

Rozirwan Rozirwan

Final_ Buku Plankton_Prof. Dr. Rozirwan

 Buku Plankton

Document Details

Submission ID

trn:oid:::3618:134646598

Submission Date

9 Apr 2026, 12:31 GMT+7

Download Date

9 Apr 2026, 12:45 GMT+7

File Name

Final_ Buku Plankton_Prof. Dr. Rozirwan.docx

File Size

18.3 MB

174 Pages

55,608 Words

370,715 Characters

19% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text

Top Sources

- 5%  Internet sources
- 2%  Publications
- 17%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 5% Internet sources
- 2% Publications
- 17% Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Student papers	Sriwijaya University on 2025-10-09	3%
2	Student papers	Sriwijaya University on 2025-10-09	3%
3	Student papers	Sriwijaya University on 2025-10-09	2%
4	Student papers	Sriwijaya University on 2025-10-09	2%
5	Student papers	Sriwijaya University on 2025-10-09	2%
6	Student papers	Sriwijaya University on 2025-10-09	1%
7	Internet	text-id.123dok.com	<1%
8	Student papers	Sriwijaya University on 2025-10-09	<1%
9	Internet	repository.ub.ac.id	<1%
10	Student papers	Sriwijaya University on 2021-01-18	<1%
11	Internet	pubmed.ncbi.nlm.nih.gov	<1%

12	Student papers	Sriwijaya University on 2023-06-26	<1%
13	Student papers	Universitas Djuanda on 2025-08-06	<1%
14	Internet	www.researchgate.net	<1%
15	Student papers	Universitas Tanjungpura on 2025-11-21	<1%
16	Internet	ejournal2.undip.ac.id	<1%
17	Internet	ejournal.undip.ac.id	<1%
18	Student papers	Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung on 2025-07-29	<1%
19	Student papers	Sriwijaya University on 2023-05-19	<1%
20	Student papers	Sriwijaya University on 2019-07-24	<1%
21	Student papers	Universitas Djuanda on 2025-08-09	<1%
22	Student papers	Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar on 2026-02-14	<1%
23	Internet	ojs.umada.ac.id	<1%
24	Internet	www.plankton.jp	<1%
25	Student papers	Universitas Bengkulu on 2026-03-16	<1%

26	Internet	mahasiswaindonesia.id	<1%
27	Student papers	Universitas Kristen Satya Wacana on 2023-12-06	<1%
28	Internet	id.wikipedia.org	<1%
29	Internet	www.scribd.com	<1%
30	Student papers	Politeknik Negeri Lampung on 2024-10-05	<1%
31	Internet	pt.scribd.com	<1%
32	Student papers	Sriwijaya University on 2022-11-22	<1%
33	Student papers	UIN Maulana Malik Ibrahim Malang on 2025-06-03	<1%
34	Student papers	UIN Maulana Malik Ibrahim Malang on 2025-06-04	<1%
35	Internet	repository.unsri.ac.id	<1%
36	Student papers	UPN Veteran Yogyakarta on 2025-11-07	<1%
37	Student papers	Universitas Pendidikan Ganesha on 2025-04-29	<1%
38	Student papers	Sriwijaya University on 2021-01-25	<1%
39	Student papers	Sriwijaya University on 2021-01-18	<1%

40	Student papers	Universitas Djuanda on 2025-03-04	<1%
41	Student papers	Universitas Muhammadiyah Sukabumi on 2024-08-27	<1%
42	Student papers	Padjadjaran University on 2026-02-08	<1%
43	Internet	eprints.unram.ac.id	<1%
44	Internet	karyailmiah.id	<1%
45	Internet	pastiuniks.blogspot.com	<1%
46	Student papers	Sriwijaya University on 2023-07-20	<1%
47	Student papers	Universitas Airlangga on 2025-02-20	<1%
48	Student papers	Universitas Airlangga-1 on 2025-12-01	<1%
49	Student papers	Universitas Pendidikan Indonesia on 2026-01-22	<1%
50	Internet	ejournal-balitbang.kkp.go.id	<1%
51	Internet	jurnal.ubt.ac.id	<1%
52	Internet	ojs.umrah.ac.id	<1%
53	Internet	repository.radenintan.ac.id	<1%

54	Internet	sosiologi.fisip.uns.ac.id	<1%
55	Student papers	Universitas Kristen Duta Wacana on 2024-12-05	<1%
56	Internet	ejournal.unsrat.ac.id	<1%
57	Internet	repository.usd.ac.id	<1%
58	Publication	Endang Sri Utami, Henny Fitrinawati. "Status Kesuburan Berdasarkan Fitoplankto...	<1%
59	Student papers	Padjadjaran University on 2017-01-25	<1%
60	Student papers	Sriwijaya University on 2022-09-22	<1%
61	Student papers	Universitas Airlangga on 2024-03-07	<1%
62	Student papers	Universitas Bangka Belitung on 2026-01-27	<1%
63	Student papers	Universitas Diponegoro on 2022-12-09	<1%
64	Internet	eudl.eu	<1%
65	Internet	penerbit.brin.go.id	<1%
66	Internet	repository.dinamika.ac.id	<1%
67	Student papers	Padjadjaran University on 2025-04-15	<1%

68	Internet	asianpost.id	<1%
69	Student papers	Institut Pertanian Bogor on 2024-08-29	<1%
70	Student papers	Universitas Diponegoro on 2017-08-06	<1%
71	Student papers	Universitas Maritim Raja Ali Haji on 2025-11-24	<1%
72	Student papers	Universitas Muhammadiyah Buton on 2025-11-21	<1%
73	Internet	ji.unbari.ac.id	<1%
74	Internet	look-better.icu	<1%
75	Internet	repositori.umrah.ac.id	<1%
76	Internet	thousands-passed.xyz	<1%
77	Publication	Mardiyah Ulpa, Mahya Ihsan, Dawam Suprayogi. "Analysis of Phytoplankton Dive...	<1%
78	Student papers	Universitas Airlangga on 2019-08-25	<1%
79	Internet	jurnal.fpik.umi.ac.id	<1%
80	Internet	maretbio01cs.weebly.com	<1%
81	Internet	nurulstmik.wordpress.com	<1%

82	Internet	siedoo.com	<1%
83	Internet	victorvolvox.wordpress.com	<1%
84	Internet	www.guruprajab.com	<1%
85	Student papers	Sriwijaya University on 2019-07-26	<1%
86	Student papers	Sriwijaya University on 2019-09-23	<1%
87	Student papers	Sriwijaya University on 2021-01-18	<1%
88	Student papers	UIN Raden Intan Lampung on 2019-10-22	<1%
89	Student papers	UIN Sunan Gunung Djati Bandung on 2017-12-07	<1%
90	Student papers	Universitas Diponegoro on 2022-12-09	<1%
91	Student papers	Universitas Diponegoro on 2022-12-09	<1%
92	Student papers	Universitas Diponegoro on 2022-12-09	<1%
93	Student papers	Universitas Jenderal Soedirman on 2018-07-10	<1%
94	Student papers	Universitas Pendidikan Indonesia on 2026-01-31	<1%
95	Student papers	Universiti Malaysia Terengganu UMT on 2021-06-29	<1%

96	Internet	danielpinem.wordpress.com	<1%
97	Internet	ejournal3.unud.ac.id	<1%
98	Internet	pinegreenwoods.blogspot.com	<1%
99	Internet	www.bio-conferences.org	<1%
100	Publication	Abraham M. Rimper, Veibe Warouw, Joice R.T.S.L Rimper, Rosita A.J. Lintang, Med...	<1%
101	Publication	Husain Latuconsina, Madehusen Sangadji, La Sarfan. "Struktur Komunitas Ikan P...	<1%
102	Publication	Khoirunnisa, Dian Iswandaru, Christine Wulandari, Susni Herwanti, Novriyanti, A...	<1%
103	Student papers	Udayana University on 2025-09-08	<1%
104	Student papers	Universitas Airlangga on 2025-05-27	<1%
105	Student papers	Universitas Andalas on 2025-08-19	<1%
106	Student papers	Universitas Borneo Tarakan on 2026-03-03	<1%
107	Student papers	Universitas Katolik Santo Agustinus Hippo on 2026-02-02	<1%
108	Student papers	Universitas Maritim Raja Ali Haji on 2025-08-14	<1%
109	Internet	docplayer.info	<1%

110	Internet	eprints.undip.ac.id	<1%
111	Internet	es.scribd.com	<1%
112	Internet	hikmahyoso.blogspot.com	<1%
113	Internet	journal.trunojoyo.ac.id	<1%
114	Internet	kusmandanuunindra4.blogspot.com	<1%
115	Internet	nataliairda36.wordpress.com	<1%
116	Internet	ojs3.unpatti.ac.id	<1%
117	Internet	repository.ar-raniry.ac.id	<1%
118	Internet	repository.penerbiteureka.com	<1%
119	Internet	repository.unhas.ac.id	<1%
120	Internet	www.coursehero.com	<1%
121	Publication	Anaid López-Sánchez, Ana Laura Silva-Gálvez, Óscar Aguilar-Juárez, Carolina Sené...	<1%
122	Publication	Bismi Rahma Firna, Sandi Fransisco Pratama. "Adaptasi Struktur Histologi Insang...	<1%
123	Publication	Dzaky, Hasim, Mulis. "Effect of Using Different Shelter and Feed Types on Growt...	<1%

124	Student papers	FAKULTAS KESEHATAN MASYARAKAT on 2025-08-13	<1%
125	Publication	Fety Widiarti Aptasari, Muhammad Helmi Falah, Budiman Budiman, Baiq Krisnin...	<1%
126	Student papers	Garden Grove Unified School District on 2020-07-01	<1%
127	Publication	Hanny Meirinawati, Mochamad Riza Iskandar. "Karakteristik Fisika dan Kimia Per...	<1%
128	Publication	Komang Iwan Suniada, B. Realino S.. "STUDI PENENTUAN LOKASI UNTUK PENGE...	<1%
129	Publication	Liyatin Gea, A. S. Khouw, Ch. I. Tupan. "Keanekaragaman Gastropoda Pada Habit...	<1%
130	Publication	Nasrullah Bai Arifin, Arifatus Febiana, Febriyani Eka Supriatin, Muhammad Fakhri...	<1%
131	Student papers	Padjadjaran University on 2025-06-18	<1%
132	Student papers	Padjadjaran University on 2025-06-18	<1%
133	Student papers	Politeknik Kesehatan Kemenkes Padang on 2026-03-06	<1%
134	Student papers	Sriwijaya University on 2019-12-04	<1%
135	Student papers	Sriwijaya University on 2021-01-22	<1%
136	Student papers	Sriwijaya University on 2021-01-22	<1%
137	Student papers	Sriwijaya University on 2025-10-09	<1%

138	Student papers	UIN Maulana Malik Ibrahim Malang on 2021-12-01	<1%
139	Student papers	Universitas Andalas on 2024-02-01	<1%
140	Student papers	Universitas Bangka Belitung on 2023-12-04	<1%
141	Student papers	Universitas Bangka Belitung on 2024-10-07	<1%
142	Student papers	Universitas Diponegoro on 2026-01-19	<1%
143	Student papers	Universitas Diponegoro on 2026-01-27	<1%
144	Student papers	Universitas Katolik Widya Mandala on 2019-09-10	<1%
145	Student papers	Universitas Maritim Raja Ali Haji on 2021-02-08	<1%
146	Student papers	Universitas Mataram on 2023-10-02	<1%
147	Student papers	Universitas Negeri Medan on 2024-07-01	<1%
148	Student papers	Universitas PGRI Palembang on 2025-07-01	<1%
149	Student papers	University of Sheffield on 2024-01-09	<1%
150	Internet	beranda.miti.or.id	<1%
151	Internet	budi-prayogi.blogspot.com	<1%

152	Internet	digilib.uin-suka.ac.id	<1%
153	Internet	e-journal.umaha.ac.id	<1%
154	Internet	ejournal.unitomo.ac.id	<1%
155	Internet	ejournal3.undip.ac.id	<1%
156	Internet	etd.repository.ugm.ac.id	<1%
157	Internet	forclime.org	<1%
158	Internet	hal.umontpellier.fr	<1%
159	Internet	id.ecotaf.net	<1%
160	Internet	journal.ugm.ac.id	<1%
161	Internet	limnologi.lipi.go.id	<1%
162	Internet	mikasunisa.blogspot.com	<1%
163	Internet	perbedaan.budisma.net	<1%
164	Internet	repository.ubb.ac.id	<1%
165	Internet	repository.upp.ac.id	<1%

166	Internet	stay-control.xyz	<1%
167	Internet	wisdianto43.blogspot.com	<1%
168	Internet	www.impronetwork.com	<1%
169	Internet	www.infosawit.com	<1%
170	Internet	www.journal.publication-center.com	<1%
171	Internet	www.slideshare.net	<1%
172	Internet	123dok.com	<1%
173	Publication	Eka Sari Wijianti, Nurhadini Nurhadini, Saparin Saparin. "PENINGKATAN KUALITA...	<1%
174	Publication	Ramazan Acar, Ergun Akbas, Cihangir Koycegiz, Musa Esit. "Rainfall trends in the ...	<1%
175	Publication	Ricko Reynalta, Aang Setyawan Anjasmara, Muhammad Imam Fadila, Daisy Rah...	<1%
176	Student papers	UIN Raden Intan Lampung on 2018-12-27	<1%
177	Student papers	UW, Stevens Point on 2023-08-31	<1%
178	Student papers	Universitas Hang Tuah Surabaya on 2026-01-22	<1%
179	Student papers	Universitas Maritim Raja Ali Haji on 2025-04-29	<1%

180	Student papers	Universitas Muhammadiyah Sukabumi on 2024-08-20	<1%
181	Student papers	Universitas Negeri Padang on 2026-04-08	<1%
182	Student papers	Institut Pertanian Bogor on 2025-05-02	<1%
183	Publication	Muhammad Andre Nugraha, Dewi Purnama, Mukti Dono Wilopo, Yar Johan. "KON...	<1%
184	Student papers	Padjadjaran University on 2025-04-15	<1%
185	Student papers	Sriwijaya University on 2020-10-18	<1%
186	Student papers	Universitas Brawijaya on 2022-03-03	<1%
187	Student papers	Universitas Diponegoro on 2022-12-09	<1%
188	Student papers	Universitas Diponegoro on 2026-04-01	<1%
189	Student papers	Universitas Jenderal Soedirman on 2024-11-17	<1%
190	Student papers	Universitas Pendidikan Ganesha on 2025-06-26	<1%
191	Student papers	Universitas Tidar on 2023-07-03	<1%
192	Student papers	Universiti Sains Malaysia on 2014-02-21	<1%
193	Internet	idoc.pub	<1%

PLANKTON: Fondasi Ekosistem Laut

Struktur, Fungsi, dan Dinamika dalam Sistem Pesisir dan Laut

Penulis:

Rozirwan

Nadila Nur Khotimah

Redho Yoga Nugroho

Riris Aryawati

Fauziyah

Iskhaq Iskandar

16

Departemen Ilmu Kelautan

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Sriwijaya

PRAKATA

Kami berterima kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, yang memungkinkan penyusunan dan penyelesaian buku "PLANKTON: Fondasi Ekosistem Laut " ini. Salah satu tujuan buku ini adalah untuk memberikan referensi ilmiah yang lengkap tentang plankton, baik dari aspek dasar hingga aplikatif, yang relevan dengan kemajuan ilmu kelautan dan perairan kontemporer. Makhluk biotik yang hidup di perairan, plankton, memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem akuatik. Plankton adalah produsen dan penghubung utama jaringan makanan dan memainkan peran penting dalam siklus biogeokimia, produktivitas perairan, dan keberlanjutan sumber daya perikanan. Selain itu, plankton berfungsi sebagai bioindikator penting untuk kualitas perairan dan perubahan lingkungan, seperti dampak pencemaran dan perubahan iklim global.

Buku ini disusun secara berurutan, dimulai dengan konsep dasar dan sejarah kajian plankton, klasifikasi, morfologi, dan ekologi plankton, hingga pembahasan khusus mengenai fitoplankton dan zooplankton. Selain itu, buku ini juga memuat metode studi plankton, pemanfaatan plankton sebagai bioindikator, serta aplikasi plankton dalam bidang akuakultur, bioteknologi, dan pembangunan kelautan berkelanjutan. Dengan pendekatan tersebut, diharapkan pembaca memperoleh pemahaman yang utuh dan terintegrasi mengenai peran plankton dalam ekosistem perairan.

Buku ini ditulis untuk mahasiswa, dosen, peneliti, serta praktisi di bidang kelautan, perikanan, dan lingkungan, serta pihak lain yang memiliki ketertarikan terhadap studi ekosistem perairan. Buku ini diharapkan dapat berfungsi sebagai bahan ajar dan referensi ilmiah, dan sumber inspirasi bagi pengembangan penelitian plankton, khususnya di perairan Indonesia yang memiliki keanekaragaman hayati sangat tinggi. Penulis menyadari bahwa buku ini memiliki kelemahan dan memerlukan penyempurnaan. Masukan berupa kritik maupun saran yang bersifat membangun sangat kami nantikan guna penyempurnaan di masa yang akan datang. Kami berharap buku ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam menunjang kegiatan penelitian serta pengelolaan sumber daya perairan secara berkelanjutan.

Indralaya
Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA	1
DAFTAR ISI	3
DAFTAR GAMBAR	6
DAFTAR TABEL	9
BAB I	10
PENDAHULUAN	10
1.1 Definisi dan Konsep Dasar Plankton	10
1.2 Sejarah Kajian Plankton	10
BAB II	17
KLASIFIKASI PLANKTON	17
2.1 Berdasarkan Ukuran: Pikoplankton, Nanoplankton, Mikroplankton, dan Makroplankton	17
2.2 Berdasarkan Fungsinya: Fitoplankton dan Zooplankton	19
2.3 Berdasarkan Siklus Hidup: Holoplankton dan Meroplankton	20
BAB III	22
MORFOLOGI DAN STRUKTUR PLANKTON	22
3.1 Ciri-ciri Morfologi Sel/Alga (Fitoplankton)	22
3.2 Struktur Tubuh Zooplankton	36
3.3 Adaptasi Bentuk Terhadap Lingkungan Perairan	43
BAB IV	45
EKOLOGI PLANKTON	45
4.1 Keberadaan Plankton	46
4.2 Distribusi Fitoplankton	47
4.3 Distribusi Spasial dan Temporal	47
4.4 Parameter Pertumbuhan Plankton	50
4.6 Kelimpahan Plankton di Pesisir	55
4.5 Fungsi Fitoplankton bagi Biota	56
BAB V	58
FITOPLANKTON	58

5.1	Kelompok Utama	58
5.2	Peran dalam fotosintesis dan siklus karbon	64
5.3	Blooms (<i>Harmful Algal Blooms</i> , HABs) dan Dampaknya	69
5.3.1	Fitoplankton dan Fenomena <i>Algal Bloom</i>	69
5.3.2	Jenis-jenis Organisme Penyebab HABs	70
5.3.3	Faktor-Faktor Penyebab HABs	77
BAB VI		84
ZOOPLANKTON		84
6.1	Kelompok Utama	84
6.2	Peran dalam Rantai Makanan Laut	92
6.3	Signifikansi dalam Produktivitas Perikanan	93
BAB VII		94
METODE STUDI PLANKTON		94
7.1	Teknik Pengambilan Sampel	94
7.1.1	Sampling Plankton di Pesisir	95
7.1.2	Sampling Plankton di Laut Dalam	96
7.2	Analisis di Laboratorium	97
7.2.1	Identifikasi Jenis Plankton	97
7.2.2	Analisis Data Plankton	99
7.3	Penggunaan indeks ekologi berbasis plankton	99
7.3.1	Indeks Keanekaragaman	99
7.3.2	Indeks Keseragaman	100
7.3.3	Indeks Dominansi	101
7.3.4	Kelimpahan	102
BAB VIII		104
PLANKTON SEBAGAI BIOINDIKATOR		104
8.1	Indikator Kualitas Perairan	104
8.2	Indikator perubahan iklim dan produktivitas laut	105
8.3	Studi Kasus di Indonesia	109
BAB IX		111
APLIKASI DAN MANFAAT PLANKTON		111
9.1	Plankton Dalam Akuakultur	111
9.2	Pemanfaatan Fitoplankton dalam Pakan Alami	114

2

9.3 Bioteknologi dan Pemanfaatan Senyawa Bioaktif Plankton	118
BAB X	123
TANTANGAN DAN PROSPEK STUDI PLANKTON.....	123
10.1 Isu Pencemaran Laut.....	123
10.2 Dampak Perubahan Iklim Global terhadap Plankton.....	124
10.3 Prospek Penelitian Plankton ke Depan di Indonesia.....	125
BAB XI	128
PENUTUP.....	128
11.1 Ringkasan.....	128
11.2 Arah Pengembangan Ilmu Plankton.....	130
11.3 Relevansi dengan Pembangunan Kelautan Berkelanjutan	133
DAFTAR PUSTAKA.....	136
GLOSARIUM.....	162
BIODATA PENULIS	174

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Jenis-jenis fitoplankton.	22
Gambar 2. Diatom.	23
Gambar 3. Struktur tubuh diatom.	24
Gambar 4. Struktur raphe sel diatom.	24
Gambar 5. Komposisi fitoplankton perairan permukaan Sangihe-Talaud.	25
Gambar 6. Struktur komposisi fitoplankton di muara sungai Musi dan Banyuasin.	26
Gambar 8. Persentase spesies fitoplankton di perairan permukaan Sangihe-Talaud.	27
Gambar 7. Persentase genus fitoplankton di muara sungai Musi dan Banyuasin.	28
Gambar 9. Dinoflagellata.	28
Gambar 10. Struktur dinoflagellata.	29
Gambar 11. Cyanobacteria pembentuk tikar yang diidentifikasi dalam penelitian ini. (A) <i>Synechococcus nidulans</i> , (B) <i>Gloeocapsa gelatinosa</i> , (C) <i>Klorogloeopsis fritschii</i> , (D) <i>Anabaena</i> sp. NK1-14, (E) <i>Fischerella</i> sp. NK 1-16, (P) <i>Fischerella</i> sp. NK 1-20, (G).	30
Gambar 12. Jenis-jenis Cyanobacteria.	31
Gambar 13. Kokkolitofores.	32
Gambar 14. Jenis-jenis kokkolitofores.	33
Gambar 15. Euglenozoa.	34
Gambar 16. Morfologi Euglenozoa.	35
Gambar 17. Bagian tubuh copepoda.	36
Gambar 18. Morfologi tiga ordo utama Copepoda, yaitu Calanoida, Cyclopoida, dan Harpacticoida. Sumber: https://ar.inspiredpencil.com/pictures-2023/class-copepoda	38
Gambar 19. Morfologi umum Cladocera (Ket : (A) Tampak lateral, (B) Pori-pori kepala, (C) Gigi-gigi kecil (dentikel) di tepi posterior abdomen, (D) Tampak samping kepala yang menunjukkan rostrum tidak menonjol, (E) Cakar postabdominal, (F) Tampak dorsal (dari atas), (G) Tampak ventral (dari bawah)	38
Gambar 20. Foraminifera.	39
Gambar 21. Morfologi foraminifera.	40
Gambar 22. Perairan Pesisir.	45
Gambar 23. Visualisasi suhu perairan.	51
Gambar 24. Visualisasi suhu pH perairan.	52
Gambar 25. Visualisasi salinitas perairan.	53
Gambar 26. Jenis-jenis diatom.	58
Gambar 27. Dinoflagellata.	59
Gambar 28. Beberapa macam <i>Cyanobacteria</i> berdasarkan pemeriksaan mikroskopis strain: (A). <i>Nostoc spongiforme</i> , (B). <i>N. spongiforme</i> , (C). <i>N. species</i> , (D). <i>N. species</i> , (E). <i>Anabaenopsis species</i> , (F). <i>Anabaena circularis</i> , (G). not identified, (H). <i>A. roxburgii</i> , (I). <i>A. variabilis</i> , (J). <i>Calothrix species</i> , (K). <i>Microchaetae species</i> , (L). <i>Gloeocapsa species</i> , (M). <i>N. muscorum</i> , (N). <i>A. species</i> , (O). <i>A. species</i> (Deep <i>et al.</i> 2013)	60
Gambar 29. Chlorophyta.	61
Gambar 30. Chrysophyta.	62
Gambar 31. Cyanophyta.	63

	Gambar 32. Euglenophyta.	63
	Gambar 33. Beberapa Jenis Fitoplankton, A. <i>Dinophysis homunculus</i> , B. <i>Ceratium furca</i> , C. <i>Protoperdinium conicum</i>	64
	Gambar 34. Kontribusi yang berbeda dari vegetasi darat dan fitoplankton terhadap produksi primer bersih global.	65
	Gambar 35. Berbagai fitoplankton yang dilihat dengan menggunakan mikroskop perbesaran 10 kali dan filter <i>phase contrast</i>	66
	Gambar 36. Skema pompa karbon biologis.	67
	Gambar 37. Beberapa Jenis Fitoplankton Penyebab HABs.	74
	Gambar 38. Ringkasan dampak ledakan alga berbahaya terhadap perairan pedalaman.	80
	Gambar 39. Hubungan antara asupan nutrisi dari luar, daur ulang nutrisi di dalam, pertumbuhan alga akibat peningkatan kadar nutrisi dan kurangnya oksigen di kondisi stratifikasi salinitas.	81
	Gambar 40. Mekarnya <i>Cyanobacterial</i> di pedalaman. (Patiño <i>et al.</i> 2023)	81
5	Gambar 41. Perubahan warna dan kematian massal ikan di sepanjang pantai Malaysia dalam beberapa tahun terakhir disebabkan oleh mekarnya <i>Noctiluca scintillans</i> (A), <i>Chattonella malayana</i> (B), <i>Karlodinium australe</i> (C), dan <i>Margalefidinium fulvescens</i> (D) (McGlone MLSD <i>et al.</i> 2024)	82
5	Gambar 42. Beberapa spesies mikroalga berbahaya yang sering membunuh ikan di Asia Tenggara. (A) <i>Margalefidinium polykrikoides</i> (B) <i>Chattonella marina</i> (C) <i>C subsalsa</i> (D) <i>C malayana</i> (E) <i>Karenia mikimotoi</i> (F) <i>Karlodinium australe</i> (G) <i>K veneficum</i> (H) <i>Takayama acrotrocha</i> (McGlone MLSD <i>et al.</i> 2024)	83
	Gambar 43. Zooplankton.	84
4	Gambar 44. (A) <i>Paramecium</i> sp. dan (B) <i>Entamoeba</i> sp.	86
4	Gambar 45. Ubur-ubur Surai Singa (<i>Cyanea capillata</i>).	87
4	Gambar 46. Ubur-ubur sisir abyssal (<i>Beroe abyssicola</i>)	88
	Gambar 47. Larva arthropoda.	89
	Gambar 48. Jenis Mollusca.	90
	Gambar 49. Larva Echinodermata.	91
	Gambar 50. Jenis Chordata.	92
	Gambar 51. Planktonet.	94
	Gambar 52. Botol air.	95
	Gambar 53. Metode untuk mengumpulkan plankton di permukaan air.	96
	Gambar 54. Sampling plankton di laut dalam.	97
	Gambar 55. <i>Prorocentrum</i> sp.	98
	Gambar 56. Mikroskop.	99
	Gambar 57. Planktonet.	105
	Gambar 58. Pakan akuakultur.	111
	Gambar 59. Mikroalga sangat penting untuk akuakultur	112
	Gambar 60. Kontribusi Mikroalga terhadap Budidaya Akuakultur.	113
2	Gambar 61. (a) <i>Crinalium glaciale</i> (b–c) Spesies dan morfospesies yang termasuk dalam ordo <i>Chroococcidiopsidales</i> : (b) <i>Gloeocapsopsis</i> sp (c) <i>Gloeocapsopsis</i> sp. (d) <i>Nodularia</i> sp. (e–g)	

2

Spesies dan morfotipe yang termasuk dalam ordo Oscillatoriales: (e) Lyngbya sp. (f) Phormidium sp.; (g) Phormidium sp.....	113
Gambar 62. Ukuran mulut larva ikan.	114
Gambar 63. Potensi mikroalga.....	115
Gambar 64. Keunggulan pakan alami.....	115
Gambar 65. Pemilihan pakan ikan.	116
Gambar 66. Nannochloropsis sp.	117
Gambar 67. Dunaliella, Tetraselmis, dan Chlorella.	117
Gambar 68. Thalassiosira sp.	118
Gambar 69. Metabolit utama mikroalga.	119
Gambar 70. Kultur Chlorella vulgaris.	119
Gambar 71. Fase Kultur Aurantiochytrium.	120
Gambar 72. Dunaliella salina.	120
Gambar 73. Copepoda.	121
Gambar 74. Komponen kimia, kandungan bioaktif, efek biologis, dan penggunaan mikroalga Spirulina.	121
Gambar 75. (a) Sel Chaetoceros calcitrans pada fase vegetatif; (b) Sel Chaetoceros calcitrans pada tahap pembentukan rantai atau koloni.....	122

2

DAFTAR TABEL

7	Tabel 1. Jenis-jenis fitoplankton penyebab HABs di perairan Indonesia	73
7	Tabel 2. Kejadian blooming fitoplankton di perairan Indonesia.....	74
7	Tabel 3. Beberapa contoh kejadian blooming fitoplankton di berbagai negara.....	77
	Tabel 4. Kategori indeks keanekaragaman	100
	Tabel 5. Kriteria Tingkat Keseragaman	101
	Tabel 6. Kategori tingkat dominansi	102
	Tabel 7. Kategori kelimpahan plankton	103

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Definisi dan Konsep Dasar Plankton

Nama "plankton" berasal dari kata Yunani "planktos", yang berarti "melayang" atau "mengapung" (Nontji, 2008). Penamaan ini mencerminkan sifat khas organisme plankton yang keberadaannya tersebar di kolom perairan dan pergerakannya sangat bergantung pada dinamika arus. Plankton tidak memiliki kemampuan untuk berenang melawan arus secara aktif seperti ikan, sehingga pergerakannya sepenuhnya dipengaruhi oleh dinamika perairan di sekitarnya. Dengan demikian, keberadaan plankton dalam suatu wilayah perairan sangat bergantung pada pola arus, angin, serta kondisi oseanografi yang menentukan arah penyebarannya di permukaan maupun lapisan bawah air. Secara umum, plankton tidak memiliki kemampuan berenang aktif seperti ikan, melainkan hanya mampu bergerak secara pasif mengikuti arus laut, sungai, atau danau. Plankton memegang peranan fundamental dalam ekosistem perairan karena berfungsi sebagai komponen dasar yang menopang terbentuknya rantai makanan di lingkungan laut. Dalam sistem trofik perairan, plankton berfungsi sebagai penghasil energi utama yang mendukung keberlangsungan organisme pada tingkat trofik berikutnya, mulai dari zooplankton dan ikan berukuran kecil hingga organisme pemangsa tingkat tertinggi. Dengan demikian, pola sebaran dan tingkat kelimpahan plankton kerap dimanfaatkan sebagai indikator dalam mengevaluasi tingkat produktivitas ekosistem perairan (Hertika *et al.* 2021; Masithah, 2022).

Pada dasarnya, plankton dapat dibedakan menjadi dua golongan utama, yakni fitoplankton dan zooplankton. Fitoplankton adalah organisme berukuran sangat kecil yang mampu memproduksi makanannya sendiri (autotrof) karena mengandung klorofil, sehingga dapat melakukan fotosintesis sebagai sumber energi. Sebaliknya, zooplankton merupakan organisme heterotrof yang tidak memiliki kemampuan berfotosintesis dan bergantung pada konsumsi fitoplankton maupun organisme mikroskopis lainnya sebagai sumber energi (Asriyana dan Yuliana, 2021; Amrillah *et al.* 2023). Fitoplankton umumnya ditemukan di lapisan perairan yang masih memungkinkan penetrasi cahaya matahari, yaitu zona fotik yang mencapai kedalaman sekitar 200 meter di laut terbuka. Sementara itu, zooplankton tersebar pada lapisan yang lebih luas, termasuk di zona afotik, karena mereka bergantung pada sumber makanan yang bisa berpindah bersama arus. Fitoplankton merupakan komponen kunci yang berkontribusi besar terhadap kestabilan dan keberlanjutan ekosistem perairan. Melalui proses fotosintesis, fitoplankton mengubah karbon dioksida (CO_2) menjadi oksigen (O_2) dan materi organik yang berperan sebagai penyedia energi bagi organisme tingkat trofik lainnya. Dengan demikian, fitoplankton tidak hanya menjadi penyedia utama makanan di lautan, tetapi juga berkontribusi besar terhadap siklus karbon global dan kestabilan atmosfer bumi (Latuconsina, 2019). Diperkirakan lebih dari setengah oksigen yang kita hirup dihasilkan oleh fitoplankton di laut. Dengan demikian, keberadaan fitoplankton sering dimanfaatkan sebagai parameter utama dalam menilai tingkat kesuburan suatu ekosistem perairan.

1.2 Sejarah Kajian Plankton

Kajian mengenai plankton telah berkembang sejak abad ke-19, ketika para ilmuwan mulai tertarik mempelajari kehidupan mikroskopis yang melayang di air laut dan tawar.

Sebelum masa itu, organisme mikroskopis yang ditemukan di perairan sering kali diabaikan karena sulit diamati tanpa bantuan alat optik yang memadai. Perkembangan mikroskop menjadi tonggak penting yang membuka pandangan baru terhadap dunia kehidupan yang tak kasat mata. Melalui pengamatan ini, para ilmuwan menyadari bahwa organisme mikroskopis ternyata memainkan peran vital dalam keseimbangan ekosistem perairan dan rantai makanan di laut. Istilah plankton pertama kali diperkenalkan oleh ahli biologi kelautan asal Jerman, Victor Hensen, pada tahun 1887. Hensen menggunakan istilah tersebut untuk menggambarkan kelompok organisme yang hidup melayang dan terbawa arus di perairan. Ia pula yang dianggap sebagai pelopor dalam penelitian modern tentang plankton, serta orang pertama yang mencoba mengukur kelimpahan dan biomassa plankton secara kuantitatif. Konsep ini kemudian menjadi dasar bagi perkembangan ilmu planktologi, yaitu cabang ilmu biologi laut yang mempelajari plankton dari segi struktur, fungsi, dan distribusinya.

Pada masa Hensen, penelitian plankton dilakukan menggunakan alat sederhana berupa jaring plankton yang dirancang khusus untuk menangkap organisme mikroskopis di laut. Jaring tersebut memiliki ukuran pori tertentu untuk memisahkan jenis plankton berdasarkan ukuran. Dari hasil tangkapan itu, Hensen melakukan analisis morfologi dan menghitung kelimpahan plankton di berbagai kedalaman. Penelitian ini menjadi fondasi penting dalam memahami dinamika populasi plankton dan hubungannya dengan kondisi lingkungan laut. Pendekatan kuantitatif yang ia gunakan masih menjadi rujukan hingga kini dalam studi oseanografi biologis. Seiring berkembangnya waktu, penelitian tentang plankton mulai menarik perhatian ilmuwan di berbagai negara. Di Eropa, penelitian awal banyak dilakukan di Laut Baltik, Laut Utara, dan Samudera Atlantik bagian utara. Sementara itu, di Amerika Serikat, penelitian serupa mulai berkembang di perairan pesisir timur dan danau-danau besar. Penelitian ini tidak semata-mata berfokus pada pengenalan jenis, tetapi juga mencakup distribusi spasial dan temporal plankton, serta hubungan antara plankton dan produktivitas perairan. Penelitian lintas wilayah ini kemudian menghasilkan pemahaman bahwa plankton memiliki variasi musiman dan geografis yang erat kaitannya dengan faktor lingkungan.

Pada awal abad ke-20, kajian plankton mulai dikaitkan dengan aspek ekologi dan oseanografi. Para ilmuwan mulai meneliti bagaimana perubahan suhu, salinitas, arus laut, serta intensitas cahaya memengaruhi kelimpahan plankton. Periode ini juga ditandai dengan kemajuan dalam pengambilan sampel laut dalam, yang memungkinkan para peneliti mengamati distribusi plankton hingga ratusan meter di bawah permukaan laut. Studi semacam ini membuka wawasan baru bahwa plankton tidak hanya hidup di permukaan, tetapi juga dapat ditemukan di lapisan tengah laut hingga daerah mesopelagik. Selama dekade 1920-an hingga 1940-an, banyak ekspedisi ilmiah besar yang dilakukan untuk mempelajari kehidupan laut, termasuk plankton. Salah satu yang terkenal adalah Ekspedisi Dana (1928–1930) yang menjelajahi Samudera Atlantik dan Hindia. Ekspedisi ini berhasil mengumpulkan ribuan sampel plankton dari berbagai kedalaman dan lokasi, serta menghasilkan katalog lengkap mengenai keanekaragaman plankton laut. Data dari ekspedisi tersebut menjadi dasar penting dalam memahami pola sirkulasi arus laut dan distribusi nutrisi yang berhubungan dengan produksi primer.

Pada masa yang sama, penelitian tentang fitoplankton dan zooplankton mulai dibedakan secara lebih sistematis. Fitoplankton dipelajari dalam konteks produktivitas primer, sementara zooplankton dikaji dalam kaitannya dengan rantai makanan laut. Hubungan keduanya

kemudian menjadi fokus utama dalam ekologi laut, karena keseimbangan antara produsen dan konsumen mikroskopis ini menentukan stabilitas seluruh ekosistem perairan. Dengan berkembangnya mikroskop elektron, struktur seluler plankton dapat diamati lebih detail, membuka pemahaman tentang adaptasi morfologi dan fisiologi organisme tersebut. Pada pertengahan abad ke-20, kemajuan dalam bidang kimia dan fisika laut mendorong lahirnya disiplin ilmu baru, yaitu oseanografi biologi modern. Kajian terhadap plankton kini tidak lagi memandangnya semata sebagai organisme tunggal, melainkan sebagai komponen integral dalam sistem ekologi laut yang bersifat kompleks. Para ilmuwan meneliti bagaimana siklus karbon, nitrogen, dan fosfor dipengaruhi oleh aktivitas plankton. Fitoplankton diidentifikasi sebagai kontributor utama dalam siklus karbon global, sedangkan zooplankton diketahui berperan dalam mengatur transportasi vertikal bahan organik ke dasar laut melalui proses yang dikenal sebagai biological pump.

Pada dekade 1960-an hingga 1980-an, penelitian plankton semakin berkembang pesat berkat dukungan teknologi analisis laboratorium dan komputer. Metode penghitungan sel otomatis, analisis klorofil, serta teknik spektrofotometri mulai digunakan untuk memperkirakan biomassa dan tingkat fotosintesis fitoplankton. Selain itu, satelit penginderaan jauh mulai dimanfaatkan sebagai sarana untuk menggambarkan pola sebaran klorofil pada lapisan permukaan laut, yang menjadi indikator produktivitas primer. Data satelit ini memberikan gambaran luas mengenai dinamika plankton secara global, termasuk fenomena upwelling dan blooming musiman. Memasuki era 1990-an, penelitian plankton memasuki tahap yang lebih detail dengan diterapkannya pendekatan molekuler. Teknik seperti DNA barcoding dan metagenomik digunakan untuk mengidentifikasi spesies plankton berdasarkan urutan genetiknya, bahkan untuk organisme yang sulit diidentifikasi secara morfologis. Pendekatan ini memperkaya pemahaman tentang keanekaragaman plankton, termasuk mikroorganisme baru yang sebelumnya tidak dikenal. Selain itu, metode ini juga digunakan untuk melacak penyebaran spesies invasif dan memahami adaptasi plankton terhadap perubahan lingkungan global.

Kajian sejarah plankton juga tidak dapat dilepaskan dari perkembangan pemahaman manusia terhadap perubahan iklim. Seiring meningkatnya konsentrasi karbon dioksida di atmosfer, para ilmuwan mulai meneliti bagaimana perubahan suhu laut dan keasaman air memengaruhi komunitas plankton. Penelitian menunjukkan bahwa beberapa jenis fitoplankton sangat sensitif terhadap perubahan pH laut, sementara beberapa lainnya mampu beradaptasi dengan cepat. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peran plankton tidak hanya terbatas sebagai indikator kondisi lingkungan perairan, melainkan juga memiliki peran sentral dalam mengendalikan keseimbangan karbon pada skala biosfer.

1.3 Pentingnya Plankton dalam Ekosistem laut

Plankton merupakan komponen esensial yang berkontribusi besar terhadap stabilitas dan keberlanjutan ekosistem laut. Organisme mikroskopis ini merupakan komponen dasar dari rantai makanan laut dan menjadi sumber energi utama bagi hampir seluruh biota akuatik. Tanpa keberadaan plankton, kehidupan di laut tidak akan dapat berlangsung secara seimbang. Melalui aktivitas fotosintetik, fitoplankton berperan dalam menghasilkan oksigen sekaligus membentuk materi organik yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai sumber energi oleh beragam organisme laut lainnya. Dengan demikian, plankton dapat dikatakan sebagai fondasi

80 utama yang menopang seluruh kehidupan di ekosistem laut. Sebagai komponen utama produsen primer, fitoplankton memanfaatkan energi cahaya matahari untuk diubah menjadi energi kimia yang tersimpan dalam bahan organik melalui proses fotosintesis. Selain menghasilkan nutrisi bagi rantai makanan, proses ini juga menghasilkan lebih dari 50% oksigen di atmosfer bumi. Oleh karena itu, peran fitoplankton sangat krusial tidak hanya bagi ekosistem perairan, tetapi juga bagi keberlangsungan kehidupan di daratan. Dalam skala global, plankton berkontribusi besar terhadap stabilitas iklim karena berperan dalam mengatur pertukaran karbon antara atmosfer dan laut melalui proses penyerapan karbon dioksida.

Zooplankton, di sisi lain, berfungsi sebagai konsumen primer yang membuat hubungan antara produsen dan pelanggan lebih lanjut. Mereka memakan fitoplankton dan menjadi mangsa bagi ikan kecil, ubur-ubur, serta organisme laut lainnya. Rantai makanan ini kemudian berlanjut hingga ke predator puncak seperti ikan besar, burung laut, dan mamalia laut. Dengan demikian, plankton menjadi penghubung berperan krusial dalam proses perpindahan energi dan daur materi di ekosistem perairan laut. Keberadaan zooplankton yang stabil menandakan keseimbangan ekosistem, sedangkan penurunan populasinya dapat mengganggu seluruh rantai trofik. Peranan plankton tidak hanya sebatas dalam penyediaan energi, tetapi juga dalam siklus biogeokimia. Fitoplankton berperan aktif dalam siklus karbon, nitrogen, fosfor, dan silikon. Ketika fitoplankton mati atau dimakan oleh zooplankton, sebagian bahan organiknya akan tenggelam ke dasar laut dan menjadi sumber nutrisi bagi organisme benthik. Proses ini dikenal sebagai biological pump, yaitu mekanisme alami yang mentransfer karbon dari permukaan laut ke sedimen dasar. Proses tersebut memungkinkan plankton berfungsi dalam menurunkan konsentrasi karbon dioksida yang terdapat di atmosfer serta memberikan kontribusi penting dalam upaya mitigasi perubahan iklim pada skala global.

148 Dalam konteks produktivitas perairan, kelimpahan plankton kerap dimanfaatkan sebagai penanda tingkat kesuburan suatu perairan laut. Perairan dengan konsentrasi nutrisi tinggi seperti di daerah upwelling cenderung memiliki kelimpahan fitoplankton yang besar, sehingga menjadi daerah penangkapan ikan yang produktif. Sebaliknya, perairan oligotrofik yang miskin nutrisi umumnya memiliki jumlah plankton yang rendah dan tingkat produksi primer yang terbatas. Oleh karena itu, pemantauan populasi plankton menjadi merupakan salah satu pendekatan utama dalam mengevaluasi potensi sumber daya perikanan di suatu kawasan. Di samping itu, plankton turut memainkan peranan ekologis dalam menjaga keseimbangan rantai makanan dan struktur komunitas laut. Keanekaragaman jenis plankton yang tinggi mencerminkan stabilitas ekosistem, karena setiap jenis memiliki peran tersendiri dalam proses ekologi. Misalnya, beberapa jenis fitoplankton mampu memfiksasi nitrogen dari udara, sementara yang lain berperan dalam dekomposisi bahan organik. Zooplankton juga membantu menjaga keseimbangan populasi fitoplankton agar tidak terjadi ledakan populasi yang berlebihan yang dapat mengganggu kualitas perairan.

97 Selain itu, plankton dapat digunakan sebagai bioindikator perubahan lingkungan. Sensitivitas plankton yang tinggi terhadap perubahan parameter fisik dan kimia perairan, seperti suhu, salinitas, pH, dan konsentrasi nutrisi, menyebabkan struktur komunitas plankton kerap dijadikan dasar dalam mengidentifikasi perubahan kualitas perairan. Misalnya, peningkatan jenis dinoflagellata tertentu dapat menjadi indikator eutrofikasi atau pencemaran organik. Dengan demikian, studi tentang plankton dapat memberikan informasi awal mengenai kondisi kesehatan ekosistem laut sebelum terjadi kerusakan yang lebih parah. Dari aspek

175

102

ekonomi, plankton memiliki nilai penting yang tidak langsung. Keberhasilan sektor perikanan, baik tangkap maupun budidaya, sangat ditentukan oleh ketersediaan plankton yang berfungsi sebagai sumber pakan alami. Fitoplankton seperti *Chlorella*, *Nannochloropsis*, dan *Isochrysis* banyak digunakan dalam pembenihan ikan dan udang sebagai penyedia unsur hara alami yang kaya protein dan asam lemak esensial. Sementara itu, zooplankton seperti *Artemia* dan Rotifera menjadi pakan utama bagi larva ikan dan udang dalam sistem budidaya. Oleh karena itu, pengelolaan dan pemantauan populasi plankton juga berkontribusi terhadap keberhasilan sektor perikanan.

Selain nilai ekologis dan ekonomi, plankton juga memiliki peran penting dalam penelitian ilmiah. Studi tentang plankton memberikan pemahaman yang luas mengenai dinamika ekosistem laut, siklus energi, serta dampak perubahan iklim terhadap kehidupan laut. Dalam oseanografi modern, plankton digunakan sebagai bioindikator untuk menilai perubahan lingkungan global seperti pemanasan laut dan peningkatan kadar CO₂. Data tentang distribusi dan produktivitas plankton yang dikumpulkan melalui satelit dan ekspedisi ilmiah menjadi dasar bagi model iklim dan prediksi perubahan ekosistem laut di masa depan. Secara ekologis, plankton dapat disebut sebagai penentu utama keberlanjutan ekosistem laut. Tanpa adanya plankton, rantai makanan di laut tidak akan dapat berjalan. Organisme besar seperti ikan, paus, dan burung laut tidak akan memiliki sumber energi jika tidak ada fitoplankton yang memproduksi bahan organik di dasar rantai makanan. Dengan kata lain, plankton merupakan “jantung produktivitas laut.” Karena itu, setiap perubahan kecil pada populasi plankton dapat berdampak luas pada seluruh sistem kehidupan laut, termasuk pada manusia yang bergantung pada hasil laut untuk kebutuhan pangan dan ekonomi.

1.4 Peran Plankton Bagi Ilmu Kelautan dan Manusia

Plankton memiliki kedudukan yang sangat penting dalam ilmu kelautan karena menjadi komponen utama dalam memahami dinamika ekosistem laut. Keberadaannya mencerminkan keseimbangan antara faktor fisika, kimia, dan biologi perairan, sehingga kajian mengenai plankton sering dijadikan dasar dalam menilai kondisi lingkungan laut secara menyeluruh. Dalam penelitian oseanografi biologi, plankton berfungsi sebagai indikator produktivitas primer suatu perairan. Besarnya biomassa fitoplankton mencerminkan tingkat kesuburan suatu perairan yang berkaitan erat dengan ketersediaan nutrien, intensitas cahaya, serta stabilitas kolom air. Fitoplankton berfungsi sebagai komponen produsen utama yang mensintesis materi organik melalui proses fotosintesis, sekaligus menyediakan sumber energi dasar bagi beragam organisme di lingkungan laut. Dengan demikian, memahami keberadaan dan dinamika plankton berarti memahami fondasi dari seluruh sistem rantai makanan laut.

Di sisi lain, zooplankton berperan sebagai perantara yang menjembatani produsen primer dengan organisme pada tingkat trofik yang lebih tinggi. Mereka mengonsumsi fitoplankton dan menjadi makanan bagi ikan kecil, larva ikan, serta organisme nekton lainnya. Peran ini menjadikan zooplankton sangat penting dalam aliran energi laut, di mana setiap perubahan dalam populasi plankton dapat memengaruhi struktur komunitas biota laut secara keseluruhan. Dalam konteks ekologi laut, plankton juga terlibat dalam berbagai proses biogeokimia, termasuk siklus karbon dan nitrogen. Fitoplankton mampu menyerap karbon dioksida dari atmosfer melalui fotosintesis, lalu mengendapkannya ke dasar laut dalam bentuk bahan organik, sehingga membantu menurunkan kadar gas rumah kaca dan menstabilkan iklim.

global. Dalam bidang oseanografi kimia, keberadaan plankton dapat dijadikan indikator alami terhadap perubahan kondisi kimiawi air laut seperti kadar oksigen terlarut, pH, serta konsentrasi unsur hara. Perubahan struktur komunitas plankton sering kali menjadi tanda awal adanya eutrofikasi atau pencemaran yang disebabkan oleh aktivitas antropogenik. Karena itu, plankton banyak dimanfaatkan sebagai bioindikator dalam pemantauan kualitas lingkungan laut. Jenis-jenis plankton tertentu diketahui sensitif terhadap polusi logam berat atau limbah organik, sehingga keberadaannya dapat dijadikan dasar dalam pengelolaan kualitas perairan.

Dalam kajian perikanan, plankton memiliki peran vital karena menjadi sumber pakan utama bagi larva ikan serta berbagai organisme laut pada fase awal kehidupan. Ketersediaan plankton di perairan berpengaruh langsung terhadap keberhasilan proses rekrutmen ikan di alam, yang pada akhirnya menentukan produktivitas suatu wilayah perikanan. Dalam sistem budidaya, khususnya pada tahap pembenihan udang dan ikan, plankton memegang peranan utama sebagai sumber pakan alami. Beberapa fitoplankton, antara lain *Nannochloropsis*, *Isochrysis*, dan *Tetraselmis*, banyak dikultur untuk meningkatkan ketersediaan zooplankton seperti Rotifera dan *Artemia*, yang selanjutnya diberikan sebagai pakan bagi larva ikan. Dengan demikian, keberadaan plankton menjadi faktor kunci dalam mendukung ketahanan dan keberhasilan produksi perikanan budidaya. Selain peran ekologis dan ekonominya, plankton juga memiliki nilai ilmiah dan bioteknologis yang tinggi. Beberapa jenis mikroalga diketahui menghasilkan senyawa bioaktif seperti antioksidan, antimikroba, dan pigmen alami yang bernilai tinggi dalam industri farmasi, kosmetik, dan pangan. Fitoplankton juga memiliki prospek untuk dimanfaatkan sebagai sumber bahan baku energi terbarukan, khususnya biodiesel, mengingat kandungan lipidnya yang relatif tinggi serta kemampuannya untuk dibudidayakan secara berkelanjutan. Mikroalga seperti *Chlorella sp.*, *Dunaliella salina*, dan *Nannochloropsis sp.* sejumlah penelitian telah mengkaji pemanfaatannya dalam pengembangan energi hijau sebagai upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Di samping itu, beberapa jenis plankton juga diketahui memiliki kandungan asam lemak omega-3 yang memberikan manfaat signifikan bagi kesehatan manusia, menjadikannya sumber alami nutrisi penting yang mendukung industri pangan dan farmasi.

Dalam bidang medis dan bioteknologi, plankton menjadi sumber berbagai metabolit sekunder seperti enzim, polisakarida, dan senyawa bioaktif lain yang berpotensi besar untuk pengembangan obat-obatan. Penelitian terhadap kandungan biokimia plankton terus berkembang karena kemampuannya dalam menghasilkan senyawa alami yang dapat diaplikasikan untuk terapi dan kesehatan manusia. Selain manfaat langsungnya, plankton juga berperan besar dalam menjaga keberlanjutan rantai makanan laut. Stabilitas komunitas plankton sangat menentukan keseimbangan ekosistem laut secara keseluruhan. Penurunan populasi plankton akibat pencemaran atau perubahan iklim dapat menyebabkan penurunan populasi ikan dan organisme laut lainnya, sehingga berdampak luas pada sektor ekonomi dan sosial manusia. Dalam konteks pendidikan dan penelitian, plankton menjadi objek penting dalam studi ekologi dan oseanografi. Pengkajian terhadap plankton memungkinkan para ilmuwan untuk mengungkap pola distribusi, tingkat produktivitas, serta dinamika interaksi antarorganisme dalam ekosistem laut. Selain itu, studi plankton menyediakan landasan ilmiah yang penting bagi penerapan pengelolaan sumber daya laut secara berkelanjutan, karena mampu merefleksikan keterkaitan antara aktivitas antropogenik dan perubahan kondisi lingkungan perairan. Dari sisi keindahan alam, plankton juga berperan dalam memunculkan

fenomena alami yang unik, seperti red tide dan bioluminesensi, meskipun dalam kondisi tertentu sebagian fenomena tersebut berpotensi menimbulkan dampak merugikan bagi keseimbangan ekosistem.

Secara menyeluruh, plankton berperan bukan hanya sebagai komponen dasar rantai makanan dan penanda kondisi ekologis, tetapi juga sebagai sumber daya yang memiliki potensi untuk mendukung kesejahteraan manusia. Dari segi ilmiah, plankton membantu memahami dinamika perairan; dari segi ekonomi, mendukung industri perikanan dan bioteknologi; dan dari segi ekologis, berkontribusi terhadap kestabilan iklim global. Oleh karena itu, studi tentang plankton merupakan aspek fundamental dalam ilmu kelautan modern dan menjadi kunci dalam menjaga keseimbangan serta keberlanjutan kehidupan di laut dan bumi secara keseluruhan.

BAB II

KLASIFIKASI PLANKTON

2.1 Berdasarkan Ukuran: Pikoplankton, Nanoplankton, Mikroplankton, dan Makroplankton

Klasifikasi plankton dapat dilakukan berdasarkan berbagai kriteria, salah satunya adalah ukuran tubuhnya. Ukuran plankton sangat menentukan peran ekologisnya dalam rantai makanan laut serta metode yang digunakan untuk mengamati dan menelitinya. Secara umum, plankton dibedakan menjadi empat kelompok utama berdasarkan ukurannya, yaitu pikoplankton, nanoplankton, mikroplankton, dan makroplankton (Hertika *et al.* 2021). Keempat kelompok ini memiliki karakteristik biologis dan ekologis yang berbeda, mulai dari ukuran sel, cara hidup, hingga peranannya dalam sistem produktivitas primer laut. Plankton memiliki rentang ukuran yang bervariasi, mulai dari skala mikrometer hingga beberapa milimeter, dan setiap rentang ukuran tersebut memainkan fungsi penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem laut.

A. Pikoplankton

Pikoplankton organisme plankton berukuran paling kecil, berkisar antara 0,2 hingga 2 mikrometer. Pikoplankton terdiri atas organisme bersel tunggal seperti bakteri fotosintetik, sianobakteria, dan mikroalga berukuran sangat kecil (Nontji, 2008; Hertika *et al.* 2021). Meskipun ukurannya mikroskopik, peran pikoplankton dalam ekosistem laut sangat besar karena mereka menyumbang sebagian besar produktivitas primer, terutama di perairan oligotrofik atau miskin nutrisi. Pikoplankton berperan penting dalam daur biogeokimia, khususnya dalam siklus karbon dan nitrogen, melalui aktivitas fotosintesis dan dekomposisi bahan organik. Keberadaan pikoplankton juga menjadi dasar terbentuknya microbial loop, yaitu mekanisme ekologis yang mengembalikan bahan organik terlarut ke dalam rantai makanan melalui aktivitas mikroorganisme, sehingga menjaga efisiensi transfer energi di ekosistem laut.

B. Nanoplankton

Nanoplankton adalah plankton yang memiliki ukuran antara 2 hingga 20 mikrometer. Organisme dalam kelompok ini umumnya terdiri atas flagelata kecil, diatom berukuran mini, serta beberapa jenis mikroalga (Hertika *et al.* 2021). Nanoplankton menjadi penghubung antara pikoplankton dan mikroplankton dalam rantai makanan laut. Mereka memainkan peran penting dalam transfer energi, karena menjadi sumber makanan utama bagi zooplankton kecil seperti rotifera dan larva copepoda. Selain itu, nanoplankton juga memiliki kemampuan fotosintetik tinggi sehingga turut berperan besar dalam produktivitas primer perairan pesisir dan laut terbuka. Dalam konteks penelitian, nanoplankton juga digunakan sebagai indikator kesuburan perairan, karena populasinya cenderung meningkat di wilayah dengan ketersediaan unsur hara yang cukup, seperti daerah upwelling dan muara sungai.

C. Mikroplankton

Mikroplankton yaitu plankton berukuran 20 hingga 200 mikrometer. Mikroplankton mencakup berbagai jenis diatom, dinoflagellata, dan protozoa laut yang menjadi komponen dominan dalam komunitas plankton di perairan produktif (Hertika *et al.* 2021). Karena ukurannya relatif besar, mikroplankton dapat dengan mudah diamati menggunakan mikroskop cahaya biasa dan sering digunakan dalam penelitian oseanografi biologi. Keberadaan mikroplankton sangat berperan dalam rantai makanan di laut karena menjadi makanan utama bagi zooplankton berukuran besar dan larva ikan. Selain itu, beberapa jenis dinoflagellata dari kelompok ini dapat menyebabkan fenomena *blooming* atau ledakan populasi plankton yang mengubah warna air laut, dikenal sebagai *red tide* (Retnaningdyah, 2019; Sartimbul *et al.*, 2021). Meskipun fenomena ini mungkin meningkatkan produktivitas dalam jangka pendek, ketika terjadi dalam skala besar, mereka bahkan dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut dan bahkan kematian massal biota laut.

D. Makroplankton

Makroplankton yaitu plankton berukuran lebih dari 200 mikrometer hingga beberapa sentimeter. Organisme dalam kelompok ini mencakup larva berbagai hewan laut seperti ikan, krustasea, serta ubur-ubur kecil (medusae). Makroplankton memiliki kemampuan bergerak lebih aktif dibandingkan kelompok plankton yang lebih kecil, namun tetap tergolong plankton karena tidak dapat melawan arus secara efektif (Nontji, 2008; Hertika *et al.* 2021). Peran makroplankton sangat signifikan dalam rantai trofik laut, karena menjadi penghubung penting antara komunitas planktonik dan nektonik. Larva ikan yang termasuk makroplankton merupakan tahap awal kehidupan ikan sebelum menjadi perenang aktif, sehingga kelimpahan dan distribusi makroplankton sering digunakan sebagai indikator potensi sumber daya ikan di suatu wilayah perairan.

Jika ditinjau dari sudut pandang ekologi, pembagian plankton berdasarkan ukuran ini bukan hanya bersifat morfologis, tetapi juga mencerminkan strategi ekologis yang berbeda dalam beradaptasi terhadap lingkungan laut. Dengan rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, pikoplankton dan nanoplankton dapat menyerap nutrisi di perairan dengan unsur hara rendah. Sebaliknya, mikroplankton dan makroplankton lebih unggul dalam memanfaatkan kondisi perairan yang kaya nutrisi karena ukuran selnya yang besar memungkinkan kapasitas fotosintesis dan penyimpanan energi lebih tinggi. Dengan demikian, distribusi ukuran plankton sering kali menjadi cerminan kondisi trofik suatu perairan, di mana dominasi pikoplankton menunjukkan perairan oligotrofik, sedangkan dominasi mikroplankton dan makroplankton mengindikasikan perairan eutrofik atau subur. Dalam penelitian oseanografi, klasifikasi ukuran plankton juga memiliki implikasi metodologis yang penting. Ukuran jaring plankton (plankton net) yang digunakan dalam pengambilan sampel harus disesuaikan dengan kategori ukuran plankton yang ingin diteliti. Misalnya, untuk menangkap mikroplankton digunakan jaring berukuran pori sekitar 20 mikrometer, sedangkan pikoplankton umumnya memerlukan metode filtrasi khusus atau teknik analisis menggunakan mikroskop elektron dan sitometri alir. Pemilihan metode yang tepat sangat penting untuk memperoleh data kelimpahan dan keanekaragaman plankton secara akurat. Oleh karena itu, memahami perbedaan ukuran plankton penting secara metodologis dan ekologis untuk penelitian dan pengelolaan sumber daya laut.

Selain itu, hubungan antarukuran plankton mencerminkan hierarki trofik dalam rantai makanan laut. Pikoplankton sebagai produsen primer menjadi sumber energi pertama, dikonsumsi oleh nanoplankton dan mikrop plankton, yang kemudian dimakan oleh makrop plankton dan organisme nekton yang lebih besar. Pola ini menghasilkan sistem aliran energi yang kompleks yang saling bergantung. Gangguan terhadap salah satu kelompok ukuran plankton dapat memengaruhi keseimbangan ekosistem secara keseluruhan. Misalnya, penurunan populasi fitoplankton mikro akibat pencemaran atau perubahan suhu laut dapat menyebabkan kelangkaan pakan bagi zooplankton dan larva ikan, yang pada akhirnya menurunkan produktivitas perikanan. Dalam konteks perubahan iklim global, distribusi ukuran plankton juga mengalami pergeseran yang signifikan. Kenaikan suhu laut dan peningkatan stratifikasi air menghambat pencampuran lapisan perairan dan menurunkan pasokan nutrisi ke permukaan. Kondisi ini cenderung menguntungkan kelompok pikoplankton yang mampu bertahan dalam kondisi miskin hara, sementara populasi mikrop plankton menurun. Akibatnya, efisiensi transfer energi dalam rantai makanan laut menurun, karena organisme kecil seperti pikoplankton hanya dapat dimanfaatkan oleh sedikit kelompok konsumen. Fenomena ini menunjukkan bahwa ukuran plankton bukan sekadar atribut fisik, tetapi juga faktor penting yang menentukan produktivitas dan stabilitas ekosistem laut dalam jangka panjang.

2.2 Berdasarkan Fungsinya: Fitoplankton dan Zooplankton

Pengelompokan plankton tidak hanya didasarkan pada ukuran tubuhnya, tetapi juga pada fungsi serta perannya dalam rantai makanan di ekosistem laut. Berdasarkan fungsinya dalam ekosistem perairan, plankton dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok besar, yakni fitoplankton dan zooplankton. Keduanya memiliki hubungan yang erat dan terus berinteraksi, sehingga membentuk jaringan aliran energi yang rumit di lingkungan laut. Fitoplankton berperan sebagai organisme autotrof yang memproduksi bahan organik melalui fotosintesis, sedangkan zooplankton berfungsi sebagai organisme heterotrof yang memperoleh energi dengan mengonsumsi fitoplankton.

Fitoplankton adalah kelompok plankton yang berfungsi sebagai produsen utama dalam ekosistem laut. Mereka adalah organisme autotrofik, yang berarti mereka dapat menghasilkan makanan sendiri melalui fotosintesis, yang memanfaatkan energi cahaya matahari, karbon dioksida, dan unsur hara anorganik. Pigmen fotosintetik fitoplankton terutama terdiri dari klorofil, yang memainkan peran penting dalam penyerapan cahaya matahari. Fitoplankton sangat beragam, termasuk diatom, dinoflagellata, *Cyanobacteria*, dan coccolithophorid. Diatom adalah kelompok yang paling banyak dan tersebar luas, dengan dinding sel terbuat dari silika yang menyerupai kaca. Sementara itu, dinoflagellata memiliki flagela yang memungkinkannya bergerak di kolom air dan berubah sesuai dengan lingkungannya. Faktor-faktor lingkungan seperti intensitas cahaya, suhu, ketersediaan unsur hara, dan arus laut sangat memengaruhi keberadaan fitoplankton.

Karena fitoplankton membentuk inti dari rantai makanan laut, peran ekologis mereka sangat penting. Fitoplankton menyumbang sebagian besar produktivitas primer global dan berkontribusi terhadap keseimbangan karbon di atmosfer dalam ekosistem laut terbuka. Selain itu, energi yang dihasilkan melalui aktivitas fotosintesis fitoplankton dimanfaatkan oleh organisme pada tingkat trofik yang lebih tinggi, mulai dari zooplankton, ikan, hingga predator puncak. Proses ini tidak hanya mendukung aliran energi dalam rantai makanan, tetapi juga

22 berperan dalam penyerapan karbon dioksida serta produksi oksigen yang berkontribusi terhadap kestabilan iklim global. Di sisi lain, fitoplankton juga berperan penting dalam siklus biogeokimia berbagai unsur hara, seperti nitrogen, fosfor, dan silikon, yang sangat diperlukan untuk menjaga kesuburan dan produktivitas perairan.

95 Zooplankton adalah konsumen primer atau sekunder dalam rantai makanan laut. Karena heterotrofik, mereka tidak dapat memproduksi makanan sendiri dan bergantung pada organisme lain, terutama fitoplankton, untuk mendapatkan energi. Zooplankton terdiri dari berbagai jenis organisme, mulai dari protozoa yang sangat kecil hingga larva hewan laut yang sangat besar. Zooplankton dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori utama, yaitu holoplankton dan meroplankton. Holoplankton merupakan organisme yang sepanjang siklus hidupnya tetap berada sebagai plankton, contohnya seperti copepoda, euphausiid, dan chaetognatha. Sebaliknya, meroplankton hanya bersifat planktonik pada tahap awal kehidupannya, khususnya saat fase larva, seperti pada echinodermata, bivalvia, dan larva ikan.

4 Zooplankton memiliki peran penting sebagai penghubung dalam aliran energi, yaitu antara produsen primer (fitoplankton) dan konsumen pada tingkat trofik yang lebih tinggi, seperti ikan kecil serta larva ikan di ekosistem laut. Organisme ini memanfaatkan fitoplankton sebagai sumber makanan melalui aktivitas herbivori, sehingga turut mengendalikan kelimpahan fitoplankton, sekaligus menjadi sumber nutrisi bagi berbagai biota laut lainnya. Karena perubahan kelimpahan atau komposisi jenis zooplankton dapat berdampak pada distribusi ikan dan produktivitas perikanan, dinamika populasi zooplankton sangat memengaruhi stabilitas ekosistem laut. Selain itu, zooplankton berpartisipasi dalam siklus karbon laut melalui proses yang dikenal sebagai pompa biologi, di mana mereka mengendap partikel organik ke dasar laut saat mereka mengeluarkan kotoran atau mati. Proses ini membantu menyimpan karbon di sedimen laut dan mengurangi konsentrasi karbon dioksida di atmosfer.

58 Dari sudut pandang manusia, pemahaman tentang fungsi plankton sangat bermanfaat. Fitoplankton dan zooplankton kerap dimanfaatkan sebagai bioindikator dalam menilai kondisi kualitas perairan serta mendeteksi dampak pencemaran lingkungan. Beberapa jenis fitoplankton bahkan telah digunakan dalam industri farmasi dan pangan karena kandungan senyawa bioaktifnya yang tinggi. Oleh karena itu, studi tentang kehidupan dan peran plankton meningkatkan pengetahuan ilmiah dan membangun dasar untuk pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2.3 Berdasarkan Siklus Hidup: Holoplankton dan Meroplankton

76 Selain itu, plankton dapat diklasifikasikan berdasarkan siklus hidupnya dan dibagi menjadi dua kelompok utama: holoplankton dan meroplankton. Holoplankton adalah organisme yang mempertahankan bentuk planktonik selama seluruh tahap siklus hidupnya. Sejak menetas hingga dewasa, holoplankton tetap berada dalam bentuk planktonik dan tidak mengalami perubahan bentuk menjadi organisme bentik atau nektonik. Contoh dari kelompok ini antara lain adalah diatom, dinoflagellata, copepoda, dan beberapa jenis ubur-ubur kecil seperti medusa. Komunitas fitoplankton dan zooplankton sering dijadikan sebagai indikator biologis untuk mengevaluasi mutu perairan sekaligus mengidentifikasi adanya tekanan atau gangguan akibat pencemaran. Karena itu, populasi holoplankton sering kali digunakan sebagai indikator kualitas lingkungan perairan.

Sementara itu, meroplankton hanya menghabiskan sebagian dari siklus hidupnya dalam bentuk planktonik, umumnya pada tahap larva atau juvenil, sebelum akhirnya bermetamorfosis menjadi organisme dewasa yang hidup menetap (bentik) atau berenang bebas (nekton). Contoh meroplankton meliputi larva dari berbagai kelompok hewan laut seperti ikan (larva ikan), moluska (veliger), krustasea (nauplius dan zoea), serta echinodermata (bipinnaria dan pluteus). Fase planktonik pada meroplankton memiliki peran penting dalam proses penyebaran atau dispersal spesies di laut, karena arus laut dapat membawa larva ke berbagai wilayah sehingga mendukung kolonisasi dan keanekaragaman hayati di ekosistem laut. Dalam konteks ekologi laut, perbedaan antara holoplankton dan meroplankton sangat penting untuk memahami dinamika komunitas plankton. Holoplankton berperan dalam rantai makanan primer sebagai produsen dan konsumen tingkat rendah, sedangkan meroplankton memainkan peran penting dalam rekrutmen populasi organisme dasar laut. Selain itu, fluktuasi populasi meroplankton dapat mencerminkan musim pemijahan berbagai biota laut dan menjadi indikator produktivitas ekosistem. Kombinasi kedua kelompok ini menciptakan keseimbangan dalam jaringan trofik perairan, mendukung keberlanjutan energi dan materi di laut.

BAB III

MORFOLOGI DAN STRUKTUR PLANKTON

3.1 Ciri-ciri Morfologi Sel/Alga (Fitoplankton)

Fitoplankton memiliki beragam bentuk dan struktur sel yang mencerminkan kemampuan adaptasinya terhadap berbagai kondisi lingkungan perairan. Keragaman morfologi ini meliputi perbedaan ukuran, bentuk tubuh, keberadaan flagela, dinding sel, serta struktur tambahan seperti duri, sisik, atau vesikula gas yang membantu mempertahankan posisinya di kolom air. Variasi bentuk tersebut tidak hanya berperan dalam proses fotosintesis dan efisiensi penyerapan cahaya, tetapi juga memengaruhi strategi bertahan hidup terhadap arus, pemangsaan, dan kompetisi antar spesies.



Gambar 1. Jenis-jenis fitoplankton.
Sumber: Dokumentasi Pribadi (2023).

Secara taksonomis, fitoplankton tidak membentuk kelompok tunggal yang seragam, yang memiliki berbagai macam struktur sel yang kompleks (Hertika *et al.* 2021). Fitoplankton hadir dalam berbagai kapasitas, mulai dari yang sangat kecil sekitar 0.2 μm (pikoplankton) hingga yang lebih besar melebihi 200 μm (makroplankton) (Nontji, 2008). Fitoplankton dengan struktur selnya menunjukkan variasi yang luas, mencakup beragam bentuk dan tipe dinding sel (silika keras, dinding sel rangkap, atau membran tipis), flagela pergerakan, dan berbagai warna (Yanuhar, 2018). Keanekaragaman seluler fitoplankton terlihat dari perbedaan bentuk dan jenis dinding sel ada yang tersusun dari silika keras, dinding rangkap, atau membran tipis serta kemampuan bergerak menggunakan flagela pada beberapa kelompok. Selain itu, tiap kelas fitoplankton menunjukkan variasi pigmentasi yang khas (Rahmah *et al.* 2022). Bentuk sel yang pipih atau berduri biasanya berfungsi untuk memperluas permukaan tubuh sehingga menghambat laju tenggelam dan meningkatkan produktivitas fotosintesis (Hertika *et al.* 2021). Selain itu, keberadaan vakuola gas dan flagela memungkinkan beberapa jenis fitoplankton mengatur posisi vertikalnya di kolom air untuk memperoleh cahaya optimal (Masithah, 2023).

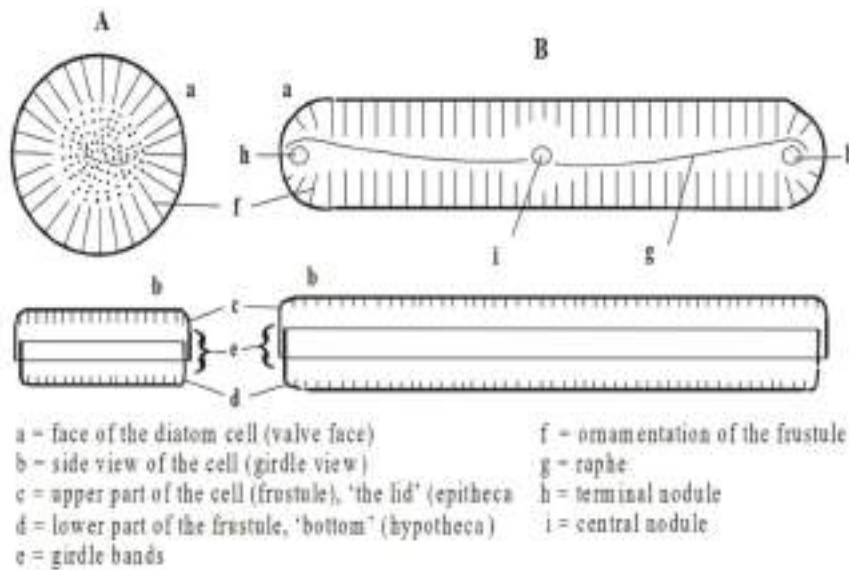
a. Diatom (Bacillariophyceae)

Diatom adalah kelompok fitoplankton yang paling melimpah dan memegang sebagai produsen utama di ekosistem perairan laut dan air tawar. Morfologi diatom sangat beragam, mulai dari bentuk bulat, elips, hingga memanjang menyerupai jarum, dengan pola permukaan dan ornamen halus yang berbeda antar spesies. Diatom dibagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan bentuk dan simetrinya: Centric diatom (ordo Centrales), yang memiliki simetri radial dan biasanya bersifat planktonik, melayang di kolom air; serta Pennate diatom (ordo Pennales), yang memiliki simetri bilateral dan cenderung menempel pada substrat sebagai organisme benthik. Selain berperan penting dalam rantai makanan, Diatom juga berkontribusi besar dalam siklus biogeokimia karbon dan silika di perairan. Pigmen utama yang dimilikinya, seperti klorofil a, klorofil c, dan fucoxanthin, memberikan warna kecokelatan khas pada kelompok ini serta mendukung efisiensi fotosintesis di berbagai kondisi cahaya. Gambar berikut menunjukkan beberapa contoh morfologi Diatom (Bacillariophyceae) yang ditemukan pada hasil pengamatan.



Gambar 2. Diatom
Sumber: Widjaja (2019).

Diatom yang termasuk dalam kelas Bacillariophyceae, merupakan mikroalga bersel tunggal. Sebagian besar eksis sebagai individu mandiri, meski ada juga yang membentuk koloni. Salah satu karakteristik khas diatom adalah adanya cangkang sel yang kaku, atau frustul, yang tersusun dari silika bercampur pektin (Widjaja, 2019). Frustula memiliki bentuk kotak petri dengan dua bagian utama, epiteka (bagian atas) dan hipoteka (bagian bawah), yang saling terhubung oleh pita pengikat atau pita girdle. Setiap spesies memiliki pola pori dan dekorasi yang berbeda pada frustulnya, sehingga struktur ini sering digunakan untuk mengidentifikasi morfologi diatom (Fu *et al.* 2022). Diatom terbagi menjadi dua kelompok berdasarkan bentuk dan simetrinya. Yang pertama adalah pennate diatom, yang memiliki simetri bilateral dan biasanya bersifat planktonik; yang kedua adalah centric diatom, yang memiliki simetri radial dan biasanya bersifat planktonik. Fucoxanthin, yang memberikan warna coklat khas sel, dan klorofil a dan c adalah pigmen fotosintetik utama diatom.

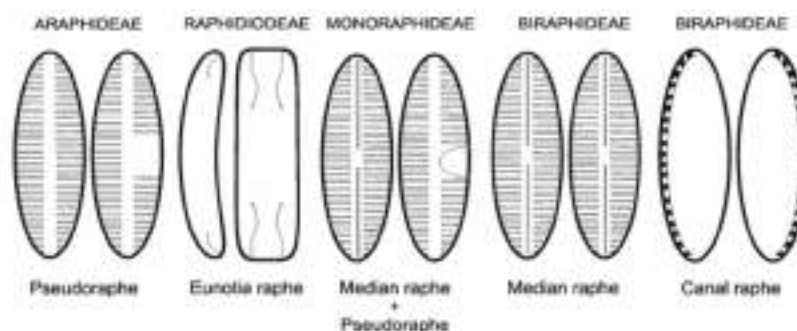


Gambar 3. Struktur tubuh diatom.

Sumber: Sorvari *et al.* (2001)

Diatom terbagi menjadi dua kategori utama, yakni diatom sentris (bentuk radial) dan diatom penat (silindris atau lonjong). Kedua kelompok ini berbeda dalam morfologi dan simetri frustule (Putra *et al.* 2024). Ornamen pada katup diatom biasanya tersusun secara melingkar atau memancar dari pusat, sedangkan sel diatom sentris berbentuk seperti cakram atau silinder dengan simetri radial pada permukaannya (Widjaja, 2019). Organisme pada kelompok ini umumnya tidak memiliki struktur raphe, sehingga kemampuan pergerakannya relatif terbatas. Akibatnya, sebagian besar hidup secara planktonik dengan cara melayang mengikuti dinamika pergerakan massa air di (Omoruyi dan Kadiri, 2024).

Kelompok organisme ini pada umumnya tidak memiliki raphe sebagai alat pergerakan, sehingga mobilitasnya sangat terbatas. Oleh karena itu, mereka cenderung hidup sebagai plankton yang melayang di kolom perairan dan pergerakannya lebih banyak dipengaruhi oleh arus atau dinamika massa air (Falcitore dan Mock, 2022). Diatom memanfaatkan struktur raphe untuk mengeluarkan lendir bersifat gelatin yang tersusun dari mukopolisakarida. Sekresi tersebut berperan agar sel dapat menempel pada substrat seperti batu atau sedimen dasar perairan. Pada diatom penat, perpindahan sel berlangsung lewat aliran sitoplasma yang bergerak di dalam sel dan keluarnya mukopolisakarida melalui raphe (Cohn *et al.* 2021).



Gambar 4. Struktur raphe sel diatom.

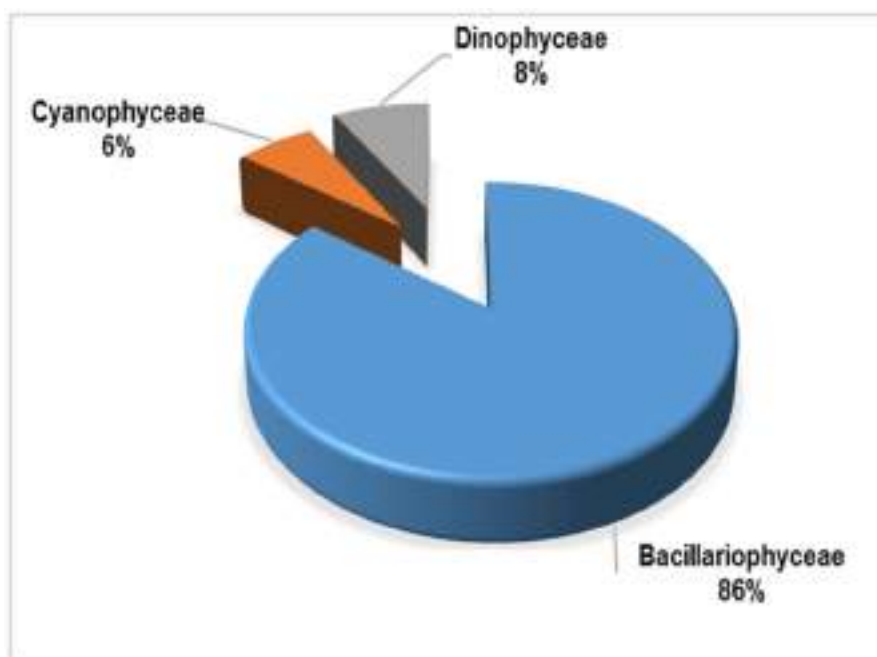
Sumber: Nugroho (2019).

Perbedaan bentuk dan karakteristik struktur raphe merupakan salah satu aspek penting yang digunakan dalam pengelompokan taksonomi diatom. Berdasarkan ada atau tidaknya raphe, diatom kemudian dapat dibagi ke dalam beberapa tipe utama (Nugroho, 2019):

1. Araphideae, yaitu kelompok diatom yang tidak memiliki raphe sama sekali, atau hanya memperlihatkan struktur menyerupai raphe semu yang dikenal sebagai pseudoraphe;
2. Raphidioideae, yaitu kelompok diatom yang memiliki raphe dengan perkembangan terbatas, umumnya hanya terdapat pada bagian ujung sel, yang dikenal sebagai tipe raphe eunotoid;
3. Monoraphideae, yaitu kelompok diatom yang memiliki raphe hanya pada salah satu sisi sel, sementara sisi lainnya tidak memiliki struktur tersebut;
4. Biraphideae, yaitu kelompok diatom yang memiliki struktur raphe pada kedua sisi katup sel. Raphe tersebut dapat terletak di bagian tengah yang disebut median raphe maupun berada di sisi lateral yang dikenal sebagai canal raphe.

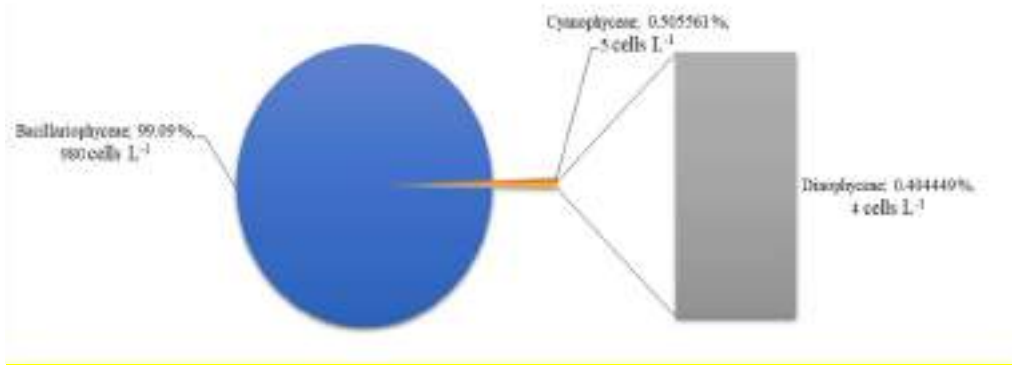
Selain raphe, fitur morfologi penting lainnya untuk identifikasi diatom adalah striae, yaitu barisan alveolus pada permukaan katup. Pada diatom sentris, striae biasanya tersusun radial mengikuti jari-jari katup, sementara pada diatom penat, striae orientasinya melintang terhadap sumbu apikal sel (Cox, 2014). Morfologi ujung katup atau apex diatom menunjukkan variasi yang beragam, mulai dari bentuk bulat, runcing, memanjang, hingga menyerupai gada. Variasi bentuk apex yang dikombinasikan dengan pola striae serta ornamentasi silika yang khas pada frustula menjadi karakter penting yang digunakan sebagai dasar dalam identifikasi morfologi spesies diatom.

Dominansi diatom dalam ekosistem perairan juga diperkuat oleh berbagai hasil penelitian lapangan. Salah satunya ditunjukkan pada studi di perairan Sangihe–Talaud, di mana komposisi fitoplankton didominasi oleh kelas Bacillariophyceae. Selain itu juga, darimuara Sungai Musi dan Banyuasin juga didominasi oleh kelas Bacillariophyceae.



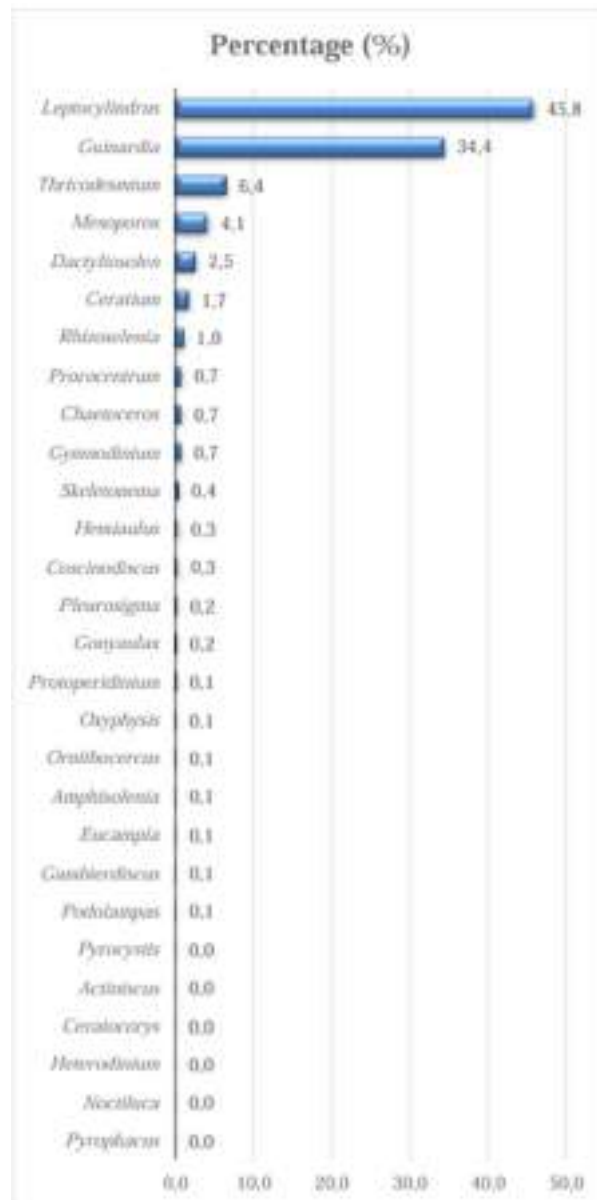
Gambar 5. Komposisi fitoplankton perairan permukaan Sangihe-Talaud

Sumber : (Rozirwan *et al.* 2021)



Gambar 6. Struktur komposisi fitoplankton di muara sungai Musi dan Banyuasin
Sumber: (Rozirwan *et al.* 2024)

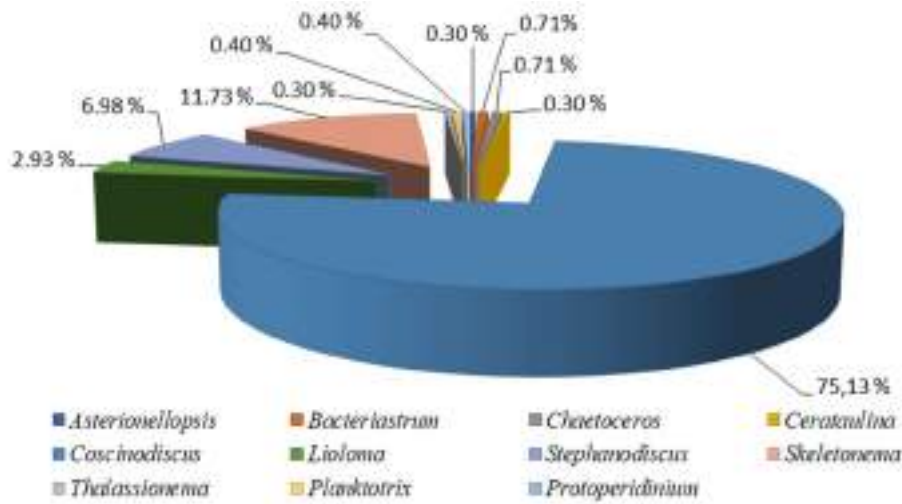
Berdasarkan hasil penelitian pada perairan Sangihe–Talaud pada Gambar 6, kelas Bacillariophyceae teridentifikasi terdiri atas sepuluh genus, yaitu *Chaetoceros*, *Coscinodiscus*, *Dactyliosolen*, *Eucampia*, *Guinardia*, *Hemiaulus*, *Leptocylindrus*, *Pleurosigma*, *Rhizosolenia*, dan *Skeletonema*. Dari keseluruhan genus tersebut, *Leptocylindrus* dan *Guinardia* merupakan genus yang paling dominan dan ditemukan di seluruh stasiun pengamatan. Kelimpahan tertinggi tercatat pada *Leptocylindrus* dan *Guinardia*. Sementara itu, kelas Dinophyceae menunjukkan keragaman genus yang lebih tinggi, yaitu sebanyak tujuh belas genus, namun dengan tingkat kelimpahan yang relatif lebih rendah dibandingkan Bacillariophyceae. Beberapa genus seperti *Ceratium* dan *Mesoporos* ditemukan di seluruh stasiun pengamatan, meskipun dengan kelimpahan yang jauh lebih kecil. Pada kelas Cyanophyceae, hanya ditemukan satu genus, yaitu *Trichodesmium*, dengan distribusi terbatas pada beberapa stasiun pengamatan dan kelimpahan yang relatif rendah.



Gambar 7. Persentase spesies fitoplankton di perairan permukaan Sangihe-Talaud

Sumber : (Rozirwan *et al.* 2021)

Berdasarkan hasil penelitian di muara sungai Musi dan Banyuasin Sebelas genus fitoplankton yang ditemukan di kedua muara diklasifikasikan menjadi empat kelompok. Sembilan genus Bacillariophyceae, satu genus Cyanophyceae, dan satu genus Dinophyceae. Pada tingkat genus, *Coscinodiscus* terbukti dominan di semua pengamatan stasiun. Dalam kelas Bacillariophyceae, genus berikut diidentifikasi: *Asterionellopsis*, *Bacteriastrum*, *Chaetoceros*, *Cerataulus*, *Coscinodiscus*, *Lioloma*, *Stephanodiscus*, *Skeletonema*, dan *Thalassionema*. Dalam kelas Cyanophyceae yang juga disebut Cyanobacteriota atau Cyanophyta, hanya genus *Planktothrix*, dan dalam kelas Dinophyceae, genus *Protophydinium* diidentifikasi.

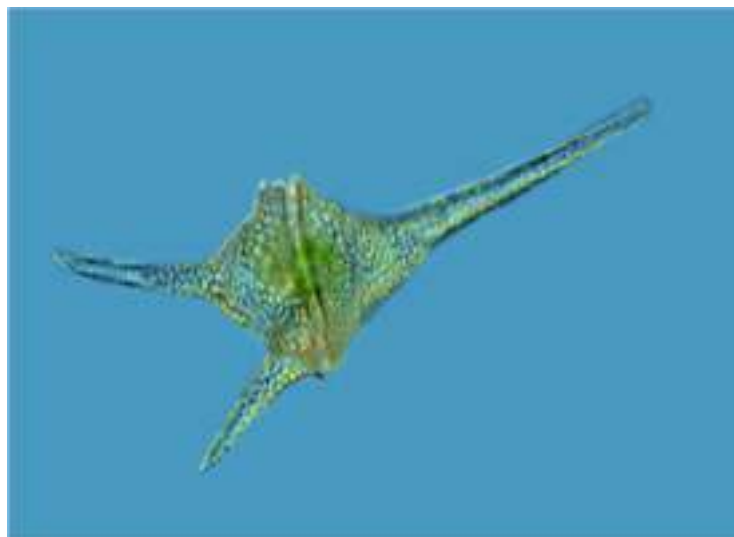


Gambar 8. Persentase genus fitoplankton di muara sungai Musi dan Banyuasin.

Sumber: (Rozirwan *et al.* 2024)

b. Dinoflagellata (Dinophyceae)

Dinoflagellata (Dinophyceae) adalah kelompok fitoplankton uniseluler yang ditandai oleh keberadaan dua flagela, yang berfungsi sebagai alat utama untuk bergerak. Flagela tersebut terletak pada dua posisi berbeda: satu mengelilingi sel di dalam alur melintang (cingulum) dan satu lagi memanjang ke arah belakang melalui alur memanjang (sulcus), sehingga menghasilkan gerakan berputar yang khas.

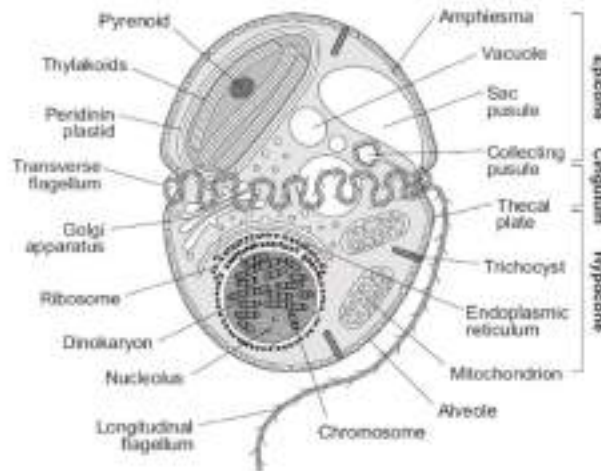


Gambar 9. Dinoflagellata.

Sumber: Widjaja (2019).

Fitoplankton eukariotik dikenal sebagai dinoflagellata yang menonjol karena morfologinya yang kompleks, terutama ditunjukkan oleh flagel yang memungkinkan pergerakan aktif (Cooney *et al.* 2024). Ukuran sel diatom bervariasi antara 10 hingga 200 μm , dengan bentuk tubuh yang beragam seperti bulat, oval, memanjang, maupun bertanduk. Ini

membantu memperluas permukaan sel dan memperlambat laju tenggelam ke dasar (Weliyadi, 2013).



Gambar 10. Struktur dinoflagellata.

Sumber: Gagat *et al.* (2013).

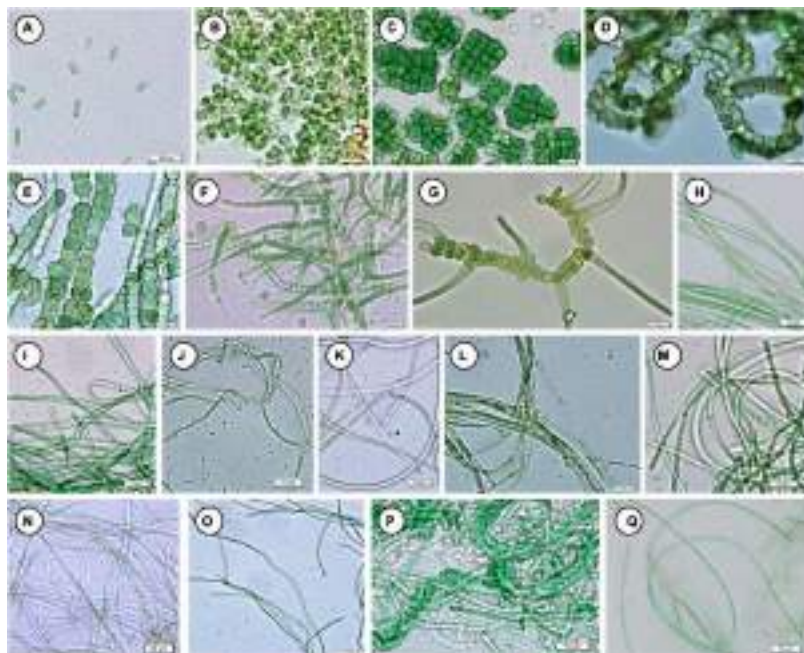
Nama Dinoflagellata berasal dari kata Yunani "dinos" yang berarti "berputar" dan "flagellum" yang berarti "cambuk". Gerakan spiral unik yang dihasilkan oleh kombinasi gerakan kedua flagela ini disebut sebagai gerakan spiral (Gagat *et al.* 2013). Tubuh dinoflagellata terdiri dari dua bagian utama, yaitu epitheca di bagian atas dan hypotheca di bagian bawah, yang dipisahkan oleh cincin khusus yang disebut cingulum atau girdle (Nirmalasari, 2018). Selain itu, cingulum memanjang ke bagian posterior sel melalui lekukan vertikal yang disebut sulkus. Sulkus terhubung ke cingulum dan menjadi tempat dua flagela menempel. Flagela transversal pada cingulum bertanggung jawab menghasilkan gerakan memutar sel, sementara flagela longitudinal yang menempel pada sulkus berfungsi sebagai pengarah dan kemudi pergerakan sel (Vanitha dan Selvi, 2024; Maruyama *et al.* 2024).

Struktur alveoli terdiri dari lapisan vesikel pipih di atas permukaan sel dinoflagellata, yang disebut amphiesma (Vanitha and Selvi, 2024). Spesies thecate memiliki dinding sel kaku yang terbentuk dari alveoli berlapis selulosa, disebut teka, sedangkan yang tanpa lempeng dikenal sebagai athecate atau tipe "tanpa rambut" (Putra *et al.* 2024). Mayoritas spesies memiliki organel pertahanan yang disebut ekstrusom atau trichocyst, menempel tegak lurus pada membran plasma dan berperan melindungi sel (Gul dan Nawaz, 2014). Kebanyakan spesies dilengkapi dengan struktur pertahanan berupa ekstrusom atau trikosis, yang tersusun tegak terhadap membran plasma. Struktur ini berperan sebagai mekanisme perlindungan sel dari gangguan atau ancaman di lingkungan sekitarnya (Gómez, 2020). Organisme ini memiliki mitokondria dengan krista berbentuk tabung. Sebagian besar sitoplasmanya didominasi oleh vakuola besar, termasuk sepasang pusula yang berfungsi dalam mengatur osmoregulasi serta membuang produk metabolisme (Gavelis *et al.* 2019). Sebagian besar dinoflagellata memiliki plastida yang berfungsi dalam proses fotosintesis. Plastida tersebut mengandung berbagai pigmen, seperti klorofil a dan c₂, β -karoten, peridinin serta beberapa jenis xantofil. Secara struktural, plastida ini dibungkus oleh tiga lapisan membran dan memiliki tilakoid yang tersusun dalam tumpukan tiga lapis (Widjaja, 2019). Menurut Kristiana *et al.* (2024)

menyebutkan bahwa pigmen-pigmen ini menyumbangkan warna pada sel dimulai warna coklat kehijauan sampai kemerahan. Karena sifat ini, beberapa spesies dikenal sebagai *fire plant/algae* (tumbuhan api) terutama karena kemampuan mereka menghasilkan cahaya melalui bioluminesensi (*Noctiluca scintillans*).

c. Sianobakteri (*Cyanobacteria*)

Cyanobacteria (alga hijau-biru) adalah organisme prokariotik bersel tunggal yang mampu melakukan fotosintesis layaknya tumbuhan. Namun, organisme jenis ini Meski disebut bukan alga sejati karena selnya tidak memiliki inti yang dibatasi membran. *Cyanobacteria* tidak memiliki flagela sebagai alat gerak, dan ukuran selnya sangat kecil, biasanya kurang dari 5 μm . Oleh karena itu, kelompok organisme ini diklasifikasikan sebagai bagian dari ultraplankton (Widjaja, 2019). Hingga saat ini, lebih dari 4.400 spesies *Cyanobacteria* telah berhasil diidentifikasi. Seluruh spesies tersebut memiliki kemampuan melakukan fotosintesis dengan memanfaatkan pigmen seperti klorofil-a, karoten, serta fikobilin (Dvořák *et al.* 2015). Pigmen fikobilin, terutama fikosianin berwarna biru dan fikoeritrin berwarna merah, menghasilkan warna hijau kebiruan khas pada *Cyanobacteria*. Pigmen ini juga memungkinkan organisme ini beradaptasi dan tetap melakukan fotosintesis meski intensitas cahaya rendah (Kristiana *et al.* 2024).

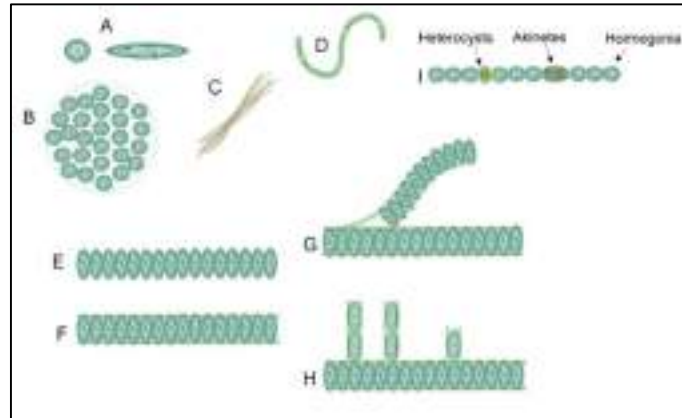


Gambar 11. *Cyanobacteria* pembentuk tikar yang diidentifikasi dalam penelitian ini. (A) *Synechococcus nidulans*, (B) *Gloeocapsa gelatinosa*, (C) *Klorogloeopsis fritschii*, (D) *Anabaena* sp. NK1-14, (E) *Fischerella* sp. NK 1-16, (P) *Fischerella* sp. NK 1-20, (G).

Sumber: (Keshari *et al.* 2022).

Cyanobacteria mempunyai bentuk morfologi yang sangat bervariasi, mulai dari uniseluler, berfilamen, hingga membentuk koloni yang diselubungi lendir (*mucilage*). Dinding selnya tersusun atas peptidoglikan yang kuat, sehingga mampu bertahan dalam berbagai kondisi ekstrem, termasuk salinitas tinggi dan suhu yang fluktuatif. Beberapa genus seperti *Anabaena*, *Nostoc*, dan *Microcystis* mampu membentuk heterosista, yaitu sel khusus yang

berfungsi untuk fiksasi nitrogen, memungkinkan organisme ini bertahan di perairan dengan kadar nutrisi rendah.



Gambar 12. Jenis-jenis *Cyanobacteria*.

Sumber: Mehdizadeh Allaf & Peerhossaini (2022).

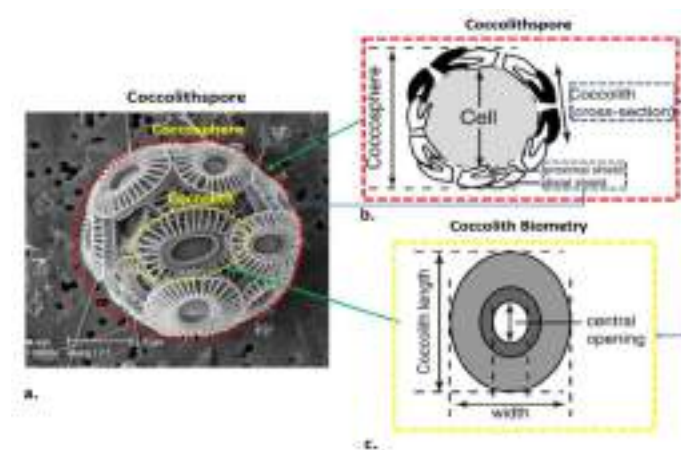
Cyanobacteria memperlihatkan variasi struktur dan bentuk yang sangat beragam (sel tunggal dan filamen multiseluler kompleks) (Nirmalasari, 2018). Sel-sel *Cyanobacteria* dapat memiliki bentuk yang beragam, seperti bulat, oval, maupun silindris. Selain hidup sebagai sel tunggal, organisme ini juga sering membentuk koloni dengan pola susunan yang dapat teratur ataupun tidak teratur (Mehdizadeh Allaf dan Peerhossaini, 2022). Dalam koloni *Cyanobacteria*, sel-sel umumnya terhubung satu sama lain melalui matriks lendir (mucilage) yang terbentuk selama pertumbuhan. Lapisan lendir ini berperan sebagai pelindung sekaligus membantu menjaga keterikatan dan pengelompokan sel dalam koloni (Bowange *et al.* 2022). Beberapa *Cyanobacteria* diketahui membentuk koloni, misalnya *Merismopedia* yang memiliki susunan sel teratur menyerupai pola kisi, serta *Microcystis* yang koloni selnya tersusun tidak beraturan. Ukuran koloni pada kelompok ini sangat bervariasi, mulai dari beberapa sel hingga ribuan sel, bergantung pada spesiesnya (Dvořák *et al.* 2017).

Pada *Cyanobacteria* yang memiliki bentuk filamen, sel-sel hasil pembelahan tidak terpisah sepenuhnya, melainkan tetap saling terhubung sehingga tersusun membentuk deretan sel memanjang yang dikenal sebagai trikoma (Widjaja, 2019). Trikoma tersebut umumnya dikelilingi oleh lapisan mukilago yang menyelubungi deretan sel, sehingga keseluruhan struktur filamen terlihat menyerupai benang halus (Putra *et al.* 2024). Pada kelompok taksonomi tertentu, struktur trikoma dapat mengalami pemutusan yang menghasilkan percabangan semu. Fenomena ini merupakan ciri yang kerap dijumpai pada ordo *Cyanobacteria* dengan tipe pertumbuhan berfilamen (Nirmalasari, 2018). Berbeda dari *Cyanobacteria* lainnya, ordo *Nostocales* melakukan pembelahan sel baik secara tegak lurus maupun membentuk sudut terhadap sumbu utama filamen. Pola pembelahan ini menyebabkan terbentuknya percabangan sejati dengan tingkat kompleksitas struktur yang lebih tinggi. Pada beberapa spesies, pola pertumbuhan tersebut bahkan berkembang menjadi trikoma multiseriat, yaitu susunan beberapa baris trikoma yang tersusun sejajar, sebagaimana ditemukan pada anggota *Stigonematales* (Dvořák *et al.* 2017). *Cyanobacteria* berbentuk filamen menunjukkan adanya diferensiasi sel yang memiliki fungsi khusus, yang mencerminkan tingkat organisasi

1 seluler yang cukup berkembang meskipun organisme ini tergolong prokariotik. Pada kelompok ini terdapat tiga tipe sel yaitu hormogonia, heterokista, dan akinet (Uyeda *et al.* 2016).

d. Kokkolitofora (Haptophyta)

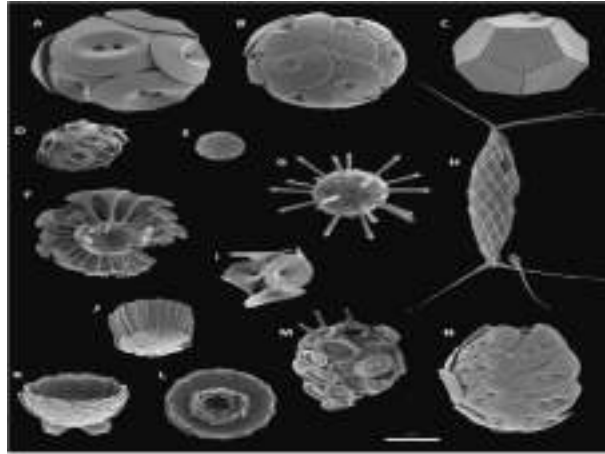
1 Kokolitofora adalah fitoplankton uniseluler yang tergolong ke dalam kelas Prymnesiophyceae atau Haptophyta. Kelompok ini dicirikan oleh keberadaan kokolit, yaitu lempeng mikroskopis tersusun atas kalsium karbonat (CaCO_3) yang melapisi bagian luar sel. Susunan kokolit tersebut membentuk selubung pelindung yang dikenal sebagai kokosfera dan menjadi ciri morfologi utama kokolitofora (Jacobi *et al.* 2021). Ukuran 2–20 μm umumnya dimiliki oleh sel kokolitofa dengan bentuk sferis hingga elips, sehingga digolongkan sebagai nanoplankton. Organisme ini memiliki dua flagela yang berukuran halus serta satu struktur khas yang disebut haptonema. Haptonema berbentuk filamen tipis menyerupai rambut dan berperan penting dalam membantu perlekatan sel serta mendukung interaksi dan penangkapan partikel di lingkungan perairan (Putra *et al.* 2024).



Gambar 13. Kokkolitofora.

Sumber: Jacobi *et al.* (2021).

141 Selain memiliki dua flagela yang digunakan untuk pergerakan, Kokkolitofora juga dilengkapi dengan organel khas berupa haptonema, yaitu struktur filamen halus yang tidak digunakan untuk berenang, tetapi berperan dalam proses menempel, penangkapan partikel makanan, dan persepsi lingkungan sekitar (Jordan & Green, 1994). Pigmen fotosintetik utama yang dimiliki antara lain klorofil a, klorofil c, dan fucoxanthin, yang memberikan warna kecokelatan keemasan pada kelompok ini.



Gambar 14. Jenis-jenis kokolitofor.
Sumber: Firdaus & Wijayanti (2019).

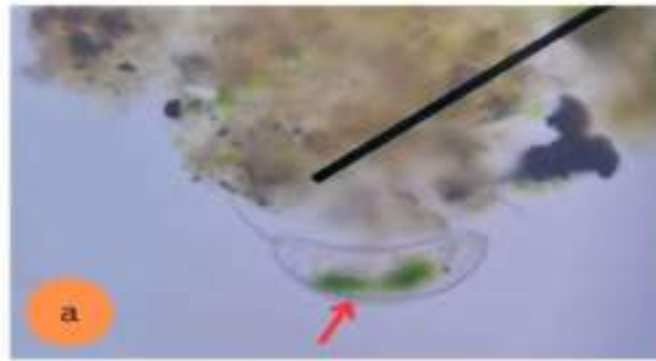
Umunya sel kokolitofora dengan bentuk bylat sampai lonjong, sehingga termasuk kelompok nanoplankton. Organisme ini memiliki dua flagela halus dan satu struktur khusus bernama haptonema, yaitu filamen tipis mirip rambut yang membantu sel menempel pada permukaan dan menangkap partikel di perairan. Struktur kalsit pada sel tidak hanya memberikan perlindungan mekanis dari tekanan lingkungan dan predator, tetapi juga membantu mengatur daya apung serta memantulkan cahaya, sehingga mendukung efisiensi fotosintesis (Eikrem *et al.* 2016). Setelah sel mengalami kematian, kokolit yang bersifat keras dan resistan akan mengendap ke dasar perairan laut, membentuk fenomena yang dikenal sebagai *calcium carbonate rain*. Proses ini berkontribusi terhadap akumulasi sedimen karbonat di dasar laut dan memiliki peran penting dalam siklus biogeokimia karbon, khususnya sebagai mekanisme penyimpanan karbon jangka panjang yang berpengaruh terhadap regulasi iklim global (Firdaus dan Wijayanti, 2019).

Kokolitofora memiliki kloroplas dengan nuansa cokelat keemasan yang dihasilkan oleh kombinasi pigmen fotosintetik, terutama klorofil a dan klorofil c, serta pigmen aksesori seperti β -karoten, fucoxanthin, diadinoxanthin, dan diatoxanthin. Dominasi pigmen-pigmen tersebut menyebabkan sel kokolitofora menampilkan warna kuning kecokelatan yang khas, terutama ketika populasinya meningkat tajam atau pada peristiwa *bloom* (Yudasmar, 2015). Keberadaan pigmen-pigmen tersebut menjadi ciri pembeda utama kokolitofora dibandingkan alga hijau, sekaligus menunjang perannya sebagai organisme fototrof yang berkontribusi signifikan terhadap produktivitas primer di ekosistem laut (Putra *et al.* 2024). Pada umumnya, spesies dalam kelompok ini dilengkapi dengan sepasang flagela yang memiliki ukuran relatif sama (isokont), dengan pola gerak yang dapat bersifat homodinamik maupun heterodinamik. Namun demikian, pada beberapa kelas, misalnya Pavlovophyceae, kedua flagela memiliki panjang yang berbeda dan permukaannya tertutup sisik-sisik halus (Eikrem *et al.* 2016). Karakteristik unik lainnya adalah keberadaan haptonema, yaitu organel berbentuk benang yang secara struktural dan fungsional berbeda dari flagela, tetapi berperan penting dalam membantu sel berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya (Taylor *et al.* 2017). Kokolit sirkumflagelar tersusun membentuk cincin yang mengelilingi area keluarnya flagela pada kokosfera. Pelat-pelat ini saling bertumpuk secara imbrikatif dengan orientasi berlawanan arah jarum jam, sehingga membentuk lapisan pelindung yang kokoh sekaligus tetap lentur (Jacobi *et al.* 2021).

Pada tiap spesies, satu unit kokosfera dapat dilengkapi sekitar delapan hingga dua belas apendiks yang tersusun atas beberapa lapisan kokolit. Struktur ini terdiri atas kokolit dasar serta kokolit apendiks yang berbentuk memanjang dan saling berhimpit rapat, membentuk suatu sistem mekanik yang kompleks meskipun antarunsurnya tidak terhubung atau saling mengunci secara sempurna (Young *et al.* 2009).

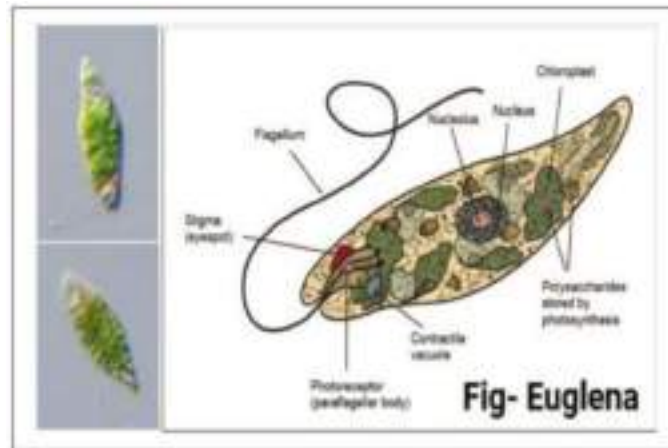
e. **Euglenozoa (Euglenophyceae)**

Euglenozoa adalah kelompok mikroalga bersel tunggal yang memiliki strategi nutrisi fleksibel. Organisme ini mampu berfotosintesis layaknya tumbuhan, namun juga mampu memanfaatkan bahan organik terlarut yang tersedia di lingkungan sebagai sumber energi sekaligus sumber karbon, sehingga digolongkan sebagai organisme mixotrof. Ciri khas utama dari kelompok ini adalah adanya flagela satu atau dua buah yang digunakan untuk pergerakan aktif di kolom air, serta tubuh yang lentur karena tidak memiliki dinding sel sejati.



Gambar 15. Euglenozoa.
Sumber: Hevila *et al.* (2023).

Euglenozoa adalah kumpulan protein eukariotik yang menunjukkan tingkat keragaman tinggi, baik dari sisi struktur tubuh maupun fungsi fisiologinya. Empat kelompok utama organisme berflagela: euglenida, kinetoplastida, diplomid, dan postgaardid termasuk dalam supergrup Excavata. Anggota Euglenozoa memiliki pola hidup yang sangat beragam, mulai dari organisme yang mampu berfotosintesis, bersifat heterotrof, hingga yang menjalani kehidupan sebagai parasite (Bicudo and Menezes, 2016). Secara umum, anggota kelompok ini tersusun atas satu sel dan dilengkapi alat gerak berupa flagela. Sel-selnya tidak memiliki dinding sel yang kaku, sehingga struktur tubuhnya bersifat lentur dan mampu mengalami perubahan bentuk sesuai kondisi lingkungan (Morotti *et al.* 2018).



Gambar 16. Morfologi Euglenozoa.

Sumber: Putra *et al.* (2024).

Menurut Kostygov *et al.* (2021) sebagai alternatif untuk dinding sel yang tidak fleksibel, organisme ini dilapisi oleh pelikel, yaitu selubung protein yang tersusun atas deretan pita membran. Struktur tersebut berperan dalam mempertahankan bentuk sel yang umumnya memanjang atau silindris, sekaligus memungkinkan terjadinya gerakan khas berupa perubahan bentuk tubuh secara fleksibel (metaboli). Pada kelas ini yang mencakup kelompok Euglenida bersifat fototrofik, sel biasanya berbentuk oval hingga menyerupai gelendong, serta memiliki satu atau dua flagela yang muncul dari bukaan anterior sel (Ergin, 2015).

Salah satu flagel berperan utama sebagai alat lokomosi, sementara flagel lainnya berukuran lebih pendek dan pada beberapa spesies tidak selalu terlihat dari permukaan sel (Fila *et al.* 2019). Menurut Adam dan Haryono (2023) bagian ujung depan sel terdapat stigma atau bintik mata berwarna kemerahan yang berfungsi sebagai sistem penerima cahaya. Struktur ini berasosiasi dengan badan paraflagelar yang peka terhadap intensitas cahaya, sehingga memungkinkan Euglenophyceae mengarahkan pergerakannya menuju sumber cahaya melalui mekanisme fototaksis positif. Dalam kelompok ini, kloroplas memiliki beragam bentuk, mulai dari menyerupai cakram hingga berbentuk pita. Pigmen dominan yang ditemukan adalah klorofil a dan b, sementara pigmen pendukung seperti β -karoten, berbagai jenis xantofil, serta karotenoid merah (haematochrome) memberikan warna hijau yang khas pada sel Euglenophyceae (Kristiana *et al.* 2024). Kloroplas pada organisme ini diselubungi oleh tiga lapisan membran, yang menjadi bukti bahwa organel tersebut berasal dari peristiwa endosimbiosis sekunder. Pada sejumlah spesies, dijumpai keberadaan pirenoid yang dapat terletak di dalam kloroplas dan di seluruh sitoplasma. Struktur ini berperan penting dalam proses akumulasi dan penyimpanan cadangan energi, terutama dalam bentuk paramilum serta lipid (Putra *et al.* 2024).

Secara struktural, Euglenozoa memperlihatkan tingkat adaptasi yang tinggi, khususnya pada mekanisme pergerakan dan sistem sensori selulernya. Tubuh sel yang elastis, dikombinasikan dengan keberadaan flagela, memungkinkan organisme ini bermigrasi secara efektif dan beradaptasi dengan baik pada beragam kondisi perairan (Hevila *et al.* 2023). Sebagian anggota Euglenozoa mengalami reduksi atau kehilangan kloroplas sehingga tidak lagi melakukan fotosintesis, dan beralih pada pola hidup heterotrof dengan memanfaatkan bahan organik terlarut di sekitarnya melalui mekanisme saprofitik (Kostygov *et al.* 2021).

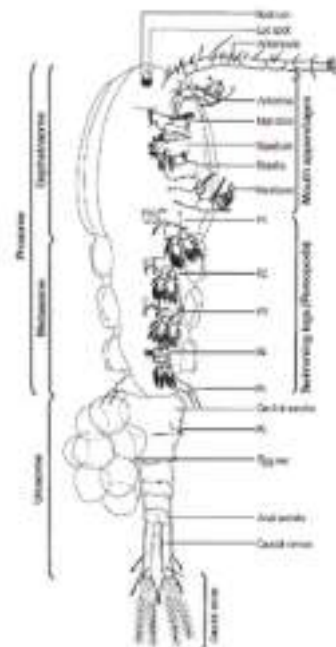
Namun, kelompok Euglenozoa lainnya, terutama kinetoplastida, memiliki karakteristik seperti kinetoplast dengan akumulasi DNA dalam mitokondria untuk mengatur metabolisme respirasi dan produksi energi. Keberadaan struktur ini menunjukkan karakteristik biokimia yang membedakannya dari kelompok protista lainnya (Cavalier-Smith, 2016).

3.2 Struktur Tubuh Zooplankton

Organisme heterptrof seperti zooplankton ini hidup melayang di kolom perairan, dengan pergerakannya sebagian besar dipengaruhi oleh arus. Dari sisi morfologi, zooplankton menunjukkan variasi yang sangat luas, mencakup bentuk bersel tunggal seperti protozoa hingga organisme multiseluler dengan struktur tubuh yang lebih berkembang, misalnya krustasea berukuran kecil serta fase larva berbagai invertebrata. Keanekaragaman bentuk dan tingkat organisasi tubuh tersebut mencerminkan kemampuan adaptasi zooplankton terhadap peran ekologisnya, baik sebagai konsumen primer maupun konsumen sekunder dalam rantai makanan perairan.

a. Copepoda

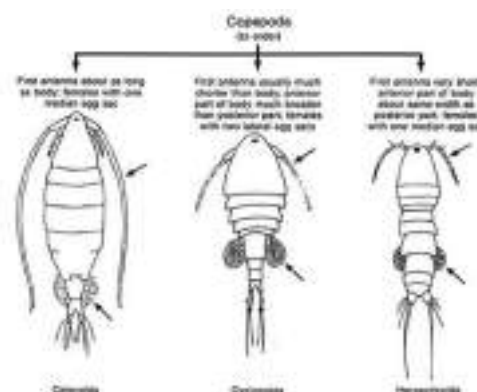
Semua orang tahu bahwa copepoda adalah kelompok zooplankton terbesar ditemukan di berbagai ekosistem perairan. Keberadaan organisme ini sangat krusial dalam jaring-jaring makanan karena menghubungkan produsen utama (fitoplankton) ke level trofik yang lebih tinggi. Copepoda dapat berfungsi sebagai konsumen utama fitoplankton dalam sistem perairan maupun sebagai konsumen sekunder yang memangsa zooplankton berukuran lebih kecil. Organisme ini termasuk dalam subkelas dari Crustacea dan umumnya berukuran antara 0,5 - 2 mm, meskipun beberapa spesies dapat mencapai ukuran lebih besar.



Gambar 17. Bagian tubuh copepoda.
Sumber: Santhosh *et al.* (2018).

Copepoda yang biasanya berukuran kecil, transparan, dan berbentuk memanjang adalah salah satu kelompok zooplankton yang paling banyak berada di ekosistem laut. Tubuh mereka terdiri dari tiga bagian utama: kepala, toraks, dan perut, yang membantu mereka bergerak dan beraktivitas di perairan (Jeon *et al.* 2019). Istilah Yunani "*copepod*" berasal dari kata Yunani "*kope*", yang berarti "dayung", dan "*podos*", yang berarti "kaki". Penamaan ini merujuk pada bentuk kaki renang copepoda yang pipih dan berfungsi menyerupai dayung, sehingga mendukung pergerakannya di perairan (Wootton *et al.* 2017). Kepala copepoda memiliki dua antena yang berukuran relatif panjang dan berperan penting dalam fungsi sensorik sekaligus membantu pergerakan. Selain itu, struktur mulutnya tersusun atas mandibula dan maksila yang sederhana, yang memungkinkan organisme ini menangkap dan mengonsumsi partikel makanan berupa fitoplankton maupun mikrozooplankton (Ayshi *et al.* 2024). Bagian toraks pada copepoda terdiri dari enam ruas yang masing-masing dilengkapi dengan sepasang appendiks renang, atau pleopoda, yang membantu mereka berenang. Pada beberapa spesies, kaki kelima dan keenam mengalami perubahan bentuk tertentu, sehingga karakteristiknya kerap dimanfaatkan sebagai penanda penting dalam identifikasi dan klasifikasi taksonomi (Santhosh *et al.* 2018).

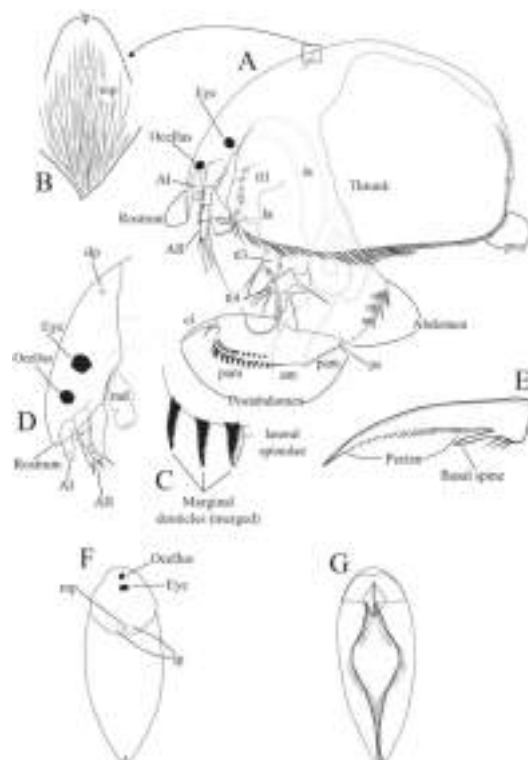
Abdomen atau urosome pada copepoda terdiri dari atas beberapa ruas, tanpa dilengkapi struktur kaki. Bagian posterior tubuh ini diakhiri oleh furka yang bercabang dua, masing-masing membawa setae memanjang yang tersusun menyerupai kipas pada bagian ekor (Jeon *et al.* 2019). Abdomen tampak lebih sempit dan memanjang, sementara kepala dan toraks menyatu membentuk sefalotoraks atau cephalosome yang relatif besar. Kepala dilengkapi dengan berbagai struktur tambahan, termasuk rostrum, sepasang mata tengah, antennula, antena, mandibula, maksila, serta maksiliped. Hampir semua anggota tubuh tambahan memiliki percabangan ganda atau biramus. Bentuk tubuh yang ramping dan tersusun efisien ini memungkinkan copepoda bergerak dengan cepat dan gesit di kolom air (Ayshi *et al.* 2024). Menurut Santhosh *et al.* (2018) menyebutkan bahwa copepoda dapat dikelompokkan ke dalam dua tipe utama berdasarkan posisi sambungan urosome. Pada tipe gymnoplean, urosome terhubung di belakang segmen toraks kelima, sebagaimana terlihat pada ordo Calanoida. Sementara itu, tipe podoplean menunjukkan sambungan urosome setelah segmen toraks keempat, contohnya pada Harpacticoida. Ciri morfologi, khususnya ukuran tubuh dan bentuk antennula, memungkinkan identifikasi jenis kelamin copepoda. Copepoda jantan biasanya lebih kecil dan antennulanya mengalami modifikasi yang memudahkan mereka menggenggam betina saat proses kopulasi (Monell *et al.* 2023).



1 Gambar 18. Morfologi tiga ordo utama Copepoda, yaitu Calanoida, Cyclopoida, dan Harpacticoida. Sumber: <https://ar.inspiredpencil.com/pictures-2023/class-copepoda>

b. Cladocera

Cladocera merupakan kelompok zooplankton dari kelas Branchiopoda yang dikenal luas dengan sebutan water fleas karena gerakannya yang menyerupai lompatan di dalam air. Sebagian besar copepoda memiliki ukuran tubuh relatif kecil, umumnya berada pada kisaran submilimeter hingga beberapa milimeter, yaitu sekitar 0,2 hingga 3 mm. Organisme ini umumnya menghuni perairan tawar, meskipun sejumlah spesies juga mampu beradaptasi dan ditemukan di lingkungan perairan payau (Nontji, 2008). Tubuh Cladocera umumnya berbentuk lonjong atau agak membulat, diselubungi oleh karapas transparan yang tipis, menutupi hampir seluruh tubuh kecuali kepala.



1 Gambar 19. Morfologi umum Cladocera (Ket : (A) Tampak lateral, (B) Pori-pori kepala, (C) Gigi-gigi kecil (*dentikel*) di tepi posterior abdomen, (D) Tampak samping kepala yang menunjukkan rostrum tidak menonjol, (E) Cakar postabdominal, (F) Tampak dorsal (dari atas), (G) Tampak ventral (dari bawah)
1 Sumber: Sousa & Elmoor-Loureiro (2019).

27 Ciri morfologi khas Cladocera adalah keberadaan antenna kedua yang berukuran besar dan berfungsi sebagai alat utama untuk berenang. Antena ini bergerak secara ritmis sehingga menghasilkan gerakan melompat yang khas (Hamdhani, 2022). Cladocera memiliki sepasang mata majemuk besar yang terletak di bagian kepala dan biasanya tampak jelas di bawah mikroskop. Sistem pencernaannya sederhana, dengan usus yang memanjang ke arah posterior tubuh, sedangkan alat pernapasan dan sirkulasi dilakukan secara difusi melalui permukaan tubuh. Sebagian besar Cladocera merupakan herbivora atau filtrator, yang memakan

61
13
fitoplankton, bakteri, dan partikel organik tersuspensi di air. Namun, terdapat pula jenis yang bersifat omnivora atau bahkan karnivora, terutama dari genus *Leptodora*. Cladocera berperan penting dalam menjaga keseimbangan populasi fitoplankton dan merupakan sumber makanan utama bagi ikan larva serta zooplankton predator lainnya. Reproduksi Cladocera umumnya berlangsung secara partenogenesis, di mana betina dapat menghasilkan keturunan tanpa pembuahan, terutama pada kondisi lingkungan yang mendukung. Namun, ketika kondisi memburuk, mereka dapat beralih ke reproduksi seksual untuk menghasilkan telur istirahat (resting eggs) yang tahan terhadap kondisi ekstrem (Zuykova *et al.* 2021).

c. Foraminifera

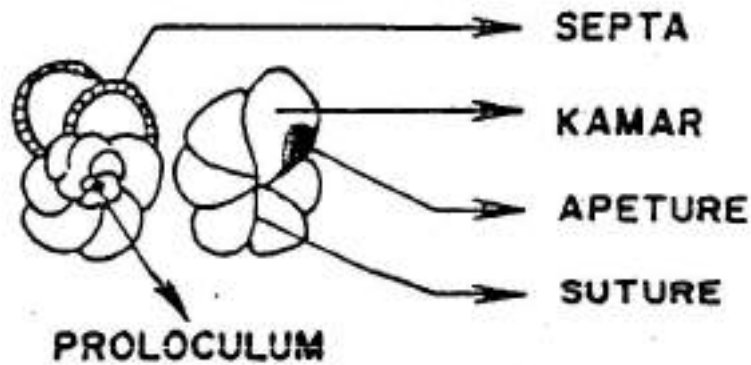
Zooplankton uniseluler seperti foraminifera merupakan filum Protozoa dan subfilum Sarcodina. Hal ini dikenal karena kemampuan mereka untuk membangun cangkang pelindung yang sangat kompleks. CaCO_3 (bentuk kalsit maupun aragonite) biasanya merupakan bahan uji foraminifera. Pada beberapa spesies lainnya, cangkang dapat terbentuk dari butiran sedimen yang direkatkan melalui proses aglutinasi, sehingga menghasilkan struktur yang padat dan kompak (Aliyan *et al.* 2023).



Gambar 20. Foraminifera.

Sumber: Weinkauff (2015).

1
Struktur tubuh foraminifera tersusun atas protoplasma yang mengandung inti sel dan terlindungi oleh cangkang berpori halus (*test*). Melalui pori-pori tersebut, pseudopodia yang halus dapat menjulur keluar dan berperan dalam proses penangkapan makanan, pergerakan, serta berperan dalam mempertahankan posisi organisme agar tetap berada di dalam kolom perairan (Weinkauff, 2015). Ukuran foraminifera menunjukkan variasi yang luas, mulai dari sekitar 5 mikrometer hingga mencapai beberapa sentimeter, meskipun sebagian besar spesies umumnya memiliki ukuran rata-rata antara 0,1 hingga 2 mm (Manuhuwa *et al.* 2021).



Gambar 21. Morfologi foraminifera.

Sumber: <https://porositas.blogspot.com/2016/05/foraminifera-benthonik-dan-lingkungan.html>

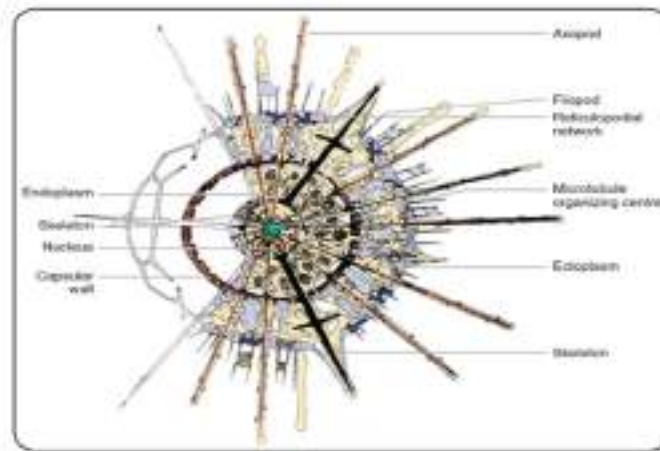
Menurut Maya & Nurhidayah (2020) klasifikasi foraminifera dapat dilakukan berdasarkan karakteristik dinding cangkangnya, yang secara umum terbagi ke dalam tiga kelompok utama. Kelompok arenaceous dicirikan oleh cangkang yang tersusun dari partikel sedimen berpasir, kelompok porcelaneous memiliki cangkang gampingan yang tidak berpori, sedangkan kelompok hyaline ditandai oleh cangkang gampingan dengan struktur berpori. Berdasarkan habitatnya, foraminifera dibagi menjadi dua kelompok utama. Kelompok planktonik hidup mengapung di kolom air, biasanya hingga kedalaman sekitar 200 meter, sedangkan kelompok bentik mendiami dasar laut dan berinteraksi langsung dengan substrat (Hanifah dan Jurnaliah, 2022). Cangkang foraminifera tersusun dari satu atau beberapa ruang (kamar) yang dipisahkan oleh septa internal. Sekat ini tampak seperti sutura dari luar, menampilkan garis-garis halus yang membagi tiap kamar secara jelas (Tupang, 2024). Menurut Nisa *et al.* (2023) berdasarkan susunan kamar dan jumlahnya, foraminifera dibedakan menjadi unilocular dan multilocular. Kelompok multilocular, susunan kamar bervariasi, antara lain uniserial (satu baris), biserial (dua baris), triserial (tiga baris), serta planispiral atau trochospiral yang membentuk pola melingkar. Pola ini dijumpai, misalnya, pada genus *Hastigerina* dan *Globigerina*.

Apertur utama berfungsi sebagai jalur yang menghubungkan pseudopodia dengan endoplasma. Apertur ini bisa berupa satu apertur primer atau beberapa apertur sekunder, dan bentuk serta posisinya berbeda-beda tergantung spesiesnya (Heriyadi dan Wiloso, 2021). Kamar pada cangkang foraminifera menunjukkan variasi bentuk yang luas, mulai dari setengah bola, bulat sempurna, bersudut, hingga menyerupai buah pir, tergantung pada pola pertumbuhan test. Permukaan test sering dilengkapi ornamen khas seperti duri (*spine*), tonjolan bulat (*pustulose*), garis spiral (*spiral costae*), atau pola menyerupai sarang madu, yang turut memperkuat struktur cangkang (Turang, 2017).

d. Radiolaria

Radiolaria merupakan protozoa bersel tunggal yang sepenuhnya planktonik, hidup melayang di kolom perairan laut baik secara individu maupun koloni. Organisme ini terkenal dengan kerangka mineralnya yang tersusun dari silika (SiO_2) atau celestite (SrSO_4), membentuk cangkang berpori bercorak seperti jaring dan dilengkapi duri yang memancar radial (Fitriani, 2016). Radiolaria biasanya memiliki bentuk bulat atau sferis, dengan ukuran yang bervariasi

mulai dari sekitar 20–30 μm hingga beberapa spesies besar mencapai 3–5 mm (Ishitani *et al.* 2016).



Gambar. Morfologi radiolaria
Sumber: Ishitani *et al.* (2016).

Tubuh Radiolaria terdiri dari dua kompartemen utama: endoplasma penuh di pusat dan ektoplasma luar yang kaya vakuola. Keduanya dibatasi oleh dinding kapsul tebal dari mukoprotein dengan pori-pori halus, tempat pseudopodia halus atau retikulopodia muncul untuk menangkap makanan sekaligus menjaga posisi organisme di kolom perairan (Kleiss *et al.* 2025). Di sitoplasma, terdapat mikrotubulus radial yang disebut axopoda, memancar dari pusat sel ke arah permukaan. Struktur ini berfungsi menjaga kestabilan bentuk sel serta mendukung proses pergerakan (Ishitani *et al.* 2016).

Berdasarkan karakteristik kerangka dan pola distribusi pori pada kapsul pusat, Radiolaria dikelompokkan ke dalam empat ordo utama (Maya and Nurhidayah, 2020):

1. Actipylina (*Acantharia*) – kerangka duri radial dari pusat tubuh.
2. Peripylna (*Spumellaria*) – kapsul pusat berpori, kerangka tidak jelas.
3. Monopyla (*Nassellaria*) – kapsul pusat tebal, pori terbatas di satu area.
4. Tripylina (*Phaeodaria*) – kapsul pusat dengan 1–2 bukaan besar tambahan.

e. Medusa

Medusa merupakan tahap planktonik pada organisme filum Cnidaria, ditandai dengan tubuh berbentuk payung yang lunak, transparan, dan tersusun dari lapisan mesoglea seperti gel. Di tengah bagian bawah tubuh terdapat manubrium, yang menghubungkan mulut dengan sistem gastrovaskular sederhana, berfungsi mencerna makanan sekaligus mendistribusikan nutrisi ke seluruh tubuh (Muffett dan Miglietta, 2021). Pada bagian tepi tubuhnya terdapat deretan tentakel yang memanjang dan dilengkapi dengan sel penyengat yang disebut cnidocyte. Struktur ini berperan dalam proses penangkapan mangsa sekaligus sebagai mekanisme pertahanan terhadap ancaman dari lingkungan sekitarnya. Selain itu, pada tentakel juga terdapat ocellus, yaitu organ sensorik sederhana yang peka terhadap cahaya. Keberadaan struktur ini membantu medusa dalam mengenali arah cahaya sehingga mendukung orientasi serta pergerakannya di dalam kolom air (Fujita *et al.* 2021).



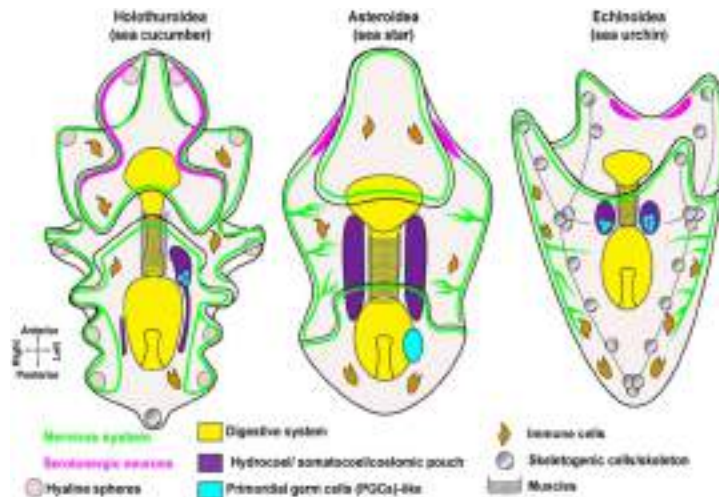
Gambar Morfologi medusa.

Sumber: Fujita *et al.* (2021).

Medusa dengan tubuyang dibentuk oleh dua lapisan jaringan utama. Lapisan terluarnya adalah ektoderm (epidermis) yang berfungsi sebagai pelindung tubuh dari pengaruh lingkungan luar. Sementara itu, bagian dalamnya terdiri atas endoderm (gastrodermis) yang berperan penting dalam proses pencernaan makanan (Maya and Nurhidayah, 2020). Menurut Rahmadina dan Ananda (2018) menuturkan bahwa pada antara kedua lapisan jaringan tersebut terdapat mesoglea, yaitu lapisan tebal yang bersifat elastis dan transparan. Lapisan ini berfungsi menjaga bentuk tubuh sekaligus membantu memberikan daya apung bagi medusa di dalam air. Sistem pencernaannya bersifat sederhana dan berbentuk seperti kantung, tempat berlangsungnya proses pencernaan secara ekstraseluler dengan bantuan enzim yang disekresikan oleh sel-sel pada lapisan gastrodermis (Rahmadina dan Ananda, 2018). Lain halnya dengan fase polip yang hidup melekat pada substrat, medusa memiliki sifat hidup bebas di perairan. Organisme ini bergerak dengan cara berenang melalui kontraksi ritmis pada bagian payung tubuhnya, sehingga memungkinkan perpindahan posisi di dalam kolom air (Fujita *et al.* 2021).

f. Larva Echinodermata

Larva echinodermata adalah zooplankton sementara yang hanya muncul sesaat, berasal dari hewan invertebrata laut dasar seperti bintang laut, bulu babi, dan teripang, sebelum dewasa menetap di dasar laut (Putra *et al.* 2024). Bentuk tubuh yang khas pada larva Echinodermata sesuai kelasnya seperti simetris bilateral, transparan, dan hidup bebas di kolom air. Pergerakan larva dibantu oleh silia yang tersusun sebagai pita ciliary band di permukaan tubuh, memungkinkan berenang secara aktif (Maya dan Nurhidayah, 2020).



Gambar Morfologi larva Echinodermata.

Sumber: Perillo *et al.* (2024).

Larva Echinodermata menampilkan bentuk tubuh yang khas bagi masing-masing kelas, biasanya simetris bilateral, transparan, dan hidup bebas di kolom perairan. Silia yang tersusun membentuk pita ciliary band di permukaan tubuh membantu larva bergerak aktif (Perillo *et al.* 2024). Larva bipinnaria (Asteroidea) memiliki dua pasang lengan silia yang memanjang dari tubuh utama, dilengkapi dengan sistem pencernaan sederhana. Sementara itu, larva Echinoidea, atau pluteus, dibangun oleh kerangka kalsium yang berkembang menjadi lengan panjang, sehingga jalur silia dapat mendukung pergerakan dan penyerapan makanan lebih efektif (Arnone *et al.* 2015).

3.3 Adaptasi Bentuk Terhadap Lingkungan Perairan

Organisme planktonic juga memiliki tantangan ekologis dalam beradaptasi. Mereka hidup di medium air yang lebih padat dan kental, dengan cahaya yang menurun seiring kedalaman, oksigen terlarut yang terbatas, serta variasi salinitas dan tekanan hidrostatik pada lapisan tertentu. Oleh karena itu, organisme akuatik perlu adaptasi morfologis agar mampu mengapung, bergerak, menangkap makanan, dan menghindari predator. Di antara semua tekanan tersebut, yang paling penting adalah kemampuan untuk tetap berada dan bergerak di kolom air (Putra *et al.* 2024). Kelompok diatom memiliki tubuh pipih atau memanjang. Bentuk ini memperbesar rasio luas permukaan terhadap volume, sehingga menambah gaya hambat dan memperlambat laju tenggelam ke dasar perairan (Weliyati, 2013). Selain itu, beberapa spesies membentuk tonjolan, duri, atau rantai sel, yang berfungsi memperluas luas permukaan tubuh. Adaptasi ini meningkatkan stabilitas dalam air dan membuat organisme tetap mengapung lebih lama sebelum tenggelam (Fu *et al.* 2022).

Menurut Zhang *et al.* (2023) menuturkan bahwa alga tertentu menyimpan lipid sebagai cadangan energi atau memiliki vakuola berisi gas ringan, yang menurunkan densitas sel dan mempermudah mereka mengapung di air. Sebaliknya, zooplankton gelatinous seperti medusa memiliki tubuh hampir sepenuhnya transparan dan terdiri dari air lebih dari 90%, sehingga densitas tubuhnya hampir sama dengan air. Kondisi ini memungkinkan mereka melayang di kolom air tanpa mengeluarkan banyak energi (Muffett dan Miglietta, 2021). Selain kemampuan mengapung, organisme juga perlu bergerak efisien di air. Copepoda dan zooplankton aktif

lainnya biasanya memiliki tubuh berbentuk torpedo yang ramping, dengan antena panjang yang berperan ganda sebagai alat gerak dan sensor lingkungan, sehingga mereka bisa bergerak cepat sambil meminimalkan resistensi air (Svetlichny *et al.* 2020). Beberapa fitoplankton bersilia atau flagelata menggunakan flagel mereka untuk bergerak secara spiral, sehingga mampu berpindah posisi secara efisien di kolom air (Gagat *et al.* 2013). Rotifera maupun larva beberapa invertebrata memanfaatkan silia untuk menghasilkan aliran air, yang membantu mereka baik dalam pergerakan maupun penangkapan partikel makanan (Jiang and Buskey, 2025). Pada organisme gelatinous, elastisitas lapisan mesoglea membantu tubuh kembali ke bentuk semula setelah kontraksi, memungkinkan mereka berenang dengan konsumsi energi yang rendah (Rahmadina & Ananda, 2018).

Kaki bersilia pada toraks Daphnia berfungsi sebagai penyaring fitoplankton, menjadikan adaptasi morfologis ini krusial dalam memperoleh nutrisi dari air (Letendre dan Cameron, 2022). Pseudopodia bercabang yang dimiliki protozoa planktonik, seperti foraminifera dan radiolaria, berfungsi seperti jaring halus untuk menangkap partikel organik mikroskopis di sekitarnya (Kleiss *et al.* 2025). Predasi memberikan tekanan selektif yang besar dalam ekosistem akuatik, sehingga banyak organisme mengembangkan adaptasi tubuh untuk perlindungan. Tubuh transparan merupakan taktik yang umum digunakan karena membuat mereka sulit terlihat oleh predator (Bashevkin *et al.* 2019). Untuk melindungi diri dari predator, beberapa fitoplankton, termasuk diatom dan foraminifera, memiliki dinding sel keras yang tersusun dari silika atau kalsium karbonat (Widjaja, 2019). Koloni besar yang dibentuk oleh beberapa jenis fitoplankton membuat tubuh mereka lebih besar dan sulit dimakan oleh predator berukuran kecil. Beberapa dinoflagellata pun mengembangkan duri panjang atau theca berselulosa, yang berfungsi meningkatkan daya apung dan melindungi dari predator (Riding *et al.* 2022).

Fitoplankton bergantung pada cahaya untuk melakukan fotosintesis, jadi banyak adaptasi morfologisnya berfokus untuk memaksimalkan penyerapan cahaya. Beberapa sel fitoplankton menempatkan kloroplas dekat permukaannya agar dapat menangkap cahaya dengan lebih baik (Masithah, 2023). Luas permukaan yang diperluas oleh bentuk tubuh pipih atau memanjang memungkinkan penyerapan cahaya lebih efisien. Sementara itu, beberapa fitoplankton flagelata bermigrasi secara vertikal, naik ke permukaan pada siang hari untuk menangkap cahaya dan turun ke lapisan dalam saat malam untuk memperoleh nutrisi (Lovecchio *et al.* 2019).

BAB IV EKOLOGI PLANKTON

Zona pesisir memegang peran krusial dalam mendukung keseimbangan ekosistem baik di daratan maupun perairan, sekaligus menjadi wilayah yang kaya akan sumber daya alam dan menyediakan berbagai layanan ekosistem (Wulandari dan Larasati, 2025). Perairan pesisir dikenal sebagai kawasan dengan kandungan nutrisi yang tinggi, karena menjadi titik akhir akumulasi berbagai material organik yang berasal dari daratan. Sumber-sumber tersebut meliputi limbah domestik, aktivitas perkotaan, aliran sungai, hingga limpasan air hujan yang membawa berbagai zat terlarut. Di sisi lain, kawasan ini memiliki nilai ekologis yang signifikan serta peran penting dalam menjaga keseimbangan sistem lingkungan. Secara ekologi, kondisi tersebut mencerminkan tingginya beban masukan yang diterima oleh perairan pesisir. Keberadaan unsur hara di wilayah ini umumnya dipengaruhi oleh berbagai aktivitas manusia di sekitarnya, seperti pemukiman, industri, pertanian, serta pembuangan limbah. Kehadiran bahan organik ini sangat memengaruhi kualitas air, yang pada gilirannya berdampak langsung terhadap kehidupan biota, khususnya plankton. Fitoplankton, sebagai organisme indikator kualitas air, menunjukkan respons terhadap kondisi lingkungan perairan. Di daerah dekat daratan, seperti estuari, kelimpahan fitoplankton cenderung tinggi karena ketersediaan nutrisi yang melimpah. Selain itu, faktor-faktor fisik dan kimia perairan turut menentukan distribusi, keragaman, dan kelimpahan fitoplankton di berbagai lokasi.



Gambar 22. Perairan Pesisir.
Sumber: Dokumentasi Pribadi

Kawasan pesisir dan laut merupakan wilayah yang kaya akan keanekaragaman hayati, mencakup beragam jenis flora dan fauna. Di Indonesia, garis pantai mencapai kurang lebih 95.181 km yang mencakup berbagai ekosistem penting, seperti mangrove, padang lamun, terumbu karang, wilayah perikanan, serta estuari, yang semuanya dikenal memiliki kekayaan biodiversitas yang tinggi. Meskipun demikian, pesatnya aktivitas pembangunan di wilayah tersebut menimbulkan berbagai tekanan terhadap lingkungan, sehingga berpotensi menyebabkan penurunan kualitas dan kerusakan ekosistem.

Meningkatnya tingkat degradasi tersebut dipicu oleh kerusakan pada berbagai habitat penting, seperti padang lamun, terumbu karang, dan hutan mangrove. Dampaknya terlihat dari perubahan garis pantai akibat abrasi dan erosi, yang mengusik kestabilan biota akuatik serta meningkatkan risiko pencemaran. Tingkat degradasi wilayah pesisir tergantung pada luas cakupan wilayah dan intensitas aktivitas manusia. Baik dari aspek in situ maupun ex situ, kondisi ini berpotensi mengurangi fungsi ekologi pesisir saat ini maupun di masa depan. Dengan demikian, diperlukan pengelolaan yang terencana dan terstruktur secara sistematis, sebagaimana diatur dalam Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2014 mengenai Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil, yang menekankan perlunya perlindungan terhadap potensi dan keberagaman pesisir sambil mengatasi permasalahan ekonomi, sosial, dan budaya.

Pengelolaan wilayah pesisir membutuhkan data lingkungan yang akurat untuk memastikan pencapaian tujuan yang diinginkan. Pesisir berfungsi sebagai batas antara daratan dan lautan, dengan bentuk yang bervariasi akibat proses fisik seperti pengikisan, pengendapan sedimen, serta pengaruh gelombang, angin, dan arus. Secara bertahap, proses ini membentuk kawasan pantai yang berbeda dengan daerah pesisir yang hanya mencakup wilayah antara pasang tertinggi hingga pasang terendah. Faktor fisik seperti gelombang laut dan pasang surut sangat memengaruhi kondisi pesisir dan distribusi organisme di sana. Organisme pesisir menunjukkan adaptasi struktural yang kuat agar dapat menempel pada substrat keras, menghadapi perubahan kondisi lingkungan, serta menyesuaikan diri dengan dinamika pasang surut laut.

4.1 Keberadaan Plankton

Fitoplankton adalah organisme berukuran sangat kecil yang memiliki sifat menyerupai tumbuhan karena mampu menghasilkan makanannya sendiri melalui mekanisme fotosintesis. Kemampuan ini menjadikan fitoplankton berperan krusial sebagai sumber utama energi atau produsen primer dalam ekosistem perairan. Organisme lain, seperti zooplankton dan ikan, mengandalkan fitoplankton sebagai sumber makanan mereka, sehingga fitoplankton menjadi dasar rantai makanan akuatik. Di samping itu, fitoplankton memiliki fungsi krusial dalam mempertahankan stabilitas ekosistem perairan serta kerap dimanfaatkan sebagai penanda tingkat kesuburan atau produktivitas suatu badan air.

Jumlah fitoplankton dalam suatu perairan sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisika dan kimia lingkungan perairan tersebut, sehingga studi mengenai struktur komunitas fitoplankton menjadi penting untuk menilai kualitas lingkungan perairan. Distribusi fitoplankton secara horizontal ditentukan oleh pergerakan massa air dan ketersediaan nutrisi. Di perairan pesisir, keberadaan fitoplankton juga dipengaruhi oleh batas toleransi lingkungan atau ambang batas tertentu. Dominasi dan komposisi komunitas fitoplankton berbeda-beda di setiap lokasi,

sehingga menjadi indikator biologis yang berguna untuk mengevaluasi kondisi ekologis perairan. Keanekaragaman dan penyebaran fitoplankton ini selanjutnya dapat digunakan sebagai tolak ukur kualitas perairan.

Di perairan pesisir, fitoplankton memiliki peran vital sebagai sumber nutrisi bagi beragam organisme laut, termasuk zooplankton dan beberapa jenis ikan. Kelimpahan fitoplankton mencerminkan tingkat produktivitas primer dalam kolom air, sehingga menjadi indikator penting terhadap potensi ekologi perairan. Kawasan pesisir biasanya kaya nutrisi, yang mendukung pertumbuhan fitoplankton secara melimpah. Kondisi ini memberikan potensi ekonomi yang signifikan, misalnya bagi jenis ikan bernilai tinggi. Oleh karena itu, daerah dengan hasil tangkapan ikan yang besar sering menunjukkan keberadaan fitoplankton yang melimpah, menandakan tingginya produktivitas ekosistem pesisir tersebut.

4.2 Distribusi Fitoplankton

Sebagai produsen primer di ekosistem laut, fitoplankton memiliki hubungan yang erat dengan organisme pada tingkat trofik lebih tinggi. Contohnya, ikan pelagis seperti cakalang mendapatkan energi secara tidak langsung dari fitoplankton melalui rantai makanan. Biomassa fitoplankton, yang biasanya diestimasi melalui konsentrasi klorofil-a, menjadi indikator penting untuk menilai kesuburan perairan. Tingkat kesuburan ini kemudian memengaruhi kepadatan ikan kecil, yang berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem laut. Kondisi perairan itu sendiri mencerminkan tingkat kesuburannya. Keberadaan fitoplankton di kolom air dipengaruhi oleh faktor lingkungan maupun kondisi fisiologis organisme itu sendiri. Dinamika populasi fitoplankton ditentukan oleh keterkaitan berbagai faktor, baik biologis maupun kondisi fisika dan kimia perairan. Laju pertumbuhannya sangat bergantung pada ketersediaan unsur hara, seperti nitrat dan fosfat, serta dipengaruhi oleh suhu perairan, konsentrasi oksigen terlarut, dan intensitas cahaya yang mampu menembus lapisan air.

Distribusi fitoplankton dan zooplankton sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, termasuk arah angin, fenomena upwelling, dan arus laut. Fitoplankton berfungsi sebagai sumber nutrisi utama bagi zooplankton, sehingga menyediakan pakan alami dalam ekosistem perairan. Secara umum, ekosistem perairan dapat dianggap stabil ketika jumlah fitoplankton cukup melimpah dibandingkan dengan zooplankton. Hal ini memungkinkan ekosistem tetap seimbang meskipun terjadi penggembalaan (grazing) oleh zooplankton. Di perairan laut, fitoplankton umumnya hanya ditemukan di lapisan permukaan yang masih menerima sinar matahari, karena fotosintesis menjadi mekanisme utama bagi mereka menghasilkan makanan. Wilayah seperti continental shelf dan area dengan fenomena upwelling cenderung memiliki kandungan bahan organik yang tinggi, sehingga mendukung pertumbuhan fitoplankton. Walaupun distribusi fitoplankton di ekosistem perairan cenderung stabil, struktur populasinya bersifat sangat dinamis. Penyebaran fitoplankton bervariasi baik secara waktu maupun ruang, bergantung pada komposisi dan interaksi dalam komunitasnya, sehingga memantau perubahan populasi ini penting untuk memahami dinamika ekosistem perairan.

4.3 Distribusi Spasial dan Temporal

Pola penyebaran plankton baik secara temporal maupun spasial merupakan aspek penting dalam ekologi perairan, karena mencerminkan variasi distribusi dan keanekaragaman plankton di ekosistem akuatik seiring berjalannya waktu (Radiarta *et al.* 2015). Sebaran plankton tidak

hanya menggambarkan keberadaannya di suatu wilayah, tetapi juga merefleksikan bagaimana organisme tersebut merespons dinamika perubahan kondisi lingkungan. Pada lingkungan perairan seperti teluk, estuari, dan kawasan pesisir, kondisi fisika dan kimia memainkan peran penting dalam menentukan keberhasilan pertumbuhan serta jumlah plankton yang berkembang (Olii *et al.* 2022). Akumulasi unsur hara yang sering terjadi di teluk, zona pencampuran antara air laut dan air tawar, menyebabkan kepadatan plankton lebih tinggi dibandingkan perairan laut terbuka yang kandungan nutrisinya lebih rendah (Salwa dan Larasati, 2024a).

Distribusi plankton ditentukan oleh variasi kondisi lingkungan antar ruang, seperti perbedaan salinitas di wilayah muara, kedalaman perairan, serta dinamika arus pada masing-masing zona. Selain itu, susunan komunitas plankton juga berbeda di setiap lokasi, di mana kelompok atau spesies tertentu cenderung mendominasi karena memiliki kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap kondisi lingkungan setempat (Chofifah *et al.* 2025). Pada wilayah pesisir yang memperoleh suplai nutrisi tinggi dari aliran daratan, komunitas fitoplankton umumnya didominasi oleh diatom dari kelas Bacillariophyceae, misalnya genus *Chaetoceros*. Sebaliknya, pada perairan laut terbuka yang cenderung memiliki ketersediaan nutrisi rendah, kelompok seperti dinoflagellata lebih banyak ditemukan mendominasi karena kemampuannya beradaptasi dengan kondisi oligotrofik (Gunady *et al.* 2025).

Jumlah plankton berubah secara temporal mengikuti siklus harian, musiman, dan tahunan. Pergerakan harian dipengaruhi oleh intensitas cahaya serta migrasi vertikal. Fitoplankton cenderung berkumpul di permukaan pada siang hari untuk memaksimalkan fotosintesis, sedangkan zooplankton bergerak naik-turun di kolom air sebagai respons terhadap cahaya dan tekanan dari predator (Sirait *et al.* 2018). Perubahan musiman dalam jumlah plankton dikendalikan oleh kondisi iklim lokal, seperti transisi antara musim hujan dan kemarau di wilayah tropis, yang berdampak pada karakteristik fisik dan kimia perairan (Haliza *et al.* 2023).

Pada musim hujan di wilayah tropis, aliran air dari daratan membawa sejumlah besar unsur hara seperti nitrogen, fosfor, serta bahan organik ke perairan. Kondisi ini kemudian memicu peningkatan yang nyata pada aktivitas produktivitas primer fitoplankton (Aisyah *et al.* 2023). Ketersediaan nutrisi yang meningkat tersebut turut mendorong perkembangan zooplankton, mengingat organisme ini sangat bergantung pada fitoplankton sebagai sumber pakan utamanya (Abubakar *et al.* 2021). Saat musim kemarau, ketersediaan nutrisi menurun dan suhu perairan meningkat, sehingga lingkungan menjadi kurang optimal bagi plankton. Kondisi ini berdampak pada penurunan jumlah individu dan perubahan komposisi spesies di komunitas plankton (Zainuri *et al.* 2023).

Keanekaragaman spesies dalam komunitas plankton dipengaruhi tidak hanya oleh faktor fisik dan kimia perairan, tetapi juga oleh interaksi antarorganisme, termasuk kompetisi, pemangsaan, dan hubungan saling menguntungkan (mutualisme) (Triawan dan Arisandi, 2020). Tingginya keberlimpahan beberapa fitoplankton, terutama diatom dari kelompok Bacillariophyceae di Teluk Tomini, mencerminkan kemampuan adaptasi fisiologis mereka terhadap kondisi lingkungan setempat. Adaptasi ini memungkinkan mereka bersaing secara optimal dengan spesies lain dan membentuk karakteristik komunitas yang khas. Di sisi lain, variasi dalam komunitas zooplankton yang bergantung pada fitoplankton sebagai sumber pakan mencerminkan dinamika ketersediaan makanan serta pengaruh tekanan pemangsaan dari organisme pada tingkat trofik yang lebih tinggi (Shabrina *et al.* 2020).

3 Temperatur perairan memegang peranan penting dalam mengendalikan aktivitas metabolisme serta proses reproduksi plankton. Suhu yang relatif stabil dan berada pada kisaran optimum akan mendukung peningkatan pertumbuhan populasi plankton secara lebih optimal (Wulandari *et al.* 2025). Sebagai contoh, di Teluk Tomini, kestabilan suhu perairan pada musim barat dapat memicu peningkatan jumlah plankton secara cepat, sedangkan perubahan suhu yang lebih ekstrem pada musim timur cenderung menyebabkan penurunan kelimpahannya. Hal ini menunjukkan bahwa suhu berperan dominan dalam membentuk respons fisiologis dan siklus hidup plankton terhadap lingkungan sekitarnya (Setyadji dan Priatna, 2011).

130 Pola distribusi plankton sangat dipengaruhi oleh salinitas, terutama di wilayah peralihan air tawar dan laut, contohnya kawasan teluk dan muara sungai (Cahyani *et al.* 2023). Setiap jenis plankton memiliki tingkat toleransi yang berbeda terhadap salinitas, sehingga kondisi ini berperan sebagai filter ekologis yang menentukan spesies mana yang mampu bertahan hidup dan berkembang dalam suatu wilayah (Raunsay dan Koirewoa, 2016). Di daerah dengan perubahan salinitas yang besar, spesies plankton euryhalin yang memiliki kemampuan adaptasi tinggi cenderung lebih mendominasi. Intensitas cahaya memengaruhi tidak hanya fotosintesis fitoplankton, tetapi juga perilaku zooplankton. Perubahan cahaya, baik harian maupun musiman, mendorong migrasi vertikal zooplankton, yang membantu mereka mengurangi risiko predasi sekaligus meningkatkan akses terhadap makanan (Zainuri *et al.* 2023). Di samping itu, intensitas cahaya yang berlebihan maupun perubahan cahaya yang berlangsung secara tiba-tiba dapat memicu stres fisiologis pada plankton, sehingga berpengaruh terhadap penurunan laju pertumbuhan dan kemampuan reproduksinya (Hanurandi *et al.* 2022).

46 Penyebaran plankton sangat dipengaruhi oleh dinamika massa air, seperti arus, gelombang, dan pasang surut. Arus berfungsi sebagai pengangkut nutrisi sekaligus media perpindahan agregasi plankton, sedangkan gelombang dan pasang surut mendukung pencampuran vertikal yang meningkatkan kandungan oksigen dan nutrisi di kolom air (Witariningsih *et al.* 2020). Akibat pengaruh hidrodinamika, plankton cenderung terkonsentrasi di beberapa titik, membuat distribusinya berbeda-beda di seluruh perairan (Putri *et al.* 2024). Keterkaitan antara dimensi waktu dan ruang membentuk variasi komunitas plankton yang bersifat kompleks serta dinamis. Variasi kondisi lingkungan memunculkan wilayah dengan kepadatan plankton yang tinggi, yang bersifat fluktuatif sepanjang waktu, termasuk terjadinya peningkatan populasi pada musim tertentu dan penurunan pada periode lainnya (Meiwinda, 2020). Keadaan ini memberikan dampak signifikan terhadap keseluruhan rantai trofik di ekosistem perairan, mengingat plankton berperan sebagai sumber energi utama bagi berbagai organisme (Zuhri *et al.* 2024). Studi yang dilakukan di Teluk Tomini mengungkapkan bahwa variasi kondisi lingkungan yang dipengaruhi musim berperan dalam menentukan tingkat kelimpahan dan struktur komunitas plankton. Pada periode musim barat, masuknya nutrisi dari daratan yang disertai dengan kondisi perairan yang relatif stabil mendorong peningkatan pertumbuhan fitoplankton hingga mencapai kepadatan tinggi. Dominasi diatom, seperti *Chaetoceros* dan *Coscinodiscus*, menunjukkan adanya pola komunitas khas, di mana jenis-jenis tersebut lebih kompetitif pada lingkungan dengan kandungan nutrisi melimpah dan suhu yang mendukung. Temuan ini menegaskan pentingnya faktor fisika dan kimia perairan dalam menunjang keberhasilan perkembangan plankton (Setyadji dan Priatna, 2011).

3 3 Pada musim timur, terlihat perbedaan yang cukup mencolok dalam kelimpahan plankton, dengan fitoplankton sekitar 4.878 sel per meter kubik dan zooplankton mencapai 7.088

individu per meter kubik. Kondisi ini mencerminkan lingkungan yang kurang kondusif, ditandai oleh menurunnya ketersediaan nutrisi, fluktuasi suhu yang cukup tajam, serta perubahan salinitas. Penurunan jumlah plankton ini berpotensi memengaruhi rantai makanan, khususnya ketersediaan pakan bagi organisme pada tingkat trofik lebih tinggi. Sebaliknya, pada musim barat, diatom dari kelompok Bacillariophyceae cenderung mendominasi karena kemampuan fisiologisnya dalam memanfaatkan nutrisi dalam jumlah tinggi, terutama silika yang digunakan untuk membentuk dinding sel. Namun, dominasi ini bersifat dinamis dan dapat berubah seiring pergantian musim, sehingga struktur komunitas plankton terus menyesuaikan diri dengan perubahan kondisi lingkungan.

Penelitian ini menunjukkan bahwa keterkaitan berbagai faktor lingkungan, baik yang berlangsung secara temporal maupun spasial, berperan dalam membentuk komunitas plankton yang bersifat kompleks dan dinamis. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan yang komprehensif dan terintegrasi, termasuk penggunaan teknologi modern seperti penginderaan jauh, untuk mengamati perubahan pola distribusi plankton secara langsung dalam skala yang lebih luas. Dengan dukungan data yang akurat serta analisis yang mendalam, penyusunan model ekologi dan prediksi perubahan komunitas plankton dapat dilakukan dengan lebih presisi, sehingga dapat menunjang upaya pengelolaan sumber daya perairan yang berkelanjutan. Selain itu, pemahaman mengenai pola distribusi plankton menjadi sangat krusial dalam menghadapi perubahan iklim global, yang berpotensi mempercepat perubahan kondisi lingkungan perairan, seperti peningkatan suhu dan perubahan pola curah hujan, yang pada akhirnya berdampak pada produktivitas primer, struktur komunitas plankton, serta keseimbangan ekosistem perairan secara keseluruhan (Leidonald *et al.* 2022). Kajian mengenai pola sebaran plankton, baik dari aspek ruang maupun waktu, menjadi landasan ilmiah yang penting dalam memperkirakan dampak ekologis serta menyusun strategi pengelolaan yang bersifat adaptif.

Fluktuasi kelimpahan plankton memengaruhi tidak hanya ekosistem, tetapi juga sektor perikanan yang bergantung pada produktivitas primer sebagai sumber pakan alami. Untuk menjaga keberlanjutan rantai pasok ikan bernilai komersial, informasi tentang distribusi plankton harus diperhitungkan dalam perencanaan perikanan (Awwalia *et al.* 2025).

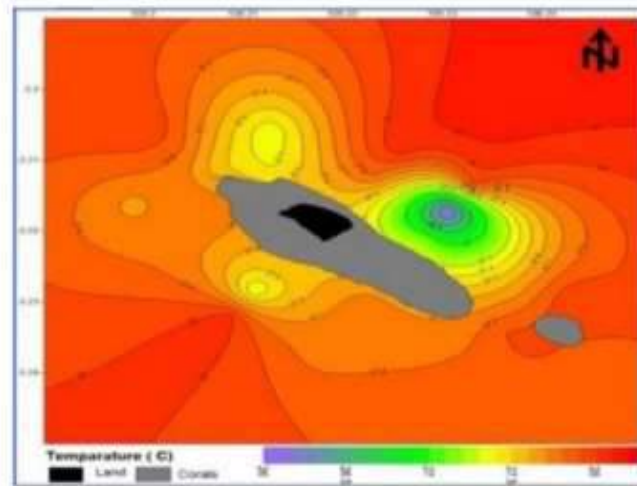
4.4 Parameter Pertumbuhan Plankton

Parameter kualitas perairan, termasuk kelimpahan dan komposisi plankton, dapat mencerminkan kondisi lingkungan suatu perairan. Kehadiran populasi plankton tertentu secara berlebihan sering menunjukkan adanya zat atau nutrisi yang meningkat secara signifikan, sehingga memberikan indikasi kondisi ekosistem. Di perairan, komponen biotik dan abiotik saling berinteraksi melalui siklus nutrisi. Ketika terjadi tekanan atau gangguan, perubahan parameter lingkungan dapat menyebabkan ketidakseimbangan interaksi antarbiota, dan sebaliknya, gangguan pada biota dapat memengaruhi kondisi lingkungan. Faktor-faktor seperti limbah kimia, biologis, dan fisik turut memengaruhi perubahan ini. Sebagai alat penilaian, indeks saprobitas dapat digunakan untuk mendeteksi tingkat pencemaran di ekosistem laut.

a. Suhu

Salah satu parameter fisik perairan yang berperan dalam mendukung pertumbuhan fitoplankton adalah suhu. Kisaran temperatur tertentu dapat meningkatkan proses fotosintesis

yang dilakukan oleh fitoplankton (Asriyana dan Yuliana, 2021). Pada umumnya, fitoplankton menunjukkan pertumbuhan paling baik pada kisaran suhu sekitar 20–24 °C, dengan batas toleransi antara 16 hingga 36 °C. Ketika suhu berada di bawah 16 °C, laju pertumbuhannya cenderung menurun, sedangkan suhu yang melebihi 36 °C dapat menyebabkan kematian pada beberapa jenis plankton. Rentang suhu optimal bagi perkembangan fitoplankton umumnya berada di antara 20–30 °C.



Gambar 23. Visualisasi suhu perairan.

Sumber: (Rozirwan *et al.* 2020).

b. Cahaya

Radiasi sinar matahari berperan penting dalam mengendalikan fotosintesis, yang selanjutnya memengaruhi pola penyebaran horizontal fitoplankton di perairan. Fitoplankton juga sering digunakan sebagai indikator kualitas perairan melalui nilai indeks saprobitas, karena setiap spesies tergolong dalam kelompok saprobik tertentu yang secara tidak langsung memengaruhi tingkat saprobitas. Penentuan indeks ini dilakukan berdasarkan komposisi jenis fitoplankton yang ditemukan. Selain itu, cahaya matahari berkontribusi dalam pembentukan senyawa karbon organik. Kebutuhan intensitas cahaya bervariasi tergantung pada kedalaman media kultur dan kepadatan populasi fitoplankton. Paparan cahaya yang berlebihan dapat menyebabkan peningkatan suhu serta fotoinhibisi. Intensitas cahaya yang dianggap optimal berkisar sekitar 1.000 lux untuk kultur dalam wadah Erlenmeyer, dan antara 5.000 hingga 10.000 lux untuk kultur skala besar

c. Nutrien

Zat hara di perairan umumnya dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu makronutrien dan mikronutrien. Fitoplankton maupun zooplankton sangat bergantung pada nutrien ini untuk tumbuh dan berkembang. Nitrat dan fosfat merupakan contoh makronutrien penting yang mendukung pertumbuhan fitoplankton. Nitrat menyediakan nitrogen esensial untuk proses pertumbuhan, sementara bentuk nitrogen lain, seperti nitrit, amonia, dan senyawa organik, turut berperan dalam siklus nutrien ekosistem perairan

Asriyana dan Yuliana (2021) mengatakan bahwa Selain nitrogen dan fosfor, fitoplankton juga membutuhkan unsur hara lainnya meskipun dalam jumlah yang relatif kecil. Nutrien

anorganik berperan signifikan dalam mendukung proses pertumbuhan serta perkembangan fitoplankton. Sebagai indikator utama kesuburan perairan, kelimpahan fitoplankton sering dimanfaatkan untuk menilai kondisi ekosistem secara keseluruhan. Peningkatan input nutrisi memberikan efek yang berbeda tergantung sifat perairan; efeknya cenderung lebih signifikan pada perairan oligotrofik dibandingkan pada perairan yang bersifat eutrofik.

d. Nitrat

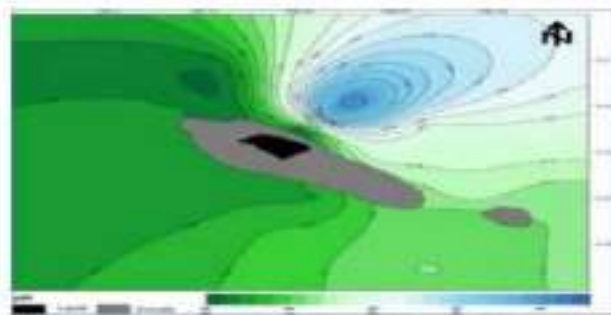
Nitrat merupakan nutrisi penting bagi pertumbuhan alga dan berfungsi sebagai bentuk utama nitrogen di perairan secara alami. Di perairan terbuka, kadar nitrat umumnya tidak melebihi 0.1 mg/L. Eutrofikasi dapat terjadi ketika konsentrasi nitrat melebihi 0.2 mg/L. Di sisi lain, kadar nitrat yang dianggap ideal untuk mendukung pertumbuhan fitoplankton umumnya berada dalam rentang 0,9 hingga 3,5 mg/L (Asriyana dan Yuliana, 2021).

e. Fosfat

Fosfat memiliki peranan yang sangat penting dalam ekosistem perairan karena berpengaruh terhadap tingkat produktivitas fitoplankton dan kerap menjadi faktor pembatas bagi pertumbuhannya. Di lingkungan laut, kadar fosfat umumnya relatif rendah. Unsur fosfor di perairan dapat ditemukan dalam bentuk organik, seperti asam nukleat, gula berfosfat, serta senyawa lainnya, maupun dalam bentuk anorganik. Bagi plankton, fosfat dibutuhkan untuk menjaga stabilitas membran sel sekaligus menunjang pertumbuhan dan aktivitas metabolisme. Menurut Asriyana dan Yuliana (2021), fitoplankton umumnya berkembang paling baik pada perairan dengan kadar fosfat berkisar antara 0,09 hingga 1,80 mg/L. Namun demikian, secara alami konsentrasi fosfat di perairan cenderung rendah dan biasanya tidak melampaui 0,1 mg/L. Apabila terjadi peningkatan kadar fosfat secara signifikan, kondisi ini dapat memicu terjadinya eutrofikasi di lingkungan perairan tersebut.

f. pH

Perubahan pH di perairan berdampak pada pertumbuhan dan metabolisme fitoplankton melalui beberapa mekanisme, seperti mengganggu keseimbangan rantai karbon organik, memengaruhi ketersediaan nutrisi, serta menimbulkan efek pada proses fisiologis sel. Dalam kultur, pH umumnya dijaga antara 7 hingga 9, sementara pH ideal untuk pertumbuhan alga laut berkisar 7.5–8.5. Secara umum, pH perairan yang optimal berada pada rentang 6.5–8.5. Selain itu, pH juga berperan penting dalam reaksi kimia dan proses biologis yang menentukan kualitas perairan. Nilai pH di bawah 6 atau di atas 9 dapat mengganggu pertumbuhan zooplankton dan memengaruhi fungsi metabolisme mereka.



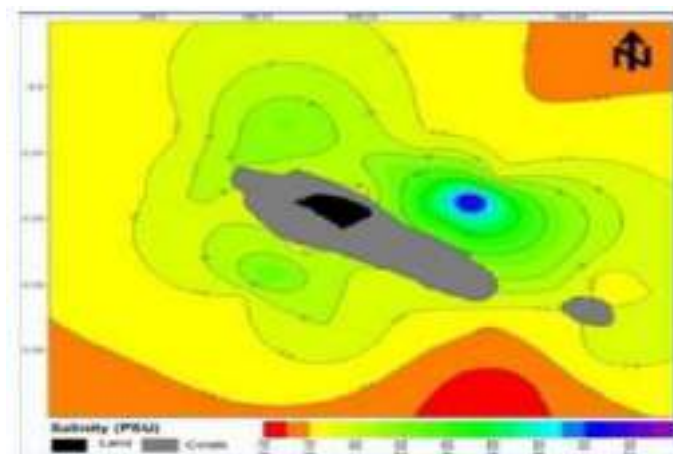
Gambar 24. Visualisasi suhu pH perairan.

Sumber: (Rozirwan *et al.* 2020)

Sebagian besar biota perairan umumnya mampu hidup pada kondisi pH yang berada di kisaran netral hingga sedikit basa, namun masih dapat mentoleransi kondisi yang mengarah ke asam maupun basa dalam batas tertentu (Rozirwan *et al.* 2023). Kondisi perairan dengan tingkat keasaman maupun kebasaan yang ekstrem dapat membahayakan organisme karena berpotensi mengganggu proses metabolisme dan pernapasan. Selain itu, pH yang terlalu rendah dapat meningkatkan kelarutan serta pergerakan logam berat beracun, sehingga mengancam keberlangsungan hidup biota akuatik. Sebaliknya, pada kondisi pH yang sangat tinggi (basa), konsentrasi amonia cenderung meningkat (Barus, 2004).

g. Salinitas

Salinitas merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi pertumbuhan plankton. Secara umum, salinitas didefinisikan sebagai total kandungan garam terlarut dalam satu liter air laut. Perubahan salinitas di perairan dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti intensitas curah hujan, aliran sungai, dan kondisi lingkungan lainnya. Fitoplankton, khususnya yang berasal dari perairan laut, umumnya berkembang lebih baik pada salinitas sedikit lebih rendah dibandingkan habitat aslinya. Organisme laut biasanya mampu mentoleransi rentang salinitas antara 15 hingga 36 ppt, dengan kisaran optimum sekitar 27–30 ppt.



Gambar 25. Visualisasi salinitas perairan.

Sumber: (Rozirwan *et al.* 2020).

h. Karbondioksida

Karbon dioksida berperan penting dalam mendukung proses fotosintesis pada fitoplankton. Dalam kegiatan kultur, gas ini umumnya dibutuhkan dalam kisaran sekitar 1–2% dengan intensitas cahaya yang relatif rendah. Namun, apabila konsentrasi karbon dioksida di perairan terlalu tinggi, kondisi tersebut dapat menurunkan kualitas lingkungan dengan menyebabkan pH menjadi tidak optimal.

i. Oksigen Terlarut (DO)

Oksigen adalah komponen penting dalam perairan yang dibutuhkan organisme untuk menjalankan metabolisme. Kadar oksigen terlarut dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah

satunya adalah suhu. Ketika suhu air meningkat, kemampuan air dalam melarutkan oksigen menurun sehingga konsentrasi DO cenderung berkurang (Fatur Rahman *et al.* 2016). Berdasarkan Yazwar (2008) bahwa kisaran oksigen terlarut (DO) yang mendukung kehidupan biota laut umumnya berada pada rentang 5.45–7.00 mg/L. Kondisi kualitas perairan, termasuk tingkat pencemaran, juga dapat ditinjau dari nilai DO; semakin tinggi tingkat pencemaran, biasanya diikuti oleh penurunan kadar oksigen terlarut. Meskipun demikian, plankton masih mampu tumbuh dengan baik pada konsentrasi DO di atas 3 mg/L.

4.5 Dinamika Populasi Plankton

Perubahan populasi plankton menggambarkan rumitnya interaksi ekologi di ekosistem perairan, yang dikendalikan oleh berbagai faktor lingkungan yang saling berhubungan dan bekerja secara simultan (Meiwinda, 2020). Plankton sebagai kelompok organisme sangat sensitif terhadap perubahan kondisi fisik, kimia, maupun biologis lingkungan, sehingga jumlah individunya dapat mengalami fluktuasi dalam jangka waktu pendek maupun panjang. Faktor-faktor yang memengaruhi kondisi tersebut meliputi suhu, intensitas cahaya, ketersediaan nutrisi, tekanan predasi, kompetisi antarspesies, serta dinamika perairan seperti arus dan gelombang (Nazar *et al.* 2024). Proses dinamika tersebut tidak hanya relevan dalam memahami dasar-dasar ekologi plankton, tetapi juga memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem perairan serta menunjang produktivitas sektor perikanan.

Intensitas cahaya yang mendukung berlangsungnya fotosintesis sangat menentukan laju pertumbuhan fitoplankton (Sinaga *et al.* 2021). Mayoritas fitoplankton memanfaatkan energi cahaya di zona fotik, terutama pada lapisan permukaan perairan yang secara langsung terpapar sinar matahari. Oleh karena itu, perubahan intensitas cahaya harian membentuk pola khas dalam dinamika populasinya, di mana aktivitas dan reproduksi cenderung mencapai puncak pada siang hari. Penetrasi cahaya ke dalam kolom air turut ditentukan oleh tingkat kekeruhan, yang dapat berubah akibat adanya partikel tersuspensi maupun bahan organik. Oleh karena itu, dinamika plankton sangat berkaitan erat dengan kondisi lingkungan perairan (Zainuri *et al.* 2023).

Zooplankton sebagai pemakan utama fitoplankton menunjukkan pola migrasi vertikal yang menjadi salah satu bentuk adaptasi penting. Pergerakan yang terjadi setiap hari ini membantu zooplankton menekan risiko pemangsaan oleh organisme yang mengandalkan penglihatan, sekaligus meningkatkan efisiensi dalam memperoleh sumber makanan (Poupon *et al.* 2024). Zooplankton bergerak ke lapisan permukaan pada malam hari untuk memanfaatkan fitoplankton sebagai sumber pakan, sementara pada siang hari mereka berpindah ke perairan yang lebih dalam, gelap, dan relatif terlindung dari predator. Pola pergerakan ini, yang dikenal sebagai diel vertical migration, menghasilkan variasi berkala dalam komposisi dan distribusi vertikal plankton, sekaligus berperan dalam mekanisme aliran energi di ekosistem perairan (Piton *et al.* 2025).

Temperatur perairan adalah salah satu faktor lingkungan utama yang memengaruhi metabolisme, reproduksi, dan pertumbuhan plankton. Setiap jenis plankton memiliki kisaran suhu optimum yang berbeda untuk berkembang secara maksimal. Perubahan suhu yang signifikan dapat mempercepat atau memperlambat siklus hidup fitoplankton maupun zooplankton (Zainuri *et al.* 2023). Di ekosistem tropis, meskipun variasi suhu relatif kecil, perubahan temperatur tetap berperan penting dalam memicu blooming fitoplankton, yang

3 umumnya terkait dengan siklus musim hujan dan kemarau (Anggraini *et al.* 2024). Unsur hara, seperti nitrogen, fosfor, dan silika, berperan penting dalam mendukung pertumbuhan fitoplankton, karena menjadi komponen utama pembentukan biomassa sekaligus mendukung proses fotosintesis (Rahmah *et al.* 2022). Ketersediaan nutrisi yang tinggi, baik dari aliran daratan maupun proses *upwelling*, dapat memicu peningkatan tajam populasi fitoplankton (*blooming*) sehingga mengubah struktur komunitas secara signifikan. Namun, kelebihan unsur hara juga berpotensi menyebabkan eutrofikasi, yang berdampak negatif pada kualitas perairan dan keberlanjutan ekosistem (Sigalingging *et al.* 2023).

3 Interaksi antara fitoplankton dan zooplankton tidak hanya bersifat produsen-konsumen, tetapi juga mencakup kompetisi yang kompleks, baik di dalam satu spesies maupun antarspesies. Zooplankton dapat memengaruhi komposisi jenis fitoplankton dengan memilih mangsa tertentu, sehingga struktur komunitas fitoplankton berubah sekaligus memengaruhi dinamika siklus hidupnya (Patmawati *et al.* 2018). Ketika fitoplankton mengalami stres, misalnya akibat kelebihan nutrisi atau suhu tinggi, mereka dapat menghasilkan toksin yang memengaruhi kesehatan zooplankton. Kondisi ini membuat interaksi antara keduanya bersifat dinamis dan berpotensi menimbulkan perubahan populasi plankton secara *non-linear* (Umbekna *et al.* 2025).

3 Dalam pendekatan matematis, dinamika populasi plankton biasanya dijelaskan menggunakan persamaan diferensial yang menggambarkan laju pertumbuhan fitoplankton, tingkat konsumsi oleh zooplankton, serta faktor kehilangan seperti kematian atau perpindahan. Model predator–mangsa klasik, misalnya Lotka–Volterra, dapat diperluas dengan memasukkan variabel lingkungan seperti temperatur dan ketersediaan nutrisi, sehingga memungkinkan prediksi kuantitatif terhadap fluktuasi populasi. Selain itu, model ini dapat dikombinasikan dengan pendekatan hidrodinamika untuk memetakan distribusi dan pergerakan plankton, baik di kolom air maupun pada skala wilayah yang lebih luas (Mulyadi dan Lekalette, 2020). Pengaruh aktivitas manusia terhadap dinamika populasi plankton semakin mendapat perhatian, terutama terkait perubahan iklim serta pencemaran nutrisi dan zat berbahaya. Kegiatan pertanian dan industri yang meningkatkan aliran unsur hara ke perairan dapat memicu ledakan fitoplankton yang merugikan, sekaligus mengubah struktur komunitas plankton dan mengancam keanekaragaman hayati serta keseimbangan ekosistem. Oleh sebab itu, penelitian tentang dinamika plankton menjadi sangat penting untuk mendukung pengelolaan perairan dan upaya mitigasi dampak pencemaran (Cahyani *et al.* 2023).

4.6 Kelimpahan Plankton di Pesisir

12 Sebagai produsen primer utama dalam ekosistem perairan, fitoplankton berperan langsung dalam rantai makanan sekaligus mendukung produksi ikan. Oleh karena itu, keberadaan fitoplankton dapat dijadikan indikator untuk menilai kualitas perairan, melalui pemantauan kelimpahan dan komposisi jenis di suatu lokasi (Rashidy *et al.* 2013). Di masa mendatang, diperkirakan akan terjadi perubahan dalam komposisi biota laut yang berimplikasi pada pergeseran fungsi serta struktur ekologi. Hal ini dipengaruhi oleh dinamika kondisi lingkungan, termasuk perkembangan ekologi di kawasan konservasi. Oleh karena itu, pemahaman terhadap komposisi plankton menjadi sangat penting sebagai dasar dalam mendukung produktivitas ekosistem perairan (Mukhoromah *et al.* 2018).

Karakteristik biologis suatu perairan merupakan aspek penting yang perlu dikaji secara mendalam, karena menjadi dasar dalam penentuan strategi pengelolaan, khususnya terkait komunitas fitoplankton. Selain berperan sebagai produsen utama, fitoplankton juga berkontribusi pada penyediaan oksigen melalui komposisi dan tingkat kelimpahannya. Masukan bahan organik yang berlebihan ke perairan dapat meningkatkan kekeruhan. Kondisi kekeruhan yang tinggi berdampak signifikan terhadap kualitas perairan, karena dapat menyebabkan distribusi nutrisi menjadi tidak merata serta menghambat penetrasi cahaya. Akibatnya, proses dan aktivitas fitoplankton pun dapat terganggu (Abida, 2010).

Ekosistem perairan tersusun dari dua komponen utama, yaitu biotik dan abiotik. Komponen abiotik yang berperan penting meliputi pH, oksigen terlarut (DO), suhu, ketersediaan nutrisi, dan tingkat kecerahan. Sementara itu, salah satu komponen biotik yang memiliki peranan signifikan adalah fitoplankton. Organisme ini memiliki karakteristik khusus karena keberadaannya dapat mencerminkan kondisi kualitas perairan. Selain itu, fitoplankton juga berfungsi sebagai sumber pakan utama dalam rantai makanan akuatik.

Ketersediaan unsur hara seperti nitrogen (N) dan fosfor (P) sangat memengaruhi kelimpahan fitoplankton, karena kedua unsur tersebut merupakan faktor pembatas dalam pertumbuhannya. Di wilayah beriklim empat musim, distribusi dan kelimpahan fitoplankton menunjukkan pola musiman. Pada musim dingin, kelompok flagelata cenderung dominan karena mampu beradaptasi terhadap suhu rendah dan intensitas cahaya yang terbatas, sedangkan diatom umumnya melimpah pada musim gugur.

Ledakan populasi fitoplankton dapat terjadi meskipun laju pertumbuhannya relatif lambat, terutama pada perairan yang tenang dan dangkal yang tidak mengalami stratifikasi suhu. Dalam kondisi tersebut, ketersediaan cahaya matahari dan nutrisi yang cukup akan mendorong peningkatan kelimpahan fitoplankton secara cepat. Faktor lain seperti curah hujan dan arus juga turut memengaruhi dinamika ini. Curah hujan dapat menurunkan salinitas sekaligus membawa masuk nutrisi dari daratan ke perairan. Akibatnya, pada musim hujan kelimpahan fitoplankton cenderung meningkat, yang pada akhirnya dapat berdampak pada peningkatan produksi ikan (Istadewi *et al.* 2016).

4.5 Fungsi Fitoplankton bagi Biota

Fitoplankton merupakan produsen primer utama di ekosistem perairan dan menjadi dasar bagi keterkaitan antarorganisme dalam rantai makanan. Organisme ini tidak dikonsumsi secara langsung oleh ikan pelagis besar seperti hiu, melainkan melalui jalur trofik, di mana biomassa fitoplankton terlebih dahulu dimanfaatkan oleh organisme tingkat rendah sebelum akhirnya mencapai predator tingkat tinggi. Kandungan klorofil pada fitoplankton telah lama digunakan sebagai indikator dalam menilai kualitas perairan. Selain itu, keberadaan ikan pemakan plankton dalam jumlah tertentu juga dapat mencerminkan kondisi ekosistem yang sehat.

Fitoplankton merupakan organisme penting yang tersebar luas di ekosistem perairan. Dengan memanfaatkan klorofil dan energi cahaya matahari, mereka mampu mengubah senyawa anorganik menjadi bahan organik melalui fotosintesis. Produk hasil fotosintesis ini kemudian menjadi sumber makanan bagi zooplankton, larva, dan organisme akuatik lainnya. Dengan demikian, fitoplankton memegang peran sentral dalam rantai makanan perairan, terutama sebagai penyedia energi utama bagi ikan kecil dan larva. Dalam ekologi perairan,

zooplankton juga memainkan peran penting sebagai penghubung energi, menyalurkan hasil produksi fitoplankton ke tingkat trofik yang lebih tinggi. Energi ini selanjutnya diteruskan ke ikan pelagis kecil dan predator yang lebih besar, termasuk ikan bertingkat trofik tinggi seperti pari yang memangsa ikan berukuran lebih kecil.

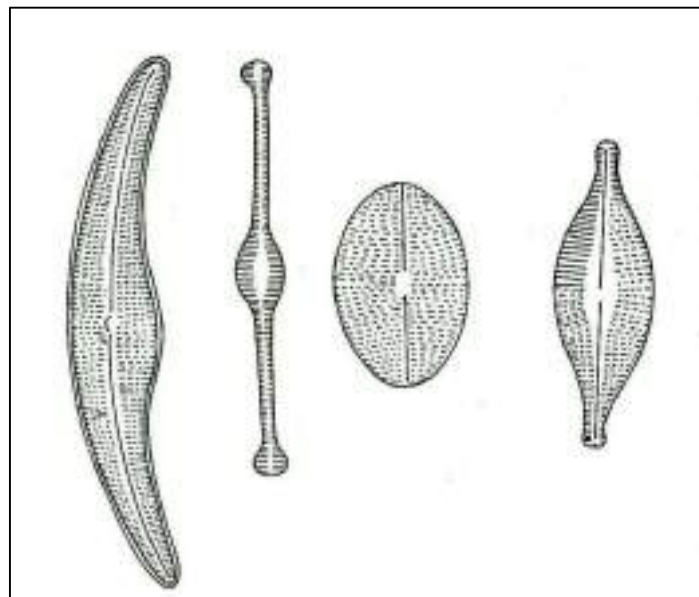
BAB V FITOPLANKTON

5.1 Kelompok Utama

Dalam ekosistem perairan, fitoplankton adalah produsen utama organisme mikroskopis yang fotosintetik. Berdasarkan klasifikasi dan pigmen yang dikandungnya, fitoplankton dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok utama, yaitu Bacillariophyta (Diatom), Dinoflagellata, Cyanobacteria (Cyanophyta), Chlorophyta (Alga Hijau), Chrysophyta (Alga Keemasan), dan Euglenophyta. Berikut uraian masing-masing kelompok.

1. Bacillariophyta (Diatom)

Diatom merupakan jenis mikroalga yang dinding selnya tersusun lebih dari 90% oleh silika, sehingga memiliki kemampuan untuk mengalami proses fosilisasi. Organisme ini dapat dijumpai di beragam jenis perairan, baik di lingkungan laut maupun di air tawar (Samudra *et al.* 2013).



Gambar 26. Jenis-jenis diatom.

Sumber: <https://shorturl.at/0obk2>

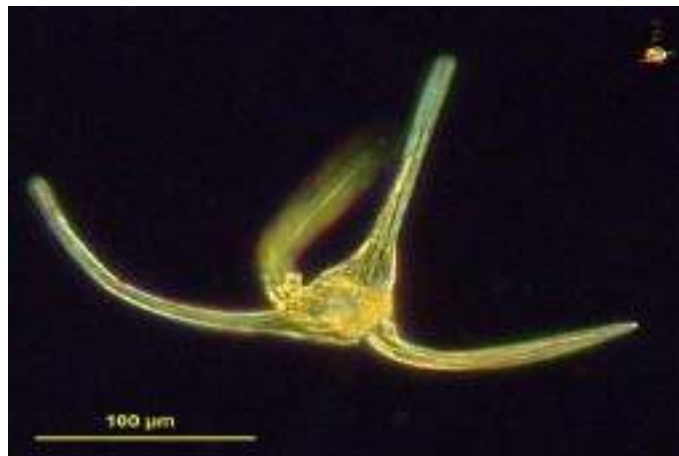
Diatom, salah satu kelompok fitoplankton yang khas, diperkirakan memiliki sekitar 16.000 spesies. Kelompok ini berperan sebagai produsen utama dan memiliki kontribusi penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem perairan, sehingga diklasifikasikan sebagai produsen primer dalam rantai trofik. Dalam proses reproduksinya, diatom membentuk koloni yang menghasilkan filamen. Secara umum, plankton dapat dibedakan menjadi dua tipe hidup: yang menempel pada substrat dan yang bergerak bebas di permukaan air, dengan pergerakannya dipengaruhi oleh arus (Murti dan Nurmiyati, 2025). Morfologi diatom sangat khas, ditandai oleh dinding sel transparan dan kokoh yang disebut frustul, tersusun dari silika. Frustul ini terdiri dari dua bagian yang saling menutupi seperti tutup dan wadah, yaitu epitheka sebagai bagian atas dan hipoteka sebagai bagian bawah. Bentuk frustul sangat beragam dan

menjadi elemen penting dalam identifikasi spesies, dengan pola pori dan ornamen permukaan yang kompleks serta berbeda antarspesies. Diatom umumnya bersifat mikroskopis, dengan panjang bervariasi mulai dari kurang dari 10 mikrometer hingga sekitar 200–5000 mikrometer (Zhang dan Luo, 2022)

Diatom terbagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan bentuk dan simetrinya. Yang pertama adalah diatom pennate, yang memiliki simetri bilateral dan biasanya berbentuk bulat seperti cakram, dan yang kedua adalah diatom sentris, yang memiliki simetri radial dan biasanya berbentuk (Nonoyama *et al.* 2019). Diatom tipe pennate umumnya hidup dengan melekat pada permukaan substrat di lingkungan perairan, sedangkan diatom sentris lebih sering dijumpai mengapung bebas di kolom air. Diatom memegang peran ekologis yang penting, terutama sebagai penyumbang utama produktivitas primer di perairan tawar maupun laut. Kemampuan mereka melakukan fotosintesis menjadikan diatom kontributor utama dalam produksi primer global pada ekosistem perairan (Larasati *et al.* 2025). Diatom berperan penting dalam berbagai siklus biogeokimia, terutama siklus karbon dan silika. Hal ini disebabkan dinding sel silikanya (frustul) yang dapat mengendap dan menumpuk sebagai sedimen silika di dasar laut (Leu *et al.* 2021). Keberadaan nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan silika di perairan turut menentukan keberadaan diatom. Masuknya unsur hara dari daratan ke badan sungai juga dapat memengaruhi kondisi kualitas air di suatu wilayah. Nutrien tersebut sangat dibutuhkan oleh organisme akuatik, terutama fitoplankton, dengan komponen utama berupa silikat, nitrat, dan fosfat.

2. Dinoflagellata

Dinoflagellata merupakan kelompok fitoplankton yang dapat bertahan hidup dan berkembang biak baik di perairan laut maupun di perairan tawar. Mereka bertanggung jawab atas pembentukan ekosistem perairan. Dinoflagellata adalah jenis fitoplankton bersel tunggal dengan dua flagela yang berbeda (Seygita *et al.* 2015).



Gambar 27. Dinoflagellata.

Sumber: <https://fpk.unair.ac.id/lebih-mengenal-dinoflagellata/>

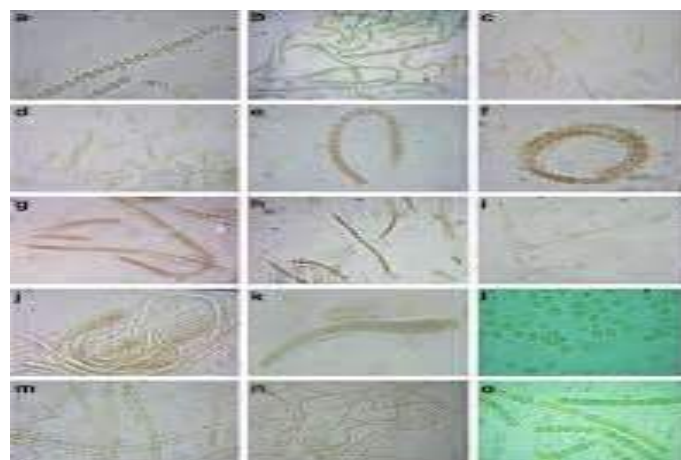
Salah satu flagel terletak di bagian tengah sel dan membentuk lekukan yang dikenal sebagai cingulum, yang berperan dalam menghasilkan gerakan dorong sekaligus memutar sel. Sementara itu, flagel lainnya tersusun memanjang secara longitudinal sepanjang sel dan

berfungsi sebagai alat penggerak utama. Sel dinoflagellata biasanya berukuran 20–200 μm dengan berbagai bentuk, termasuk simetris dan bulat. Karena kemampuan mereka untuk berasosiasi dengan makroalga atau bentik serta kemampuan mereka untuk menempel pada karang atau pasir, dinoflagellata banyak ditemukan pada organisme epibentik. Beberapa jenis dinoflagellata memiliki kemampuan untuk mengeluarkan racun dari kolom perairan. Meningkatnya pasokan nutrisi dari aktivitas manusia ke ekosistem pesisir sering dikaitkan dengan dinoflagellata, yang juga memainkan peran penting dalam pembentukan HAB. Lonjakan jumlah dinoflagellata secara drastis dapat menyebabkan perubahan warna air laut menjadi kemerahan, suatu fenomena yang dikenal sebagai red tide. Kondisi ini tidak hanya memengaruhi organisme perairan, tetapi juga dapat berdampak pada kesehatan manusia yang mengonsumsi biota yang terkontaminasi (Mujib *et al.* 2015).

Dinding sel pada dinoflagellata menunjukkan variasi struktur. Beberapa spesies memiliki lapisan pelindung berupa theca (armored) yang tersusun dari pelat kitin, sedangkan yang lain tidak memiliki theca (athecate atau naked), sehingga dindingnya lebih lentur dan fleksibel (Gonçalves dan Figueredo, 2020). Keberadaan nukleus dinokariotik pada dinoflagellata menjadi ciri khas yang membedakannya dari eukariot lain. Pada organisme ini, DNA tidak terorganisasi dalam bentuk nukleosom sebagaimana umumnya sel eukariotik, serta tidak dibungkus oleh membran inti yang bersifat konvensional. Selain itu, struktur genomnya sangat unik karena tidak melibatkan nukleosom maupun histon, yang biasanya berperan penting dalam proses pengemasan materi genetik (Wang *et al.* 2024).

3. *Cyanobacteria*

Cyanobacteria adalah salah satu kelompok fitoplankton yang paling umum dijumpai dan sering disebut alga hijau-biru. Organisme ini merupakan bakteri prokariotik yang mampu melakukan fotosintesis seperti tumbuhan, dengan memanfaatkan pigmen seperti klorofil *a*, fikobiliprotein (misalnya fikosianin dan fikoeritrin), serta karotenoid yang memberi warna hijau kebiruan, meski dalam kondisi tertentu warnanya bisa kemerahan atau kekuningan. *Cyanobacteria* dapat muncul dalam berbagai bentuk, baik sebagai sel tunggal, koloni, maupun filamen berbentuk benang, dan dikenal tangguh terhadap lingkungan ekstrem, termasuk fluktuasi suhu, salinitas, dan ketersediaan nutrisi (Surilayani dan Aldrianto, 2015).



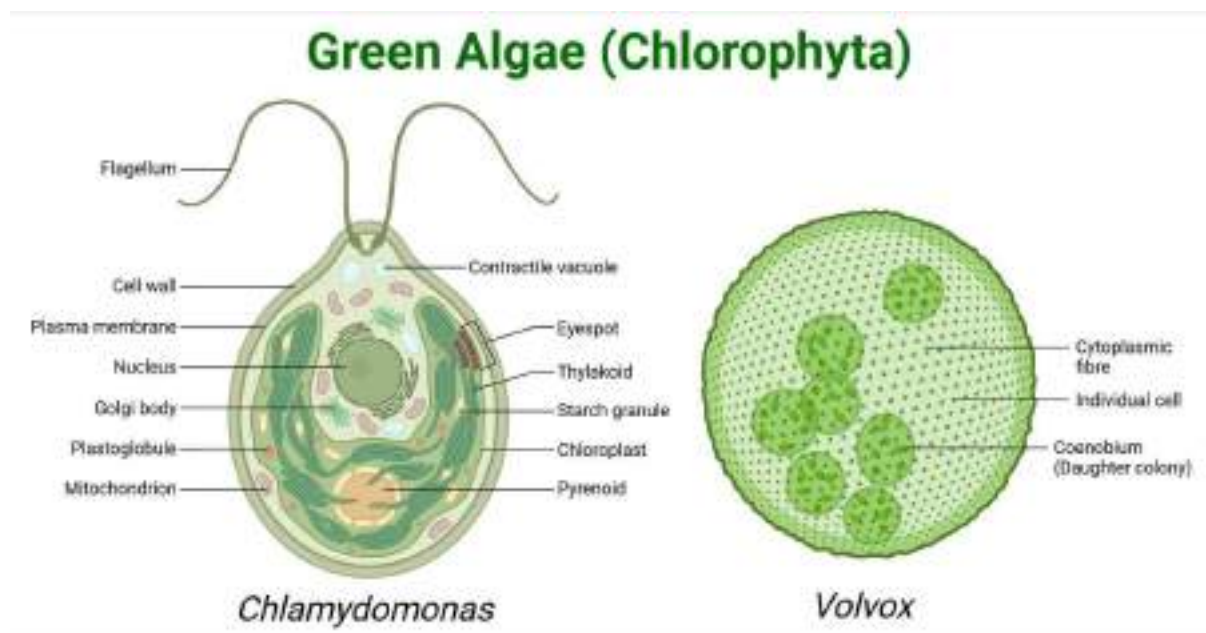
Gambar 28. Beberapa macam *Cyanobacteria* berdasarkan pemeriksaan mikroskopis strain: (A). *Nostoc spongiforme*, (B). *N. spongiforme*, (C). *N. species*, (D). *N. species*, (E).

Anabaenopsis species, (F). *Anabaena circularis*, (G). not identified, (H). *A. roxburgii*, (I). *A. variabilis*, (J). *Calothrix species*, (K). *Microchaeta species*, (L). *Gleocapsa species*, (M). *N. muscorum*, (N). *A. species*, (O). *A. species* (Deep *et al.* 2013)

Manurut Demoulin *et al.* (2019), cianobakteri bereproduksi dengan cara pembelahan biner pada bentuk uniseluler, sedangkan pada tipe filamen terjadi melalui pemanjangan benang. Ketika filamen terputus, dapat terbentuk bagian kecil yang disebut hormogonium, yang selanjutnya mampu berkembang menjadi individu baru. Selain itu, kemampuan bergerak maju-mundur atau berosilasi membantu organisme ini memperoleh cahaya dan nutrisi secara optimal. Di samping menghasilkan oksigen melalui proses fotosintesis, cianobakteri juga mampu melakukan fiksasi nitrogen, sehingga berperan dalam meningkatkan kesuburan tanah maupun perairan yang miskin unsur hara.

4. Chlorophyta

Chlorophyta adalah kelompok alga hijau yang menunjukkan tingkat keanekaragaman tertinggi dibandingkan dengan kelompok alga lainnya. Mereka dapat ditemukan secara individual atau dalam kelompok di perairan, dan mereka mengandung karoten dan klorofil hijau. Sebagian besar dari mereka tinggal di area laut. Organisme ini juga kerap dijumpai pada perairan lentik maupun lotik, seperti kolam dan danau.



Gambar 29. Chlorophyta.

Sumber: <https://shorturl.at/C4YU9>

Chlorophyta berperan sebagai produsen primer melalui aktivitas fotosintesis, mengubah energi cahaya matahari menjadi energi kimia. Selain menyediakan pakan dan tempat tinggal bagi berbagai organisme akuatik, kelompok ini juga berkontribusi dalam menghasilkan oksigen yang penting bagi kelangsungan hidup organisme aerobik di seluruh tingkat trofik (Yasa *et al.* 2024).

5. Chrysophyta

Kelompok *Chrysophyta* juga dikenal dengan istilah alga keemasan (*golden algae*) atau alga pirang. Penamaan ini disebabkan oleh banyaknya pigmen *karoten* dan *xantofil* dengan jumlah yang lebih dominan dibanding dengan klorofil a dan c yang terdapat pada alga ini, sehingga membuat sel plastida berwarna kuning atau cokelat keemasan. Selain itu alga ini juga memiliki pigmen lainnya yang memicu terjadinya warna keemasan. Pigmen tersebut dikenal dengan nama fukosantin.



Gambar 30. Chrysophyta.

Sumber: <https://alchetron.com/Navicula>

Kelompok *Chrysophyta* juga dikenal memiliki banyak potensi untuk dimanfaatkan, beberapa spesies yang terkenal dari golongan ini adalah *Navicula* dan *Vaucheria*. Spesies *Vaucheria* dapat dimanfaatkan menjadi komponen utama pembentuk minyak bumi, hal ini disebabkan karena spesies ini memiliki cadangan makanan berupa minyak yang dapat di ekstrak. Hal ini tentu saja menjadi alternatif lain yang digunakan untuk memproduksi minyak bumi. Sedangkan spesies *Navicula*, pemanfaatannya terjadi saat telah mati, dimana ketika spesies ini mati, endapan tanah yang terbentuk dari sisa-sisa tubuhnya mampu dijadikan sebagai bahan pembuatan alat penggosok, cat, pernis, bahan dalam industri kaca, penyaring, bahkan sebagai bahan penyekat dinamit.

6. Cyanophyta

Kelompok fitoplankton ini merupakan organisme yang bersifat prokariotik, dapat ditemukan secara individu, berkoloni maupun membentuk filamen. Kelompok ini juga biasa disebut dengan alga hijau-biru karena memiliki warna hijau hingga kebiruan. Warna tersebut diakibatkan oleh warna pigmen yang dimiliki alga ini. Jika dalam keadaan kering, kelompok alga ini akan mengelupas seperti kerak. Kelompok ini banyak ditemukan di daerah intertidal dan estuari, tetapi tidak jarang ditemukan di daerah tropis dan sub tropis. Kelompok ini juga memiliki sifat yang sangat tolerir terhadap keadaan kering. Beberapa jenis kelompok ini juga mampu mengikat N_2 dari udara dan melakukan reproduksi dengan cara pembelahan sel. Dalam lingkungan perairan, kelompok ini mampu tumbuh hingga menyebabkan ledakan populasi. Hal ini diakibatkan karena beberapa spesies dari kelompok ini mampu melakukan fiksasi nitrogen

sehingga menyebabkan perairan tersebut kaya akan nutrisi dan memicu terjadinya pertumbuhan yang signifikan dari plankton ini.



Gambar 31. Cyanophyta.

Sumber: <https://jp.pinterest.com/pin/609252655810990509/>

7. Euglenophyta

Kelompok ini dinamakan *Euglenophyta* karena memiliki ciri khusus berupa stigma yang berwarna merah dan dapat menangkap cahaya (*photoreceptive eyespot*). Euglenophyta merupakan jenis fitoplankton yang memiliki bulu cambuk yang disebut dengan *flagel* tubuh di ujung anterior yang dapat membantu mobilitas dari organisme ini. Kelompok ini termasuk alga karena mengandung pigmen seperti klorofil a, klorofil b, dan karoten yang memfasilitasi proses fotosintesis. Bentuk selnya umumnya oval, dengan ujung depan yang membulat dan ujung belakang yang meruncing.



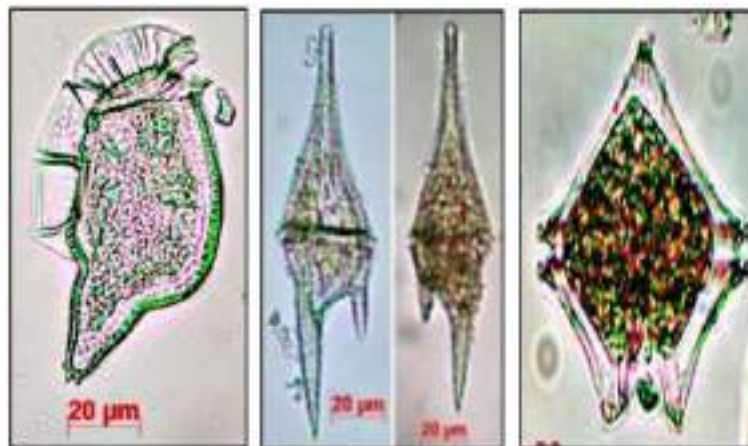
Gambar 32. Euglenophyta.

Sumber: <https://pinegreenwoods.blogspot.com/2015/01/montessori-biology-phylum-euglenophyta.html>

Kelompok ini mungkin juga heterotrof. Jenis alga ini akan berfotosintesis ketika ada sinar matahari yang mencukupi; jika tidak ada pencahayaan, jenis alga ini akan mengambil zat organik terlarut di sekitarnya. Membran sel membantu absorpsi zat organik, yang kemudian dicerna secara enzimatik di dalam sitoplasma. Salah satu spesies terkenal dari kelompok ini adalah *Euglena viridis*. Spesies ini biasa dimanfaatkan sebagai bahan tambahan pakan ikan karena diketahui spesies ini mudah untuk ditumbuhkan dalam suatu media dan juga memiliki banyak kandungan nutrisi yang sangat berguna untuk perkembangan ikan.

5.2 Peran dalam fotosintesis dan siklus karbon

Fitoplankton sangat penting untuk ekosistem perairan. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, kemampuan fitoplankton untuk melakukan proses fotosintesis menjadikannya produsen utama ekosistem perairan. Kelompok organisme yang menyerupai tumbuhan disebut fitoplankton. Produsen di perairan adalah fitoplankton yang memiliki kemampuan fotosintesis, yang memungkinkannya memproduksi makanan untuk dirinya sendiri (Apriani *et al.* 2022). Zooplankton, yang memiliki tingkat trofik yang lebih tinggi, akan memakan fitoplankton. Organisme memiliki kemampuan fotosintesis dan memproduksi makanan sendiri. Klorofil yang ditemukan dalam fitoplankton memiliki kemampuan untuk mengubah zat non-organik menjadi organik melalui fotosintesis. Selain itu, fitoplankton sangat terkait dengan unsur karbon dan siklus karbon (Bahri and Sarjan, 2025). Karbon adalah sumber energi utama fitoplankton untuk pembentukan senyawa karbohidrat. Pembentukan karbohidrat ini dimungkinkan oleh reaksi anabolik yang dikenal sebagai fotosintesis. Menurut Firdaus dan Wijayanti (2019), Jumlah karbon yang secara bersih diserap oleh fitoplankton di lautan hampir setara dengan yang diserap oleh tumbuhan di daratan.

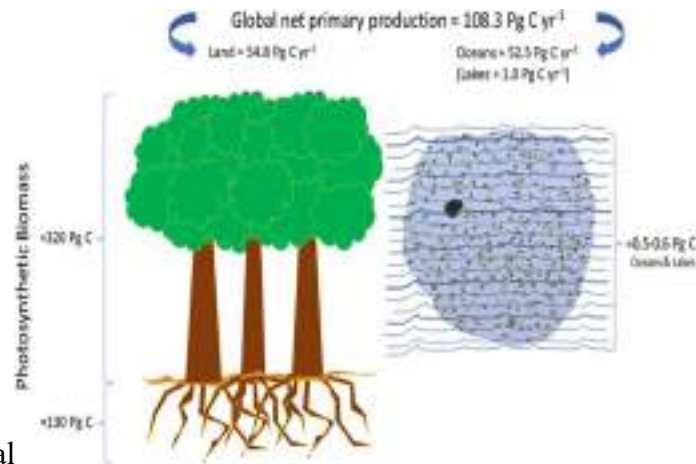


Gambar 33. Beberapa Jenis Fitoplankton, A. *Dinophysis homunculus*, B. *Ceratium furca*, C. *Protoperdinium conicum*.

Sumber: (Bahri dan Sarjan, 2025)

Dalam ekosistem perairan, fitoplankton memiliki peran penting dalam fotosintesis dan siklus karbon. Organisme mikroskopis autotrof ini mampu mengubah karbon dioksida dan air menjadi glukosa serta oksigen melalui proses fotosintesis. Aktivitas tersebut tidak hanya menyediakan oksigen yang vital bagi organisme akuatik, tetapi juga membantu menurunkan kadar karbon dioksida di atmosfer maupun perairan, sehingga berkontribusi pada penyerapan

5 karbon secara global. Selain itu, fitoplankton menjadi elemen utama dalam siklus karbon dunia dan mendukung kesuburan ekosistem pesisir melalui peranannya dalam produksi.



primer global

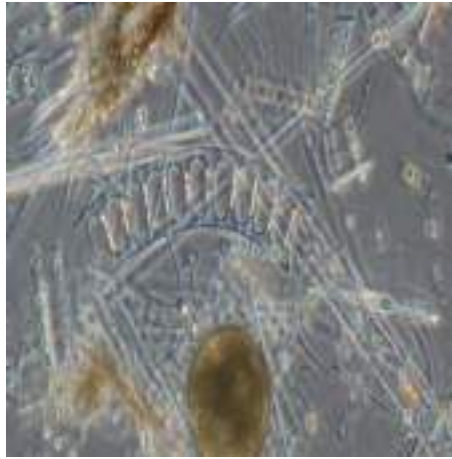
Gambar 34. Kontribusi yang berbeda dari vegetasi darat dan fitoplankton terhadap produksi primer bersih global.

Sumber: (Flores Lg & Padisak J, 2023).

Selama fotosintesis, fitoplankton menyerap karbon dioksida (CO₂) dari perairan. Melalui siklus Calvin, CO₂ tersebut diubah menjadi senyawa organik seperti glukosa, yang berfungsi sebagai sumber energi bagi fitoplankton itu sendiri sekaligus bagi organisme heterotrof lain dalam rantai makanan (Dokulil dan Qian, 2021). Selain itu, oksigen yang dihasilkan sebagai produk samping fotosintesis dilepaskan ke dalam perairan. Oksigen terlarut ini memegang peranan penting dalam mendukung kelangsungan hidup beragam organisme akuatik (Naselli-Flores dan Padisák, 2023). Fotosintesis pada fitoplankton dipengaruhi oleh berbagai faktor, terutama intensitas cahaya. Selain itu, faktor lingkungan lain seperti suhu, ketersediaan nutrisi (nitrogen, fosfor, dan silika), salinitas, arus perairan, serta kadar oksigen terlarut juga memengaruhi keberadaan fitoplankton. Aktivitas fotosintesis yang berlangsung pada siang hari berperan dalam meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut di perairan. Namun, apabila cahaya tidak dapat menembus perairan, jumlah fitoplankton cenderung tetap rendah meskipun kondisi lainnya mendukung. Di sisi lain, faktor biologi seperti dekomposisi dan aktivitas pemangsaan oleh organisme lain juga turut memengaruhi dinamika fitoplankton.

Fitoplankton turut berperan dalam proses pembentukan stratifikasi perairan, khususnya pada badan air tertutup seperti danau. Secara umum, danau tersusun atas dua lapisan utama, yaitu lapisan permukaan (epilimnion) yang memiliki suhu lebih hangat, serta lapisan bawah yang lebih dingin, yang mencakup zona metalimnion dan hipolimnion (Giling *et al.* 2017). Lapisan epilimnion biasanya kaya akan oksigen, sementara metalimnion dicirikan oleh perubahan suhu yang cepat, dan hipolimnion memiliki kadar oksigen yang relatif rendah. Perbedaan ini terkait dengan penetrasi cahaya di setiap lapisan, yang menjadi sumber energi utama bagi proses produktivitas primer (Wang *et al.* 2023). Suhu biasanya lebih rendah di lapisan yang lebih dalam, seperti metalimnion dan hipolimnion, dan penetrasi cahaya sangat terbatas. Kondisi ini membuat aktivitas fotosintesis di zona tersebut minimal, sehingga kadar oksigen di lapisan ini relatif rendah. Pada lapisan hipolimnion, berlangsung proses dekomposisi oleh bakteri terhadap bahan organik yang mengendap ke dasar danau, sehingga

menyebabkan kadar oksigen terlarut (DO) di lapisan ini menjadi yang paling rendah dibandingkan lapisan lainnya (Komala *et al.* 2019). Disebabkan perbedaan suhu dan kerapatan air, pencampuran antara lapisan hangat epilimnion dan lapisan dingin hipolimnion terhambat. Akibatnya, distribusi oksigen dan nutrisi di perairan tidak merata.



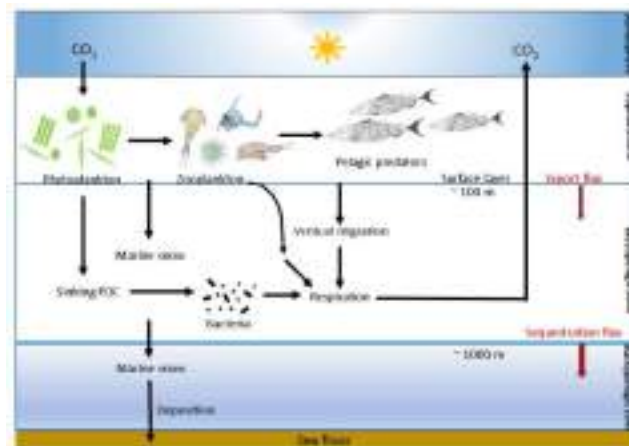
Gambar 35. Berbagai fitoplankton yang dilihat dengan menggunakan mikroskop perbesaran 10 kali dan filter *phase contrast*.

Sumber: (Firdaus dan Wijayanti, 2019)

Fotosintesis sangat penting bagi fitoplankton, karena senyawa yang dihasilkannya menjadi sumber energi untuk kedua mikroalga dan makroalga. Selama proses ini, fitoplankton menyerap karbon dioksida dari kolom air dan mengubahnya menjadi karbohidrat. Selain itu, mereka menjadi kontributor utama oksigen, terutama di wilayah Indonesia yang luasnya laut lebih besar dibanding daratan. Fitoplankton biasanya tidak dapat bergerak secara aktif karena mereka adalah mikroorganisme autotrof yang dibawa oleh arus dan pergerakan air. Sebagai produsen utama di ekosistem laut, mereka menyediakan energi dan makanan bagi organisme lain serta berfungsi sebagai bioindikator kualitas perairan. Kandungan klorofil-a fitoplankton sering digunakan peneliti untuk mengidentifikasi lokasi potensial penangkapan ikan, karena area dengan konsentrasi tinggi biasanya mendukung populasi ikan planktivora dan karnivora yang melimpah (Salwa dan Larasati, 2024). Di dalam fitoplankton terdapat klorofil-a, pigmen utama sel tumbuhan, yang membantu fotosintesis di lingkungan perairan. Tingkat kelimpahan fitoplankton berkaitan langsung dengan penyebaran dan konsentrasi klorofil-a. Setiap sel fotosintesis biasanya memiliki satu atau lebih jenis pigmen klorofil. Distribusi klorofil dipengaruhi oleh parameter fisika dan kimia seperti suhu, intensitas cahaya, serta pergerakan arus air. Fitoplankton memiliki kemampuan untuk mengubah senyawa anorganik menjadi senyawa organik melalui fotosintesis. Akibatnya, kadar klorofil-a sering digunakan sebagai indikator utama untuk menilai produktivitas primer perairan sekaligus memantau kelimpahan fitoplankton.

Fitoplankton adalah produsen utama makanan karena kemampuan untuk memproduksi makanannya sendiri melalui fotosintesis. Jika fitoplankton tidak ada di perairan, maka tidak ada kehidupan di sana. Fitoplankton adalah komponen penting dari ekosistem perairan. Fitoplankton berperan dalam siklus karbon melalui fotosintesis dan proses pompa biologis. Saat biomassa fitoplankton mati dan mengendap ke dasar laut, karbon yang terkandung di

5 dalamnya dibawa dari permukaan menuju lapisan bawah perairan. Melalui penyimpanan karbon, proses ini berkontribusi pada pengurangan kadar karbon dioksida di atmosfer dan mendukung perubahan iklim global (Firdaus dan Wijayanti, 2019)



Gambar 36. Skema pompa karbon biologis

Sumber: (Basu dan Mackey, 2018)

5 Beberapa kelompok fitoplankton, misalnya kokolitofor yang membentuk cangkang dari kalsium karbonat, selain berperan dalam pompa biologi, juga terlibat dalam siklus kalsium karbonat. Proses ini mengubah karbon dioksida (CO₂) terlarut menjadi karbonat, yang kemudian mengendap di dasar laut. Proses ini juga berfungsi sebagai cara yang lama untuk menyimpan karbon (Ziveri *et al.* 2023). Fitoplankton menyerap sekitar 40 hingga 50 petagram, atau miliar ton karbon, setiap tahun di seluruh dunia, menjadikannya salah satu bagian paling penting dari sirkulasi karbon global (Hannisdal *et al.* 2012). Gangguan pada proses fotosintesis fitoplankton akan menurunkan kemampuan mereka menyerap karbon dioksida dari atmosfer, sehingga meningkatkan konsentrasi CO₂ dan membantu mempercepat pemanasan global dan perubahan iklim. Fitoplankton mengambil karbon dari air selama fotosintesis untuk membentuk karbohidrat, bertanggung jawab untuk hampir separuh penyerapan karbon di seluruh dunia. Selain itu, selama fotosintesis, fitoplankton menghasilkan banyak oksigen, yang sangat penting bagi kelangsungan hidup organisme aerobik di laut (Firdaus dan Wijayanti, 2019).

5 Selain memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan antara oksigen dan karbon, aktivitas fitoplankton dalam siklus karbon berhubungan erat dengan aktivitas siklus nutrisi lainnya, seperti nitrogen dan fosfor (Flores dan Padisak, 2023). Ketersediaan nutrisi memengaruhi tingkat produksi fitoplankton, yang pada gilirannya menentukan laju penyerapan karbon, terkait langsung dengan fotosintesis dan jumlah biomassa yang terbentuk (Hagstrom *et al.* 2024). Peranan fitoplankton di ekosistem suatu perairan sangatlah besar. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, fitoplankton berperan sebagai produsen primer di perairan berkat kemampuannya melakukan fotosintesis. Namun sisi lain, biota mikroskopis ini juga memiliki dampak penting lain yang harus kita ketahui. Organisme ini juga mampu menjadi indikator kualitas perairan. Mengapa demikian? Karena organisme ini mampu memberikan respon terhadap perubahan kondisi perairan. Hal ini ditunjukkannya melalui perubahan kelimpahan, jumlah jenis, maupun struktur komunitasnya di dalam perairan. Meskipun fotosintesis

umumnya berlangsung pada siang hari, fitoplankton tetap mampu meningkatkan kadar oksigen terlarut (DO) di perairan. Namun, jika cahaya tidak menembus air, meskipun populasi fitoplankton tinggi, kadar oksigen terlarut dapat tetap rendah. Selain itu, fitoplankton berperan dalam pembentukan stratifikasi perairan, khususnya pada badan air tertutup seperti danau. Perairan ini terbagi menjadi lapisan atas yang hangat (epilimnion) dan lapisan yang lebih dingin di bawahnya (metalimnion dan hipolimnion). Lapisan epilimnion kaya akan oksigen, sedangkan hipolimnion memiliki kadar oksigen yang rendah. Perbedaan ini terkait erat dengan penetrasi cahaya di setiap lapisan, yang menyediakan energi bagi produktivitas primer.

Bahkan tingkat trofik perairan sangat dipengaruhi oleh fluktuasi plankton. Nutrisi adalah salah satu faktor lingkungan yang mengubah populasi organisme ini. Eutrofikasi dapat menyebabkan ledakan populasi fitoplankton di perairan, yang dapat menurunkan kualitas air. Disebut sebagai alga hijau yang berbahaya, populasi fitoplankton yang meledak di perairan juga dapat membunuh ikan. Salah satu jenis Dinoflagellata yang bersifat racun bagi biota seperti ikan, memiliki danya neurotoksin yang dilepaskan ke perairan. Fitoplankton memiliki dampak yang sangat besar terhadap organisme disekitarnya bahkan manusia sekalipun. Diketahui organisme ini juga menjadi salah satu penyerap karbon dioksida terbesar dan menghasilkan oksigen yang diperlukan oleh organisme lainnya. Penurunan jumlah fitoplankton pada malam hari bisa saja menyebabkan terjadinya kematian bagi organisme di dalam nya akibat kurangnya persediaan oksigen terlarut. Jika dapat dikendalikans secara baik, maka fitoplankton ini mampu menyerap lebih banyak CO₂ yang dapat dikirim ke dasar laut sebagai deposit karbon.

Fakta lain yang perlu diketahui mengenai organisme ini yang mampu melakukan suatu fenomena yang cukup unik, biasa dikenal dengan peristiwa *Blooming Alga*. Fenomena ini merupakan keadaan perairan baik itu perairan tertutup, seperti danau, kolam bahkan di lautan sekalipun mengalami ledakan populasi fitoplankton akibat adanya kandungan nutrisi yang berlebih di perairan tersebut atau biasa dikenal sebagai eutrofikasi. Selain adanya eutrofikasi, pemanasan global juga menjadi faktor lain yang menyebabkan terjadinya ledakan fitoplankton tersebut. Pemanasan tersebut akan memicu metabolisme yang dilakukan oleh organisme ini sehingga menyebabkan reproduksi dan proses pembelahan sel akan berlangsung semakin cepat dan smakin banyak.

5 Fenomena ini dapat disebabkan oleh masuknya limbah rumah tangga, industri, dan pertanian yang tinggi nutrien, terutama fosfat, ke dalam perairan. Peningkatan konsentrasi fosfat di air akan merangsang pertumbuhan fitoplankton secara pesat, yang selanjutnya berdampak signifikan terhadap berbagai organisme hewan dan tumbuhan air yang hidup di ekosistem tersebut. Fenomena ini dikenal dengan *Harmfull Blooming algae*. Menurut Rozirwan (2010), beberapa jenis plankton yang mengalami Harmful Algal Blooms (HAB) juga berpotensi menghasilkan toksin bagi manusia, yang dapat menimbulkan berbagai efek, seperti keracunan paralitik, keracunan saraf, gangguan memori, diare, serta jenis keracunan lainnya. Fenomena ini juga dapat membunuh biota di sekitarnya. Hal ini dapat terjadi karena terdapat beberapa jenis alga yang akan mengeksresikan toksin di perairan yang diproduksi secara banyak sehingga ketika dibiarkan maka akan membawa kematian bagi biota yang mengonsumsinya. Selain itu fenomena ini juga dapat menghasilkan berkurangnya kadar oksigen dalam air disuatu perairan. Hal ini disebabkan beberapa hal, salah satunya akan ada perebutan oksigen dari biota lain dan juga alga itu sendiri. Selain itu siklus hidup alga yang juga sangat cepat membuat proses dekomposisi di perairan juga akan semakin banyak. Perlu diketahui, proses dekomposisi

juga membutuhkan oksigen dalam tahapannya. Beberapa jenis fitoplankton yang mampu melakukan fenomena ini berasal dari kelompok *Cyanobacteria* yang biasa ditandai dengan warna hijau-biru dari kelompok *dinoflagellata* yang biasa ditandai dengan warna merah.

5.3 Blooms (*Harmful Algal Blooms*, HABs) dan Dampaknya

Harmful Algal Blooms (HABs) merupakan fenomena alam yang memperlihatkan peningkatan populasi fitoplankton atau mikroalga tertentu dalam waktu yang sangat cepat hingga menimbulkan dampak negatif terhadap ekosistem perairan, kesehatan manusia, serta kegiatan ekonomi pesisir. Dalam istilah awam, HABs sering disebut sebagai *red tide* (pasang merah), meskipun tidak semua HABs berwarna merah dan tidak semua *red tide* bersifat beracun. Secara ilmiah, HABs menjadi perhatian penting karena dapat menghasilkan toksin (racun) yang mencemari rantai makanan laut, menyebabkan kematian massal ikan, serta memengaruhi kualitas air dan oksigen terlarut. Fenomena ini telah dilaporkan meningkat secara global dalam beberapa dekade terakhir, seiring dengan perubahan iklim dan aktivitas manusia yang memperkaya nutrisi di perairan (eutrofikasi).

Dalam beberapa dekade terakhir, dinamika komunitas plankton menunjukkan fenomena ekologis yang semakin kompleks. Salah satu fenomena yang mendapat perhatian besar dalam planktonologi modern adalah *Harmful Algal Blooms* (HABs) atau ledakan alga berbahaya. Fenomena ini terjadi ketika populasi fitoplankton tertentu mengalami pertumbuhan yang sangat cepat dan masif, sering kali menghasilkan toksin yang dapat membahayakan organisme laut lainnya, menurunkan kualitas air, dan menimbulkan kerugian ekonomi pada sektor perikanan serta pariwisata pesisir. Secara ekologis, HABs merupakan manifestasi dari ketidakseimbangan lingkungan yang dapat dipicu oleh faktor alami maupun antropogenik, seperti peningkatan nutrisi (nitrogen dan fosfor) akibat limpasan daratan, perubahan suhu permukaan laut, serta pergeseran pola sirkulasi dan stratifikasi kolom air.

Fitoplankton sangat dibutuhkan organisme dalam keadaan normal pada tingkat trofik di atasnya, tetapi apabila terlalu banyak akan membahayakan. Ini adalah jenis tanaman yang disebut sebagai tanaman alga berbahaya (HAB). Graneli dan Turner (2006) menuturkan bahwa alga berbahaya didefinisikan sebagai alga yang dapat menimbulkan berbagai dampak negatif bagi ekosistem perairan, seperti menurunkan kadar oksigen dalam air, menyumbat insang ikan, atau menyebabkan keracunan pada organisme yang memakan fitoplankton beracun. Ledakan populasi fitoplankton juga dapat menimbulkan kekurangan oksigen di lapisan perairan yang lebih dalam, yang pada akhirnya mengakibatkan kematian massal hewan bentik dan ikan (Wiadnyana 1997; Graneli dan Turner 2006). Orang-orang dapat mengalami keracunan atau kematian jika mereka mengonsumsi ikan yang mengandung biotoksin. Produk perikanan yang terkontaminasi toksin juga berpotensi menimbulkan kerugian finansial bagi petambak dan nelayan (Mulyasari *et al.* 2003).

5.3.1 Fitoplankton dan Fenomena *Algal Bloom*

Proses pertumbuhan alga plankton (fitoplankton) yang cepat di dalam perairan dikenal sebagai alga bloom. Andersen (1996) Ledakan populasi, atau blooming, didefinisikan sebagai kondisi di mana satu atau beberapa spesies fitoplankton mencapai kepadatan tinggi yang berpotensi membahayakan organisme laut atau menyebabkan akumulasi toksin dalam tubuh

mereka. Beberapa peneliti juga menjelaskan *Harmful Algal Bloom* (HAB) sebagai fenomena ledakan fitoplankton di perairan yang dapat menimbulkan kematian biota lain serta mengubah struktur komunitas ekosistem. Toksin yang dihasilkan HAB pun dapat menular ke manusia melalui konsumsi kerang dan ikan sebagai perantara.

Hallegraeff (1995) mengelompokkan HABs menjadi tiga tipe:

1. Plankton penyebab perubahan warna air – Bisa menurunkan oksigen terlarut dan mengganggu biota laut. Contoh: *Gonyaulax polygramma*, *Noctiluca scintillans*, *Scrippsiella trochoidea*, *Trichodesmium erythraeum*.
2. Plankton berpotensi toksik bagi manusia – Termasuk beberapa *dinoflagellata*, *diatom*, dan *cyanobacteria*: *Alexandrium acatenella*, *A. tamarense*, *Gymnodinium catenatum*, *Pyrodinium bahamense*, *Dinophysis* spp., *Prorocentrum lima*, *Pseudo-nitzschia* spp., *Anabaena circinalis*, *Nodularia spumigena*.

Plankton mengganggu biota laut tapi aman bagi manusia – Menyumbat insang dan merusak sistem pernapasan. Contoh: *Chaetoceros convolutus*, *Gymnodinium mikimotoi*, dan sejenisnya. Pertumbuhan alga yang berlebihan dapat mengganggu hubungan trofik dalam ekosistem perairan. Saat alga mati dan mengendap ke dasar, bakteri dan dekomposer lainnya akan memecahnya melalui proses dekomposisi, yang dapat menurunkan kadar oksigen di lapisan air bawah. Kondisi ini berpotensi menyebabkan kematian ikan atau digantikan oleh organisme yang lebih toleran terhadap lingkungan kaya nutrisi dan miskin oksigen. Fenomena ledakan alga semacam ini terjadi baru-baru ini di Teluk Lampung, Indonesia, ketika pada pertengahan Oktober 2013, ledakan *Cochlodinium polykrikoides* menewaskan banyak ikan budidaya di karamba jaring apung Balai Besar Pengembangan Budidaya Laut. Fitoplankton umumnya bereproduksi melalui berbagai mekanisme reproduksi spesifik tiap jenisnya. Menurut Valiela (1984), suksesi didefinisikan sebagai proses pergeseran bertahap dan berurutan dari satu komunitas ke komunitas lainnya, yang dipengaruhi oleh perubahan lingkungan serta komposisi dan keanekaragaman spesies.

Graneli dan Turner (2006) menyatakan bahwa dari sekitar 5.000 spesies fitoplankton yang dikenal, sekitar 80 di antaranya mampu menghasilkan racun, sementara sekitar 300 spesies berpotensi menyebabkan *Harmful Algal Bloom* (HAB). Beberapa jenis *dinoflagellata*, saat mengalami ledakan populasi, melepaskan neurotoksin yang dapat mematikan ikan dalam jumlah tertentu. Toksin ini dapat menumpuk pada hewan pemakan saring seperti kerang, dan akhirnya menular ke manusia yang mengonsumsinya. Berdasarkan penelitian Praseno dan Sugstiningsih (2000), terdapat 37 spesies fitoplankton di perairan Indonesia yang berpotensi menimbulkan HAB. Sidabutar (2006) melaporkan 16 peristiwa blooming fitoplankton di wilayah perairan Indonesia antara tahun 1983 hingga 2005. Sebagian besar ledakan ini berasal dari *Dinoflagellata*, meskipun beberapa juga disebabkan oleh *Diatom* dan *Cyanophyta*.

5.3.2 Jenis-jenis Organisme Penyebab HABs

Fenomena *Harmful Algal Blooms* (HABs) disebabkan oleh berbagai kelompok mikroalga dan sianobakteri yang memiliki kemampuan untuk tumbuh cepat dan dalam banyak kasus, menghasilkan senyawa toksik. Secara taksonomis, organisme penyebab HABs berasal dari beberapa kelompok besar fitoplankton. Di antara kelompok HAB laut yang paling umum

adalah diatom dan dinoflagellata. Beberapa spesies dari kelompok ini menghasilkan toksin yang sangat berbahaya bagi manusia dan makhluk laut lainnya.

Kelompok mikroalga penyebab HABs:

1. Dinoflagellata (Kelas Dinophyceae)

Dinoflagellata merupakan kelompok protista berflagela yang memiliki kemampuan berenang aktif dan sebagian besar bersifat autotrof. Beberapa spesies seperti *Alexandrium tamarense*, *Gymnodinium catenatum*, dan *Karenia brevis* diketahui memproduksi toksin yang berbahaya bagi ikan dan manusia.

a. Genus dan Spesies Penting

- *Alexandrium* spp., menghasilkan *saxitoxin* dan derivatifnya, penyebab *Paralytic Shellfish Poisoning* (PSP). Contoh: *A. catenella*, *A. minutum*, *A. tamarense*
- *Dinophysis* spp., menghasilkan *okadaic acid* dan *pectenotoxin*, penyebab *Diarrhetic Shellfish Poisoning* (DSP). Contoh: *Dinophysis acuminata*, *D. fortii*.
- *Karenia* spp., menghasilkan *brevetoxin*, menyebabkan *Neurotoxic Shellfish Poisoning* (NSP) dan kematian ikan masif. Contoh: *Karenia brevis*, *K. mikimotoi*.
- *Gambierdiscus* spp., bersifat bentik (hidup di substrat terumbu karang) dan menghasilkan *ciguatoxin*, penyebab *Ciguatera Fish Poisoning* (CFP). Contoh: *Gambierdiscus toxicus*.
- *Cochlodinium polykrikoides*, menghasilkan senyawa hemolitik yang menyebabkan kematian ikan, meskipun tidak selalu toksik bagi manusia.
- *Noctiluca scintillans* (Dinoflagellata non-toksik), tidak menghasilkan toksin, tetapi menyebabkan *bloom* besar yang menurunkan oksigen terlarut dan menyebabkan kematian ikan secara tidak langsung.

b. Ciri dan Ekologi

Dinoflagellata umumnya berkembang pada perairan hangat, kaya nutrisi, dan kondisi kolom air stabil (stratifikasi tinggi). Dinoflagellata bersifat mixotrofik (dapat berfotosintesis dan memakan partikel organik kecil), sehingga mampu bertahan dalam kondisi nutrisi rendah. Beberapa spesies membentuk kista istirahat (*resting cysts*) di sedimen yang dapat bertahan bertahun-tahun dan menjadi sumber ledakan berikutnya.

2. Diatom (Kelas Bacillariophyceae)

Walaupun diatom tidak membahayakan manusia, kepadatan populasi yang tinggi dapat mengancam biota laut karena dapat merusak dan menyumbat organ pernapasan, seperti insang. Sebagian besar diatom tidak berbahaya, tetapi beberapa spesies dari genus *Pseudo-nitzschia* menghasilkan toksin yang berbahaya, termasuk asam domoat, yang menyebabkan keracunan shellfish amnesia (ASP). Diatom dapat berkembang pesat pada kondisi kaya silikat dan nutrisi.

a. Genus dan Spesies Penting

- *Pseudo-nitzschia* spp., menghasilkan *domoic acid*, penyebab *Amnesic Shellfish Poisoning* (ASP) pada manusia. Contoh: *Pseudo-nitzschia multiseries*, *P. australis*, *P. pungens*.
- *Chaetoceros* spp., *Skeletonema* spp., diatom yang dapat menyebabkan HABs karena merusak dan menyumbat sistem pernafasan (insang)

b. Ciri dan Ekologi

Pseudo-nitzschia spp umumnya mendominasi pada perairan dingin atau sedang, terutama setelah upwelling atau musim semi. Domoic acid adalah asam amino analog yang menargetkan

reseptor glutamat di otak manusia dan mamalia laut. Bloom *Pseudo-nitzschia* sering terkait dengan input silikat, nitrogen, dan fosfat yang tinggi. *Chaetoceros* spp., *Skeletonema* spp., sering ditemukan blooming pada perairan tropis.

3. *Cyanobacteria* (Sianobakteri atau Alga Hijau-Biru)

Kelompok ini umum di perairan tawar, waduk, dan kadang di estuaria. *Cyanobacteria* merupakan prokariota fotosintetik yang mampu memfiksasi nitrogen dan membentuk *surface scum* tebal.

a. Genus dan Spesies Penting

- *Microcystis* spp., menghasilkan *microcystin* (hepatotoksin) yang merusak hati. Contoh: *Microcystis aeruginosa*.
- *Anabaena* spp. (*Dolichospermum*), menghasilkan *anatoxin-a* (neurotoksin).
- *Cylindrospermopsis raciborskii*, menghasilkan *cylindrospermopsin* (hepatotoksin dan sitotoksin).
- *Planktothrix agardhii*, menghasilkan *microcystin* dan *anatoxin*.

b. Ciri dan Ekologi

Bloom umumnya muncul di waduk eutrofik dengan suhu hangat (>25°C). Mampu melakukan *nitrogen fixation*, sehingga dapat tumbuh walau nitrogen anorganik rendah. Bloom padat dapat menyebabkan hipoksia parah dan kematian ikan akibat dekomposisi.

4. Raphidophyceae

Raphidophyceae adalah kelompok flagelata non-dinoflagellata yang sering menyebabkan HABs non-toksik (tetapi berbahaya secara fisik bagi biota).

a. Genus Penting

Heterosigma akashiwo, *Chattonella marina*, *Fibrocapsa japonica*.

b. Mekanisme Dampak

Kelompok Raphidophyceae menghasilkan senyawa oksidatif reaktif (ROS) dan lendir yang merusak insang ikan. Kelompok fitoplankton ini menyebabkan kematian massal ikan pada perairan pesisir Jepang, Korea, dan juga pernah dilaporkan di Indonesia bagian timur.

5. Haptophyceae (Prymnesiophyceae)

Kelompok ini mencakup beberapa spesies beracun yang menghasilkan *hemolysin* atau *ichthyotoxin*.

a. Genus Penting

Prymnesium parvum, menghasilkan *prymnesin*, menyebabkan kematian ikan (terutama di danau dan estuaria). *Chrysochromulina leadbeateri*, pernah menyebabkan kematian ikan secara luas di Skandinavia.

b. Ekologi

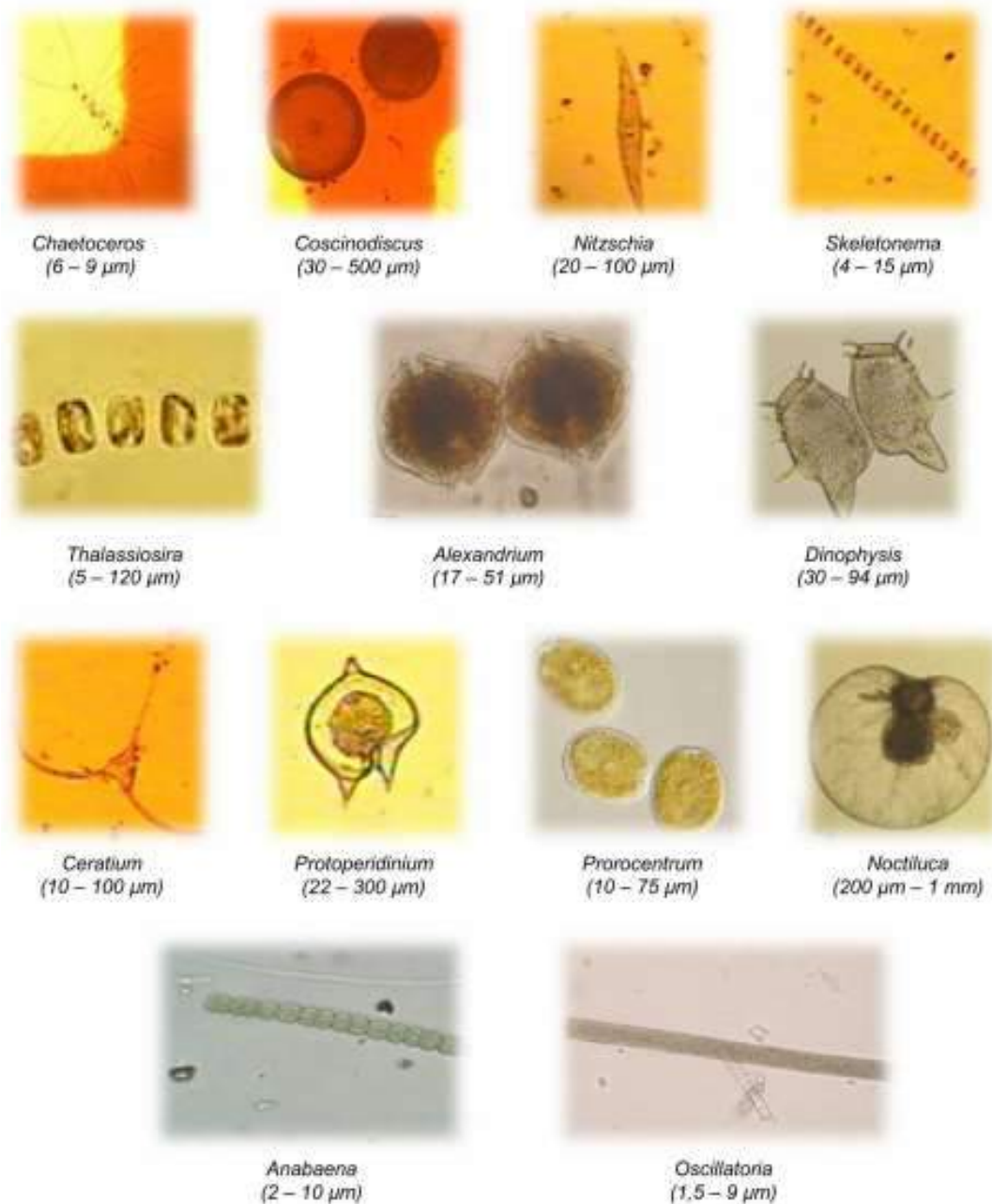
Umumnya muncul pada perairan payau dengan salinitas menengah (5–30 PSU). Bloom sering dipicu oleh fluktuasi ionik dan perubahan keseimbangan N:P.

Fitoplankton yang menyebabkan HAB di perairan Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 33.

Tabel 1. Jenis-jenis fitoplankton penyebab HABs di perairan Indonesia

No	Spesies	No	Spesies
1	<i>Gymnodinium pulchellum</i>	21	<i>Prorocentrum triestinum</i>
2	<i>Dinophysis caudate</i>	22	<i>Prorocentrum emarginatum</i>
3	<i>Ceratium fusus</i>	23	<i>Pyrodinium bahamense var compressum</i>
4	<i>Alexandrium tamiyavanichi</i>	24	<i>Ostreopsis ovata</i>
5	<i>Gonyaulax diegens</i>	25	<i>Prorocentrum microcephalus</i>
6	<i>Dinophysis acuta</i>	26	<i>Prorocentrum convacum</i>
7	<i>Noctiluca scintillans</i>	27	<i>Prorocentrum lima</i>
8	<i>Alexandrium cohorticula</i>	28	<i>Prorocentrum micans</i>
9	<i>Dinophysis acuminata</i>		Raphidophyta
10	<i>Alexandrium affine</i>	29	<i>Chatonella antique</i>
11	<i>Ostreopsis lenticularis</i>	30	<i>Chatonella subsalsa</i>
12	<i>Dinophysis rotundata</i>		Diatom
13	<i>Gonyaulax spinifera</i>	31	<i>Thalassiosira mala</i>
14	<i>Gonyaulax polygramma</i>	32	<i>Chaetoceros concavicornis</i>
15	<i>Ceratium tripos</i>	33	<i>Chaetoceros convolutus</i>
16	<i>Gymnodinium impudicum</i>	34	<i>Pseudonitzschia pungens</i>
17	<i>Gymnodinium catenatum</i>	35	<i>Chaetoceros socialis</i>
18	<i>Gonyaulax polyedra</i>		Cyanophyta
19	<i>Dinophysis miles</i>	36	<i>Trichodesmium erythraeum</i>
20	<i>Gambierdiscus toxicus</i>	37	<i>Trichodesmium thiebautii</i>

Sumber: Praseno dan Sugestiningih (2000).



Gambar 37. Beberapa Jenis Fitoplankton Penyebab HABs.

Sumber: (Aryawati *et al.* 2016)

Beberapa kejadian *blooming* fitoplankton di perairan Indonesia dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kejadian *blooming* fitoplankton di perairan Indonesia

Tahun Kejadian	Lokasi	<i>Blooming</i> fitoplankton dan biota target	Dampak
November 1983	Selat Lewotobi, Flores Timur	<i>Pyrodinium bahamense var compressum</i>	Keracunan 240 orang, meninggal 4 orang
Agustus 1985		Ikan Selar	

Juli 1987	Teluk Kao	<i>Pyrodinium bahamense</i> <i>var compressum</i>	Tidak ada yang korban, ikan langka
	Ujung Pandang	<i>Pyrodinium bahamense</i> <i>var compressum</i>	4 orang meninggal
Januari 1988		Kerang <i>Meritrix</i>	
	Nunukan, Pulau Sebatik selatan	<i>meritrix</i> <i>Pyrodinium bahamense</i>	Keracunan 65 orang, 2 meninggal
April s/d	Kaltim	<i>var compressum</i>	
November 1991	Pantai	Kerang-kerangan	Kematian massal pada udang
Januari 1995	Lampung Timur, Pulau	<i>Trichodesmium</i> <i>erythraeum</i>	windu, bandeng, dan organisme benthik
Juli 1995	Pari Kepulauan Seribu		Kematian massal ikan
Juli 1996	Pantai Binaria Ancol	<i>Noctiluca scintillans</i>	Keracunan 33 orang, 2 meninggal
Agustus 1996	Teluk Ambon	<i>Pyrodinium bahamense</i>	
Oktober 1997		<i>var compressum</i>	Ikan langka
Oktober s/d		Kerang-kerangan	Ikan langka
November 1999	Teluk Ambon	<i>Trichodesmium</i>	Ikan langka
September 1999	Teluk Ambon	<i>erythraeum</i>	Ikan langka
Mei 1999	Teluk Ambon	<i>Noctiluca scintillans</i>	
	Pulau Pari	<i>Alexandrium</i> sp	
Oktober 2000	Kepulauan	<i>Trichodesmium</i>	Ikan langka
November 2004	Seribu	<i>erythraeum</i>	
Juni 2005			Ikan langka
	Perairan Kaltim	<i>Trichodesmium</i>	Ikan langka
	Muara emberamo Irian Jaya	<i>erythraeum</i> <i>Trichodesmium</i>	Kematian massal ikan-ikan dan biota lainnya
	Sulawesi Utara	<i>erythraeum</i>	Kematian massal ikan-ikan dan biota lainnya
	Teluk Jakarta	<i>Trichodesmium</i>	
	Pantai Ancol, Marina	<i>erythraeum</i> <i>Skeletonema</i> dan <i>Noctiluca</i>	
		<i>Noctiluca scintillans</i>	

Sumber: Sidabutar (2006)

Tabel 2 menunjukkan bahwa antara bulan Juli dan Januari, blooming sering terjadi di perairan Indonesia. Jenis fitoplankton yang sering blooming telah ditemukan di perairan

Indonesia selama 12 tahun (1983-2005). Beberapa fitoplankton yang berpotensi mengalami blooming berasal dari Dinoflagellata, seperti *Noctiluca scintillans*, *Pyrodinium bahamense* var. *compressum* dan *Alexandrium* sp.; dari *Cyanophyta*, seperti *Trichodesmium erythraeum*; serta dari Diatom, misalnya *Skeletonema*. Ledakan populasi alga ini dapat menimbulkan kerusakan lingkungan, kerugian ekonomi, bahkan kematian organisme akuatik.

Ledakan populasi alga dalam suatu jaring makanan dapat mengacaukan keseimbangan interaksi antarorganisme, khususnya dalam proses pemangsaan. Ketika alga mati dan mengendap di dasar perairan, mikroorganisme pengurai seperti bakteri akan meningkat jumlahnya untuk memecah bahan organik tersebut. Aktivitas dekomposisi ini mengonsumsi oksigen terlarut dalam jumlah besar, terutama di lapisan perairan yang lebih dalam, sehingga menyebabkan kondisi kekurangan oksigen. Dampaknya, organisme seperti ikan dapat mengalami kematian atau tergantikan oleh spesies lain yang lebih toleran terhadap kondisi eutrofik dan rendah oksigen. Contohnya, pada pertengahan Oktober 2013, perairan Teluk Lampung mengalami ledakan alga *Cochlodinium polykrikoides* yang menewaskan banyak ikan budidaya di keramba jaring apung milik Balai Besar Pengembangan Budidaya Laut. Secara umum, peningkatan populasi fitoplankton dapat berlangsung melalui proses reproduksi seksual yang melibatkan berbagai jenis fitoplankton. Valiela (1984) mengatakan bahwa suksesi didefinisikan sebagai proses transisi dari berlangsung secara perlahan dari satu komunitas ke komunitas lain melalui tahapan yang berkesinambungan, dengan perubahan lingkungan dan perubahan komposisi dan keanekaragaman jenis.

Blooming fitoplankton adalah kejadian yang kerap dijumpai di wilayah perairan Kepulauan Seribu (Teluk Jakarta). Fitoplankton *Trichodesmium*, yang sejak lama dikenal sering mengalami blooming di kawasan tersebut, kembali menunjukkan peningkatan populasi pada 15 Oktober 2020. Kondisi ini erat kaitannya dengan dinamika musim serta meningkatnya konsentrasi nutrien di perairan, khususnya ortofosfat dan nitrat, yang berperan dalam mempercepat laju pertumbuhan fitoplankton (Mursalin *et al.* 2021). Sidabutar *et al.* (2021) menyampaikan bahwa HABs hampir terjadi di setiap tahun di Teluk Jakarta, Teluk Lampung dan Teluk Ambon. HABs terjadi di Teluk Jakarta sepanjang tahun, dan ledakan alga paling sering disebabkan oleh diatom seperti *Skeletonema*, *Chaetoceros* dan dari kelompok dinoflagellata beracun, termasuk *Alexandrium* sp., *Pyrodinium bahamense* var. *compressum*, *Gymnodinium* sp., dan *Cochlodinium* sp. Ledakan alga di Teluk Lampung sering didominasi oleh *Trichodesmium*, spesies yang menghasilkan HABs bersamaan dengan *Noctiluca scintillans*. *Pyrodinium bahamense* merupakan spesies beracun yang sering sebagai HABs di Teluk Ambon. Selain itu, genera diatom *Thalassiosira*, *Chaetoceros*, dan *Skeletonema* adalah jenis yang umum ditemukan dan menimbulkan HABs pada musim-musim tertentu.

Adanya fenomena HABs ini telah menjadikan beberapa peneliti secara intensif melakukan penelitian dengan mengidentifikasi jenis fitoplankton yang berpotensi HABs di berbagai wilayah Indonesia, antara lain penelitian dilakukan oleh Aryawati *et al.* (2016), Aryawati *et al.* (2023) dan Tururaja *et al.* (2025). Di pesisir Sumatera Selatan, ditemukan berbagai fitoplankton yang berpotensi memicu HABs, termasuk jenis-jenis seperti *Dinophysis*, *Gonyaulax*, *Noctiluca*, *Anabaena*, *Pseudonitzschia*, *Gymnodinium*, *Skeletonema*, *Ceratium*, dan *Pyrodinium* (Aryawati *et al.* 2005; Aryawati *et al.* 2016; Aryawati *et al.* 2017; Aryawati *et al.* 2018). Di Teluk Hurun, Lampung, penelitian menunjukkan bahwa blooming plankton diawali oleh *Skeletonema* pada bulan Agustus, kemudian dilanjutkan oleh *Pyrodinium* pada

Oktober, dan diakhiri oleh *Chaetoceros* pada November (Widiarti 2000). Hasil penelitian Widiarti (2000) memperlihatkan bahwa *Skeletonema* memiliki korelasi positif dengan fosfat di perairan, sedangkan *Pyrodinium* memiliki salinitas dan kandungan nitrat yang tinggi, dan *Chaetoceros* menyukai salinitas yang rendah karena berada dekat dengan wilayah mangrove. Tabel 3 menunjukkan jumlah kasus HAB di berbagai negara.

Tabel 3. Beberapa contoh kejadian blooming fitoplankton di berbagai negara

Tahun Kejadian	Lokasi	Penyebab blooming	Pustaka
Sering terjadi pada bulan November-Desember	Morobe Harbour, Papua New Guinea	<i>P. bahamense</i>	Maclean (1977)
Hampir setiap tahun terjadi	Laut Cina	Umumnya dari jenis <i>Gymnodinium</i> sp., <i>Noctiluca scintillans</i> , <i>Skeletonema costatum</i>	Yan <i>et al.</i> (2002)
Juli 2002 dan bertahan beberapa bulan	Pantai Lido Johor Bahru, Malaysia	<i>Prorocentrum minimum</i>	Rozirwan (2010)
Dimulai tahun 1981, sampai 1996	Perairan Korea	<i>Karenia mikimotoi</i> , <i>Cochlodinium polykrikoides</i>	Kim (2010)

Di pesisir Sydney, Australia, antara 1978 dan 1979, fitoplankton mengalami ledakan populasi. Awalnya, terjadi proliferasi diatom kecil yang membentuk koloni (*Thalassiosira*, *Leptocylindrus*, *Asterionella*, *Skeletonema*), kemudian diikuti oleh diatom besar (*Eucampia*, *Lauderia*, *Detonula*), dan akhirnya disusul oleh ledakan dinoflagellata (*Protoperidinium*, *Ceratium*) (Rissik *et al.* 2009).

5.3.3 Faktor-Faktor Penyebab HABs

Blooming alga disebabkan oleh berbagai faktor, seperti aktivitas manusia, kelebihan nutrisi, kegiatan pertanian dan budidaya perairan, penangkapan ikan berlebih, penggunaan air ballast, serta kemungkinan pengaruh perubahan iklim global (Anderson *et al.* 2002). Sellner, *et al.* (2003) mengatakan bahwa ledakan populasi organisme di perairan umumnya dipengaruhi oleh dua penyebab utama. Pertama, faktor alami seperti dinamika sirkulasi massa air dan masukan dari aliran sungai yang membawa berbagai unsur ke dalam sistem perairan. Kedua, faktor antropogenik, yakni aktivitas manusia yang menyebabkan masuknya zat pencemar sehingga meningkatkan kesuburan perairan secara berlebihan (eutrofikasi). Di sisi lain, sejumlah pakar juga mengemukakan bahwa kemunculan spesies penyebab HAB tidak terlepas dari kondisi meteorologis yang turut membentuk karakteristik lingkungan perairan, meliputi variasi salinitas, suhu, pergerakan arus, ketersediaan nutrisi, siklus musim, hingga bentuk geomorfologi suatu wilayah (Pednekar *et al.* 2012).

Hujan memainkan peran yang signifikan dalam penyebaran spatiotemporal spesies alga berbahaya (Maclean 1977; Pednekar *et al.* 2012). Lebih lanjut Pednekar *et al.* (2012) menyebutkan bahwa banyaknya spesies HAB terkait dengan lebih banyak nutrisi yang masuk ke perairan pesisir dari hulu sungai, dan bahwa kegiatan manusia menyebabkan peningkatan nutrisi di daerah tersebut. Panggabean (1994) menyatakan bahwa gelombang merah biasanya terjadi di perairan dengan penyuburan (eutrophic) yang sangat tinggi. Penyuburan mungkin berasal dari perubahan musim atau limbah daratan. Penyuburan terjadi pada musim panas di negara subtropis. Pengadukan terjadi ketika suhu air laut meningkat, menyebabkan nutrisi naik dari dasar perairan. Perubahan suhu tidak terlalu nyata di negara tropis. Musim hujan dapat menyebabkan penyuburan. Kim (2010) menggambarkan bahwa suhu air 24-26 °C dan salinitas 32-33 psu dapat menyebabkan fitoplankton tumbuh di perairan laut Korea.

Secara umum, terjadinya HABs bukan dipicu oleh satu unsur, melainkan merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor abiotik (fisika, kimia, dan iklim), biotik (interaksi antarorganisme), serta antropogenik (aktivitas manusia). Pemahaman terhadap faktor-faktor penyebab ini penting untuk merumuskan strategi pengelolaan dan mitigasi dampak HABs pada ekosistem laut dan masyarakat pesisir. Adapun faktor-faktor utama penyebab terjadinya HABs:

1. Faktor Fisik

Faktor-faktor fisik, termasuk suhu, kecerahan cahaya, dan stratifikasi kolom air, sangat memengaruhi laju pertumbuhan dan distribusi fitoplankton. Ketika suhu meningkat permukaan laut akibat perubahan iklim dapat mempercepat laju metabolisme dan fotosintesis alga, khususnya spesies dinoflagellata yang mampu tumbuh optimal pada kondisi hangat. Selain itu, stratifikasi yang kuat menyebabkan lapisan air menjadi stabil sehingga nutrisi terperangkap di lapisan permukaan, memberikan kondisi ideal bagi fitoplankton tertentu untuk berkembang secara berlebihan. Kim (2010) menyatakan bahwa fitoplankton *C. Polykrikoides* dapat berkembang di perairan laut Korea pada suhu 24–26 °C dan salinitas 32–33 psu. Ini menunjukkan bahwa *C. Polykrikoides* memiliki ketahanan yang tinggi terhadap kondisi suhu dan salinitas yang berbeda.

2. Faktor Kimia (Nutrien)

Faktor utama yang menyebabkan HAB adalah ketersediaan nutrisi, terutama nitrogen (N) dan fosfor (P). Input nutrisi yang berlebihan dari aktivitas manusia, seperti pertanian, limbah domestik, dan industri, dapat menyebabkan eutrofikasi perairan. Selain itu, rasio N:P yang tidak seimbang cenderung menguntungkan spesies alga tertentu yang mampu menyesuaikan diri dengan kondisi perairan kaya nutrisi. Selain itu, beberapa jenis dinoflagellata berbahaya dapat memanfaatkan bentuk nitrogen tereduksi (seperti amonia) yang sering ditemukan di wilayah pesisir dengan input limbah tinggi. Hasil penelitian Widiarti (2000) menekankan bahwa *Skeletonema* menunjukkan hubungan yang menguntungkan dengan kadar fosfat dalam perairan, sedangkan *Pyrodinium* cenderung ditemukan pada kondisi dengan salinitas dan nitrat yang tinggi. Penelitian Aryawati *et al.* (2017) dan Aryawati *et al.* (2018) juga menunjukkan bahwa konsentrasi nutrisi, terutama nitrat, fosfat, dan silikat yang tinggi, sangat memengaruhi jumlah fitoplankton, terutama *Skeletonema*.

3. Faktor Biologis

Interaksi biologis dalam komunitas plankton juga berperan dalam dinamika HABs. Kompetisi antarspesies, predasi oleh zooplankton, serta aktivitas bakteri dapat menentukan dominasi spesies fitoplankton tertentu. Beberapa spesies berbahaya memiliki strategi pertahanan seperti toksin atau bentuk kista dorman yang memungkinkan mereka bertahan dalam kondisi ekstrem dan tumbuh kembali ketika lingkungan mendukung.

4. Faktor Hidrodinamika

Sirkulasi air, arus, dan pola upwelling turut menentukan penyebaran dan intensitas HABs. Perairan yang relatif tenang dan tertutup, seperti teluk atau laguna, lebih rentan mengalami akumulasi biomassa alga. Sebaliknya, daerah dengan arus kuat atau turbulensi tinggi cenderung menekan perkembangan populasi alga berbahaya karena pencampuran air yang intens menghambat stratifikasi dan mengencerkan konsentrasi sel.

5. Faktor Antropogenik

Aktivitas manusia berkontribusi signifikan terhadap peningkatan frekuensi dan intensitas HABs. Peningkatan input nutrisi dari pertanian, urbanisasi pesisir, dan pembuangan limbah organik merupakan penyebab utama eutrofikasi. Selain itu, transportasi laut dan akuakultur intensif dapat mempercepat penyebaran spesies alga invasif melalui ballast water atau media budidaya, memperluas jangkauan geografis HABs.

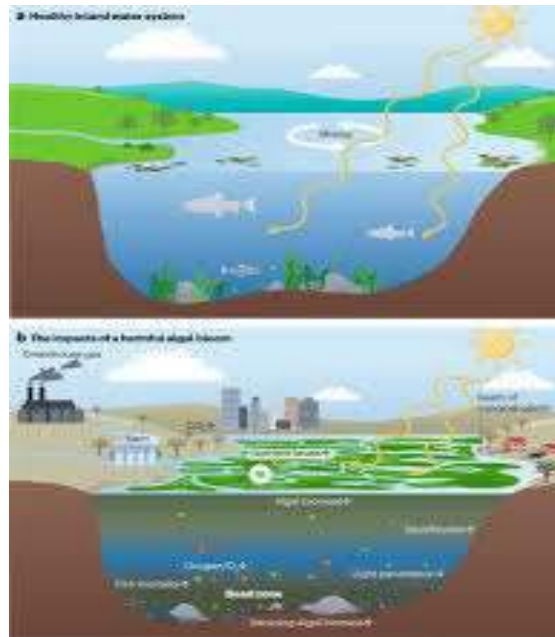
6. Faktor Iklim Global

Perubahan iklim global berperan besar dalam mengubah pola distribusi dan dinamika HABs. Kenaikan suhu laut serta perubahan pola curah hujan, dan peningkatan kejadian *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO) dapat mengubah kondisi oseanografi yang menguntungkan bagi proliferasi alga berbahaya. Selain itu, peningkatan kadar CO₂ atmosfer dapat mendukung pertumbuhan spesies fitoplankton yang mampu beradaptasi dengan kondisi asidifikasi laut. Terbentuknya HABs merupakan akibat dari interaksi yang kompleks antara faktor fisik, kimia, biologis, hidrodinamika, serta aktivitas manusia. Pemahaman menyeluruh terhadap faktor-faktor tersebut sangat penting untuk pengelolaan dan mitigasi dampak HABs di wilayah pesisir. Pendekatan multidisipliner yang melibatkan aspek oseanografi, biologi laut, serta kebijakan lingkungan diperlukan untuk mengantisipasi meningkatnya kejadian HABs di masa mendatang.

Bahkan tingkat trofik perairan dipengaruhi oleh fluktuasi plankton. Ketersediaan nutrisi adalah salah satu faktor lingkungan yang memengaruhi variasi populasi organisme ini (Harliani *et al.* 2025). Eutrofikasi dapat meningkatkan banyaknya fitoplankton di perairan, menurunkan kualitas air, dan blooming alga berbahaya, populasi fitoplankton yang meningkat, juga dapat mematikan ikan (Feng *et al.* 2024).

Lonjakan drastis dan tiba-tiba populasi fitoplankton atau alga mikroskopis di suatu perairan dikenal sebagai fenomena bloom atau Harmful Algal Blooms (HABs), yang dapat mengubah warna air serta menimbulkan dampak merugikan (Rachman A *et al.* 2021). HABs dapat terjadi pada berbagai tipe perairan, baik laut, payau, maupun tawar, dan berdampak signifikan terhadap keseimbangan ekosistem, sektor ekonomi, serta kesehatan manusia. Fenomena ini telah menjadi perhatian serius di tingkat global karena potensi risikonya yang

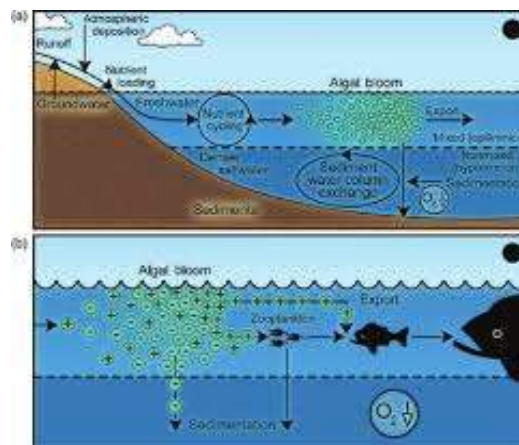
luas. Pemicu utamanya antara lain kondisi hidrodinamika yang memungkinkan proliferasi alga secara pesat, meningkatnya konsentrasi nutrisi seperti nitrogen dan fosfor, serta adanya fluktuasi suhu perairan yang mendukung pertumbuhannya (Gurning *et al.* 2020).



Gambar 38. Ringkasan dampak ledakan alga berbahaya terhadap perairan pedalaman.

Sumber: (Feng *et al.* 2024)

Kelompok dinoflagellata (*Alexandrium*, *Karenia*) adalah sumber beberapa jenis fitoplankton yang menyebabkan HABs ini, yang dapat berbahaya bagi hewan seperti ikan karena mengandung racun neurotoksin yang akan dilepaskan ke dalam air, diatom (*Pseudo-nitzschia*), dan cyanobakteri (Oh *et al.* 2023). HAB membentuk gelombang merah dan menghasilkan racun. Jumlah fitoplankton berpigmen yang meningkat menyebabkan badai merah, yang mengubah warna air laut sesuai dengan pigmennya. Fitoplankton menghasilkan metabolit sekunder toksik, yang dapat menumpuk pada makhluk hidup di air seperti kerang dan ikan, menyebabkan peristiwa pembuatan racun atau penghasil racun (Hanifah *et al.* 2023).



Gambar 39. Hubungan antara asupan nutrisi dari luar, daur ulang nutrisi di dalam, pertumbuhan alga akibat peningkatan kadar nutrisi dan kurangnya oksigen di kondisi stratifikasi salinitas
Sumber: (Yogaswara, 2020).

Fenomena pertumbuhan alga juga dipicu oleh aktivitas manusia. Peningkatan jumlah penduduk yang terus menerus mengakibatkan bertambahnya limbah yang dihasilkan. Limbah tersebut meliputi limbah domestik, industri, dan pertanian. Fenomena ini dapat dipicu oleh masuknya residu detergen dari kegiatan rumah tangga maupun limbah industri yang mengandung nutrisi tinggi, seperti fosfat, ke dalam perairan (McDowell *et al.* 2025). Kenaikan kadar fosfat di perairan akan memicu pertumbuhan fitoplankton secara pesat, yang pada akhirnya memberikan dampak besar terhadap berbagai organisme akuatik. Kejadian ini dikenal sebagai HABs (Arista, 2025). Proses budidaya tambak di Pulau Sumbawa meningkatkan jumlah nutrisi dalam perairan melalui pembuangan sisa pakan, yang memungkinkan perairan hutan mengalami tanaman algal berbahaya (HAB). Di samping itu, lokasi perairan yang berada dekat dengan kawasan permukiman serta menerima aliran sungai cenderung lebih rentan terhadap masuknya polutan dari aktivitas manusia, seperti limbah domestik, industri, peternakan, dan pertanian. Sebagai ilustrasi, kejadian HAB yang dipicu oleh kegiatan budidaya tambak pernah dilaporkan di Pantai Ringgung, Teluk Lampung, pada tahun 2016, yang menyebabkan kematian ikan dalam jumlah besar. Kasus tersebut memperlihatkan bahwa peningkatan masukan nutrisi yang berujung pada eutrofikasi dapat berdampak serius terhadap kerusakan ekosistem perairan (Supriatna *et al.* 2025).



Gambar 40. Mekarnya *Cyanobacterial* di pedalaman. (Patiño *et al.* 2023)

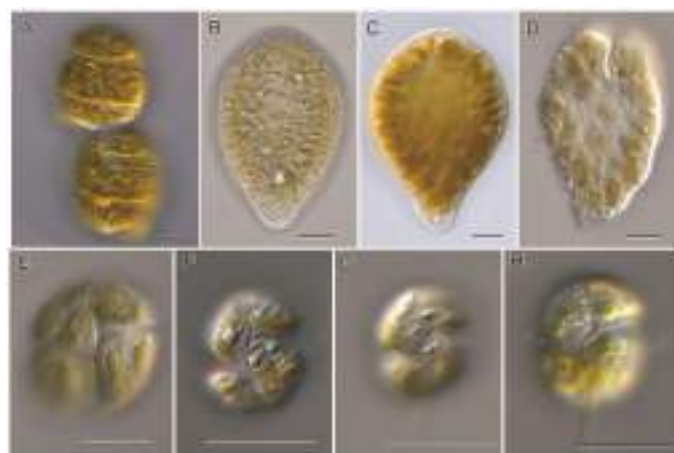
Kematian besar-besaran pada ikan, kerang, dan biota laut lainnya umumnya disebabkan oleh menurunnya kadar oksigen terlarut di perairan (hipoksia). Situasi ini terjadi ketika mikroorganisme pengurai memecah biomassa alga yang mati melalui proses aerobik, sehingga menggunakan oksigen dalam jumlah tinggi. Akibatnya, terbentuk kondisi kekurangan oksigen atau “zona mati” yang berdampak merusak keseimbangan ekosistem perairan (Yogaswara, 2020). HAB juga memiliki efek langsung pada kesehatan manusia. Ledakan fitoplankton akibat tingginya nutrisi dapat menghasilkan senyawa beracun yang menimbulkan efek merugikan (Hidayati, 2020). Beberapa jenis alga menghasilkan toksin atau zat berbahaya yang menumpuk dalam jaringan ikan dan kerang. Konsumsi zat-zat ini oleh manusia dapat menyebabkan

keracunan ikan kerang parah, diarrhetic, dan amnesic. (Yuan *et al.* 2024). Paparan senyawa berbahaya dapat terjadi tidak hanya melalui konsumsi makanan, tetapi juga melalui kontak langsung dengan air tercemar atau inhalasi partikel halus di udara. Saksitoksin adalah salah satu toksin yang paling berbahaya bagi manusia, anggota kelompok PSP (*Paralytic Shellfish Poisoning*), yang dapat menimbulkan sensasi kesemutan di sekitar mulut serta berpotensi menyebabkan gangguan serius pada sistem saraf. (Kusnopranto *et al.* 2014).



Gambar 41. Perubahan warna dan kematian massal ikan di sepanjang pantai Malaysia dalam beberapa tahun terakhir disebabkan oleh mekarnya *Noctiluca scintillans* (A), *Chattonella malayana* (B), *Karlodinium australe* (C), dan *Margalefidinium fulvescens* (D) (McGlone MLSD *et al.* 2024)

HABs memberikan dampak ekonomi yang besar, terutama pada sektor perikanan dan pariwisata pantai. Nelayan dan pelaku akuakultur menderita kerugian akibat kematian ikan dan larangan konsumsi produk laut dari daerah terdampak. Selain itu, penutupan wilayah wisata akibat blooming alga memperkecil pendapatan masyarakat dan mengganggu aktivitas industri pariwisata (McGlone MLSD *et al.* 2024). Seiring bertambahnya beban nutrisi yang bermula dari limbah kegiatan industri dan pertanian yang masuk ke badan perairan, kejadian HAB cenderung terjadi lebih sering. Kondisi ini menciptakan lingkungan yang semakin mendukung pertumbuhan alga (Feng *et al.* 2024).



5

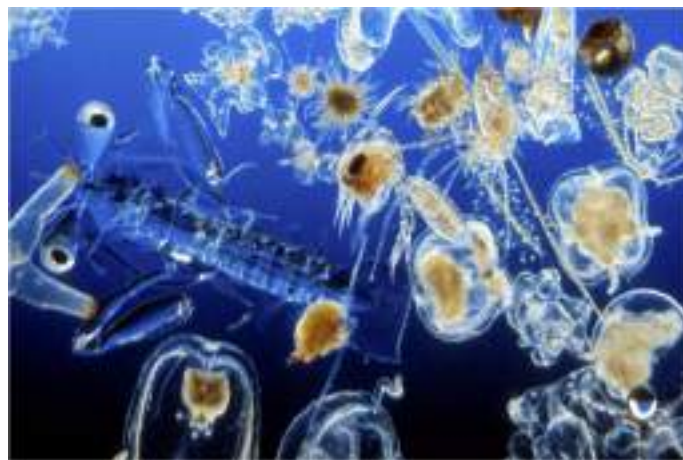
Gambar 42. Beberapa spesies mikroalga berbahaya yang sering membunuh ikan di Asia Tenggara. (A) *Margalefidinium polykrikoides* (B) *Chattonella marina* (C) *C subsalsa* (D) *C malayana* (E) *Karenia mikimotoi* (F) *Karlodinium australe* (G) *K veneficum* (H) *Takayama acrotrocha* (McGlone MLSD *et al.* 2024)

Menurut (Rozirwan, 2010), beberapa jenis plankton yang mengalami HAB dapat menghasilkan toksin yang berbahaya bagi manusia, termasuk keracunan parolitik, keracunan saraf, gangguan memori, diare, dan jenis keracunan lainnya. Untuk mengurangi dampak negatif HABs, sejumlah negara telah mengembangkan pendekatan pengelolaan terpadu yang melibatkan masyarakat luas, petani, nelayan, dan pemerintah. Walaupun sering menimbulkan dampak negatif, HABs pada dasarnya tetap merupakan bagian dari proses alami dalam ekosistem dan mencerminkan respons yang kuat terhadap perubahan kondisi lingkungan (Foulon *et al.* 2020).

BAB VI ZOOPLANKTON

6.1 Kelompok Utama

Zooplankton adalah jenis hewan yang sangat beragam yang hidup di air, terdiri dari berbagai hewan dengan bentuk tubuh dan fungsi fisiologis berbeda. Kelompok ini mencakup filum protozoa, ctenophoracnidaria, mollusca, echinodermata, arthropoda, hingga chordata, masing-masing dengan morfologi, strategi hidup, dan peran ekologis yang unik. Dalam ekosistem perairan, Zooplankton mengangkut energi dari produsen primer, terutama fitoplankton, ke organisme laut seperti ikan, ubur-ubur, dan lainnya. Peran setiap kelompok zooplankton ini turut memperkaya dinamika dan menjaga keseimbangan ekosistem laut (Sabran *et al.* 2022).



Gambar 43. Zooplankton.

Sumber : <https://fpk.unair.ac.id/>

Zooplankton sangat penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem akuatik. Mereka mengalirkan energi dari produsen primer, seperti fitoplankton, ke tingkat trofik yang lebih tinggi, seperti ubur-ubur dan larva ikan. Selain berperan dalam rantai makanan, zooplankton juga terlibat dalam siklus materi dan aliran energi di perairan, sekaligus menjadi sumber nutrisi penting bagi makhluk yang lebih besar. Variasi jumlah dan keberadaan mereka kerap dijadikan indikator kesuburan perairan karena kepekaannya terhadap perubahan yang terjadi pada kondisi lingkungan, termasuk suhu, salinitas, oksigen terlarut, dan ketersediaan nutrisi. Dengan demikian, perubahan populasi zooplankton tidak hanya mencerminkan tingkat stabilitas ekosistem, tetapi juga berfungsi sebagai penanda awal adanya perubahan lingkungan, baik yang disebabkan oleh alam maupun yang disebabkan oleh aktivitas manusia (Junaidi dan Azhar, 2018).

1. Protozoa

Organisme eukariotik bersel tunggal dengan inti dan organel yang dilapisi membran disebut dengan protozoa memiliki selnya memiliki struktur yang kompleks (Ruslan, 2023). Protozoa termasuk dalam bagian dari kingdom Protista juga diketahui sebagai kelompok organisme sederhana dengan tingkat keanekaragaman yang sangat tinggi, baik dari segi bentuk,

105
4
4
cara hidup, maupun strategi memperoleh nutrisi. Organisme-organisme ini biasanya sangat kecil sehingga hanya dapat diamati melalui mikroskop. Protozoa, baik di perairan maupun di tanah, memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan rantai makanan dalam suatu ekosistem. Mereka bertindak sebagai konsumen tingkat pertama yang memanfaatkan bakteri, alga mikroskopis, dan partikel organik sebagai makanan. Selain itu, mereka juga menjadi sumber nutrisi bagi organisme yang lebih besar, seperti zooplankton bersel banyak dan larva invertebrata.

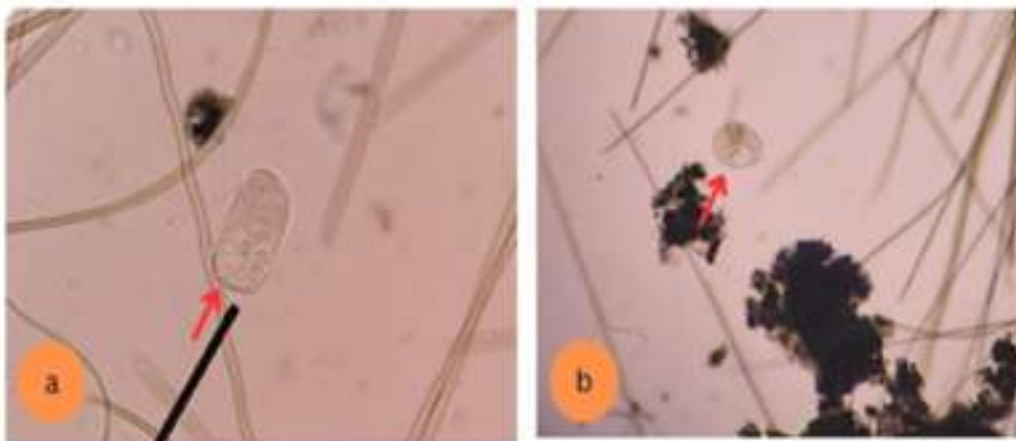
4
4
4
Protozoa menghuni berbagai jenis habitat, mulai dari perairan tawar dan laut hingga tanah. Beberapa di antaranya dapat bertahan dalam situasi ekstrim, misalnya suhu tinggi atau salinitas yang tinggi. Selain hidup secara bebas, terdapat juga protozoa parasitik yang berkembang biak di dalam tubuh inang, yang berpotensi mengganggu manusia, hewan, dan tumbuhan (Putri *et al.* 2024). Kelompok ini sangat penting untuk sistem ekologi, serta untuk penelitian biologi, kesehatan, dan lingkungan karena berbagai bentuk dan fungsi protozoa. Melalui keterlibatannya dalam proses penguraian materi organik serta perannya sebagai sumber pakan bagi organisme berukuran kecil, protozoa memberikan kontribusi signifikan dalam mempertahankan keseimbangan ekosistem. Protozoa adalah kelompok mikroorganisme yang memainkan peran dalam berbagai proses ekologis di beragam habitat, didukung oleh kemampuan adaptasi yang tinggi serta strategi reproduksi yang dapat berlangsung secara aseksual maupun seksual. Tipe protozoa yang umumnya melewati fase planktonik pada tahap awal kehidupannya meliputi Flagellata, Rhizopoda, Ciliatada, dan Sporozoa (Hertika *et al.* 2021).

4
4
4
Kelompok protozoa (Rhizopoda) yang melakukan pergerakan sekaligus memperoleh makanan dengan memanfaatkan pseudopodia, yaitu juluran sitoplasma yang dapat berubah-ubah. Organisme ini tidak memiliki dinding sel yang kaku, sehingga tubuhnya bersifat lentur dan mampu menyesuaikan bentuk saat menangkap serta menelan partikel makanan. Mereka memakan bakteri dan detritus kecil, berperan penting dalam siklus nutrien dan penguraian bahan organik. Rhizopoda umum dijumpai pada sedimen perairan dangkal, baik di laut maupun air tawar. Beberapa spesiesnya sensitif terhadap perubahan pH dan konsentrasi logam berat, sehingga kelompok ini kerap dimanfaatkan sebagai indikator kualitas air (Dolan, 2020). Protozoa dari kelompok Ciliata atau Ciliophora bergerak dengan bantuan silia, yaitu rambut getar yang menutupi bagian tubuh atau seluruhnya. Struktur silia pada organisme ini berperan dalam menangkap partikel makanan sekaligus mengarahkannya menuju sitosom atau “mulut sel”. Kelompok ini termasuk mikrozooplankton yang hidup di perairan laut maupun tawar. Anggota Ciliata tertentu, seperti Strombidium, Tintinnopsis, dan Favella biasanya banyak dijumpai di daerah eufotik dan memegang peran yang signifikan dalam jejaring makanan mikroba. Selain memakan fitoplankton dan bakteri berukuran kecil, mereka juga menjadi sumber pakan bagi zooplankton yang lebih besar, seperti copepoda (Pratomo, 2017).

13
Mastigophora atau Flagellata adalah kelompok protozoa yang bergerak menggunakan satu atau lebih flagel. Kelompok ini memiliki keragaman yang luas, mencakup organisme autotrof seperti Euglena hingga bentuk heterotrof seperti Bodo dan Cryptomonas. Sebagian besar flagellata bersifat mixotrof, artinya mereka dapat melakukan fotosintesis sekaligus memanfaatkan partikel organik sebagai sumber nutrisi. Biasanya tersedia di lapisan permukaan perairan (epipelagik), organisme ini memainkan peran penting dalam transfer energi dan daur ulang nutrien pada tingkat mikro. Selain itu, flagellata juga menghasilkan energi bagi

organisme lain seperti Ciliata dan copepoda juvenil, sehingga turut mendukung produktivitas primer dalam sistem mikroba perairan (Paulangan dan Wally, 2023). Sporozoa adalah protozoa non-motil yang parasit pada organisme lain, baik vertebrata maupun invertebrata. Sporozoa, misalnya *Gregarina sp.*, merupakan kelompok protozoa yang umumnya hidup sebagai parasit pada invertebrata laut, seperti krustasea planktonik. Struktur alat gerak seperti silia maupun flagella organisme ini tidak memilikinya dan bereproduksi melalui pembentukan spora. Walaupun tidak terlibat secara langsung dalam aliran rantai makanan planktonik, keberadaan Sporozoa tetap penting dalam ekosistem laut karena berperan dalam mengatur populasi organisme inang serta turut memengaruhi dinamika aliran energi. Beberapa spesies dari kelompok Apicomplexa juga berperan dalam biomineralisasi dan membentuk interaksi yang rumit dengan organisme inang, terutama di ekosistem laut dalam (Kirkman dan Deitsch, 2020).

Dalam lingkungan perairan, protozoa berkontribusi besar pada menjaga keseimbangan ekologi. Aliran energi dalam jaring makanan terbantu oleh peran mereka sebagai penghubung antara zooplankton yang lebih besar dan mikroorganisme autotrof. Persebaran protozoa juga dipengaruhi oleh komponen lingkungan seperti salinitas, suhu, pH, kadar oksigen terlarut, dan jumlah mikroba dan bahan organik yang tersedia. Populasi mereka biasanya tinggi di perairan yang kaya nutrisi, karena keadaan ini mendorong pertumbuhan fitoplankton, yang merupakan makanan utama protozoa (Meshjel, 2024).



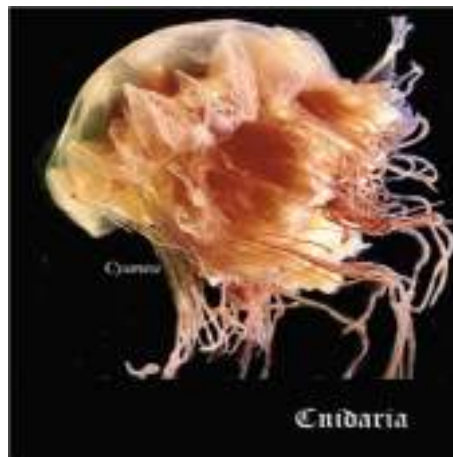
Gambar 44. (A) *Paramecium sp.* dan (B) *Entamoeba sp.*
Sumber : (Hevila *et al.* 2023)

2. Cnidaria

Cnidaria hidup dalam bentuk plankton sebagian besar berasal dari kelas Hydrozoa dan Scyphozoa, kelompok yang umum diketahui di perairan laut karena karakteristik tubuhnya yang khas serta peran ekologisnya. Baik dalam koloni maupun individu, organisme ini biasanya melayang di kolom air, dengan pergerakan yang sebagian besar dipengaruhi oleh arus. Meski demikian, beberapa spesies, seperti ubur-ubur, mampu mempertahankan posisinya di perairan terbuka dengan menggerakkan tubuhnya secara aktif. Dari sisi morfologi, tubuh Cnidaria planktonik tergolong sederhana, tersusun atas dua lapisan utama ektoderm di bagian luar dan gastroderm di bagian dalam yang dipisahkan oleh mesoglea. Lapisan mesoglea ini bersifat seperti gel transparan dan tidak tersusun atas sel, berfungsi sebagai penopang struktur

tubuh sekaligus membantu memberikan daya apung, sehingga organisme dapat tetap berada dan bergerak di dalam kolom perairan.

Di samping itu, lapisan dalam (endoderm) berperan dalam proses pencernaan makanan, sementara lapisan luar (ektoderm) pada Cnidaria planktonik dilengkapi dengan sel penyengat yang disebut nematosista, yang dimanfaatkan untuk melindungi diri sekaligus menangkap mangsa. Meskipun memiliki tubuh sederhana dan sistem saraf primitif, organisme ini sangat penting bagi ekosistem laut karena efektif dalam beradaptasi dengan lingkungan perairan. Organisme ini berfungsi sebagai pemangsa zooplankton berukuran kecil, sekaligus menjadi bagian dari sumber pakan bagi biota laut yang memiliki ukuran lebih besar (Turk *et al.* 2021). Dalam perjalanan hidupnya, Cnidaria memiliki dua bentuk morfologi utama: polip dan medusa. Polip biasanya menetap dan menempel pada substrat seperti batu, terumbu karang, atau dasar perairan, dengan tubuh berbentuk silindris dan mulut yang menghadap ke atas. Medusa, di sisi lain, bersifat planktonik dan bergerak bebas di perairan, dengan tubuh berbentuk payung atau lonceng yang memungkinkannya berenang di kolom air. Beberapa Cnidaria hanya menunjukkan satu morfologi seluruh hidupnya, tetapi banyak sekali yang mendapati perubahan bentuk atau metagenesis selama siklus hidup. Pergantian bentuk ini memungkinkan fase polip aseksual bergantian dengan fase seksual pada bentuk lain, mendukung reproduksi sekaligus penyebaran ke berbagai habitat laut. Misalnya, polip kecil pada Scyphozoa yang hampir tak terlihat dapat tumbuh menjadi medusa dewasa yang besar dan transparan. Baik polip maupun medusa memiliki lubang gastrovaskular, ruang bagian dalam yang berfungsi untuk pencernaan sekaligus distribusi nutrisi ke seluruh tubuh. Meskipun tubuhnya sederhana, adaptabilitas Cnidaria tinggi, memungkinkan organisme ini bertahan dan berkembang dari air pantai hingga laut dalam tanpa sistem peredaran darah kompleks seperti pada hewan lainnya (Saputra *et al.* 2022).



Gambar 45. Ubur-ubur Surai Singa (*Cyanea capillata*).

Sumber: (Moroz *et al.* 2024).

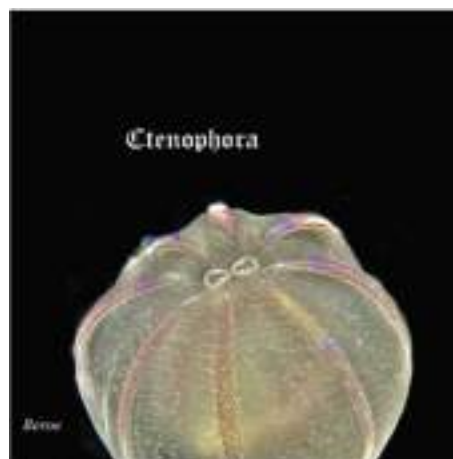
3. Ctenophora

Kebanyakan Ctenophora memiliki warna atau tubuh transparan, yang membantu mereka bersembunyi dari predator di perairan terbuka. Struktur tubuhnya yang bersifat gelatin membuat Ctenophora menjadi salah satu komponen utama dalam komunitas planktonik. Beberapa genus yang kerap dijumpai seperti *Pleurobrachia*, *Beroe*, dan *Velamen* menunjukkan

perbedaan bentuk tubuh serta fungsi ekologis yang berbeda-beda dalam ekosistem perairan. Keanekaragaman genus ini serta fungsinya dalam rantai makanan laut telah ditunjukkan melalui penelitian taksonomi terbaru, terutama terkait predasinya terhadap zooplankton dan larva ikan (Moroz *et al.* 2024). Karena itu, Ctenophora memiliki nilai penting tidak hanya dari sudut pandang evolusi dan keunikan morfologi, meskipun juga berperan krusial dalam menjaga keseimbangan ekosistem dengan mengatur dinamika komunitas plankton di perairan laut.

Studi terbaru menunjukkan Ctenophora, yang awalnya dianggap kelompok minor dalam komunitas zooplankton di perairan pesisir, sesungguhnya memiliki tanggung jawab ekologis yang lebih besar, terutama di wilayah laut terbuka (pelagis). Organisme gelatinous ini, yang disebut dengan comb jellies, bertindak sebagai predator aktif dan memangsa berbagai jenis plankton yang sangat kecil, termasuk copepoda, telur ikan, larva ikan, serta jenis zooplankton lainnya. Tekanan predasi yang dihasilkannya berpengaruh terhadap siklus materi organik dan distribusi energi secara vertikal di ekosistem laut, baik di wilayah laut dalam maupun perairan terbuka. Temuan ini didukung oleh berbagai pengamatan langsung di lapangan (*in situ*) serta analisis menggunakan isotop stabil yang mengungkap peran pentingnya dalam dinamika ekosistem laut.

Ctenophora memiliki peran penting tidak hanya dalam mengatur komposisi komunitas plankton, tetapi juga dalam menghasilkan karbon organik dari biomassa plankton yang lebih mudah dimanfaatkan oleh organisme pada tingkat trofik yang meningkat, seperti ubur-ubur besar, ikan pelagik, dan nekton lainnya. Selain itu, sisa pencernaan dan produk metabolisme mereka yang tenggelam ke dasar perairan turut berkontribusi pada proses pemanfaatan karbon biologis di laut dalam. Melalui mekanisme ini, Ctenophora mengatur aliran energi dan siklus nutrisi di antara lapisan kolom air dan memengaruhi kehidupan populasi plankton di lapisan permukaan. Dengan demikian, organisme ini menjadi komponen kunci dalam mempertahankan kestabilan dan fungsi ekosistem laut pada umumnya (Irvine *et al.* 2025).



Gambar 46. Ubur-ubur sisir abyssal (*Beroe abyssicola*)

Sumber: (Moroz *et al.* 2024)

4. Arthropoda

Arthropoda adalah kelompok zooplankton yang paling umum dan dapat ditemukan di berbagai jenis perairan, mulai dari laut hingga ekosistem tawar dan payau. Kelimpahan mereka menjadikan Arthropoda sebagai pemain kunci dalam struktur komunitas plankton, sekaligus sebagai penghubung energi produsen utama, seperti fitoplankton, menuju organisme tingkat trofik yang meningkat, termasuk ikan, ubur-ubur, dan biota pelagik lain. Salah satu ciri menonjol kelompok ini adalah eksoskeleton yang kuat, biasanya tersusun dari kitin dan pada beberapa spesies diperkuat kalsium karbonat, yang melindungi tubuh dari tekanan lingkungan serta predator. Lapisan keras ini juga berperan sebagai titik perlekatan otot, memastikan Arthropoda bergerak dengan kecepatan tinggi dan lincah di kolom perairan. Karena kerangka luar mereka tidak tumbuh seiring tubuh bertambah besar, pergantian kulit atau ecdisis menjadi proses penting agar organisme ini dapat terus berkembang. Dengan mekanisme ini, Arthropoda mampu mempertahankan pertumbuhan dan fungsi tubuh sepanjang siklus hidupnya.

Arthropoda, terutama Crustacea Seperti Euphausiacea, Copepoda, dan Cladocera, bertanggung jawab untuk menjaga keseimbangan fisiologi dan morfologi ekosistem perairan.. Selain itu, mereka menjalankan fungsi penting sebagai salah satu komponen utama dalam komunitas zooplankton, berkontribusi pada stabilitas dan aliran energi di ekosistem akuatik (Bramasta *et al.* 2020). Kepala, dada, dan perut adalah tiga bagian utama tubuh arthropoda. Namun, bagian-bagian ini dapat bergabung di beberapa kelompok, seperti laba-laba. Arthropoda memiliki sistem saraf yang tersusun atas rantai ganglion di bagian ventral, dengan struktur kepala yang dilengkapi otak sederhana. Sistem peredaran darahnya bersifat terbuka, sementara sistem pencernaannya telah berkembang lengkap, mencakup mulut hingga anus. Selain itu, alat indra pada kelompok ini berkembang dengan baik, ditunjukkan oleh keberadaan antena dan mata majemuk yang peka terhadap berbagai rangsangan, baik mekanis maupun kimia (Roberts dan Suttle, 2023).



Gambar 47. Larva arthropoda.
Sumber: <https://shorturl.at/4lcNh>

5. *Mollusca*

Hewan yang memiliki tubuh lunak dan biasanya dilindungi oleh cangkang disebut *Mollusca* (Sonak, 2017). *Mollusca* merupakan hewan triploblastik selomata yang memiliki beragam bentuk dan ukuran, mulai dari cumi-cumi yang memanjang seperti torpedo hingga siput kecil berbentuk telur berukuran beberapa milimeter. *Mollusca* menggunakan berbagai sumber makanan lingkungannya untuk mendapatkan energi dan nutrisi. Kelompok ini dapat dijumpai di beragam habitat, mulai dari perairan tawar, laut, hingga daratan. Jenis makanannya sangat beragam. Ada herbivora yang memakan alga mikro dan makro, karnivora yang memangsa hewan kecil seperti udang, ikan, dan invertebrata lainnya, dan detritivora yang memakan bahan organik atau sisa organisme mati di dasar perairan. Banyak strategi makan yang digunakan *Mollusca* menunjukkan kemampuan mereka untuk menyesuaikan diri dengan berbagai lingkungan.

Dikenal bahwa *mollusca* memiliki komunitas mikroba simbiotik dalam saluran pencernaannya, yang membantu dalam pemecahan protein dan polisakarida. Keberadaan mikroorganisme ini juga mendukung metabolisme energi, sehingga memungkinkan *mollusca* memperoleh nutrisi dari bahan makanan yang sulit dicerna. Interaksi simbiotik antara *mollusca* dan mikroba turut berkontribusi dalam siklus unsur hara di ekosistem perairan. Kemampuan beradaptasi terhadap berbagai kondisi habitat serta pemanfaatan beragam sumber makanan mencerminkan fleksibilitas fisiologis dan ekologis kelompok ini. *Mollusca* melakukan banyak hal untuk ekosistem, baik sebagai bagian dari rantai makanan maupun mengatur keseimbangan proses biogeokimia di lingkungan perairan (Makwarela dan Seoraj-pillai, 2025).



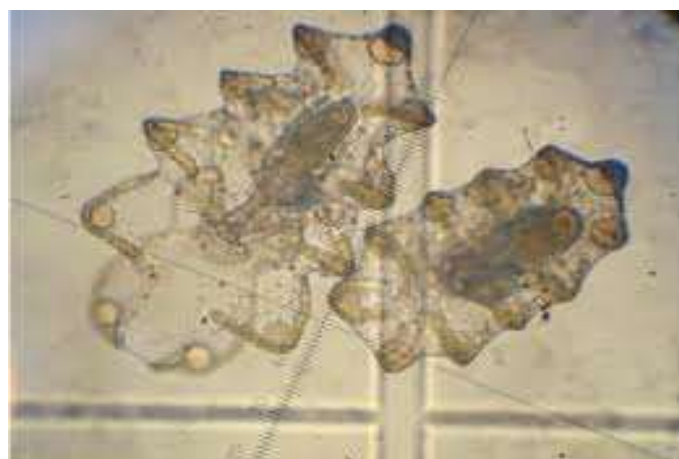
Gambar 48. Jenis *Mollusca*.

Sumber: <https://www.marinebiophotography.com/Plankton>

6. Echinodermata

Anatomi dan fisiologi Echinodermata membedakan mereka dari invertebrata lainnya. Nama filum ini berasal dari kata Yunani echinos, yang berarti "duri" dan derma, yang berarti "kulit". Secara harfiah, nama ini berarti "hewan berkulit duri". Echinodermata dilengkapi dengan endoskeleton, yaitu kerangka internal yang tersusun dari kalsium karbonat dalam bentuk lempeng-lempeng kecil atau ossicles di bawah lapisan kulit. Struktur ini memberikan tubuhnya kekakuan sekaligus permukaan yang berduri (Gillespie dan Blow, 2022). Perbedaan pola simetri antara tahap larva yang bersifat bilateral dan individu dewasa yang memiliki simetri radial menunjukkan adanya adaptasi evolusioner yang mendukung transisi dari fase planktonik ke fase benthik. Hal ini adalah ciri morfologis khas Echinodermata. Tubuh mereka, ketika mereka dewasa, memiliki pola pentaradial, atau lima lengan, yang memungkinkan tugas-tugas tubuh didistribusikan dari bagian tengah tubuh ke bagian ujung lengan. Fokus penelitian saat ini adalah karakteristik yang membedakan Echinodermata dari jenis hewan lainnya

Echinodermata memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan dan stabilitas ekosistem laut. Struktur sedimen, sirkulasi nutrisi, dan produktivitas dasar perairan dipengaruhi oleh aktivitas biologisnya. Semua ini berkontribusi pada dinamika komunitas benthik. Salah satu contoh yang jelas terdapat pada kelas Holothuroidea atau bioturbator teripang. Selama proses makan dan ekskresi, teripang aktif mengaduk, mencampur, dan memperkaya sedimen dengan bahan organik. Selain meningkatkan ketersediaan nutrisi, proses ini mempercepat dekomposisi dan memperbaiki sirkulasi oksigen dalam sedimen. Akibatnya, kondisi dasar laut menjadi lebih subur, yang memungkinkan pertumbuhan infauna, mikroorganisme, dan alga benthik. Tidak hanya Holothuroidea, tetapi juga spesies lain seperti Asteroidea dan Echinoidea memengaruhi ekosistem. Dengan fungsi ekologisnya yang beragam, echinodermata memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan struktur komunitas benthik dan kesehatan ekosistem laut karena bulu babi membantu mengendalikan pertumbuhan alga di terumbu karang, dan bintang laut mengontrol populasi invertebrata benthik (Li dan Teng, 2023).



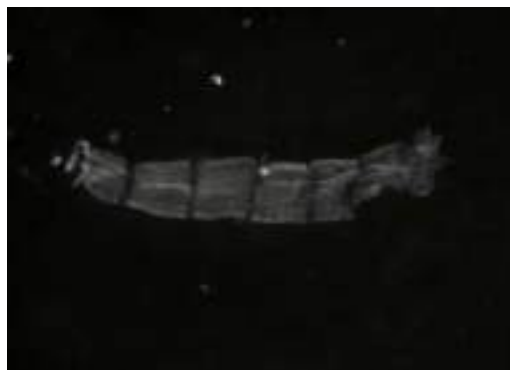
Gambar 49. Larva Echinodermata.

Sumber: Dokumentasi pribadi

7. Chordata

Chordata mencakup organisme dengan tingkat kompleksitas dan bentuk yang sangat beragam, menjadikannya salah satu subdivisi utama dalam subdivisi Animalia. Kelompok ini mencakup organisme yang lebih kompleks seperti vertebrata, serta bentuk sederhana seperti lancelet (Cephalochordata) dan tunikat (Urochordata). Anggota kelompok ini termasuk ikan, amfibi, reptil, burung, dan mamalia. Keberadaan notokorda (cikal bakal tulang belakang), tabung saraf dorsal berongga, celah faringeal, dan ekor post-anal pada salah satu tahap siklus hidup adalah ciri khas Chordata dibandingkan dengan filum lain. Tubuh Chordata triploblastik secara perkembangan dengan tiga lapisan embrional (ektoderm, mesoderm, dan endoderm) yang berkembang menjadi berbagai organ dan sistem yang kompleks. Selain itu, organisme ini memiliki simetri bilateral dan dilengkapi dengan coelom, yaitu rongga tubuh yang dilapisi mesoderm yang memungkinkan pertumbuhan dan aktivitas organ internal.

Sebagian besar anggota Chordata memiliki sistem pencernaan yang lengkap, dimulai dari mulut hingga anus, sehingga proses penyerapan nutrisi dapat berlangsung secara optimal. Mereka juga memiliki sistem peredaran darah tertutup, yang memungkinkan lebih banyak oksigen dan zat makanan didistribusikan ke seluruh tubuh. Chordata tersebar luas di berbagai ekosistem, baik perairan maupun daratan, karena tingkat adaptasi yang tinggi, didukung oleh kompleksitas struktur tubuh, kemampuan fisiologis, dan keragaman bentuk dan habitatnya (Damar, 2022). Chordata terbagi menjadi tiga kelompok utama dalam klasifikasi modern: Cephalochordata, Urochordata, dan Vertebrata. Selama tahap larva, seluruh karakteristik chordata tetap ada pada cephalochordata, tetapi ketika mereka dewasa, sebagian besar struktur tersebut tidak lagi tampak. Vertebrata adalah spesies yang paling berkembang dan sangat beragam. Ini ditunjukkan oleh sistem saraf yang lebih kompleks dan rangka yang lebih kompleks (Leksono dan Hakim, 2021).



Gambar 50. Jenis Chordata.

Sumber:

6.2 Peran dalam Rantai Makanan Laut

Zooplankton berfungsi sebagai penghubung energi dalam ekosistem perairan karena mereka heterotrof. Mereka sangat bergantung pada fitoplankton sebagai sumber nutrisi dan energi, dan mereka juga mengambil energi dari produsen primer seperti fitoplankton dan menyalurkannya ke konsumen tingkat lebih tinggi (Hertika *et al.* 2021). Dengan demikian, zooplankton memegang peran kunci sebagai penghubung aliran energi di ekosistem laut. Kehadirannya tidak hanya memengaruhi kelimpahan dan distribusi organisme laut lainnya,

seperti ikan kecil dan larva, tetapi juga berkontribusi pada siklus biogeokimia. Melalui aktivitas makan, ekskresi, dan dekomposisi, zooplankton membantu mendaur ulang nutrisi, sehingga mendukung produktivitas dan keseimbangan ekosistem perairan (Masithah, 2022).

Migrasi vertikal harian zooplankton berperan penting dalam memindahkan karbon dari lapisan permukaan menuju perairan yang lebih dalam. Pergerakan yang naik ke permukaan pada malam hari dan kembali turun ke kedalaman pada siang hari adalah tanda pola ini. Selain memainkan peran penting dalam rantai makanan, zooplankton juga memainkan peran penting dalam siklus karbon global dan menjaga keseimbangan ekosistem laut. Proses ini dikenal sebagai pompa biologis, dan berkontribusi pada pengurangan konsentrasi karbon dioksida di atmosfer, yang berdampak pada pengaturan iklim secara keseluruhan.

6.3 Signifikansi dalam Produktivitas Perikanan

Pada tahap awal pertumbuhan, larva ikan sangat rentan terhadap kematian, sehingga pemilihan jenis pakan menjadi krusial. Pada kondisi saat ini, kegiatan budidaya ikan umumnya masih mengandalkan pakan buatan yang memiliki biaya relatif tinggi. Oleh sebab itu, pemanfaatan pakan alami seperti plankton menjadi alternatif yang potensial karena lebih ekonomis dan berkelanjutan. Penggunaan pakan alami menawarkan berbagai keunggulan, di antaranya kandungan nutrisi yang relatif lengkap, kemudahan dalam proses budidaya, ukuran yang sesuai untuk larva, serta pergerakan alaminya yang mampu merangsang nafsu makan. Selain itu, kemampuan plankton untuk berkembang biak dengan cepat menjadikan ketersediaannya lebih terjaga dan stabil dalam jangka panjang.

Keberhasilan pembenihan ikan sangat dipengaruhi oleh penggunaan pakan alami, terutama karena kesesuaian ukuran pakan dengan bukaan mulut larva menentukan kemampuan larva dalam menangkap dan menelan makanan. Pakan yang terlalu besar sulit ditelan, sementara pakan yang terlalu kecil mengurangi efisiensi pemberian. Berbagai studi menunjukkan bahwa copepoda lebih sesuai dibandingkan rotifer atau *Artemia* untuk tahap awal larva, karena ukurannya lebih kecil dan gerakannya memberikan rangsangan makan yang optimal (Zeng *et al.* 2018). Tiap jenis copepoda yang dikenal dan banyak digunakan sebagai pakan alami adalah *Cyclops sp.*, *Apocyclops sp.*, *Pseudodiaptomus sp.*, *Micrositella sp.*, *Leophonte sp.*, *Oithona sp.*, *Borneoensis sp.*, *Acartia sp.*, *Microcyclops sp.*, dan *Tigriopus sp.*, meskipun bentuk dan fisiologi masing-masing spesies unik. Sifat-sifat ini memudahkan larva ikan yang tidak dapat berenang dan mengambil hewan untuk dimakan.

Karena ukuran dan teksturnya yang sesuai dengan kebutuhan nutrisi untuk menunjang pertumbuhan yang optimal, copepoda banyak digunakan sebagai pakan alami ikan mulai dari fase larva hingga juvenil atau awal dewasa. Terbukti bahwa penggunaan copepoda mampu meningkatkan tingkat kelangsungan hidup, efisiensi pemanfaatan pakan buatan, serta kualitas morfologi dan warna ikan. Dalam praktik budidaya modern yang menekankan efisiensi nutrisi dan keberlanjutan ekosistem perairan, copepoda. Oleh karena itu, organisme ini banyak dijadikan sebagai pakan utama dalam sistem budidaya ikan (Ismi *et al.* 2021). Kelangsungan hidup dan pertumbuhan optimal ikan budidaya sangat dipengaruhi oleh ketersediaan pakan alami.

BAB VII

METODE STUDI PLANKTON

7.1 Teknik Pengambilan Sampel

1. Plankton Net

Net kerucut plankton digunakan untuk mengumpulkan sampel plankton. Net ini memiliki mulut terbuka yang diperkuat oleh cincin logam agar tetap stabil di air dan ujung bawahnya berbentuk ujung cod atau botol kecil untuk menampung plankton. Untuk membuatnya mudah untuk diturunkan dan ditarik kembali, jaring diikat dari kapal dengan tali atau crane berkabel. Pengambilan sampel umumnya dilakukan melalui dua metode utama, yaitu vertikal haul dan horizontal haul (*towing*). Dalam metode haul vertikal, jaring ditarik secara vertikal ke permukaan dengan bantuan kapal yang bergerak pada kecepatan sekitar 1–2 knot. Dalam metode haul horizontal, jaring ditarik secara mendatar ke permukaan atau pada kedalaman tertentu. Dalam metode ini, jaring ditarik hingga kedalaman tertentu, misalnya 50 hingga 100 meter.

Selama jaring ditarik, air masuk melalui bagian mulut jaring, sementara plankton akan tertahan di bagian ujung (*cod end*) dan air keluar melalui pori-pori jaring. Setelah proses penarikan selesai, plankton dikumpulkan dengan membuka bagian ujung jaring atau dengan membilasnya menggunakan air laut hingga masuk ke dalam botol sampel. Sebelum dilakukan analisis di laboratorium, sampel umumnya diawetkan menggunakan larutan formalin 4% atau lugol untuk menjaga kualitas dan keutuhannya.



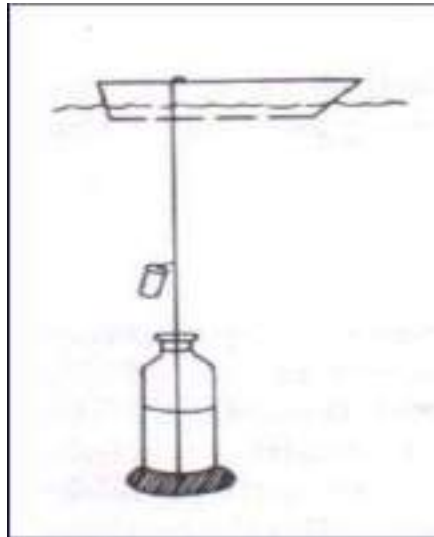
Gambar 51. Planktonet.

Sumber: <https://shorturl.at/PGaR2>

2. Botol Air

Botol sampel plankton berfungsi sebagai wadah untuk menampung hasil saringan plankton net. Botol ini bisa terbuat dari plastik atau kaca, tersedia dalam versi transparan atau

gelap. Untuk sampel yang akan diawetkan, botol plastik lebih dianjurkan karena lebih ekonomis dan tahan guncangan saat transportasi, sedangkan untuk sampel yang akan dikultur, botol transparan lebih sesuai agar cahaya bisa menembus. Ukuran botol disesuaikan dengan volume air hasil penyaringan, mulai dari 150 mL hingga 500 mL, dan sebaiknya dipilih sedikit lebih besar dari volume air yang disaring agar masih ada ruang untuk larutan pengawet. Pemilihan botol dapat disesuaikan dengan tujuan pengamatan dan metode analisis yang akan dilakukan.



Gambar 52. Botol air

Sumber: <https://shorturl.at/4dDUN>

3. Larutan Pengawet, Labeling dan Penyimpanan

Kualitas sampel plankton, seperti jumlah individu, bentuk, dan warna, disimpan dalam larutan pengawet. Dua larutan yang umum dipakai adalah Lugol dan formalin. Lugol lebih direkomendasikan karena mampu menjaga kualitas sampel lebih baik. Konsentrasi yang biasanya digunakan berkisar 10–15% untuk Lugol dan 4–8% untuk formalin. Setelah pengawetan, sampel harus dilabeli dengan informasi seperti nomor atau nama stasiun, jenis plankton (fitoplankton atau zooplankton), tanggal pengambilan, dan nama kolektor. Sampel yang sudah diberi label tidak dicampur dengan peralatan lain dan disimpan secara terpisah dalam kotak yang terlindung dari sinar matahari langsung. Untuk sampel yang akan dikultur, sebaiknya disimpan dalam kotak pendingin pada suhu sekitar 4 °C agar metabolisme plankton melambat dan komposisi sampel tetap stabil seperti saat awal pengambilan.

7.1.1 Sampling Plankton di Pesisir

Pengambilan sampel plankton di perairan pesisir umumnya lebih sederhana dibandingkan di laut lepas karena wilayah kajian lebih terbatas, jarak tempuh lebih pendek, dan kebutuhan alat transportasi lebih sedikit. Oleh sebab itu, penelitian di kawasan pesisir lebih sering dilakukan, terutama di lokasi dengan karakteristik khusus seperti teluk, muara sungai, pertemuan arus, atau daerah upwelling.

Proses pengambilan sampel di pesisir dapat dilakukan dengan berbagai cara, antara lain pengambilan sampel di permukaan air maupun sampling berdasarkan kedalaman tertentu untuk

memperoleh gambaran distribusi plankton secara vertikal. Sampling permukaan biasanya menggunakan plankton net yang ditarik dengan kecepatan dan jarak tertentu. Metode ini efektif untuk memperoleh data kelimpahan di area yang luas dengan waktu yang relatif cepat. Alternatif lain adalah menyaring volume air tertentu menggunakan wadah, misalnya ember berkapasitas 50–100 L per stasiun, sehingga perhitungan kelimpahan plankton menjadi lebih akurat. Contoh prosedur sampling permukaan: air diambil dari permukaan perairan sebanyak 50–100 L per stasiun, kemudian disaring melalui net plankton 20 μm . Hasilnya dimasukkan ke dalam botol dengan larutan Lugol 10% dan disimpan di kotak dingin untuk menjaga kualitas sampel hingga dianalisis di laboratorium.



Gambar 53. Metode untuk mengumpulkan plankton di permukaan air.

Sumber: Dokumentasi Pribadi 2023

Pengambilan sampel plankton secara vertikal di kolom air bertujuan untuk menilai distribusi plankton berdasarkan kedalaman, mengingat pertumbuhan plankton sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti intensitas cahaya. Untuk tujuan ini, digunakan botol pengambil sampel seperti botol Niskin atau Nansen, yang dapat menampung air dari kedalaman tertentu. Pengambilan sampel umumnya dilakukan pada kedalaman tertentu yang telah ditetapkan, seperti 0 m, 5 m, 10 m, 20 m, dan seterusnya. Namun, metode ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain volume air yang diperoleh relatif kecil serta waktu pengambilan yang cenderung lebih lama dibandingkan dengan teknik lainnya.

7.1.2 Sampling Plankton di Laut Dalam

Pengambilan sampel plankton dilakukan menggunakan beberapa teknik. Untuk sampel dari permukaan hingga kedalaman 500 m digunakan twin plankton net, sedangkan sampel permukaan dapat diambil menggunakan tong atau drum berkapasitas 80 L. Botol Niskin digunakan untuk mengumpulkan sampel pada kedalaman khusus, yakni 5 m, 50 m, 100 m, 200 m, dan 300 m. Setiap botol dilabeli dengan nomor stasiun, jenis plankton (fitoplankton atau zooplankton), tanggal pengambilan, dan nama kolektor, kemudian disimpan dalam kotak khusus setelah hasil saringan plankton dikumpulkan dan disimpan dalam larutan Lugol 10%. Sampel kemudian dikirim ke laboratorium untuk dianalisis.



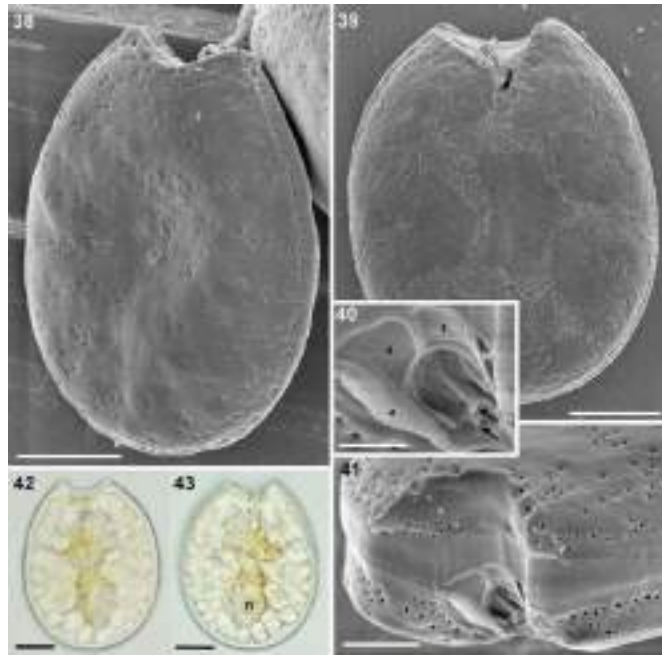
Gambar 54. Sampling plankton di laut dalam.

Sumber: <https://shorturl.at/76HNf>

7.2 Analisis di Laboratorium

7.2.1 Identifikasi Jenis Plankton

Tahap awal yang sangat penting dalam analisis struktur komunitas adalah proses identifikasi plankton. Kegiatan ini dilakukan untuk mengetahui komposisi jenis serta jumlah individu plankton yang terdapat dalam sampel. Pendekatan yang digunakan dalam identifikasi umumnya terbagi menjadi dua, yaitu melalui pengamatan morfologi dan analisis molekuler (genetik). Secara morfologis, pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop, baik mikroskop cahaya maupun scanning electron microscopy (SEM), untuk mengamati karakteristik spesies secara lebih detail (Pariansyah *et al.* 2025). SEM (*Scanning Electron Microscopy*) adalah alat pengamatan yang mampu memperbesar spesimen hingga 30.000–40.000 kali, sehingga memungkinkan identifikasi plankton secara rinci hingga tingkat spesies. Sebaliknya, mikroskop cahaya hanya memungkinkan pengamatan sampai tingkat genus karena detail morfologi individu kurang terlihat. Perbedaan hasil pembesaran dari kedua jenis mikroskop ini sangat jelas; jika kedua metode diaplikasikan pada sel spesies yang sama, kualitas dan tingkat detail gambar yang diperoleh akan berbeda secara nyata (Mora *et al.* 2019).



Gambar 55. .Prorocentrum sp.
Sumber: (Laza-martinez *et al.* 2012).

4 Alat utama untuk mengidentifikasi plankton secara morfologis adalah mikroskop, karena ukuran plankton sangat kecil sehingga tidak dapat diamati secara langsung dengan mata telanjang. Dengan menggunakan mikroskop, pengamatan detail terhadap bentuk, ukuran, struktur, dan warna sel atau individu plankton dapat dilakukan dengan lebih jelas. Untuk menghitung jumlah sel, terutama pada fitoplankton, alat pendukung seperti Sedgwick Rafter Counting Cell (SRCC) digunakan. Kualitas mikroskop yang digunakan memengaruhi tingkat ketelitian hasil identifikasi. Pengamatan yang lebih akurat biasanya dihasilkan oleh mikroskop dengan spesifikasi yang lebih tinggi. Perangkat tambahan seperti optilab juga sering digunakan untuk membuat pengamatan dan dokumentasi digital plankton lebih mudah. Dengan menghubungkan alat ini ke laptop, hasil pengamatan mikroskop dapat ditampilkan secara langsung pada layar laptop, yang memungkinkan visualisasi yang lebih jelas dan proses dokumentasi yang lebih efektif (Fenton *et al.* 2018).

8 Dalam tahap identifikasi plankton, morfologi zooplankton dan fitoplankton membedakannya. Zooplankton biasanya memiliki bentuk menyerupai larva dan perhitungan dilakukan berdasarkan jumlah individu. Sebaliknya, fitoplankton umumnya memiliki struktur yang lebih simetris dan dihitung berdasarkan jumlah sel, yang sering muncul dalam kelompok atau koloni. Selama proses identifikasi, perhatian juga perlu diberikan pada keberadaan serasah atau partikel lain dalam sampel yang dapat mengganggu pengamatan. Untuk meminimalkan kesalahan identifikasi, penggunaan referensi seperti buku panduan plankton sangat diperlukan. Referensi tersebut membantu meningkatkan ketepatan hasil identifikasi serta mengurangi kemungkinan kesalahan dalam penentuan jenis plankton.



Gambar 56. Mikroskop.

Sumber: Dokumentasi Pribadi 2024

7.2.2 Analisis Data Plankton

Analisis data plankton bertujuan memperoleh informasi kuantitatif mengenai status plankton di suatu perairan, mencakup tingkat kelimpahan serta struktur dan komposisi komunitasnya. Dalam praktik, kelimpahan dihitung dengan menghitung jumlah sel fitoplankton dan zooplankton per satuan volume air (liter). Untuk memungkinkan perbandingan hasil antara lokasi dan waktu sampling, berbagai rumus dan persamaan digunakan untuk mengolah data ini.

7.3 Penggunaan indeks ekologi berbasis plankton

7.3.1 Indeks Keanekaragaman

Penentuan tingkat keanekaragaman plankton dilakukan melalui indeks keanekaragaman dengan menggunakan persamaan yang diperkenalkan oleh Odum 1996, berikut persamaannya

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i \dots\dots\dots 4$$

$$p_i = \frac{n_i}{N} \dots\dots\dots 5$$

Tingkat keanekaragaman komunitas plankton dapat dinilai menggunakan indeks Shannon-Wiener (H'). Nilai H' diperoleh dari proporsi setiap spesies terhadap jumlah total individu yang ditemukan pada stasiun pengambilan sampel. Secara matematis, P_i menunjukkan rasio antara jumlah individu atau sel spesies ke- i (n_i) dengan total keseluruhan individu (N), sedangkan $\ln$ merupakan logaritma natural yang digunakan dalam perhitungannya.

Interpretasi nilai H' biasanya dibagi menjadi tiga kategori:

- $H' \leq 1$: keanekaragaman rendah, sering dijumpai pada perairan yang tertekan atau tercemar.
- $1 < H' \leq 3$: keanekaragaman sedang, menunjukkan beberapa spesies masih dominan namun komunitas relatif stabil.
- $H' \geq 3$: keanekaragaman tinggi, menandakan perairan seimbang dan produktif.

Indeks ini menunjukkan jumlah spesies yang ada dan distribusi individu dalam komunitas plankton. Odum (1996) menyatakan rumus keanekaragaman jenis plankton sebagai berikut:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln (P_i)$$

Keterangan :

S = Total jumlah spesies dalam komunitas

N = Jumlah seluruh individu dari semua spesies

n_i = Jumlah individu pada spesies ke – i

p_i = Proporsi individu spesies ke – i terhadap total individu

Ln = Logaritma natural

H' = Indeks keanekaragaman

Nilai indeks H menunjukkan seberapa stabil dan seimbang ekosistem perairan (Odum, 1996). Tabel 4 menunjukkan kategori plankton dan makna ekologisnya, dan menunjukkan bagaimana kondisi lingkungan berkorelasi dengan keanekaragaman plankton.

Tabel 4. Kategori indeks keanekaragaman

Nilai H' (Indeks Keanekaragaman)	Kategori Keanekaragaman	Interpretasi dari ekologi
$H' \leq 1$	Rendah	Keanekaragaman plankton yang rendah menunjukkan dominasi hanya oleh beberapa spesies saja. Hal ini mengindikasikan bahwa perairan mengalami tekanan ekologis tinggi atau tingkat pencemaran yang cukup signifikan
$1 < H' \leq 3$	Sedang	Keanekaragaman plankton sedang menggambarkan adanya variasi spesies yang cukup, meskipun beberapa spesies masih mendominasi komunitas. Kondisi ini menunjukkan perairan relatif stabil, tetapi tetap dipengaruhi oleh faktor-faktor pembatas lingkungan
$H' > 3$	Tinggi	Keanekaragaman plankton tinggi menunjukkan perairan stabil, subur, dan minim pencemaran.

7.3.2 Indeks Keseragaman

Indeks keseragaman (*evenness*) digunakan untuk menilai distribusi individu antar spesies dalam komunitas plankton. Perhitungannya mengacu pada formula Odum (1996), sebagai berikut:

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

Dengan:

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

Keterangan :

H' = Indeks keanekaragaman

E = Indeks keseragaman

S = Jumlah spesies (atau genus)

H_{max} = Nilai keanekaragaman maksimum (Jika jumlah individu dalam setiap spesies sama)

$\ln$ = Logaritma natural

Indeks keseragaman (E) menunjukkan tingkat pemerataan jumlah individu antarspesies dalam komunitas plankton; nilainya berkisar 0–1, dan semakin mendekati 1 berarti distribusinya semakin merata. Kategori ekologisnya adalah:

- $E = 0-0,5$ (keseragaman rendah): Satu atau beberapa spesies sangat dominan, ekosistem kurang seimbang.
- $E = 0,5-0,75$ (keseragaman sedang): Mayoritas spesies memiliki jumlah individu yang hampir seimbang, komunitas relatif stabil.
- $E = 0,75-1$ (keseragaman tinggi): Tidak ada spesies dominan, distribusi individu merata, menandakan ekosistem stabil dan seimbang.

Indeks ini penting untuk menilai kesehatan dan stabilitas komunitas plankton dalam suatu perairan. Rumus berikut diusulkan oleh Odum (1996):

Tabel 5. Kriteria Tingkat Keseragaman

Nilai E	Kategori Keseragaman	Interpretasi dari ekologi
$0 \leq E \leq 0.5$	Rendah	Dominasi spesies tertentu menunjukkan tingkat keseragaman yang rendah, yang biasanya terkait dengan lingkungan yang tertekan atau tidak stabil.
$0.5 < E \leq 0.75$	Sedang	Komunitas menunjukkan keseragaman moderat; distribusi individu antarspesies cukup merata, namun masih terlihat kecenderungan dominasi ringan
$0.75 < E \leq 1.0$	Tinggi	Jumlah populasi yang seragam di komunitas menunjukkan lingkungan yang stabil dan aman bagi berbagai jenis plankton

7.3.3 Indeks Dominansi

Penggunaan indeks dominansi bertujuan untuk menilai apakah ada spesies plankton yang jumlahnya jauh lebih banyak dibandingkan yang lain. Rumus yang umum digunakan mengacu pada Simpson (1949) dalam Odum (1996), yaitu:

$$C = \sum \frac{ni (ni - 1)}{N (N - 1)}$$

Keterangan :

C = Indeks dominansi

ni = Jumlah individu spesies ke-i

N = Total individu (atau sel) dari seluruh spesies di satu stasiun

S = Jumlah seluruh spesies

Dalam komunitas plankton, indeks dominansi (C) dihitung dari perbandingan jumlah individu spesies ke-i (ni) terhadap total individu (N). Interpretasi ekologisnya adalah sebagai berikut:

- C = 0–0,5 (dominansi rendah): Tidak ada spesies yang dominan; komunitas sangat beragam dan seimbang.
- C = 0,5–0,75 (dominansi sedang): Beberapa spesies mulai lebih banyak jumlahnya, namun keseimbangan ekosistem masih terjaga.
- C = 0,75–1 (dominansi tinggi): Hanya sedikit spesies yang mendominasi; kondisi ini sering terjadi akibat tekanan lingkungan seperti pencemaran, perubahan suhu, atau eutrofikasi.

Indeks dominansi penting untuk menilai struktur komunitas plankton dan mengetahui adanya spesies yang menguasai suatu perairan. Nilai indeks ini dihitung berdasarkan rumus yang dikemukakan oleh Odum (1996) sebagai berikut:

Tabel 6. Kategori tingkat dominansi

Nilai C	Kategori dominansi	Interpretasi dari ekologi
$0 \leq C \leq 0.5$	Rendah	Ketiadaan spesies dominan menunjukkan kondisi komunitas yang seimbang dengan keragaman yang tinggi
$0.5 < C \leq 0.75$	Sedang	Mulai terjadi dominasi oleh sedikit spesies, meskipun tingkatnya belum terlalu kuat
$0.75 < C \leq 1.0$	Tinggi	Komunitas dominasi satu atau beberapa spesies, yang umumnya menunjukkan kondisi perairan yang tertekan, tercemar, atau tidak stabil

7.3.4 Kelimpahan

Perhitungan kelimpahan plankton menyesuaikan dengan jenisnya. Jumlah sel per liter (sel/L) atau sel per meter kubik (sel/m³) menentukan hasil fitoplankton, sedangkan jumlah individu per liter (ind/L) atau individu per meter kubik (ind/m³) menentukan hasil zooplankton. Perbedaan ini diperlukan karena cara penghitungan dan satuan representasi jumlahnya berbeda sesuai karakteristik masing-masing kelompok plankton. Metode perhitungan kelimpahan ini umumnya mengacu pada persamaan yang dikemukakan oleh APHA (1989), dengan persamaan sebagai berikut:

$$N = \frac{O_i \times V_r \times n}{O_p \times V_o \times V_s}$$

Keterangan:

- N = Jumlah plankton (sel/L atau ind/L)
 O_i = Luas area kaca objek mikroskop (mm²)
 O_p = Luas suatu bidang pandang mikroskop (mm²)
 V_r = Volume air yang disaring (mL)
 V_o = Volume air yang diamati dibawah mikroskop (mL)
 V_s = Volume air yang tersaring (L)
 N = Jumlah lapang pandang yang dihitung

Selain metode diatas, perhitungan kelimpahan juga dapat mengacu pada persamaan Choirun *et al.* (2015) berikut:

$$N = \frac{n_i \times V_t}{V_s \times V}$$

Keterangan:

- n_i = Banyaknya individu plankton yang terhitung pada sub-sampel
 V_s = Volume sub-sampel yang diamati (mL)
 V_t = Volume total sampel (mL)
 V = Volume air yang disaring (m³)

Untuk sementara, volume air yang disaring selama proses pengambilan sampel dapat dihitung menggunakan rumus dari Hutagalung *et al.* (1997):

$$V = R \times a \times p$$

Keterangan:

- V = Volume air yang tersaring (m³)
 R = Jumlah putar baling pengukur aliran
 a = Luas mulut jaring plankton (m²)
 p = Panjang kolom air (m) yang ditempuh oleh baling-baling dalam satu rotasi

Pengelompokan berdasarkan kelimpahan plankton menjadi indikator yang signifikan dalam menggambarkan status kesuburan dan produktivitas suatu perairan. Menurut Nurmalitasari, (2023). Tabel 7 menunjukkan klasifikasi kelimpahan plankton.

Tabel 7. Kategori kelimpahan plankton

Klasifikasi	Nilai Kelimpahan Plankton (individu atau sel per L)	Keterangan
Rendah / oligotrofik	< ~ 2.000 ind/L	Kurang subur
Sedang / mesotrofik	~ 2.000 – 15.000 ind/L	Kesuburan sedang
Tinggi / eutrofik atau subur	> ~ 15.000 ind/L	Eutrofik atau subur

BAB VIII

PLANKTON SEBAGAI BIOINDIKATOR

8.1 Indikator Kualitas Perairan

Keanekaragaman, kelimpahan total, dan struktur komposisi spesies adalah kriteria utama untuk mengevaluasi kualitas air plankton (Endryeni *et al.* 2025). Indeks keanekaragaman plankton, seperti Shannon-Wiener (H'), digunakan untuk menilai stabilitas dan keseimbangan ekosistem. Di sisi lain, kelimpahan plankton menjadi indikator penting karena fluktuasi jumlah totalnya dapat mencerminkan adanya gangguan lingkungan, misalnya pencemaran, perubahan nutrisi, atau proses eutrofikasi. Dengan menggabungkan kedua parameter ini, peneliti dapat mengevaluasi kondisi ekologis perairan secara lebih komprehensif (Nurina *et al.* 2024). Unggul dalam spesies tertentu, terutama yang memiliki tingkat toleransi berbeda, dapat menjadi indikator dalam menilai tingkat pencemaran secara lebih spesifik (Nur 'Aini dan Safira, 2022).

Plankton terbagi menjadi dua kelompok utama, yaitu fitoplankton (plankton yang memiliki klorofil yang bersifat tumbuhan) dan Zooplankton (plankton yang memiliki alat gerak seperti hewan berukuran mikro) (Sudinno *et al.* 2015). Masing-masing kelompok plankton menyajikan informasi yang berbeda mengenai kondisi kualitas perairan. Fitoplankton, sebagai produsen utama, memiliki sensitivitas tinggi terhadap ketersediaan nutrisi dan intensitas cahaya, sehingga fluktuasi jumlahnya dapat mencerminkan perubahan sifat fisika dan kimia air. Sementara itu, zooplankton menggambarkan tingkat produktivitas primer serta kondisi habitat, dan kerap dimanfaatkan untuk mengevaluasi dinamika rantai makanan dalam ekosistem akuatik (Rasyid *et al.* 2018). Fitur fisik-kimia air, termasuk suhu, pH, oksigen terlarut, dan kandungan nutrisi, termasuk nitrogen dan fosfor, juga berkorelasi kuat dengan keberadaan plankton. Kondisi oksigen terlarut yang rendah, biasanya akibat pencemaran organik, dapat mengubah susunan komunitas plankton di perairan (Ali dan Siti Nurul, 2016). Temperatur perairan memiliki pengaruh besar terhadap kecepatan perkembangan serta dinamika siklus hidup plankton, sehingga sering dijadikan salah satu indikator utama dalam menilai kondisi kualitas air. Di sisi lain, kestabilan nilai pH mencerminkan lingkungan yang relatif seimbang, sementara perubahan yang signifikan pada pH dapat menjadi tanda adanya gangguan, seperti masuknya bahan pencemar yang berpotensi mengganggu stabilitas ekosistem (Evita *et al.* 2021).

Pemantauan jumlah plankton sangat penting untuk mendeteksi terjadinya bloom atau peningkatan populasi secara drastis, yang umumnya dipicu oleh kondisi eutrofikasi (Gurning *et al.* 2020). Meningkatnya jumlah plankton, terutama fitoplankton, dapat menyebabkan penurunan mutu perairan karena munculnya senyawa toksik dan penurunan oksigen terlarut. Karena itu, pemantauan awal melalui penghitungan banyak plankton menjadi langkah krusial dalam pengelolaan sumber daya air sekaligus mencegah degradasi ekosistem perairan (Riyantini *et al.* 2020).

Penerapan teknologi mutakhir dalam proses pengambilan sampel serta analisis plankton telah mendorong peningkatan ketelitian dan kecepatan dalam pemantauan kondisi perairan. Penggunaan mikroskop digital serta pendekatan berbasis molekuler memungkinkan identifikasi organisme hingga tingkat spesies secara lebih efisien, sehingga mendukung sistem pemantauan yang bersifat *real-time* dan mempercepat pengambilan keputusan mengenai manajemen sumber daya perairan.

6 . Secara umum, pemanfaatan plankton sebagai indikator lingkungan dinilai praktis sekaligus reliabel untuk mengevaluasi kesehatan ekosistem perairan. Dengan menggabungkan informasi mengenai keanekaragaman, kelimpahan, serta struktur komunitas plankton bersama parameter fisika dan kimia, dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif terkait kondisi kualitas air. Kegiatan pemantauan plankton yang dilakukan secara berkala pada berbagai tipe perairan menjadi langkah strategis dalam mendukung upaya pengelolaan dan konservasi lingkungan (Akbarurrasyid *et al.* 2023).



Gambar 57. Planktonet.
Sumber (Hablützel *et al.* 2019).

6 Plankton dapat dimanfaatkan sebagai indikator biologis dalam menilai kualitas air, memberikan metode yang menyeluruh untuk mendukung konservasi sumber daya perairan. Sensitivitas tinggi plankton terhadap perubahan lingkungan membuatnya alat yang efektif untuk memantau kondisi ekosistem sejak tahap awal. Dengan pendekatan ini, potensi gangguan dapat terdeteksi lebih cepat, sehingga langkah-langkah mitigasi bisa segera diterapkan demi menjaga keseimbangan dan keberlanjutan perairan (Labupili, *et al.* 2018).

8.2 Indikator perubahan iklim dan produktivitas laut

6 Produktivitas laut sangat dipengaruhi oleh keberadaan plankton, khususnya fitoplankton yang berfungsi sebagai produsen utama bahan organik melalui fotosintesis. Ketika suplai nutrisi tersedia secara optimal, pertumbuhan fitoplankton akan meningkat dan berdampak pada bertambahnya populasi zooplankton serta organisme dengan tingkat trofik yang meningkat (Putra *et al.* 2025). Perubahan tersebut menunjukkan adanya modifikasi kondisi fisika dan kimia perairan laut sebagai dampak pemanasan global. Dengan siklus hidup yang relatif singkat, plankton mampu merespons perubahan lingkungan dengan cepat, sehingga variasi komposisinya dapat dimanfaatkan untuk memantau dinamika iklim laut dalam waktu singkat (Brierley dan Kingsford, 2009).

Produktivitas laut sangat dipengaruhi oleh keberadaan plankton, terutama fitoplankton yang berfungsi sebagai produsen utama melalui proses fotosintesis ketika bahan organik dibuat. Peningkatan ketersediaan dan distribusi nutrisi akan mendorong pertumbuhan fitoplankton, yang selanjutnya memicu peningkatan jumlah zooplankton dan makhluk dengan tingkat trofik yang lebih tinggi (Djumanto, 2019). Pada akhirnya, produktivitas ekosistem laut dapat menurun akibat perubahan iklim yang membuat stratifikasi kolom air menjadi lebih kuat. Kondisi ini menghambat pergerakan nutrisi dari lapisan dalam menuju permukaan, sehingga

ketersediaan unsur hara berkurang dan biomassa plankton ikut menurun. Dampak lanjutan dari situasi tersebut turut dirasakan oleh populasi ikan hidup di berbagai daerah perairan yang mengalami penurunan (Budiman *et al.* 2023)

Data pemantauan jangka panjang menunjukkan bahwa ada korelasi antara perubahan kelimpahan plankton dan tingkat produktivitas laut di seluruh dunia. Berdasarkan analisis gambar satelit, terlihat bahwa di wilayah tropis terjadi tren penurunan produktivitas, sedangkan di daerah lintang tinggi terjadi peningkatan, yang disebabkan oleh perubahan suhu dan dinamika arus laut. Oleh karena itu, kajian dan pemantauan plankton sangat penting untuk memahami dampak perubahan iklim terhadap keberlanjutan ekosistem laut karena fakta bahwa plankton tidak hanya berfungsi sebagai indikator perubahan iklim tetapi juga bertanggung jawab untuk mengatur siklus karbon di lautan (Cahyani *et al.* 2023).

Fitoplankton berfungsi sebagai pembuat utama di lingkungan perairan dengan memanfaatkan energi cahaya untuk disintesis menjadi bahan organik melalui fotosintesis. Peran ini menjadikannya sebagai fondasi utama penyedia nutrisi bagi berbagai kehidupan laut lainnya (Yulianto *et al.* 2014). Perubahan dalam kondisi lingkungan, terutama yang berkaitan dengan faktor iklim seperti suhu, salinitas, dan kualitas perairan, sangat memengaruhi variasi jumlah dan keanekaragaman plankton. Kepekaan plankton terhadap perubahan parameter fisik, kimia, dan biologis menjadikannya sebagai indikator alami dalam ekosistem akuatik. Perubahan pada kelimpahan dan struktur komunitas plankton dapat mencerminkan adanya pencemaran, fluktuasi suhu, serta bagaimana perubahan iklim mempengaruhi produktivitas laut (Anggraini *et al.* 2024).

Komunitas plankton yang mengalami perubahan mencerminkan kondisi iklim dan tingkat produktivitas laut, mengingat peranannya yang krusial dalam keseimbangan rantai makanan dan ekosistem perairan (Budiman *et al.* 2023). Perubahan keanekaragaman dan kelimpahan plankton sering digunakan sebagai indikator biologis untuk mengukur dampak perubahan iklim terhadap ekosistem laut, termasuk pergeseran pola cuaca dan dinamika suhu perairan. Perubahan pada unsur-unsur iklim mempengaruhi langsung struktur komunitas plankton, memengaruhi suhu, salinitas, dan kondisi kualitas air (Unbekna *et al.* 2020). Komposisi spesies plankton dapat berubah akibat meningkatnya suhu laut akibat pemanasan global, dengan jenis tertentu menjadi lebih umum sementara yang lain mengalami penurunan (Rasconi *et al.* 2015). Perubahan tersebut berpotensi menurunkan produktivitas primer di laut dan memberikan dampak berantai pada keseluruhan sistem trofik perairan. Penurunan kelimpahan plankton sebagai produsen utama dapat menyebabkan berkurangnya populasi ikan serta menurunnya produktivitas perairan secara keseluruhan. Oleh karena itu, pemantauan rutin plankton adalah langkah penting dalam mengantisipasi dampak perubahan iklim terhadap produktivitas laut dan mendukung pengelolaan sumber daya perairan yang berkelanjutan (Varmlandia dan Hadisusanto, 2023).

Faktor iklim seperti curah hujan dan dinamika arus memengaruhi pola distribusi dan produktivitas plankton. Perubahan tersebut kemudian memengaruhi variasi salinitas dan ketersediaan nutrisi di laut. Sebagai produsen utama, fitoplankton sangat peka terhadap perubahan cahaya dan nutrisi, sehingga pergeseran komposisi komunitasnya dapat menjadi indikasi perubahan kondisi lingkungan laut akibat pengaruh iklim (Cahyani *et al.* 2023). Berbagai studi di perairan menegaskan adanya korelasi kuat antara fluktuasi faktor iklim dan dinamika komunitas plankton. Penelitian pada tahun 2022 menunjukkan bahwa pemantauan

keanekaragaman plankton secara temporal dapat menjadi indikator yang efektif untuk menilai perubahan kondisi lingkungan laut yang dipengaruhi oleh perubahan iklim (Farkan *et al.* 2024).

Variasi iklim memengaruhi siklus hidup fitoplankton, sehingga secara langsung mengatur tingkat biomassa dan produktivitas primer di perairan laut (Adiwilaga dan Damar, 2004). Pengaruh perubahan iklim tidak hanya terbatas pada fitoplankton, tetapi juga merambat ke seluruh jaringan trofik laut dan turut memengaruhi tingkat produktivitas sektor perikanan. Seringnya bloom alga meningkat, dan jika berlebihan, dapat menyebabkan kekurangan oksigen dan peningkatan racun. Dengan memantau bloom, ilmuwan bisa mendapatkan sinyal awal tentang potensi gangguan ekologis yang dapat mengurangi produksi laut (Gobler, 2020). Teknologi kontemporer seperti sensor di laut dan citra satelit memungkinkan pemantauan komunitas plankton secara lebih presisi dalam menghadapi perubahan iklim. Informasi yang dikumpulkan diolah untuk menampilkan tren produktivitas laut dari waktu ke waktu dan di tempat yang berbeda (Rosalina *et al.* 2025).

Kerumitan hubungan antara komponen biotik dan abiotik menjadi tantangan dalam pemanfaatan plankton sebagai indikator perubahan iklim. Namun, penggabungan data plankton dengan model iklim dan ekologi dapat meningkatkan ketepatan dalam memprediksi produktivitas laut (Faturohman *et al.* 2020). Pengamatan plankton memungkinkan identifikasi perubahan produktivitas laut sebagai respons terhadap perubahan iklim global. Sifat sensitif plankton terhadap fluktuasi lingkungan menjadikannya penunjuk biologis yang penting bagi ekosistem laut (Akbarurrasyid *et al.* 2023).

Agar plankton dapat digunakan sebagai indikator lingkungan, upaya adaptasi terhadap perubahan iklim dapat dilakukan secara lebih efektif baik di kawasan pesisir maupun laut lepas, diperlukan kerja sama lintas disiplin seperti klimatologi, ekologi kelautan, dan teknologi penginderaan jauh (Bi *et al.* 2022). Sebagai indikator biologis tingkat produktivitas laut dan perubahan iklim, plankton memiliki peranan yang sangat penting dalam kajian ilmiah serta pengelolaan sumber daya kelautan. Ketersediaan data yang akurat dan mutakhir menjadi landasan utama dalam pengambilan keputusan berbasis sains guna menjaga keberlanjutan ekosistem laut (Rahayu *et al.* 2024)

Efisiensi aliran energi ke zooplankton dan ikan dipengaruhi oleh variasi dalam struktur komunitas fitoplankton. Pada gilirannya, hasil perikanan dipengaruhi oleh variasi ini. Pengukuran kuantitatif plankton, termasuk jumlah, biomassa, dan ukuran individu, berfungsi sebagai indikator nyata untuk menilai perubahan produktivitas ekosistem laut (Ajani *et al.* 2020). Perubahan dalam salinitas dan ketersediaan nutrisi, serta suhu, memengaruhi kelimpahan plankton. Variasi salinitas, baik penurunan maupun peningkatan, dapat menghambat pertumbuhan spesies tertentu, sementara kelebihan nutrisi dapat mendorong ledakan fitoplankton yang berpotensi menyebabkan eutrofikasi (Susilowati *et al.* 2023)

Fenomena ledakan fitoplankton diketahui mengalami perubahan waktu (fenologi) akibat variasi musim dan pertumbuhan suhu permukaan laut. Di beberapa daerah pantai, puncak produksi primer dapat terjadi lebih cepat atau justru tertunda, yang disertai dengan perubahan dalam komposisi taksonomi fitoplankton. Pergeseran tersebut dapat dimanfaatkan sebagai indikator awal adanya gangguan iklim di wilayah perairan tersebut (Gittings *et al.* 2018). Perubahan dominasi spesies dan ukuran komunitas mencerminkan respons adaptif terhadap peningkatan suhu serta stratifikasi kolom air. Indeks komunitas plankton dapat merekam perubahan sistem laut selama sepuluh tahun (Sarker *et al.* 2020).

Dengan menggunakan plankton sebagai indikator, kita dapat mengidentifikasi perubahan dalam parameter fisik dan kimia perairan seperti suhu, salinitas, dan nutrisi, yang berdampak pada produktivitas primer. Tingkat produktivitas laut dan variabel iklim lainnya, seperti anomali suhu, sangat terkait, menurut pola dinamika plankton. Akurasi penilaian terhadap perubahan iklim akan meningkat apabila data plankton dipadukan dengan pengamatan satelit serta pengukuran nutrisi (Benedetti *et al.* 2021). Metode berbasis plankton memiliki kemampuan untuk membandingkan efek pemanasan global dengan tekanan lokal, seperti eutrofikasi. Perubahan produktivitas laut di masa mendatang dapat diprediksi dengan memodelkan respons komunitas fitoplankton terhadap skenario kenaikan suhu (Bedford *et al.* 2020). Produksi primer dan aliran energi di ekosistem pesisir terkait erat dengan perubahan biomassa fitoplankton yang diamati dalam survei laut. Analisis proxy biogeokimia dan sedimen organik dapat digunakan untuk melihat tren jangka panjang yang dipengaruhi oleh aktivitas manusia dan perubahan iklim (Krajewska *et al.* 2020). Seberapa efektif energi diteruskan ke zooplankton dan ikan dipengaruhi oleh perubahan komposisi fitoplankton, yang berdampak pada produktivitas perikanan. Mengamati kuantitatif plankton, yang mencakup kelimpahan, biomassa, dan ukuran tubuh, menyediakan indikator yang dapat diandalkan tentang peningkatan atau penurunan produktivitas laut (Mattei dan Scardi, 2021).

Studi lintas lokasi menunjukkan bahwa perubahan dalam respons plankton terhadap perubahan produktivitas berbeda antara perairan laut lepas dan wilayah pesisir yang dipengaruhi oleh sungai. Perubahan dalam respons plankton secara spasial dan temporal biasanya mencerminkan interaksi antara pola sirkulasi dan ketersediaan nutrisi (Siddons *et al.* 2022). Memanfaatkan berbagai indeks plankton memungkinkan untuk membedakan dampak perubahan iklim di seluruh dunia dari dampak yang disebabkan oleh faktor lokal. Perubahan kemampuan laut untuk menyerap karbon atmosfer juga ditunjukkan oleh variasi produktivitas yang dicatat oleh plankton. Menggabungkan observasi kontemporer dengan data historis membantu merekonstruksi produksi masa lalu dan memperkirakan tren ke depan (Henson *et al.* 2021)

Efek pemanasan regional terhadap produktivitas tahunan diukur dengan melacak bloom fitoplankton dan dinamika musiman komunitas. Menurut penelitian lapangan dan satelit, perubahan fenologi berdampak langsung pada jumlah dan kualitas produksi primer (Sugie *et al.* 2020). Interaksi antara pemanasan dan ketersediaan nutrisi, seperti peningkatan limpasan atau penurunan pencampuran air, memengaruhi respons produktivitas fitoplankton. Perubahan spesies dominan dalam bloom dapat mengubah jalur biogeokimia, termasuk siklus karbon dan remobilisasi nutrisi (Kwon *et al.* 2022). Di masa depan, peningkatan suhu dapat menyebabkan komunitas fitoplankton menjadi kurang mampu menyimpan karbon biologis. Parameter fungsional plankton seperti ukuran dan efisiensi fotosintesis dapat digunakan untuk mengevaluasi perubahan produktivitas secara lebih menyeluruh daripada hanya melihat biomassa (Jia *et al.* 2022). Menurut hasil dan model ekosistem, pemanasan dan eutrofikasi dapat mempercepat perubahan produktivitas tingkat atas. Indikator fenologi plankton dapat diamati untuk mengetahui perubahan dalam produktivitas setiap tahun sebelum mereka berdampak pada organisme dengan tingkat trofik yang lebih tinggi (Henson *et al.* 2021)

8.3 Studi Kasus di Indonesia

Hasil studi di berbagai wilayah menegaskan bahwa plankton efektif sebagai indikator ekologi. Parameter fisika dan kimia di Sungai Brantas bersama dengan kelimpahan dan keanekaragaman plankton dapat menunjukkan tingkat pencemaran air (Siregar *et al.* 2024). Kehadiran spesies dominan seperti *Melosira* sp dan *Carteria* dapat menunjukkan jenis pencemaran tertentu (Nur 'Aini dan Safira, 2022). Penelitian di Pantai Sayung, Demak, menunjukkan bahwa perubahan suhu, pH, dan nutrisi sangat terkait dengan jumlah fitoplankton dan zooplankton yang berbeda. Dengan hubungan ini, plankton dapat digunakan sebagai petunjuk awal kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh pencemaran atau perubahan iklim, dan pemantauan rutin membantu menjaga keseimbangan ekosistem pesisir (Evita *et al.* 2021).

Komunitas plankton Situ Asih Pulo, Depok terdiri dari zooplankton, fitoplankton eukariotik, dan cianobakteri. Untuk mengukur tingkat pencemaran air dari rendah hingga sedang, kelembapan spesies plankton digunakan (Mersyah *et al.* 2021). Meskipun ada pencemaran, kehidupan plankton dan biota air tetap bertahan di perairan ini, seperti yang ditunjukkan oleh penggunaan indeks komunitas dan koefisien saprobik (Geng *et al.* 2022). Studi yang dilakukan di Danau Seran, Kalimantan Selatan, menemukan bahwa jenis plankton yang paling umum digunakan untuk menunjukkan kondisi perairan adalah yang paling tepat. Fitoplankton terutama terdiri dari jenis *Charophyta*, *Bacillariophyta*, *Chlorophyta*, dan *Cyanobacteria*. Faktor fisika-kimia tertentu, seperti pH, suhu, oksigen terlarut, timbal, fosfat, dan nitrat, bertanggung jawab sebagian besar atas kualitas perairan. Temuan kondisi oligotrofik menunjukkan bahwa perairan tidak subur dan kekurangan nutrisi (Fithratullah *et al.* 2023).

Fitoplankton, terutama yang termasuk dalam kelas *Bacillariophyceae*, merupakan plankton yang dominan di perairan muara Sungai Banyuasin, Sumatera Selatan. Kehadiran fitoplankton dalam jumlah besar mengindikasikan bahwa perairan berada dalam kondisi relatif sehat, dengan pencemaran ringan menurut penilaian indeks saprobitas (Ramadhan *et al.* 2021). Situasi ini mengidentifikasi bahwa plankton dapat berfungsi sebagai bioindikator yang baik untuk melihat bagaimana kualitas air berubah di wilayah pesisir yang terkena dampak aliran sungai besar (Evita *et al.* 2021). Studi yang dilakukan di Sungai Brantas di Jawa Timur menunjukkan bahwa plankton berfungsi sebagai bioindikator untuk mengukur tingkat pencemaran di salah satu sungai paling tercemar di Indonesia (Arsad *et al.* 2021). Keanekaragaman plankton berkurang di lingkungan yang lebih tercemar; ini termasuk *Carteria* dan *Melosira* sp. Analisis fisika-kimia seperti DO, fosfat, dan suhu menunjukkan bagaimana komunitas plankton dan tingkat pencemaran berkorelasi satu sama lain (Xiong *et al.* 2020).

Komposisi dan kelimpahan plankton yang berubah di perairan Indonesia dapat memberikan indikasi langsung mengenai kualitas air dan tingkat pencemaran, menegaskan perannya sebagai bioindikator (Bi *et al.* 2022). Monitoring komunitas plankton secara berkala menjadi kunci bagi kelestarian ekosistem perairan, karena mampu memberikan data lebih cepat dan akurat daripada pendekatan kimia tradisional (Ugya *et al.* 2025). Studi di perairan Krueeng Sabee, Aceh Jaya, menunjukkan bahwa perubahan komunitas plankton terkait dengan pencemaran lingkungan, dan keberadaan fitoplankton yang vital rantai makanan akuatik berfungsi sebagai indikator kualitas ekosistem pesisir (Ferrera *et al.* 2020).

Sejumlah perairan kota di Indonesia diteliti dengan mengamati berbagai jenis plankton guna mengevaluasi tingkat pencemaran dan status ekosistemnya. Dampak buruk aktivitas manusia seperti masuknya sampah rumah tangga dan industri ke dalam laut dapat dijelaskan melalui indeks keanekaragaman dan komposisi spesies plankton.. Perairan tercemar biasanya memperlihatkan dominansi spesies plankton tertentu yang mampu bertahan dalam kondisi polusi (Retnaningdyah *et al.* 2025). Plankton adalah indikator biologis yang baik karena responsnya yang cepat terhadap perubahan lingkungannya. Komunitas plankton dapat menunjukkan tingkat pencemaran melalui pengamatan indeks saprobitas, yang penting untuk manajemen sumber daya air di Indonesia (Asmarani *et al.* 2024)

Sebagai bioindikator, plankton membantu manajemen perairan Indonesia secara berkelanjutan, menurut studi. Plankton, yang berasal dari berbagai spesies yang sensitif terhadap kontaminan, dapat mendeteksi pencemaran dengan cepat, memungkinkan perbaikan cepat (Akbarurrasyid *et al.* 2024). Beragam studi di nusantara memperkuat posisi plankton sebagai bioindikator penting di semua jenis perairan, sementara teknologi dan metode sampling modern mendukung pengumpulan data yang luas untuk pemantauan berkelanjutan (Lubis *et al.* 2023). Sebagai bioindikator, plankton membantu ilmuwan memahami cara kerja ekosistem perairan. Mereka juga membantu membuat kebijakan pengelolaan sumber daya air di Indonesia yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Untuk memerangi pencemaran dan perubahan iklim, kedua kebijakan ini sangat penting (Akbarurrasyid *et al.* 2024). Respons cepat plankton terhadap perubahan lingkungan dan kemampuannya mendeteksi stres yang tak terlihat lewat parameter kimia menjadikannya indikator efektif. Contohnya, penelitian di Bendungan Kebasen dan Muara Sungai Serayu menemukan korelasi kuat antara fitoplankton, indeks saprobik, dan kualitas air, dipengaruhi oleh kondisi trofik-saprobik serta limbah (Afifah dan Purnomo, 2025).

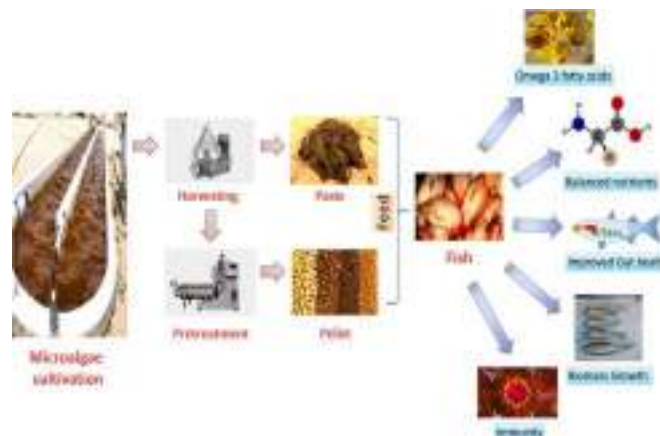
Studi terkini tentang air Muara Paiton, Probolinggo, menunjukkan keanekaragaman dan populasi plankton pantai dapat mengukur tingkat pencemaran dan metode penggunaan lahan di sekitarnya yang meliputi limpasan nutrien dan bahan organik (Minawati *et al.* 2023). Dominansi spesies plankton toleran terhadap polusi dapat menyesatkan penilaian kualitas air, karena aspek lain seperti kontaminan mikro tetap berisiko. Untuk mendapatkan interpretasi yang tepat, variabel alam seperti musim, arus, dan perubahan harian juga harus diperhatikan (Arumugham *et al.* 2023).

BAB IX

APLIKASI DAN MANFAAT PLANKTON

9.1 Plankton Dalam Akuakultur

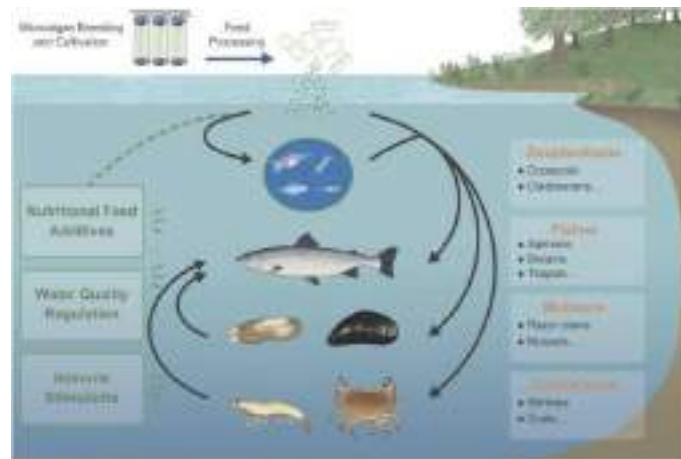
Keberadaan plankton sangat vital dalam budidaya akuakultur, karena mendukung kestabilan rantai makanan alami dan kualitas air. Kelimpahan dan diversitas plankton menjadi indikator kesuburan perairan yang memengaruhi produktivitas organisme budidaya (Khan and Rahman, 2025). Tingkat pertumbuhan dan kesehatan organisme budidaya, seperti ikan dan udang, akan lebih optimal jika kondisi air stabil dan planktonnya seimbang (Aisyah *et al.* 2023).



Gambar 58. Pakan akuakultur
Sumber: Nagappan *et al.* (2021).

Penggunaan plankton sebagai pakan alami dalam budidaya menawarkan keuntungan ekonomi dan ekologi, karena dapat menekan biaya pakan buatan sekaligus mendukung kualitas air melalui siklus nutrisi dan oksigenasi (Khan dan Rahman, 2025). Untuk meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi produksi, komunitas plankton harus dipelihara dan dipantau (Sharpe *et al.* 2024). Karena berfungsi sebagai pakan alami, pemasok oksigen, dan bioindikator kualitas air, plankton sangat penting untuk kelangsungan hidup akuakultur (Evita *et al.* 2021). Melalui fotosintesis, fitoplankton memproduksi oksigen yang sangat dibutuhkan untuk mendukung pernapasan organisme dalam budidaya (Aisyah *et al.* 2023).

Mikroalga melakukan banyak hal dalam sistem budidaya akuakultur, seperti mengurangi penetrasi cahaya ke media kultur, menyediakan pakan alami langsung, membantu mengubah kualitas air, dan membantu pertumbuhan pakan alami tambahan (Ma *et al.* 2020). Mikroalga memenuhi kebutuhan nutrisi organisme budidaya karena berfungsi sebagai sumber mikronutrien esensial. Fungsi imunostimulan dan pengendalian mikroba menjaga lingkungan budidaya sehat dan stabil, meningkatkan produktivitas secara keseluruhan (Muahiddah dan Affandi, 2023).



Gambar 59. Mikroalga sangat penting untuk akuakultur
Sumber: K. Ma *et al.* (2020).

Keberhasilan akuakultur sangat dipengaruhi oleh jenis plankton yang mendominasi dan kelimpahannya. Misalnya, fitoplankton Chlorophyceae sering menjadi kelompok dominan, menstabilkan kondisi kolam dan memberikan pakan yang tepat untuk ikan dan udang (Vijayaram *et al.* 2024). Zooplankton, seperti *Arcella* dan *Branchiopoda*, juga berperan dalam menjaga siklus nutrisi kolam budidaya. Kelimpahan plankton yang optimal membantu mengurangi penggunaan pakan buatan sekaligus meningkatkan produktivitas budidaya (Azani *et al.* 2025).

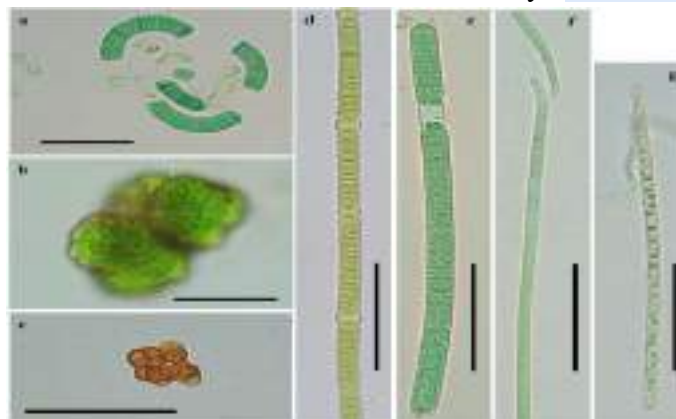
Fitoplankton berfungsi sebagai pengendali kualitas air dan pakan alami dalam sistem budidaya. Mikroalga seperti *Nannochloropsis*, *Chlorella*, dan *Tetraselmis* digunakan untuk menjaga larva dan meningkatkan populasi zooplankton kecil seperti rotifera. Fungsi mereka sebagai penghubung trofik antara organisme budidaya utama dan zooplanktonnya sendiri. (Creswell, 2010). Fotosintesis fitoplankton menghasilkan oksigen, yang membantu organisme air bernapas dan menjaga keseimbangan ekosistem. Selain itu, fitoplankton menyerap nutrisi berlebih dari kolom air, mengurangi peluang eutrofikasi dalam sistem budidaya intensif (Aly *et al.* 2024). Fitoplankton dan zooplankton berperan penting dalam menjaga kualitas air melalui penyerapan nutrisi dan pembentukan oksigen terlarut, sementara penelitian terbaru menunjukkan bahwa mikroalga dapat menjadi sumber pakan alami yang mengandung banyak nutrisi untuk larva dan hewan budidaya lainnya (Ma dan Hu, 2024). Sering digunakan sebagai bioindikator untuk mengukur kualitas lingkungan kolam budidaya koi dan produktivitas udang vaname, komunitas plankton menunjukkan korelasi jelas antara kondisi fisik-kimia air dan kelimpahan plankton (Nafisyah *et al.* 2025).



Gambar 60. Kontribusi Mikroalga terhadap Budidaya Akuakultur.

Sumber: Ma dan Hu, (2024).

Ketika *Cyanobacteria* mendominasi fitoplankton, itu sering menunjukkan kondisi perairan yang penuh nutrisi dan eutrofikasi yang lebih tinggi, termasuk kemungkinan toksin, seperti yang terlihat di reservoir Australia (Rousso *et al.* 2022). Studi di Waduk Jatigede juga mengungkapkan bahwa Cyanophyta menjadi fitoplankton dominan di kondisi perairan yang mengalami pencemaran (Rosadi *et al.* 2020). Selain menjadi sumber makanan, plankton juga berperan sebagai penanda kesehatan ekosistem dalam budidaya akuakultur.



Gambar 61. (a) *Crinalium glaciale* (b–c) Spesies dan morfospesies yang termasuk dalam ordo *Chroococciopsidales*: (b) *Gloeocapsopsis sp* (c) *Gloeocapsopsis sp*. (d) *Nodularia sp*. (e–g) Spesies dan morfotipe yang termasuk dalam ordo *Oscillatoriales*: (e) *Lyngbya sp*. (f) *Phormidium sp.*; (g) *Phormidium sp.*

Sumber: Dory *et al.* (2025).

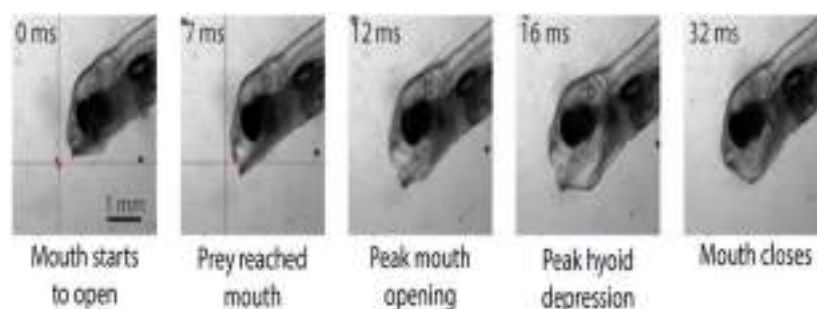
Berbagai kelompok plankton, seperti diatom, dinoflagellata, alga biru-hijau, dan alga hijau, ditemukan dalam media budidaya udang vanamei (Mansyah *et al.* 2020). Persentase alga hijau meningkat seiring umur udang, menunjukkan kualitas air yang baik dan mendukung produktivitas udang (Suprakto *et al.* 2024). Kesehatan dan pertumbuhan udang di tambak berkorelasi positif dengan kelimpahan plankton. Selain itu, kelimpahan plankton membantu menghentikan pertumbuhan klekap dan lumut yang merugikan dasar kolam (Farkan *et al.* 2025). Hasil studi di Kabupaten Bantul tahun 2021 menyoroti bahwa dinamika musiman berperan penting dalam menentukan keberadaan dan keanekaragaman plankton serta produktivitas perairan utama (Nurmalitasari dan Sudarsono, 2023). Pada awal musim hujan,

indeks dominansi plankton lebih tinggi daripada pada musim kemarau, ketika fitoplankton dan zooplankton seimbang, menunjukkan kondisi ekosistem yang stabil. Ini memungkinkan plankton berfungsi sebagai pakan alami dan pengukur kesehatan akuakultur (Wei *et al.* 2022).

Menurut penelitian yang dilakukan di tambak budidaya udang vanamei di Garut, Jawa Barat, produksi udang sangat dipengaruhi oleh organisasi komunitas plankton, yang terdiri dari lima kelompok plankton dan 20 genus, dengan fitoplankton yang paling banyak berasal dari kelas Chlorophyceae (Akbarurrasyid *et al.* 2022). Fitoplankton Bacillariophyta mendominasi tambak udang vanamei di Kabupaten Brebes, tetapi zooplankton yang paling umum adalah Rotifera. Dengan indeks keanekaragaman plankton yang sedang dan tingkat keseragaman yang tinggi, kondisi plankton tampaknya stabil (Mulatsih *et al.* 2023). Dalam akuakultur, plankton melakukan dua peran penting: mereka berfungsi sebagai pakan alami, meningkatkan kualitas air, menunjukkan kesehatan ekosistem, dan merupakan komponen penting dalam mendukung budidaya berkelanjutan (Pan *et al.* 2022). Pertumbuhan, kelangsungan hidup, dan produktivitas organisme akuatik yang dibudidayakan dapat diperbaiki dengan manajemen yang tepat terhadap dinamika komunitas plankton (Berthold *et al.* 2018). Secara lebih efisien, pemanfaatan plankton dapat menjadikan budidaya akuakultur lebih berkelanjutan, hemat sumber daya, dan berkontribusi pada keamanan pangan global (Valenzuela-Sanchez *et al.* 2021).

9.2 Pemanfaatan Fitoplankton dalam Pakan Alami

Fitoplankton, yang terdiri dari alga uniseluler yang mengandung klorofil sebagai pigmen, memiliki kemampuan untuk mengumpulkan energi cahaya dan menghasilkan energi kimia. Energi kemudian disimpan dalam bentuk senyawa organik, yang kemudian memberikan nutrisi kepada berbagai organisme di perairan, termasuk spesies yang ditanamkan dalam sistem akuakultur (Vijayaram *et al.* 2024). Fitoplankton adalah pakan alami bernutrisi tinggi yang ideal untuk tahap larva ikan yang membutuhkan makanan granular yang sesuai dengan ukuran mulut (Ratnawati *et al.* 2023).



Gambar 62. Ukuran mulut larva ikan.

Sumber: China dan Holzman, (2014).

Mikroalga sangat bagus sebagai pengganti tepung ikan dan minyak, yang saat ini banyak digunakan dalam pakan akuakultur komersial (Tham *et al.* 2023). Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa mikroalga laut dan air tawar sangat kaya akan lipid, protein, dan karbohidrat, serta bahan lain yang sangat penting untuk pertumbuhan dan perkembangan ikan.



Gambar 63. Potensi mikroalga.

Sumber: Tham *et al.* (2023).

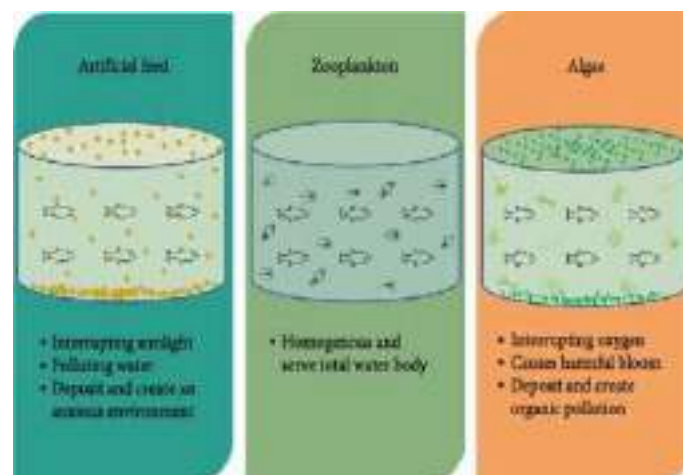
Dalam bidang akuakultur, mikroalga juga digunakan sebagai pakan alami untuk berbagai organisme budidaya, termasuk ikan (Aini *et al.* 2023). Menggunakan mikroalga sebagai pakan alami dapat membantu memperkecil ketergantungan pada pakan buatan, yang sering mengakibatkan akumulasi zat berbahaya seperti amonia dan nitrit dalam sistem budidaya. Namun, upaya untuk mengembangkan dan mengkultur mikroalga secara terkontrol mulai dilakukan karena pasokan mikroalga di alam cenderung berubah dan tidak stabil untuk meningkatkan penggunaannya dan memastikan ketersediaannya (Lestari *et al.* 2019). Pakan alami sangat penting untuk pembenihan ikan. Pakan sebaiknya diklasifikasikan menurut beberapa kriteria, seperti ukurannya sesuai dengan bukaan mulut ikan. Angka kematian ikan juga biasanya tinggi, terutama di awal siklus hidupnya (Krishnan *et al.* 2020). Dalam budidaya perikanan, pakan sangat penting. Pakan buatan masih digunakan sebagian besar untuk memenuhi kebutuhan pakan, tetapi biayanya yang tinggi mendorong orang untuk mencari alternatif yang lebih murah dan berkelanjutan (Nagappan *et al.* 2021).



Gambar 64. Keunggulan pakan alami.

Sumber: Khan and Rahman, (2025).

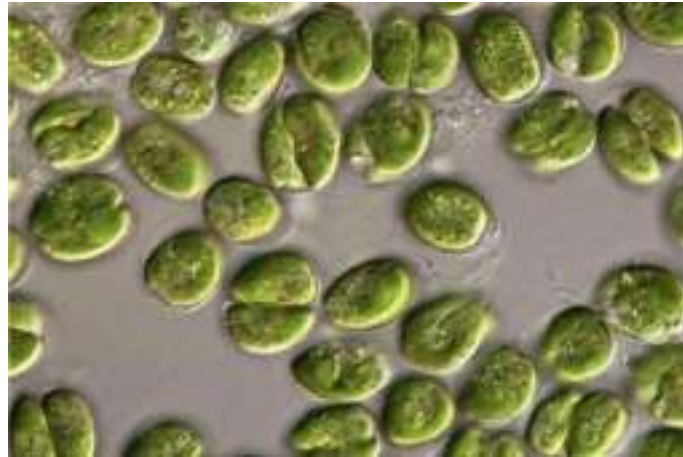
Pakan alami digunakan dalam budidaya perikanan memberikan banyak keuntungan, karena biasanya kaya nutrisi dan dapat dibudidayakan dengan cara yang relatif sederhana (Hutagalung *et al.* 2021). Karena kaya nutrisi, plankton berperan sebagai pakan alami utama bagi ikan budidaya, membantu menunjang perkembangan dan kondisi kesehatannya (Khan dan Rahman, 2025). Kualitas hasil budidaya ikan sangat dipengaruhi oleh jenis pakan yang dipilih. Dalam siklus hidup ikan, tahap larva sangat penting. Beberapa aspek perlu diperhatikan saat memberikan pakan alami, termasuk menyesuaikan ukuran pakan yang sesuai dengan tahap perkembangan ikan (China dan Holzman, 2014). Selain itu, menghindari pakan berlebihan karena dapat berdampak negatif. Memberikan pakan alami berbasis plankton secara berlebihan berisiko mengganggu pertumbuhan ikan dan mungkin bahkan meningkatkan angka kematian pada individu ikan (Vijayaraj *et al.* 2022).



Gambar 65. Pemilihan pakan ikan.

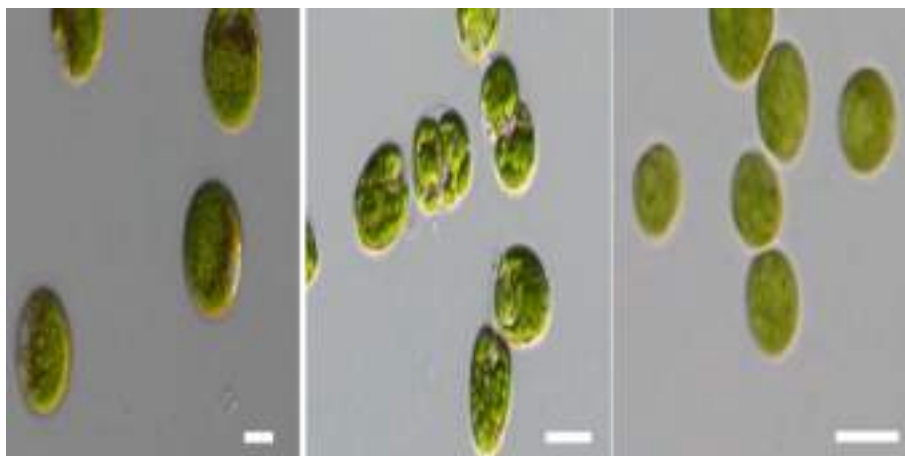
Sumber: Khan and Rahman, (2025).

Di Indonesia, upaya pengembangan dan budidaya telah dilakukan terhadap salah satu mikroalga yang berasal dari kelompok diatom, yaitu *Chaetoceros calcitrans*. Mikroalga ini kaya akan nutrisi dan senyawa bioaktif yang memiliki potensi pemanfaatan, dengan komposisi antara lain lipid 14–17%, protein sekitar 35%, karbohidrat 6,6% dan, lemak 6,9% (Prasetyo *et al.* 2022). Ketersediaan nutrisi dalam media pertumbuhan menjadi elemen utama yang menentukan seberapa baik mikroalga berkembang dan mutu selnya (Firdaus dan Yuniar, 2021). Nutrien yang tersedia di media kultur berperan penting dalam mendukung pertumbuhan optimal dan kualitas sel mikroalga (Manan dan Sari, 2012). Kandungan utama mikroalga ini meliputi protein, pigmen fotosintetik, dan asam lemak tak jenuh ganda (PUFA) seperti EPA, yang secara signifikan berkontribusi terhadap pertumbuhan, daya tahan hidup, serta peningkatan respons imun pada larva (Sitepu *et al.* 2025).



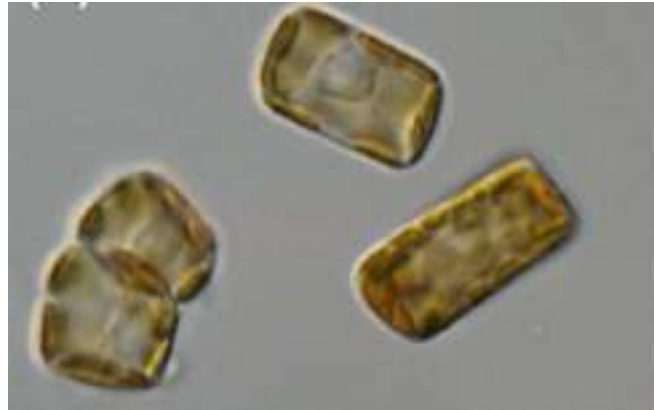
Gambar 66. *Nannochloropsis* sp.
Sumber: Zanella and Vianello, (2020).

Berbagai jenis fitoplankton, seperti *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros calcitrans*, *Tetraselmis chuii*, dan *Chlorella*, umum digunakan sebagai sumber pakan alami pada fase larva ikan dan udang. Hasil studi menunjukkan bahwa dalam sistem kultur batch, mikroalga tersebut mengalami tahapan pertumbuhan yang meliputi fase adaptasi (lag), fase pertumbuhan cepat (eksponensial), fase stabil (stasioner), hingga fase penurunan (kematian) (Mohamed Nafees *et al.* 2022). Pemanfaatan *C. calcitrans* dan *T. chuii* sebagai pakan larva udang, telah terbukti meningkatkan pertumbuhan dan kelangsungan hidup dibandingkan dengan perlakuan kontrol (Fujaya *et al.* 2020). Pertumbuhan *C. calcitrans* dalam kultur eksperimen dipengaruhi oleh faktor lingkungan, termasuk kekuatan atau intensitas cahaya (Prasetyo *et al.* 2022). Dengan mengontrol pertumbuhan mikroorganisme yang berpotensi berbahaya dan menghasilkan oksigen melalui fotosintesis, fitoplankton memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem perairan. Beberapa jenis fitoplankton yang berbeda yang umum digunakan sebagai pakan alami meliputi *Dunaliella*, *Tetraselmis*, dan *Chlorella*, yang kaya akan asam lemak tak jenuh dan protein. (Huang *et al.* 2023).



Gambar 67. *Dunaliella*, *Tetraselmis*, dan *Chlorella*.
Sumber: Ma and Hu, (2024).

Penelitian Ratnawati *et al.*(2023) melaporkan bahwa Penggunaan fitoplankton seperti *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira sp.*, dan *Chaetoceros sp.* sangat penting sebagai sumber pakan alami pada tahap awal pemeliharaan larva udang vaname (*Litopenaeus vannamei*). Studi menunjukkan bahwa perawatan dengan fitoplankton dan pakan buatan meningkatkan pertumbuhan dan tingkat kelangsungan hidup larva lebih baik daripada perawatan tanpa pakan alami.



Gambar 68. *Thalassiosira sp.*
Sumber: Ma and Hu, (2024).

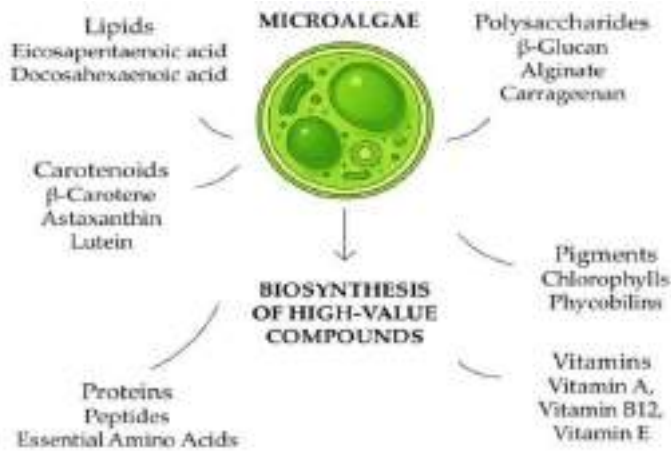
Penelitian Jessica *et al.* (2024) menunjukkan bahwa kultur *Thalassiosira sp.* dapat berkembang hingga mencapai tingkat kepadatan yang tinggi sekaligus tetap stabil apabila pengelolaannya dilakukan dengan baik. Mikroalga ini sangat cocok untuk digunakan sebagai pakan alami hatchery untuk udang dan ikan laut lainnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penguasaan teknik kultur fitoplankton di laboratorium menjadi aspek penting dalam mendukung keberlanjutan perikanan. Penelitian Alyaniazy *et al.* (2023) menemukan bahwa manajemen yang tepat dapat mengoptimalkan perkembangan kultur *Chlorella vulgaris*. Pemberiannya tidak hanya berfungsi sebagai pakan utama untuk ukuran bukaan mulut larva, tetapi juga meningkatkan lingkungan budidaya dengan membuat oksigen melalui fotosintesis. Secara keseluruhan, telah terbukti bahwa *C. vulgaris* meningkatkan pertumbuhan dan kelangsungan hidup larva kerapu, sehingga direkomendasikan sebagai pakan alami yang penting untuk kerapu yang dibudidaya di Indonesia.

Tingkat keberhasilan budidaya ikan, khususnya pada tahap awal seperti pembenihan dan stadia larva, sangat dipengaruhi oleh keberadaan dan kualitas pakan alami berupa fitoplankton. Oleh sebab itu, diperlukan pengelolaan lingkungan yang baik agar produksi fitoplankton dapat ditingkatkan, sehingga ketersediaan pakan alami tetap berkesinambungan dan mampu mendukung pertumbuhan ikan secara maksimal (Valenzuela-Sanchez *et al.* 2021).

9.3 Bioteknologi dan Pemanfaatan Senyawa Bioaktif Plankton

Bioteknologi adalah bidang ilmu yang memanfaatkan organisme hidup atau bagian-bagiannya untuk membuat barang dan jasa yang bermanfaat bagi manusia (Martins *et al.* 2021). Sebagai makhluk kecil yang hidup di perairan laut dan tawar, plankton memiliki banyak potensi untuk berkembang biak dan memainkan peran penting dalam ekosistem akuatik. Keberagaman plankton, baik fitoplankton maupun zooplankton, tidak hanya membentuk dasar rantai makanan di ekosistem perairan, tetapi juga menyediakan senyawa bioaktif yang dapat

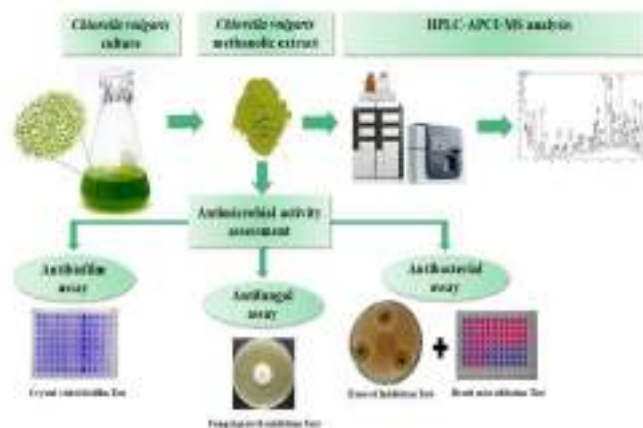
digunakan dalam industri farmasi, makanan, kosmetik, dan teknologi lingkungan (Prates, 2025).



Gambar 69. Metabolit utama mikroalga.

Sumber: Arenas Colarte *et al.* (2025).

2 Dalam bioteknologi, penggunaan plankton berfokus pada pembuatan produk berbasis senyawa bioaktif seperti antioksidan, antibakteri, antivirus, dan antikanker. Klorofil dan pigmen fotosintetik dari plankton menghasilkan senyawa yang bermanfaat bagi Kesehatan (Sun *et al.* 2024). Sejumlah mikroalga, seperti *Chlorella vulgaris* dan *Spirulina sp.*, telah banyak digunakan sebagai makanan tambahan karena mengandung banyak protein, vitamin, dan mineral. Selain itu, plankton menghasilkan metabolit sekunder yang dapat digunakan sebagai obat baru; salah satu contoh metabolit ini adalah senyawa antimikroba yang memiliki kemampuan untuk menghalangi berbagai patogen (Ouzakar *et al.* 2025).

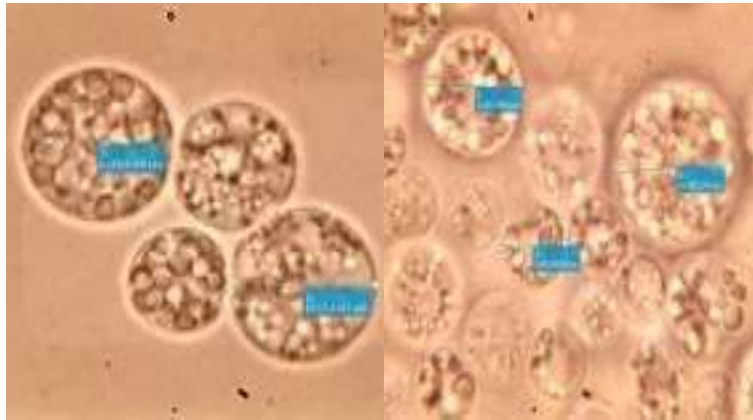


Gambar 70. Kultur *Chlorella vulgaris*.

Sumber: Ouzakar *et al.* (2025).

Dalam hasil penelitian Suhendra *et al.* (2023), diketahui bahwa mikroalga *Aurantiochytrium* kaya akan senyawa bioaktif utama, asam lemak omega-3, terutama DHA (dokosaheksaenoat) dan EPA (eikosapentaenoat), yang memainkan peran penting dalam meningkatkan pertumbuhan dan kelangsungan hidup ikan serta meningkatkan kualitas gizi

2 daging untuk konsumsi manusia. Selain itu, mikroalga ini menghasilkan lipid dalam jumlah besar yang tersimpan dalam vesikel sel. Jadi, *Aurantiochytrium* membantu keberlanjutan industri perikanan secara strategis.



Gambar 71. Fase Kultur *Aurantiochytrium*.
Sumber: Suhendra *et al.* (2023).

2 Penelitian Dewi *et al.* (2023) memperlihatkan bahwa adanya cahaya tinggi dapat meningkatkan produksi senyawa bioaktif pada *Dunaliella salina*. Karotenoid seperti β -karoten, astaxantin, dan lutein berfungsi sebagai antioksidan dan pelindung sel dari stres oksidatif. Senyawa ini berpotensi dimanfaatkan sebagai suplemen pakan dalam akuakultur. Selain itu, kemampuannya beradaptasi pada kondisi ekstrem menjadikannya prospektif untuk manufaktur massal yang efektif dan berkelanjutan.



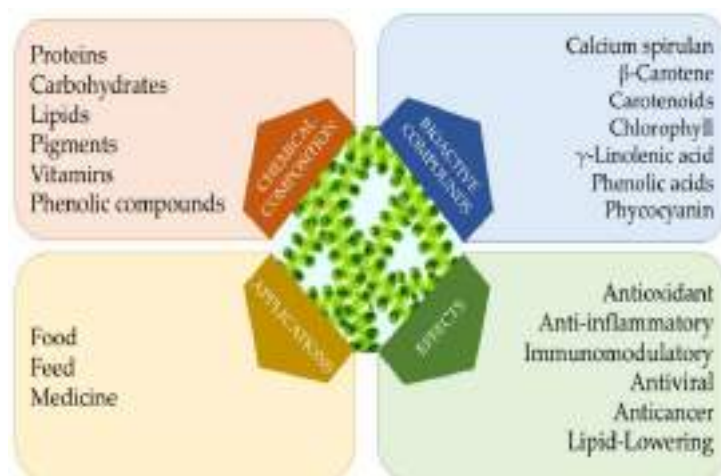
Gambar 72. *Dunaliella salina*.
Sumber: Sugumar *et al.* (2020).

14 Penelitian Ashaari *et al.* (2024), menunjukkan bahwa copepoda mengandung berbagai senyawa bioaktif utama, seperti PUFA, atau asam lemak tak jenuh ganda, yang sangat penting. Sistem kekebalan larva ikan dan udang sangat dibantu oleh kandungan DHA pada copepoda. Selain itu, copepoda mengandung banyak pigmen karotenoid, salah satunya adalah astaxanthin, yang bertindak sebagai antioksidan dan meningkatkan kualitas warna organisme budidaya. Copepoda dapat meningkatkan kesehatan dan produktivitas sistem akuakultur secara signifikan karena kandungan nutrisi dan bioaktifnya yang luar biasa.



Gambar 73. *Copepoda*.
Sumber: Ashaari *et al.* (2024).

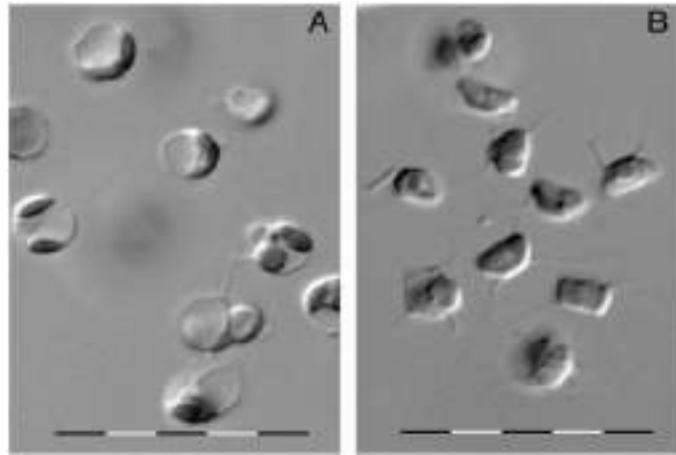
Dengan kandungan senyawa bioaktifnya yang tinggi, spirulina adalah salah satu mikroalga yang sangat potensial untuk digunakan dalam akuakultur. Dengan banyak protein, asam lemak esensial, vitamin, dan pigmen seperti fikosianin dan karotenoid, ia melakukan aktivitas antioksidan yang membantu organisme budidaya tetap sehat (Spínola *et al.* 2024). Ekstrak Spirulina juga memiliki kemampuan antibakteri yang melawan berbagai jenis bakteri patogen. Akibatnya, ini dapat digunakan sebagai pakan yang efektif untuk mengontrol penyakit di akuakultur. Senyawa aktifnya bertindak sebagai antibakteri yang efektif. Ada bukti bahwa penggunaan Spirulina dalam praktik akuakultur dapat membantu mencapai budidaya yang berkelanjutan (Hidayati *et al.* 2022).



Gambar 74. Komponen kimia, kandungan bioaktif, efek biologis, dan penggunaan mikroalga Spirulina.
Sumber: Spínola *et al.* (2024).

Mikroalga *Chaetoceros calcitrans* diketahui mengandung beragam senyawa bioaktif yang berpotensi dimanfaatkan dalam bidang akuakultur, di antaranya flavonoid, tanin, terpenoid, dan steroid (Setyawan, 2019). Bakteri patogen seperti *Aeromonas salmonicida* dapat dibunuh oleh sifat antibakteri senyawa-senyawa ini (Maftuch *et al.* 2018). Selain itu, *Chaetoceros* juga memiliki kandungan nutrisi yang tinggi, terutama protein (sekitar 34,79%),

yang berperan penting dalam mendukung pertumbuhan organisme budidaya secara optimal (Satyantini *et al.* 2025).



Gambar 75. (a) Sel *Chaetoceros calcitrans* pada fase vegetatif; (b) Sel *Chaetoceros calcitrans* pada tahap pembentukan rantai atau koloni.

Sumber: Kaspar *et al.* (2014).

Untuk mendukung keberlanjutan sektor akuakultur, bioteknologi sangat penting untuk meningkatkan efisiensi produksi dan pemanfaatan senyawa bioaktif yang berasal dari plankton, terutama mikroalga. Pendekatan yang digunakan termasuk rekayasa metabolik, optimalisasi sistem kultur, dan teknologi ekstraksi (Ahmad Kamal *et al.* 2024). Oleh karena itu, penciptaan bioteknologi berbasis plankton dapat menjadi langkah strategis untuk membangun sistem akuakultur yang sehat, berkelanjutan, dan berwawasan lingkungan.

BAB X

TANTANGAN DAN PROSPEK STUDI PLANKTON

10.1 Isu Pencemaran Laut

Pencemaran laut merupakan salah satu tantangan terbesar dalam menjaga keseimbangan ekosistem laut, termasuk kehidupan plankton di dalamnya. Kontaminasi ini dapat bersumber dari beragam aktivitas manusia, antara lain pembuangan limbah industri, kegiatan pertanian, limbah domestik, serta aktivitas pelayaran dan eksplorasi di wilayah laut (Khotimah *et al.* 2024; Rozirwan *et al.* 2024). Bahan pencemar seperti logam berat, minyak, pestisida, serta limbah organik dan anorganik memiliki dampak signifikan terhadap kualitas air laut. Plankton, sebagai organisme mikroskopik yang hidup melayang di kolom air, menjadi salah satu biota yang paling rentan terhadap perubahan kondisi lingkungan akibat pencemaran tersebut. Perubahan kualitas perairan akibat masuknya bahan pencemar dapat mengganggu proses fotosintesis pada fitoplankton, menurunkan produktivitas primer, dan mengubah struktur komunitas plankton di suatu wilayah perairan. Logam berat seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), dan tembaga (Cu) dapat menghambat aktivitas enzimatik dan mengganggu metabolisme seluler plankton (Balali-Mood *et al.* 2021; Angon *et al.* 2024). Selain itu, peningkatan konsentrasi nutrisi akibat eutrofikasi dari limbah pertanian dapat memicu ledakan populasi fitoplankton tertentu, terutama dari kelompok dinoflagellata yang berpotensi menghasilkan racun berbahaya. Kondisi ini tidak hanya berdampak negatif terhadap ekosistem, tetapi juga berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi, khususnya pada sektor perikanan dan pariwisata.

Pencemaran fisik seperti mikroplastik juga menjadi ancaman nyata bagi plankton. Mikroplastik yang berukuran sangat kecil dapat dengan mudah tertelan oleh zooplankton, menyebabkan gangguan fisiologis dan bahkan kematian. Karena plankton berada di dasar rantai makanan laut, mikroplastik yang masuk ke dalam tubuh plankton dapat berpindah ke organisme pada tingkat trofik yang lebih tinggi, seperti ikan, moluska, dan pada akhirnya ke manusia melalui konsumsi makanan laut. Pencemaran laut bukan hanya masalah ekologis, tetapi juga memiliki implikasi langsung terhadap kesehatan manusia dan ketahanan pangan. Pencemaran minyak yang diakibatkan oleh tumpahan minyak dari kapal tanker atau pengeboran lepas pantai juga berdampak besar terhadap kehidupan plankton (Thiagarajan and Devarajan, 2025). Lapisan minyak di permukaan air menghambat penetrasi cahaya matahari ke zona fotik, sehingga menurunkan aktivitas fotosintesis fitoplankton. Komponen kimia dalam minyak seperti hidrokarbon aromatik polisiklik (PAHs) bersifat toksik dan dapat menyebabkan mutasi genetik pada plankton (Patel *et al.* 2020). Keadaan ini berpotensi memicu perubahan struktur komunitas plankton serta menurunkan tingkat keanekaragaman hayati dalam ekosistem laut.

Perubahan iklim global juga memperparah dampak pencemaran laut terhadap plankton. Pemasaman laut akibat peningkatan kadar karbon dioksida (CO₂), serta perubahan pola arus laut dapat mempengaruhi distribusi dan kelimpahan plankton (Mishra, 2025; Nawab *et al.* 2025). Fitoplankton yang sensitif terhadap perubahan suhu dan pH air akan mengalami tekanan ekologis, sehingga menyebabkan pergeseran struktur komunitas dan berdampak pada seluruh rantai makanan laut. Upaya pengendalian pencemaran laut perlu dilakukan secara terpadu, melibatkan pemerintah, akademisi, pelaku industri, dan masyarakat. Pemantauan berkala terhadap kualitas air laut serta kajian bioindikator menggunakan plankton sangat penting untuk

126 mendeteksi perubahan kondisi lingkungan sejak dini. Plankton dapat dijadikan indikator biologis karena responnya yang cepat terhadap perubahan parameter lingkungan seperti pH, salinitas, nutrisi, dan keberadaan bahan pencemar (Hemraj *et al.* 2017). Dengan demikian, kajian mengenai plankton memiliki peranan yang sangat penting dalam mendukung kebijakan pengelolaan lingkungan laut yang berkelanjutan.

Dalam konteks ilmiah, penelitian mengenai dampak pencemaran terhadap plankton juga menjadi bagian penting dalam pengembangan ilmu kelautan. Analisis terhadap respon fisiologis, genetik, dan ekologis plankton terhadap berbagai jenis pencemar dapat membantu dalam memahami mekanisme adaptasi dan kerentanan biota laut. Selain itu, data plankton dapat dijadikan dasar dalam model ekologi laut untuk memprediksi dampak jangka panjang dari berbagai skenario pencemaran.

21 10.2 Dampak Perubahan Iklim Global terhadap Plankton

4 Perubahan iklim global telah berkembang menjadi salah satu tantangan lingkungan paling besar di era ini dan memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap ekosistem laut, termasuk terhadap keberlangsungan kehidupan plankton (Sun, J. *et al.* 2024). Sebagai komponen awal dalam rantai makanan laut, plankton memiliki tingkat kepekaan yang tinggi terhadap perubahan kondisi lingkungan, seperti suhu, salinitas, pH, serta ketersediaan nutrisi (Mishra, 2025). Peningkatan suhu permukaan laut sebagai dampak pemanasan global berpotensi mengacaukan pola sebaran, tingkat produktivitas, serta susunan komunitas plankton di berbagai kawasan perairan di dunia. Perubahan-perubahan tersebut pada akhirnya akan memengaruhi kestabilan ekosistem laut secara keseluruhan. Salah satu konsekuensi paling signifikan dari perubahan iklim terhadap plankton adalah meningkatnya suhu perairan laut. Fitoplankton yang sangat bergantung pada suhu dan cahaya untuk fotosintesis, akan mengalami perubahan pola pertumbuhan dan penyebaran (Chen *et al.* 2015). Di daerah tropis, suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan efisiensi fotosintesis dan menghambat produksi primer, sedangkan di daerah kutub, mencairnya es laut membuka wilayah baru bagi pertumbuhan fitoplankton. Namun, perubahan distribusi ini dapat menyebabkan ketidakseimbangan dalam rantai makanan, karena zooplankton dan ikan mungkin tidak mampu beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan lokasi dan musim kelimpahan fitoplankton (Lomartire *et al.* 2021; Heneghan *et al.* 2023).

149 Kenaikan kadar karbon dioksida (CO₂) di atmosfer juga berkontribusi terhadap terjadinya pengasaman laut (*ocean acidification*). Fenomena ini menyebabkan turunnya pH air laut, yang selanjutnya berdampak pada kelompok plankton bercangkang kalsium karbonat, seperti foraminifera, coccolithophores, dan pteropoda (Turley, 2013). Menurunnya pH air laut menghambat proses pembentukan cangkang, sehingga berpotensi menekan jumlah populasi plankton tersebut. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat memicu perubahan struktur komunitas plankton serta mengganggu kestabilan siklus karbon di ekosistem laut. Perubahan iklim juga mempengaruhi pola sirkulasi dan stratifikasi air laut. Dengan meningkatnya suhu, lapisan permukaan air laut menjadi lebih hangat dan cenderung tidak mudah bercampur dengan lapisan air yang lebih dingin di bawahnya. Kondisi ini mengakibatkan berkurangnya aliran nutrisi dari lapisan perairan dalam menuju zona fotik, sehingga berdampak pada menurunnya produktivitas fitoplankton. Penurunan produktivitas ini berpotensi mengurangi biomassa laut

dan mengganggu keseimbangan rantai makanan laut (Moum and Smyth, 2019; Venegas *et al.* 2023).

Perubahan pola curah hujan dan peningkatan intensitas badai akibat perubahan iklim dapat mempengaruhi kondisi fisik dan kimia perairan pesisir. Peningkatan aliran air tawar dari daratan membawa sedimen, nutrien, dan bahan pencemar yang dapat menyebabkan eutrofikasi di wilayah pesisir (Pizzorni *et al.* 2024; Rahat *et al.* 2024). Eutrofikasi sering memicu ledakan populasi fitoplankton tertentu, termasuk jenis berbahaya seperti dinoflagellata toksik, yang dapat menghasilkan fenomena *red tide* atau ledakan alga beracun (Sha *et al.* 2021). Kejadian ini tidak hanya mengancam kehidupan organisme laut tetapi juga menimbulkan dampak sosial ekonomi pada perikanan dan pariwisata. Dampak perubahan iklim terhadap plankton juga terlihat pada pola migrasi dan siklus hidup zooplankton. Beberapa jenis zooplankton, seperti copepoda, menunjukkan pergeseran musim pemijahan dan migrasi vertikal yang berbeda akibat perubahan suhu air laut. Pergeseran ini dapat menyebabkan ketidaksesuaian waktu (*mismatch timing*) antara puncak kelimpahan fitoplankton dan kebutuhan pakan zooplankton, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi transfer energi di dalam rantai makanan laut.

Di sisi lain, beberapa jenis plankton justru mampu beradaptasi dan berkembang dalam kondisi ekstrem akibat perubahan iklim. Misalnya, spesies fitoplankton yang toleran terhadap suhu tinggi atau kadar CO₂ tinggi cenderung mendominasi komunitas plankton di perairan tertentu (Tascón-Peña *et al.* 2025). Namun, dominasi ini dapat mengurangi keanekaragaman plankton secara keseluruhan dan menyebabkan ketidakseimbangan ekosistem laut. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan iklim dapat menciptakan “pemenang” dan “pecundang” di antara komunitas plankton, tergantung pada kemampuan adaptasi spesies terhadap kondisi lingkungan yang berubah. Selain dampak ekologis, perubahan iklim juga memiliki implikasi terhadap penelitian dan pemantauan plankton. Ilmuwan kelautan kini dituntut untuk memahami dinamika plankton dalam konteks perubahan global yang kompleks. Pemantauan jangka panjang terhadap parameter fisik, kimia, dan biologis laut menjadi sangat penting untuk mendeteksi tren perubahan populasi plankton. Data tersebut diperlukan untuk memprediksi bagaimana ekosistem laut akan merespons perubahan iklim di masa mendatang, serta untuk merancang strategi mitigasi dan adaptasi yang efektif.

Peran plankton dalam siklus karbon global juga menjadikan mereka komponen penting dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Fitoplankton berperan dalam menyerap karbon dioksida melalui proses fotosintesis dan membantu menyimpannya di laut melalui proses yang disebut biological carbon pump. Namun, jika perubahan iklim terus memperburuk kondisi laut, efektivitas proses ini dapat menurun sehingga mengurangi kemampuan laut dalam menyerap karbon. Dengan demikian, menjaga keseimbangan komunitas plankton juga berarti menjaga kestabilan iklim global.

10.3 Prospek Penelitian Plankton ke Depan di Indonesia

Kajian mengenai plankton di Indonesia memiliki peluang yang sangat besar untuk terus dikembangkan, mengingat luasnya wilayah perairan yang dimiliki, mulai dari kawasan pesisir, estuaria, laut lepas, hingga ekosistem kepulauan tropis yang khas. Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, Indonesia memiliki kekayaan keanekaragaman hayati laut yang luar biasa, termasuk berbagai jenis plankton yang memegang peranan penting dalam dinamika ekosistem perairan. Plankton tidak hanya berperan sebagai penghasil utama dalam rantai makanan laut,

121 tetapi juga memiliki fungsi penting sebagai indikator biologis dalam menilai kondisi dan kualitas lingkungan perairan. Dengan demikian, arah penelitian plankton di masa mendatang perlu difokuskan pada upaya mendukung pengelolaan sumber daya kelautan secara berkelanjutan serta menjaga stabilitas ekosistem laut Indonesia. Dalam konteks nasional, penelitian plankton dapat menjadi dasar ilmiah dalam mendukung kebijakan pengembangan sektor kelautan dan perikanan yang berlandaskan prinsip keberlanjutan. Fitoplankton, misalnya, dapat digunakan untuk menilai produktivitas perairan dan potensi daerah tangkapan ikan. Dengan memantau distribusi dan kelimpahan plankton, para ilmuwan dapat memberikan informasi penting bagi pengelolaan sumber daya perikanan. Selain itu, plankton juga berperan dalam mendeteksi adanya pencemaran laut, eutrofikasi, dan perubahan iklim lokal, sehingga hasil penelitian plankton dapat membantu dalam mitigasi dampak lingkungan di wilayah pesisir dan laut Indonesia. Penelitian mengenai plankton di Indonesia juga memiliki potensi besar dalam pengembangan bioteknologi kelautan. Beberapa jenis fitoplankton seperti *Chlorella*, *Nannochloropsis*, dan *Tetraselmis* diketahui mengandung berbagai senyawa bioaktif, seperti antioksidan, asam lemak esensial, serta pigmen alami, yang berpotensi dimanfaatkan dalam sektor farmasi, pangan, maupun pengembangan energi terbarukan (Sathasivam *et al.* 2019; Zanella and Vianello, 2020). Melalui pendekatan bioteknologi, penelitian plankton dapat dikembangkan untuk menghasilkan produk-produk bernilai ekonomi tinggi seperti suplemen kesehatan, biofuel, serta bahan pakan alami dalam budidaya perikanan (Pereira *et al.* 2022; Calbet, 2024).

Selain itu, penelitian plankton juga berperan penting dalam memahami dinamika ekosistem laut tropis yang khas di Indonesia. Kondisi oseanografi yang beragam, mulai dari laut dangkal hingga perairan dalam, memungkinkan terjadinya variasi komunitas plankton yang sangat kompleks. Kajian plankton di wilayah seperti Laut Banda, Laut Sulawesi, atau perairan Papua Barat dapat memberikan wawasan baru tentang hubungan antara plankton, nutrisi, dan produktivitas laut. Temuan tersebut memiliki peranan yang sangat krusial sebagai dasar dalam perumusan kebijakan pengelolaan kawasan laut yang berlandaskan pendekatan ekosistem (*ecosystem-based management*). Perkembangan teknologi penginderaan jauh dan sistem pemantauan laut modern juga membuka peluang besar bagi penelitian plankton di masa depan. Melalui citra satelit dan sensor oseanografi, para peneliti dapat memantau distribusi fitoplankton secara real-time berdasarkan konsentrasi klorofil-a di permukaan laut. Data ini dapat dikombinasikan dengan pengamatan lapangan untuk memahami dinamika musiman plankton serta dampaknya terhadap produktivitas perairan. Pendekatan ini akan memperkuat sistem pemantauan ekosistem laut nasional dan membantu pemerintah dalam mengambil kebijakan berbasis data ilmiah.

Selain pendekatan teknologi, penelitian plankton di Indonesia ke depan perlu memperhatikan aspek ekotoksikologi dan genotoksikologi. Kajian ini penting untuk memahami bagaimana plankton merespons tekanan lingkungan akibat pencemaran logam berat, mikroplastik, atau bahan kimia berbahaya lainnya. Dengan memahami mekanisme stres genotoksik pada plankton, para ilmuwan dapat mengidentifikasi risiko ekologis terhadap rantai makanan laut serta dampaknya terhadap kesehatan manusia. Penelitian semacam ini juga dapat mendukung pengembangan model risiko ekologis yang relevan untuk kondisi perairan Indonesia. Di sisi lain, tantangan besar bagi penelitian plankton di Indonesia adalah keterbatasan fasilitas laboratorium, peralatan mikroskopi canggih, serta didukung oleh tenaga

ahli yang kompeten dalam bidang taksonomi plankton. Oleh karena itu, penguatan kapasitas penelitian di perguruan tinggi dan lembaga riset kelautan menjadi sangat penting. Pemerintah bersama lembaga penelitian perlu berkolaborasi dalam menyediakan pusat riset plankton nasional yang berfungsi sebagai tempat pelatihan, pengumpulan data, serta publikasi hasil penelitian. Kolaborasi internasional juga perlu ditingkatkan untuk memperluas jejaring riset dan mempercepat transfer teknologi dalam studi plankton.

Selain untuk kepentingan akademik, temuan dari kajian plankton memiliki peluang yang signifikan untuk berkontribusi dalam memperkuat program ketahanan pangan nasional. Plankton menjadi pakan alami utama dalam budidaya ikan dan udang, sehingga pemahaman tentang komposisi dan ketersediaannya dapat meningkatkan efisiensi budidaya perikanan. Penelitian tentang produksi plankton alami, dinamika populasi, dan pengaruh faktor lingkungan terhadap kelimpahannya sangat penting untuk pengembangan teknologi budidaya berbasis ekosistem. Prospek penelitian plankton ke depan juga mencakup kajian mengenai perubahan iklim dan pengaruhnya terhadap plankton di perairan tropis. Indonesia, yang terletak di wilayah garis khatulistiwa, merupakan lokasi ideal untuk mempelajari respon plankton terhadap variasi iklim seperti El Niño dan La Niña. Kajian jangka panjang mengenai pola kelimpahan plankton selama fenomena iklim tersebut dapat membantu memahami dampaknya terhadap produktivitas perikanan nasional. Dengan demikian, penelitian plankton juga memiliki kontribusi besar dalam sistem peringatan dini perubahan iklim laut.

Dengan semakin meningkatnya kesadaran akan pentingnya ekosistem laut, kajian plankton di Indonesia perlu dikembangkan tidak hanya berfokus pada dimensi ekologi, tetapi juga mencakup aspek sosial ekonomi serta kebijakan lingkungan. Sinergi antara hasil penelitian ilmiah dan perumusan kebijakan publik akan menjadi faktor penting dalam memperkuat upaya perlindungan dan pengelolaan laut Indonesia. Pada akhirnya, plankton tidak sekadar dipandang sebagai organisme mikroskopis, melainkan sebagai elemen strategis yang berperan dalam menjaga keberlanjutan ekosistem laut serta mendukung kehidupan manusia yang bergantung padanya. Dengan penguatan riset, inovasi teknologi, dan dukungan kebijakan yang tepat, Indonesia berpeluang menjadi pusat kajian plankton tropis terdepan di dunia.

18

47

BAB XI PENUTUP

11.1 Ringkasan

117 Plankton merupakan elemen kunci dalam ekosistem perairan yang berperan besar dalam menjaga stabilitas lingkungan laut. Kata “plankton” sendiri berasal dari bahasa Yunani planktos yang berarti “mengembara” atau “terhanyut”, mencerminkan cara hidupnya yang mengikuti pergerakan arus. Kehadirannya tidak hanya menjadi fondasi dalam jaringan makanan laut, tetapi juga berkontribusi terhadap tingkat produktivitas primer di perairan. Melalui aktivitas fotosintesis oleh fitoplankton, energi sinar matahari dikonversi menjadi energi kimia yang selanjutnya dimanfaatkan oleh berbagai organisme laut lainnya. Sejarah kajian plankton telah dimulai sejak abad ke-19 ketika para ilmuwan laut mulai meneliti kehidupan mikroskopis di perairan. Studi awal ini mengungkap bahwa meskipun ukurannya sangat kecil, plankton memberikan kontribusi yang sangat signifikan terhadap keberlangsungan sistem kehidupan di lingkungan laut. Seiring perkembangan teknologi mikroskopi dan metode oseanografi, penelitian plankton semakin mendalam dan mencakup berbagai aspek, mulai dari taksonomi, ekologi, fisiologi, hingga peranannya dalam biogeokimia laut. Saat ini, kajian plankton telah menjadi salah satu cabang penting dalam ilmu kelautan modern.

Pentingnya plankton dalam ekosistem laut tidak dapat dilepaskan dari perannya sebagai produsen utama. Fitoplankton, yang merupakan jenis plankton autotrof, menghasilkan sekitar 50% oksigen di atmosfer bumi melalui proses fotosintesis. Selain itu, plankton menjadi sumber energi untuk berbagai makhluk laut, mulai dari zooplankton hingga ikan besar dan mamalia laut. Dengan demikian, keberadaan plankton menjadi fondasi kehidupan di laut dan berpengaruh langsung terhadap ketersediaan sumber daya perikanan. Selain berperan dalam rantai makanan, plankton juga berkontribusi terhadap siklus biogeokimia global. Melalui proses penyerapan karbon dioksida dan penyimpanan karbon di dasar laut (biological pump), plankton berperan penting dalam mengurangi efek gas rumah kaca. Proses ini membantu menjaga kestabilan iklim bumi. Dengan kata lain, plankton tidak hanya penting bagi ekosistem laut, tetapi juga bagi keseimbangan atmosfer dan kehidupan di daratan.

36 Bagi ilmu kelautan, studi tentang plankton memiliki nilai ilmiah yang sangat tinggi. Kajian plankton digunakan untuk memantau perubahan lingkungan, kualitas air, dan dinamika ekosistem laut. Karena memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi terhadap variasi suhu, salinitas, serta ketersediaan nutrisi, plankton kerap dimanfaatkan sebagai bioindikator dalam kajian lingkungan perairan. Data yang dihasilkan dari penelitian plankton dapat menjadi fondasi untuk pengelolaan sumber daya laut dan pelestarian keanekaragaman hayati, hingga pengendalian dampak perubahan iklim. Dari sisi pemanfaatannya, plankton juga memberikan beragam manfaat yang penting bagi kehidupan manusia. Selain menjadi dasar dalam rantai makanan laut yang mendukung sektor perikanan, beberapa jenis plankton memiliki potensi ekonomi tinggi, misalnya dalam bidang farmasi, kosmetik, dan industri pangan. Fitoplankton seperti Spirulina dan Chlorella telah dimanfaatkan sebagai sumber protein, antioksidan, dan suplemen kesehatan. Sementara itu, beberapa senyawa bioaktif yang dihasilkan oleh plankton menjadi bahan dasar dalam pengembangan obat dan antibiotik.

31 Klasifikasi plankton dapat dilakukan berdasarkan berbagai kriteria, seperti ukuran, fungsi, dan siklus hidup. Berdasarkan ukuran, plankton dibedakan menjadi pikoplankton, nanoplankton, mikrop plankton, dan makrop plankton. Pikoplankton merupakan yang terkecil dan

sering ditemukan dalam jumlah sangat banyak di laut terbuka, sementara makroplankton seperti ubur-ubur dapat terlihat dengan mata telanjang. Klasifikasi ini membantu para ilmuwan memahami struktur komunitas plankton dan interaksinya dalam jaring makanan laut. Dilihat dari perannya dalam ekosistem, plankton dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu fitoplankton, zooplankton, dan mixoplankton. Fitoplankton berfungsi sebagai penghasil utama yang memproduksi energi melalui proses fotosintesis. Zooplankton bertindak sebagai konsumen tingkat awal yang memanfaatkan fitoplankton sebagai sumber makanan. Sementara itu, mixoplankton memiliki sifat kombinatif, karena mampu melakukan fotosintesis sekaligus memangsa organisme berukuran lebih kecil. Pembagian ini mencerminkan kompleksitas hubungan antarplankton dalam sistem ekologi laut.

Dari sisi siklus hidup, plankton dibagi menjadi holoplankton dan meroplankton. Holoplankton hidup sepenuhnya dalam bentuk planktonik sepanjang hidupnya, sementara meroplankton hanya berada dalam fase planktonik pada tahap larva atau juvenil sebelum menjadi organisme dewasa. Keberadaan meroplankton sangat penting dalam proses penyebaran spesies laut dan pemeliharaan keanekaragaman hayati ekosistem. Faktor-faktor lingkungan seperti intensitas cahaya, suhu, ketersediaan nutrisi, salinitas, dan dinamika arus sangat memengaruhi variasi jenis dan kelimpahan plankton di suatu perairan. Sebagai contoh, pertumbuhan fitoplankton dalam jumlah besar biasanya akan didorong oleh perairan yang memiliki kandungan nutrisi tinggi, yang pada gilirannya akan menyebabkan populasi zooplankton dan organisme laut lainnya meningkat. Sebaliknya, perubahan iklim yang mengganggu sirkulasi arus laut dapat memengaruhi distribusi plankton secara global.

Pemantauan plankton secara berkala sangat penting dalam kegiatan penelitian kelautan. Data mengenai komposisi dan kelimpahan plankton digunakan untuk menilai kesehatan ekosistem laut dan mendeteksi adanya pencemaran. Beberapa jenis plankton bahkan dapat menyebabkan fenomena blooming atau ledakan populasi, yang jika berlebihan bisa berbahaya, seperti pada kasus *Harmful Algal Blooms* (HABs). Oleh karena itu, pemahaman yang baik tentang dinamika populasi plankton menjadi kunci dalam pengelolaan lingkungan laut yang berkelanjutan. Dalam konteks perubahan iklim global, plankton juga memainkan peran sebagai indikator awal. Perubahan suhu laut dan tingkat keasaman (pH) dapat mempengaruhi reproduksi dan metabolisme plankton, yang pada gilirannya berdampak pada rantai makanan laut secara keseluruhan. Studi jangka panjang terhadap plankton dapat membantu mengantisipasi efek perubahan iklim terhadap produktivitas laut dan keseimbangan ekosistem.

Ilmu planktonologi tidak hanya penting bagi penelitian akademik, tetapi juga memiliki nilai aplikatif dalam dunia industri dan konservasi. Data plankton dapat digunakan untuk menentukan wilayah perikanan potensial, memprediksi musim penangkapan ikan, serta menilai tingkat kesuburan perairan. Selain itu, penelitian tentang senyawa bioaktif yang dihasilkan oleh plankton membuka peluang besar bagi pengembangan industri berbasis bioteknologi kelautan. Peran plankton juga tidak dapat dilepaskan dari hubungan simbiotik dengan organisme lain. Banyak jenis plankton yang hidup bersimbiosis dengan karang, ikan, maupun organisme mikroskopis lainnya. Hubungan ini memperkuat ketahanan ekosistem laut dan membantu menjaga siklus energi serta materi di dalamnya. Gangguan terhadap populasi plankton dapat menyebabkan ketidakseimbangan yang serius pada seluruh sistem ekologi laut.

Dengan demikian, kajian tentang plankton menjadi sangat penting dalam mendukung konsep pembangunan berkelanjutan di wilayah pesisir dan laut. Pengetahuan tentang plankton

179

dapat digunakan untuk menyusun kebijakan pengelolaan perairan yang berwawasan ekologi dan ramah lingkungan. Pemanfaatan sumber daya laut perlu dilakukan dengan memperhatikan keberlanjutan populasi plankton agar keseimbangan ekosistem tetap terjaga. Karena keanekaragaman kehidupan plankton, menjadi salah satu subjek penelitian yang menarik bagi akademisi. Untuk memahami peran penting plankton dalam sistem bumi, berbagai bidang ilmu bekerja sama untuk mengkaji plankton, termasuk biologi laut, kimia laut, fisika laut, dan klimatologi.

Selain sebagai komponen ekologi, plankton juga berperan dalam pendidikan dan penelitian dasar di bidang kelautan. Studi tentang plankton dapat membantu mahasiswa dan peneliti memahami konsep dasar ekologi perairan, rantai makanan, dan siklus biogeokimia. Hal ini menjadikan plankton sebagai salah satu materi penting dalam kurikulum pendidikan kelautan. Dalam konteks sosial ekonomi, keberadaan plankton yang mendukung produktivitas ikan dan biota laut lainnya memiliki dampak langsung terhadap kesejahteraan masyarakat pesisir. Ketika populasi plankton menurun akibat pencemaran atau perubahan lingkungan, hasil tangkapan ikan juga menurun, yang akhirnya berpengaruh terhadap ekonomi masyarakat. Oleh karena itu, menjaga kelestarian plankton berarti juga menjaga sumber penghidupan masyarakat pesisir. Sehingga dapat disimpulkan bahwa plankton adalah makhluk kecil dengan peran besar bagi kehidupan di bumi. Ia bukan hanya dasar rantai makanan laut, tetapi juga pengatur siklus karbon, penghasil oksigen, dan indikator kesehatan ekosistem. Pemahaman yang mendalam tentang plankton akan membuka jalan bagi pengelolaan laut yang lebih bijak, berkelanjutan, dan berpihak pada keseimbangan alam. Dengan memperkuat penelitian dan kesadaran tentang pentingnya plankton, manusia dapat memastikan kelangsungan hidup ekosistem laut bagi generasi mendatang.

11.2 Arah Pengembangan Ilmu Plankton

Ilmu plankton merupakan salah satu cabang penting dalam ilmu kelautan yang terus berubah sesuai dengan kemajuan teknologi dan meningkatnya kesadaran terhadap pentingnya ekosistem laut. Pengembangan ilmu ini diarahkan tidak hanya untuk memahami keberadaan dan peranan plankton dalam rantai makanan laut, tetapi juga untuk menjawab masalah global seperti perubahan iklim, pencemaran laut, dan degradasi lingkungan pesisir. Dengan kemajuan penelitian di bidang bioteknologi, oseanografi, dan ekologi molekuler, kajian tentang plankton kini telah melampaui batas pengamatan morfologis menuju pemahaman yang lebih mendalam pada tingkat genetika dan fungsi ekologisnya. Salah satu arah utama pengembangan ilmu plankton adalah dalam konteks monitoring perubahan iklim global. Melalui fotosintesis, plankton memainkan peran penting dalam siklus karbon laut dan penyimpanan karbon di lapisan laut dalam. Dengan kemampuan ini, fitoplankton dapat menjadi indikator alami dalam mempelajari perubahan iklim. Penelitian ke depan akan lebih difokuskan pada pemetaan sebaran dan produktivitas plankton menggunakan teknologi penginderaan jauh dan sistem pemantauan satelit untuk mengetahui dinamika perairan secara real time.

Selain itu, arah pengembangan lainnya adalah pada kajian biodiversitas dan genetik plankton. Penggunaan metode molekuler seperti DNA barcoding dan metagenomics memungkinkan identifikasi spesies plankton secara lebih akurat, bahkan terhadap spesies yang tidak dapat diamati dengan mikroskop konvensional. Pendekatan ini penting untuk memahami keanekaragaman hayati laut yang belum sepenuhnya terungkap serta memetakan hubungan

evolusioner antarspesies plankton di berbagai wilayah perairan dunia. Dalam bidang bioteknologi kelautan, plankton menjadi sumber potensial bagi senyawa bioaktif yang dapat digunakan di area farmasi, pangan, dan energi terbarukan. Banyak penelitian menunjukkan bahwa plankton menghasilkan sejumlah metabolit sekunder yang berbeda seperti pigmen, lipid, dan antioksidan yang bernilai ekonomi tinggi. Oleh karena itu, arah pengembangan ilmu plankton juga diarahkan untuk mengeksplorasi potensi bioprospeksi plankton laut dalam sebagai bahan baku inovatif bagi industri masa depan.

Dari sisi ekologi dan konservasi, kajian terhadap plankton berperan sebagai pijakan utama dalam mempertahankan stabilitas ekosistem laut. Keberadaan plankton yang sensitif terhadap perubahan lingkungan menjadikannya indikator awal bagi gangguan ekosistem seperti eutrofikasi, pencemaran logam berat, dan ledakan populasi alga berbahaya (*Harmful Algal Blooms*). Oleh sebab itu, pengembangan ilmu plankton diarahkan pada pembentukan sistem peringatan dini berbasis data plankton untuk memantau kesehatan laut secara berkelanjutan. Kemajuan teknologi digital dan big data juga menjadi peluang besar dalam pengembangan ilmu plankton. Penggunaan kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin kini mulai diterapkan dalam analisis citra plankton, prediksi dinamika populasi, serta deteksi pola perubahan ekosistem laut. Sistem ini memungkinkan para peneliti memperoleh hasil yang cepat, akurat, dan efisien dalam skala global, sekaligus membuka kolaborasi lintas negara melalui platform data terbuka.

Dari aspek pendidikan dan penelitian, arah pengembangan ilmu plankton perlu didukung dengan integrasi multidisiplin ilmu. Penelitian tentang plankton tidak hanya melibatkan biologi laut, tetapi juga kimia, fisika, geologi, dan ilmu komputer. Kolaborasi antarbidang ini penting untuk memahami peran plankton secara menyeluruh dalam sistem oseanografi. Selain itu, kurikulum pendidikan kelautan juga perlu menekankan pentingnya studi plankton melalui kegiatan praktikum, riset lapangan, dan pengolahan data berbasis teknologi modern. Dalam konteks kebijakan, kajian mengenai plankton dapat berfungsi sebagai landasan ilmiah dalam upaya pengelolaan sumber daya kelautan yang berkelanjutan. Data mengenai produktivitas plankton dapat digunakan untuk menentukan wilayah penangkapan ikan yang potensial tanpa merusak ekosistem. Selain itu, informasi tentang distribusi plankton juga penting dalam penetapan kawasan konservasi laut dan pengendalian pencemaran di perairan pesisir. Dengan demikian, hasil penelitian plankton berkontribusi langsung terhadap kebijakan pengelolaan lingkungan laut yang berbasis sains.

Pengembangan ilmu plankton juga diarahkan pada penguatan sistem observasi laut nasional dan global. Pemasangan sensor otomatis di kapal penelitian, pelampung laut (buoy), dan stasiun pemantau dapat memperkaya basis data tentang dinamika plankton. Kolaborasi internasional telah membuka jalan bagi pertukaran data ilmiah untuk memahami perubahan ekosistem laut secara global. Selain manfaat ekologis dan ilmiah, arah pengembangan plankton di masa depan juga mencakup pemanfaatan energi hijau dari plankton. Mikroalga tertentu memiliki kemampuan menghasilkan minyak alami yang dapat diolah menjadi biodiesel. Kajian di bidang ini diharapkan mampu berkontribusi dalam percepatan peralihan menuju energi bersih sekaligus menekan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Oleh sebab itu, plankton berpotensi dimanfaatkan sebagai alternatif dalam pengembangan sumber energi terbarukan yang lebih berwawasan lingkungan.

15

Dalam menghadapi tantangan lingkungan seperti polusi laut dan perubahan suhu global, pengembangan ilmu plankton perlu memperkuat riset adaptasi ekosistem. Peneliti harus memahami bagaimana komunitas plankton beradaptasi terhadap kondisi ekstrem seperti peningkatan suhu, penurunan pH laut (pengasaman laut), dan perubahan arus. Pengetahuan ini akan membantu dalam upaya mitigasi dampak perubahan iklim terhadap produktivitas laut dan rantai makanan global. Arah penelitian juga mencakup pembangunan basis data plankton Indonesia, menyadari bahwa kawasan perairan Indonesia dikenal memiliki tingkat keanekaragaman hayati laut yang sangat melimpah. Dengan kondisi geografis yang strategis di antara dua samudra, Indonesia memiliki potensi besar untuk menjadi pusat riset plankton tropis dunia. Pengembangan pusat data nasional plankton akan membantu peneliti dalam memantau kondisi laut dan menyediakan data krusial yang dapat dijadikan dasar dalam manajemen sumber daya pesisir yang berkelanjutan.

Selanjutnya, penting juga dilakukan pengembangan metode sampling dan identifikasi plankton yang lebih efisien. Inovasi alat seperti plankton imaging analyzer dan automated sampler memungkinkan pengumpulan data dalam waktu singkat dan dengan ketepatan tinggi. Perkembangan metode ini akan mendukung penelitian skala besar dan memperluas pemahaman tentang dinamika populasi plankton di berbagai tipe perairan. Pengembangan ilmu plankton juga diarahkan untuk memperkuat kolaborasi antara akademisi, pemerintah, dan industri. Kerja sama ini diperlukan agar hasil penelitian tidak hanya berhenti di laboratorium, tetapi juga dapat diterapkan dalam praktik pengelolaan laut, pengembangan industri kelautan, serta inovasi produk berbasis sumber daya mikroorganisme laut.

Selain aspek ilmiah, pengembangan ilmu plankton juga harus memperhatikan aspek sosial dan edukatif. Meningkatkan pengetahuan masyarakat tentang manfaat plankton dalam menjaga kehidupan laut menjadi langkah awal untuk mendorong partisipasi publik dalam pelestarian ekosistem laut. Edukasi ini dapat dilakukan melalui program kampanye lingkungan, pameran kelautan, dan kegiatan pembelajaran berbasis ekowisata laut. Secara umum, arah pengembangan ilmu plankton di masa depan menekankan integrasi antara riset dasar, riset terapan, dan inovasi teknologi. Ketiga elemen ini menjadi fondasi dalam membangun pemahaman menyeluruh tentang peran plankton di Bumi. Riset dasar membantu memahami aspek biologi dan ekologi plankton, riset terapan mengarah pada pemanfaatan ekonomi dan pengelolaan lingkungan, sementara inovasi teknologi mempercepat proses pengumpulan dan analisis data. Melalui penerapan prinsip keberlanjutan, kajian tentang plankton berpotensi berperan strategis sebagai sarana dalam menjawab berbagai isu global, termasuk menjaga ketersediaan pangan berbasis laut, menekan dampak perubahan iklim, serta mengoptimalkan pengelolaan sumber daya perairan. Melalui pengembangan ilmu ini, diharapkan manusia dapat memahami lebih dalam tentang sistem kehidupan laut yang kompleks dan saling terhubung. Akhirnya, arah pengembangan ilmu plankton harus senantiasa berpijak pada prinsip keberlanjutan, konservasi, dan kemanfaatan bagi umat manusia. Plankton bukan sekadar organisme mikroskopis, melainkan penopang kehidupan di lautan dan di bumi. Dengan riset yang konsisten, dukungan kebijakan, dan kesadaran ekologis yang tinggi, ilmu plankton akan terus berkembang menjadi fondasi penting bagi ilmu kelautan modern dan bagi masa depan keberlanjutan planet kita.

11.3 Relevansi dengan Pembangunan Kelautan Berkelanjutan

69 Plankton memiliki relevansi yang sangat besar terhadap pembangunan kelautan berkelanjutan karena perannya yang fundamental dalam menjaga keseimbangan ekosistem laut. Sebagai organisme penghasil utama dalam rantai makanan, fitoplankton menjadi sumber energi utama dalam rantai makanan laut yang menopang kehidupan berbagai organisme mulai dari zooplankton, ikan kecil, hingga predator besar. Tanpa keberadaan plankton, produktivitas ekosistem laut akan menurun secara drastis, sehingga mengancam keberlanjutan sumber daya perikanan yang menjadi tumpuan ekonomi masyarakat pesisir. Akibatnya, pemahaman mendalam mengenai fungsi dan kontribusi plankton menjadi landasan krusial dalam merancang serta mengimplementasikan pembangunan sektor kelautan yang menitikberatkan pada keberlanjutan ekosistem.

37 Plankton berfungsi sebagai bioindikator kesehatan ekosistem laut. Perubahan komposisi dan kelimpahan plankton dapat menggambarkan kondisi lingkungan perairan, baik akibat pencemaran, eutrofikasi, maupun perubahan iklim. Dengan demikian, pemantauan plankton secara berkala dapat dijadikan instrumen ilmiah dalam sistem pengawasan kualitas air laut dan perairan pesisir. Informasi tersebut berperan penting dalam kebijakan pengelolaan sumber daya laut yang didasarkan pada data ilmiah dan pendekatan ekosistem. Selain sebagai indikator lingkungan, plankton juga berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim global. Melalui proses fotosintesis, fitoplankton mengambil karbon dioksida dari atmosfer dan bertanggung jawab untuk mengalirkannya ke laut dalam melalui proses yang disebut sebagai pipa karbon biologi. Proses ini membantu mengurangi konsentrasi karbon di atmosfer dan menekan laju pemanasan global. Menjaga stabilitas populasi fitoplankton di ekosistem laut menjadi salah satu upaya strategis dalam menghadapi perubahan iklim serta mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG 13).

61 Keberadaan plankton juga berperan penting dalam menjaga ketahanan pangan laut. Sebagai produsen primer di perairan, fitoplankton menopang rantai makanan yang mendukung keberadaan ikan dan biota laut lain yang dimanfaatkan manusia sebagai sumber protein, termasuk masyarakat pesisir Indonesia. Pembangunan kelautan yang memperhatikan kesehatan ekosistem plankton akan mendukung keberlanjutan hasil tangkapan ikan dan industri perikanan. Dengan kata lain, pengelolaan perairan yang berkelanjutan tidak hanya memastikan kelestarian lingkungan, tetapi juga menjamin ketersediaan sumber pangan laut dalam jangka panjang. Dari sisi ekonomi biru (*blue economy*), plankton memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan secara berkelanjutan. Pemanfaatan mikroalga telah berkembang luas, termasuk sebagai bahan utama dalam pembuatan produk farmasi, kosmetik, dan pangan fungsional. Pengembangan industri berbasis bioteknologi kelautan yang memanfaatkan plankton secara bijak dapat memberikan nilai tambah ekonomi tanpa merusak ekosistem. Ini sejalan dengan konsep ekonomi biru, yang menekankan pada keseimbangan antara pelestarian ekosistem dan pemanfaatan sumber daya laut.

107 Pemahaman tentang ekologi plankton membantu menentukan kawasan yang memiliki produktivitas tinggi dan penting bagi kelangsungan hidup biota laut. Data plankton digunakan untuk mengidentifikasi daerah nursery ground dan feeding ground ikan yang perlu dijaga dari aktivitas eksploitasi berlebihan. Upaya ini mendukung tujuan pembangunan kelautan berkelanjutan yang menekankan perlindungan terhadap keanekaragaman hayati laut dan pemeliharaan fungsi ekosistem. Plankton juga berperan penting dalam pengendalian

pencemaran laut. Komunitas plankton sangat sensitif terhadap zat pencemar seperti logam berat, pestisida, dan limbah industri. Dengan melakukan studi tentang respons plankton terhadap polutan, peneliti dapat menilai tingkat kerusakan ekosistem secara dini. Informasi ini dapat dijadikan dasar dalam penerapan kebijakan pengelolaan limbah berbasis ekosistem dan penegakan hukum lingkungan di wilayah pesisir.

Relevansi plankton terhadap pembangunan kelautan berkelanjutan juga terlihat dari kontribusinya dalam penelitian dan inovasi teknologi ramah lingkungan. Kajian plankton menjadi dasar dalam pengembangan sistem pemantauan laut otomatis, teknologi penginderaan jauh, serta model ekosistem laut yang digunakan untuk memprediksi perubahan lingkungan. Inovasi tersebut mendukung perencanaan kebijakan kelautan yang adaptif terhadap dinamika ekosistem dan perubahan iklim global. Selain itu, pembangunan kelautan berkelanjutan memerlukan pendekatan interdisipliner yang mengintegrasikan ilmu planktonologi dengan oseanografi, biogeokimia, dan kebijakan lingkungan. Melalui kolaborasi antar bidang, pengelolaan sumber daya laut dapat dilakukan dengan mempertimbangkan hubungan antar komponen ekosistem, termasuk plankton sebagai fondasi produktivitas laut. Melalui pendekatan ini, pembangunan di bidang kelautan diarahkan tidak hanya untuk meningkatkan nilai ekonomi, tetapi juga untuk melindungi dan mempertahankan keseimbangan ekosistem laut.

Pengembangan penelitian plankton di Indonesia memiliki relevansi strategis karena wilayah perairannya yang luas dan kaya biodiversitas. Dengan sekitar dua pertiga wilayahnya berupa laut, Indonesia memiliki potensi yang sangat luas dalam pengembangan kajian ilmiah mengenai plankton tropis. Hasil penelitian plankton dapat digunakan untuk mendukung kebijakan pengelolaan perikanan berkelanjutan, konservasi terumbu karang, serta pengendalian pencemaran di wilayah pesisir. Dengan demikian, ilmu plankton dapat menjadi fondasi ilmiah bagi pembangunan kelautan nasional yang berwawasan lingkungan. Pembangunan kelautan berkelanjutan juga menekankan pentingnya edukasi dan kesadaran masyarakat. Pemahaman tentang peran plankton dalam menjaga kehidupan laut perlu disebarluaskan melalui pendidikan formal maupun kegiatan penyuluhan di masyarakat pesisir. Kesadaran bahwa kehidupan di laut bergantung pada organisme mikroskopis seperti plankton dapat menumbuhkan rasa tanggung jawab kolektif dalam menjaga kelestarian laut.

Di ekosistem pesisir, plankton turut berkontribusi dalam mempertahankan keseimbangan lingkungan. Fitoplankton, melalui aktivitas fotosintesisnya, membantu menyediakan oksigen terlarut yang mendukung kehidupan biota laut. Sementara itu, zooplankton berkontribusi dalam daur ulang materi organik, sehingga mendukung proses biogeokimia yang menjaga kesuburan perairan. Dengan demikian, keberadaan plankton menjadi penentu stabilitas ekosistem pesisir yang sehat dan produktif. Dalam jangka panjang, ilmu plankton memiliki relevansi besar terhadap pengambilan keputusan berbasis sains (*science-based policy*) di bidang kelautan. Informasi tentang kelimpahan dan komposisi plankton dapat digunakan untuk menilai daya dukung lingkungan laut, menentukan zona tangkap yang aman, serta merancang kebijakan mitigasi terhadap fenomena alam seperti blooming algae. Pengelolaan laut yang efektif dan berkelanjutan memerlukan dasar ilmiah yang kuat agar kebijakan yang diterapkan mampu menyesuaikan diri dengan berbagai perubahan kondisi.

Plankton juga dapat mendukung pengembangan teknologi energi terbarukan, khususnya melalui mikroalga penghasil biofuel. Potensi ini dapat membantu mengurangi ketergantungan

150
171
37

terhadap energi fosil sekaligus mendukung transisi menuju energi hijau. Dengan pengelolaan yang tepat, eksplorasi plankton untuk energi dapat menjadi bagian dari strategi pembangunan kelautan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Kondisi komunitas plankton juga memiliki keterkaitan yang kuat dengan stabilitas ekonomi dan sosial masyarakat yang tinggal di pesisir. Sumber daya perikanan, yang selama ini menjadi sumber penghasilan utama bagi banyak masyarakat pesisir, akan terus bertahan jika ada plankton yang hidup. Oleh karena itu, pemahaman mengenai dinamika plankton di perairan menjadi sangat penting dalam upaya pengelolaan sumber daya laut. Melalui pengetahuan tersebut, pemerintah bersama masyarakat dapat merancang strategi pengelolaan perikanan yang lebih bijaksana agar produktivitas perairan tetap terpelihara tanpa mengabaikan kelestarian ekosistemnya. Dengan demikian, keberlanjutan plankton tidak hanya berhubungan dengan keseimbangan ekologi, tetapi juga berkaitan erat dengan keberlangsungan ekonomi serta kesejahteraan sosial masyarakat pesisir dalam kerangka pembangunan berkelanjutan.

Plankton memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan sistem bumi di seluruh dunia. Keberadaan organisme mikroskopis ini berkontribusi besar terhadap produksi oksigen di atmosfer serta menjadi dasar rantai makanan di ekosistem laut. Apabila plankton mengalami penurunan yang signifikan, maka tidak hanya ketersediaan oksigen yang berpotensi berkurang, tetapi juga kestabilan jaringan trofik laut dapat terganggu. Oleh sebab itu, upaya pembangunan kelautan yang berkelanjutan perlu menempatkan perlindungan terhadap organisme plankton sebagai salah satu prioritas utama. Berbagai strategi pengelolaan lingkungan laut, seperti konservasi ekosistem laut, pengelolaan wilayah pesisir, hingga upaya mitigasi perubahan iklim, perlu memperhatikan keberlanjutan komunitas plankton. Hal ini menunjukkan bahwa peranan plankton dalam pembangunan kelautan berkelanjutan tidak hanya berkaitan dengan dimensi ekologis, tetapi juga memiliki implikasi terhadap aspek ekonomi, sosial, dan kebijakan pengelolaan sumber daya. Dengan demikian, plankton dapat dipandang sebagai dasar utama kehidupan di laut yang memengaruhi produktivitas, kestabilan, dan keberlanjutan ekosistem perairan. Melalui penguatan penelitian ilmiah, pengembangan pendidikan, serta penerapan kebijakan yang tepat, pemahaman dan perlindungan terhadap plankton dapat menjadi langkah strategis untuk mewujudkan kondisi laut yang sehat, produktif, dan berkelanjutan bagi generasi masa kini maupun masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abubakar, S., Akbar, N., Baksir, A., Umasangadji, H., Najamuddin, N., Tahir, I., Paembonan, R. E., & Ismail, F. 2021. Distribusi Spasial Dan Temporal Fitoplankton di Perairan Laut Tropis. *J. Kelaut. Indones. J. Mar. Sci. Technol.*, 14(2): 149–163.
- Adam, C., & Haryono, A. 2023. The identification of Euglenids (Euglenophyceae, Euglenophyta) from the peat waters of Palangka Raya, Indonesia. *J. Multidiscip. Appl. Nat. Sci.*, 3(1): 81–89.
- Adani, N. G., Muskanonfola, M. R., & Hendarto, I. B. (2013). Kesuburan perairan ditinjau dari kandungan klorofil-a fitoplankton: studi kasus di Sungai Wedung, Demak. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/maquares>
- Adiwilaga, E. M., & Damar, A. 2004. Produktivitas primer fitoplankton dan keterkaitannya dengan unsur hara dan cahaya di perairan teluk banten 1 (Phytoplankton Primary Productivity and its Relationship to Nutrients and Light Availabilities in Banten Bay). 1: 21–26.
- Afifah, K., & Purnomo, T. 2025. The Abundance and Diversity of Plankton as a Bioindicator of the Quality of Coastal Waters of the Coastal Fishing Site of Paiton District of Probolinggo. *Lentera Bio*, 14(1): 92–104.
- Ahmad Kamal, A. H., Mohd Hamidi, N. F., Zakaria, M. F., Ahmad, A., Harun, M. R., Chandra Segaran, T., & Jusoh, M. 2024. Genetically engineered microalgae for enhanced bioactive compounds. *Discov. Appl. Sci.*, 6(9): 482.
- Aini, S., Sudino, D., Putra, A., Nuraini, Y., Maulita, M., Ramadhanty, N. R., Hamdani, H., Aulia, D., & Suriadin, H. 2023. Estimasi Potensi Produksi Ikan DI Danau Singkarak Sumatera Barat Berdasarkan Nilai Klorofil-A Dan Kelimpahan Fitoplankton. *J. Indones. Trop. Fish. J. Akuakultur, Teknol. Dan Manaj. Perikan. Tangkap Dan Ilmu Kelaut.*, 6(1): 79–85.
- Aisyah, D., Ramadhani, A. W., Fattah, M., Sofiati, D., & Anandya, A. 2023. Pengaruh kelimpahan plankton dan kualitas air terhadap performa pertumbuhan udang vanname pada sistem budidaya intensif. *J. Lemuru*, 5(2): 173–182.
- Ajani, P. A., Davies, C. H., Eriksen, R. S., & Richardson, A. J. 2020. Global Warming Impacts Micro-Phytoplankton at a Long-Term Pacific Ocean Coastal Station. *Front. Mar. Sci.*, 7(October): 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.576011>
- Akbarurrasyid, M., Prajayanti, V. T. F., Nurkamalia, I., & Gunawan, B. I. 2022. Struktur komunitas plankton sebagai indikator produksi budidaya udang vaname (*Penaeus vannamei*). *J. Ris. Akuakultur*, 249–263.
- Akbarurrasyid, M., Prajayati, V. T. F., Katresna, M., Sudinno, D., & Sofian, A. 2024. Keanekaragaman temporal plankton sebagai bioindikator kualitas lingkungan di area tambak budidaya udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*). *J. Perikan. Unram*, 13(3): 783–795. <https://doi.org/10.29303/jp.v13i3.621>
- Akbarurrasyid, M., Taru, V., Prajayanti, F., & Nurkamalia, I. 2023. Struktur komunitas plankton sebagai indikator produksi budidaya udang vaname (*Penaeus vannamei*). 17(4): 249–263.

- Ali, M., & Siti Nurul. 2016. Kualitas fisika dan kimia air Waduk Batutegi Lampung [Water quality of physics and chemistry of Batutegi Lampung Reservoir]. 8(2): 25–32.
- Aly, S. M., ElBanna, N. I., & Fathi, M. 2024. Chlorella in aquaculture: challenges, opportunities, and disease prevention for sustainable development. *Aquac. Int.*, 32(2): 1559–1586.
- Alyaniazy, S., Tiyas, P. R., Ma'arif, N. I., & Sari, A. N. 2023. TEKNIK KULTUR FITOPLANKTON CHLORELLA VULGARIS SEBAGAI PAKAN ALAMI IKAN KERAPU CANTANG: PHYTOPLANKTON CHLORELLA VULGARIS CULTURE TECHNIQUE AS NATURAL FEED FOR CANTANG GROUPER. *JFMR (Journal Fish. Mar. Res.)*, 7(3): 89–96.
- Amrillah, A. M., Salamah, L. N., Amin, A. A., Syaifullah, Rangkuti, R. F. A., Mahariawan, I. M. D., Adhihapsari, W., Yanuar, A. T., & Setyoningrum, D. 2023. *Biomonitoring Lingkungan Akuatik*. UB Press.
- Andersen P. 1996. Design and implementation of some harmful algal monitoring systems. IOC-UNESCO. 110p.
- Anderson DM, Gilbert PM, Burkholder JM. 2002. Harmful Algal Blooms and Eutrophication: Nutrient Sources, Composition and Consequences. *Estuaries*. 25:704-726.
- Anggraini, M. V, Permatasari, I. N., & Kisnarti, E. A. 2024. Pengaruh Perubahan Temperatur dan Nutrisi Terhadap Kelimpahan Fitoplankton. *J. Ris. Kelaut. Trop. (Journal Trop. Mar. Res.)*, 6(1): 49–63.
- Angon, P. B., Islam, M. S., KC, S., Das, A., Anjum, N., Poudel, A., & Suchi, S. A. 2024. Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. 10(7): e28357. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2024.E28357>
- Apriani, R., Astuti, S. P., Candri, D. A., Ahyadi, H., & Novida, S. 2022. LOMBOK TENGAH Program Studi Biologi , FMIPA , Universitas Mataram , Indonesia Program Studi Ilmu Lingkungan , FMIPA , Universitas Mataram , Indonesia Program Studi Agribisnis , Fakultas Pertanian , Universitas Islam Al Azhar Mataram , Indonesia PENDAHULUAN. *Biosci. J. Ilm. Biol. Biol.*, 10(1): 322–332.
- Apriani, R., Astuti, S. P., Candri, D. A., Ahyadi, H., Suropto, S., & Novida, S. (2022). Keanekaragaman Fitoplankton di Padang Lamun Kawasan Pesisir Mandalika Kabupaten Lombok Tengah. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 10(1), 322. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v10i1.5260>
- Arenas Colarte, C., Balic, I., Díaz, Ó., Moreno, A. A., Amenabar, M. J., Bruna Larenas, T., & Caro Fuentes, N. 2025. High-Value Bioactive Molecules Extracted from Microalgae. 13(9): 2018.
- Arista, R. (2025). Potensi blooming alga pada air sungai di desa jumeneng kecamatan mojoanyar kabupaten mojokerto (Vol. 1, Issue 1).
- Arnone, M. I., Byrne, M., & Martinez, P. 2015. Echinodermata. In *Evolutionary developmental biology of invertebrates 6: Deuterostomia* (pp. 1–58). Springer.
- Arsad, S., Putra, K. T., Latifah, N., Kadim, M. K., & Musa, M. 2021. Epiphytic microalgae community as aquatic bioindicator in brantas river, east java, indonesia. 22(7): 2961–2971. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220749>
- Arumugham, S., Joseph, S. J. P., P M, G., Nooruddin, T., & Subramani, N. 2023. Diversity and ecology of freshwater diatoms as pollution indicators from the freshwater Ponds of

- Kanyakumari district, Tamilnadu. 9(March 2022): 100164.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100164>
- Aryawati R, Bengen DG, Prartono T, Zulkifli H. 2016. Harmful algal in Banyuasin coastal waters, South Sumatera. *Biosaintifika*. 8(2) : 231 – 239
- Aryawati R, Surbakti H, Ulqodry TZ. 2005. Hubungan kondisi oseanografi dengan kelimpahan fitoplankton di Perairan Banyuasin. *Pemanfaatan dan Pengelolaan Perairan Umum secara Terpadu bagi Generasi Sekarang dan Mendatang*. 2004 Juli 27-29. Palembang: BRPPU.
- Aryawati, R., D.G. Bengen, T. Prartono, and H. Zulkifli. 2017. Abundance of phytoplankton in the coastal waters of South Sumatera. *Ilmu Kelautan*. 22(1) : 31 - 39.
- Aryawati, R., Melki, Azhara, I., T. Z. Ulqodry, dan M. Hendri. 2023. Keragaman Fitoplankton dan Potensi Harmful Algal Blooms (HABs) di Perairan Sungai Musi Bagian Hilir Provinsi Sumatera Selatan. *Buletin Oseanografi Marina*, 12(1):27-35.
- Aryawati, R., T. Z. Ulqodry, H. Surbakti dan E. N. Ningsih. 2018. Populasi fitoplankton skeletonema di Estuaria Banyuasin Sumatera Selatan. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*. 10(2) : 269-275.
- Ashaari, A., Iehata, S., Kim, H.-J., & Rasdi, N. W. 2024. Recent advancement of zooplankton enriched with nutrients and probiotic isolates from aquaculture systems: a review. *J. Appl. Anim. Res.*, 52(1): 2417052.
- Asmarani, A. S., Indriyawati, N., Dewi, K., Winata, D. C., Bachri, A. R., Lestari, D. A., & Safitri, S. 2024. Analisa Indeks Saprobitas di Perairan Padelegan Sebagai Air Baku Tambak Garam UTM. *J. Kelaut. Indones. J. Mar. Sci. Technol.*, 17(2): 121–128.
<https://doi.org/10.21107/jk.v17i2.27065>
- Asriyana, S. P., & Yuliana, S. P. 2021. *Produktivitas Perairan: Edisi Revisi*. Bumi Aksara.
- Awwalia, E. F., Munir, M., & Maisaroh, D. S. 2025. Struktur Komunitas Plankton di Pantai Wisata Kampung Kerapu Situbondo. *Juv. J. Ilm. Kelaut. Dan Perikan.*, 6(1): 20–30.
- Ayshi, F. A., Mugdha, A. R., & Jahan, R. 2024. Identification of marine zooplankton in the Maheshkhali Channel, Cox's Bazar, Bangladesh. *Asian J. Fish. Aquat. Res*, 26(3): 12–22.
- Azani, N., Suhaimi, H., Yuslan, A., Jung, L. H., Karim, M., Yatim, S. R., & Rasdi, N. W. 2025. Fermented feeds contribute to sustainable aquaculture by transforming waste into valuable diets for *Moina macrocopa* (Branchiopoda, Anomopoda) while adhering to industry standards. 98(5–6): 537–575.
- Bahri, S., & Sarjan, M. (2025). Analisis Plankton (Fitoplankton & Zooplankton) di Perairan Teluk Batu Kumbu Sekotong Barat. *Biocaster : Jurnal Kajian Biologi*, 5(2), 55–62.
<https://doi.org/10.36312/biocaster.v5i2.361>
- Bahri, S., & Sarjan, M. 2025. ANALISIS PLANKTON (FITOPLANKTON & ZOOPLANKTON) DI PERAIRAN TELUK BATU KUMBU SEKOTONG BARAT Saipul. *Biocaster J. Kaji. Biol.*, 5(2): 55–62.
- Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. 2021. Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic. *Front. Pharmacol.*, 12: 643972. <https://doi.org/10.3389/FPHAR.2021.643972>

- Bashevkin, S. M., Christy, J. H., & Morgan, S. G. 2019. Photoprotective benefits of pigmentation in the transparent plankton community: a comparative species experimental test. *Ecology*, 100(5): e02680.
- Basu, S., & Mackey, K. R. M. (2018). Phytoplankton as key mediators of the biological carbon pump: Their responses to a changing climate. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su10030869>
- Basu, S., & Mackey, K. R. M. 2018. Phytoplankton as Key Mediators of the Biological Carbon Pump: Their Responses to a Changing Climate. In *Sustainability* (Vol. 10, Issue 3, p. 869). <https://doi.org/10.3390/su10030869>
- Bedford, J., Johns, D. G., & McQuatters-Gollop, A. 2020. Implications of taxon-level variation in climate change response for interpreting plankton lifeform biodiversity indicators. *ICES J. Mar. Sci.*, 77(7–8): 3006–3015. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa183>
- Benedetti, F., Vogt, M., Elizondo, U. H., Righetti, D., Zimmermann, N. E., & Gruber, N. 2021. Major restructuring of marine plankton assemblages under global warming. *Nat. Commun.*, 12(1): 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25385-x>
- Berthold, M., Karsten, U., von Weber, M., Bachor, A., & Schumann, R. 2018. Phytoplankton can bypass nutrient reductions in eutrophic coastal water bodies. *Ambio*, 47(Suppl 1): 146–158.
- Bi, H., Song, J., Zhao, J., Liu, H., Cheng, X., Wang, L., Cai, Z., Benfield, M. C., Otto, S., Goberville, E., Keister, J., Yang, Y., Yu, X., Cai, J., Ying, K., & Conversi, A. 2022. Temporal characteristics of plankton indicators in coastal waters: High-frequency data from PlanktonScope. *J. Sea Res.*, 189(September): 102283. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2022.102283>
- Bicudo, C. E. de M., & Menezes, M. 2016. Phylogeny and classification of Euglenophyceae: A brief review. *Front. Ecol. Evol.*, 4: 17.
- Bowange, R., Jayasinghe, M., Yakandawala, D. M. D., Kumara, K. L. W., Abeynayake, S. W., & Ratnayake, R. R. 2022. Morphological characterization of culturable cyanobacteria isolated from selected extreme ecosystems of Sri Lanka. *Ceylon J. Sci.*, 51(5):.
- Bramasta, Y., Setyati, W. A., Azizah, R., & Nuraini, T. 2020. Pengaruh Perbedaan Intensitas Cahaya Terhadap Kelimpahan Arthropoda di. 9(1): 9–12.
- Brierley, A. S., & Kingsford, M. J. 2009. Impacts of Climate Change on Marine Organisms and Ecosystems. *Curr. Biol.*, 19(14): R602–R614. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.05.046>
- Cahyani, L. E., Irma, K., & Haumahu, S. 2023. Pengaruh Perubahan Gradien Suhu dan Salinitas terhadap Struktur Komunitas Fitoplankton di Perairan Teluk Ambon. *J. Kelaut. Trop.*, 26(3): 543–553.
- Calbet, A. 2024. Harnessing the Power of Plankton: A Revolutionary Approach to Industry BT - *The Wonders of Marine Plankton* (A. Calbet (ed.); pp. 123–129). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50766-3_21
- Cavalier-Smith, T. 2016. Higher classification and phylogeny of Euglenozoa. *Eur. J. Protistol.*, 56: 250–276.
- Chen, M., Fan, M., Liu, R., Wang, X., Yuan, X., & Zhu, H. 2015. The dynamics of temperature and light on the growth of phytoplankton. *J. Theor. Biol.*, 385: 8–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2015.07.039>

- China, V., & Holzman, R. 2014. Hydrodynamic starvation in first-feeding larval fishes. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 111(22): 8083–8088.
- Chofifah, N., Nuraini, R. A. T., & Suryono, C. A. 2025. Distribusi Horizontal Jenis Fitoplankton di Pesisir Morodemak. *J. Mar. Res.*, 14(2): 254–262.
- Cooney, E. C., Jacobson, D. M., Wolfe, G. V, Bright, K. J., Saldarriaga, J. F., Keeling, P. J., Leander, B. S., & Strom, S. L. 2024. Morphology, behavior, and phylogenomics of *Oxytoxum lohmannii*, Dinoflagellata. *J. Eukaryot. Microbiol.*, 71(6): e13050.
- Cox, E. J. 2014. Diatom identification in the face of changing species concepts and evidence of phenotypic plasticity. *J. Micropalaeontology*, 33(2): 111–120.
- Creswell, L. 2010. Phytoplankton culture for aquaculture feed.
- Damar, D. 2022. *Ensiklopedia Biologi Filum Chordata (Subphylum Urochordata dan Cephalochordata) (Vol. 4)*. Senja Book.
- Deep, P. R., Bhattacharyya, S., & Nayak, B. (2013). Cyanobacteria in wetlands of the industrialized Sambalpur District of India. *Aquatic Biosystems*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/2046-9063-9-14>
- Demoulin, C. F., Lara, Y. J., Cornet, L., François, C., Baurain, D., Wilmotte, A., & Javaux, E. J. 2019. Cyanobacteria evolution: Insight from the fossil record. *Free Radic. Biol. Med.*, 140: 206–223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2019.05.007>
- Demoulin, C. F., Lara, Y. J., Cornet, L., François, C., Baurain, D., Wilmotte, A., & Javaux, E. J. (2019). Cyanobacteria evolution: Insight from the fossil record. In *Free Radical Biology and Medicine* (Vol. 140, pp. 206–223). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2019.05.007>
- Dewi, R., Winanto, T., Haryono, F. E. D., Marhaeni, B., Hanifa, G., Nabila, D., Muis, D. R., & Khalisa, S. 2023. Potensi Klorofil dan Karotenoid Fitoplankton *Dunaliella salina* sebagai Sumber Antioksidan. *Bul. Oseanografi Mar.*, 12(1): 125–132.
- Djumanto. 2019. Full Paper. *Progres. J. Pemikir. Dan Pendidik. Islam*, 8(1): 1. <https://doi.org/10.22219/progresiva.v8i1.8931>
- Dokulil, M. T., & Qian, K. (2021). Photosynthesis, carbon acquisition and primary productivity of phytoplankton: a review dedicated to Colin Reynolds. In *Hydrobiologia* (Vol. 848, Issue 1, pp. 77–94). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04321-y>
- Dokulil, M. T., & Qian, K. 2021. Photosynthesis, carbon acquisition and primary productivity of phytoplankton: a review dedicated to Colin Reynolds. *Hydrobiologia*, 848(1): 77–94. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04321-y>
- Dolan, J. R. 2020. Re-Claiming Adrien Certes (1835 – 1903), Pioneer Deep-Sea Microbiologist , as a Protistologist. *Ann. Anat.*, 171(6): 125772. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2020.125772>
- Dory, F., Nava, V., Nedbalová, L., Soler, V., Di Mauro, B., Traversa, G., Spreafico, M., & Leoni, B. 2025. Morphological diversity of microalgae and Cyanobacteria of cryoconite holes in Northern Victoria Land, Antarctica. *J. Glaciol.*, 71: e37.
- Dvořák, P., Casamatta, D. A., Hašler, P., Jahodářová, E., Norwich, A. R., & Pouličková, A. 2017. Diversity of the cyanobacteria. In *Modern topics in the phototrophic prokaryotes: Environmental and applied aspects* (pp. 3–46). Springer.

- Eikrem, W., Medlin, L. K., Henderiks, J., Rokitta, S., Rost, B., Probert, I., Throndsen, J., & Edvardsen, B. 2016. Haptophyta. In *Handbook of the Protists* (pp. 1–61). Springer.
- Endryeni, L. M., Desmiati, I., Sains, F., Nahdlatul, U., & Sumatera, U. 2025. SEMAH : Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Perairan Vol. 9 No.1 Juni 2025 April 2024. 9(1): 22–28.
- Ergin, F. G. 2015. Flow field measurements during microorganism locomotion using MicroPIV and dynamic masking. *Proc. 11th Int. Symp. PIV*, St. Barbar. Calif.,.
- Evita, I. N. M., Hariyati, R., & Hidayat, J. W. 2021. Kelimpahan dan keanekaragaman plankton sebagai bioindikator kualitas air di perairan Pantai Sayung Kabupaten Demak Jawa Tengah. *Bioma Berk. Ilm. Biol.*, 23(1): 25–32.
- Falciatore, A., & Mock, T. 2022. *The molecular life of diatoms* (Vol. 592). Springer.
- Farkan, M., Mulyono, M., Novriadi, R., & Marlina, E. 2024. Zooplankton Indikator Lingkungan Produktivitas Tambak Budidaya Udang Zooplankton Environmental Indicators Productivity Of Shrimp Farming Ponds PENDAHULUAN Udang merupakan komoditas unggulan pada sub sektor budidaya . Saat ini Sebagian besar tambak di Indo. 10–11.
- Farkan, M., Pahlevi, R. S., Nurraditya, L., Jabbar, M. A., & Prabowo, D. H. G. 2025. Phytoplankton bioindicators as a measure of productivity for Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) pond farming in Indonesia. *Aquac. Aquarium, Conserv. Legis.*, 18(1): 163–174.
- Fatur Rahman, I., Sunarto, & Nurruhwati, I. 2020. Korelasi Kelimpahan Plankton Dengan Suhu Perairan Laut di Sekitar PLTU Cirebon. *J. Perikan. Kelaut.*, 7(1):.
- Fauziah SM, & Laily AN. (2015). 3150-6206-1-SM. Bioedukasi, 8(1), 20–22.
- Feng, L., Wang, Y., Hou, X., Qin, B., Kuster, T., Qu, F., Chen, N., Paerl, H. W., & Zheng, C. (2024). Harmful algal blooms in inland waters. In *Nature Reviews Earth and Environment* (Vol. 5, Issue 9, pp. 631–644). Springer Nature. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00578-2>
- Ferrera, I., Reñé, A., Funosas, D., Camp, J., Massana, R., Gasol, J. M., & Garcés, E. 2020. Assessment of microbial plankton diversity as an ecological indicator in the NW Mediterranean coast. *Mar. Pollut. Bull.*, 160(June): 111691. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111691>
- Fidyantini, F., Candri, D. A., & Japa, L. (2024). Primary Productivity of Phytoplankton in Mandalika Coastal Area, Central Lombok Regency. *Jurnal Biologi Tropis*, 24(1), 1–7. <https://doi.org/10.29303/jbt.v24i1.5659>
- Fila, R., Nurchayati, N., & Ardiyansyah, F. 2019. Kelimpahan fitoplankton di perairan kawasan mangrove Pulau Santen Banyuwangi. *J. Biosense*, 2(01): 38–50.
- Firdaus, A. A., & Yuniar, I. 2021. PENGARUH PEMBERIAN NUTRISI DENGAN TAMBAHAN PUPUK SUSULAN PADA AWAL WAKTU YANG BERBEDA TERHADAP PERTUMBUHAN spirulina sp. *Fish. J. Perikan. Dan Ilmu Kelaut.*, 3(1): 1–9.
- Firdaus, M. R., & Wijayanti, L. A. S. (2019). Fitoplankton dan siklus karbon global. *OSEANA*, 44(2), 35–48. <https://doi.org/10.14203/oseana.2019.vol.44no.2.39>
- Firdaus, M. R., & Wijayanti, L. A. S. 2019. Fitoplankton dan siklus karbon global. 44(2): 35–48.

- Fithratullah, R., Juwiyatri, E., & Pribadi, A. 2023. Identifikasi Jenis Plankton Sebagai Bioindikator Perairan di Danau Seran Kecamatan Landasan Ulin, Kalimantan Selatan. *Sang Pencerah J. Ilm. Univ. Muhammadiyah But.*, 9(4): 945–953. <https://doi.org/10.35326/pencerah.v9i4.4478>
- Fitriani, D. R. 2016. Deformasi Bentuk dan Tekstur Radiolaria Dalam Keramik Instalasi. Institut Seni Indonesia Yogyakarta.
- Fitriyah, A., Zainuri, M., & Indriyawati, N. (2022). Perbedaan dan Hubungan Nitrat, Fosfat Dengan Kelimpahan Fitoplankton Pada Saat Air Pasang dan Surut di Muara Ujung Piring Bangkalan. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 15(1), 60–68. <https://doi.org/10.21107/jk.v15i1.13990>
- Flores Lg, & Padisak J. (2023). Ecosystem services provided by marine and freshwater phytoplankton. *Hydrobiologia*, 850(12–13), 2691–2706. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04795-y>
- Foulon, É., Rousseau, A. N., Benoy, G., & North, R. L. (2020). A global scan of how the issue of nutrient loading and harmful algal blooms is being addressed by governments, non-governmental organizations, and volunteers. *Water Quality Research Journal*, 55(1), 1–23. <https://doi.org/10.2166/WQRJ.2019.013>
- Fu, W., Shu, Y., Yi, Z., Su, Y., Pan, Y., Zhang, F., & Brynjolfsson, S. 2022. Diatom morphology and adaptation: Current progress and potentials for sustainable development. *Sustain. Horizons*, 2: 100015.
- Fujaya, Y., Rukminasari, N., Alam, N., Rusdi, M., Fazhan, H., & Waiho, K. 2020. Is limb autotomy really efficient compared to traditional rearing in soft-shell crab (*Scylla olivacea*) production? *Aquac. Reports*, 18: 100432.
- Fujita, S., Kuranaga, E., & Nakajima, Y. 2021. Regeneration potential of jellyfish: cellular mechanisms and molecular insights. *Genes (Basel)*, 12(5): 758.
- Gagat, P., Bodył, A., Mackiewicz, P., & Stiller, J. W. 2013. Tertiary plastid endosymbioses in dinoflagellates. In *Endosymbiosis* (pp. 233–290). Springer.
- Gavelis, G. S., Herranz, M., Wakeman, K. C., Ripken, C., Mitarai, S., Gile, G. H., Keeling, P. J., & Leander, B. S. 2019. Dinoflagellate nucleus contains an extensive endomembrane network, the nuclear net. *Sci. Rep.*, 9(1): 839.
- Geng, Y., Li, M., Yu, R., Sun, H., Zhang, L., Sun, L., Lv, C., & Xu, J. 2022. Response of planktonic diversity and stability to environmental drivers in a shallow eutrophic lake. *Ecol. Indic.*, 144(October): 109560. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109560>
- Giling, D. P., Staehr, P. A., Grossart, H. P., Andersen, M. R., Bohrer, B., Escot, C., Evrendilek, F., Gómez-Gener, L., Honti, M., Jones, I. D., Karakaya, N., Laas, A., Moreno-Ostos, E., Rinke, K., Scharfenberger, U., Schmidt, S. R., Weber, M., Woolway, R. I., Zwart, J. A., & Obrador, B. 2017. Delving deeper: Metabolic processes in the metalimnion of stratified lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 62(3): 1288–1306. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/lno.10504>
- Giling, D. P., Staehr, P. A., Grossart, H. P., Andersen, M. R., Bohrer, B., Escot, C., Evrendilek, F., Gómez-Gener, L., Honti, M., Jones, I. D., Karakaya, N., Laas, A., Moreno-Ostos, E., Rinke, K., Scharfenberger, U., Schmidt, S. R., Weber, M., Woolway, R. I., Zwart, J. A., & Obrador, B. (2017). Delving deeper: Metabolic processes in the metalimnion of

- stratified lakes. *Limnology and Oceanography*, 62(3), 1288–1306.
<https://doi.org/10.1002/lno.10504>
- Gillespie, P. J., & Blow, J. J. 2022. DDK: The Outsourced Kinase of Chromosome Maintenance.
- Gittings, J. A., Raitsos, D. E., Krokos, G., & Hoteit, I. 2018. Impacts of warming on phytoplankton abundance and phenology in a typical tropical marine ecosystem. *Sci. Rep.*, 8(1): 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20560-5>
- Gobler, C. J. 2020. Climate Change and Harmful Algal Blooms: Insights and perspective. *Harmful Algae*, 91(December 2019): 101731. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101731>
- Gómez, F. 2020. Diversity and classification of dinoflagellates. *Dinoflag. Classif. Evol. Physiol. Ecol. Significance*; Rao, DVS, Ed, 38.
- Goncalves CDA, & Figueredo CC. (2020). What we really know about the composition and function of microalgae cell coverings? - An overview. In *Acta Botanica Brasilica* (Vol. 34, Issue 4, pp. 599–614). Sociedade Botanica do Brasil. <https://doi.org/10.1590/0102-33062020abb0309>
- Gonçalves, C., & Figueredo, C. 2020. What we really know about the composition and function of microalgae cell coverings? - an overview. *Acta Bot. Brasilica*, 34: 599–614. <https://doi.org/10.1590/0102-33062020abb0309>
- Graneli E, Turner JT. 2006. Ecology of Harmful Algae. In Graneli E, Turner JT, editor. *Ecological Studies. Volume 189. Analysis and Synthesis*. Netherland: Springer. p:3-8.
- Gul, S., & Nawaz, M. F. 2014. The Dinoflagellate Genera *Protoperdinium* and *Podolampas* from Pakistan's Shelf and Deep Sea Vicinity (North Arabian Sea). *Turkish J. Fish. Aquat. Sci.*, 14(1):.
- Gunady, S. M., Ismunarti, D. H., & Muslim, M. 2025. Sebaran Konsentrasi Silikat dan Hubungannya Dengan Konsentrasi Klorofil-A pada Pantai Ujung Piring, Kabupaten Jepara. *Indones. J. Oceanogr.*, 7(2): 190–200.
- Gurning, L. F. P., Nuraini, R. A. T., & Suryono, S. (2020). Kelimpahan Fitoplankton Penyebab Harmful Algal Bloom di Perairan Desa Bedono, Demak. *Journal of Marine Research*, 9(3), 251–260. <https://doi.org/10.14710/jmr.v9i3.27483>
- Gurning, L. F. P., Nuraini, R. A. T., & Suryono, S. 2020. Kelimpahan Fitoplankton Penyebab Harmful Algal Bloom di Perairan Desa Bedono, Demak. *J. Mar. Res.*, 9(3): 251–260. <https://doi.org/10.14710/jmr.v9i3.27483>
- Hablützel, B. P. I., Rombouts, I., Dillen, N., Lagaisse, R., Mortelmans, J., & Ollevier, A. 2019. Exploring New Technologies for Plankton Observations. 20–26.
- Hagstrom, G. I., Stock, C. A., Luo, J. Y., & Levin, S. A. (2024). Impact of Dynamic Phytoplankton Stoichiometry on Global Scale Patterns of Nutrient Limitation, Nitrogen Fixation, and Carbon Export. *Global Biogeochemical Cycles*, 38(5). <https://doi.org/10.1029/2023GB007991>
- Haliza, F. D. N., Rahayu, D. R. U. S., & Sastranegara, M. H. 2023. Struktur Komunitas Plankton pada Waktu yang berbeda di Telaga Kumpe Banyumas. *BioEksakta J. Ilm. Biol. Unsoed*, 4(3): 174–181.
- Hallegraeff GM. 1995. Harmfull algal blooms: A global overview. In Hallegraeff GM, Anderson DM and Cambella AD, editor. *Manual on Harmful Marine Microalgae*. Franch: UNESCO. p. 1-22.

- Hamdhani, H. 2022. Pengamatan terhadap pembiakan cladocera (*Macrothrix* sp.) dan phytoplankton secara eksitu: Observation of culturing cladocera (*Macrothrix* sp.) and phytoplankton under laboratory condition. *J. Ilmu Perikan. Trop. Nusantara*. (Nusantara Trop. Fish. Sci. Journal), 1(2): 155–159.
- Hanifah, N., Nofrita, N., & Nurdin, J. (2023). Sebaran spasial fitoplankton penyebab harmful algal blooms (HABs) pada perairan pesisir kota Padang, Sumatera Barat. *Jurnal Biologi UNAND*, 11(2), 108–116. <https://doi.org/10.25077/jbioua.11.2.108-116.2023>
- Hanifah, R. I., & Jurnaliah, L. 2022. Paleosalinitas berdasarkan kelimpahan foraminifera bentonik kecil di perairan Jepara, Jawa Tengah. *Bull. Sci. Contrib. Geol.*, 20(3): 121–126.
- Hannisdal, B., Henderiks, J., & Liow, L. H. (2012). Long-term evolutionary and ecological responses of calcifying phytoplankton to changes in atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 18(12), 3504–3516. <https://doi.org/10.1111/gcb.12007>
- Hannisdal, B., Henderiks, J., & Liow, L. H. 2012. Long-term evolutionary and ecological responses of calcifying phytoplankton to changes in atmospheric CO₂. *Glob. Chang. Biol.*, 18(12): 3504–3516. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.12007>
- Hanurandi, A. P., Haryati, M., & Soeprbowati, T. R. 2022. Struktur Komunitas Plankton di Waduk Jatibarang Semarang. *J. Ilmu Lingkung.*, 20(4): 796–805.
- Harliani, M., Nurfadilah, N., & Bulan, D. E. (2025). Studi Hubungan Kelimpahan Fitoplankton dan Ketersediaan Nutrien pada Tambak di Kampung Pegat Batumbuk, Kalimantan Timur Menggunakan Generalized Poisson Regression. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(4), 1085–1092. <https://doi.org/10.14710/jil.23.4.1085-1092>
- Hemraj, D. A., Hossain, M. A., Ye, Q., Qin, J. G., & Leterme, S. C. 2017. Plankton bioindicators of environmental conditions in coastal lagoons. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 184: 102–114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.10.045>
- Heneghan, R. F., Everett, J. D., Blanchard, J. L., Sykes, P., & Richardson, A. J. 2023. Climate-driven zooplankton shifts cause large-scale declines in food quality for fish. *Nat. Clim. Chang.*, 13(5): 470–477. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01630-7>
- Henson, S. A., Cael, B. B., Allen, S. R., & Dutkiewicz, S. 2021. Future phytoplankton diversity in a changing climate. *Nat. Commun.*, 12(1): 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25699-w>
- Heriyadi, N. W. A. A. T., & Wiloso, D. A. 2021. Mikropaleontologi foraminifera: Konsep Dasar dan Aplikasinya. UGM PRESS.
- Hertika, A. M. S., Arsad, S., & Putra, R. B. D. S. 2021. Ilmu tentang plankton dan peranannya di lingkungan perairan. Universitas Brawijaya Press.
- Hevila, R. R., Adinugraha, F., & Mamangkey, J. 2023. Identifikasi Protista sebagai Konten Lembar Kerja Siswa (LKS) untuk Mendukung Pengetahuan Keanekaragaman Hayati di SMA Negeri 42 Jakarta. *Otus Educ. J. Biol. Dan Pendidik. Biol.*, 1(2): 48–62.
- Hidayati, I. (2020). Pemahaman Masyarakat Pesisir Lampung akan Bahaya Harmful Algae Bloom pada Sumber Pangan Laut. <http://ejournal.unikama.ac.id/index.php/JPIG/>
- Hidhayati, N., Agustini, N. W. S., Apriastini, M., & Diaudin, D. P. A. 2022. Bioactive compounds from microalgae *Spirulina platensis* as antibacterial candidates against pathogen bacteria. *J. Kim. Sains Dan Apl.*, 25(2): 41–48.

- Huang, Z., Gao, J., Peng, C., Song, J., Xie, Z., Jia, J., Li, H., Zhao, S., Liang, Y., & Gong, B. 2023. The effect of the microalgae *Chlorella vulgaris* on the gut microbiota of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) is feeding-time dependent. 11(4): 1002.
- Hutagalung, R. A., Mudlofdar, F., & Salim, R. 2021. The Effect of Differences of Live Feed on The Growth And Survival of Redtail Catfish (*Hemibagrus Nemurus*) Larvae.
- Ibnu Budiman, Dita Wisudyawati, & Afifah Azzahra. 2023. Penyebab dan Dampak Ekologis dari Susut Hasil Produksi Ikan di Indonesia. In *Pengelolaan Sumber Daya Perikanan Laut Berkelanjutan*. <https://doi.org/10.55981/brin.908.c755>
- Iis Minawati¹*, Sutrisno Anggoro¹, C. A. 2023. 1 城市韧性评价指标体系 1. 1. El-Usrah J. Huk. Kel., 5(2): 89–95.
- Irvine, T., Costello, J. H., Gemmell, B. J., Sutherland, K. R., Corrales-Ugalde, M., Townsend, J. P., & Colin, S. P. 2025. Ctenophores are a highly impactful predatory guild in open oceanic ecosystems. *Curr. Biol.*, 35(10): 2467–2473.
- Ishitani, Y., Febvre-Chevalier, C., & Febvre, J. 2016. Radiolaria. 1–6.
- Ismi, S., Yusup, D. S., & Anjani, S. 2021. PENGAMATAN PERTUMBUHAN COPEPOD SEBAGAI PERSEDIAAN PAKAN ALAMI OBSERVATION. 13(August): 261–268.
- Jacobi, D., Longo, J., Duque, F., & Oyarzabal, F. 2021. High Resolution Geochemical Mapping of Fossil Coccospheres of Coccolithophores in Organic Chalks using Energy Dispersive Spectroscopy and Back Scatter Electrons. *Microsc. Microanal.*, 27(S1): 2252–2256.
- Jeon, D., Lee, W., Soh, H. Y., & Eyun, S. 2019. A new species of Monstrillopsis Sars, 1921 (Copepoda: Monstrilloidea) with an unusually reduced urosome. 12(1): 9.
- Jessica, J., Kurniawan, A., & Akbar, M. Y. 2024. Teknik kultur fitoplankton *thalassiosira* sp. Skala laboratorium di pt. Central proteina prima, Lubuk Besar, Bangka Tengah. 1(3): 120–126.
- Jia, J., Gao, Y., Sun, K., Lu, Y., Wang, J., & Shi, K. 2022. Phytoplankton community composition, carbon sequestration, and associated regulatory mechanisms in a floodplain lake system. *Environ. Pollut.*, 306(May): 119411. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119411>
- Jiang, H., & Buskey, E. J. 2025. Relating ciliary propulsion morphology and flow to particle acquisition in marine planktonic ciliates I: the tintinnid ciliate *Amphorides quadrilineata*. *J. Plankton Res.*, 47(2): fbae012.
- Junaidi, M., & Azhar, F. 2018. Struktur Komunitas Zooplankton di Perairan Kabupaten Lombok Utara, Provinsi Nusa Tenggara Barat.
- Karisma Murti, R. (2025). Struktur Komunitas Mikroalga di Wisata Air Umbul Kabupaten Klaten Microalgae Diversity as a Bioindicator of Pollution in Umbul Water Tourism, Klaten Regency. *Sumberdaya Akuatik Indopasifik*, 9(3), 181–195. <https://doi.org/10.46252/jsai-fpik-unipa.2024.Vol.9.No.3.517>
- Kaspar, H. F., Keys, E. F., King, N., Smith, K. F., Kesarcodi-Watson, A., & Miller, M. R. 2014. Continuous production of *Chaetoceros calcitrans* in a system suitable for commercial hatcheries. 420: 1–9.
- Keshari, N., Zhao, Y., Das, S. K., & Zhu, T. 2022. Cyanobacterial Community Structure and Isolates From Representative Hot Springs of Yunnan Province , China Using an Integrative Approach. 13(April): <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.872598>

- Khan, N. S., & Rahman, M. S. 2025. Zooplankton in Aquaculture: A Perspective on Nutrition and Cost-Effectiveness. *Aquac. Res.*, 2025(1): 5347147.
- Khotimah, N. N., Rozirwan, R., Putri, W. A. E., Fauziyah, F., Aryawati, R., Isnaini, I., & Nugroho, R. Y. 2024. Bioaccumulation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Contamination (Lead and Copper) Build Up in the Roots of *Avicennia alba* and *Excoecaria agallocha*. *J. Ecol. Eng.*, 25(5): 101–113. <https://doi.org/10.12911/22998993/185716>
- Kim HG. 2010. An Overview on the Occurrences of Harmful Algal Blooms (HABs) and Mitigation Strategies in Korean Coastal Waters. *Coastal Environmental and Ecosystem Issues of the East China Sea*. p 121-131.
- Kirkman, L. A., & Deitsch, K. W. 2020. Vive la Différence: Exploiting the Differences between Rodent and Human Malaras. *Trends Parasitol.*, 36(6): 504–511. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2020.03.008>
- Kleiss, M., Mokhtarimousavi, S., Dai, S., & Alani, M. 2025. Bio-Generative Design Morphology with Radiolaria: An application of a Nature-Based Generative Shape Grammar for Geometrical Design of Space Frames. *ArXiv Prepr. ArXiv2508.08572*,.
- Komala, P. S., Nur, A., & Nazhifa, I. (2019). Pengaruh Parameter Lingkungan Terhadap Kandungan Senyawa Organik Danau Maninjau Sumatera Barat. *Seminar Nasional Pembangunan Wilayah Dan Kota Berkelanjutan*, 1(1). <https://doi.org/10.25105/pwkb.v1i1.5289>
- Komala, P., Nur, A., & Nazhifa, I. 2019. Pengaruh Parameter Lingkungan Terhadap Kandungan Senyawa Organik Danau Maninjau Sumatera Barat. *Semin. Nas. Pembang. Wil. Dan Kota Berkelanjutan*, 1:.. <https://doi.org/10.25105/pwkb.v1i1.5289>
- Kostygov, A. Y., Karnkowska, A., Votýpka, J., Tashyreva, D., Maciszewski, K., Yurchenko, V., & Lukeš, J. 2021. Euglenozoa: taxonomy, diversity and ecology, symbioses and viruses. *Open Biol.*, 11(3): 200407.
- Krajewska, M., Szymczak-Żyła, M., Tylmann, W., & Kowalewska, G. 2020. Climate change impact on primary production and phytoplankton taxonomy in Western Spitsbergen fjords based on pigments in sediments. *Glob. Planet. Change*, 189(April 2019): 103158. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103158>
- Krishnan, K., Nafi, A. S., Gurka, R., & Holzman, R. 2020. The hydrodynamic regime drives flow reversals in suction-feeding larval fishes during early ontogeny. *J. Exp. Biol.*, 223(9): jeb214734.
- Kristiana, I., Astiyani, W. P., Pietoyo, A., Maulidia, A. I., & Akbarurrasyid, M. 2024. Identifikasi Plankton pada Tambak Udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*) di Teaching Factory Politeknik Kelautan dan Perikanan Pangandaran. *Samakia J. Ilmu Perikan.*, 15(1): 142–149.
- Kusnoputranto, H., Moersidik, S. S., Wisnubroto, D. S., & Makmur, D. M. (2014). Akumulasi dan Depurasi Toksin PSP (Paralytic Shellfish Poisoning) oleh Kerang Hijau. 19(1), 27–34.
- Kwon, E. Y., Sreeush, M. G., Timmermann, A., Karl, D. M., Church, M. J., Lee, S. S., & Yamaguchi, R. 2022. Nutrient uptake plasticity in phytoplankton sustains future ocean net primary production. *Sci. Adv.*, 8(51): 1–13. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add2475>

- Larasati, C. E., Damayanti, A. A., Astriana, B. H., & Wahyudi, R. 2025. Sebaran Jenis Diatom Di Perairan Teluk Bima : Pasca Fenomena Seasnot. *J. Mar. Res.*, 14(3): 528–535.
- Larasati, C. E., Paryono, P., Damayanti, A. A., Astriana, B. H., & Wahyudi, R. (2025). Sebaran Jenis Diatom Di Perairan Teluk Bima: Pasca Fenomena Seasnot. *Journal of Marine Research*, 14(3), 528–535. <https://doi.org/10.14710/jmr.v14i3.48847>
- Latuconsina, H. 2019. Ekologi perairan tropis: prinsip dasar pengelolaan sumber daya hayati perairan. Ugm Press.
- Laza-martinez, A., Orive, E., & Miguel, I. 2012. Morphological and genetic characterization of benthic dinoflagellates of the genera *Coolia*, *Ostreopsis* and *Prorocentrum* from the south-eastern Bay of Biscay Morphological and genetic characterization of benthic dinoflagellates of the genera *Coolia*, *Ostr.* *Eur. J. Phycol.*, July 2012 37–41. <https://doi.org/10.1080/09670262.2010.550387>
- Leidonald, R., Yusni, E., Siregar, R. F., Rangkuti, A. M., & Zulkifli, A. 2022. Keanekaragaman fitoplankton dan hubungannya dengan kualitas air di Sungai Aek Pohon Kabupaten Mandailing Natal Provinsi Sumatera Utara. *AQUACOASTMARINE J. Aquat. Fish. Sci.*, 1(2): 85–96.
- Leksono, A. S., & Hakim, L. 2021. Sistematika Hewan Vertebrata. Universitas Brawijaya Press.
- Leles, S. G., & Levine, N. M. (2023). Mechanistic constraints on the trade-off between photosynthesis and respiration in response to warming. <https://www.science.org>
- Lestari, U. A., Mukhlis, A., & Priyono, J. 2019. Pengaruh Pemberian Pupuk Nutrisil dan Kw21+ Si Terhadap Pertumbuhan *Chaetoceros calcitrans* Effect of Nutrisil and Kw21+ Si Fertilizer on *Chaetoceros calcitrans* Growth. *J. Perikan.*, 9(1): 66–74.
- Letendre, F., & Cameron, C. B. 2022. The capture of crude oil droplets by filter feeders at high and low Reynolds numbers. *J. Exp. Biol.*, 225(8): jeb243819.
- Leu, B., Tinggi, S., & Kupang, A. I. (2021). Dampak pemanasan global dan upaya pengendaliannya melalui pendidikan lingkungan hidup dan pendidikan islam. *Jurnal At Tadbir STAI Darul Kamal NW Kembang Kerang NTB*, 5. <https://journal.staidk.ac.id/index.php/tadbir>
- Leu, B., Tinggi, S., Islam, A., & Islam, P. 2021. Dampak Pemanasan Global dan Upaya Pengendaliannya Melalui Pendidikan Lingkungan Hidup dan Pendidikan Islam. *J. Tadbir STAI Darul Kamal NW Kembang Kerang NTB*, 5(2): 1–15.
- Li, Y., & Teng, M. 2023. Airport Group Operational Capacity Assessment and Analysis of Its Influencing Factors : Taking Typical Chinese Airport Group as an Example.
- Lomartire, S., Marques, J. C., & Gonçalves, A. M. M. 2021. The key role of zooplankton in ecosystem services: A perspective of interaction between zooplankton and fish recruitment. *Ecol. Indic.*, 129: 107867. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107867>
- Lovecchio, S., Climent, E., Stocker, R., & Durham, W. M. 2019. Chain formation can enhance the vertical migration of phytoplankton through turbulence. *Sci. Adv.*, 5(10): eaaw7879.
- Lubis, F., Lisdayanti, E., & Najmi, N. 2023. Kelimpahan dan Indeks Ekologi Jenis Plankton di Perairan Pulau Seurudong, Aceh Selatan. *Habitus Aquat.*, 4(1): 23–33. <https://doi.org/10.29244/haj.4.1.23>

- Ma, K., Bao, Q., Wu, Y., Chen, S., Zhao, S., Wu, H., & Fan, J. 2020. Evaluation of microalgae as immunostimulants and recombinant vaccines for diseases prevention and control in aquaculture. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 8: 590431.
- Ma, M., & Hu, Q. 2024. Microalgae as feed sources and feed additives for sustainable aquaculture: Prospects and challenges. *Rev. Aquac.*, 16(2): 818–835.
- Macleán JL. 1977. Observations on *Pyrodinium bahamense* Plate, a toxic dinoflagellate, in Papua New Guinea. *Limnology and Oceanography*. 22(2):234-254.
- Maftuch, M., Setyawan, F. H., & Suprastyani, H. 2018. Uji daya hambat ekstrak *Chaetoceros calcitrans* terhadap bakteri *Aeromonas salmonicida*. *JFMR (Journal Fish. Mar. Res.)*, 2(1): 39–46.
- Makwarela, T. G., & Seoraj-pillai, N. 2025. Exploring the Molluscan Microbiome : Diversity , Function , and Ecological Implications.
- Manan, A., & Sari, I. P. 2012. Pola Pertumbuhan *Nannochloropsis oculata* pada Kultur Skala Laboratorium, Intermediet, dan Massal [Patterns Growth Of *Nannochloropsis oculata* In Culture Scale Laboratory, Intermediate, and Bulk]. *J. Ilm. Perikan. Dan Kelaut.*, 4(2): 123–127.
- Mansyah, Y. P., Mardhia, D., & Ahdiansyah, Y. 2020. Identifikasi jenis fioplankton di tambak udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*) LSO AV3 Kecamatan Utan, Kabupaten Sumbawa. *Indones. J. Appl. Sci. Technol.*, 1(1): 20–28.
- Manuhuwa, B. A., Hartati, R., & Endrawati, H. 2021. Analisis P/B Rasio Foraminifera di perairan Delta Wulan, Demak, Jawa Tengah. *J. Mar. Res.*, 10(1): 23–28.
- Mardiati, A. U., Candri, D. A., Astuti, S. P., Ahyadi, H., & Sukiman. (2025). The Distribution of Phytoplankton in Mangroves, Seagrass Beds, and Coral Reefs Ecosystem in West Sekotong Coastal, West Lombok. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(1), 642–655. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i1.8164>
- Martins, J. A., da Silva, T. L., Marques, S., Carvalheiro, F., Roseiro, L. B., Duarte, L. C., & Gírio, F. 2021. The use of flow cytometry to assess *Rhodospiridium toruloides* NCYC 921 performance for lipid production using *Miscanthus* sp. hydrolysates. *Biotechnol. Reports*, 30: e00639.
- Maruyama, T., Yamaguchi, M., & Chibana, H. 2024. Transverse flagellum contraction synchronized with longitudinal flagellum retraction in *Akashiwo sanguinea*, a dinokont dinoflagellate. *Cytologia (Tokyo)*., 89(4): 307–320.
- Masithah, E. D. 2022. Plankton : Manfaat, Bahaya & Bagaimana Mendapatkannya.
- Masithah, E. D. 2023. Buku Ajar Planktonologi. Airlangga University Press.
- Mattei, F., & Scardi, M. 2021. Collection and analysis of a global marine phytoplankton primary-production dataset. *Earth Syst. Sci. Data*, 13(10): 4967–4985. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4967-2021>
- Maya, S., & Nurhidayah, N. 2020. Zoologi invertebrata.
- McDowell, R. W., Luo, D., Pletnyakov, P., Upsdell, M., & Dodds, W. K. (2025). Anthropogenic nutrient inputs cause excessive algal growth for nearly half the world’s population. *Nature Communications* , 16(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57054-8>
- McGlone MLSD, Yñiguez AT, Benico G, Lum WM, Hii KA, Leong SCY, Leaw CP, Iwataki M, & Lim PT. (2024). Fish Kills Related to Harmful Algal Bloom Events in Southeast

- Asia. In Sustainability (Switzerland) (Vol. 16, Issue 23). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su162310521>
- Mehdizadeh Allaf, M., & Peerhossaini, H. 2022. Cyanobacteria: model microorganisms and beyond. 10(4): 696.
- Meiwinda, E. R. 2020. Dinamika Komunitas Plankton Pada Berbagai Sumber Pencemaran Pada Segmen Perairan Sungai Musi Di Kecamatan Kertapati Dan Gandus. Unbara Environ. Eng. J., 1(1): 21–25.
- Mersyah, R., Apriyanto, E., & Wijnana, A. P. A. 2021. Plankton biodiversity based assessment for sustainable fisheries conservation in the natural recreational park dendam lake, bengkulu, indonesia. AACL Bioflux, 14(4): 1877–1887.
- Meshjel, M. H. 2024. Diversity of free-living protozoa. 238–258.
- Mishra, S. 2025. Warming Seas: The Impact of Climate Change on Ocean Life and Ecosystems BT - Navigating Climate Change: Impacts on Biodiversity and Ecosystem Resilience (B. P. Barathan, V. Velupillai, S. Perumal, & K. Kannan (eds.); pp. 467–501). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-95-0409-1_24
- Mohamed Nafees, M. S., Kamarudin, M. S., Karim, M., Hassan, M. Z., & de Cruz, C. R. 2022. Effects of native and pregelatinized starches on feed physical properties, digestibility, growth, nutrient utilization and histology of liver and intestine of juvenile tin foil barb (*Barbonymus schwanenfeldii*, Bleeker 1853). Aquac. Res., 53(15): 5142–5158.
- Momo AN, Septa I, Duan FK, Dima AOM, Ati VM, & Ola MOA. (2021). 354-158-PB. Biotropikal Sains, 18(2), 70–77.
- Monell, K. J., Roncalli, V., Hopcroft, R. R., Hartline, D. K., & Lenz, P. H. 2023. Post-diapause DNA replication during oogenesis in a capital-breeding copepod. Integr. Org. Biol., 5(1): obad020.
- Morotti, A. L. M., Carvalho, I., & Field, R. A. 2018. Synthesis of GPI anchor analogues to support the discovery of new molecular targets of *Trypanosoma cruzi*.
- Moroz, L. L., Collins, R., & Paulay, G. 2024. Ctenophora: Illustrated Guide and Taxonomy (Issue March 2025). <https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3642-8>
- Moum, J. N., & Smyth, W. D. 2019. Upper Ocean Mixing☆ (J. K. Cochran, H. J. Bokuniewicz, & P. L. B. T.-E. of O. S. (Third E. Yager (eds.); pp. 71–79). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11573-8>
- Muahiddah, N., & Affandi, R. I. 2023. Potensi Ekstrak *Spirulina* sp. Sebagai Imunostimulan Pada Bidang Akuakultur: The Potential of *Spirulina* sp. Extract as an Immunostimulant in the Aquaculture Field. J. Sains Teknol. Lingkungan, 9(4): 754–763.
- Muffett, K., & Miglietta, M. P. 2021. Planktonic associations between medusae (classes Scyphozoa and Hydrozoa) and epifaunal crustaceans. PeerJ, 9: e11281.
- Mujib AS, Damar A, & Wardiatno Y. (2015). Spatial_Distribution_of_Planktonic_Dinof. Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis, 7(2), 479–492.
- Mujib, A. S., Damar, A., & Wardianto, Y. 2015. Distribusi Spasial Dinoflagellata Planktonik di Perairan Makassar, Sulawesi Selatan. J. Ilmu Dan Teknol. Kelaut., 7(2): 479–492.
- Mulatsih, S., Dina, K. F., Hartanti, N. U., & Safitri, R. D. 2023. Identifikasi dan kelimpahan plankton di tambak udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*) Desa Sawojajar Kecamatan Wanasari, Kabupaten Brebes. Clarias J. Perikan. Air Tawar, 4(2): 1–10.

- Mulyadi, H. A., & Lekalette, J. 2020. Biodiversitas zooplankton di perairan pesisir Pulau Keffing pada musim peralihan II, Kabupaten Seram bagian Timur. *J. Kelaut. Trop.*, 23(1): 15–28.
- Mulyasari, Peranginangin R, Suryaningrum TD, Sari A. 2003. Penelitian mengenai keberadaan biotoksin pada biota dan lingkungan perairan Teluk Jakarta. *J. Penelitian Perikanan Indonesia*. 9(5): 39-47.
- Mulyasari, Peranginangin R, Suryaningrum TD, Sari A. 2003. Penelitian mengenai keberadaan biotoksin pada biota dan lingkungan perairan Teluk Jakarta. *J. Penelitian Perikanan Indonesia*. 9 (5): 39-47.
- Mursalin, R. Zulmi, M. D. Putra, L. D. W. Handayani, I. A. Nur. 2021. Blooming fitoplankton di perairan Kepulauan Seribu. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan*. 5(1):652-667
- Murti, R. K., & Nurmiyati, N. 2025. Struktur Komunitas Mikroalga di Wisata Air Umbul Kabupaten Klaten. *J. Sumberd. Akuatik Indopasifik*, 9(3): 181–195.
- Nafisyah, A. L., Fitria, I. M. A., Nurkasanah, S., Wan, W. A. A. Q. I., & Nindarwi, D. D. 2025. Plankton Community Structure as a Bioindicator of Sustainable Water Quality in Koi (*Cyprinus carpio*) Ponds. *Egypt. J. Aquat. Biol. Fish.*, 29(2): 2677–2698.
- Nagappan, S., Das, P., AbdulQuadir, M., Thaher, M., Khan, S., Mahata, C., Al-Jabri, H., Vatland, A. K., & Kumar, G. 2021. Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. *J. Biotechnol.*, 341: 1–20.
- Naselli-Flores, L., & Padisák, J. 2023. Ecosystem services provided by marine and freshwater phytoplankton. *Hydrobiologia*, 850(12): 2691–2706. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04795-y>
- Nawab, A., Khan, M. T., Ihsanullah, I., Nafees, M., & Shah, A. M. 2025. From Pollution to Ocean Warming: The Climate Impacts of Marine Microplastics. *J. Hazard. Mater. Plast.*, 100032. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hazmp.2025.100032](https://doi.org/10.1016/j.hazmp.2025.100032)
- Nazar, A., Utami, E., & Umroh, U. 2024. Korelasi Keanekaragaman Plankton Dengan Parameter Fisika-Kimia Perairan di Estuari Sungai Selan Kabupaten Bangka Tengah. *J. Mar. Res.*, 13(3): 485–492.
- Nirmalasari R. (2018). Analysis of Water Quality In Sebangau River Kereng Bengkiray Port Based On Phytoplanktons Diversity and Composition.
- Nirmalasari, R. (2018). Analysis of Water Quality In Sebangau River Kereng Bengkiray Port Based On Phytoplanktons Diversity and Composition.
- Nirmalasari, R. 2018. Analisis kualitas air sungai sebangau pelabuhan kereng bengkiray berdasarkan keanekaragaman dan komposisi fitoplankton. *J. Ilmu Alam Dan Lingkung.*, 9(17): 48–58.
- Nonoyama, T., Kazamia, E., Nawaly, H., Gao, X., Tsuji, Y., Matsuda, Y., Bowler, C., Tanaka, T., & G. Dorrell, R. 2019. Metabolic Innovations Underpinning the Origin and Diversification of the Diatom Chloroplast. In *Biomolecules* (Vol. 9, Issue 8, p. 322). <https://doi.org/10.3390/biom9080322>
- Nonoyama, T., Kazamia, E., Nawaly, H., Gao, X., Tsuji, Y., Matsuda, Y., Bowler, C., Tanaka, T., & Dorrell, R. G. (2019). Metabolic innovations underpinning the origin and diversification of the diatom chloroplast. In *Biomolecules* (Vol. 9, Issue 8). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/biom9080322>

- Nontji, A. 2008. Plankton laut. Yayasan Obor Indonesia.
- Nugroho, S. H. 2019. Karakteristik umum Diatom dan aplikasinya pada bidang Geosains. 44(1): 70–87.
- Nur Laila Rahayu, Endang Hilmi, Dewi Artini, Sisca Febrianti Listyaningrum, Rodrigo Tyas Perwira Widyatama, & Anang Adri Ansah. 2024. The Aquatic Productivity Using The Indicator Of Plankton Diversity And Abundance In Telaga Dringo, Indonesia. *Biota J. Ilm. Ilmu-Ilmu Hayati*, 9(1): 67–74. <https://doi.org/10.24002/biota.v9i1.7497>
- Nurina, S. A., Masladen, Y., Sigit, P., & Sitogasa, A. 2024. Monitoring Kualitas Air Laut Teluk Lamong Berdasar Bioindikator Plankton Dan Benthos. *J. Univers. Tech.*, 3(1): 01–12. <https://doi.org/10.58192/unitech.v3i1.1855>
- Nurmalitasari, M., & Sudarsono, S. 2023. Keanekaragaman Plankton Dan Tingkat Produktivitas Primer Antara Dua Musim Di Perairan Kabupaten Bantul. *Kingdom (The J. Biol. Stud.)*, 9(1): 16–34.
- Oh, J. W., Pushparaj, S. S. C., Muthu, M., & Gopal, J. (2023). Review of Harmful Algal Blooms (HABs) Causing Marine Fish Kills: Toxicity and Mitigation. In *Plants* (Vol. 12, Issue 23). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/plants12233936>
- Olii, A. H., Tammu, T., & Sahami, F. M. 2022. Komposisi Dan Distribusi Plankton Prakemunculan Nike Di Perairan Teluk Gorontalo Provinsi Gorontalo. *J. Galung Trop.*, 11(2): 172–179.
- Omoruyi, O. A., & Kadiri, M. O. 2024. Abundance and Dynamics of Centric Diatom *Coscinodiscus* and Pennate Diatom *Pluerosigma* in Atlantic Ocean (Nigeria), Gulf of Guinea. *J. Appl. Sci. Environ. Manag.*, 28(8): 2551–2565.
- Ouzakar, S., Skali Senhaji, N., Rigano, F., Cafarella, C., Kounnoun, A., Cacciola, F., & Abrini, J. 2025. *Chlorella vulgaris* as a producer of lipids for antibacterial, antibiofilm and antifungal properties. *Nat. Prod. Res.*, 1–9.
- Paerl, H. (2017). The Cyanobacterial nitrogen fixation paradox in natural waters. In *F1000Research* (Vol. 6). Faculty of 1000 Ltd. <https://doi.org/10.12688/f1000research.10603.1>
- Pan, Y.-J., Dahms, H.-U., Hwang, J.-S., & Souissi, S. 2022. Recent trends in live feeds for marine larviculture: A mini review. *Front. Mar. Sci.*, 9: 864165.
- Panggabean LMG 1994. "Red Tide" Di Indonesia : Perlukah Diwaspadai?. *Oseana*. 19(1):33–38.
- Patel, A. B., Shaikh, S., Jain, K. R., Desai, C., & Madamwar, D. 2020. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches. *Front. Microbiol.*, 11: 562813. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.562813>
- Patiño, R., Christensen, V. G., Graham, J. L., Rogosch, J. S., & Rosen, B. H. (2023). Toxic Algae in Inland Waters of the Conterminous United States—A Review and Synthesis. In *Water (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 15). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/w15152808>
- Patmawati, R., Endrawati, H., & Santoso, A. 2018. Struktur Komunitas Zooplankton di Perairan Pulau Panjang dan Teluk Awur, Kabupaten Jepara. *Bul. Oseanografi Mar.*, 7(1): 37–42.

- Patty SI, Arfah H, & Abdul MS. (2015). Zat hara (fosfat, nitrat), oksigen terlarut. In *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis* (Vol. 1).
- Paulangan, Y. P., & Wally, A. R. 2023. Kelimpahan Dan Keanekaragaman Ikan Karang Pada Lokasi Transplantasi Karang Di Pantai Harlem Teluk Depapre Kabupaten Jayapura. *ACROPORA J. Ilmu Kelaut. Dan Perikan. Papua*, 6(2): 33–43. <https://doi.org/10.31957/acr.v6i2.3406>
- Pednekar SM, Matondkar SGP, Kerkar V. 2012. Spatiotemporal Distribution of Harmful Algal Flora in the Tropical Estuarine Complex of Goa, India. *The Scientific World J.* 2012:11 p. doi: 10.1100/2012/596276.
- Pereira, L., Cotas, J., Araujo, G. S., Pacheco, D., Alves da Silva, J. W., de Souza Saboya, J. P., & Teixeira Moreira, R. 2022. Plankton: Environmental and Economic Importance for a Sustainable Future (L. Pereira & A. M. Gonçalves (eds.)). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100433>
- Perillo, M., Sepe, R. M., Paganos, P., Toscano, A., & Annunziata, R. 2024. Sea cucumbers: an emerging system in evo-devo. *EvoDevo*, 15(1): 3.
- Piton, V., Reiss, R., Lemmin, U., Anneville, O., Many, G., Keller, J., Kindschi, V., Wynn, H. K., Rasconi, S., & Laine, L. 2025. Identifying and quantifying unexpected deep zooplankton diel vertical migration in a large deep lake. *Limnol. Oceanogr.*, 70(2): 259–274.
- Pizzorni, M., Innocenti, A., & Tollin, N. 2024. Droughts and floods in a changing climate and implications for multi-hazard urban planning: A review. *City Environ. Interact.*, 24: 100169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cacint.2024.100169>
- Poupon, M. A. F., Resplandy, L., Garwood, J., Stock, C., Zadeh, N., & Luo, J. 2024. Chlorophyll shading reduces zooplankton diel migration depth in a high-resolution physical biogeochemical model. 2024: 1–42.
- Praseno DP dan Sugestiningih. 2000. *Retaid di Perairan Indonesia*. P3O-LIPI. Jakarta. Hal: 2-34.
- Prasetyo, L. D., Supriyanti, E., & Sedjati, S. 2022. Pertumbuhan mikroalga *Chaetoceros calcitrans* pada kultivasi dengan intensitas cahaya berbeda. *Bul. Oseanografi Mar.*, 11(1): 59–70.
- Prates, J. A. M. 2025. Applications of Bioactive Compounds from Marine Microalgae in Health, Cosmetics, and Functional Foods. *Appl. Sci.*, 15(11): 6144.
- Pratomo, H. 2017. Kingdom Protozoa dan Filum Porifera. 1: 1–38.
- Putra, A., Aini, S., Hamdani, Maulida, C., Qhadaffi, L. A. J., Ryan, M., Harminto, Ariana, M., Subiantoro, R. A., & Tashwir. 2025. Impact of Global Climate Shifts on the Biodiversity and Functionality of Marine Zooplankton Communities. *J. Trop. Biodivers. Biotechnol.*, 10(1): 1–22. <https://doi.org/10.22146/jtbb.14575>
- Putra, A., Darsiani, Alianto, Cahyanurani, A. B., Lestari, D., Madjid, I. Y., Azril, M., Fauzia, N., Insivitawati, E., & Wulan, W. O. S. 2024. PLANKTONOLOGI.
- Putri, A., Ardellia, I. K., Fitriana, N., Moy, A., Charisma, A. M., Medika, U. A., Timur, J., & Medika, U. A. 2024. Identifikasi Penyakit Protozoa Terhadap Manusia. 5.
- Putri, E. S. A., Helmi, M., & Atmodjo, W. 2024. Analisis Material Padatan Tersuspensi dan Pengaruhnya Terhadap Konsentrasi Klorofil-A Berdasarkan Pemodelan Hidrodinamika 2D di Perairan Slamayan, Kota Pekalongan. *Indones. J. Oceanogr.*, 6(2): 132–138.

- Rachman A, Intan MDB, Thoha H, Sianturi OR, Mukyadi HA, Muawanah, & Masseret E. (2021). Distribution and abundance of *Pyrodinium bahamense* cyst in the harmful algal blooms risk waters in Indonesia. *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia*, 6(1)(1), 37–53. <https://doi.org/10.14203/oldi.2021.v6i1.337i>
- Radiarta, I. N., Erlania, E., & Sugama, K. S. K. 2015. Analisis Spasial Dan Temporal Komunitas Fitoplankton Sekitar Budidaya Laut Terintegrasi Di Teluk Ekas, Nusa Tenggara Barat. *J. Ris. Akuakultur*, 10(2): 283–291.
- Rahat, S. H., Saki, S., Khaira, U., Biswas, N. K., Dollan, I. J., Wasti, A., Miura, Y., Bhuiyan, M. A. E., & Ray, P. 2024. Bracing for impact: how shifting precipitation extremes may influence physical climate risks in an uncertain future. *Sci. Rep.*, 14(1): 17398. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65618-9>
- Rahmadina, R., & ANANDA, D. 2018. Inventarisasi hewan invertebrata pada filum coelenterata di pantai pondok permai kabupaten serdang bedagai, Sumatera Utara. *Klorofil J. Ilmu Biol. Dan Terap.*, 2(2): 1–2.
- Rahmah, N., Zulfikar, A., & Apriadi, T. 2022. Kelimpahan Fitoplankton dan Kaitannya dengan Beberapa Parameter Lingkungan Perairan di Estuari Sei Carang Kota Tanjungpinang. *J. Mar. Res.*, 11(2): 189–200.
- Ramadhan, R., Teristiandi, N., & Fatiqin, A. 2021. Keanekaragaman Fitoplankton di Sungai Kabupaten Banyuasin. *Org. J. Biosci.*, 1(2): 71–78. <https://doi.org/10.24042/organisms.v1i2.10678>
- Rasconi, S., Gall, A., Winter, K., & Kainz, M. J. 2015. Increasing water temperature triggers dominance of small freshwater plankton. *PLoS One*, 10(10): 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140449>
- Ratnawati, R., Ilham, I., & Hasan, O. D. S. n.d. Pengaruh Fitoplankton Sebagai Pakan Alami Terhadap Pertumbuhan Larva Udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*). *Bul. Jalanidhitah Sarva Jivitam*, 5(1): 37–44.
- Raunsay, E. K., & Koirewoa, D. C. 2016. Plankton Sebagai Parameter Kualitas Perairan Teluk Yos Sudarso dan Sungai Anafre Kota Jayapura Papua. *J. Biol.*, 8(2): 1–12.
- Retnaningdyah, C. 2019. Blooming microcystis di ekosistem perairan tawar dan cara pengendaliannya. Universitas Brawijaya Press.
- Retnaningdyah, C., Hakim, L., Arisoesilaningsih, E., Sumani, Setiahadi, R., & Mukhtasor. 2025. Phytoplankton diversity as a health indicator of coastal ecosystems in Prigi Bay, Trenggalek District, East Java, Indonesia. 26(5): 2198–2209. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d260518>
- Ridho, Moh. R., Patriono, E., & Mulyani, Y. S. (2020). Hubungan kelimpahan fitoplankton, konsentrasi klorofil-a dan kualitas perairan pesisir sungsang, Sumatera Selatan. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 12(1), 1–8. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v12i1.25745>
- Riding, J. B., Fensome, R. A., Soyer-Gobillard, M.-O., & Medlin, L. K. 2022. A review of the dinoflagellates and their evolution from fossils to modern. *J. Mar. Sci. Eng.*, 11(1): 1.
- Rissik D, Senden D, Doherty M. Ingleton T, Ajani P, Bowling L, Gibbs M, Gladstone M, Kobayashi T, Suthers I, Froneman W. 2009. Plankton related environmental and water quality issues. In Suthers I and Rissik D, editor. *Plankton: A guide to their ecology and monitoring for water quality*. Australia: CSIRO Publising. p 39-72.

- Riyanto S. (2015). Kajian potensi suhu air laut.
- Roberts, A. J., & Suttle, C. A. 2023. Pathogens and Passengers : Roles for Crustacean Zooplankton Viruses in the Global Ocean. 1–21.
- Rosadi, R., Musa, M., & Lelono, T. D. 2020. Plankton community structure as bioindicator trophic status of Jatigede Reservoir Waters. *Res. J. Life Sci.*, 7(1): 29–40.
- Rosalina, D., Rizkiah, R., Handayani, E., Wardono, S., Sutrisno, B. O., Ismail, R. M., Sabilah, A. A., Leilani, A., & Alfira. 2025. Pemetaan Sebaran Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a Menggunakan Data Citra Satelit Aqua MODIS di Perairan Selat Makassar. 18(1): 31–39.
- Rouso, B. Z., Bertone, E., Stewart, R. A., Hughes, S. P., Hobson, P., & Hamilton, D. P. 2022. Cyanobacteria species dominance and diversity in three Australian drinking water reservoirs. *Hydrobiologia*, 849(6): 1453–1469.
- Rozirwan, Apri, R., & Iskandar, I. 2020. Distribution of zooplankton abundance and diversity in the vicinity of Maspari Island, Bangka Strait, South Sumatra, Indonesia. *Eurasia J. Biosci.*, 3579(14): 3571–3579. <https://www.researchgate.net/publication/344607309>
- Rozirwan, Az-Zahrah, S. A. F., Khotimah, N. N., Nugroho, R. Y., Putri, W. A. E., Fauziyah, Melki, Agustriani, F., & Siregar, Y. I. 2024. Ecological Risk Assessment of Heavy Metal (Pb, Cu) Contamination in Water, Sediment, and Polychaeta (Neoleanira Tetragona) from Coastal Areas Affected by Aquaculture, Urban Rivers, and Ports in South Sumatra. *J. Ecol. Eng.*, 25(1): 303–319. <https://doi.org/10.12911/22998993/175365>
- Rozirwan, Balkis, A., Khotimah, N. N., Aryawati, R., Fauziyah, Putri, W. A. E., & Nugroho, R. Y. 2024. Impact of Environmental Factors on Phytoplankton Community Structure From Two Different River Estuaries , South Sumatra , Indonesia. <https://doi.org/10.4108/eai.3-11-2023.2347971>
- Rozirwan, R. 2010. Teknik Kultur Klon Spesies Dinoflagelata yang Menyebabkan Red Tide di Perairan Pantai Lido, Johor Bahru, Malaysia. *J. Penelit. Sains*, 13(1): 31–34.
- Rozirwan, R., Bahrudin, I., Barus, B. S., Nugroho, R. Y., & Khotimah, N. N. 2023. First assesment of coral Mussidae in Kelagian Island waters, Lampung. *Proc. 9TH Int. Symp. Innov. Bioprod. Indones. Biotechnol. Bioeng. 2022 Strength. Bioeconomy through Appl. Biotechnol. Bioeng. Biodivers.*, 2972(1): 040008. <https://doi.org/10.1063/5.0171642/2931856>
- Rozirwan, Sugeha, H. Y., Fitriya, N., Firdaus, M. R., Avianto, P., & Iskandar, I. 2021. Correlation Between the Phytoplankton Distribution with the Oceanographic Parameters of the Deep-Sea Surface of Sangihe-Talaud, North Sulawesi, Indonesia. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 789(1): 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/789/1/012007>
- Rozirwan. (2010). Teknik Kultur Klon Spesies Dinoflagelata yang Menyebabkan Red Tide. In *Jurnal Penelitian Sains* (Vol. 13).
- Ruslan, A. A. F. 2023. Identifikasi protozoa toxoplasma gondii dan isospora spp pada kucing di beberapa pet clinic kota makassar= identification of protozoa toxoplasma gondii and isospora spp in cats at several pet clinics in Makassar city. Universitas Hasanuddin.
- Sabran, M., Zainal, S., & Febriawan, A. 2022. The Abundance and Diversity of Plankton in the Waters of the Tasilaha Lagoon Helpano Village, South Banawa, Donggala Regency. 22: 1049–1056.

- Salwa H, Chandrika EL, & Paryono. (2024). *adminejikt,+05_57446-NN-SEBARAN+SPASIAL+PLANKTON+DAN+KLOROFIL-A+...OK_LY*. Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis, 16(3), 343–352.
- Salwa, H., & Larasati, C. E. 2024a. Sebaran Spasial Plankton dan Klorofil-a sebagai Indikator Penentuan Daerah Potensial Penangkapan Ikan di Perairan Gili Trawangan: Spatial Distribution of Plankton and Chlorophyll-a as Indicators for Determining Potential Fishing Grounds in the Waters of G. J. Ilmu Dan Teknol. Kelaut. Trop., 16(3): 343–352.
- Salwa, H., & Larasati, C. E. 2024b. Sebaran spasial plankton dan klorofil-a sebagai indikator penentuan daerah potensial penangkapan ikan di perairan gili trawangan Provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB) merupakan salah satu daerah di Indonesia yang dikenal memiliki keanekaragaman. J. Ilmu Dan Teknol. Kelaut. Trop., 16(December): 343–352.
- Samudra, S. R., Soeprobawati, T. R., & Izzati, M. 2013. Komposisi , Kemelimpahan dan Keanekaragaman Fitoplankton Danau Rawa Pening Kabupaten Semarang. 15(1):.
- Samudra, S. R., Tri,), Soeprobawati, R., Munifatul Izzati,), Program,), & Biologi, S. M. (2013). Komposisi, Kemelimpahan dan Keanekaragaman Fitoplankton Danau Rawa Pening Kabupaten Semarang (Vol. 15, Issue 1).
- Santhosh, B., Anil, M. K., Muhammed Anzeer, F., Aneesh, K. S., Abraham, M. V, Gopakumar, G., George, R. M., Gopalakrishnan, A., & Unnikrishnan, C. 2018. Culture techniques of marine copepods. ICAR-Central Marine Fisheries Research Institute.
- Saputra, S., Plankton, K., Sub, D., Dan, K., Plankton, K., Sub, D. I., Riam, D. A. S., Borneo, S., Saputra, S., Asmawi, S., Yunita, R., Banjar, K., Kalimantan, P., Toman, L., Riam, B., Batas, B., & Bujur, R. 2022. Kanan Provinsi Kalimantan Selatan. 134–144.
- Sarker, S., Yadav, A. K., Akter, M., Shahadat Hossain, M., Chowdhury, S. R., Kabir, M. A., & Sharifuzzaman, S. M. 2020. Rising temperature and marine plankton community dynamics: Is warming bad? Ecol. Complex., 43(April): 100857. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2020.100857>
- Sartimbul, A., Rohadi, E., Herawati, E. Y., Yona, D., Khasanah, R. I., & Widiarti, R. 2021. Plankton Selat Bali: Identifikasi, Dinamika, dan Solusi Pemantauannya. Universitas Brawijaya Press.
- Sathasivam, R., Radhakrishnan, R., Hashem, A., & Abd Allah, E. F. 2019. Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine. Saudi J. Biol. Sci., 26(4): 709–722. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.11.003>
- Satyantini, W. H., Ainy, S., Fadila, A. S., Dewi, N. N., & Sulmartiwi, L. 2025. Protein Content, Fucoxanthin and Growth of Chaetoceros calcitrans Using Liquid Organic Fertilizer from Agricultural and Fish By-Product. Egypt. J. Aquat. Biol. Fish., 29(4): 2369–2386.
- Sellner KG, Doucette GJ, Kirkpatrick GJ. 2003. Harmful algal blooms: causes, impacts and detection. J Ind Microbiol Biotechnol. 30:383–406.
- Setyadji, B., & Priatna, A. 2011. Distribusi spasial dan temporal plankton di perairan teluk tomini, Sulawesi. Bawal Widya Ris. Perikan. Tangkap, 3(6): 387–395.
- Setyawan, F. H. 2019. Fraksi Dan Aktivitas Antibakteri Ekstrak Chaetoceros calcitrans Terhadap Histopatologi Insang Dan Hati Ikan Mas (Cyprinus carpio) yang diinfeksi Bakteri Aeromonas Salmonicida. Universitas Brawijaya.
- Seygita, V., & Ikhwan Siregar, Y. (2015). Analisis Kelimpahan Dinoflagellata Bentik Beracun di Perairan Teluk Bayur, Sumatera Barat.

- Seygita, V., Thamrin, T., & Siregar, Y. 2015. Analisis Kelimpahan Dinoflagellata Benthik Beracun di Perairan Teluk Bayur, Sumatera Barat. *Din. Lingkung. Indones.*, 2: 92. <https://doi.org/10.31258/dli.2.2.p.92-99>
- Sha, J., Xiong, H., Li, C., Lu, Z., Zhang, J., Zhong, H., Zhang, W., & Yan, B. 2021. Harmful algal blooms and their eco-environmental indication. *Chemosphere*, 274: 129912. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129912>
- Shabrina, F. N., Saptarini, D., & Setiawan, E. 2020. Struktur Komunitas Plankton di Pesisir Utara Kabupaten Tuban. *J. Sains Dan Seni ITS*, 9(2): 488875.
- Sharpe, H., Gallardi, D., Gurney-Smith, H., Guyonnet, T., McKindsey, C. W., & Lacoursière-Roussel, A. 2024. Ecological insight of seasonal plankton succession to monitor shellfish aquaculture ecosystem interactions. *Front. Mar. Sci.*, 11: 1448718.
- Sidabutar T. 2006. Fenomena red tide yang dapat mengakibatkan kerugian pada sektor perikanan. *Prosiding Seminar Nasional Tahunan III Hasil Penelitian Perikanan dan Kelautan. Jurusan Perikanan dan Kelautan Fakultas Pertanian, UGM.* hal. 114-126
- Sidabutar, T., E.S. Srimariana and S. Wouthuyzen. 2021. Phytoplankton species potentially Harmful Algal Blooms (HABs) in Jakarta Bay. *International Symposium on Aquatic Sciences and Resources Management. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*
- Siddons, J. T., Irwin, A. J., & Finkel, Z. V. 2022. Graphical Analysis of A Marine Plankton Community Reveals Spatial, Temporal, and Niche Structure of Sub-Communities. *Front. Mar. Sci.*, 9(August): 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.943540>
- Sigalingging, A., Bulan, D. E., & Suryana, I. 2023. Hubungan Kelimpahan Fitoplankton Dengan Kandungan Nitrat dan Fosfat Pada Tambak Secure Di Kampung Suaran, Kabupaten Berau. *BIOPROSPEK J. Ilm. Biol.*, 15(2): 43–54.
- Sinaga, L., Putriningtias, A., & Komariyah, S. 2021. PENGARUH INTENSITAS CAHAYA TERHADAP PERTUMBUHAN *Nannochloropsis* sp. *J. Akuakultura Univ. Teuku Umar*, 4(2): 31–37.
- Sirait, M., Rahmatia, F., & Pattullo, P. 2018. Komparasi indeks keanekaragaman dan indeks dominansi fitoplankton di sungai ciliwung jakarta (comparison of diversity index and dominant index of phytoplankton at ciliwung river jakarta). *J. Kelaut. Indones. J. Mar. Sci. Technol.*, 11(1): 75–79.
- Siregar, Z. A., Irianto, H. E., Anggoro, S., & Purnaweni, H. 2024. Monitoring of water quality with the plankton indicator and the saprobic index in a minapadi area. *AACL Bioflux*, 17(1): 156–165.
- Sitepu, S. S., Rosmaiti, R., Haser, T. F., & Febri, S. P. 2025. Growth Performance of *Nannochloropsis* sp. in Different Aquaculture Wastewater Media. *J. Ilm. Samudra Akuatika*, 9(1): 38–46.
- Sonak, S. M. 2017. Molluscs and their shells. In *Marine Shells of Goa: A Guide to Identification* (pp. 1–23). Springer.
- Sorvari, S., Korhola, A., & Thompson, R. 2001. Climate impacts on remote subarctic lakes in Finnish Lapland: hydrobiological and palaeolimnological assessment. *Clim. Chang. Var. North. Eur. (CLICK)*, Turku, Finl., 97.

- Sousa, F. D. R., & Elmoor-Loureiro, L. M. A. 2019. Identification key for the Brazilian genera and species of Aloninae (Crustacea, Branchiopoda, Anomopoda, Chydoridae). Pap. Avulsos Zool., 59: e20195924.
- Spínola, M. P., Mendes, A. R., & Prates, J. A. M. 2024. Chemical composition, bioactivities, and applications of Spirulina (Limnospira platensis) in food, feed, and medicine. 13(22): 3656.
- Sudinno, D., Jubaedah, I., & Anas, P. 2015. Water Quality And Pond In Coastal Communities Plankton Subang Regency West Java. J. Penyul. Perikan. Dan Kelaut., 9(1): 13–28.
- Sugie, K., Fujiwara, A., Nishino, S., Kameyama, S., & Harada, N. 2020. Impacts of Temperature, CO₂, and Salinity on Phytoplankton Community Composition in the Western Arctic Ocean. Front. Mar. Sci., 6(January): <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00821>
- Sugumar, S., Rajesh, R., Kannan, P., & Venkatesan, P. 2020. Biodiesel production from the biomass of Dunaliella salina green microalgae using organic solvent. Mater. Today Proc., 33: 3260–3264.
- Suhendra, S., Sugianti, A. F., Safitri, A., & Wahyudiyanto, D. 2023. Potensi pakan mengandung omega-3 menggunakan mikroalga aurantiochytrium untuk industri perikanan yang berkelanjutan. Pros. Semin. Nas. Penelit. LPPM UMJ,.
- Sun, D., Wu, S., Li, X., Ge, B., Zhou, C., Yan, X., Ruan, R., & Cheng, P. 2024. The structure, functions and potential medicinal effects of chlorophylls derived from microalgae. Mar. Drugs, 22(2): 65.
- Sun, J., Chen, Z., Xu, K., & Lin, M. 2024. Editorial: Marine biodiversity under global climate change. J. Sea Res., 202: 102555. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102555>
- Suprakto, B., Bintari, Y. K., Aulia, D., Rizky, P. N., & Wartini, S. n.d. Plankton abundance and water quality profile of vannamei shrimp (Litopenaeus vannamei) farming intensive system. Aurelia J., 6(2): 227–236.
- Supriatna, N., Buhari, N., & Jefri, E. (2025). Phytoplankton Diversity and The Potential of Harmful Algal Blooms (HABs) in Utan Waters Sumbawa. Jurnal Biologi Tropis, 25(2), 2353–2361. <https://doi.org/10.29303/jbt.v25i2.8781>
- Surilayani, D., & Aldrianto, A. 2015. Pengaruh Perbedaan Salinitas Medium Kultur Terhadap Pertumbuhan Biomass Nostoc sp. J. Pertan., 6(2): 64–67.
- Surilayani, D., & Aldrianto, D. E. (2015). Pengaruh perbedaan salinitas medium kultur terhadap pertumbuhan biomass nostoc sp. The effect of different salinity culture medium on the growth of biomass Nostoc sp.
- Susilowati, R., Bengen, D. G., Krisanti, M., Januar, H. I., & Rusmana, I. 2023. Temporal and spatial distribution of plankton community in three Indonesian salt pond environments. 24(3): 1833–1844. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240359>
- Svetlichny, L., Larsen, P. S., & Kiørboe, T. 2020. Kinematic and dynamic scaling of copepod swimming. 5(2): 68.
- Tascón-Peña, O., Cabrerizo, M. J., Pérez-Lorenzo, M., & Marañón, E. 2025. Impact of thermal fluctuations on phytoplankton: an experimental multi-trait analysis across species. J. Plankton Res., 47(3): fbaf021. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbaf021>

- Taylor, A. R., Brownlee, C., & Wheeler, G. 2017. Coccolithophore cell biology: chalking up progress. *Ann. Rev. Mar. Sci.*, 9: 283–310.
- Tham, P. E., Lim, H. R., Khoo, K. S., Chew, K. W., Yap, Y. J., Munawaroh, H. S. H., Ma, Z., Rajendran, S., Gnanasekaran, L., & Show, P. L. 2023. Insights of microalgae-based aquaculture feed: A review on circular bioeconomy and perspectives. *Algal Res.*, 74: 103186.
- Thiagarajan, C., & Devarajan, Y. 2025. The urgent challenge of ocean pollution: Impacts on marine biodiversity and human health. *Reg. Stud. Mar. Sci.*, 81: 103995. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103995>
- Triawan, A. C., & Arisandi, A. 2020. Struktur komunitas fitoplankton di perairan muara dan laut Desa Kramat Kecamatan Bangkalan Kabupaten Bangkalan. *Juv. J. Ilm. Kelaut. Dan Perikan.*, 1(1): 97–110.
- Tupang, K. T. M. 2024. Studi Foraminifera untuk Penentuan Umur dan Lingkungan Pengendapan pada Formasi Sentolo, Desa Geden, Kecamatan Lendah, Kabupaten Kulon Progo, Yogyakarta. 22–27.
- Turang, D. A. O. 2017. Sistem Pakar Penentuan Jenis Planktonic Foraminifera Berbasis Web Dengan Metode Forward Chaining. *J. Ilm. Teknol. Infomasi Terap.*, 4(1):.
- Turk, V., Forti, A., Kramar, M. K., & Žnidarič, M. T. 2021. Observations on the Surface Structure of *Aurelia solida*.
- Turley, C. 2013. Chapter 2 - Ocean Acidification (K. J. Noone, U. R. Sumaila, & R. J. B. T.-M. O. E. in a C. C. Diaz (eds.); pp. 15–44). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407668-6.00002-1>
- Tururaja, T. S., Bawole, R., Moge, R. A., Murthihapsari, Manan, J., Kusuma, A. B., Kolibongso, D. 2025. Detection and Identification of Potentially Harmful Microalgal Species in Doreri Bay, Manokwari, West Papua, Indonesia: A Preliminary Study. *Ilmu Kelautan Vol 30(1)* : 53 - 70.
- Ugaya, A. Y., Yan, C., Chen, H., & Wang, Q. 2025. Unravelling the eco-monitoring potential of phytoplankton towards a sustainable aquatic ecosystem. *Mar. Pollut. Bull.*, 216(January): 118021. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118021>
- Umbekna, S., Wijayanti, L. A. S., Paiki, K., & Lubis, A. M. 2025. Komposisi Jenis Fitoplankton di Perairan Teluk Tanah Merah, Depapre, Papua. *FISHIANA J. Mar. Fish.*, 4(1): 66–74.
- Umbekna, S., Hernawan, U., Setyobudi, E., Wijayanti, L. A. S., Satriyo, T. B., Aryudiawan, C., & Setiawan, R. Y. 2020. Plankton abundance and diversity north of Lembata Island, Indonesia. *AACL Bioflux*, 13(4): 2355–2364.
- Uyeda, J. C., Harmon, L. J., & Blank, C. E. 2016. A comprehensive study of cyanobacterial morphological and ecological evolutionary dynamics through deep geologic time. *PLoS One*, 11(9): e0162539.
- Valenzuela-Sanchez, C. G., Pasten-Miranda, N. M. A., Enriquez-Ocaña, L. F., Barraza-Guardado, R. H., Holguin, J. E. V., & Martinez-Cordova, L. R. 2021. Phytoplankton composition and abundance as indicators of aquaculture effluents impact in coastal environments of mid Gulf of California. 7(2):.
- Valiela I. 1984. *Marine Ecological Process*. New York. Springer-Verlag

- Vanitha, S., & Selvi, M. 2024. Studies on phenetic diversity of microalgae from sediment sample of Ramanadhi River, Tamil Nadu: Focus to generic level. *Res. Jr. Agril. Sci*, 15(2): 517–524.
- Varmlandia, A., & Hadisusanto, S. 2023. Comparison of the Composition and Abundance of Phytoplankton Based on Different Land Use in the Cisadane River, Tangerang Regency. *Berk. Ilm. Biol.*, 14(2): 37–47. <https://doi.org/10.22146/bib.v14i2.7684>
- Venegas, R. M., Acevedo, J., & Treml, E. A. 2023. Three decades of ocean warming impacts on marine ecosystems: A review and perspective. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, 212: 105318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2023.105318>
- Vijayaraj, R., Jayaprakashvel, M., & Altaff, K. 2022. Efficacy of *Apocyclops royi* (Cyclopoida, Copepoda) nauplii as live prey for the first feeding larvae of Silver Pompano, *Trachinotus blochii* (Lacepède, 1801). *Asian J. Fish. Aquat. Res.*, 20(4): 29–34.
- Vijayaram, S., Ringø, E., Ghafarifarsani, H., Hoseinifar, S. H., Ahani, S., & Chou, C.-C. 2024. Use of algae in aquaculture: a review. 9(2): 63.
- Wahyuni, W. I., Amin, B., & Siregar, S. H. (2021). Analysis of nitrate, phosphate and silicate content and their effects on planktonic abundance in the estuary waters of batang arau or padang city west sumatra province. In *Asian Journal of Aquatic Sciences* (Vol. 4, Issue 1).
- Wang B, Ma Y, Wang Y, Lazhu, Wang L, Ma W, & Su B. (2023). Analysis of Lake Stratification and Mixing and Its Influencing Factors over High Elevation Large and Small Lakes on the Tibetan Plateau. *Water (Switzerland)*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/w15112094>
- Wang, B., Ma, Y., Wang, Y., Zhu, L., Wang, L., Ma, W., & Su, B. 2023. Analysis of Lake Stratification and Mixing and Its Influencing Factors over High Elevation Large and Small Lakes on the Tibetan Plateau. 15: 2094. <https://doi.org/10.3390/w15112094>
- Wang, H., Wu, P., Xiong, L., Kim, H. S., Kim, J. H., & Ki, J. S. (2024). Nuclear genome of dinoflagellates: Size variation and insights into evolutionary mechanisms. In *European Journal of Protistology* (Vol. 93). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.ejop.2024.126061>
- Wang, H., Wu, P., Xiong, L., Kim, H.-S., Kim, J. H., & Ki, J.-S. 2024. Nuclear genome of dinoflagellates: Size variation and insights into evolutionary mechanisms. *Eur. J. Protistol.*, 93: 126061. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejop.2024.126061>
- Wei, J., Ji, X., & Hu, W. 2022. Characteristics of phytoplankton production in wet and dry seasons in hyper-eutrophic Lake Taihu, China. 14(18): 11216.
- Weinkauff, M. 2015. The Influence of the Environment on Shell Morphology and Calcification in Planktonic Foraminifera. Dissertation, Tübingen, Universität Tübingen, 2015.
- Weliyadi, E. 2013. Identifikasi spesies fitoplankton penyebab harmful algal bloom (HAB) di perairan Tarakan. *J. Harpodon Borneo*, 6(1):.
- Wiadnyana NN. 1997. Toksisitas pada Plankton dan Makanan Laut: Metode Analisis dengan HPLC. *Jurnal Ilmu-Ilmu Perairan dan Perikanan Indonesia*. 5(2):73-82.
- Widiarti R, Pudjiarto RK, Fathoniah I, & Adi APW. (2016). Dinoflagellata epifitik pada makroalga yang berpotensi menyebabkan Ciguatera Fish Poisoning di perairan Pulau Weh, Aceh. 97–102. <https://doi.org/10.13057/psnmmbi/m020119>
- Widiarti R. 2000. Pola Sukses Organisme Penyebab Red Tide *Pyrodinium bahamense* Plate di Teluk Hurun Lampung Selatan [tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor. 80 hal.

- Widjaja, S. 2019. Sumber Daya Hayati Maritim.
- Witariningsih, N. P., Suteja, Y., & Putra, I. N. G. 2020. Komposisi jenis dan fluktuasi kelimpahan plankton secara temporal di perairan Selat Lombok. *J. Mar. Aquat. Sci.*, 6(1): 140–146.
- Wootton, M., Castellani, C., & Edwards, M. 2017. Crustacea: copepoda. *Mar. Plankton. A Pract. Guid. to Ecol. Methodol. Taxon.* Oxford Univ. Press. Oxford, 267–380.
- Wulandari, D. J., & Larasati, C. E. 2025. Jurnal Biologi Tropis Abundance of Plankton Types and Diversity in The Water of Teluk Nare , North Lombok. *J. Biol. Trop.*,.
- Wulandari, D. J., Larasati, C. E., & Paryono, P. 2025. Abundance of Plankton Types and Diversity in The Water of Teluk Nare, North Lombok. *J. Biol. Trop.*, 25(3): 2822–2830.
- Xiong, W., Huang, X., Chen, Y., Fu, R., Du, X., Chen, X., & Zhan, A. 2020. Zooplankton biodiversity monitoring in polluted freshwater ecosystems: A technical review. *Environ. Sci. Ecotechnology*, 1(November 2019): 100008. <https://doi.org/10.1016/j.es.2019.100008>
- Yanuhar, U. 2018. Avertebrata. Universitas Brawijaya Press.
- Yasa M, Dindin U, & Nurbaeti N. (2024). Struktur Komunitas Fitoplankton pada Budidaya Ikan Koi (*Cyprinus Rubrosfuscus*) dalam Sistem Vertiqua Menggunakan Biofikal Filter Atas. *Manfish: Jurnal Ilmiah Perikanan Dan Peternakan*, 2(2), 191–212. <https://doi.org/10.62951/manfish.v2i2.70>
- Yasa, M., Dindin, U., & Nurbaeti, N. 2024. Struktur Komunitas Fitoplankton pada Budidaya Ikan Koi (*Cyprinus Rubrosfuscus*) dalam Sistem Vertiqua Menggunakan Biofikal Filter Atas. *Manfish J. Ilm. Perikan. Dan Peternak.*, 2: 191–212. <https://doi.org/10.62951/manfish.v2i2.70>
- Yogaswara, D. (2020). Distribution and Nutrient Cycle in Estuary and Its Control. <https://www.researchgate.net/publication/341057079>
- Young, J. R., Andruleit, H., & Probert, I. 2009. Coccolith function and morphogenesis: insights from appendage-bearing coccolithophores of the family syracosphaeraceae (haptophyta) 1. *J. Phycol.*, 45(1): 213–226.
- Yuan, K. K., Li, H. Y., & Yang, W. D. (2024). Marine Algal Toxins and Public Health: Insights from Shellfish and Fish, the Main Biological Vectors. In *Marine Drugs* (Vol. 22, Issue 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/md22110510>
- Yudasmara, G. A. 2015. Analisis keanekaragaman dan kelimpahan relatif algae mikroskopis di berbagai ekosistem pada kawasan intertidal Pulau Menjangan Bali Barat. *JST (Jurnal Sains Dan Teknol.*, 4(1):.
- Yuliana, & Mutmainnah. (2019). toranifikp,+Artikel+3. *Fisheries and Marine Science*, 3(1), 16–25.
- Yulianto D, M. M. P. P. (2014). 7099-13494-1-SM. *IPONEGORO JOURNAL OF MAQUARES*, 3(4), 195–200.
- Yulianto, D., Muskananfolo, M. R., & Purnomo, P. 2014. Tingkat produktivitas primer dan kelimpahan fitoplankton berdasarkan waktu yang berbeda di perairan pulau panjang, Jepara. *Iponegoro J. Maquares*, 3(4): 195–200.

- Zainuri, M., Indriyawati, N., Syarifah, W., & Fitriyah, A. 2023. Korelasi intensitas cahaya dan suhu terhadap kelimpahan fitoplankton di Perairan Estuari Ujung Piring Bangkalan. *Bul. Oseanografi Mar.*, 12(1): 20–26.
- Zanella, L., & Vianello, F. 2020. Microalgae of the genus *Nannochloropsis*: Chemical composition and functional implications for human nutrition. *J. Funct. Foods*, 68: 103919.
- Zeng, C., Shao, L., Ricketts, A., & Moorhead, J. 2018. The importance of copepods as live feed for larval rearing of the green mandarin fish *Synchiropus splendidus*. 491(January): 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.03.011>
- Zhang, Q., & Luo, Y. W. (2022). A Competitive Advantage of Middle-Sized Diatoms From Increasing Seawater CO₂. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.838629>
- Zhang, Q., & Luo, Y.-W. 2022. A Competitive Advantage of Middle-Sized Diatoms From Increasing Seawater CO₂. *Front. Microbiol.*, Volume 13-2022: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.838629>
- Zhang, W., Hao, Q., Zhu, J., Deng, Y., Xi, M., Cai, Y., Liu, C., Zhai, H., & Le, F. 2023. Nanoplanktonic diatom rapidly alters sinking velocity via regulating lipid content and composition in response to changing nutrient concentrations. *Front. Mar. Sci.*, 10: 1255915.
- Ziveri, P., Gray, W. R., Anglada-Ortiz, G., Manno, C., Grelaud, M., Incarbona, A., Rae, J. W. B., Subhas, A. V., Pallacks, S., White, A., Adkins, J. F., & Berelson, W. 2023. Pelagic calcium carbonate production and shallow dissolution in the North Pacific Ocean. *Nat. Commun.*, 14(1): 805. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36177-w>
- Ziveri, P., Gray, W. R., Anglada-Ortiz, G., Manno, C., Grelaud, M., Incarbona, A., Rae, J. W. B., Subhas, A. V., Pallacks, S., White, A., Adkins, J. F., & Berelson, W. (2023). Pelagic calcium carbonate production and shallow dissolution in the North Pacific Ocean. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36177-w>
- Zuhri, M. I., Adriman, A., & Sumiarsih, E. 2024. Struktur komunitas plankton di perairan mangrove Teluk Buo, Padang, Sumatra Barat. *J. Oase Nusantara*, 3(2): 17–24.
- Zuykova, E. I., Bochkarev, N. A., & Kotov, A. A. 2021. Specific and genetic structure of the *Daphnia longispina* sl complex (Cladocera, Daphniidae) in water bodies of Southern Siberia. *Biol. Bull.*, 48(7): 880–891.

GLOSARIUM

Abdomen (Urosome) = Bagian posterior tubuh zooplankton tertentu, seperti copepoda, yang bersegmen, tidak memiliki kaki, dan berfungsi dalam keseimbangan serta reproduksi.

Abiotik = Komponen lingkungan tak hidup yang mempengaruhi ekosistem, seperti suhu, pH, salinitas, cahaya, dan nutrisi.

Adaptasi Ekologis = Kemampuan organisme, termasuk plankton, untuk merespons dan menyesuaikan diri terhadap perubahan faktor lingkungan seperti suhu, pH, serta ketersediaan nutrisi di ekosistem perairan.

Adaptasi Morfologis = Penyesuaian bentuk dan struktur tubuh organisme terhadap kondisi lingkungan untuk meningkatkan kelangsungan hidup, efisiensi gerak, dan perolehan nutrisi.

Afotik = Zona perairan yang tidak mendapatkan penetrasi cahaya matahari, sehingga tidak mendukung berlangsungnya proses fotosintesis oleh organisme fotosintetik.

Akinet = Sel dorman berdinding tebal pada sianobakteri berfilamen yang berfungsi sebagai cadangan hidup saat kondisi lingkungan tidak menguntungkan.

Akuakultur = Kegiatan budidaya organisme akuatik, seperti ikan, udang, moluska, dan alga, dalam lingkungan perairan yang dikelola secara terkontrol untuk tujuan produksi.

Akuakultur Berkelanjutan = Praktik budidaya perairan yang mengintegrasikan aspek ekologi, produktivitas, dan pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan.

Alveoli = Vesikel pipih pada permukaan sel dinoflagellata yang membentuk lapisan pelindung (amphiesma).

Amphiesma = Struktur pelindung kompleks pada dinoflagellata yang tersusun atas membran plasma dan lapisan alveoli.

Amnesic Shellfish Poisoning (ASP) = Keracunan akibat konsumsi kerang yang mengandung asam domoat, ditandai dengan gangguan sistem saraf dan kehilangan ingatan.

Anabolik = Reaksi metabolisme yang menyusun molekul kompleks dari molekul sederhana, seperti pembentukan karbohidrat pada fotosintesis.

Analisis komunitas plankton = Pendekatan penelitian yang digunakan untuk mengkaji komposisi dan struktur komunitas plankton melalui berbagai parameter ekologi, termasuk kelimpahan, tingkat keanekaragaman, keseragaman, dan dominansi spesies.

Antennula = Sepasang antena pertama pada copepoda yang berfungsi sebagai alat sensorik dan membantu pergerakan.

Antioksidan = Senyawa yang mampu menghambat atau menetralkan reaksi oksidasi berlebihan dalam sel sehingga melindungi organisme dari stres oksidatif.

Aperture = Bukaan utama pada cangkang foraminifera yang menjadi jalur keluarnya pseudopodia.

Apex = Ujung katup diatom yang memiliki variasi bentuk dan menjadi karakter penting dalam identifikasi taksonomi.

43 **Artemia** = Organisme zooplanktonik dari golongan krustasea yang sering digunakan sebagai sumber pakan alami untuk larva ikan dan udang pada sistem budidaya perairan.

52 **Arus** = Pergerakan massa air laut yang berperan dalam distribusi nutrisi dan organisme plankton.

Arus Laut = Aliran massa air di perairan laut yang bergerak baik secara mendatar maupun ke arah vertikal, yang dipicu oleh pengaruh angin, variasi kepadatan air, dan gaya rotasi bumi.

Astaxantin = Pigmen karotenoid dengan aktivitas antioksidan tinggi yang berperan dalam meningkatkan warna tubuh dan kesehatan organisme akuatik.

40 **Autotrof** = Makhluk hidup yang mampu mensintesis senyawa organik dari bahan anorganik dengan menggunakan energi cahaya atau energi kimia.

Axopoda = Pseudopodia kaku berbentuk radial pada radiolaria yang disokong mikrotubulus dan berfungsi dalam penangkapan makanan serta daya apung.

9 **Bacillariophyta (Diatom)** = Kelompok fitoplankton yang dicirikan oleh dinding sel yang tersusun dari silika, dan memiliki kontribusi besar dalam proses produktivitas primer serta siklus karbon dan silika di ekosistem perairan.

Bentik = Makhluk hidup yang menghuni bagian dasar perairan, baik dengan menempel pada permukaan substrat maupun berada di atas atau di dalam sedimen.

Bioaktif = Senyawa alami yang memiliki aktivitas biologis tertentu, seperti antibakteri, antioksidan, antivirus, atau imunostimulan.

Bioindikator = Organisme atau komunitas organisme yang digunakan untuk menilai kondisi dan kualitas lingkungan perairan berdasarkan respon biologisnya.

Biological Carbon Pump = Proses biologis di laut di mana karbon dioksida diserap oleh fitoplankton melalui fotosintesis dan selanjutnya disimpan di laut dalam melalui sedimentasi materi organik.

Biological Pump = Proses alami pemindahan karbon dari permukaan laut ke dasar laut melalui aktivitas biologis plankton, terutama melalui kematian dan sedimentasi organisme.

Bioluminesensi = Kemampuan organisme menghasilkan cahaya melalui reaksi biokimia, umum dijumpai pada beberapa dinoflagellata seperti *Noctiluca scintillans*.

Biomassa = Jumlah total materi hidup organisme dalam suatu perairan pada satuan volume atau luas tertentu.

Bioprospeksi = Proses eksplorasi sumber daya hayati untuk mengidentifikasi senyawa bioaktif yang dapat dimanfaatkan dalam berbagai sektor, seperti industri farmasi, pangan, dan energi.

Bioteknologi = Penerapan sistem biologis, termasuk sel dan organisme hidup, dalam proses produksi yang bertujuan menghasilkan produk atau jasa yang memiliki nilai manfaat.

Biotik = Komponen hidup dalam ekosistem perairan, seperti plankton, ikan, dan organisme lainnya.

Bloom Berbahaya (*Harmful Algal Blooms, HABs*) = Ledakan populasi mikroalga tertentu yang menghasilkan dampak negatif seperti toksin, hipoksia, dan kematian organisme perairan.

Bloom plankton (Ledakan plankton) = Peningkatan kelimpahan plankton secara cepat dan masif dalam waktu singkat, umumnya dipicu oleh tingginya nutrisi (eutrofikasi), yang dapat menurunkan kualitas perairan.

Blooming (Ledakan Populasi) = Fenomena meningkatnya jumlah fitoplankton secara pesat di perairan yang umumnya dipicu oleh ketersediaan nutrisi yang tinggi serta kondisi lingkungan yang mendukung pertumbuhan.

Blue Economy (Ekonomi Biru) = Konsep pembangunan yang menekankan pemanfaatan sumber daya kelautan secara berkelanjutan dengan tetap menjaga keseimbangan dan keberlanjutan ekosistem laut.

Botol Niskin/Nensen = Alat pengambil sampel air pada kedalaman tertentu yang dapat menutup secara otomatis untuk menjaga keaslian sampel air beserta plankton di dalamnya.

Cahaya (Intensitas Cahaya) = Energi radiasi matahari yang diperlukan fitoplankton untuk melakukan fotosintesis.

Carbonate Pump = Proses pengendapan karbon dalam bentuk kalsium karbonat oleh fitoplankton tertentu seperti kokolitofor.

Chlorophyta (Alga Hijau) = Kelompok alga yang mengandung klorofil a dan b, berperan sebagai produsen utama di perairan tawar dan laut.

Chrysophyta (Alga Keemasan) = Kelompok fitoplankton dengan pigmen dominan fukosantin yang memberi warna keemasan dan memiliki potensi ekonomi serta ekologis.

Cingulum = Lekukan melintang pada sel dinoflagellata tempat melekatnya flagela transversal.

CO₂ (Karbon Dioksida) = Gas yang dimanfaatkan fitoplankton dalam proses fotosintesis dan berperan penting dalam siklus karbon global.

Cod end = Bagian ujung bawah plankton net berupa botol kecil yang berfungsi sebagai tempat penampung plankton hasil penyaringan.

Copepoda = Krustasea mikroskopis yang termasuk dalam zooplankton dan sering mendominasi komunitas plankton di perairan, serta berperan dalam proses perpindahan energi dalam jaringan trofik.

Cyanobacteria (Alga Hijau-Biru) = Kelompok bakteri fotosintetik yang menyerupai alga dan dapat mendominasi perairan eutrofik, beberapa di antaranya menghasilkan toksin.

Cyanophyta = Istilah lain untuk *Cyanobacteria*, dikenal sebagai alga hijau-biru.

DHA (Dokosaheksaenoat) = Kelompok asam lemak omega-3 esensial yang berkontribusi dalam berbagai proses fisiologis penting, seperti perkembangan saraf, pertumbuhan, dan mekanisme pertahanan tubuh organisme perairan.

Diarrhetic Shellfish Poisoning (DSP) = Keracunan akibat konsumsi kerang yang mengandung toksin okadaic acid, menyebabkan gangguan pencernaan.

Diatom (Bacillariophyceae) = Kelompok fitoplankton dengan dinding sel silika (frustule) yang berperan penting sebagai produsen primer.

Diatom = Kelompok fitoplankton bersel tunggal yang memiliki dinding sel dari silika (frustule) dan berperan besar sebagai produsen primer perairan.

Diel Vertical Migration = Perilaku migrasi vertikal harian zooplankton yang bergerak menuju permukaan air pada malam hari dan kembali ke kedalaman yang lebih besar pada siang hari.

Dinoflagellata = Fitoplankton bersel tunggal berflagela yang banyak berasosiasi dengan fenomena HABs dan produksi toksin laut.

Dinokarion = Tipe inti sel khas dinoflagellata dengan kromosom yang tetap terkondensasi dan tanpa histon.

Dissolved Oxygen (DO) = Oksigen yang terlarut dalam air dan dibutuhkan organisme akuatik untuk respirasi.

Distribusi Spasial = Pola penyebaran organisme plankton berdasarkan lokasi atau ruang dalam suatu perairan.

Distribusi Temporal = Pola perubahan kelimpahan dan komposisi plankton berdasarkan waktu, seperti harian, musiman, atau tahunan.

DNA Barcoding = Metode identifikasi organisme menggunakan sekuens DNA pendek sebagai penanda spesies, banyak digunakan dalam studi keanekaragaman plankton.

Dominansi (Indeks Dominansi) = Ukuran yang menunjukkan tingkat penguasaan satu atau beberapa spesies plankton terhadap komunitas secara keseluruhan.

Ekosistem Pesisir = Kawasan transisi antara daratan dan laut yang dipengaruhi oleh interaksi proses dari kedua lingkungan tersebut serta dikenal memiliki tingkat produktivitas yang tinggi.

Ektoderm = Lapisan jaringan luar pada tubuh medusa yang berfungsi melindungi tubuh.

Endoderm (Gastrodermis) = Lapisan jaringan dalam pada tubuh medusa yang berperan dalam proses pencernaan.

EPA (Eikosapentaenoat) = Jenis asam lemak omega-3 yang memiliki fungsi penting dalam menjaga pertumbuhan, aktivitas metabolik, dan kondisi fisiologis ikan serta udang.

Epilimnion = Lapisan atas perairan danau yang hangat dan kaya oksigen.

Epitheca = Bagian atas sel diatom atau dinoflagellata yang berada di atas cingulum atau frustule.

Euglenophyta = Kelompok fitoplankton berflagela yang bersifat mixotrof dan memiliki stigma sebagai reseptor cahaya.

Eutrofik = Kondisi perairan dengan tingkat kesuburan tinggi yang ditandai oleh kelimpahan plankton yang besar, umumnya akibat tingginya kandungan nutrisi.

Eutrofikasi = Kondisi meningkatnya tingkat kesuburan perairan akibat penumpukan nutrisi, terutama nitrogen dan fosfor, yang dapat memicu pertumbuhan fitoplankton secara berlebihan serta menurunkan kadar oksigen terlarut.

Evenness (Indeks Keseragaman) = Ukuran yang menunjukkan seberapa merata distribusi jumlah individu pada setiap spesies dalam suatu komunitas plankton.

Fenologi plankton = Pola waktu kejadian biologis plankton, seperti waktu muncul, puncak kelimpahan, dan durasi bloom yang dipengaruhi oleh faktor iklim dan lingkungan.

Fitoplankton = Organisme planktonik autotrof yang mampu berfotosintesis dan berfungsi sebagai produsen utama dalam ekosistem perairan.

Flagela = Struktur seperti cambuk yang berfungsi sebagai alat gerak pada fitoplankton tertentu seperti dinoflagellata dan euglenozoa.

Flowmeter = Alat yang dipasang pada mulut plankton net untuk mengukur jumlah air yang melewati jaring selama proses sampling.

Foraminifera = Protozoa uniseluler yang memiliki cangkang kalsium karbonat dan berperan penting dalam kajian paleoceanografi.

Fosfat = Senyawa fosfor anorganik yang berperan sebagai nutrisi pembatas utama dalam mendukung pertumbuhan fitoplankton.

Fotosintesis = Proses biokimia yang memanfaatkan energi cahaya matahari untuk mengubah karbon dioksida dan air menjadi senyawa organik, disertai dengan pelepasan oksigen.

Frustula = Dinding sel diatom yang tersusun dari silika dan memiliki pola ornamentasi khas.

Genotoksikologi = Cabang ilmu yang mempelajari dampak zat pencemar terhadap kerusakan materi genetik organisme hidup.

Haptonema = Organel filiform khas kokolitofora yang berfungsi dalam penempelan dan persepsi lingkungan.

Haptophyceae (Prymnesiophyceae) = Kelompok fitoplankton yang mencakup spesies penghasil toksin seperti *Prymnesium parvum*.

Harmful Algal Bloom (HAB) = Ledakan populasi alga tertentu yang menghasilkan racun dan dapat berdampak negatif bagi organisme laut dan manusia.

Heterokista = Sel khusus pada sianobakteri yang berfungsi dalam proses fiksasi nitrogen.

Heterotrof = Organisme yang memperoleh energi dengan memanfaatkan bahan organik dari organisme lain.

Heterotrof Fakultatif = Organisme yang dapat berfotosintesis namun juga mampu memperoleh energi secara heterotrof.

16

Hidrodinamika = Dinamika pergerakan massa air yang dipengaruhi oleh faktor fisik seperti arus laut, gelombang, serta pasang surut, yang berperan dalam menentukan perpindahan organisme di perairan.

Hipolimnion = Lapisan bawah perairan danau yang dingin dan memiliki kandungan oksigen rendah.

Hipoteka = Bagian bawah frustule diatom atau bagian bawah sel dinoflagellata.

Holoplankton = Organisme plankton yang hidup sebagai plankton sepanjang siklus hidupnya.

Horizontal haul (towing) = Metode pengambilan sampel plankton dengan cara menarik plankton net secara mendatar pada kedalaman tertentu.

Imunostimulan = Zat atau senyawa yang mampu meningkatkan respon sistem imun organisme terhadap penyakit atau stres lingkungan.

46

Indeks Keanekaragaman (H') = Parameter yang menggambarkan tingkat variasi spesies dalam komunitas plankton berdasarkan banyaknya jenis yang ditemukan serta proporsi individu dari setiap spesies.

33

Indeks keanekaragaman (Shannon–Wiener, H') = Ukuran statistik yang digunakan untuk mengevaluasi keanekaragaman spesies dalam suatu komunitas dengan memperhitungkan jumlah spesies serta penyebaran individu pada masing-masing spesies.

Indeks saprobik = Metode penilaian kualitas perairan yang didasarkan pada struktur komunitas organisme air, seperti plankton, sebagai penanda kondisi pencemaran lingkungan.

Indeks Saprobitas = Metode penilaian kualitas perairan yang didasarkan pada jenis organisme plankton yang terdapat di dalamnya sebagai indikator tingkat pencemaran.

72

Indeks Simpson (C) = Ukuran yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat dominasi suatu spesies dalam komunitas, berdasarkan peluang bahwa dua individu yang dipilih secara acak berasal dari spesies yang sama.

Karotenoid = Kelompok pigmen alami berwarna kuning hingga merah yang memiliki fungsi sebagai antioksidan dan pelindung sel dari radiasi cahaya berlebih.

Keanekaragaman Hayati Laut = Variasi kehidupan laut pada tingkat genetik, spesies, dan ekosistem, termasuk keanekaragaman plankton.

Kelimpahan = Ukuran banyaknya individu plankton yang terdapat dalam suatu volume air tertentu.

Kelimpahan plankton = Jumlah individu (zooplankton) atau sel (fitoplankton) plankton per satuan volume air (ind/L atau sel/L).

Kelimpahan plankton = Ukuran banyaknya plankton dalam satuan volume air, yang dinyatakan sebagai jumlah individu untuk zooplankton atau jumlah sel untuk fitoplankton.

Klorofil-a = Pigmen penting dalam proses fotosintesis fitoplankton yang umum dipakai sebagai penanda jumlah biomassa dan tingkat kesuburan perairan.

Kokolit = Pelat mikroskopis kalsium karbonat yang menyelimuti sel kokolitofores.

Kokolitofores = Fitoplankton bersel satu penghasil kokolit yang berperan dalam siklus karbon laut.

Kolom Air = Bagian perairan dari permukaan hingga dasar yang menjadi habitat organisme planktonik.

Kolom perairan = Lapisan vertikal perairan dari permukaan hingga dasar yang memiliki karakteristik fisik dan biologis berbeda.

Komposisi spesies plankton = Susunan jenis-jenis plankton yang terdapat dalam suatu perairan, digunakan untuk mengidentifikasi kondisi lingkungan dan tingkat pencemaran.

Larva = Tahap awal kehidupan organisme sebelum mencapai bentuk dewasa, yang pada banyak biota laut bersifat planktonik.

Larva Pluteus = Bentuk larva echinodermata (bulu babi) dengan lengan panjang yang ditopang kerangka kalsium.

Lugol = Larutan pengawet berbasis iodin yang digunakan untuk mengawetkan sampel plankton dengan mempertahankan bentuk dan struktur sel.

Makroplankton = Plankton berukuran lebih dari 200 mikrometer hingga beberapa sentimeter, termasuk larva ikan dan ubur-ubur kecil.

Meroplankton = Organisme yang hanya berada pada fase planktonik selama tahap tertentu dalam siklus hidupnya, biasanya pada fase larva.

Mesoglea = Lapisan gelatinosa di antara ektoderm dan endoderm pada medusa yang berfungsi sebagai penopang dan pemberi daya apung.

Mesotrofik = Kondisi perairan dengan tingkat kesuburan sedang, berada di antara oligotrofik dan eutrofik.

Metabolit Sekunder = Senyawa yang dihasilkan organisme bukan untuk pertumbuhan langsung, tetapi memiliki fungsi ekologis atau bioaktif tertentu.

Metagenomik = Pendekatan molekuler untuk mempelajari komunitas mikroorganisme secara langsung dari lingkungan tanpa perlu isolasi individu.

Metalimnion = Lapisan peralihan antara epilimnion dan hipolimnion dengan gradien suhu yang tajam.

Microbial Loop = Jalur aliran energi dalam ekosistem perairan yang melibatkan bakteri dan mikroorganisme dalam mendaur ulang bahan organik terlarut ke dalam rantai makanan.

Migrasi Vertikal = Perpindahan organisme plankton secara vertikal di dalam kolom air sebagai respons terhadap cahaya dan tekanan predator.

Mikroalga = Organisme alga berskala sangat kecil yang hidup di berbagai ekosistem perairan, baik laut maupun air tawar, serta banyak dimanfaatkan dalam kegiatan akuakultur dan aplikasi bioteknologi.

Mikroplankton = Plankton berukuran 20–200 mikrometer, mencakup diatom besar, dinoflagellata, dan protozoa.

Mikroplastik = Partikel plastik berukuran sangat kecil (<5 mm) yang dapat tertelan oleh plankton dan berpindah ke tingkat trofik lebih tinggi.

Mikroskop Cahaya = Alat optik yang digunakan untuk mengamati plankton pada tingkat pembesaran rendah hingga sedang, umumnya untuk identifikasi hingga tingkat genus.

Mitigasi Perubahan Iklim = Upaya untuk mengurangi dampak perubahan iklim, termasuk melalui peningkatan peran laut dan plankton dalam penyerapan karbon.

Mixoplankton = Plankton dengan strategi nutrisi ganda, mampu melakukan fotosintesis sekaligus memperoleh energi dengan memangsa organisme lain.

Mixotrof = Organisme yang dapat memperoleh energi melalui fotosintesis dan juga menyerap bahan organik.

Mixotrofik = Kemampuan organisme untuk memperoleh energi secara autotrof dan heterotrof.

Mixotrophy = Kemampuan organisme untuk mengombinasikan mekanisme autotrofik (fotosintesis) dan heterotrofik (pemangsaan).

Monitoring kualitas air = Proses evaluasi kondisi perairan yang dilakukan dengan mengamati dan mengukur parameter biologis, fisik, serta kimia secara periodik guna menilai status kualitas lingkungannya.

Nanoplankton = Plankton berukuran 2–20 mikrometer yang berperan penting dalam transfer energi antara pikoplankton dan mikroplankton.

Nekton = Organisme akuatik yang mampu berenang aktif dan melawan arus, seperti ikan dan mamalia laut.

Neurotoxin = Senyawa toksik yang menyerang sistem saraf organisme.

Nitrat = Bentuk nitrogen anorganik yang menjadi sumber utama nutrisi bagi fitoplankton.

Nitrogen Fixation (Fiksasi Nitrogen) = Proses pengikatan nitrogen bebas (N_2) dari atmosfer menjadi bentuk yang dapat dimanfaatkan organisme.

Non-Toksik = Tidak menghasilkan racun, namun dapat menyebabkan dampak fisik seperti hipoksia.

Nutrien (Zat Hara) = Unsur kimia esensial, seperti nitrogen dan fosfor, yang diperlukan oleh organisme perairan sebagai sumber pendukung bagi proses fisiologis dan perkembangan.

Oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen/DO*) = jumlah oksigen yang berada dalam bentuk terlarut di dalam air dan dapat dimanfaatkan oleh organisme akuatik, serta menjadi salah satu indikator penting kualitas ekosistem perairan.

Oligotrofik = Kondisi perairan dengan kandungan nutrisi rendah dan produktivitas primer yang terbatas.

Optilab = Perangkat kamera digital yang terhubung dengan mikroskop dan komputer untuk membantu dokumentasi serta visualisasi plankton secara digital.

Oseanografi Biologi = Cabang ilmu oseanografi yang mempelajari organisme laut serta interaksinya dengan lingkungan perairan.

Pakan Alami = Pakan yang berasal dari organisme hidup, seperti fitoplankton dan zooplankton, yang dikonsumsi langsung oleh organisme budidaya.

Paralytic Shellfish Poisoning (PSP) = Keracunan akibat konsumsi kerang yang mengandung saxitoxin, dapat menyebabkan kelumpuhan.

Pengasaman laut (*Ocean acidification*) = Kondisi menurunnya pH air laut yang terjadi akibat meningkatnya penyerapan karbon dioksida (CO_2) dari atmosfer, sehingga dapat memengaruhi komposisi dan fungsi komunitas plankton.

Penginderaan Jauh = Teknologi pemantauan kondisi perairan menggunakan citra satelit dan sensor untuk mengamati distribusi plankton secara luas.

Perubahan iklim = Pergeseran kondisi iklim dalam jangka waktu panjang, seperti variasi suhu, pola curah hujan, sirkulasi arus laut, serta faktor iklim lainnya yang berdampak pada struktur dan tingkat produktivitas ekosistem perairan.

pH = Derajat keasaman atau kebasaan perairan yang mempengaruhi proses fisiologis dan kimia organisme akuatik.

Pikoplankton = Plankton berukuran sangat kecil (0,2–2 mikrometer) yang berperan besar dalam produktivitas primer, terutama di perairan oligotrofik.

Planktologi = Cabang ilmu biologi laut yang mempelajari plankton meliputi struktur, fungsi, distribusi, dan dinamika populasinya.

Plankton = Organisme mikroskopis yang melayang di kolom air dan pergerakannya dipengaruhi oleh arus, terdiri atas fitoplankton dan zooplankton.

Plankton net = Alat berbentuk jaring kerucut yang digunakan untuk memisahkan sekaligus mengumpulkan plankton yang terdapat di perairan.

Produksi Primer = Pembentukan bahan organik oleh organisme autotrof, terutama fitoplankton, melalui fotosintesis.

Produktivitas laut = Kemampuan ekosistem laut dalam menghasilkan biomassa, yang sangat dipengaruhi oleh kelimpahan dan aktivitas fitoplankton.

Produktivitas Perairan = Kemampuan suatu perairan dalam menghasilkan biomassa, terutama melalui aktivitas fitoplankton.

Produktivitas Primer = Tingkat produksi materi organik oleh organisme autotrof, terutama fitoplankton, melalui proses fotosintesis di perairan.

Produsen Primer = Organisme autotrof, terutama fitoplankton, yang menghasilkan bahan organik melalui fotosintesis.

Prokariotik = Organisme yang tidak memiliki inti sel sejati dan organel bermembran.

Pseudopodia = Perpanjangan sitoplasma yang berfungsi untuk pergerakan dan penangkapan makanan pada protozoa.

14 **Polyunsaturated Fatty Acids (PUFA)** = Kelompok asam lemak yang memiliki lebih dari satu ikatan rangkap dan berperan penting dalam mendukung proses pertumbuhan, perkembangan, serta fungsi sistem kekebalan pada organisme akuatik.

Radiolaria = Protozoa planktonik dengan kerangka silika berpori yang berbentuk radial.

60 **Rantai Makanan** = Hubungan makan-dimakan antarorganisme yang menggambarkan aliran energi dalam ekosistem.

162 **Rantai Makanan Laut** = Proses perpindahan energi antar organisme di ekosistem perairan, yang dimulai dari produsen primer seperti fitoplankton hingga mencapai konsumen pada tingkat trofik yang lebih tinggi.

Raphe = Celah longitudinal pada katup diatom penat yang memungkinkan pergerakan dan penempelan.

Raphidophyceae = Kelompok fitoplankton flagelata non-dinoflagellata yang dapat menyebabkan kematian ikan melalui kerusakan insang.

Red Tide = Peristiwa peningkatan pesat populasi alga di perairan yang menyebabkan perubahan warna air, dan umumnya terkait dengan dominasi dinoflagellata.

Rekayasa Metabolik = Pendekatan bioteknologi untuk memodifikasi jalur metabolisme organisme guna meningkatkan produksi senyawa tertentu.

Rotifera = Zooplankton mikroskopis yang sering digunakan sebagai pakan alami larva ikan dalam sistem hatchery.

Salinitas = Kadar garam terlarut dalam air laut atau perairan payau yang memengaruhi distribusi dan pertumbuhan plankton.

Sampling plankton = Proses pengambilan contoh plankton dari perairan untuk tujuan analisis kuantitatif dan kualitatif.

Saprobiotik = Klasifikasi organisme berdasarkan tingkat toleransinya terhadap pencemaran bahan organik.

Scanning Electron Microscope (SEM) = Instrumen mikroskopi beresolusi tinggi yang memanfaatkan berkas elektron untuk menampilkan struktur permukaan organisme secara sangat rinci, termasuk morfologi plankton hingga tingkat spesies.

Science-Based Policy = Kebijakan pengelolaan lingkungan yang disusun berdasarkan data dan kajian ilmiah yang kuat.

Sedgwick Rafter Counting Cell (SRCC) = Alat bantu berupa ruang hitung khusus yang digunakan untuk menghitung jumlah sel fitoplankton di bawah mikroskop.

Sedimentasi Karbon = Proses pengendapan karbon organik ke dasar perairan melalui aktivitas biologis.

Sentinel biologis = Organisme yang sangat peka terhadap perubahan lingkungan, sehingga keberadaannya dapat digunakan sebagai indikator dini adanya gangguan dalam ekosistem.

Sianobakteri (Cyanobacteria) = Organisme prokariotik fotosintetik yang memiliki pigmen klorofil-a dan fikobilin.

Siklus Karbon = Peredaran karbon antara atmosfer, perairan, organisme hidup, dan sedimen.

Sitometri Alir (Flow Cytometry) = Teknik analisis laboratorium untuk menghitung dan mengidentifikasi sel plankton berukuran sangat kecil secara cepat.

Stratifikasi kedalaman = Pembagian lapisan perairan berdasarkan kedalaman yang memengaruhi distribusi plankton akibat perbedaan cahaya dan kondisi lingkungan.

Stratifikasi Perairan = Pembentukan lapisan air berdasarkan perbedaan suhu dan densitas yang memengaruhi distribusi nutrisi dan plankton.

Stratifikasi Perairan = Pembentukan lapisan air yang stabil akibat perbedaan suhu dan densitas, yang memengaruhi distribusi nutrisi dan plankton.

Stres Oksidatif = Keadaan biologis yang terjadi akibat meningkatnya produksi spesies reaktif yang tidak diimbangi oleh kapasitas mekanisme antioksidan untuk menetralkannya.

Striae = Deretan pori atau alveolus pada katup diatom yang menjadi ciri penting dalam identifikasi.

Struktur komunitas plankton = Susunan dan hubungan antar spesies plankton dalam suatu perairan yang meliputi keanekaragaman, keseragaman, dominansi, dan kelimpahan.

Suhu Perairan = Parameter fisika yang mempengaruhi metabolisme, pertumbuhan, dan distribusi plankton.

Sukses Fitoplankton = Perubahan bertahap komposisi komunitas fitoplankton dalam suatu perairan.

Taksonomi Plankton = Cabang ilmu yang mempelajari klasifikasi dan identifikasi plankton berdasarkan ciri morfologi dan genetik.

Theca = Dinding sel kaku dari selulosa pada dinoflagellata berlapis baja (thecate).

Toksin Alga = Senyawa beracun yang dihasilkan oleh beberapa fitoplankton dan berdampak pada biota dan manusia.

Transfer Energi = Perpindahan energi antara organisme dalam rantai makanan, yang berlangsung dari satu tingkat trofik ke tingkat trofik berikutnya dalam ekosistem.

Trikoma = Rangkaian sel pada sianobakteri berfilamen yang membentuk struktur seperti benang.

Upwelling = Fenomena naiknya massa air laut dalam yang kaya nutrisi ke permukaan, sehingga mendorong peningkatan produktivitas perairan.

Variabilitas iklim laut = Perubahan kondisi lingkungan laut yang terjadi secara alami, termasuk variasi suhu permukaan laut, pergerakan arus, dan pola presipitasi, yang berpotensi memengaruhi kelimpahan serta komposisi plankton.

Vertical haul = Metode pengambilan plankton dengan cara menarik plankton net secara vertikal dari kedalaman tertentu menuju permukaan.

Zona Fotik = Lapisan perairan yang masih dapat ditembus cahaya matahari dan memungkinkan terjadinya fotosintesis.

Zooplankton = Organisme planktonik ini bersifat heterotrof karena tidak dapat menghasilkan makanan sendiri dan bergantung pada organisme lain sebagai sumber nutrisi, sehingga berperan sebagai konsumen primer maupun sekunder dalam rantai makanan perairan.

BIODATA PENULIS