



# Chemical Profile of Basal and Apical Sections of Seaweed (*Kappaphycus* sp.) Based on GC-MS Analysis and Their Potential as Aquaculture Feed Additive

(Profil Kimia Bagian Basal dan Apikal Rumput Laut (*Kappaphycus* sp.) Berdasarkan Analisis GC-MS serta Potensinya sebagai Bahan Aditif Pakan Akuakultur)

Marlina Achmad <sup>1,2✉</sup>, Alimuddin <sup>3</sup>, Sukenda <sup>3</sup>, Muhammad Fatratullah Muhsin <sup>4,5</sup> dan Besse Tenri Nurkamilah <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Ilmu Akuakultur, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia.

<sup>2</sup> Jurusan Perikanan, Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, Universitas Hasanuddin, Jln. Perintis Kemerdekaan Km 10, Makassar, 90245, Makassar, Indonesia.

<sup>3</sup> Departemen Budidaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia.

<sup>4</sup> Program Studi Budi Daya Laut dan Pantai, Fakultas Vokasi, Universitas Hasanuddin, Jln. Perintis Kemerdekaan Km 10, Makassar, 90245, Indonesia.

<sup>5</sup> Higher Institution Centers of Excellence (HICoE), Institute of Tropical Aquaculture and Fisheries, Universiti Malaysia Terengganu, Terengganu, Malaysia, 91030.

Email: marlina.achmad@unhas.ac.id

Article Info:

Received : 09 Sept. 2025

Accepted : 29 Okt. 2025

Online : 30 Okt. 2025

Article type :

<input type="checkbox"/>	Review Article
<input type="checkbox"/>	Common Serv. Article
<input checked="" type="checkbox"/>	Research Article

Keyword :

*Kappaphycus* sp., GC-MS, Basal and Apical Sections, Chemical Profile, Bioactive Metabolites, Aquaculture Feed Additives.

Corresponding Author :

Marlina Achmad  
 Universitas Hasanuddin.  
 Makassar, Indonesia

Email :

marlina.achmad@unhas.ac.id



Copyright©2025, Marlina Achmad, Alimuddin, Sukenda, Muhammad Fatratullah Muhsin, Besse Tenri Nurkamilah.

## Abstract

Seaweeds are recognized as valuable biomaterials rich in nutrients and bioactive metabolites with strong potential for application in sustainable aquaculture. This study aimed to characterize and compare the chemical composition of the basal and apical sections of *Kappaphycus* sp., which represent physiologically older and younger tissues, respectively, using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). Both sections contained similar groups of compounds but at notably different concentrations, particularly carbohydrate-derived products, furan-based derivatives, and saturated and unsaturated fatty acids. The basal section was dominated by levoglucosan (22.75%), furfuryl alcohol (10.03%), and lauric acid (7.94), whereas the apical section exhibited higher levels of levoglucosan (40.40%) along with palmitic acid (6.47%). These compositional differences reflect the distinct metabolic functions of mature versus actively growing tissues. The identified metabolites, many of which are known for their nutritional, antioxidant, and antimicrobial properties, indicate substantial potential for incorporation into aquaculture feed additive formulations. These findings provide a biochemical basis for valorising different seaweed section as functional ingredients to support health, growth performance, and sustainability in aquaculture system.

## I. PENDAHULUAN

Rumput laut merupakan salah satu komoditas hayati yang memiliki peran penting

dalam industri pangan, farmasi, kosmetik, dan terutama sektor akuakultur (Lomartire & Goncalves, 2022; Salido *et al.* 2024). Dalam beberapa

dekade terakhir, penelitian global mulai berfokus pada eksplorasi senyawa bioaktif rumput laut karena kemampuannya dalam meningkatkan kesehatan, ketahanan penyakit, serta efisiensi pertumbuhan organisme budidaya (Achmad *et al.* 2025). Salah satu rumput laut yang memiliki nilai ekonomi dan biologis tinggi adalah *Kappaphycus* sp., yang merupakan salah satu sumber utama penghasil karaginan di dunia.

*Kappaphycus* sp. termasuk genus makroalga merah (Rhodophyta) yang banyak dibudidayakan di kawasan Indo-Pasifik, termasuk Indonesia, Filipina, dan Malaysia (Barille *et al.* 2025). Spesies ini dikenal memiliki struktur thallus yang berdaging dengan warna bervariasi dari hijau, coklat, hingga merah keunguan (Gelli *et al.* 2023). Secara anatomi, thallus *Kappaphycus* menunjukkan diferensiasi jaringan antara bagian basal dan apikal. Bagian basal merupakan jaringan yang lebih tua, lebih tebal, dan berperan dalam struktur serta penopang thallus. Sebaliknya, bagian apikal adalah jaringan muda yang aktif tumbuh dan memiliki aktivitas metabolik serta fotosintesis yang lebih tinggi (Charrier *et al.* 2017; Widyartini *et al.* 2021; Daurtseva *et al.* 2024; Roleda & Hurd, 2019). Perbedaan karakter fisiologis ini berpotensi menghasilkan variasi kandungan metabolit pada masing-masing bagian.

Di sektor akuakultur modern, kebutuhan akan pakan berkualitas tinggi semakin meningkat seiring berkembangnya produksi komoditas seperti ikan dan udang (Nunes *et al.* 2022; Haque & Mahmud, 2025). Namun, industri akuakultur masih menghadapi tantangan besar terkait ketergantungan pada bahan baku konvensional, termasuk tepung ikan, minyak ikan, dan *feed additive* sintetis, yang secara ekonomi mahal dan secara ekologis tidak berkelanjutan (Fantatto *et al.* 2024; Satyakumar *et al.* 2024; Li *et al.* 2025; Boyd *et al.* 2020). Oleh karena itu, pencarian sumber bahan alami yang mudah diperoleh, terbarukan, aman, dan efektif sebagai pengganti aditif sintetis telah menjadi fokus penelitian global. Rumput laut muncul sebagai kandidat unggulan karena memiliki metabolit bioaktif yang dapat berfungsi sebagai imunostimulan, antioksidan, antimikroba, dan peningkat efisiensi pakan (Siddik *et al.* 2023; Ghaliaouli *et al.* 2024).

Selain menjadi komoditas utama karaginan, *Kappaphycus* juga menarik secara ilmiah karena kandungan metabolitnya yang kompleks, seperti polisakarida sulfat, gula sederhana, asam lemak, alkohol funarik, dan berbagai senyawa volatil lain yang berpotensi sebagai bioaktif (Nesic *et al.* 2024;

Rath *et al.* 2025; Mandal *et al.* 2025). Senyawa bioaktif pada rumput laut, terutama polisakarida dan turunannya telah dilaporkan oleh Akter *et al.* (2024) berperan dalam meningkatkan repon imun non-spesifik, memperbaiki kesehatan usus, serta mengoptimalkan metabolisme nutrisi pada organisme akuakultur. Selain itu, turunan furan, alkohol, ester, dan asam lemak yang terkandung dalam rumput laut dapat memberikan kontribusi terhadap aktivitas biologis seperti antimikroba, peningkatan toleransi stres, dan peningkatan energi metabolik (Melchor-Martinez *et al.* 2025; Shannon & Abu-Ghannam, 2016). Untuk mengungkap profil kimia secara komprehensif, metode karakterisasi yang sensitive seperti *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) diperlukan karena mampu mendeteksi senyawa volatil dan semi-volatil secara presisi (Zhang *et al.* 2023).

Meskipun berbagai penelitian mengenai *Kappaphycus* telah dilakukan, sebagian besar masih berfokus pada produksi karaginan dan komposisi metabolit secara umum. Hingga saat ini, penelitian yang secara khusus membandingkan profil kimia antara basal dan apikal masih sangat terbatas (Basyuni *et al.* 2024). Padahal, perbedaan fisiologis antara kedua thallus tersebut sangat mungkin menghasilkan variasi metabolit yang penting bagi formulasi aditif pakan. Ketiadaan informasi ini menjadi gap yang perlu dijawab, terutama untuk mendukung pengembangan pakan akuakultur berbasis bahan alami yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkarakterisasi dan membandingkan profil kimia bagian basal dan apikal *Kappaphycus* sp. Menggunakan metode GC-MS. Informasi mengenai diferensiasi metabolit antarbagian thallus diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah dalam pemanfaatan rumput laut sebagai bahan aktif pakan akuakultur, serta mendukung pengembangan formulasi pakan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

## II. METODE PENELITIAN

### 2.1. Lokasi dan Identifikasi Sampel

Sampel yang digunakan adalah *Kappaphycus* sp. yang dikumpulkan dari lokasi budidaya Desa Punaga, Kabupaten Takalar, Sulawesi Selatan. Thallus rumput laut dipisahkan menjadi dua bagian morfologis berdasarkan posisi pertumbuhannya, yaitu bagian basal (jaringan bawah yang lebih tua dan tebal) dan bagian apikal (jaringan atas yang lebih muda dan aktif tumbuh)

(Gambar 1). Setiap bagian diberi kode sampel yang berbeda, kemudian disimpan pada suhu dingin sebelum proses preparasi.

## 2.2. Preparasi Sampel

Setiap sampel dibersihkan dengan air tawar untuk menghilangkan pasir, epifit, dan material asing lainnya, kemudian ditiriskan hingga tidak ada sisa air permukaan. Sampel lalu dikeringkan

pada suhu rendah (40-45 °C) hingga mencapai berat konstan untuk mencegah degradasi senyawa volatil. Setelah kering, sampel digiling menjadi serbuk halus untuk memperoleh homogenat yang seragam, sehingga memudahkan proses ekstraksi senyawa. Serbuk yang dihasilkan disimpan dalam wadah tertutup pada suhu ruang dan terlindungi dari cahaya hingga tahap ekstraksi dilakukan.



Gambar 1. Rumput Laut *Kappapycus* sp. 1. thallus primer (basal); 2. thallus sekunder (apikal).

## 2.3. Ekstraksi Senyawa

Ekstraksi dilakukan menggunakan pelarut aseton sesuai protokol laboratorium. Serbuk sampel ditimbang sebanyak 2 g dan dimasukkan ke dalam wadah ekstraksi, kemudian ditambahkan aseton dengan rasio 1:10 (b/v). Campuran diekstraksi menggunakan metode perendaman atau sinokasi selama 30 menit untuk memaksimalkan pelepasan senyawa volatil dan semi-volatil. Ekstrak kemudian disentrifuge pada 500 rpm selama 10 menit. Supernatan yang diperoleh disaring menggunakan membrane 0,45 µm dan dimasukkan ke vial GC-MS.

## 2.4. Analisis GC-MS

Analisis komposisi kimia dilakukan menggunakan instrumen *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS). Pemisahan senyawa dilakukan pada kolom kapiler non-polar tipe RTX-5Ms (atau setara), dengan helium sebagai gas pembawa pada laju alir 1,0 mL/menit. Sampel diinjek sebanyak 1 µL menggunakan mode injeksi splitless dengan suhu injector 250 °C untuk memastikan volatilitas dan transfer sampel yang optimal. Program suhu oven diatur mulai dari 60 °C dan dipertahankan selama 2 menit, kemudian dinaikkan secara bertahap sebesar 10 °C per menit

hingga mencapai suhu 300 °C, dan ditahap selama 10 menit untuk menyelesaikan pemisahan komponen volatil dan semi-volatil. Deteksi massa dilakukan dengan mencocokkan spektrum massa yang diperoleh dengan database NIST/EPA/NIH. Hasil analisis berupa kromatogram dan daftar puncak kemudian digunakan untuk menentukan komposisi dan kelimpahan relative senyawa yang terdapat pada bagian basal dan apikal *Kappapycus* sp.

## 2.5. Analisis Data

Data GC-MS dianalisis secara deskriptif. Persentase area puncak digunakan sebagai indikator relatif kelimpahan masing-masing senyawa. Profil kimia bagian basal dan apikal dibandingkan untuk mengidentifikasi perbedaan komposisi dan kelompok metabolit dominan. Untuk memastikan konsistensi antarbagian, senyawa dikelompokkan berdasarkan kategori kimia (asam lemak, ester, turunan karbohidrat, senyawa furanik, dan lainnya).

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Identifikasi Senyawa Kimia pada Ekstrak *Kappaphycus* sp.

Analisis GC-MS telah berhasil mengidentifikasi profil senyawa volatil dan semi-volatil pada ekstrak bagian basal dan apikal thallus *Kappaphycus* sp.. Secara umum, kedua bagian thallus menunjukkan kandungan kelompok

senyawa utama yang serupa, meliputi turunan karbohidrat, asam lemak, ester, aldehida, keton, dan lakton. Perbedaan utama terletak pada profil dominasi dan persentase area relatif masing-masing senyawa. Data komposisi kimia dominan, berdasarkan persentase area yang terdeteksi, disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Kimia Dominan pada Ekstrak *Kappaphycus* sp.

Komponen	Basal (%)	Apikal (%)	T(df); p-value
Levoglucosan	22,75 ± 0,76	40,40 ± 0,90	t(4) = -25,96; p < 0,001
Furfuryl Alcohol	10,03 ± 0,25	n.d.	-
Asam Lemak	7,94 ± 0,47	6,67 ± 0,46	t(4) = 3,33; p = 0,029

\*n.d.: tidak terdeteksi; signifikan pada  $\alpha = 0,05$

Secara statistik, terdapat perbedaan signifikan antara kedua bagian thallus pada parameter yang dianalisis. Kandungan levoglucosan pada bagian apikal secara signifikan lebih tinggi dibandingkan pada bagian basal, dengan hasil uji *t* menunjukkan bahwa perbedaan yang sangat nyata ( $t(4) = -25,96$ ;  $p < 0,001$ ). Nilai ini menegaskan bahwa jaringan apikal memiliki aktivitas metabolik yang lebih intensif sehingga menghasilkan atau mengakumulasi levoglucosan dalam jumlah yang lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan karakter fisiologis jaringan apikal rumput laut yang aktif tumbuh, yang membutuhkan cadangan energi lebih besar untuk mendukung proses elongasi dan sintesis dinding sel (Choi *et al.* 2011; Jiang *et al.* 2017).

Selain Levoglucosan, terdapat perbedaan yang mencolok pada kelompok senyawa furanik dan asam lemak. Furfuryl alcohol yang termasuk senyawa furanik, merupakan komponen dominan kedua pada bagian basal (10,03%), tetapi tidak terdeteksi pada bagian apikal. Senyawa furanik umumnya terbentuk dari proses degradasi karbohidrat struktural, terutama pada jaringan yang mengalami proses penuaan (Eldridge & Fam, 2014; Seok *et al.* 2015). Kehadiran Furfuryl alcohol dalam konsentrasi tinggi pada bagian basal mengidentifikasi aktivitas degradasi polisakarida struktural yang lebih intens pada bagian tersebut.

Selanjutnya, profil asam lemak juga bervariasi. Bagian basal memiliki kadar signifikan lebih tinggi dibandingkan bagian apikal, yang dikonfirmasi melalui uji *t* ( $t(4) = 3,33$ ;  $p = 0,029$ ). Perbedaan ini menunjukkan bahwa jaringan basal berfungsi sebagai lokasi penyimpanan energi dalam bentuk lipid. Hal tersebut konsisten dengan laporan Dyll *et al.* (2022) dan Zhang *et al.* (2025), bahwa jaringan dewasa pada makroalga sering

menunjukkan akumulasi lipid yang lebih tinggi sebagai bagian dari proses stabilisasi struktur dan cadangan energi jangka panjang.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa pemisahan thallus menjadi bagian basal dan apikal memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai distribusi metabolit bioaktif dalam *Kappaphycus* sp.. Pola distribusi yang berbeda antar bagian tidak hanya menunjukkan variasi fisiologis, tetapi juga memberikan dasar ilmiah untuk memaksimalkan pemanfaatan bagian tertentu sesuai komponen bioaktif yang dikandungnya.

#### 3.2. Potensi Pemanfaatan sebagai *Feed Additive*

Profil kimia yang ditemukan pada ekstrak *Kappaphycus* sp. Mengidentifikasi potensi kuat pemanfaatannya sebagai komponen bioaktif dalam formulasi feed additive akuakultur. Beberapa senyawa kunci, seperti levoglucosan, furfuryl alcohol, dan berbagai asam lemak, memiliki peran fisiologis maupun fungsional yang relevan untuk mendukung pertumbuhan, kesehatan, serta ketahanan organisme budidaya. Komponen senyawa pada ekstrak *Kappaphycus* sp. dan potensinya dalam akuakultur tersajikan dalam Tabel 2.

Levoglucosan yang ditemukan dalam konsentrasi tinggi pada bagian apikal, berfungsi sebagai sumber energi cepat serta metabolit turunan karbohidrat yang dapat berperan dalam modulasi imunitas non-spesifik. Kandungan levoglucosan yang tinggi pada jaringan muda menunjukkan bahwa bagian apikal dapat dioptimalkan sebagai bahan baku kaya karbohidrat bioaktif. Menurut Choi *et al.* (2011), levoglucosan merupakan produk degradasi polisakarida yang terbentuk melalui ptoses pirolitik atau

depolimerasi parsial selulosa dan galaktan, dan akumulasi senyawa ini sering dikalikan dengan aktivitas sintesis dinding sel pada jaringan muda yang mengalami pertumbuhan cepat. Jiang *et al.* (2017) juga melaporkan bahwa jaringan apikal pada beberapa spesies makroalga memiliki turunan karbohidrat yang lebih tinggi dibandingkan jaringan tua, karena tingginya kebutuhan energi

dan bahan baku struktural untuk pembelahan dan pemanjangan sel. Pada makroalga penghasil karagenan seperti *Kappaphycus* dan *Eucheuma*, aktivitas biosintesis galaktan sulfat yang tinggi di bagian apikal menghasilkan lebih banyak prekursor karbohidrat yang dapat terdegradasi menjadi levoglucosan (Tabacof *et al.* 2024)

Tabel 2. Potensi ekstrak *Kappaphycus* sp. sebagai komponen bioaktif dalam formulasi *feed additive*.

Komponen Senyawa	Senyawa	Peran Potensi dalam Akuakultur
Turunan Karbohidrat	Levoglucosan	Sumber energi, metabolit yang terkait dengan polisakarida yang dapat meningkatkan respon imun non-spesifik dan usus.
Asam Lemak	Lauric acid, Pelmitic acid, Oleic acid	Sumber energi, peningkatan energi metabolik, dan penyusun struktur membran. Asam lemak memiliki aktivitas antimikroba.
Senyawa Furanik	Furfuryl alcohol	Metabolit volatíl yang dapat berkontribusi pada aktivitas biologis seperti antimikroba dan peningkatan toleransi stres.
Lakton	$\gamma$ -Tridecanolactone	Berpotensi sebagai antioksidan atau antimikroba.

Ekstrak *Kappaphycus* sp. diketahui mengandung berbagai komponen bioaktif yang berperan sebagai agen antimikroba dan antioksidan sehingga berpotensi meningkatkan ketahanan organisme budidaya terhadap stres oksidatif maupun infeksi penyakit. Penelitian Bhuyar *et al.* (2021) mengungkapkan bahwa ekstrak *Kappaphycus* sp. efektif menghambat pertumbuhan *Bacillus cereus*, salah satu bakteri patogen penting dalam sistem budidaya. Selain itu, ekstrak *K. alvarezii* memiliki karakteristik prebiotik yang mampu mendukung proliferasi bakteri menguntungkan dalam saluran pencernaan organisme akuakultur, sehingga dapat meningkatkan kesehatan usus dan efisiensi pencernaan (Bajury *et al.* 2017; Situmorang *et al.* 2025). Keberadaan berbagai asam lemak jenuh dan tak jenuh dalam ekstrak tersebut semakin menegaskan perannya sebagai suplemen nutrisi yang dapat meningkatkan fungsi metabolik, respon imun, serta kondisi fisiologis organisme budidaya secara keseluruhan (Bhuyar *et al.*, 2021).

Penelitian oleh Chai *et al.* (2013) menunjukkan bahwa furfuryl alcohol (FA) dan turunan senyawa furan lainnya memiliki aktivitas antimikroba yang kuat. Senyawa-senyawa ini mampu menghambat pertumbuhan bakteri Gram-positif seperti *Bacillus subtilis* dan bakteri Gram-negatif seperti *Salmonella*, dengan nilai MIC (*Minimum Inhibitory Concentration*) sekitar 0,115  $\mu$ M, yang mengindikasikan efektivitasnya

meskipun pada konsentrasi sangat rendah. Aktivitas antimikroba tersebut diduga berkaitan dengan mekanisme kerusakan membran sel, penghambatan enzim metabolik, serta denaturasi protein bakteri. Kemampuan FA dalam memberikan perlindungan terhadap mikroba maupun serangga menunjukkan bahwa senyawa ini memiliki nilai aplikasi yang luas, baik untuk produk berbasis biomassa maupun material terbarukan lainnya. Temuan-temuan ini mendukung pemanfaatan sumber biomassa seperti rumput laut *Kappaphycus* sp., yang menghasilkan senyawa furan melalui proses termal, sebagai alternatif sumber bahan bioaktif bernilai tinggi.

Dalam konteks akuakultur, senyawa lakton memiliki potensi aplikasi yang signifikan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa lakton dapat meningkatkan status antioksidan organisme budidaya dengan cara menetralkan radikal bebas dan menghambat peroksidasi lipid, sehingga membantu menjaga integrasi membran sel (Feng & Wang, 2020). Hal ini penting mengingat stres oksidatif merupakan salah satu pemicu utama terjadinya penurunan performa pertumbuhan dan kerentanan terhadap patogen pada ikan dan krustasea. Selain itu, sifat antimikroba lakton dapat mendukung keseimbangan mikroba usus dengan menghambat bakteri patogen tertentu, sehingga mendukung kesehatan saluran pencernaan dan efisiensi penyerapan nutrisi. Keberadaan  $\gamma$ -tridecanolactone pada ekstrak *Kappaphycus* sp.

Memperluas potensi rumput laut ini sebagai feed additive alami yang bersifat multifungsi. Kombinasi aktivitas antioksidan, antimikroba, dan stabilitas kimia lakton menjadikannya kandidat bioaktif yang relevan untuk meningkatkan kesehatan dan ketahanan organisme budidaya.

Dengan demikian, profil kimia yang diidentifikasi ini memberikan landasan ilmiah bahwa *Kappaphycus* sp. dapat menjadi bahan alami, terbarukan, dan efektif sebagai alternatif bagi aditif sintetis. Namun, evaluasi aktivitas biologis spesifik dari senyawa-senyawa dominan ini (seperti efek imunomodulator atau antimikroba) dalam sistem akuakultur memerlukan penelitian lanjutan, khususnya untuk mengetahui dosis optimal, mekanisme kerja spesifik dalam tubuh organisme, serta sinergi setiap senyawa bioaktif lain yang terdapat dalam *Kappaphycus* sp.

#### IV. PENUTUP

Analisis GC-MS menunjukkan bahwa bagian basal dan apikal *Kappaphycus* sp. memiliki komposisi kimia yang berbeda secara jelas, mencerminkan perbedaan fisiologis antara jaringan tua dan muda. Bagian basal didominasi turunan karbohidrat, senyawa furanik, dan beberapa asam lemak jenuh sedangkan apikal lebih kaya levoglucosan, ester, lakton, dan asam

lemak tidak jenuh. Variasi komposisi ini menegaskan bahwa setiap bagian thallus memiliki potensi biofungsional yang berbeda dan dapat dioptimalkan untuk aplikasi yang lebih spesifik dalam pengembangan bahan tambahan pakan akuakultur.

Temuan ini memberikan dasar ilmiah bahwa *Kappaphycus* sp. Merupakan kandidat kuat sebagai sumber feed additive alami yang tidak hanya menyediakan nutrisi, tetapi juga senyawa bioaktif dengan potensi antimikroba, antioksidan, dan imunomodulator. Pemanfaatan bagian apikal dapat diarahkan sebagai sumber energi dan karbohidrat bioaktif, sedangkan bagian basal berpotensi digunakan untuk formulasi aditif dengan fungsi antimikroba atau penguat ketahanan organisme budidaya.

Untuk memaksimalkan aplikasinya, penelitian lanjutan diperlukan, khususnya uji aktivitas biologis secara *in vivo*, penentuan dosis optimal, sinergi antar senyawa, serta evaluasi performa pertumbuhan dan kesehatan organisme budidaya melalui uji lapangan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi pijakan awal dalam pengembangan pakan akuakultur berbasis biomassa rumput laut yang lebih berkelanjutan, efektif, dan bernilai tambah tinggi.

#### REFERENSI

- Achmad M, Alimuddin A, Sukenda S. 2025. Effect of *Stenotrophomonas maltophilia* bacteria and environmental factor on the thallus of red seaweed *Kappaphycus alvarezii*. *International Journal of Agriculture & Biology*, 34: 340208. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.2356>.
- Akter A, Sobuj MKA, Islam MS, Chakroborty K, Tasnim N, Ayon MH, Hossain MF, Rafiquzzaman SM. 2024. Seaweed polysaccharides: Sources, structure, and biomedical applications with special emphasis on antiviral potentials. *Future Foods*, 10: 100440. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100440>.
- Bajury DM, Rawi MH, Sazali IH, Abdullah A, Sarbini SR. 2017. Prebiotic evaluation of red seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) using in vitro colon model. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 68(7): 821-828. <https://doi.org/10.1080/09637486.2017.1309522>.
- Barille L, Paterson ILR, Oiry S, Aris A, Cook-Cottier EJ, Nurdin N. 2025. Variability of *Kappaphycus alvarezii* cultivation in South-Sulawesi (Indonesia) related to the monsoon shift: Water quality, growth and colour quantification. *Aquaculture Reports*, 40, 102557. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102557>.
- Basyuni M, Puspita M, Rahmania R, Albasri H, Pratama I, Purbani D, Aznawi AA, Mubarq A, Al Mustaniroh SS, Menne F, Rahmila YI, Salmo III SG, Susilowati A, Larekeng SH, Ardli E, Kajita T. 2024. Current biodiversity status, distribution, and prospects of seaweed in Indonesia: A systematic review. *Heliyon*, 10(10): e31073. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31073>.
- Bhuyar, P., Sundararaju, S., Rahim, M.H.A., Unpaprom, Y., Maniam, G.P. and Govindan, N., 2021. Antioxidative study of polysaccharides extracted from red (*Kappaphycus alvarezii*), green (*Kappaphycus striatus*) and brown (*Padina gymnospora*) marine macroalgae/seaweed. *SN Applied Sciences*, 3(4), p.485. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04477-9>.

- Boyd CE, D'Abramo LR, Glencross BD, Huyben DC, Juarez LM, Lockwood GS, McNevin AA, Tacon AGJ, Teletchea F, Tomasso Jr JR, Tucker CS, Valenti WC. 2020. Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(3):578-633. <https://doi.org/10.1111/jwas.12714>.
- Chai WM, Liu X, Hu YH, Feng HL, Jia YL, Guo YJ, Zhou HT, Chen QX. 2013. Antityrosinase and antimicrobial activities of furfuryl alcohol, furfural and furoic acid. *International journal of biological macromolecules*, 57, pp.151-155. <https://doi.org/10.3390/app10176101>.
- Charrier B, Abreu MH, Araujo R, Bruhn A, Coates JC, De Clerck O, Katsaros C, Robaina RR, Wichard T. 2017. Furthering knowledge of seaweed growth and development to facilitate sustainable aquaculture. *New Phytologist*, 216(4): 967-975. <https://doi.org/10.1111/nph.14728>.
- Choi S, Kim M, Kim Y. 2011. Influence of silica on formation of levoglucosan from carbohydrates by pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 90(1): 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.10.009>.
- Daurtseva A, Gorshenina E, Obluchinskaya E. 2024. Comparative study of elements and biochemical components of sterile and fertile brown algae *Ascophyllum nodosum*. *Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities*, 3(3): 47-60. <https://doi.org/10.37614/2949-1185.2024.3.3.005>.
- Dyall SC, Balas L, Bazan NG, Brenna JT, Chiang N, Souza FD, Dalli J, Durand T, Galano J, Lein P, Serhan C, Taha AY. 2022. Polyunsaturated fatty acids and fatty acid-derived lipid mediators: recent advances in the understanding of their biosynthesis, structures, and functions. *Progress in Lipid Research*, 86: 101165. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2022.101165>.
- Eldridge A, Fam A. 2014. Environmental aging effect on tensile properties of GFRP made of furfuryl alcohol bioresin compared to epoxy. *Journal of Composites for Construction*, 18(5): 04014010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000467](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000467).
- Fantatto RR, Mota J, Ligeiro C, Vieira I, Guilgur LG, Santos M, Murta D. 2024. Exploring sustainable alternatives in aquaculture feeding: the role of insects. *Aquaculture Reports*, 37: 102228. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102228>.
- Feng T, Wang J. 2020. Oxidative stress tolerance and antioxidant capacity of lactic acid bacteria as probiotic: a systematic review. *Gut Microbes*, 12(1): 1801944. <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1801944>.
- Gelli VC, de Souza MR, Plastino EM, Yokoya NS. 2023. Temperature as determinant factor on the generation of new strains of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta) cultivated in subtropical water. *Journal of Applied Phycology*, 36(2):1-8. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03108-7>.
- Ghaliaoui N, Hazzit M, Mokrane H. 2024. Seaweeds as a potential source of bioactive compounds. *Research in Biotechnology and Environmental Science*, 3(1): 1-8. <https://doi.org/10.58803/rbes.v3i1.19>.
- Haque MM, Mahmud MN. 2025. Potential role of aquaculture in advancing sustainable development goals (SDGs) in Bangladesh. *Aquaculture Research*, 25(1): 6035730. <https://doi.org/10.1155/are/6035730>.
- Jiang L, Wu N, Zheng A, Wang X, Liu M, Zhao Z, He F, Li H, Feng X. 2017. Effect of glycerol pretreatment on levoglucosan production from corncobs by fast pyrolysis. *Polymers*, 9(11): 599. <https://doi.org/10.3390/polym9110599>.
- Li B, Boukhennou A, Shao J, Miao L, Dua Y, Chen J. 2025. Application status and development prospect of fermented ingredients in aquaculture. *Aquaculture Reports*, 42: 102842. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102842>.
- Lomartire S, Goncalves AMM. 2022. An overview of potential seaweed-derived bioactive compounds for pharmaceutical applications. *Marine Drugs*, 20(2):141. <https://doi.org/10.3390/md20020141>.
- Mandal AK, Parida S, Behera AK, Adhikary SP, Lukatkin AA, Lukatkin AS, Jena M. 2025. Seaweed in the diet as a source of bioactive metabolites and a potential natural immunity booster: A comprehensive review. *Pharmaceuticals*, 18(3): 367. <https://doi.org/10.3390/ph18030367>.
- Melchor-Martinez EM, Reyes AG, Pena-Rodriguez A, Delgado-Cortez IG, Flores-Contreras EA. 2025. Utilization of brown algae and pre-treatment strategies as a source of bioactive nutrients for aquaculture species. *Journal of Applied Phycology*, 37:2121-2146. <https://doi.org/10.1007/s10811-025-03508-x>.
- Nesic A, Meseldzija S, Benavides S, Figueroa FA, Cabrera-Barjas G. 2024. Seaweed as a valuable and sustainable resource for food packaging materials. *Foods*, 13(9): 3212. <https://doi.org/10.3390/foods13193212>.

- Nunes AJP, Dalen LL, Leonardi G, Burri L. 2022. Developing sustainable, cost-effective, and high-performance shrimp feed formulations containing low fish meal levels. *Aquaculture Reports*, 27, 101422. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101422>.
- Rath S, Sahoo SS, Samantaray A, Parhi P, Sahoo CR, Thahoi R. 2025. Commercial importance of seaweeds: an overview. *Bioresource Bioprocess*, 12(1): 119. <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00944>.
- Roleda MY, Hurd CL. 2019. Seaweed nutrient physiology: application of concepts to aquaculture and bioremediation. *Phycologia*, 58(5): 552-562. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1622920>.
- Salido M, Soto M, Seoane S. 2024. Seaweed: Nutritional and gastronomic perspective. A review. *Algal Research*, 77: 103357. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103357>.
- Satyakumar A, Saivenkat C, Varghese T, Mohanta KN. 2024. Marine algae: A sustainable and eco-friendly aqua-feed resource for the replacement of fish meal and fish oil. *Proceedings of the Zoological Society India*, 32(2): 187-197. <https://doi.org/10.59467/PZSI.2024.23.187>.
- Seok Y, Her J, Kim Y, Kim MY, Jeong SY, Kim MK, Lee J, Kim C, Yoon H, Lee K. 2015. Furan in thermally processed foods – a review. *Toxicological Research*, 31(3): 241-253. <http://dx.doi.org/10.5487/TR.2015.31.3.241>.
- Shannon E, Abu-Ghannam N. 2016. Antibacterial derivatives of marine algae: An overview of pharmacological mechanisms and applications. *Marine Drugs*, 14(4): 81. <https://doi.org/10.3390/md14040081>.
- Siddik MAB, Francis P, Rohani MF, Azam MS, Mock TS, Francis DS. 2023. Seaweed and seaweed-based functional metabolites as potential modulators of growth, immune and antioxidant responses, and gut microbiota in fish. *Antioxidants*, 12(12): 2066. <https://doi.org/10.3390/antiox12122066>.
- Situmorang ML, Fadillah AN, Azizy A, Santika G. 2025. Biofloc system with symbiotic supplementation improves *Penaeus vannamei* immunity against AHPND. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 109(1): 213. <https://doi.org/10.1007/s00253-025-13587-y>.
- Tabacof A, Calado V, Jr NP. 2024. The macroalga *Kappaphycus alvarezii* as a potential raw material for fermentation processes within the biorefinery concept: Challenges and perspectives. *Fermentation*, 10(6):283. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060283>.
- Widyartini DS, Smiyarsih S, Paindian TRA, Kholilullah I. 2021. Anatomical structure of *Sargassum polycystum* thallus from Menganti and Karimunjawa Beaches, Central Jawa Indonesia. *Journal of Human University*, 48(10): 265-274.
- Zhang M, Zhao J, Dai X, Li X. 2023. Extraction and analysis of chemical compositions of natural products and plants. *Separations*, 10(12): 598. <https://doi.org/10.3390/separations10120598>.
- Zhang X, Li F, Peng L, Huang W, Du Y, Yang L, Zhou Y. 2025. Integrated multi-omics analysis of metabolome and transcriptome profiles during bovine adipocyte differentiation reveals functional divergence of FADS2 isoforms in lipid metabolism regulation. *BMC Genomics*, 26: 457. <https://doi.org/10.1186/s12864-025-11650-6>.