/10.1007/s00441-019-03085-9>
- Cury, P., Bakun, A., Crawford, R., Jarre, A., Quiñ, R., Shannon, L., Verheye, H., & Quinones, R. (2000). Small pelagics in upwelling systems: Patterns of interaction and structural changes in “wasp-waist” ecosystems. *ICES Journal of Marine Science*, 57, 603–618.
- da Silva, M. C., Canário, A. V. M., Hubbard, P. C., & Gonçalves, D. M. F. (2021). Physiology, endocrinology and chemical communication in aggressive behaviour of fishes. *Journal of Fish Biology*, 98(5), 1217–1233. <https://doi.org/10.1111/jfb.14667>
- Dahdouh-Guebas, F., et al. (2000). An ecologically sound approach to mangrove conservation and management. *Ecological Applications*, 10(4), 1085-1098.
- Damar, A., Colijn, F., Hesse, K. J., Adrianto, L., Yonvitner, Fahrudin, A., Kurniawan, F., Prismayanti, A. D., Rahayu, S. M., Rudianto, B. Y., & Ramli, A. (2020). Phytoplankton biomass dynamics in tropical coastal waters of Jakarta Bay, Indonesia in the period between 2001

- and 2019. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9), 1–17.  
<https://doi.org/10.3390/jmse8090674>
- Damayanty, S., Misdayanti, & Ainurafiq. (2023). Literatur review: risiko kesehatan melalui konsumsi ikan yang mengandung logam berat nikel (ni) literature. *Jambura Journal Of Health Science and Research*, 1(1), 1–13.  
<https://ejurnal.ung.ac.id/index.php/jjhsr/index>
- Danielsen, F., Sørensen, M. K., Olwig, M. F., Selvam, V., Parish, F., Burgess, N. D., Hiraishi, T., Karunakaran, V. M., Rasmussen, M. S., Hansen, L. B., Quarto, A., & Suryadiputra, N. (2005). The Asian Tsunami: A Protective Role for Coastal Vegetation. *Science*, 310(5748), 643.
- Danovaro, R., et al. (2008). "Excess of organic matter in deep-sea sediments: A potential indicator of human impacts." *Marine Pollution Bulletin*, 56(3), 485-490.
- Daryono, B. S., Meylani, V., & Radjasa, O. K. (2025). *Laut Dalam Menurut Perspektif Biologi*. Yogyakarta: UGM Press.
- Dedman, S., Moxley, J. H., Papastamatiou, Y. P., Braccini, M., Caselle, J. E., Chapman, D. D., Cinner, J. E., Dillon, E. M., Dulvy, N. K., Dunn, R. E., Espinoza, M., Harborne, A. R., Harvey, E. S., Heupel, M. R., Huveneers, C., Graham, N. A. J., Ketchum, J. T., Klinard, N. V, Kock, A. A., ... Heithaus, M. R. (2024). Ecological roles and importance of sharks in the Anthropocene Ocean. *Science*, 385(6708), adl2362.
- Diaz Briz, L., Sánchez, F., Marí, N., Mianzan, H., & Genzano, G. (2017). Gelatinous zooplankton (ctenophores, salps and medusae): an important food resource of fishes in the temperate SW Atlantic Ocean. *Marine Biology Research*, 13(6), 630–644.
- Diederich, M. 2009. Chemical ecology and medicinal chemistry of marine nf-k b inhibitors. The biotic and abiotic factors governing the marine ecosystem. [https://www.researchgate.net/figure/The-biotic-and-abiotic-factors-governing-the-marine-ecosystem\\_fig1\\_255729021](https://www.researchgate.net/figure/The-biotic-and-abiotic-factors-governing-the-marine-ecosystem_fig1_255729021)
- Diego, I.P., Orti, R.M., Loureiro, J.P., Marcos, C.T., Dominguez, E.T., Alvarez, I.S., Lloret P.P & Soriano, J.G. 2023. The respiratory system on the *Arctocephalus australis* in comparison to the dog as a land

carnivore: are there adaptations to marine life?. *Animals*, 13(199), 1 – 15.

- Djumanto, A., & Triyanto, A. (2020). *Morfologi dan Anatomi Ikan Air Laut*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Djumanto, D., Sidabutar, T., Pontororing, H., & Leipary, R. (2009). POLA SEBARAN HORIZONTAL DAN KERAPATAN PLANKTON Di PERAIRAN BAWEAN. *Jurnal Perikanan (J. Fish Sci.)*, XI(1), 117–129. <https://doi.org/10.22146/JFS.3028>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarto, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297.
- Doney, S. C., et al. (2009). Ocean acidification: The other CO<sub>2</sub> problem. *Annual Review of Marine Science*.
- Duarte, C. M., Kennedy, H., Marbà, N., & Hendriks, I. (2013). Assessing the capacity of seagrass meadows for carbon burial: Current limitations and future strategies. *Ocean & Coastal Management*, 83, 32–38.
- Ducklow, H. (2001). Upper Ocean Carbon Export and the Biological Pump. *Oceanography*, 14, 50–54. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2001.06>
- Edgar, G. J., Stuart-Smith, R. D., Willis, T. J., Kininmonth, S., Baker, S. C., Banks, S., Barrett, N. S., Becerro, M. A., Bernard, A. T. F., Berkhout, J., Buxton, C. D., Campbell, S. J., Cooper, A. T., Davey, M., Edgar, S. C., Försterra, G., Galván, D. E., Irigoyen, A. J., Kushner, D. J., ... Thomson, R. J. (2014). Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. *Nature*, 506(7487), 216–220. <https://doi.org/10.1038/nature13022>
- Elomari, D. (2022). *Open water lifestyles: marine nekton* (pp. 229–255). Elsevier eBooks. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102826-1.00009-0>
- English, S., Wilkinson, C. R., & Baker, V. (1997). *Survey Manual for Tropical Marine Resources* (2nd Edition).

- Ezraneti, R & Windarti. 2015. Histologi lambung benih ikan kakap putih (*Lates calcalifer bloch*) yang terpapar merkuri nitrat [Hg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] dengan konsentrasi berbeda. *Acta Aquatica*, 2(1), 66-69.
- Fabry, V. J., et al. (2008). Ocean acidification at high latitudes. *Oceanography*.
- Falkowski, P. (2012). Ocean Science: The power of plankton. *Nature*, 483(7387), S17–S20. <https://doi.org/10.1038/483S17a>
- FAO. (2018). *The State of the World's Forests 2018*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fargeot, L., Poesy, C., Lefort, M., Prunier, J. G., Krick, M., Verdonck, R., Veyssière, C., Richard, M., Legrand, D., Loot, G., & Blanchet, S. (2024). Genetic diversity affects ecosystem functions across trophic levels as much as species diversity, but in an opposite direction. *BioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2024.03.27.586944>
- Fargeot, L., Poésy, C., Lefort, M., Prunier, J. G., Krick, M., Verdonck, R., Veyssière, C., Richard, M., Legrand, D., Loot, G., & Blanchet, S. (2025). Genetic diversity affects ecosystem functions across trophic levels as much as species diversity, but in an opposite direction. *ELife*, 13. <https://doi.org/10.7554/elife.100041.4>
- Farizky, C. K., Fitriani, M., Hidayati, N. V., Rahardja, B. S., & Andriyono, S. (2022). Studi bioakumulasi logam berat (Pb, Cd, dan As) pada rumput laut (*Caulerpa racemosa*) dari tambak tradisional di Brondong, Lamongan. *Jurnal Perikanan Unram*, 12(4), 722–733. <https://doi.org/10.29303/jp.v12i4.401>
- Fernández-Gracia, J., Rodríguez, J. P., Peel, L. R., Klemm, K., Meekan, M. G., & Eguíluz, V. M. (2024). Inferring leader-follower behavior from presence data in the marine environment: a case study on reef manta rays. *ArXiv Preprint ArXiv:2412.03990*.
- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998a). Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science*, 281(5374), 237–240.

- Flores, H., Motlagh, N. H., Zuniga, A., Liyanage, M., Passananti, M., Tarkoma, S., Youssef, M., & Nurmi, P. (2020). Toward Large-Scale Autonomous Monitoring and Sensing of Underwater Pollutants. ArXiv: Distributed, Parallel, and Cluster Computing. <https://dblp.uni-trier.de/db/journals/corr/corr2005.html#abs-2005-09571>
- Florko, K. R. N., Yurkowski, D. J., Breiter, C. J. C., Ferguson, S. H., Gamblin, H. E. L., Grottoli, A., Nace, A., Shuert, C. R., & Petersen, S. D. (2024). Biologging reveals rapid movements of harbour seals between freshwater and marine habitats in the subarctic. *Frontiers in Marine Science*, 11(September), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1435206>
- Fofonoff, N. P., & Millard, S. (1983). Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *UNESCO Technical Papers in Marine Science*, 44.
- Fonseca, C. T., Pérez-Jorge, S., Prieto, R., Oliveira, C., Tobeña, M., Scheffer, A., & Silva, M. A. (2022). Dive behavior and activity patterns of fin whales in a migratory habitat. *Frontiers in Marine Science*, 9, 875731.
- Foster, S. J., & Vincent, A. C. J. (2004). Life history and ecology of seahorses: Implications for conservation and management. *Journal of Fish Biology*, 65(1), 1–61. <https://doi.org/10.1111/j.0022-1112.2004.00429.x>
- Foyle, K.L., Hess, S., Powell, M.D & Herbert, N.A. 2020. What is gill health and what is its role in marine finfish aquaculture in the face of a changing climate. *Frontiers in Marine Science*, 7, 1 – 16.
- Franco, A. Di, Hogg, K. E., Calò, A., Bennett, N. J., Alaminos, O. E., Lang, M., Prvan, M., Santarossa, L., Franco, A. Di, Hogg, K. E., Calò, A., & Bennett, N. J. (2022). Improving marine protected area governance through collaboration and co-production to cite this version : HAL Id : hal-03490761.
- Fredrick, W.S & Ravichandran, S. 2012. Hemolymph proteins in marine crustaceans. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*. 2(6), 496 – 502. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(12\)60084-7](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(12)60084-7)

- Friedman, J. (2020). The Evolution of Annual and Perennial Plant Life Histories: Ecological Correlates and Genetic Mechanisms. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 51, 461–481. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110218-024638>
- Fulton, E. A., Smith, A. D. M., Smith, D. C., & Johnson, P. (2014). An Integrated Approach Is Needed for Ecosystem Based Fisheries Management: Insights from Ecosystem-Level Management Strategy Evaluation. *PLOS ONE*, 9(1), e84242-.
- Fulton, E., Smith, A., Smith, D., & Johnson, P. (2014). An Integrated Approach Is Needed for Ecosystem Based Fisheries Management: Insights from Ecosystem-Level Management Strategy Evaluation. *PloS One*, 9, e84242. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084242>
- Gage, J. D., & Tyler, P. A. (1991). "Deep-Sea Biology: A Natural History of Organisms at the Deep-Sea Floor." Cambridge University Press.
- Gagne, T. O., Hyrenbach, K. D., Hagemann, M. E., Van Houtan, K. S., & Van Houtan, K. S. (2018). Trophic signatures of seabirds suggest shifts in oceanic ecosystems. *Science Advances*, 4(2).
- Gaylord, & Gaines, S. (2000). Temperature or Transport? Range Limits in Marine Species Mediated Solely by Flow. *The American Naturalist*, 155, 769. <https://doi.org/10.2307/3079099>
- Giani, D., Andolina, C., Bains, M., Panti, C., Sciandra, M., Vizzini, S., & Fossi, M. C. (2023). Trophic niche influences ingestion of micro-and mesoplastics in pelagic and demersal fish from the Western Mediterranean Sea. *Environmental Pollution*, 328, 121632.
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J., & Duke, N. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154–159.
- Gjedrem, T., & Robinson, N. (2014). Advances by Selective Breeding for Aquatic Species: A Review. *Agricultural Sciences*, 05(12), 1152–1158. <https://doi.org/10.4236/as.2014.512125>
- Gjerde, K. M., Clark, N. A., & Harden-Davies, H. R. (2019). Building a Platform for the Future: the Relationship of the Expected New

- Agreement for Marine Biodiversity in Areas beyond National Jurisdiction and the UN Convention on the Law of the Sea. *Ocean Yearbook Online*, 33(1), 1–44. [https://doi.org/10.1163/9789004395633\\_002](https://doi.org/10.1163/9789004395633_002)
- Glaviano, F., Esposito, R., Cosmo, A. Di, Esposito, F., Gerevini, L., Ria, A., Molinara, M., Bruschi, P., Costantini, M., & Zupo, V. (2022). Management and Sustainable Exploitation of Marine Environments through Smart Monitoring and Automation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2), 297. <https://doi.org/10.3390/jmse10020297>
- Glynn, P. W. (1993). Coral reef bleaching: ecological perspectives. *Coral Reefs*, 12(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/BF00303779>
- Golden, C. D., Koehn, J. Z., Shepon, A., Passarelli, S., Free, C. M., Viana, D. F., Matthey, H., Eurich, J. G., Gephart, J. A., Fluet-Chouinard, E., Nyboer, E. A., Lynch, A. J., Kjellevold, M., Bromage, S., Charlebois, P., Barange, M., Vannuccini, S., Cao, L., Kleisner, K. M., ... Thilsted, S. H. (2021). Aquatic foods to nourish nations. *Nature*, 598(7880), 315–320. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03917-1>
- Goodchild, M., & Haining, R. (2003). GIS and Spatial Data Analysis: Converging Perspectives. *Review of Economic Design*, 83, 363–385.
- Gosnell, J. S., Macfarlan, R., Shears, N. T., & Caselle, J. E. (2014). A dynamic oceanographic front drives biogeographical structure in invertebrate settlement along Santa Cruz Island, California, USA. *Marine Ecology Progress Series*, 507, 181–196. <https://doi.org/10.3354/MEPS10802>
- Green, J & Gordon, I. 2025. Crustacean. *Ensiklopedia Britannica*.
- Griffiths, J. R., Kadin, M., Nascimento, F. J. A., Tamelander, T., Törnroos, A., Bonaglia, S., Bonsdorff, E., Brüchert, V., Gårdmark, A., Järnström, M., Kotta, J., Lindegren, M., Nordström, M. C., Norkko, A., Olsson, J., Weigel, B., Žydelis, R., Blenckner, T., Niiranen, S., & Winder, M. (2017). The importance of benthic–pelagic coupling for marine ecosystem functioning in a changing world. *Global Change Biology*, 23(6), 2179–2196. <https://doi.org/10.1111/gcb.13642>

- Gross, C., Duffy, J. E., Hovel, K. A., Kardish, M. R., Reynolds, P. L., Boström, C., Boyer, K. E., Cusson, M., Eklöf, J. S., Engelen, A. H., Eriksson, B. K., Fodrie, F. J., Griffin, J. M., Hereu, C. M., Hori, M., Hughes, A. R., Ivanov, M., Jorgensen, P., Kruschel, C., ... Stachowicz, J. J. (2022). The biogeography of community assembly: latitude and predation drive variation in community trait distribution in a guild of epifaunal crustaceans. *289(1969)*. <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.1762>
- Hadi, T., Muhammad, A., Giyanto, G., Prayudha, B., Johan, O., Budiyo, A., Rezza, A., Alifatri, L., Sulha, S., & Shar, S. (2020). *The Status of Indonesian Coral Reefs 2019*.
- Hagerthey, S. E., Bellinger, B. J., Wheeler, K., Gantar, M., & Gaiser, E. E. (2011). Everglades Periphyton: A Biogeochemical Perspective. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 41(1)*, 309–343. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.531218>
- Halpern, B., Frazier, M., Potapenko, J., Casey, K., Koenig, K., Longo, C., Stewart, J., Rockwood, R., Selig, E., Selkoe, K., & Walbridge, S. (2015). Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean. *Nature Communications, 6*, 7615.
- Halpern, B., Walbridge, S., Selkoe, K., Kappel, C., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J., Casey, K., Ebert, C., Fox, H., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H., Madin, E., Perry, M., Selig, E., Spalding, M., Steneck, R., & Watson, R. (2008). A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems. *Science (New York, N.Y.)*, 319, 948–952.
- Hameed, S., Goswami, B. N., Vinayachandran, P., & Yamagata, T. (1999). A dipole mode in the Tropical Indian Ocean. *Nature, 401*, 360–363. <https://doi.org/10.1038/43854>
- Hammerschlag, N. (2019). Quantifying shark predation effects on prey: Dietary data limitations and study approaches. *Endangered Species Research, 38*, 147–151.
- Handelsman, J. (2007). *Metagenomics and Microbial Communities*. In *Encyclopedia of Life Sciences*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0020367>

- Handl, G., & Svendsen, K. (2019). *Managing the Risk of Offshore Oil and Gas Accidents: The International Legal Dimension*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781786436740>
- Hanlon, R. (2007). Cephalopod dynamic camouflage. *Current Biology*, 17(11), 400–404. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.03.034>
- Harley, C. D. G., Randall Hughes, A., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J. B., Thornber, C. S., Rodriguez, L. F., Tomanek, L., & Williams, S. L. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*, 9(2), 228–241.
- Harrison, A. L., Costa, D. P., Winship, A. J., Benson, S. R., Bograd, S. J., Antolos, M., Carlisle, A. B., Dewar, H., Dutton, P. H., Jorgensen, S. J., Kohin, S., Mate, B. R., Robinson, P. W., Schaefer, K. M., Shaffer, S. A., Shillinger, G. L., Simmons, S. E., Weng, K. C., Gjerde, K. M., & Block, B. A. (2018). The political biogeography of migratory marine predators. *Nature Ecology and Evolution*, 2(10), 1571–1578. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0646-8>
- He, Z. (2024). Exploring the Dangers of Marine Pollution to Marine Life. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 83, 372–377. <https://doi.org/10.54097/sn0d0n29>
- Helm, M. M., & et al. (2017). "Impact of Climate Change on Fish Distribution." *Marine Ecology Progress Series*.
- Hempson, T. N., Graham, N. A. J., MacNeil, M. A., Williamson, D. H., Jones, G. P., & Almany, G. R. (2017). Coral reef mesopredators switch prey, shortening food chains, in response to habitat degradation. *Ecology and Evolution*, 7(8), 2626–2635. <https://doi.org/10.1002/ece3.2805>
- Herbert-Read, J. E., Buhl, J., Hu, F., Ward, A. J. W., & Sumpter, D. J. T. (2015). Initiation and spread of escape waves within animal groups. *Royal Society Open Science*, 2(4). <https://doi.org/10.1098/rsos.140355>
- Hernandez-Leon, S. (2023). The biological carbon pump, diel vertical migration, and carbon dioxide removal. *IScience*, 26(11).

- Hixon, M. A., Beets, J. P. 1993. Predation, prey refuges, and the structure of coral reef fish assemblages. *Ecological Monographs*, 63(1), 77-101.
- Hock, K., Wolff, N. H., Ortiz, J. C., Condie, S. A., Anthony, K. R. N., Blackwell, P. G., & Mumby, P. J. (2017). Connectivity and systemic resilience of the Great Barrier Reef. *PLoS Biology*, 15(11), 1–23. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003355>
- Hoegh-Guldberg, O., & Bruno, J. F. (2010). The Impact of Climate Change on the World’s Marine Ecosystems. *Science*, 328(5985), 1523–1528. <https://doi.org/10.1126/science.1189930>
- Holman, L., de Bruyn, M., Creer, S., Carvalho, G. R., Robidart, J., & Rius, M. (2020). Consistent marine biogeographic boundaries across the tree of life despite centuries of human impacts. *BioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.06.24.169110>
- Horhoruw, S. M., Fadli, M., Atmadipoera, A., Lekalette, J., Nugroho, D. Y., Tatipatta, W. M., & Kainama, F. (2020). Horizontal Structure of Banda Eddies and The Relationship to Chlorophyll-a During South East Monsoon in Normal and ENSO Period on 2008-2010. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 618(1), 12011.
- Horton, T., Kroh, A., Ahyong, S., Bailly, N., Boyko, C. B., Brandão, S. N., ... & WoRMS Editorial Board. (2023). World Register of Marine Species (WoRMS): 2023 Annual Checklist. VLIZ. <https://www.marinespecies.org>
- Hsieh, H. Y., Tew, K. S., & Meng, P. J. (2023). The Impact of Changes in the Marine Environment on Marine Organisms. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4), 2–5. <https://doi.org/10.3390/jmse11040809>
- <https://mongabay.co.id/2020/12/29/memetakan-potensi-ikan-asli-indonesia-untuk-kegiatan-ekonomi/#:~:text=Diketahui%2C%20saat%20ini%20total%20ada,dan%20invasif%20sebanyak%2013%20spesies.>
- <https://www.marinebio.org/creatures/marine-biology/history-of-marine-biology/>

- Hu, M.Y., Tseng, Y.C., Lin, L.Y., Chen, P.Y., Daures, M.C., Hwang, P.P & Melznes, F. 2011. New insight into ion regulation of cephalopod molluscs: a role of epidermal ionocytes in acid-based regulation during embryogenesis. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 301. R1700 – R1709. doi:10.1152/ajpregu.00107.2011.
- Huang, W., Song, B., Liang, J., Niu, Q., Zeng, G., Shen, M., Deng, J., Luo, Y., Wen, X., & Zhang, Y. (2021). Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124187. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124187>
- Huang, Z., Fang, F., Ding, L., Yu, K., Zhang, L., & Lu, H. (2023). Technological Advancements in a Field Investigation of Marine Microorganisms: From Sampling Strategies to a Molecular Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse11101981>
- Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., van de Leemput, I. A., Lough, J. M., Morrison, T. H., Palumbi, S. R., van Nes, E. H., & Scheffer, M. (2017). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546(7656), 82–90. <https://doi.org/10.1038/nature22901>
- Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., van de Leemput, I. A., Lough, J. M., Morrison, T. H., Palumbi, S. R., van Nes, E. H., & Scheffer, M. (2017). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546(7656), 82–90. <https://doi.org/10.1038/nature22901>
- Hughes, T. P., et al. (2017). "Global warming and recurrent mass bleaching of corals." *Nature*.
- Hughes, T. P., Rodrigues, M. J., Bellwood, D. R., & Cowan, Z. (2017). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546(7656), 82-90.
- Hughes, T., Kerry, J., Alvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J., King, K., Baird, A., Babcock, R., Beger, M., Bellwood, D., Berkelmans, R., Bridge, T., Butler, I., Byrne, M., Cantin, N., Comeau, S., Connolly, S.,

- Cumming, G., Dalton, S., Diaz-Pulido, G., & Wilson, S. (2017). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543, 373–377.
- Hull, P. (2017). Emergence of modern marine ecosystems. *Current Biology*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.04.041>
- Hulley, P. E. (1981). "The Biology of Myctophid Fishes." *Marine Biology*, 63(2), 149-157.
- Hutchinson, G. E. (1959). Homage to Santa Rosalia or Why Are There So Many Kinds of Animals? *The American Naturalist*, 93(870), 145–159.
- Iglesias, B., Louzao, M., Bachiller, E., López-López, L., Santos, M., Boyra, G., & Preciado, I. (2023). Influence of seasonal variability on the trophic structure of pelagic communities. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1185376.
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2017). Blue carbon ecosystems. <https://www.iucn.org/resources/issues-brief/blue-carbon>
- IPCC. (2019). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.
- IPCC. (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for Policymakers.
- ISSF. (2021). Status of the world fisheries for tuna. <https://issf-foundation.org>
- IUCN. (2021). "Protected Planet Report 2020." International Union for Conservation of Nature.
- Jahan, S. (2023). The Role of Phytoplanktons in the Environment and in Human Life, a Review. *Mağallaṭ Al-Başraṭ Li-l-'ulūm*. <https://doi.org/10.29072/basjs.20230212>
- Jambeck, J., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. (2015). Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science (New York, N.Y.)*, 347, 768–771.
- Jankowska, E., Pelc, R., Alvarez, J., Mehra, M., & Frischmann, C. J. (2022). Climate benefits from establishing marine protected areas targeted at blue carbon solutions. *Proceedings of the National Academy of*

- Sciences of the United States of America, 119(23).  
<https://doi.org/10.1073/pnas.2121705119>
- Jaya, I. (2024). Pentingnya Kebijakan Pemantauan dan Pelaporan Indeks Kesehatan Laut Nusantara. *Policy Brief Pertanian, Kelautan, dan Biosains Tropika*, 6(4), 1041-1047.
- Jones, D. O. B., Kaiser, S., Sweetman, A. K., Smith, C. R., Menot, L., Vink, A., Trueblood, D., Greinert, J., Billett, D. S. M., Arbizu, P. M., Radziejewska, T., Singh, R., Ingole, B., Stratmann, T., Simon-Lledó, E., Durden, J. M., & Clark, M. R. (2017). Biological responses to disturbance from simulated deep-sea polymetallic nodule mining. *PLOS ONE*, 12(2), e0171750.
- Joyce, K., Fickas, K., & Kalamandeen, M. (2022). The unique value proposition for using drones to map coastal ecosystems. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1, 1–26.  
<https://doi.org/10.1017/cft.2022.7>
- Judijanto, L. (2025). *Marine Biodiversity Conservation: A Bibliometric Study on Ocean Research and Policy*. West Science Interdisciplinary Studies, 3(07), 1259–1266.  
<https://doi.org/10.58812/wsis.v3i07.2121>
- Kaiser, M. J., Attrill, M. J., Jennings, S., & Thomas, D. (2020). *Marine Ecology: Processes, Systems, and Impacts*. Oxford University Press.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). *Statistik Lingkungan Hidup dan Kehutanan Tahun 2021*. KLHK.
- Kendall, K. D. (2017). *Marine Environments* (1st ed.). DEEPEND.
- Kerry, J. T., Baird, A. H., Connolly, S. R., Chase, T. J., Dietzel, A., Hill, T., Hoey, A. S., Hoogenboom, M. O., Jacobson, M., Kerswell, A., Madin, J. S., Mieog, A., Paley, A. S., Pratchett, M. S., Torda, G., & Woods, R. M. (2018). Dynamics of Corals. *Nature*.  
<http://dx.doi.org/10.1038/s41586-019-1081-y>
- Khoruzhiy, A. A. (2011). Features of species composition and abundance of the nekton community in the upper epipelagic layer of the Northwest Pacific in early summer. *Russian Journal of Marine*

Biology, 37(7), 533–548.

<https://doi.org/10.1134/S1063074011070030>

- Khoruzhiy, A. A., Zavolokin, A. V., Starovoytov, A. N., Naydenko, S. V., Vanin, N. S., Dubovets, E. N., Kornilova, E. A., Emelin, P. O., & Somov, A. A. (2013). Pacific salmon in the nekton community of the upper epipelagic layer of the Northwest Pacific at Kuril Islands in the early summer of 2012. *Russian Journal of Marine Biology*, 39(7), 486–500. <https://doi.org/10.1134/S1063074013070031>
- King, S. L., Friedman, W. R., Allen, S. J., Gerber, L., Jensen, F. H., Wittwer, S., Connor, R. C., & Krützen, M. (2018). Bottlenose Dolphins Retain Individual Vocal Labels in Multi-level Alliances. *Current Biology*, 28(12), 1993–1999.e3. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.013>
- Kirk, J. T. O. (2010). The underwater light field. In *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems* (pp. 1–2). Cambridge University Press.
- Kirk, R.E. and Othmer, V.R., 1994, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4th ed., Wiley-Interscience New York.
- Kocsis, Á. T., Kocsis, Á. T., Reddin, C. J., & Kiessling, W. (2018). The stability of coastal benthic biogeography over the last 10 million years. *Global Ecology and Biogeography*, 27(9), 1106–1120. <https://doi.org/10.1111/GEB.12771>
- Koster, R. D., & et al. (2010). "The Role of Ocean Circulation in Climate Variability." *Climate Dynamics*.
- Kroeker, K. J., Bell, L. E., Donham, E. M., Hoshijima, U., Lummis, S., Toy, J. A., & Willis-Norton, E. (2020). Ecological change in dynamic environments: Accounting for temporal environmental variability in studies of ocean change biology. *Global Change Biology*, 26(1), 54–67. <https://doi.org/10.1111/gcb.14868>
- Kubota, K., Yokoyama, Y., Ishikawa, T., Suzuki, A., & Ishii, M. (2017). Rapid decline in pH of coral calcification fluid due to incorporation of anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Scientific Reports*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07680-0>
- Kühn, B., Cayetano, A., Fincham, J. I., Moustahfid, H., Sokolova, M., Trifonova, N., Watson, J. T., Fernandes-Salvador, J. A., & Uusitalo, L. (2025). Machine Learning Applications for Fisheries—At Scales

- from Genomics to Ecosystems. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 33(2), 334–357.  
<https://doi.org/10.1080/23308249.2024.2423189>
- Kültz, D. (2015). Physiological mechanisms used by fish to cope with salinity stress. *Journal of Experimental Biology*, 218(12), 1907–1914.
- Kumar, M., & et al. (2018). "Salinity and Its Effect on Marine Life." *Journal of Marine Science and Engineering*.
- Ky Vinh, M. (2008). GIS-Aided Marine Conservation Planning And Management: A Case Study In Phuquoc Island, Vietnam. *International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences*.
- Levin, L. A., Etter, R. J., Rex, M. A., Gooday, A. J., Smith, C. R., Pineda, J., Stuart, C. T., Hessler, R. R., & Pawson, D. (2001). Environmental Influences on Regional Deep-Sea Species Diversity<sup>1</sup>. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 32(Volume 32, 2001), 51–93.
- Levitus, S., Antonov, J. I., Wang, J., Delworth, T. L., Dixon, K. W., & Broccoli, A.J. (2000). Anthropogenic warming of Earth's climate system. *Science*, 292(5515), 267–270.  
<https://doi.org/10.1126/science.1058154>
- Li, F., Zhang, H., Lue, Z., Xu, B., & Zheng, L. (2014). Species composition and community diversity of nekton in Laizhou Bay, China. *Biodiversity Science*, 21(5), 537–546.  
<https://doi.org/10.3724/SP.J.1003.2013.10009>
- Li, J., Du, L., Guan, W., Yu, F.-H., & van Kleunen, M. (2016). Latitudinal and longitudinal clines of phenotypic plasticity in the invasive herb *Solidago canadensis* in China. *Oecologia*, 182(3), 755–764.  
<https://doi.org/10.1007/S00442-016-3699-X>
- Li, X., Qin, L., Dai, S., Jiang, S., & Liu, Z. (2007). Marine microbial metagenomics: progress and prospect. *Wei Sheng Wu Xue Bao = Acta Microbiologica Sinica*, 47, 548–553.
- Lindeman, R. L. (1942). The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology. *Ecology*, 23(4), 399–417. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1930126>

- Lohnes, D. (2022). Species interactions (pp. 349–409). Elsevier eBooks. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85673-7.00002-2>
- Long, R. D., Charles, A., & Stephenson, R. L. (2015). Key principles of marine ecosystem-based management. *Marine Policy*, 57, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.01.013>
- Longhurst, A. R. (2007). *Ecological geography of the sea* (2nd ed.). Academic Press.
- Longhurst, A. R., & Pauly, D. (1987). *Ecology of tropical oceans*. Academic Press.
- Lumuindong, F., Mamujaja, C. F., Tarore, D., Mandey, L. C., & Paat, F. J. (2023). *BIOLOGI LAUT* (A. D. Kambey (ed.)). CV. Mineral Mutiara Bumi.
- Luthfi, O. M., & Nurhayati, H. (2017). *Pengantar Anatomi Hewan Air*. Bogor: IPB Press
- MacNeil, L., & Scotti, M. (2025). Network-based bioregionalization of demersal fish in continental shelf seas. *Ecography*. <https://doi.org/10.1002/ecog.07683>
- Maggioni, F., Bell, J. J., Pujo-Pay, M., Shaffer, M., Cerrano, C., Lemonnier, H., Letourneur, Y., & Rodolfo-Metalpa, R. (2023). Sponge organic matter recycling: Reduced detritus production under extreme environmental conditions. *Marine Pollution Bulletin*, 190(April). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114869>
- Manalu, A. A., Hariyadi, S., & Wardiatno, Y. (2017). Microplastics abundance in coastal sediments of Jakarta Bay, Indonesia. *AACL Bioflux*, 10(5), 1164–1173.
- Manik, R.R.D.S & Arleston, J. 2020. *Buku ajar ikhtology*. Widina Media Utama: Bandung.
- Manno, C., Peck, L. V, & Tarling, A. G. (2016). Pteropod eggs released at high pCO<sub>2</sub> lack resilience to ocean acidification. *Scientific Reports*, 6, 25752.
- Manokaran, S., Joydas, T. V, & Khan, A. (2022). Chapter 6 - Physico-chemical factors regulating marine benthos structure and function. In P. S. Godson, S. G. T. Vincent, & S. Krishnakumar (Eds.), *Ecology and Biodiversity of Benthos* (pp. 209–250). Elsevier.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821161-8.00005-2>

- Mantua, N., Hare, S., Zhang, Y., Wallace, J., & Francis, R. (1997). A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 1069–1079.
- Marcos, C.M., Diz, M.J.O., Orti, R.M., Loureiro, J.P., Diego, I.M., Dominguez, E.T., Lioret, P.P., Alvarez, I.S & Soriano, J.G. Nature or nurture: is the digestive of the pontoporia blainvillei influenced or determined by its diet?. *Animals*, 14(5), 1 – 29. <https://doi.org/10.3390/ani14050661>
- Martín, P. V., Buček, A., Bourguignon, T., Bourguignon, T., & Pigolotti, S. (2020). Ocean currents promote rare species diversity in protists. *Science Advances*, 6(29). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAZ9037>
- Martins, G. M., Patarra, R. F., Álvaro, N. V, Prestes, A. C. L., & Neto, A. I. (2013). Effects of coastal orientation and depth on the distribution of subtidal benthic assemblages. *Marine Ecology*, 34(3), 289–297. <https://doi.org/10.1111/MAEC.12014>
- Matin, M., Koszarska, M., Atanasov, A. G., Król-Szmajda, K., Józwick, A., Stelmasiak, A., & Hejna, M. (2024). Bioactive Potential of Algae and Algae-Derived Compounds: Focus on Anti-Inflammatory, Antimicrobial, and Antioxidant Effects. *Molecules*, 29(19), 4695. <https://doi.org/10.3390/molecules29194695>
- Matos, A., Ledoux, J.-B., Domínguez-Pérez, D., Almeida, D., & Antunes, A. (2020). Omics Advances in the Study of Zooplankton : Big Data for Small Drifting Organisms (pp. 264–277). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351021821-15>
- Maxwell, S. M., Hazen, E. L., Lewison, R. L., Dunn, D. C., Bailey, H., Bograd, S. J., Briscoe, D. K., Fossette, S., Hobday, A. J., Bennett, M., Benson, S., Caldwell, M. R., Costa, D. P., Dewar, H., Eguchi, T., Hazen, L., Kohin, S., Sippel, T., & Crowder, L. B. (2015). Dynamic ocean management: Defining and conceptualizing real-time

- management of the ocean. *Marine Policy*, 58, 42–50.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.03.014>
- McCook, L. J., Ayling, T., Cappo, M., Choat, J. H., Evans, R. D., De Freitas, D. M., Heupel, M., Hughes, T. P., Jones, G. P., Mapstone, B., Marsh, H., Mills, M., Molloy, F. J., Pitcher, C. R., Pressey, R. L., Russ, G. R., Sutton, S., Sweatman, H., Tobin, R., ... Williamson, D. H. (2010). Adaptive management of the Great Barrier Reef: A globally significant demonstration of the benefits of networks of marine reserves. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(43), 18278–18285.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0909335107>
- McCormick, S. D., & et al. (2013). "Salinity Effects on Fish Physiology." *Fish Physiology*.
- McLachlan, A., & Brown, A. C. (2006). "The Ecology of Sandy Shores." Elsevier.
- Meidinger, M., Vasiliki, M., Sano, M., Palma, M., & Ponti, M. (2013). Seafloor mapping and cartography for the management of marine protected areas. *Advances in Oceanography and Limnology*, 4(2), 120–137. <https://doi.org/10.1080/19475721.2013.848529>
- Meinita, M. D. N., Soedibya, P. H. T., & Kartika Sari, L. (2022). *Biologi Laut. Purwokerto: Universitas Jenderal Soedirman Press.*
- Middelburg, J. (2019). *Marine Carbon Biogeochemistry: A Primer for Earth System Scientists.* <https://doi.org/10.1007/978-3-030-10822-9>
- Millero, F.J. 2006. *Chemical Oceanography*. 3 ed. CRC Taylor and Francis. New York, 305 pp
- Mogalekar, H., Jawahar, P., & Canciyal, J. (2015). *Marine Ecosystems, Biodiversity and Conservation.*
- Molinos, J. G., Hunt, H. L., Green, M., Champion, C., Hartog, J. R., & Pecl, G. T. (2022). Climate, currents and species traits contribute to early stages of marine species redistribution. *Communications Biology*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s42003-022-04273-0>
- Möller, I., et al. (2014). Wave attenuation over mangroves and salt marshes: A review. *Wetlands Ecology and Management*, 22(3), 1-19.

- Moore, S. K., Trainer, V. L., Mantua, N. J., Parker, M. S., Laws, E. A., Backer, L. C., & Fleming, L. E. (2008). Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health. *Environmental Health*, 7(Suppl 2), S4. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-7-S2-S4>
- Mora, C., Tittensor, D., Adl, S., Simpson, A., & Worm, B. (2011). How Many Species Are There on Earth and in the Ocean? *PLoS Biology*, 9, e1001127. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001127>
- Morad, A.E. 2020. Fish cardiovascular system. *Acta Scientific Veterinary Sciences*, 2(11), 13 – 15.
- Morel, A. dan Prieur, L. (1977) “Analysis of variations in ocean color,” *Limnology and Oceanography*, 22(4), hal. 709–722. doi: 10.4319/lo.1977.22.4.0709.
- Morel, A., & Maritorena, S. (2001). Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C4), 7163–7180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2000JC000319>
- Motivarash, Y. B., Fofandi, D. C., Dabhi, R. M., Makrani, R. A., & Tanna, P. D. (2020). Importance of sharks in ocean ecosystem. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 8(1), 611–613.
- Muda, M. 2025. Rantai makanan ekosistem laut – ciri-ciri, organisme dan contoh ekosistem laut. <https://ipa.pelajaran.co.id/rantai-makanan-ekosistem-laut/>
- Mujiono, N., & Isnaningsih, N.R. 2022. Komunitas Moluska Pada Berbagai Kondisi Mangrove di Segara Anakan, Cilacap Jawa Tengah. *Jurnal Kelautan Tropis* 25(2): 213-222.
- Mulya, M. B. (2023). *Biologi Laut Miswar Budi Mulya*.
- Mulyani, G.T., Fibrianto, Y.H., Budipitojo, T & Indrawati, A. 2014. Studi sistem respirasi dan kajian mikrobiologis lumba-lumba hidung botol (*Tursiops aduncus*) di Perairan Laut Jawa. *Acta Veterinaria Indonesia*, 2 (1), 1 – 5.
- Munasik, M., Sabdono, A., Benjamin, P. M., Haryanti, D., Wirasatriya, A., & Yusidarta, I. (2025). Rapid assessment of coral bleaching induced

- by 2023 ENSO in Karimunjawa, Central Java. 1496, 12029.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1496/1/012029>
- Muscatine, L., & Porter, J. W. (1977). Reef Corals: Mutualistic Symbioses Adapted to Nutrient-Poor Environments. *BioScience*, 27(7), 454–460.
- Myers, R., Baum, J., Shepherd, T., Powers, S., & Peterson, C. (2007). Cascading Effects of the Loss of Apex Predatory Sharks from a Coastal Ocean. *Science (New York, N.Y.)*, 315, 1846–1850.
- Mynderse, J. S., Crandall, L. W., & Cardellina, J. H. (1989). Chapter 10 Bioactive Compounds from Marine Organisms and Cultivated Blue-Green Algae (Vol. 43, pp. 377–432). Elsevier.  
[https://doi.org/10.1016/S0301-4770\(08\)60401-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4770(08)60401-7)
- Nagelkerken, I., & Munday, P. L. (2016). Animal behaviour shapes the ecological effects of ocean acidification and warming: moving from individual to community-level responses. *Global Change Biology*, 22(3), 974–989.
- National Research Council. 1994. *Molecular biology in marine science: scientific questions, technological approaches, and practical implications*. Washington, DC: The National Academies Press.  
<https://doi.org/10.17226/9119>.
- Natsir, N. A., Selanno, D. A. J., Tupan, C. I., & Male, Y. T. (2022). *Buku Biologi Laut: Pencemaran Logam Berat dan Pengaruhnya terhadap Anatomi dan Fisiologi Lamun*. Yogyakarta: Deepublish.
- Nedelec, S. L., Radford, A. N., Pearl, L., Nedelec, B., McCormick, M. I., Meekan, M. G., & Simpson, S. D. (2017). Motorboat noise impacts parental behaviour and offspring survival in a reef fish. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1856).  
<https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0143>
- Neelmani, R., Chandravanshi, M. P., Sarman, V., Vyas, U. D., & Tn, M. (2019). Impacts of climate change on marine biodiversity. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 7(2), 425–430.
- Ngarofah, L. 2020. *Modul pembelajaran fisiologi hewan*. Uin Raden Intan: Lampung

- Nicol, S., Foster, J., & Kawaguchi, S. (2012). The fishery for Antarctic krill – recent developments. *Fish and Fisheries*, 13(1), 30–40.
- Nixon, S., Ammerman, J., Atkinson, L., Berounsky, V., Billen, G., Boicourt, W., Boynton, W., Church, T., Ditoro, D., Elmgren, R., Garber, J., Giblin, A., Jahnke, R. A., Owens, N., Pilson, M., & Seitzinger, S. (1996). The Fate of Nitrogen and Phosphorus at the Land Sea Margin of the North Atlantic Ocean. *Biogeochemistry*, 35, 141–180.
- NOAA. (2020). "Ocean and Climate Change." National Oceanic and Atmospheric Administration.
- NOAA. 2025. Aquatic food webs. National oceanic and atmospheric administration. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/marine-life/aquatic-food-webs>
- NOAA. 2025. Coral reef ecosystems. National oceanic and atmospheric administration. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/marine-life/coral-reef-ecosystems>
- Nordeide, J. T., Johansen, S. D., Jørgensen, T. E., Karlsen, B. O., & Moum, T. (2011). Population connectivity among migratory and stationary cod *Gadus morhua* in the Northeast Atlantic; A review of 80 years of study. *Marine Ecology Progress Series*, 435, 269–283.
- Nugraha, A. H., Tasabaramo, I. A., Hernawan, U. E., Rahmawati, S., Putra, R. D., & Darus, R. F. (2021). Diversity, coverage, distribution and ecosystem services of seagrass in three small islands of northern Papua, Indonesia: Liki island, Meossu island and Befondi island. *Biodiversitas*, 22(12), 5544–5549. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d221238>
- Nurdin, N., Amri, K., Mashoreng, S., & Komatsu, T. (2022). Estimation of Seagrass Biomass by In Situ Measurement and Remote Sensing Technology on Small Islands, Indonesia. *Ocean Science Journal*, 57, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12601-022-00054-2>
- OECD. (2017). Marine Protected Areas : economics, management and effective policy mixes. In J. Treves, J. Allain, & A. N. For (Eds.), *Nature Food* (Vol. 4, Issue 6). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00787-w>

- Orr, J. C., et al. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*.
- Orti, R.M., Marcos, C.T., Loureiro, J.P., Diego, I.M., Dominguez, E.T., Alvarez, I.S., Lloret, P.P & Soriano, J.G. 2022. The digestive of the *Arctocephalus australis* in comparison to the dog as a land – carnivore model. *Animal* (Basel), 25(13), 1634. <https://doi.org/10.3390/ani12131634>
- Paerl, H. W., & Justic, D. (2011). Primary Producers: Phytoplankton Ecology and Trophic Dynamics in Coastal Waters. *Treatise on estuarine and coastal science*, 6, 23–42.
- Paine, R. T. (1969). A Note on Trophic Complexity and Community Stability. *The American Naturalist*, 103(929), 91–93.
- Pane, E.P., Arfiati, D & Apriliyanti, F.J. 2023. Reviw: respon fisiologis ikan terhadap lingkungan hidupnya. *Jurnal Akuatik*, 6(2), 71n- 83.
- Pauly, D., Christensen, V., Dalsgaard, J., Froese, R., & Torres, F. (1998). Fishing Down Marine Food Webs. *Science*, 279(5352), 860–863.
- Pauly, Daniel., Villy Christensen, Sylvie Guénette, Tony J. Pitcher, U. Rashid Sumaila, Carl J. Walters, R. Watson, Dirk Zeller. 2002. Towards sustainability in world fisheries. *Nature*. 418: 689-695.
- Pearce-Higgins, J. W., Ockendon, N., Baker, D., Carr, J., White, E. C., Almond, R. E. A., Amano, T., Bertram, E., Bradbury, R. B., Bradley, C., Butchart, S. H. M., Doswald, N., Foden, W., Gill, D., Green, R. E., Sutherland, W. J., & Tanner, E. V. J. (2015). Geographical variation in species' population responses to changes in temperature and precipitation. *Proceedings of The Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1818), 20151561. <https://doi.org/10.1098/RSPB.2015.1561>
- Pearce-Kelly, P., Altieri, A. H., Bruno, J. F., Cornwall, C. E., McField, M., Muñoz-Castillo, A. I., Rocha, J., Setter, R. O., Sheppard, C., Roman-Cuesta, R. M., & Yesson, C. (2025). Considerations for determining warm-water coral reef tipping points. *Earth System Dynamics*, 16(1), 275–292. <https://doi.org/10.5194/esd-16-275-2025>

- Peck, L. (2018). Antarctic Marine Biodiversity: Adaptations, Environments and Responses to Change: An Annual Review (pp. 105–236).
- Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I.-C., Clark, T. D., Colwell, R. K., Danielsen, F., Evengård, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R. A., Griffis, R. B., Hobday, A. J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M. A., Jennings, S., ... Williams, S. E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(6332). <https://doi.org/10.1126/science.aai9214>
- Pen, O., Randall, C. J., Negri, A. P., Quigley, K. M., Foster, T., Ricardo, G. F., Webster, N. S., Bay, L. K., Harrison, P. L., Russ, C., & Heyward, A. J. (2020). Sexual production of corals for reef restoration in the Anthropocene. *Marine Ecology Progress Series*, 635, 203–232.
- Pereira, L. (2025). The Unsung Heroes of Aquatic Ecosystems: The Vital Roles of Plankton. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1009861>
- Pérez, G., Dagorn, L., Deneubourg, J. L., Forget, F., Filmalter, J. D., Holland, K., Itano, D., Adam, S., Jauharee, R., Beeharry, S. P., & Capello, M. (2020). Effects of habitat modifications on the movement behavior of animals: the case study of Fish Aggregating Devices (FADs) and tropical tunas. *Movement Ecology*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40462-020-00230-w>
- Pilczynska, J., Pilczynska, J., Cocito, S., Boavida, J., Boavida, J., Serrão, E. A., Assis, J., Fragkopoulou, E., & Queiroga, H. (2019). Genetic diversity increases with depth in red gorgonian populations of the Mediterranean Sea and the Atlantic Ocean. *PeerJ*, 7. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.6794>
- Plön, S., Andra, K., Auditore, L., Gegout, C., Hale, P. J., Hampe, O., & Tuddenham, P. (2024). Marine mammals as indicators of Anthropocene Ocean Health. *Npj Biodiversity*, 3(1), 24.
- Polis, G. A., Anderson, W. B., & Holt, R. D. (1997). Toward an Integration of Landscape and Food Web Ecology: The Dynamics of Spatially Subsidized Food Webs. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 28(Volume 28, 1997), 289–316.

- Poloczanska, E. S., Burrows, M. T., Brown, C. J., García Molinos, J., Halpern, B. S., Hoegh-Guldberg, O., Kappel, C. V., Moore, P. J., Richardson, A. J., Schoeman, D. S., & Sydeman, W. J. (2016). Responses of Marine Organisms to Climate Change across Oceans. *Frontiers in Marine Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00062>
- Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2018). The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(1), 470–488. <https://doi.org/10.1121/1.5021594>
- Pramesti, R., Susanto, A. B., Setyati, W. A., Ridlo, A., Subagiyo, & Oktaviaris, Y. (2016). Struktur Komunitas dan Anatomi Rumput Laut di Perairan Teluk Awur, Jepara dan Pantai Krakal, Yogyakarta. *Jurnal Kelautan Tropis*, 19(2), 82–91. <https://doi.org/10.14710/jkt.v19i2.822>
- Price, T. (2023). Interactions between Species. In *Ecology of a Changed World* (pp. 31–42). Oxford University Press New York. <https://doi.org/10.1093/oso/9780197564172.003.0004>
- Pugh, D. (2014). *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. Wiley.
- Purnamasari, R & Santi, D.R. 2017. *Fisiologi hewan*. Program Studi Arsitektur UIN Sunan Ampel. Surabaya.
- Puspasari, R., Hartati, T., Regi, D., & Anggawangsa, F. (2017). Analisis Dampak Reklamasi terhadap Lingkungan dan Perikanan di Teluk Jakarta. *Jurnal Kebijakan Perikanan Indonesia*, 9(2), 85–94.
- Rahayu, S.M., Wiryanto., & Sunarto. 2017. Keanekaragaman Jenis Krustasea di Kawasan Mangrove Kabupaten Purworejo Jawa Tengah. *Jurnal Sains Dasar* 6(1):57-65.
- Rahmadina & Ananda, D. 2018. Inventarisasi hewan Invertebrata pada Filum Coelenterata di Pantai Pondok Permai Kabupaten Sendang Begadai Sumatera Utara. *Klorofil* 2(2):
- Rahmawati, S., Hernawan, U. E., McMahan, K., Prayudha, B., Prayitno, H. B., Wahyudi, A. J., & Vanderklift, M. (2014). *Blue Carbon in Seagrass Ecosystem: Guideline for the Assessment of Carbon Stock and Sequestration in Southeast Asia*. Gadjah Mada University Press.

- Ramirez-Llodra, E., Tyler, P. a., Baker, M. c., Bergstad, O. A., Clark, M. r., Escobar, E., Levin, L. a., Menot, L., Rowden, A. a., Smith, C. r., & Van Dover, C. l. (2011). Man and the Last Great Wilderness: Human Impact on the Deep Sea. *Plos One*, 6(8).
- Rex, M., & Etter, R. (2011). Deep-Sea Biodiversity: Pattern and Scale. *BioScience*, 61, 327–328. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.4.17>
- Riniatsih, I., & Suryono, C. A. (2018). *Ekosistem Pesisir dan Adaptasi Biota Laut*. Semarang: Universitas Diponegoro Press.
- Riser, S., Freeland, H., Roemmich, D., Wijffels, S., Belbéoch, M., Gilbert, D., Xu, J., Pouliquen, S., Thresher, A., Traon, P.-Y., Maze, G., Klein, B., Ravichandran, M., Grant, F., Poulain, P.-M., Suga, T., Lim, B., Sterl, A., & Jayne, S. (2016). Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Clim. Change*, 6, 145–153.
- Roark, E. B., Guilderson, T. P., Dunbar, R. B., Fallon, S. J., & Mucciarone, D. A. (2009). Extreme longevity in proteinaceous deep-sea corals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(13), 5204–5208.
- Roberts, C., Branch, G., Bustamante, R., Castilla, J., Dugan, J., Halpern, B., Lafferty, K., Leslie, H., Lubchenco, J., McArdle, D., Ruckelshaus, M., & Warner, R. (2003). Application of Ecological Criteria in Selecting Marine Reserves and Developing Reserve Networks. *Ecological Applications*, 13.
- Roberts, K. E., Garrison, L. P., Ortega-Ortiz, J., Hu, C., Zhang, Y., Sasso, C. R., & Hart, K. M. (2022). The influence of satellite-derived environmental and oceanographic parameters on marine turtle time at surface in the Gulf of Mexico. *Remote Sensing*, 14(18), 4534.
- Robinson, L., Elith, J., Hobday, A., Pearson, R., Kendall, B., Possingham, H., & Richardson, A. (2011). Pushing the limits in marine species distribution modelling: Lessons from the land present challenges and opportunities. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 789–802.
- Rodriguez-Pinto, I. I., Rieucan, G., Handegard, N. O., Boswell, K. M., & Theobald, J. C. (2024). Environmental impact on visual perception modulates behavioral responses of schooling fish to looming

- predators. *Journal of Experimental Biology*, 227(6).  
<https://doi.org/10.1242/jeb.246665>
- Rossi, T., Nagelkerken, I., Pistevo, J. C., & Connell, S. D. (2016). Lost at sea: ocean acidification undermines larval fish orientation via altered hearing and marine soundscape modification. *Biology Letters*, 12(1), 20150937.
- Roux, F. Le, Wegner, K. M., Baker-Austin, C., Vezzulli, L., Osorio, C. R., Amaro, C., Ritchie, J. M., Defoirdt, T., Destoumieux-Garzón, D., Blokesch, M., Mazel, D., Jacq, A., Cava, F., Gram, L., Wendling, C. C., Strauch, E., Kirschner, A., & Huehn, S. (2015). The emergence of *Vibrio* pathogens in Europe: ecology, evolution, and pathogenesis (Paris, 11–12th March 2015). *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00830>
- Rwawi, C., Moltó, V., Berline, L., Nérini, D., & Rossi, V. (2025). Explaining biogeography through ocean circulation and abiotic variability. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-17616>
- Ryther, J. H. (1969). Photosynthesis and Fish Production in the Sea. *Science*, 166(3901), 72–76. <http://www.jstor.org/stable/1727735>
- Ryther, J. H., & Dunstan, W. M. (1971). Nitrogen, Phosphorus, and Eutrophication in the Coastal Marine Environment. *Science*, 171(3975), 1008–1013.
- Sala, E., Mayorga, J., Bradley, D., Cabral, R. B., Atwood, T. B., Auber, A., Cheung, W., Costello, C., Ferretti, F., Friedlander, A. M., Gaines, S. D., Garilao, C., Goodell, W., Halpern, B. S., Hinson, A., Kaschner, K., Kesner-Reyes, K., Leprieur, F., McGowan, J., ... Lubchenco, J. (2021). Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate. *Nature*, 592(7854), 397–402. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03371-z>
- Salayan, L. M., Wulandari, H., & Huda, M. K. (2024). Peran Ekosistem Laut dalam Konservasi Keanekaragaman Hayati Di Indonesia. *Journal of Natural Sciences*, 5(3), 234–244. <https://doi.org/10.34007/jonas.v5i3.717>
- Salma, U., & Larasati, S. J. H. (2025). Ecological Analysis of Mangroves and Seagrasses on Large and Small Islands: Environmental Factors,

- Biodiversity, and Ecosystem Services. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 12(2), 72–79.
- Sarangi, R., .M, J., Sharma, R., Das, A., MALI, D. R. K., Ramalingam, L., Kizhakudan, S., Kumar, A., Samal, Dr. R., & Prakash, C. (2023). Multiple ocean parameter-based potential fishing zone (PFZ) location generation and validation in the Western Bay of Bengal. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196.
- Satheesh, S., & El-Sherbiny, M. M. (2022). Chapter 7 - Ecology, distribution, and biogeography of benthos. In P. S. Godson, S. G. T. Vincent, & S. Krishnakumar (Eds.), *Ecology and Biodiversity of Benthos* (pp. 251–285). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821161-8.00006-4>
- Schmidtko, S., et al. (2017). Decline in global oceanic oxygen content. *Nature*.
- Science Learning Hub. (2024, October 16). Marine trophic pyramid. The University of Waikato Te Whare Wānanga o Waikato. <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/281-marine-trophic-pyramid>
- Scott, J., Cameron, G., Goodenough, A., Hawkins, D., Koenig, J., Lück, M., Papachristodoulou, D., Snape, A., Yeoman, K., & Goodwin, M. (2022). *Communities*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/hesc/9780198783688.003.0067>
- Selvaraj, H. (2024). Harnessing the ocean’s pharmacy: marine bioactive compounds as next-generation therapeutics. *Natural Product Research*, 1–2. <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2373965>
- Setiawan, I., et al. (2018). Pollution levels in mangrove ecosystems: A case study in Jakarta Bay. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(5), 1-12.
- Short, A. D., & Wright, L. D. (1983). "Physical Processes on Beaches." *Oceanography and Marine Biology*.
- Short, F. T., Polidoro, B., Livingstone, S. R., Carpenter, K. E., Bandeira, S., Bujang, J. S., Calumpong, H. P., Carruthers, T. J. B., Coles, R. G., Dennison, W. C., Erftemeijer, P. L. A., Fortes, M. D., Freeman, A. S.,

- Jagtap, T. G., Kamal, A. H. M., Kendrick, G. A., Judson Kenworthy, W., La Nafie, Y. A., Nasution, I. M., ... Zieman, J. C. (2011). Extinction risk assessment of the world's seagrass species. *Biological Conservation*, 144(7), 1961–1971.
- Silva, E., Marco, A., da Graça, J., Pérez, H., Abella, E., Patino-Martinez, J., Martins, S., & Almeida, C. (2017). Light pollution affects nesting behavior of loggerhead turtles and predation risk of nests and hatchlings. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 173, 240–249. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.06.006>
- Sindonews. 2023. 7 fakta unik remora, ikan yang selalu menempel erat dengan hiu. <https://tekno.sindonews.com/read/1270411/768/7-fakta-unik-remora-ikan-yang-selalu-menempel-erat-dengan-hiu-1701907976>
- Singh, M., Gupta, N., Gupta, P., Doli, Mishra, P., & Yadav, A. K. (2023). Discovery of Novel and Biologically Active Compounds from Algae. 1–40. <https://doi.org/10.1002/9781119857860.ch16>
- Siregar, L. L., Hutabarat, S., & Muskananfolo, M. R. (2014). Distribusi fitoplankton berdasarkan waktu dan kedalaman yang berbeda di perairan pulau menjangan kecil karimunjava. *Management of Aquatic Resources Journal*, 3(4), 9–14. <https://doi.org/10.14710/MARJ.V3I4.7026>
- Siringoringo, R. M., Sari, N. W. P., Giyanto, Muhammad Abrar, Kunto Wibowo, Puji Rahmadi, Oksto Ridho Sianturi, Irfan Kampono, Munasik, Beginer Subhan, Muhammad Hafizt, & Raden Sutiadi. (2023). Buku Panduan Penyelaman Ilmiah Biologi Laut dan Kesehatan Keselamatan Kerja Bawah Air. In Bambang Trimansyah, N. W. P. Sari, P. Rahmadi, R. Syahrizal, & R. M. Siringoringo (Eds.), *Buku Panduan Penyelaman Ilmiah Biologi Laut dan Kesehatan Keselamatan Kerja Bawah Air (Issue January)*. BRIN. <https://doi.org/10.55981/brin.654>
- Smith, A. D. M., Brown, C. J., Brown, C. J., Bulman, C. M., Fulton, E. A., Johnson, P., Kaplan, I. C., Lozano-Montes, H., Mackinson, S., Marzloff, M. P., Marzloff, M. P., Shannon, L. J., Shin, Y.-J., Shin, Y.-J.,

- & Tam, J. (2011). Impacts of Fishing Low-Trophic Level Species on Marine Ecosystems. *Science*, 333(6046), 1147–1150.
- Smith, C., De Leo, F., Bernardino, A., Sweetman, A., & Martinez Arbizu, P. (2008). Abyssal food limitation, ecosystem structure and climate change. *Trends in Ecology & Evolution*, 23, 518–528.
- Snelgrove, P. V. R. (1999). Getting to the Bottom of Marine Biodiversity: Sedimentary Habitats: Ocean bottoms are the most widespread habitat on Earth and support high biodiversity and key ecosystem services. *BioScience*, 49(2), 129–138.
- Snelgrove, P. V. R., & Danovaro, R. (2023). Marine Biodiversity. *Ecology*. <https://doi.org/10.1093/obo/9780199830060-0245>
- Solé, M., Kaifu, K., Mooney, T. A., Nedelec, S. L., Olivier, F., Radford, A. N., Vazzana, M., Wale, M. A., Semmens, J. M., Simpson, S. D., Buscaino, G., Hawkins, A., Aguilar de Soto, N., Akamatsu, T., Chauvaud, L., Day, R. D., Fitzgibbon, Q., McCauley, R. D., & André, M. (2023). Marine invertebrates and noise. *Frontiers in Marine Science*, 10(March), 1–34. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1129057>
- Somero, G. N. (2010). The physiology of climate change: how potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine ‘winners’ and ‘losers.’ *Journal of Experimental Biology*, 213(6), 912–920.
- Somov, A. A. (2015). The composition, structure, and dynamics of the nekton of the upper epipelagic layer in the Aleutian and Commander basins, western Bering Sea, in the fall seasons of 2002–2013. *Russian Journal of Marine Biology*, 41(7), 507–527. <https://doi.org/10.1134/S1063074015070068>
- Song, P., Zhang, J., Lin, L., Xu, Z., & Zhu, X. (2012). Nekton species composition and biodiversity in Taiwan Strait. *Biodiversity Science*, 20(1), 32–40. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1003.2012.09142>
- Spencer, G.E & Rothwell, C.M. 2013. Behavioural and network plasticity following conditioning of the aerial respiratory response of pulmonate mollusc. *Canadian Journal of Zoology*, 91(6), 382 – 390. DOI: 10.1139/cjz-2012-0291.

- Sprintall, J., Gordon, A., Koch-Larrouy, A., Lee, T., Potemra, J., Pujiana, K., & Wijffels, S. (2014). The Indonesian Seas and their impact on the Coupled Ocean-Climate System. *Nature Geoscience*, 7.
- Starovoytov, A. N. (2024). Results of the trawl survey of nekton and macroplankton during preanadromous migrations of pacific salmon in the North-West Pacific in 2023. *Известия Тихоокеанского Научно-Исследовательского Рыбохозяйственного Центра*.  
[https://doi.org/10.26428/losos\\_bull18-2024-157-170](https://doi.org/10.26428/losos_bull18-2024-157-170)
- Steenbeek, J. (2024). Ecosystem modelling for the ocean decade - facing the challenge [Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya].  
<https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-417801>
- Sterner, R. W., & Elser, J. J. (2002). Ecological Stoichiometry: Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. In *Journal of Plankton Research* (Vol. 25, Issue 9). Princeton University Press.
- Sterner, R., & Elser, J. J. (2002). Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements From Molecules to The Biosphere (p. 439).
- Straile, D. (1997a). Gross growth efficiencies of protozoan and metazoan zooplankton and their dependence on food concentration, predator-prey weight ratio, and taxonomic group. *Limnology and Oceanography*, 42(6), 1375–1385.
- Straile, D. (1997b). Gross growth efficiencies of protozoan and metazoan zooplankton and their dependence on food concentration, predator-prey weight ratio, and taxonomic group. *Limnology and Oceanography*, 42(6), 1375–1385.
- Strayer, D. L. (2009). Benthic Invertebrate Fauna, Lakes and Reservoirs (pp. 191–204). <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00161-7>
- Sun, H. (2024). The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems. *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection*, 1(10).  
<https://doi.org/10.61173/0bk963>
- Sunoko, R., & Huang, H.-W. (2014). Indonesia tuna fisheries development and future strategy. *Marine Policy*, 43, 174–183.

- Supriyadi, I. H., Iswari, M. Y., Rahmawati, S., Riniatsih, I., Suyarso, & Hafizt, M. (2024). Seagrass Ecosystems in Eastern Indonesia: Status, Diversity, and Management Challenges. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 29(4), 503–518.
- Suryanti. 2019. Buku ajar “ bioekologi phylum Echinodermata”. Undip Press, Semarang.
- Susanto, R., Gordon, A., & Zheng, Q. (2001). Upwelling along the coasts of Java and Sumatra and its relation to ENSO. *Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT*, 28, 1599–1602.
- Syamsuddin, R., & Rachmawati, I. (2021). *Fisiologi dan Anatomi Ikan Laut Tropis*. Makassar: Penerbit UNHAS Press.
- Tian, C., Shen, S., Sun, Z., Xu, D., Luo, P., Song, Y., & Shen, C. (2024). Research on a Marine Animal Behavior Recording Tag System Based on Combined Positioning and Recovery. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(12), 2292.
- Tian, Z. (2013). Advances in research of marine microbial diversity and molecular ecology. *Microbiology, China*. [https://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-WSWT201304015.htm](https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-WSWT201304015.htm)
- Tihuraa, E. F., Agustiani, E. L., & Rahmawati, K. (2020). Karakter Anatomi Daun sebagai Bentuk Adaptasi Tumbuhan Penyusun Zonasi Mangrove di Banggai Kepulauan, Provinsi Sulawesi Tengah. *Jurnal Kelautan Tropis*, 23(2), 103–112. <https://doi.org/10.14710/jkt.v23i2.7048>
- Tosetto, E. G., Lengaigne, M., Júnior, M. N., Lett, C., Neumann-Leitão, S., & Bertrand, A. (2025). Global Coastal Biogeographic Boundaries: Unveiling the Nature of Processes Shaping the Distribution of Marine Biodiversity. *Diversity and Distributions*, 31(9). <https://doi.org/10.1111/ddi.70083>
- Traon, P.-Y., Ali, A., Alvarez Fanjul, E., Aouf, L., Axell, L., Aznar, R., Ballarotta, M., Behrens, A., Mounir, B., Bentamy, A., Bertino, L., Bowyer, P., Brando, V., Breivik, L., Buongiorno Nardelli, B., Cailleau, S., Ciliberti, S., Clementi, E., Colella, S., & Zuo, H. (2017). The Copernicus Marine Environmental Monitoring Service: Main

- Scientific Achievements and Future Prospects. *Mercator Ocean Journal*, 56.
- Tuaputti, H., & Alimudi, S. (2022). *Bahan ajar biologi laut* (T. Azhari (ed.)). Deepublish Digital.
- Valiela, I., Bowen, J., & York, J. (2009). Mangrove Forests: One of the World's Threatened Major Tropical Environments. *BioScience*, 51, 807–815.
- Van Dover, C. L. (2000). *The ecology of deep-sea hydrothermal vents*. In *Limnology and Oceanography*. Princeton University Press.
- Veeranjaneyulu, R., Govindarajan, D., Subramanian, C., Devi, D. U., Banerjee, S., Edpuganti, S. K., & Upadhyay, S. (2024). Marine Ecosystem Monitoring: Applying Remote Sensing and AI to Track and Predict Coral Reef Health. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 7(4), 486–499. <https://doi.org/10.1007/s41976-024-00141-z>
- Veron, J. E. N. (2009). *Corals of the World*. Australian Institute of Marine Science.
- Waite, T. D., Kazumi, J., Lane, P. V. Z., Farmer, L. L., Smith, S. G., Smith, S. L., Hitchcock, G. L., & Capo, T. R. (2003). Removal of natural populations of marine plankton by a large-scale ballast water treatment system. *Marine Ecology Progress Series*, 258, 51–63.
- Ward, D., Melbourne-Thomas, J., Pecl, G., Evans, K., Green, M., McCormack, P., Novaglio, C., Trebilco, R., Bax, N., Brasier, M., Cavan, E., Edgar, G., Hunt, H., Jansen, J., Jones, R., Lea, M., Makomere, R., Mull, C., Semmens, J., ... Layton, C. (2020). Safeguarding marine life: conservation of biodiversity and ecosystems. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 32, 65–100.
- Weiss, M. N., John, R. E., Caro-Ruiz, A. M., Ellifrit, D. K., Grimes, C. A., Redmond, T. A., Vargas, A. A., & Croft, D. P. (2025). Manufacture and use of allogrooming tools by wild killer whales. *Current Biology*, 35(12), R599–R600. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2025.04.021>
- Wicaksono, E. A., Tahir, A., & Werorilangi, S. (2020). Preliminary study on microplastic pollution in surface-water at Tallo and Jeneberang Estuary, Makassar, Indonesia. *AAFL Bioflux*, 13(2), 902–909.

- Willig, M. R., & Presley, S. J. (2013). Latitudinal Gradients of Biodiversity. In Levin S.A (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity* (2nd ed., Vol. 44, pp. 612–626). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00086-1>
- Woodson, C. B., & Litvin, S. Y. (2015). Ocean fronts drive marine fishery production and biogeochemical cycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(6), 1710–1715.
- Woodson, C. B., & McManus, M. A. (2007). Foraging behavior can influence dispersal of marine organisms. *Limnology and Oceanography*, 52(6), 2701–2709. <https://doi.org/10.4319/LO.2007.52.6.2701>
- Woodward, G., Gierach, M. M., Schaffer, S., Chu, S., Estlin, T., Castano, R., & Li, Z. (2017). Adaptive AUV in-situ sensing system. [https://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=8232379](https://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=8232379)
- World Bank. (2016). *The Role of Mangroves in Coastal Protection*. World Bank Group.
- World Bank. (2021). *Logistics Performance Index*.
- Worm, B., Barbier, E., Beaumont, N., Duffy, J., Folke, C., Halpern, B., Jackson, J., Lotze, H., Micheli, F., Palumbi, S., Sala, E., Selkoe, K., Stachowicz, J., & Watson, R. (2006). Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. *Science (New York, N.Y.)*, 314, 787–790.
- Wouthuyzen, S., Abrar, M., & Lorwens, J. (2017). A comparison between the 2010 and 2016 El-Ninō induced coral bleaching in the Indonesian waters. <https://www.jrisetgeotam.com/index.php/proceedings/article/view/886>
- Wouthuyzen, S., Abrar, M., Corvianawatie, C., Kusumo, S., Yanuar, Y., Darmawan, D., Yennafri, Y., Salatalohi, A., Hanif, A., Permana, S., & Arafat, M. Y. (2020). Kecenderungan Naiknya Suhu Permukaan Laut dan Resiliensi Karang Setelah Kejadian Pemutihan Karang 2010 dan 2016 di Taman Wisata Perairan (TWP) Pulau Pieh, Padang, Sumatra Barat. 5(1), 1–18. <https://doi.org/10.14203/OLDI.2020.V5I1.236>

- Wu, J., & Xuan, J. (2023). Analysis of the Functions and Values of Marine Ecosystems. *International Journal of Marine Science*.
- Xu, G., & Zheng, W. (1994). Nektons of China Seas (pp. 281–290). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-0862-1\\_28](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0862-1_28)
- Yamagata, T., Behera, S., Luo, J.-J., Masson, S., Jury, M., & Rao, S. (2004). Coupled Ocean-Atmosphere Variability in the Tropical Indian Ocean. *Earth's Climate: The Ocean- Atmosphere Interaction. Geophysics Monograph Series*, 147.
- Yamano, H., Sugihara, K., & Nomura, K. (2011). Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures. *Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT*, 38.
- Yancey, P. H. (2005). "Compatible Solutes: A Key to the Success of Deep-Sea Animals." *Journal of Experimental Biology*, 208(19), 3619-3624.
- Yeoh, D. E., Valesini, F. J., Hallett, C. S., Abdo, D. A., & Williams, J. (2017). Diel shifts in the structure and function of nearshore estuarine fish communities. *Journal of Fish Biology*, 90(4), 1214–1243. <https://doi.org/10.1111/jfb.13222>
- Zaccone, G., Lauriano, E.R & Capilo, G. 2018. Air breathing in fish: air – breathing organs and control of respiration: nerves and neurotransmitters in the air – breathing organs and the skin. *Acta Histochemica*, 120(7): 630 – 641. *Elife*, 12, 1 – 19. <https://doi.org/10.7554/eLife.90211>
- Zainuri, M. I., Indriyawati, N., Syarifah, W., & Fitriyah, A. (2022). Korelasi Intensitas Cahaya Dan Suhu Terhadap Kelimpahan Fitoplankton Di Perairan Estuari Ujung Piring Bangkalan. *Buloma: Buletin Oseanografi Marina*, 12(1), 20–26. <https://doi.org/10.14710/buloma.v12i1.44763>
- Zhang, K., et al. (2019). Coastal infrastructure and climate change: The role of adaptation strategies. *Coastal Management*, 47(4), 328-347.
- Zhang, Y., Wang, X., Han, J., Xiao, J., Yong, Y., Yu, C., Yue, N., Sun, J., He, K., hao, W., Zhang, T., Wang, B., Wang, D & Yang, X. 2025. Dinamic simulations of feeding and respiration of the early Cambrian

periderm – bearing cnidarian polyps. *Elife Science*, 12, 1 - 19.  
<https://doi.org/10.7554/eLife.90211>

## BIODATA PENULIS



**Dr. Jacomina Tahapary, S.Pi., M.Si** lahir di Ambon pada tanggal 19 Juni 1971. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Manajemen Sumber Daya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Pattimura tahun 1996. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Sistem dan Pemodelan Perikanan Tangkap, Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor tahun 2010. Pendidikan Program Doktor diselesaikan pada tahun 2023 pada Program Studi Teknologi Perikanan Laut, Institut Pertanian Bogor. Penulis bekerja sebagai tenaga pengajar di Program Studi Teknologi Penangkapan Ikan, Politeknik Perikanan Negeri Tual sejak tahun 2005-sekarang. Penulis aktif mempublikasikan artikel pada jurnal nasional dan internasional bereputasi; aktif sebagai editor jurnal, editor buku, dan reviewer pada jurnal nasional. Buku Referensi yang telah ditulis oleh penulis, antara lain Dasar-Dasar Penangkapan Ikan, Sosiologi Perikanan, Oseanografi, Teknologi Penangkapan, Eksploratori Penangkapan Ikan, dan Desain dan Konstruksi Alat Penangkapan Ikan.



**Juharni, S.Pi., M.Si.** Lahir di Analahumbuti 11 November 1977, Selepas meraih gelar sarjana di Program studi Budidaya Perairan di angkat menjadi dosen tetap Universitas Khairun Ternate pada Tahun 2004 di program studi budidaya perairan hingga saat ini. Aktifitas Juharni lebih banyak dihabiskan untuk mengajar di Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Khairun Ternate.



**Andika Putriningtias, S. Kel., M.Si** lahir di Semarang pada tanggal 8 Februari 1987. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro pada tahun 2011 dan pendidikan magister pada Program Studi Ilmu Kelautan, Pascasarjana Institut Pertanian Bogor tahun 2014. Penulis bekerja sebagai tenaga pengajar di Program Studi Akuakultur, Fakultas Pertanian Universitas Samudra, Langsa – Aceh sejak Januari 2016 - sekarang.



**Didha Andini Putri** lahir di Tegal, 20 Juni 1989. Pada tahun 2012 menamatkan pendidikan S1- Ilmu Kelautan pada program studi Ilmu Kelautan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Diponegoro Semarang. Kemudian penulis melanjutkan studinya pada Magister Ilmu Kelautan FPIK UNDIP.

Pada tahun 2015 penulis menamatkan pendidikan magister di Universitas Diponegoro Semarang pada program studi Ilmu Kelautan. Saat ini penulis adalah Dosen Tetap dengan bidang keahlian Biologi dan Bioteknologi Perikanan pada Program Studi Pemanfaatan Sumber Daya Perikanan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas 17 Agustus 1945 Cirebon. Selama menjadi Dosen, penulis aktif mempublikasikan hasil penelitiannya dalam pertemuan ilmiah di berbagai seminar nasional dan internasional, diantaranya yaitu tentang The 5 th International Conference on Tropical and Coastal Region Eco-Development, Seminar dan Workshop Mikrobiologi Perikanan oleh Stasiun Karantina Cirebon, Integrasi Penelitian, Pengembangan, Pengkajian dan Penerapan Kelautan Perikanan, International Online Seminar "shrimp and Fish development, Penerapan Teknik Bioflok Pada Ikan Air Tawar. Penulis pernah lolos pendanaan kegiatan Penelitian Dosen Pemula (PDP) yang diselenggarakan oleh Direktorat Riset Teknologi dan Pengabdian Masyarakat (DRTPM) Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset

dan Teknologi Republik Indonesia di Tahun 2016 dan 2017. Penulis juga pernah menulis Buku Ajar Biologi Perikanan, buku Dasar-dasar Penangkapan Ikan, buku Pengelolaan Ekowisata Pesisir dan Laut, buku Ekologi Pesisir dan Laut, Buku Mikrobiologi Laut (Keanekaragaman, Fungsi dan Aplikasi) . Penulis dapat dihubungi [didhaandiniputri@ymail.com](mailto:didhaandiniputri@ymail.com).



**Nurul Fatimah Yunita, S.Kel., M.T** lahir di Sakra (Lombok Timur) pada tanggal 4 Juni 1989. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada program studi Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Kelautan, Universitas Diponegoro dan selesai pada tahun 2012. Kemudian melanjutkan pendidikan magister pada program studi Teknologi Kelautan dengan mengambil peminatan Teknik Manajemen Pantai, Departemen Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan lulus pada tahun 2017. Saat ini penulis bekerja sebagai tenaga pengajar pada program studi Agribisnis Perikanan dan Kelautan, Jurusan Agribisnis, Politeknik Negeri Sambas pada Juli 2019 – sekarang. Penulis aktif mengikuti seminar nasional maupun internasional dan dipublikasikan dalam prosiding baik nasional maupun internasional.



**Irwan Ismail, S.Pd.,M.Si**, lahir di Taeno Negeri Rumah Tiga - Kota Ambon pada tanggal 15 November 1986. Penulis adalah dosen tetap di Prodi manajemen Rekayasa Budidaya Laut Politeknik Perikanan Negeri Tual – Maluku Tenggara dari tahun 2022 - sekarang. Pendidikan S1 ditempuh di Prodi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan Dan Ilmu Pendidikan Universitas Pattimura - Ambon dan lulus tahun 2010, sementara pendidikan S2 ditempuh di Program Pascasarjana Prodi Ilmu Kelautan Fakultas Perikanan Dan Ilmu Kelautan Universitas Pattimura - Ambon dan lulus tahun 2016. Penulis saat ini memiliki fokus riset pada pakan alami terutama tentang Kultur Plankton



**Nur Ikhsan, S.Pi., M.Si.**, lahir di Bau-Bau pada 21 April 1990, menyelesaikan pendidikan Sarjana Manajemen Sumberdaya Perairan di Universitas Halu Oleo (UHO) Kendari pada tahun 2012, dan memulai karir sebagai staf administrasi serta asisten dosen untuk mata kuliah Avertebrata Air dan Olahraga Air. Setelah melanjutkan studi Magister di Institut Pertanian Bogor (IPB) dan meraih gelar M.Si. pada tahun 2015, Penulis kembali ke UHO sebagai Dosen Tetap di Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan hingga tahun 2017. Sejak tahun 2017-sekarang, Penulis mengabdikan sebagai Dosen Tetap di Akademi Komunitas Kelautan dan Perikanan (AKKP) Wakatobi. Selain mengajar, Penulis juga dipercaya memegang berbagai jabatan penting, termasuk Ketua Program Studi Ekowisata Bahari, Kepala Unit Sertifikasi, Pembina Kerohanian Taruna, Kepala Laboratorium Selam dan Ekologi Pesisir & Laut, serta Kepala Pusat Pembinaan Karakter Taruna. Kegemarannya menulis telah menghasilkan beberapa buku yang berhasil dipublikasikan. Penulis juga rutin menjadi narasumber dalam kegiatan Peningkatan Kapasitas Masyarakat yang diselenggarakan oleh Akademi Komunitas Kelautan dan Perikanan Wakatobi, WWF Indonesia dan Balai Taman Nasional Wakatobi.



**Dr. Ummu Salma, S.Si., M.Si.** merupakan dosen pada Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro, yang menekuni kajian pemodelan spasial ekosistem pesisir, terutama mangrove dan lamun. Perjalanan akademiknya ditempuh dari Sarjana Oseanografi di Universitas Diponegoro (2018), Magister Ilmu Kelautan di Institut Pertanian Bogor (2021), hingga Doktor Ilmu Kelautan di universitas yang sama (2024). Selain mengajar dan meneliti, ia aktif menulis dan menyebarkan gagasan melalui publikasi ilmiah dan forum akademik.



**Iwan Kuncoro, S.Si., M.Si.** lahir di Singkawang, 19 Desember 1996. Penulis menempuh pendidikan sarjana pada Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura, dan berhasil menyelesaikan studi pada tahun 2019. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang Magister Ilmu Kelautan di Institut Pertanian Bogor (IPB University) pada tahun 2020 dan lulus pada tahun 2023.

Sejak tahun 2025, penulis berkarier sebagai dosen tetap pada Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Tanjungpura. Bidang keilmuan yang ditekuni meliputi biodiversitas kelautan, ekologi laut, serta konservasi sumber daya pesisir dan laut. Penulis aktif melakukan penelitian terkait identifikasi keanekaragaman hayati menggunakan pendekatan molekuler dan ekologi lapangan, khususnya pada ekosistem mangrove, terumbu karang, dan perairan pesisir. Dalam bidang pengabdian masyarakat, penulis terlibat dalam berbagai program pemberdayaan masyarakat pesisir, seperti pelatihan konservasi mangrove, budidaya berkelanjutan, serta edukasi tentang pentingnya menjaga keanekaragaman hayati laut bagi generasi mendatang.



**Vidya Octaverina, S.Si., M.Si.** lahir di Palembang pada tanggal 29 Oktober 1997. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Bengkulu pada tahun 2019. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Magister Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro tahun 2023. Penulis bekerja sebagai dosen PNS di Program Studi Sains Lingkungan Kelautan, Fakultas Sains, Institut Teknologi Sumatera Juni 2025-sekarang.



**Dr. Emmy Syafitri, S.Pi, M.Si** lahir di Medan pada tanggal 27 Agustus 1981. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor (IPB) tahun 2003. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Ilmu Kelautan, Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor tahun 2012 melalui program Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPPDN). Pendidikan Program Doktor selesai pada tahun 2016 di Program Studi Manajemen Sumberdaya Pantai, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Diponegoro melalui program Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPPDN). Penulis bekerja sebagai dosen PNS LLDIKTI I dpk di Program Studi Akuakultur, Fakultas Perikanan Universitas Dharmawangsa Medan tahun 2005-sekarang. Penulis aktif mengikuti seminar, mempublikasi artikel pada jurnal nasional dan internasional bereputasi; aktif sebagai reviewer pada jurnal nasional dan internasional; aktif sebagai penulis dan editor buku, seperti buku : Ekofisiologi Hewan Air, Bioprospeksi dan Remediasi Kelautan, Crustacea. Penulis berperan juga sebagai Editor in Chief pada jurnal Reswara dan Jurnal Aquaculture Indonesia, jurnal nasional akreditasi SINTA 4. Selain itu Penulis juga diberi Amanah dan tanggung jawab sebagai Kepala bidang Penerbitan dan Publikasi Ilmiah Universitas Dharmawangsa tahun 2025 – sekarang.

# BIOLOGI LAUT

Biologi Laut merupakan cabang ilmu biologi yang mempelajari kehidupan di laut, meliputi struktur, fungsi, perilaku, dan interaksi berbagai organisme yang hidup di lingkungan laut. Biologi Laut juga membahas hubungan antara biota laut dengan faktor fisik, kimia, dan geologis yang memengaruhi ekosistem laut.

Dalam Biologi Laut, dikaji berbagai jenis organisme mulai dari mikroorganisme seperti plankton dan bakteri laut, hingga organisme besar seperti ikan, mamalia laut, dan tumbuhan laut. Selain itu, Biologi Laut juga menelusuri dinamika ekosistem penting seperti terumbu karang, padang lamun, dan mangrove, yang berperan besar dalam menjaga keseimbangan ekosistem pesisir dan laut.

Ilmu ini tidak hanya berfokus pada aspek biologi semata, tetapi juga mencakup konservasi sumber daya laut, adaptasi biota terhadap lingkungan laut, serta peran manusia dalam menjaga keberlanjutan ekosistem laut. Dengan memahami Biologi Laut, diharapkan muncul kesadaran dan tindakan nyata untuk melindungi serta mengelola kekayaan hayati laut secara berkelanjutan.



Penerbit LSO Creative  
Jl. Pendidikan No. 42, Jakabaring Selatan, Kec. Rambutan,  
Kab. Banyuasin, Kota Palembang, Sumatera Selatan. 30967  
Telp : 083141616988  
Email : [cvslocreative@gmail.com](mailto:cvslocreative@gmail.com)  
Website : <https://lsocreative.id/>

