



Pemetaan Bibliometrik (2020-2024) Senyawa Bioaktif Makroalga Laut Sebagai Agen Antioksidan Terhadap Toksisitas Lingkungan

Puspa Hening^{1*}, Ifhan Dwinhoven²

¹Program Studi Bioteknologi, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia 50275, Indonesia

²Program Studi Teknologi Pembenihan Ikan, Jurusan Budidaya Perikanan, Politeknik Pertanian Negeri Pangkajene Kepulauan, Jl. Poros Makassar - Parepare Km. 83, Mandalle, Pangkep, Kabupaten Pangkajene Dan Kepulauan, Sulawesi Selatan 90761, Indonesia

*Corresponding author: puspahening@lecturer.undip.ac.id

Received: 11 Mei 2025 / Accepted: 6 Juni 2025

Available online: 15 Juni 2025

Abstrak

Makroalga laut adalah sumber metabolit sekunder dengan potensi sebagai antioksidan alami dan agen protektif terhadap toksisitas lingkungan. Studi ini bertujuan untuk memetakan tren dan fokus riset global mengenai senyawa bioaktif dari makroalga laut melalui pendekatan bibliometrik. Data publikasi dikumpulkan dari basis data Scopus untuk periode 2020–2024 menggunakan kombinasi kata kunci yang relevan dan dianalisis menggunakan perangkat lunak VOSviewer dan Publish or Perish. Sebanyak 81 artikel terpilih dianalisis untuk mengidentifikasi tren publikasi, distribusi negara dan institusi, jurnal yang paling berkontribusi, serta visualisasi kata kunci dan kluster tematik. Hasil menunjukkan peningkatan tren publikasi dalam lima tahun terakhir, dengan fokus utama pada aktivitas antioksidan, stres oksidatif, dan toksisitas lingkungan. Kata kunci seperti *seaweed*, *antioxidant activity*, dan *oxidative stress* merupakan istilah yang paling dominan. Senyawa seperti *alginate*, *phloroglucinol*, *phlorotannins*, asam lemak, serta fenolik diidentifikasi sebagai komponen bioaktif utama yang menunjukkan potensi tinggi dalam melindungi sel dari stres oksidatif akibat paparan polutan lingkungan. Selain itu, metode analisis seperti *2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl* (DPPH) dan parameter enzimatik seperti *superoxide dismutase* (SOD) juga sering digunakan untuk mengevaluasi aktivitas biologis senyawa bioaktif makroalga laut. Pemetaan ini tidak hanya menegaskan relevansi makroalga dalam bidang kimia lingkungan, tetapi juga membuka peluang riset lanjutan seperti pengembangan sistem biosensor, aplikasi bioremediasi, serta eksplorasi senyawa baru dari makroalga lokal. Hasil studi ini diharapkan menjadi dasar ilmiah bagi pengembangan riset berkelanjutan berbasis sumber daya laut.

Kata Kunci: antioksidan; bibliometrik; makroalga laut; senyawa bioaktif; toksisitas lingkungan.

1. Pendahuluan

Laut adalah salah satu sumber keanekaragaman hayati yang menyimpan potensi besar bagi pengembangan senyawa bioaktif alami. Makroalga laut atau dikenal sebagai rumput laut, adalah organisme fotosintetik yang memiliki peran signifikan sebagai produsen primer sekaligus penstabil ekosistem perairan [1]. Organisme ini dapat tumbuh dengan mengapung misalnya *Sargassum* sp. atau menempel pada batu atau substrat keras di wilayah pesisir, khususnya di zona intertidal dan subtidal [2]. Makroalga laut dikenal sebagai sumber metabolit sekunder dengan struktur kimia yang unik dan kompleks. Senyawa-senyawa ini antara lain: *phlorotannin* yakni senyawa polifenol yang hanya ditemukan pada makroalga laut [3]; asam lemak tak jenuh asam eikosapentanoat (EPA)

dan asam dokosaheksanoat (DHA) [4]; serta golongan polisakarida yang memiliki gugus sulfat seperti fukosantin, karagenan, alginat, ulvan dan fucoidan [5].

Berbagai jenis metabolit sekunder seperti polisakarida, polifenol, alkaloid, terpena [6], peptid [7], dan karotenoid [8] telah berhasil diisolasi dari makroalga laut. Metabolit ini berfungsi sebagai perlindungan alami terhadap tekanan lingkungan seperti radiasi ultraviolet [9], infeksi patogen [10], pencemaran logam berat dan senyawa toksik lainnya [11]. Senyawa-senyawa ini tidak hanya mendukung mekanisme adaptasi makroalga laut, tetapi juga telah menunjukkan aktivitas biologis yang penting seperti antioksidan [12], antifungi [13], antibakteri [14], dan antiinflamasi [15]. Dengan

demikian, makroalga laut tidak hanya penting dari segi ekologi, tetapi juga memiliki nilai strategis sebagai sumber senyawa bioaktif yang berpotensi dikembangkan dalam bidang kesehatan, farmasi, pangan dan lingkungan.

Menurut perspektif lingkungan, makroalga laut berfungsi sebagai indikator biologis untuk mendeteksi pencemaran di lingkungan perairan [16]. Senyawa bioaktif dalam makroalga laut memiliki kemampuan menetralkan radikal bebas, logam berat, dan senyawa toksik lainnya, sehingga menjadikan makroalga laut sebagai agen bioremediasi yang efektif [17]. Proses ini berkaitan langsung dengan senyawa antioksidan yang mampu menekan efek oksidatif akibat polutan lingkungan, sehingga menjaga integritas seluler pada organisme yang terpapar [18]. Meskipun telah banyak dilakukan penelitian dan publikasi yang mengulas senyawa bioaktif makroalga laut, studi dengan pendekatan bibliometrik dalam topik ini masih sangat terbatas. Padahal seiring dengan meningkatnya jumlah publikasi dalam lima tahun terakhir, peneliti semakin kesulitan dalam mengakses dan memetakan informasi yang relevan secara sistematis. Oleh karena itu, analisis bibliometrik menjadi pendekatan yang tepat untuk merangkum dan memetakan perkembangan literatur secara komprehensif.

Analisis bibliometrik dapat digunakan untuk mengidentifikasi tren penelitian, mengevaluasi dampak publikasi tertentu, menilai produktivitas penulis dan institusi, serta menemukan potensi kolaborasi ilmiah. Analisis bibliometrik juga dapat memberikan gambaran mengenai perkembangan suatu bidang penelitian serta menjadi dasar dalam perumusan arah riset di masa mendatang [19]. Secara khusus, pemetaan bibliometrik terhadap senyawa bioaktif dari makroalga laut sebagai agen antioksidan memiliki peran penting dalam: (1) mengidentifikasi sumber makroalga yang kaya akan senyawa fungsional [20]; (2) mengeksplorasi berbagai potensi dan aplikasi yang ramah lingkungan [20]; dan (3) mendorong inovasi produk fungsional yang tidak hanya meningkatkan kesehatan manusia, tetapi juga berkontribusi dalam mengurangi dampak toksisitas akibat pencemaran lingkungan [21]. Dengan demikian, pemetaan ini dapat membantu para peneliti untuk memfokuskan penelitian mereka pada area yang paling menjanjikan dan merancang solusi inovatif terhadap tantangan lingkungan yang semakin kompleks.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemetaan bibliometrik terhadap publikasi ilmiah dalam lima tahun terakhir dari rentang tahun 2020-2024 yang membahas hubungan antara senyawa bioaktif makroalga laut dan aktivitas protektif terhadap toksisitas lingkungan. Dalam studi ini, basis data Scopus dipilih karena memiliki cakupan multidisiplin yang luas, meliputi jurnal-jurnal dari bidang bioteknologi, toksikologi, kimia, dan ilmu lingkungan, yang relevan dengan topik senyawa bioaktif dari makroalga laut. Scopus juga menyediakan metadata yang terstruktur secara sistematis, termasuk informasi afiliasi penulis, kutipan, dan kata kunci, yang sangat mendukung analisis visual dan tematik melalui perangkat lunak

seperti VOSviewer. Basis data Scopus dinilai paling sesuai untuk memberikan representasi literatur yang komprehensif dalam studi ini. Informasi yang dihasilkan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi pengembangan riset kimia lingkungan berbasis sumber daya laut yang berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan bibliometrik untuk memetakan tren dan fokus riset global mengenai senyawa bioaktif makroalga laut yang memiliki aktivitas antioksidan dan protektif terhadap toksisitas lingkungan. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran menyeluruh terhadap perkembangan ilmiah dalam suatu bidang serta mengidentifikasi pola-pola keterkaitan antar topik melalui analisis data publikasi

2.1. Material dan Instrumen

Material berupa data publikasi dikumpulkan dari basis data Scopus, yang merupakan salah satu pangkalan data ilmiah terbesar dan terindeks secara internasional. Proses pencarian dilakukan pada bulan April 2025 menggunakan kata kunci pencarian berikut:

("marine macroalgae" OR "seaweed") AND ("bioactive compounds" OR "natural products" OR "secondary metabolites") AND ("antioxidant" OR "cytotoxicity" OR "toxicity" OR "environmental application" OR "bioremediation")

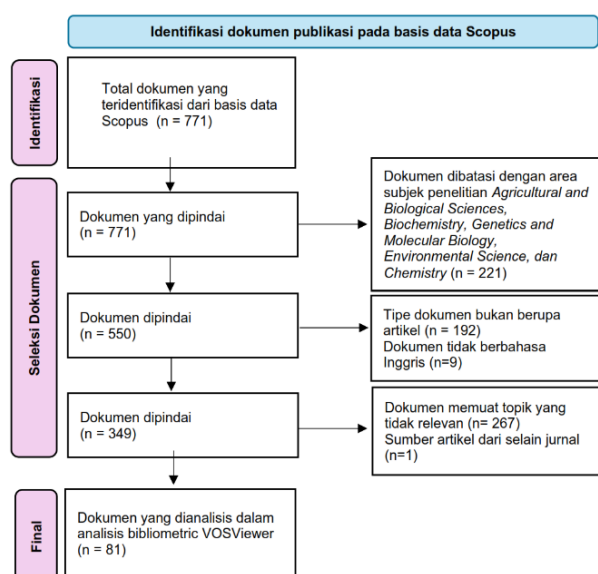
Kriteria inklusi yang diterapkan meliputi: dokumen berupa artikel ilmiah (article), diterbitkan dalam jurnal ilmiah berbahasa Inggris, dan periode publikasi berada di rentang tahun 2020 hingga 2024. Data yang diperoleh kemudian diekspor dalam format .csv dan format .ris. Data bibliometrik kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak VOSviewer version 1.6.20 [22] dan Publish or Perish [23].

2.2. Cara Kerja

Gambar 1 menggambarkan alur kerja proses identifikasi dan seleksi dokumen yang digunakan dalam analisis bibliometrik dari basis data Scopus. Prosedur ini terdiri dari tiga tahapan utama: identifikasi, seleksi dokumen, dan finalisasi dokumen yang dianalisis. Proses seleksi ini memastikan bahwa dokumen yang dianalisis benar-benar representatif dan relevan untuk menjawab tujuan studi, yakni mengungkap tren riset terkini mengenai senyawa bioaktif dari makroalga laut dan kaitannya dengan isu-isu toksisitas dan proteksi seluler.

Tren publikasi berdasarkan tahun, negara dan institusi yang berkontribusi dianalisis menggunakan basis data Scopus. Jurnal dengan jumlah artikel terbanyak dan jumlah sitasi artikel dianalisis menggunakan perangkat lunak Publish or Perish [23]. Informasi H-index jurnal secara keseluruhan diperoleh dari laman <https://www.scimagojr.com/>.

Doi:



Data-data tersebut kemudian disajikan dalam bentuk diagram dan tabel. Analisis kata kunci dilakukan dengan pendekatan *co-occurrence* pada kata kunci (*keywords*) dan menggunakan metode *full counting* pada perangkat lunak VOSviewer [22]. Untuk menjaga fokus pada istilah yang signifikan, digunakan ambang batas minimum kemunculan kata sebanyak 2 kali (*threshold* ≥ 2) yang dianalisis lebih lanjut. Visualisasi hasil dilakukan dalam bentuk visualisasi jaringan (*network visualization*), di mana setiap istilah (kata kunci, penulis, atau negara) direpresentasikan dalam bentuk gelembung (*bubble*). Ukuran gelembung mencerminkan jumlah dokumen atau frekuensi kemunculan istilah tersebut. Jarak antar gelembung menunjukkan tingkat asosiasi antar istilah, dan warna menggambarkan kluster tematik yang terbentuk secara otomatis oleh perangkat lunak.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Tren Publikasi Berdasarkan Tahun

Tren publikasi menunjukkan peningkatan yang stabil dalam lima tahun terakhir terkait penelitian tentang senyawa bioaktif dari makroalga laut. Berdasarkan basis data Scopus, pada tahun 2020 jumlah publikasi tercatat sebanyak 10 dokumen dan meningkat menjadi 14 pada tahun 2021. Kenaikan ini berlanjut secara bertahap pada 2022 dengan 15 dokumen, kemudian melonjak tajam pada 2023 dengan 20 publikasi, dan mencapai puncaknya pada 2024 dengan 22 dokumen. Peningkatan tren publikasi terkait senyawa bioaktif makroalga laut dalam beberapa tahun terakhir dapat dikaitkan dengan keragaman aplikasinya serta potensi yang signifikan di berbagai bidang, termasuk farmasi, nutrasetikal, dan lingkungan.

Senyawa bioaktif makroalga laut banyak dikembangkan dalam industri farmasi dan nutrasetikal sebagai alternatif bahan alami yang

aman [24]. Di sisi lain, penggunaan makroalga untuk pengolahan limbah dan bioenergi memperkuat perannya dalam aspek lingkungan dan energi yang berkelanjutan [25]. Peningkatan ini mencerminkan pertumbuhan minat dan urgensi riset dalam memanfaatkan sumber daya laut, khususnya makroalga, sebagai solusi alternatif dalam isu-isu kimia lingkungan seperti stres oksidatif, toksisitas lingkungan, dan bioremediasi. Kecenderungan ini juga mengindikasikan bahwa makroalga semakin dilihat sebagai sumber metabolit sekunder yang strategis dalam mendukung pembangunan berkelanjutan dan kesehatan lingkungan [26].



Gambar 2. Tren Jumlah Publikasi Berdasarkan Tahun (Sumber: Basis Data Scopus)

3.2. Jurnal yang Paling Berkontribusi dalam Riset Senyawa Bioaktif Makroalga sebagai Agen Antioksidan

Tabel 1 menampilkan lima jurnal ilmiah dengan jumlah publikasi terbanyak terkait penelitian bioaktivitas makroalga laut dalam lima tahun terakhir (2020–2024). *Journal of Applied Phycology* dan *Algal Research* menempati posisi teratas dengan masing-masing 7 artikel, namun *Journal of Applied Phycology* menunjukkan dampak ilmiah yang lebih tinggi dengan total 187 sitasi dan H-Index sebesar 143. Sementara itu, dua jurnal dari penerbit MDPI, yaitu *Foods* dan *Antioxidants*, juga turut berkontribusi signifikan meskipun jumlah artikelnya lebih sedikit. Kehadiran ACS Omega dari American Chemical Society dalam daftar ini memperkuat kecenderungan bahwa isu-isu terkait senyawa bioaktif alga laut mendapat perhatian luas lintas disiplin, termasuk kimia lingkungan, bioteknologi, dan pangan fungsional. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa penelitian tentang potensi farmakologi dan lingkungan dari makroalga tidak hanya meningkat secara kuantitatif, tetapi juga mendapatkan tempat di jurnal-jurnal dengan reputasi tinggi di tingkat internasional.

Tabel 1. Jurnal dengan Artikel Terbanyak

Peringkat	Jurnal	Jumlah Artikel	Jumlah Sitasi	H-Index	Publisher
1	Journal of Applied Phycology	7	87	143	Springer Science and Business Media B.V
2	Algal research	7	35	110	Elsevier B.V
3	Foods	4	5	123	MDPI
4	Antioxidants	3	3	133	MDPI
5	ACS Omega	3	4	120	American Chemical Society

3.3. Kontribusi Berdasarkan Negara

Tabel 2 memperlihatkan distribusi kontribusi negara-negara paling aktif dalam lima tahun terakhir. India menempati posisi teratas dengan 12 publikasi, diikuti oleh Spanyol (11), serta Indonesia dan Portugal yang sama-sama mencatatkan 10 artikel. Jumlah ini menunjukkan tingginya perhatian terhadap potensi makroalga sebagai sumber senyawa bioaktif yang mampu menangkal stres oksidatif dan melindungi sel dari dampak toksik lingkungan. Kehadiran negara-negara Asia seperti Indonesia, India, Tiongkok, Korea Selatan, dan Malaysia dalam daftar ini menandakan bahwa kawasan Asia memegang peran strategis dalam pengembangan riset berbasis sumber daya laut. Dominasi negara-negara tersebut juga menunjukkan urgensi lokal akan solusi berbasis alam terhadap isu toksisitas lingkungan dan kesehatan. Secara keseluruhan, tren ini mencerminkan pengakuan global atas makroalga sebagai agen potensial dalam bidang kimia lingkungan dan terapi berbasis antioksidan.

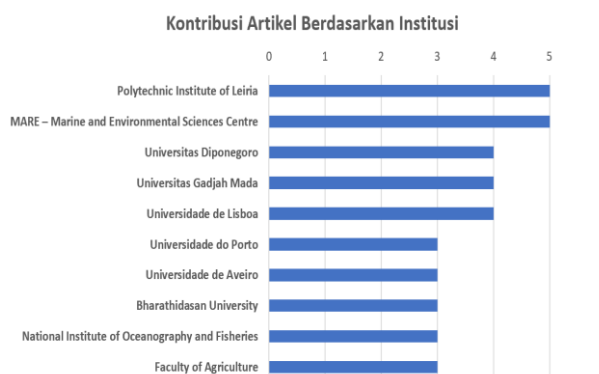
Tabel 2. Peringkat Negara yang Paling Berkontribusi

Peringkat	Negara	Jumlah Artikel
1	India	12
2	Spanyol	11
3	Indonesia	10
4	Portugal	10
5	Mesir	8
6	Tiongkok	7
7	Korea Selatan	6
8	Brazil	5
9	Malaysia	5
10	Amerika Serikat	5

3.4. Kontribusi Berdasarkan Institusi

Gambar 3 menunjukkan institusi dengan kontribusi artikel terbanyak dalam bidang eksplorasi senyawa bioaktif dari makroalga laut. Polytechnic Institute of Leiria dan MARE – Marine and Environmental Sciences Centre menempati posisi teratas dengan masing-masing lima publikasi. Disusul oleh Universitas Diponegoro, Universitas Gadjah Mada, dan Universidade de Lisboa dengan masing-masing empat artikel. Hal ini menunjukkan keterlibatan aktif institusi dari

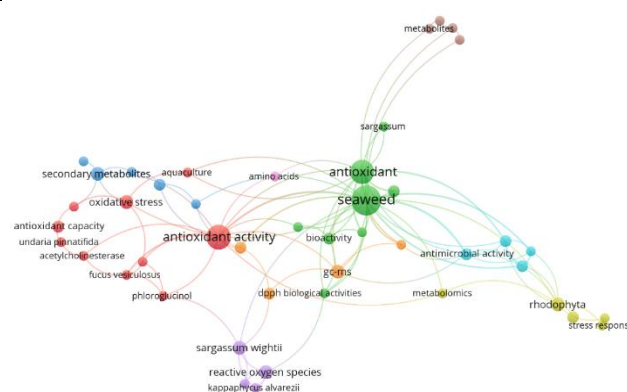
Portugal, Indonesia, dan Mesir dalam penelitian kimia lingkungan yang terkait dengan potensi antioksidan dan protektif makroalga terhadap toksisitas lingkungan. Kolaborasi dan kontribusi dari institusi-institusi ini menandai peran pentingnya dalam mendorong riset berkelanjutan berbasis sumber daya laut.



Gambar 3. Kontribusi Artikel Berdasarkan Institusi (Sumber: Basis Data Scopus)

3.5. Visualisasi Jaringan Kata Kunci

Gambar 4 menunjukkan hasil analisis frekuensi kemunculan (*co-occurrence*) terhadap kata kunci di dalam publikasi. Hal ini dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai arah dan fokus penelitian senyawa bioaktif dari makroalga laut dalam konteks aktivitas antioksidan dan proteksi terhadap toksisitas lingkungan. Visualisasi ini menunjukkan bahwa istilah *seaweed*, *antioxidant*, dan *antioxidant activity* menjadi inti dari literatur ilmiah dalam lima tahun terakhir, yang ditandai dengan ukuran *node* yang besar serta posisi sentral dalam jaringan. Hubungan antar istilah yang dihubungkan oleh garis menunjukkan keterkaitan konsep dan frekuensi kemunculan bersama dalam satu artikel.



Gambar 4. Visualisasi Jaringan Kata Kunci Senyawa Bioaktif Makroalga Laut

Untuk memberikan pemahaman yang lebih terstruktur terhadap peta visualisasi hubungan antar topik penelitian, klasifikasi kluster dalam grafik VOSviewer pada Gambar 4 dirangkum dalam Tabel 3. Setiap kluster diidentifikasi berdasarkan

warna, topik utama yang diangkat, serta kata kunci representatif yang paling dominan. Tabel ini memudahkan interpretasi mengenai fokus riset dari masing-masing kelompok, sehingga memperjelas kontribusi topik dalam riset senyawa bioaktif makroalga laut dan hubungannya dengan aspek toksisitas seluler yang disebabkan oleh tekanan lingkungan.

Tabel 3. Deskripsi Kluster Utama, Topik Utama dan Kata Kunci

Klaster	Warna	Topik Utama	Kata Representatif	Kunci
1		Aktivitas Antioksidan dan Stres Oksidatif	<i>antioxidant, oxidative, phloroglucinol, vesiculosus, pinnatifida, acetylcholinesterase</i>	<i>activity, stress, Fucus, Undaria</i>
2		Sumber Bioaktif dan Potensi Senyawa Alami	<i>seaweed, antioxidant, bioactivity, Sargassum, biological activity</i>	
3		Taksonomi dan Adaptasi Lingkungan	<i>Metabolomics, Rhodophyta, response</i>	<i>stress</i>
4		Spesies dan Mekanisme Molekuler	<i>Sargassum wightii, Kappapycus alvarezii, reactive oxygen species</i>	
5		Senyawa Kimia dan Aktivitas Bioaktif	<i>Antimicrobial activity, secondary metabolites</i>	
6		Analisis Kimia dan Komponen Bioaktif	GC-MS, DPPH	

Secara keseluruhan, Tabel 3 menunjukkan bahwa tren penelitian dalam lima tahun terakhir semakin mengarah pada pemanfaatan senyawa bioaktif dari makroalga laut sebagai agen antioksidan dan protektif terhadap toksisitas lingkungan. Hal ini dapat memberikan kontribusi pada strategi penanganan terhadap dampak yang ditimbulkan oleh polutan dan peningkatan kualitas ekosistem perairan.

Tabel 4. Distribusi Kata Kunci yang Paling Sering Muncul pada Artikel

Kata Kunci	Frekuensi Kemunculan	Total Kekuatan Hubungan
<i>seaweed</i>	19	38
<i>antioxidant activity</i>	13	16
<i>antioxidant</i>	12	22
<i>oxidative stress</i>	4	5
<i>secondary metabolites</i>	4	5
<i>Rhodophyta</i>	4	9
<i>reactive oxygen species</i>	4	5
<i>Sargassum wightii</i>	4	6
GC-MS	4	6
<i>antioxidant capacity</i>	3	2

Tabel 4 menunjukkan kata kunci yang paling sering muncul dalam artikel selama lima tahun terakhir menunjukkan bahwa "*seaweed*" merupakan istilah sentral dengan frekuensi kemunculan tertinggi (19 kali) dan total kekuatan hubungan sebesar 38, menegaskan bahwa

makroalga menjadi objek utama dalam penelitian terkait senyawa bioaktif. Kata ini disusul oleh "*antioxidant activity*" (13) dan "*antioxidant*" (12), yang mengindikasikan bahwa fungsi antioksidan merupakan aspek paling dominan dalam konteks penelitian ini. Kata kunci lain seperti "*oxidative stress*", "*reactive oxygen species*", dan "*antioxidant capacity*" mencerminkan fokus besar terhadap mekanisme perlindungan seluler dari kerusakan yang disebabkan oleh stres oksidatif. Selain itu, istilah "*secondary metabolites*", "*Sargassum wightii*", dan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* atau "GC-MS" menunjukkan bahwa perhatian penelitian tidak hanya tertuju pada efek, tetapi juga pada jenis senyawa dan metode analisis yang berkembang.

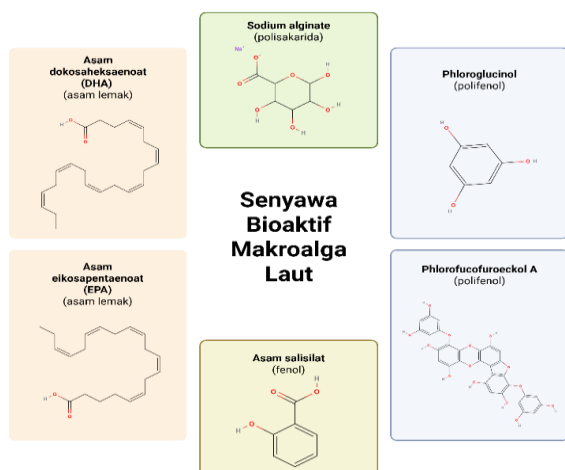
Tabel 5. Kata Kunci Bioaktif dan Parameter Biokimia yang Paling Sering Digunakan

Kata Kunci	Frekuensi Kemunculan	Total Kekuatan Hubungan
<i>Reactive Oxygen Species</i>	4	5
<i>Alginate</i>	3	3
DPPH	3	3
<i>Phenolic Compounds</i>	3	5
<i>Acetylcholinesterase</i>	2	3
<i>Fatty Acid Profile</i>	2	3
<i>Phloroglucinol</i>	2	4
<i>Phlorotannins</i>	2	4
<i>Superoxide Dismutase</i>	2	2
<i>Amino Acids</i>	2	2

Pada Tabel 5, hasil identifikasi kata kunci bioaktif dan parameter biokimia mengungkapkan bahwa senyawa seperti "*alginate*", "*phenolic compounds*", "*phloroglucinol*", dan "*phlorotannins*" menjadi fokus penting dalam riset potensi antioksidan dari makroalga laut. Keempat senyawa ini mewakili kelompok utama metabolit sekunder yang umum ditemukan pada makroalga dengan struktur kimia yang khas (Gambar 5) sehingga memungkinkan menjadi penangkap radikal bebas [27]. *Alginate* adalah polisakarida yang berasal dari dinding sel makroalga menunjukkan kemampuan mengkelat ion logam berat yang dapat menyebabkan stress oksidatif [28]. Asam salisilat adalah senyawa fenolik yang dihasilkan makroalga dapat menjaga keseimbangan oksidasi sel dan menetralkan radikal bebas seperti hidroksil (-OH) dan nitrogen monoksida (NO). Modulasi ini dapat menjaga kesehatan sel dan mencegah kerusakan oksidatif [29]. Makroalga mengandung lebih banyak asam lemak omega-3 seperti EPA dan DHA dibandingkan tumbuhan darat yang memiliki aktivitas antioksidan dengan memperkuat fluiditas membran sel [4]. Sementara itu, senyawa polifenol seperti *phloroglucinol* serta turunannya yakni *phlorotannins* (*phlorofuocofureckol A*) memiliki banyak gugus hidroksil aromatik yang efektif dalam menetralkan *Reactive Oxygen Species* (ROS) [30], serta terlibat dalam modulasi aktivitas enzim antioksidan seperti *superoxide dismutase* (SOD) [31].

Metode analisis aktivitas antioksidan seperti *2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl* (DPPH) dan

parameter enzimatik seperti acetylcholinesterase dan SOD juga digunakan untuk mengevaluasi efek biologis senyawa makroalga terhadap stres oksidatif dan toksisitas. Adanya istilah "*amino acids*" dan "*fatty acid profile*" turut memperkaya pendekatan metabolomik dalam penelitian ini. Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa makroalga tidak hanya diposisikan sebagai sumber senyawa bioaktif yang potensial, tetapi juga dievaluasi secara mendalam melalui berbagai parameter biokimia untuk mendukung protektif terhadap toksisitas lingkungan.



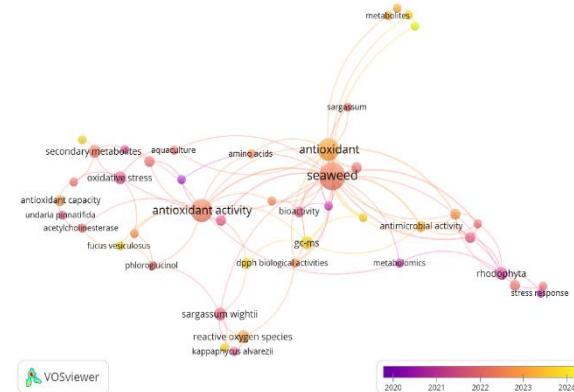
Gambar 5. Struktur kimia senyawa bioaktif utama makroalga laut yang paling sering dilaporkan. (Sumber: Kim et al. [32] dan divisualisasikan dengan <http://molview.org>)

3.6. Tren Tematik Berdasarkan Waktu

Visualisasi tren kata kunci berdasarkan waktu dalam penelitian mengenai senyawa bioaktif dari makroalga laut selama lima tahun terakhir (2020–2024) ditunjukkan melalui hasil *Overlay Analysis* pada Gambar 6. Warna pada *node* mencerminkan tahun publikasi rata-rata: ungu menunjukkan istilah yang lebih dominan pada tahun-tahun awal (2020–2021), sementara kuning dan jingga menunjukkan kemunculan yang lebih terkini (2023–2024). Secara umum, kata kunci seperti *seaweed*, *antioxidant*, dan *antioxidant activity* berada di tengah peta dengan warna oranye, menandakan bahwa istilah ini tetap menjadi pusat perhatian sepanjang periode waktu dan mengalami peningkatan eksplorasi dalam beberapa tahun terakhir. Beberapa istilah seperti *Rhodophyta*, *stress response* dan *oxidative stress* tampak berwarna ungu-merah jambu, menunjukkan bahwa topik tersebut telah diteliti sejak awal periode observasi namun tetap relevan hingga kini.

Sementara itu, kata kunci seperti *secondary metabolites*, *Fucus vesiculosus*, dan *Kappaphycus alvarezii* muncul dalam warna kuning terang, menandakan tren penelitian terbaru yang mengarah pada eksplorasi metabolit spesifik dan potensi bioaktivitasnya. Kemunculan kata seperti DPPH, GC-MS, dan *phenolic compounds* juga menunjukkan adanya peningkatan fokus pada metode analisis dan evaluasi aktivitas biokimia

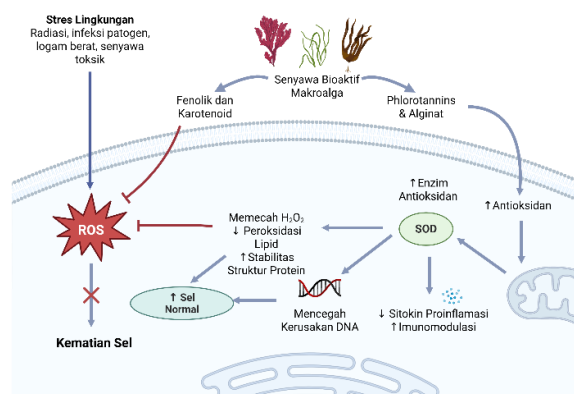
dalam penelitian terbaru. Dengan demikian, data overlay ini menunjukkan bahwa meskipun topik utama tetap berkisar pada aktivitas antioksidan dari makroalga, ada pergeseran fokus menuju pemanfaatan teknik analisis lanjutan dan eksplorasi jenis metabolit yang lebih spesifik dalam studi terkini.



Gambar 6. Visualisasi Tren Waktu Kata Kunci Penelitian Senyawa Bioaktif dari Makroalga Laut dalam 5 Tahun (2020–2024)

3.7. Relevansi Terhadap Isu Kimia Lingkungan

Temuan dari analisis ini menunjukkan bahwa penelitian mengenai senyawa bioaktif dari makroalga laut tidak hanya berkontribusi terhadap pengembangan terapi berbasis alam, tetapi juga memiliki relevansi yang kuat dalam konteks isu-isu lingkungan. Aktivitas antioksidan yang dominan menjadi fokus utama studi mencerminkan potensi senyawa dari makroalga dalam menetralkan radikal bebas yang dihasilkan akibat stres oksidatif maupun paparan polutan berbahaya di lingkungan perairan. Selain itu, kemunculan kata kunci seperti *reactive oxygen species*, *toxicity*, dan *marine environment* mengindikasikan adanya perhatian terhadap mekanisme proteksi seluler yang relevan dengan pencemaran lingkungan.



Gambar 7. Mekanisme Protektif Senyawa Bioaktif Makroalga Laut terhadap Stres Oksidatif dan Toksisitas Lingkungan (dibuat dengan <https://BioRender.com>)

Polutan lingkungan seperti logam berat, pestisida, dan senyawa organik beracun dapat memicu produksi radikal bebas (ROS) dengan

Doi:

menghambat enzim antioksidan dalam tubuh organisme [33]. Akumulasi ROS ini menyebabkan stres oksidatif, yang merusak biomolekul penting (lipid, protein, DNA) dan dapat memicu kematian sel, mutasi, dan inflamasi kronis [34]. Hal ini tidak hanya berdampak pada kesehatan manusia, tetapi juga pada keseimbangan ekosistem perairan. Pada gambar 7, senyawa bioaktif dari makroalga laut seperti fenolik, karotenoid, *phlorotannin*, dan alginat digambarkan masuk ke dalam sel dan memicu peningkatan aktivitas enzim antioksidan, khususnya *Superoxide Dismutase* (SOD) [35–37]. Aktivasi SOD menghasilkan efek berantai berupa: penurunan ROS, stabilisasi struktur sel, perlindungan DNA, penurunan sitokin proinflamasi (seperti *Tumor Necrosis Factor-α* dan Interleukin-6), dan akhirnya mencegah toksisitas dan kematian sel [38,39]. Hal ini mendukung peran senyawa bioaktif dalam proteksi terhadap kesehatan ekosistem perairan.

Dengan demikian, senyawa dari makroalga tidak hanya bertindak sebagai antioksidan alami, tetapi juga berfungsi sebagai agen protektif terhadap dampak pencemaran lingkungan pada tingkat seluler. Peran tersebut menunjukkan bahwa makroalga memiliki potensi besar dalam pengembangan strategi pencegahan pencemaran yang berkelanjutan, khususnya di ekosistem perairan. Temuan ini juga sejalan dengan arah penelitian yang fokus pada interaksi antara zat kimia lingkungan dan dampaknya terhadap organisme hidup.

4. Kesimpulan

Hasil pemetaan bibliometrik menunjukkan bahwa penelitian mengenai senyawa bioaktif dari makroalga laut dalam lima tahun terakhir terus berkembang, dengan fokus utama pada aktivitas antioksidan dan proteksi terhadap toksisitas lingkungan. Kata kunci seperti *seaweed*, *antioxidant activity*, dan *oxidative stress* mendominasi, mencerminkan perhatian ilmiah terhadap potensi makroalga sebagai agen bioaktif alami. Kluster yang terbentuk mengindikasikan keterkaitan antara eksplorasi senyawa, evaluasi toksisitas, dan penggunaan pendekatan analitik modern. Temuan ini membuka peluang besar untuk penelitian lanjutan, seperti (1) eksplorasi makroalga lokal sebagai sumber senyawa bioaktif baru, (2) formulasi senyawa bioaktif makroalga untuk menjaga kualitas lingkungan perairan, (3) pengembangan sistem deteksi pencemaran berbasis biosensor, serta (4) aplikasi pengobatan serta studi *in vivo* bagi organisme perairan yang terdampak polusi. Potensi ini juga mendukung pemanfaatan makroalga dalam inovasi produk ramah lingkungan yang berkelanjutan dan relevan dengan tantangan ekosistem perairan masa kini.

Daftar Pustaka

1. Kalasariya HS, Maya-Ramírez CE, Cotas J, Pereira L. Biology of Marine Macroalgae. Vol. 2

Thalass. Cosmeceuticals, CRC Press; 2025.

2. Thiruchelvi. R Jayashree. P., Hemashree. T, Hemasudha T. S., Balashanmugam. P. Preliminary Phytochemical Analysis of the Crude extract of Marine Red and Brown Seaweeds. Res J Pharm Technol 2018;11:4407–10. <https://doi.org/10.5958/0974-360X.2018.00806.5>.
3. Chouh A, Nouadri T, Catarino MD, Silva AMS, Cardoso SM. Phlorotannins of the Brown Algae *Sargassum vulgare* from the Mediterranean Sea Coast. Antioxidants 2022;11. <https://doi.org/10.3390/antiox11061055>.
4. Peñalver R, Lorenzo JM, Ros G, Amarowicz R, Pateiro M, Nieto G. Seaweeds as a Functional Ingredient for a Healthy Diet. Mar Drugs 2020;18:301. <https://doi.org/10.3390/md18060301>.
5. Pal A, Kamthania MC, Kumar A. Bioactive Compounds and Properties of Seaweeds—A Review. Open Access Libr J 2014;1:1–17. <https://doi.org/10.4236/oalib.1100752>.
6. Sanjivkumar M, Selvan ST, Velramar B, Nagajothi K, Sophia SSM, Parameswari A. Biotherapeutic potential and properties of seaweeds. Whole-Cell Biocatal. -Gener. Technol. Green Synth. Pharm. Chem. Biofuels, 2024, p. 199–220.
7. Murphy C, Hotchkiss S, Worthington J, McKeown SR. The potential of seaweed as a source of drugs for use in cancer chemotherapy. J Appl Phycol 2014;26:2211–64. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0245-2>.
8. Poojary MM, Barba FJ, Aliakbarian B, Donsi F, Pataro G, Dias DA, Juliano P. Innovative alternative technologies to extract carotenoids from microalgae and seaweeds. Mar Drugs 2016;14. <https://doi.org/10.3390/md14110214>.
9. Polo LK, and Chow F. Variation of antioxidant capacity and antiviral activity of the brown seaweed *Sargassum filipendula* (Fucales, Ochrophyta) under UV radiation treatments. Appl Phycol 2022;3:260–73. <https://doi.org/10.1080/26388081.2022.2030653>.
10. Mohan K, Rajan DK, Ganesan AR, Munisamy S. Algal-Derived (By) Products as an Immunostimulant in the Aquaculture Industry. Algal Biotechnol., CRC Press; 2024.
11. Cabrera J, Marcoval MaA, Díaz-Jaramillo M, Gonzalez M. Single and Combined Effects of Cypermethrin and UVR Pre-Exposure in the Microalgae *Phaeodactylum Tricornutum*. Arch Environ Contam Toxicol 2021;81:507–16. <https://doi.org/10.1007/s00244-021-00889-1>.
12. Begum R, Howlader S, Mamun-Or-Rashid ANM, Rafiquzzaman SM, Ashraf GM, Albadrani GM, Sayed AA, Peluso I, Abdel-Daim MM, Uddin MS. Antioxidant and Signal-Modulating Effects of Brown Seaweed-Derived Compounds against Oxidative Stress-Associated Pathology. Oxid

Doi:

- Med Cell Longev 2021;2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9974890>.
13. El-Bilawy EH, Al-Mansori A-NA, Alotibi FO, Al-Askar AA, Arishi AA, Teiba II, Sabry AE-N, Elsharkawy MM, Heflish AA, Behiry SI, Abdelkhalek A. Antiviral and Antifungal of Ulva fasciata Extract: HPLC Analysis of Polyphenolic Compounds. *Sustainability* 2022;14:12799. <https://doi.org/10.3390/su141912799>.
 14. [Matin M, Koszarska M, Atanasov AG, Król-Szmajda K, Józwiak A, Stelmasiak A, Hejna M. Bioactive Potential of Algae and Algae-Derived Compounds: Focus on Anti-Inflammatory, Antimicrobial, and Antioxidant Effects. *Molecules* 2024;29:4695. <https://doi.org/10.3390/molecules29194695>.
 15. Walimuni SWS, Niroshika KKH, Senaweera YT, Molagoda IMN. Seaweed metabolites as a novel source of drugs to treat inflammatory diseases. *Role Seaweeds Blue Bioeconomy*, 2024, p. 52–79. <https://doi.org/10.2174/9789815223644124010006>.
 16. Sharma M., Sujata S., Bansal D. and Kaushik P. Mini Review on the Potential of Algal Biosensors in Wastewater Monitoring. *Nanosci Nanotechnol-Asia* 2023;13:24–7. <https://doi.org/10.2174/2210681213666230517123150>.
 17. Areco MM, Salomone VN, Afonso M dos S. Ulva lactuca: A bioindicator for anthropogenic contamination and its environmental remediation capacity. *Mar Environ Res* 2021;171:105468. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105468>.
 18. Liu Z, Sun X. A Critical Review of the Abilities, Determinants, and Possible Molecular Mechanisms of Seaweed Polysaccharides Antioxidants. *Int J Mol Sci* 2020;21:7774. <https://doi.org/10.3390/ijms21207774>.
 19. Donthu N, Kumar S, Mukherjee D, Pandey N, Lim WM. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *J Bus Res* 2021;133:285–96. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>.
 20. Yumnam G, Yumnam G, Alam W. Quantifying the Global Research Effort on Bioactive Compounds: A Scientometric Analysis (1989-2023): QUANTIFYING THE GLOBAL RESEARCH EFFORT ON BIOACTIVE COMPOUNDS. *J Sci Ind Res JSIR* 2024;83:1125–38. <https://doi.org/10.56042/jsir.v83i10.9135>.
 21. Segaran TC, Azra MN, Mohd Noor MI, Danish-Daniel M, Burlakovs J, Lananan F, Xu J, Kari ZA, Wei LS. Knowledge mapping analysis of the global seaweed research using CiteSpace. *Heliyon* 2024;10:e28418. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28418>.
 22. Arruda H, Silva ER, Lessa M, Proença D, Bartholo R. VOSviewer and Bibliometrix. *J Med Libr Assoc JMLA* n.d.;110:392–5. <https://doi.org/10.5195/jmla.2022.1434>.
 23. Harzing - A-W. Publish or Perish. HarzingCom 2016. <https://harzing.com/resources/publish-or-perish> (accessed April 26, 2025).
 24. Chakraborty K. Marine Macroalgae as a Treasure House of Bioactive Compounds and Nutraceuticals, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28780-0_30.
 25. Kammler S, Malvis Romero A, Burkhardt C, Baruth L, Antranikian G, Liese A, Kaltschmitt M. Macroalgae valorization for the production of polymers, chemicals, and energy. *Biomass Bioenergy* 2024;183:107105. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107105>.
 26. García-Poza S, Pacheco D, Cotas J, Marques JC, Pereira L, Gonçalves AMM. Marine macroalgae as a feasible and complete resource to address and promote Sustainable Development Goals (SDGs). *Integr Environ Assess Manag* 2022;18:1148–61. <https://doi.org/10.1002/ieam.4598>.
 27. Priyanka KR, Rajaram R, Sivakumar SR. A critical review on pharmacological properties of marine macroalgae. *Biomass Convers Biorefinery* 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03134-4>.
 28. Vijayalakshmi K, Latha S, Rose MH, Sudha PN. Industrial applications of alginate. *Ind. Appl. Mar. Biopolym.*, 2017, p. 545–76. <https://doi.org/10.4324/9781315313535>.
 29. Žatko D, Vašková J, Perjési P, Haus M, Vaško L. Pro-oxidative and antioxidant effects of salicylates. *Chem Pap* 2020;74:3161–8. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01152-y>.
 30. Park C, Cha H-J, Hwangbo H, Ji SY, Kim DH, Kim MY, Bang E, Hong SH, Kim SO, Jeong S-J, Lee H, Moon S-K, Shim J-H, Kim G-Y, Cho S, Choi YH. Phloroglucinol Inhibits Oxidative-Stress-Induced Cytotoxicity in C2C12 Murine Myoblasts through Nrf-2-Mediated Activation of HO-1. *Int J Mol Sci* 2023;24:4637. <https://doi.org/10.3390/ijms24054637>.
 31. Woo H, Kim M-K, Park S, Han S-H, Shin H-C, Kim B, Oh S-H, Suh M-W, Lee J-H, Park M-K. Effect of Phlorofucofuroeckol A and Dieckol Extracted from Ecklonia cava on Noise-induced Hearing Loss in a Mouse Model. *Mar Drugs* 2021;19:443. <https://doi.org/10.3390/md19080443>.
 32. Kim S, Chen J, Cheng T, Gindulyte A, He J, He S, Li Q, Shoemaker BA, Thiessen PA, Yu B, Zaslavsky L, Zhang J, Bolton EE. PubChem 2025 update. *Nucleic Acids Res* 2025;53:D1516–25. <https://doi.org/10.1093/nar/gkae1059>.
 33. Mansoor S, Ali A, Kour N, Bornhorst J, AlHarbi K, Rinklebe J, Abd El Moneim D, Ahmad P, Chung YS. Heavy Metal Induced Oxidative Stress Mitigation and ROS Scavenging in Plants. *Plants* 2023;12:3003.

Doi:

- <https://doi.org/10.3390/plants12163003>.
34. Koyama H, Kamogashira T, Yamasoba T. Heavy Metal Exposure: Molecular Pathways, Clinical Implications, and Protective Strategies. *Antioxidants* 2024;13:76. <https://doi.org/10.3390/antiox13010076>.
 35. Carpena M, Pereira CSGP, Silva A, Barciela P, Jorge AOS, Perez-Vazquez A, Pereira AG, Barreira JCM, Oliveira MBPP, Prieto MA. Metabolite Profiling of Macroalgae: Biosynthesis and Beneficial Biological Properties of Active Compounds. *Mar Drugs* 2024;22:478. <https://doi.org/10.3390/md22100478>.
 36. Negreanu-Pirjol B-S, Negreanu-Pirjol T, Popoviciu DR, Anton R-E, Prelipcean A-M. Marine Bioactive Compounds Derived from Macroalgae as New Potential Players in Drug Delivery Systems: A Review. *Pharmaceutics* 2022;14:1781. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14091781>.
 37. Li Y, Ma Z. Antioxidants and Reactive Oxygen Species (ROS) Scavenging Enzymes, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5354-7_10.
 38. Matin M, Koszarska M, Atanasov AG, Król-Szmajda K, Józwik A, Stelmasiak A, Hejna M. Bioactive Potential of Algae and Algae-Derived Compounds: Focus on Anti-Inflammatory, Antimicrobial, and Antioxidant Effects. *Molecules* 2024;29:4695. <https://doi.org/10.3390/molecules29194695>.
 39. Meinita MDN, Harwanto D, Choi J-S. Seaweed Exhibits Therapeutic Properties against Chronic Diseases: An Overview. *Appl Sci* 2022;12:2638. <https://doi.org/10.3390/app12052638>.