



## Review of Evolution, Global Distribution, and Ecological Roles of Macroalgae in Tropical and Subtropical Marine Ecosystems

Audya Septria Ningrum<sup>1</sup>, Muhammad Noval Alghifari<sup>1</sup>, dan Joachim Lawoliyo<sup>1,1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Ilmu Teknologi dan Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

**Sitasi:** Ningrum, A. S., Alghifari, M. N., & Lawoliyo. (2025) Review of Evolution, Global Distribution, and Ecological Roles of Macroalgae in Tropical and Subtropical Marine Ecosystems. *Indonesian Journal of Tropical Biology*, 1(1).

### Article History

Received : February 7<sup>th</sup>, 2025

Revised : March 17<sup>th</sup>, 2025

Accepted : April 1<sup>th</sup>, 2025

Published : April 07<sup>th</sup>, 2025

\*Corresponding Author:

**AudyaSeptria Ningrum,**

Departemen Ilmu Teknologi dan Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia;

Email:

[audyaseptrian891@gmail.com](mailto:audyaseptrian891@gmail.com)

Nomer Hp: 6285237181009

**Abstract:** Macroalgae play a crucial ecological role in coastal ecosystems, particularly in tropical and subtropical marine environments. This study aims to review the evolution, global distribution, and ecological functions of macroalgae through a systematic literature review approach. Scientific articles from the last ten years were selected from databases such as Scopus, ScienceDirect, and Web of Science, with a focus on macroalgae diversity, taxonomy, bioactive compounds, and environmental services. Results show that macroalgae have existed since the Proterozoic era and have evolved into morphologically and genetically diverse lineages. Distribution patterns vary significantly between tropical and subtropical zones, influenced by environmental factors such as temperature, salinity, and light intensity. In mangrove and coral reef ecosystems, macroalgae demonstrate adaptive capacity and act as habitat formers, carbon sinks, and bioindicators of ecosystem health. Several genera, including *Sargassum*, *Padina*, and *Caloglossa*, exhibit resilience and high ecological value. Furthermore, macroalgae are rich in bioactive compounds with potential applications in pharmaceuticals, cosmetics, and biofuels. Their high biomass productivity and carbon sequestration ability, comparable to seagrasses and mangroves, highlight their strategic role in blue carbon initiatives. However, excessive macroalgae blooms, particularly in the Atlantic Sargassum belt, raise environmental and socioeconomic concerns. This review emphasizes the need for integrated coastal management strategies to optimize the ecological and economic benefits of macroalgae sustainably.

**Keywords:** macroalgae evolution; biogeography; ecological function; blue carbon; bioactive compounds

### Pendahuluan

Alga merupakan organisme laut yang memiliki klorofil dan mampu melakukan fotosintesis. Namun, tidak semua jenis alga mengandung klorofil. Alga hijau, misalnya, merupakan jenis alga yang memiliki klorofil dan mampu melakukan fotosintesis untuk menghasilkan makanannya sendiri (autotrof). Alga dapat hidup dan tumbuh hingga

kedalaman 200 meter di bawah permukaan laut (Putri et al., 2023). Saat ini, tercatat sekitar 9.600 spesies makroalga tersebar di seluruh dunia.

Makroalga diklasifikasikan ke dalam tiga filum berdasarkan jenis pigmen yang dimilikinya. Filum Rhodophyta (alga merah) memiliki keanekaragaman tertinggi, yaitu sekitar 7.000 spesies. Filum Chlorophyta (alga

hijau) mencakup sekitar 2.030 spesies, sedangkan filum Heterophyta (alga coklat) terdiri dari sekitar 600 spesies (Aziz & Chasani, 2020).

Alga merah (Rhodophyta) umumnya memiliki thallus berukuran kecil, dengan bentuk silindris, gepeng, atau menyerupai lembaran. Struktur percabangannya kompleks, dan pigmen fotosintetik yang dikandungnya meliputi klorofil *a* dan *d*, serta fikoeiritrin, karoten, xantofil, dan fikobilin yang memberikan warna merah (Dawes, 1998). Alga hijau (Chlorophyta) memiliki thallus berbentuk filamen, baik bercabang maupun tidak bercabang, dan ada pula yang menyerupai daun. Pigmen utamanya adalah klorofil *a* dan *b*, serta karotenoid seperti alfa dan beta karoten, lutein, dan zeaxanthin (Dawes, 1998; Ismail, 1995). Sementara itu, alga coklat (Heterophyta) memiliki thallus berwarna coklat yang bervariasi dalam bentuk—silindris, gepeng, hingga lembaran. Thallus alga coklat menyerupai struktur tumbuhan tingkat tinggi, seperti akar, batang, dan daun, sehingga digolongkan dalam kelas Thallophyta (Widiyastuti, 2009; Ode & Jahra, 2014).

Makroalga berkembang biak melalui spora yang disebarkan oleh arus laut. Namun, tidak semua spora dapat tumbuh karena faktor lingkungan seperti suhu, salinitas, dan ketersediaan nutrisi menjadi kendala utama (Omar, 2010). Perbedaan iklim, kondisi geografis, dan lingkungan menyebabkan adanya diskontinuitas floristik (Pratama et al., 2013). Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji evolusi, persebaran, dan peran makroalga dalam lingkungan perairan.

## Metode penelitian

### Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan pustaka sistematis (systematic literature review) yang bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menganalisis literatur ilmiah terkait evolusi, distribusi global, dan peran ekologis makroalga di ekosistem laut tropis dan subtropis.

#### a. Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini adalah tinjauan pustaka sistematis dengan fokus pada literatur ilmiah yang relevan dan terpublikasi melalui proses

*peer-review*.

#### b. Populasi Penelitian

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh artikel ilmiah yang tersedia pada database Scopus, ScienceDirect, PubMed, Web of Science, dan Google Scholar dalam kurun waktu 10 tahun terakhir (2014–2024), dengan pengecualian untuk referensi klasik yang memiliki signifikansi khusus dalam topik kajian makroalga.

#### c. Sampel Penelitian

Sampel terdiri dari artikel yang memenuhi kriteria inklusi: (1) berfokus pada makroalga, (2) memuat data primer atau tinjauan ilmiah mengenai evolusi, distribusi, peran ekologi, atau potensi bioprospeksi makroalga, dan (3) telah melalui proses *peer-review*. Artikel yang bersifat opini, tidak relevan, atau tidak tersedia dalam akses penuh dikecualikan.

#### d. Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini berupa kata kunci yang digunakan dalam pencarian literatur, yaitu: “*macroalgae evolution*”, “*macroalgae distribution*”, “*macroalgae ecological role*”, dan “*macroalgae bioactive compounds*”

#### e. Media Pencarian

Literatur dicari melalui lima database ilmiah internasional, yaitu: Scopus, ScienceDirect, PubMed, Web of Science, dan Google Scholar. Artikel berbahasa Inggris dan Indonesia menjadi fokus utama.

## Prosedur Penelitian

Tahapan sistematis dalam pelaksanaan penelitian meliputi:

1. Penentuan topik dan rumusan masalah penelitian.
2. Penetapan kata kunci pencarian berdasarkan topik kajian.
3. Pencarian literatur menggunakan kata kunci yang ditetapkan pada basis data ilmiah.
4. Seleksi artikel berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi.
5. Pengumpulan data dari artikel yang relevan.
6. Analisis kualitatif terhadap isi artikel untuk mengidentifikasi:
  - Tren evolusi dan taksonomi makroalga.
  - Pola persebaran geografis makroalga di wilayah tropis dan subtropis.

- Peran ekologis serta potensi aplikatif makroalga bagi lingkungan dan manusia.

### Analisis Data

Data dianalisis secara kualitatif-deskriptif dengan mengkaji temuan-temuan utama dari artikel terpilih guna menarik kesimpulan yang komprehensif terkait kontribusi makroalga dalam ekosistem laut tropis dan subtropis serta implikasinya terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan potensi aplikatif di bidang bioteknologi kelautan.

### Hasil dan Pembahasan

#### Sejarah makroalga

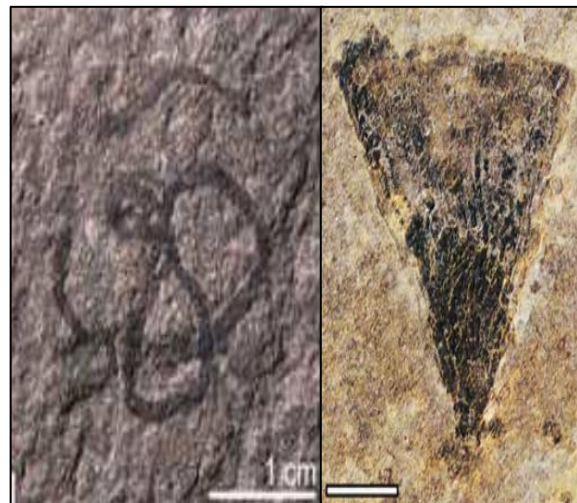
Makroalga diperkirakan telah ada sejak zaman Proterozoikum, yaitu sekitar 2,5 miliar hingga 541 juta tahun yang lalu. Baik alga merah, hijau, maupun coklat diyakini telah muncul sejak masa tersebut (Raven, 2018). Namun demikian, fosil makroalga yang ditemukan dari masa lampau umumnya tidak berada dalam kondisi yang baik, karena sebagian besar fosil ditemukan dalam keadaan terkalsifikasi. Untuk menjadi fosil utuh dalam bentuk kompresi karbon, makroalga harus melalui proses fosilisasi yang tidak umum. Selain itu, pigmen yang berfungsi sebagai penanda utama dalam identifikasi alga sering kali telah hilang pada fosil yang tidak terkalsifikasi, sehingga menyulitkan proses identifikasi dan klasifikasi makroalga purba (Bykova et al., 2020).

Mengatasi keterbatasan tersebut, para peneliti menggunakan pendekatan morfologis dengan mengelompokkan makroalga purba berdasarkan bentuk tubuhnya. Studi yang dilakukan oleh Bykova et al. (2020) menunjukkan bahwa fosil alga dapat diklasifikasikan ke dalam berbagai bentuk, seperti tubular (berbentuk tabung), pita, kipas, dan kerucut. Gambar 1 memperlihatkan dua fosil makroalga purba yang berasal dari zaman Proterozoikum, yaitu *Jiuqunaoella simplicis* dan *Flabellophyton typicum*, seperti yang dijelaskan oleh Bykova et al. (2020). Fosil *Jiuqunaoella simplicis* memiliki morfologi tubular (berbentuk tabung), sementara *Flabellophyton typicum* menunjukkan bentuk menyerupai kipas (flabellate).

Bentuk tubular pada *Jiuqunaoella* diduga berfungsi untuk meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya dan pertukaran gas di

lingkungan laut purba yang minim cahaya. Sementara itu, bentuk kipas pada *Flabellophyton* memungkinkan permukaan yang lebih luas untuk proses fotosintesis, serta dapat berperan dalam menyaring partikel atau arus air di sekitarnya.

Temuan fosil ini memberikan bukti bahwa makroalga purba telah menunjukkan keragaman morfologi yang cukup kompleks sejak masa awal evolusinya. Pendekatan morfologis melalui bentuk tubuh fosil sangat penting dalam rekonstruksi filogeni organisme fotosintetik awal, mengingat pigmen tidak lagi dapat diidentifikasi pada fosil yang tidak terkalsifikasi.



**Gambar. 1.** Fosil alga yang ditemukan, *Jiuqunaoella simplicis* yang berbentuk tubular dan *Flabellophyton typicum* yang berbentuk kipas.

\*Sumber: Bykova et al. 2020

Persamaan pada literatur yang ditemukan terkait makroalga di masa lalu, dimana makroalga yang ditemukan umumnya diduga tidak menempel pada substrat atau mengambang di laut. Contoh makroalga yang hidup di masa lampau adalah *Globusphytonlineare*. Fosil alga ini ditemukan dengan ciri-ciri bentuk tubuh yang memanjang seperti benang kusut (Wang dan Wang 2018).

#### Evolusi makroalga

Bagan filogeni dalam penelitian Dixon et al. (2014) seperti pada (Gambar 2) digunakan untuk merevisi subgenera *Batrophycus* dan *Sargassum* dengan pendekatan molekuler berdasarkan urutan gen ITS-2, *cox3*, dan *rbcLS*. Hasil analisis menunjukkan bahwa dua klade utama, yaitu *Batrophycus* dan *Sargassum*,

membentuk cabang yang konsisten dengan klasifikasi taksonomi sebelumnya.

Penelitian lain oleh Silberfeld et al. (2010) juga membahas filogeni kelompok alga coklat (*Brown Algae Clade Reconstruction – BACR*) dengan menyertakan dua spesies *Sargassum*. Mereka memperkirakan usia divergensi antara kedua spesies tersebut terjadi sekitar 5 juta tahun lalu berdasarkan batas bawah 95% HPD (Highest Posterior Density). Estimasi ini tumpang tindih dengan hasil yang diperoleh oleh Dixon et al. (2014), yaitu antara 2,2–6,8 juta tahun lalu. Namun, asal usul *Sargassum* secara keseluruhan dalam penelitian Dixon et al. diperkirakan lebih baru, yakni sekitar 3,4–11,0 juta tahun lalu, dibandingkan dengan perkiraan Silberfeld et al. (2010) yang mencapai 22 juta tahun lalu.

Perbedaan estimasi tersebut kemungkinan disebabkan oleh perbedaan metodologi dan cakupan taksa, terutama karena Dixon et al. (2014) memasukkan kelompok luar *Turbinaria* yang memiliki kekerabatan dekat dengan *Sargassum*. Temuan ini menunjukkan bahwa genus *Sargassum* kemungkinan memiliki hubungan erat dengan ekosistem terumbu karang pada masa perubahan iklim dan oseanografi purba (*paleoclimatic and paleoceanography change*), yang turut memengaruhi proses evolusinya.

Catatan sejarah dari Tiongkok dan Jepang menunjukkan bahwa *Sargassum* banyak digunakan dalam pengobatan tradisional untuk mengobati penyakit yang berhubungan dengan gangguan tiroid karena kandungan yodiumnya yang tinggi, sementara juga berfungsi sebagai suplemen untuk peningkatan kesehatan secara keseluruhan (Zemke-White & Ohno, 1999). Perannya dalam pertanian, khususnya sebagai pupuk alami, telah didokumentasikan sejak milenium pertama, dengan petani menggunakannya untuk menyuburkan tanah di wilayah pesisir karena kandungan mineralnya yang kaya, yang meliputi kalium, nitrogen, dan elemen jejak lainnya (Chapman & Chapman, 1980).

Praktik ini juga lazim di beberapa bagian Eropa, di mana rumput laut dikumpulkan dari pantai dan disebar di ladang untuk meningkatkan hasil panen (Guiry, 2010). Pelayaran maritim *Christopher Columbus* dan penjelajah Eropa lainnya pada akhir abad ke-15 memberikan catatan pertama dari Barat tentang

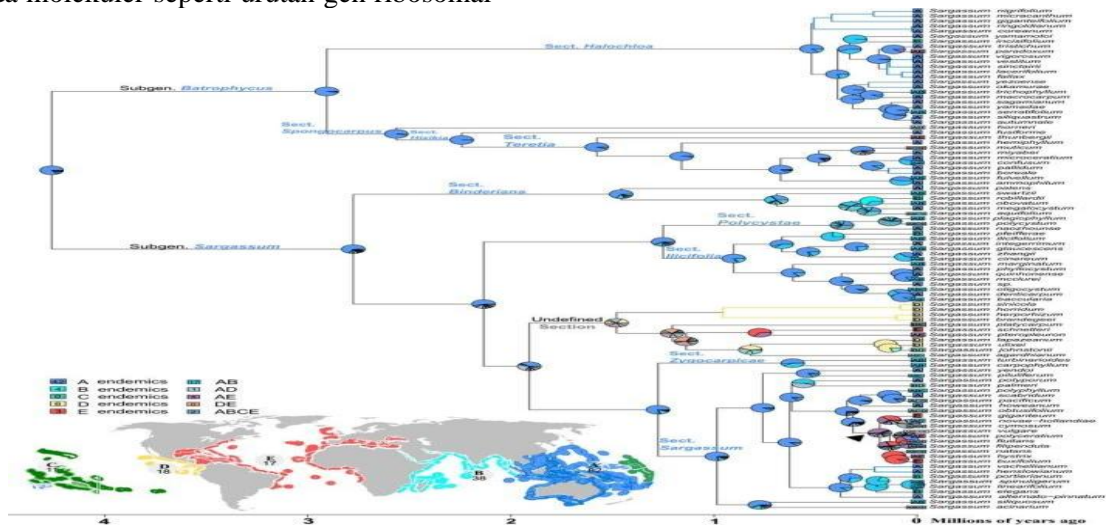
hampanan *Sargassum* yang mengapung di Samudra Atlantik, khususnya di Laut Sargasso, wilayah yang dinamai berdasarkan alga ini (Laffoley et al., 2011). Para pelaut awal sering menganggap mekarnya alga besar ini sebagai

Pohon filogeni pada (Gambar 3) merupakan hubungan evolusioner antara berbagai kelas. dalam Chlorophyta dan Streptophyta berdasarkan analisis molekuler multigen. Bagan filogeni tersebut menyajikan hubungan evolusioner antara kelompok utama alga hijau, yang secara taksonomis terbagi ke dalam dua filum besar, yaitu Chlorophyta dan Streptophyta. Filum Chlorophyta mencakup kelompok *Ulvophyceae*, *Trebouxiophyceae*, dan *Chlorophyceae*, sedangkan filum Streptophyta terdiri dari *Charophytes*, *Zygnematophyceae*, dan *Embryophyta* (tumbuhan darat). Dalam bagan tersebut, Cladophorales, Bryopsidales, dan Ulvales-Ulotrichales tergolong dalam kelas *Ulvophyceae*, yang sebagian besar merupakan alga laut dengan bentuk tubuh yang beragam. *Ulvophyceae* menempati posisi basal dalam filogeni Chlorophyta dan menunjukkan keragaman morfologi serta adaptasi lingkungan yang luas, terutama di perairan laut dangkal.

Kelompok *Trebouxiophyceae* dan *Chlorophyceae*, yang merupakan bagian dari *core chlorophytes*, menunjukkan kedekatan evolusioner. *Trebouxiophyceae* sebagian besar terdiri dari alga uniseluler dan sering ditemukan sebagai simbiosis dalam lichen. *Chlorophyceae* mencakup spesies model seperti *Chlamydomonas* dan *Volvox*, yang telah banyak digunakan dalam studi genetika dan fisiologi fotosintesis. Selanjutnya, filum Streptophyta menunjukkan transisi evolusioner dari alga hijau air tawar ke tumbuhan darat (*Embryophyta*). Kelompok *Zygnematophyceae*, yang mencakup *Spirogyra* dan *Zygnema*, dianggap sebagai kerabat terdekat dari tumbuhan darat berdasarkan

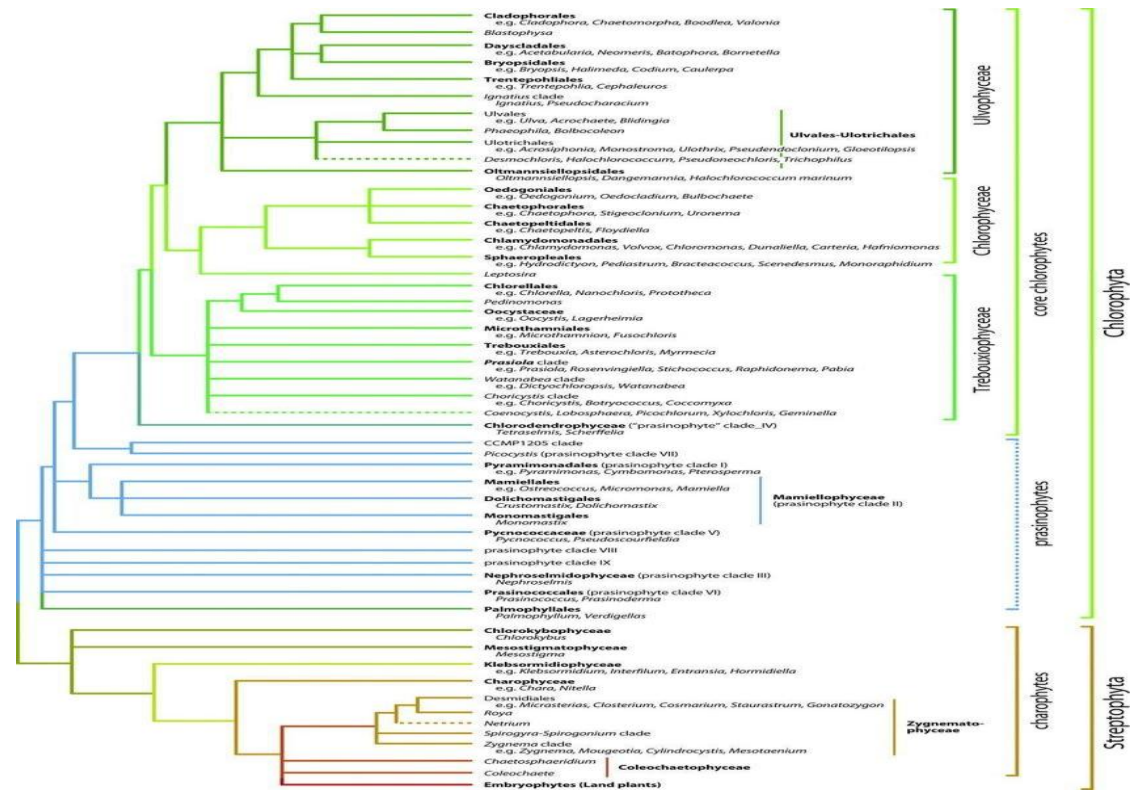
Analisis molekuler dan morfologi. Hubungan ini memperkuat hipotesis bahwa nenek moyang tumbuhan darat berasal dari alga hijau air tawar yang memiliki mekanisme adaptasi terhadap lingkungan semi-terestrial. Bagan ini juga menunjukkan bahwa evolusi alga hijau tidak bersifat linear, melainkan bercabang secara kompleks dengan banyak klade yang mewakili garis keturunan independen. Setiap cabang dalam pohon filogeni tersebut mencerminkan divergensi genetik yang

signifikan, yang dianalisis menggunakan dan gen kloroplas. penanda molekuler seperti urutan gen ribosomal



Gambar. 2. Filogeni alga coklat

\*Sumber: Dixon et al., 2014



Gambar. 3. Filogeni Alga Hijau

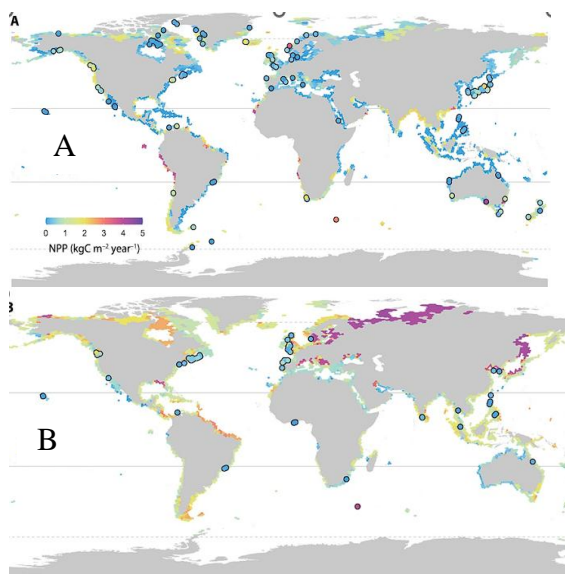
\*Sumber: Leliaert et al., 2012

### Sebaran makroalga

Makroalga merupakan komponen penting dalam ekosistem pesisir, khususnya di ekosistem mangrove dan terumbu karang yang terdapat di

wilayah tropis dan subtropis. Meskipun makroalga memiliki peran ekologi yang serupa di kedua wilayah, pola distribusi dan kelimpahan spesiesnya berbeda secara signifikan,

dipengaruhi oleh faktor lingkungan, seperti suhu, salinitas, cahaya, dan dinamika arus. Distribusi makroalga secara keseluruhan terbagi menjadi dua yakni, daerah subtidal dan intertidal didominasi oleh alga coklat yang membentuk kanopi, seperti yang terlihat pada (Gambar 4). Sementara itu, terdapat perbandingan distribusi makroalga di ekosistem mangrove dan terumbu karang antara wilayah tropis dan subtropis, dengan penekanan pada perbedaan spesies dominan serta faktor-faktor yang mempengaruhi distribusi tersebut.



**Gambar. 4.** Peta Distribusi Persebaran Alga Berdasarkan NPP Daerah Subtidal (A) Dan Intertidal (B)

\*Sumber: Pessarrodona et al., 2022

#### 1. Ekosistem mangrove di wilayah tropis dan subtropis

Ekosistem mangrove tropis umumnya tersebar di sepanjang pesisir Samudera Hindia dan Samudera Pasifik, serta di kawasan Karibia dan Amerika Tengah. Di wilayah-wilayah ini, makroalga sering tumbuh pada substrat lunak di antara akar-akar mangrove, yang menciptakan habitat ideal bagi spesies yang mampu mentoleransi fluktuasi salinitas dan intensitas cahaya. Salah satu genus makroalga yang paling umum ditemukan di ekosistem mangrove tropis adalah *Caloglossa*, yang menunjukkan toleransi tinggi terhadap kondisi hipersalin serta kemampuan adaptasi terhadap perubahan salinitas di wilayah estuari (Kathiresan & Bingham, 2001). Selain itu, genus *Bostrychia*

dan *Catenella* juga ditemukan dalam jumlah besar di kawasan Asia Tenggara, seperti Indonesia dan Filipina (Sousa et al., 2017).

Sebaliknya, ekosistem mangrove subtropis memiliki persebaran yang lebih terbatas dan umumnya ditemukan di pesisir selatan Jepang, bagian utara Australia, serta wilayah selatan Amerika Serikat, termasuk Florida. Suhu air yang lebih rendah di wilayah subtropis memengaruhi komposisi komunitas makroalga, di mana spesies yang tahan terhadap suhu dingin, seperti *Enteromorpha* dan *Cladophora*, cenderung lebih dominan. Meskipun demikian, kelimpahan makroalga di wilayah subtropis relatif lebih rendah dibandingkan dengan daerah tropis, karena suhu yang rendah dapat membatasi pertumbuhan dan reproduksi spesies tropis yang kurang adaptif (Oliveira & Qi, 2003).

#### 2. Ekosistem terumbu karang di wilayah tropis dan subtropis

Ekosistem terumbu karang di wilayah tropis, khususnya di kawasan Indo-Pasifik dan Karibia, dikenal sebagai salah satu ekosistem dengan keanekaragaman makroalga tertinggi di dunia. Di lingkungan ini, makroalga sering bersaing dengan karang untuk memperoleh ruang dan cahaya sebagai sumber daya utama. Beberapa genus makroalga yang umum ditemukan di terumbu karang tropis antara lain *Sargassum*, *Padina*, *Dictyota*, dan *Halimeda*. Di antara keempatnya, *Sargassum* merupakan genus yang paling dominan, terutama di perairan dangkal kawasan Indo-Pasifik (Littler & Littler, 2000). Dominasi *Sargassum* cenderung meningkat setelah terjadi gangguan ekologis pada karang, seperti pemutihan (bleaching) atau eutrofikasi, yang menyebabkan menurunnya populasi karang dan memberi peluang bagi pertumbuhan makroalga (Lapointe, 1997).

#### 3. Dampak Perubahan Iklim pada Distribusi Makroalga

Perubahan iklim global, khususnya peningkatan suhu air laut, telah memicu pergeseran distribusi makroalga di berbagai ekosistem pesisir, termasuk ekosistem mangrove dan terumbu karang, baik di wilayah tropis maupun subtropis. Di wilayah tropis, peningkatan suhu air laut selama beberapa dekade terakhir telah menyebabkan perubahan komposisi komunitas makroalga. Spesies yang lebih toleran terhadap suhu tinggi, seperti *Sargassum* dan *Dictyota*, cenderung menjadi

lebih dominan (Lapointe, 1997). Sebaliknya, spesies yang sensitif terhadap peningkatan suhu, seperti *Halimeda*, menunjukkan penurunan populasi karena keterbatasan adaptasi terhadap kondisi termal yang semakin ekstrem (Littler & Littler, 2000).

Wilayah subtropis, dampak perubahan iklim terutama terlihat melalui fenomena migrasi lintang. Beberapa spesies makroalga tropis mulai bermigrasi ke wilayah subtropis yang sebelumnya terlalu dingin untuk mendukung pertumbuhan mereka (Steneck et al., 2002). Pergeseran ini memperluas distribusi geografis spesies tropis dan secara bersamaan memberikan tekanan kompetitif terhadap spesies asli subtropis. Jenis kelp dan makroalga subtropis lainnya yang tahan terhadap suhu dingin kini menghadapi ancaman dari spesies tropis yang bersifat invasif, yang berpotensi menggantikan dominasi lokal mereka di beberapa ekosistem (Verlaque et al., 2000).

### **Peran makroalga dalam lingkungan perairan.**

Makroalga tidak hanya memainkan peran penting dalam rantai makanan laut, tetapi juga memiliki nilai strategis dalam berbagai bidang, mulai dari kesehatan, energi, hingga mitigasi perubahan iklim. Berikut ini disajikan beberapa peran utama makroalga berdasarkan kajian literatur.

#### **1. Bioprospeksi makroalga**

Alga dimanfaatkan secara luas sebagai bahan dalam makanan, minuman, kosmetik, dan obat-obatan. Selain itu, alga juga menghasilkan berbagai metabolit sekunder yang berfungsi sebagai senyawa bioaktif untuk melindungi diri dari kondisi lingkungan ekstrem, seperti salinitas tinggi, serta melawan serangan penyakit dan predator (Sareong, 2008). Keanekaragaman jenis dan jumlah senyawa bioaktif yang dihasilkan oleh alga sangatlah beragam. Senyawa-senyawa tersebut telah terbukti memiliki berbagai manfaat biologis, antara lain sebagai antibakteri (Maduriana & Sudira, 2009), antioksidan (Suryaningrum et al., 2006), antijamur (Lutfiyanti et al., 2012), antikanker (Nurmareta, 2014), dan antiinflamasi (Ariani, 2015).

Seiring perkembangan waktu, pemahaman terhadap ekologi alga, termasuk genus *Sargassum*, juga semakin meningkat. *Sargassum* dikenal memiliki kemampuan menyerap nutrisi

dan logam berat dari air, serta berfungsi sebagai biofilter dalam ekosistem pesisir (Rangel et al., 2004). Karakteristik ini, ditambah potensi *Sargassum* sebagai sumber senyawa bioaktif yang berkelanjutan, menjadikannya objek yang semakin menarik untuk diteliti.

Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan *Sargassum* dalam bidang bioteknologi dan pengelolaan lingkungan terus berkembang. Penelitian menunjukkan bahwa *Sargassum* memiliki sifat antioksidan, antiinflamasi, dan antimikroba yang kuat, sehingga penggunaannya semakin meluas di bidang farmasi, kosmetik, dan nutrasetikal (Liu et al., 2012). Selain itu, kemampuan *Sargassum* dalam menyerap karbon dan menurunkan tingkat pengasaman laut juga sedang dikaji sebagai bagian dari strategi adaptasi terhadap perubahan iklim (García-Sánchez et al., 2020).

Namun demikian, meskipun *Sargassum* telah lama dikenal sebagai sumber daya yang bermanfaat, lonjakan populasinya yang besar di wilayah Karibia dan Afrika Barat dalam beberapa dekade terakhir menimbulkan tantangan serius bagi lingkungan dan ekonomi (Wang et al., 2019). Pertumbuhan populasi yang masif ini, yang diperburuk oleh polusi nutrisi dan dampak perubahan iklim, telah memicu peristiwa terdamparnya *Sargassum* secara besar-besaran. Kondisi ini mengganggu sektor pariwisata, merusak ekosistem laut, serta menghambat aktivitas perikanan lokal (Oviatt et al., 2019).

#### **2. Makroalga sebagai indikator Kesuburan laut.**

Perifiton merupakan salah satu jenis alga yang memiliki peran penting dalam ekosistem perairan dan sering dimanfaatkan sebagai indikator kualitas air (Leland & Carter, 1985; Newman et al., 1985; Cosgrove et al., 2004). Organisme ini memiliki tingkat keanekaragaman yang tinggi serta berkontribusi secara signifikan dalam aliran energi dan siklus nutrisi di lingkungan perairan. Keanekaragaman struktur dan fungsi komunitas perifiton dapat dimanfaatkan untuk merancang indikator ekologis yang mencerminkan kondisi lingkungan suatu ekosistem perairan secara menyeluruh (Hill et al., 1999).

#### **3. Alga sebagai produksi biofuel**

Produksi biofuel dan dampaknya terhadap lingkungan telah menjadi salah satu isu global yang penting pada saat ini. Berbagai penelitian telah membahas urgensi pengembangan biofuel serta jenis bahan baku yang potensial untuk dimanfaatkan dalam proses produksinya. Di antara berbagai sumber hayati, alga dianggap sebagai salah satu bahan baku paling efisien untuk pembuatan biofuel, karena memiliki produktivitas biomassa yang tinggi per satuan luas lahan.

Biomassa alga dapat dikonversi menjadi berbagai produk akhir, seperti energi, bahan kimia, makanan, kosmetik, pupuk, serta agen pengolahan air limbah dan penyerapan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Diversifikasi produk yang dihasilkan dari alga ini berkontribusi dalam menekan biaya produksi, karena hasil sampingan dapat dimanfaatkan sebagai sumber pendapatan tambahan. Hal ini sangat penting dalam mendukung keberlanjutan ekonomi dan komersialisasi produksi alga di masa depan (Naika et al., 2010; Antoni et al., 2007).

#### 4. Alga laut sebagai sumber makanan

Alga mengandung berbagai bahan organik yang menyediakan sumber mineral dan vitamin, sehingga banyak dimanfaatkan dalam produk seperti agar-agar, salad rumput laut, dan karagenan. Di Indonesia, potensi alga—khususnya rumput laut—sebagai sumber pangan telah dimanfaatkan secara komersial dan dibudidayakan secara intensif, terutama melalui teknik polikultur yang mengombinasikan budidaya ikan dan rumput laut (Munifah, 2008).

Selama ratusan tahun, lebih dari 100 jenis alga telah digunakan sebagai bahan pangan

karena kandungan nutrisi yang lengkap, seperti mineral, vitamin, karbohidrat, dan protein. Dalam industri makanan, alga digunakan sebagai bahan tambahan untuk kue, es krim, permen, salad, saus, dan sirup. Rumput laut, sebagai jenis alga yang paling umum dikonsumsi, memiliki komposisi kimia berupa air, protein, karbohidrat, lemak, serat kasar, abu, enzim, asam nukleat, asam amino, serta vitamin A, B, C, D, E, dan K. Selain itu, rumput laut juga kaya akan mineral makro seperti nitrogen, oksigen, kalsium, selenium, dan mineral mikro seperti zat besi, magnesium, dan natrium.

Karbohidrat yang terkandung dalam alga berupa vegetable gum, yaitu jenis serat yang kaya akan selulosa dan hemiselulosa. Karena sulit dicerna oleh enzim tubuh, alga sering dimanfaatkan sebagai makanan diet rendah kalori dan tinggi serat. Kandungan asam amino, vitamin, dan mineral pada rumput laut diketahui 10–20 kali lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman darat. Oleh karena itu, rumput laut menjadi salah satu sumber pangan alternatif yang bernilai gizi tinggi. Bahkan, penelitian terbaru menunjukkan bahwa rumput laut berpotensi sebagai sumber senyawa antikanker dan bahan aktif untuk produk pelindung kulit (Mursal & Nurhayati, 2018; Kinanti et al., 2024).

#### 5. Alga laut sebagai penyimpan karbon

Alga memiliki kemampuan untuk menyimpan karbon dalam bentuk biomassa, sama seperti organisme lainnya. Bahkan, kapasitas alga dalam menyimpan karbon diketahui sebanding dengan vegetasi pesisir lainnya, seperti lamun dan mangrove (Raven, 2018).

**Tabel 1.** Produktivitas Primer Bersih (NPP) dan Sekuestrasi Karbon Global Berbagai Sistem Vegetasi Laut

Sistem	Produktivitas Primer Bersih Global (NPP)   ( <i>Tmol C per tahun</i> )	Sekuestrasi Karbon Global   ( <i>Tmol C per tahun</i> )	Kisaran Ekspor/Sedimen Lokal   ( <i>Tmol C per tahun</i> )
Fitoplankton	4.0 – 4.8 × 10 <sup>3</sup> (ND)	1100 (ND)	[ND]
Makroalga	80 – 210 (11 – 242)	0.8 – 22 (0.5 – 106)	[ND]
Lamun	≤ 41 (5 – 162)	≤ 9 (2 – 66)	[4 – 9.3]
Salt marshes	≤ 37 (14 – 35)	≤ 7 (12 – 45)	[0.4 – 7.3]
Mangrove	≤ 12.5 (4.2 – 12.5)	≤ 2.1 (1.6 – 5)	[2.6 – 2.8]

\*Sumber: Raven et al., 2018



Produktivitas primer bersih (NPP) dan kemampuan sekuestrasi karbon berbagai sistem vegetasi laut menunjukkan variasi yang signifikan antar ekosistem. Fitoplankton memiliki NPP global tertinggi, yaitu sekitar  $4.0$  hingga  $4.8 \times 10^3$  Tmol karbon per tahun, dengan potensi sekuestrasi karbon mencapai 1100 Tmol per tahun, meskipun data rinci mengenai ekspor atau sedimen lokal belum tersedia (ND). Makroalga menempati urutan kedua dengan NPP berkisar antara 80 hingga 210 Tmol per tahun, bahkan dalam beberapa kajian dapat mencapai hingga 242 Tmol, dan memiliki kapasitas sekuestrasi karbon sebesar 0.8 hingga 22 Tmol per tahun. Walaupun kontribusi karbon terpendam lokal belum diketahui secara pasti, potensi ini menunjukkan bahwa makroalga memiliki peran penting dalam penyerapan karbon.

Sementara itu, lamun memiliki NPP maksimum sebesar  $\leq 41$  Tmol per tahun dan sekuestrasi karbon hingga  $\leq 9$  Tmol per tahun, dengan ekspor karbon ke sedimen lokal berkisar antara 4 hingga 9.3 Tmol per tahun. Ekosistem salt marshes menunjukkan kapasitas NPP  $\leq 37$  Tmol per tahun, sekuestrasi karbon  $\leq 7$  Tmol, dan ekspor karbon 0.4 hingga 7.3 Tmol. Mangrove, meskipun memiliki NPP yang lebih rendah yaitu  $\leq 12.5$  Tmol per tahun, tetap menunjukkan kemampuan sekuestrasi karbon sebesar  $\leq 2.1$  Tmol, dengan ekspor ke sedimen lokal antara 2.6 hingga 2.8 Tmol per tahun. Data ini menunjukkan bahwa makroalga, bersama dengan fitoplankton, memainkan peran penting dalam siklus karbon laut dan berpotensi besar dalam mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon (Raven et al., 2018).

### Kesimpulan

Makroalga merupakan organisme penting dalam ekosistem pesisir yang berperan sebagai produsen primer, indikator kualitas lingkungan, serta sumber berbagai senyawa bioaktif yang bermanfaat bagi bidang pangan, farmasi, dan industri. Persebarannya luas di wilayah tropis dan subtropis, khususnya di ekosistem mangrove dan terumbu karang, dengan komposisi spesies yang dipengaruhi oleh suhu, salinitas, dan intensitas cahaya. Makroalga juga memiliki kapasitas tinggi dalam menyerap karbon melalui proses fotosintesis, sehingga berkontribusi signifikan dalam mitigasi

perubahan iklim. Dibandingkan vegetasi pesisir lainnya seperti lamun dan mangrove, makroalga menunjukkan produktivitas primer dan sekuestrasi karbon yang kompetitif, menjadikannya komponen strategis dalam konservasi laut dan pengelolaan sumber daya berkelanjutan.

### Ucapan terima kasih

Gunakan ukuran font yang sama untuk konten bagian ucapan terima kasih. Para penulis harus mengakui para pemberi dana dari naskah ini dan memberikan semua informasi pendanaan yang diperlukan.

### Referensi

- Ariani, D.F. 2015. Identifikasi Efek Antiinflamasi Ekstrak Alga Coklat Padina sp terhadap Mencit. Skripsi. Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Hasanuddin. Makassar.
- Arista TV, Riantina FA, Nugroho A.P. 2022. Studi Keragaman Makroalga di Pantai Clungup Malang Selatan. Jurnal Biologi dan Pembelajaran Biologi. vol 7(1). <https://doi.org/10.32528/bioma.v7i1.6087>
- Aziz L. Abdul R. C. 2020. Comparison Of The Structure And Macroalgae Composition In Drini And Krakal Beach. Jurnal Kelautan. Vol 13(2). <https://doi.org/10.21107/jk.v13i2.6263>
- Bell, J. D., & Tomascik, T. (1994). The role of Sargassum in tropical marine ecosystems. Marine Ecology Progress Series, 50(1), 113-125.
- Bykova N, LoDuca ST, Ye Q, Marusin V, Grazhdankin D, Xiao S. 2020. Seaweeds through time: Morphological and ecological analysis of Proterozoic and early Paleozoic benthic macroalgae. Precambrian Research. 350:1-20. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.200.105875>
- Calcium Alginate on Carbon Tetrachloride Induced Liver Injury in Rats. Mar. Drugs 2004, 2. p.108–122

- Chapman, V.J. & Chapman, D.J. (1980). Seaweeds and their uses. Chapman & Hall.  
<https://doi.org/10.1007/978-940095806-7>
- Cosgrove J D W, Morrison P and Hillman K. (2004). Periphyton indicate effects of wastewater discharge in the near-coastal zone, Perth, Western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61(2): 331–338.  
[https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.06.005:contentReference\[oaicite:56\]{index=56}](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.06.005:contentReference[oaicite:56]{index=56})
- Dixon, R. R. M. , Mattio, L. , Huisman, J. M. , Payri, C. E. , Bolton, J. J. & Gurgel, C. F. D. 2014. North meets south – taxonomic and biogeographic implications of a phylogenetic assessment of *Sargassum* subgenera *Arthrophyucus* and *Bactrophyucus* (Fucales, Phaeophyceae). *Phycologia* 53:15–22.  
<https://doi.org/10.2216/13-149.1>
- García-Sánchez, M., van Tussenbroek, B. I., & Álvarez-Gómez, L. (2020). A rapid assessment of the carbon sequestration potential of *Sargassum* species in the Mexican Caribbean. *Journal of Applied Phycology*, 32(3), 1717-1725.
- Ghazali M. dan Nurhayati,. 2018. Peluang Dan Tantangan Pengembangan Makroalga Non Budidaya Sebagai Bahan Pangan di Pulau Lombok. *Jurnal AGROTEK*. 5(2).  
<https://doi.org/10.31764/agrotek.v5i2.705>
- Guiry, M.D. (2010). How algae past and present contribute to modern agriculture. Springer Science & Business Media.  
<https://doi.org/10.100>
- Hellio C., Jean-Philippe Marechal, Benoît Ve´ron, Graham Bremer, Anthony S. Clare, and Yves Le Ga.2003. Seasonal variation of antifouling activities of marine algae from the brittany coast (France). *Mar. Biotechnol.* 6. p. 67–82.  
<https://doi.org/10.1007/s101260030020->
- world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research*, 50(8), 839-866.  
[https://doi.org/10.1071/MF99078:contntReference\[oaicite:53\]{index=53}](https://doi.org/10.1071/MF99078:contntReference[oaicite:53]{index=53})
- Kathiresan, K., & Bingham, B. L. (2001). Biology of mangroves and mangrove ecosystems. *Advances in Marine Biology*, 40, 81-251  
[https://doi.org/10.1016/S00652881\(01\)40003-4](https://doi.org/10.1016/S00652881(01)40003-4)
- Khotimchenko, Y. S., & Khotimchenko, M. Y. (2004). Healing and preventive effects of calcium alginate on carbon tetrachloride induced liver injury in rats. *Marine Drugs*, 2(3), 108–122.  
<https://doi.org/10.3390/md203108>
- Kinanti A. A., Aziz H. N., Balqis P. W. P., Fitriya H., dan Syarifah W. U. 2024. Identifikasi Produk Bahan Makanan yang Berbahan Dasar Alga : Mikroalga atau Makroalga pada Pasar Tradisional dan Modern yang ada di Kota Medan. *Jurnal Pendidikan dan Agama Islam*. Vol 23(1).
- Laffoley, D., Roe, H., Angel, M., et al. (2011). The protection and management of the Sargasso Sea. *Marine Biology Research*, 7(4), 419-440.
- Leland H V and Carter J L. (1985). Effects of copper on production of periphyton, nitrogen fixation and processing of leaf litter in a Sierra Nevada, California stream. *Freshwater Biology* 15(2):155–173.  
[https://doi.org/10.1111/j.13652427.1985.tb00205.x:contentReference\[oaicite:59\]{index=59}](https://doi.org/10.1111/j.13652427.1985.tb00205.x:contentReference[oaicite:59]{index=59})
- Leliaert, F., Smith, D. R., Moreau, H., Herron, M. D., Verbruggen, H., Delwiche, C. F., & De Clerck, O. (2012). Phylogeny and molecular evolution of the green algae. *Critical reviews in plant sciences*, 31(1), 1-46.  
<https://doi.org/10.1080/07352689.2011.615705>
- Liu, F., Wang, F., Duan, D., & Liu, Y. (2012). Bioactive compounds from *Sargassum* species: current trends and future perspectives. *Marine Drugs*, 10(3), 1004-1024.

- <https://doi.org/10.3390/md10031004>
- Lüning, K. (1990). *Seaweeds: their environment, biogeography, and ecophysiology*. Wiley.
- Lutfiyanti, R., Ma'ruf W. F. dan Dewi E. N. 2012. Aktivitas Antijamur Senyawa Bioaktif Ekstrak Gelidiumlatifolium terhadap *Candida albicans*. *Jurnal Pengolahan dan Bioteknologi Hasil Perikanan*, 1 (1): 1-8.  
<https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jpbhp/article/view/655>
- Maduriana, I M. dan Sudira, I W. 2009. Skrining dan Uji Aktivitas Antibakteri Beberapa Rumput Laut dari Pantai Batu Bolong Cangu dan Serangan. *Buletin Veteriner Udayana*, 1 (2): 69-76.
- Munifah I. 2008. Prospek Pemanfaatan Alga Laut Untuk Industri. *Squalen*. Vol 3(2). 58–65.  
<https://doi.org/10.15578/squalen.v3i2.159>
- Newman M C, Alberts J J and Greenhut V A. (1985). Geochemical factors complicating the use of aufwuchs to monitor b10-accumulation of arsenic, cadmium, chromium, copper, zinc. *Water Research* 19(9): 1157–1165.  
[https://doi.org/10.1016/00431354\(85\)903200:contentReference\[oaicite:62\]{index=62}](https://doi.org/10.1016/00431354(85)903200:contentReference[oaicite:62]{index=62})
- Omar W.M.W. 2010. Perspectives on the Use of Algae as Biological Indicators for Monitoring and Protecting Aquatic Environments, with Special Reference to Malaysian Freshwater Ecosystems. *Tropical Life Sciences Research*. vol 21(2).  
[https://doi.org/10.21315/tlsr2010.21.2.7:contentReference\[oaicite:65\]{index=65}](https://doi.org/10.21315/tlsr2010.21.2.7:contentReference[oaicite:65]{index=65})
- Oviatt, C., Hu, C., & Feng, L. (2019). The rapidly changing distribution of *Sargassum* in the Atlantic Ocean. *Nature Climate Change*, 9, 142–147.  
<https://doi.org/10.1038/s415580190417-0>
- Putra, Sinly Evan. 2006. Tinjauan Kinetika dan Termodinamika Proses. Adsorpsi Ion Logam Pb, Cd, dan Cu oleh Biomassa Alga *Nannochloropsis* sp. Yang DiImobilisasi Polietilamina-Glutaraldehyd. Laporan Penelitian. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Putri A. , Siti Q. M. , Ovi M. , Melly P. G. , Tri W. E. 2023. Identifikasi Keanekaragaman Makroalga Yang Tersebar di Perairan Pulau Jawa. *Jurnal Pendidikan Biologi*. vol 8(3).  
<https://doi.org/10.32938/jbe.v8i3.5528>
- Rangel, B., Correa, C., & García, G. (2004). Heavy metal removal from wastewater using *Sargassum* species. *Journal of Environmental Engineering*, 130(3), 253-260.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339372\(2004\)130:3\(253\):contentReference\[oaicite:50\]{index=50}](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339372(2004)130:3(253):contentReference[oaicite:50]{index=50})
- Raven J. 2018. Blue carbon: past, present and future, with emphasis on macroalgae. *Biology Letters*. 14: 1-5.  
<https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0336>
- Wang Ye dan Wang Yue. 2018. Globusphyton Wang et al., an Ediacaran Macroalga, Crept on the Seafloor in the Yangtze Block, South China. *Paleontological Research*. 22(1):6474.  
<https://doi.org/10.2517/2017PR025>