

**DIVERGENSI NUTRISI ANTARA DUA SPESIES *Sargassum*
(PHAEOPHYCEAE) SIMPATRIK: IMPLIKASI UNTUK APLIKASI
PANGAN FUNGSIONAL TERTARGET**

***NUTRIENT DIVERGENCE BETWEEN TWO SYMPATRIC SARGASSUM
SPECIES: IMPLICATIONS FOR TARGETED FUNCTIONAL FOOD
APPLICATIONS***

Singgih Afifa Putra*, Santia Gardenia Widyaswari

Balai Pengembangan Penjaminan Mutu Pendidikan Vokasi Bidang Kelautan Perikanan Teknologi
Informasi dan Komunikasi (BPPMPV KPTK), Jl. Diklat No 30, Pacellekang, Pattallassang, Gowa,
Sulawesi Selatan 92172, Indonesia.

Korespondensi: singgihafifa@gmail.com

Abstract

*The industrial application of *Sargassum* as a functional food ingredient is often limited by a generalized approach that overlooks interspecies biochemical variations. This study addresses current gap through a comparative nutritional analysis of two sympatric species, *Sargassum ilicifolium* and *S. polycystum*, collected from the Spermonde Archipelago, Indonesia, to establish a basis for precision bioprospecting. Standardized sample preparation was followed by comprehensive chemical profiling conducted in triplicate (n=3). Proximate and mineral analyses adhered to AOAC protocols, while fatty acid and amino acid profiles were determined using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) and Ultra-Performance Liquid Chromatography (UPLC), respectively. Comparative data were statistically validated using Independent Samples t-tests. Results revealed distinct "functional fingerprints" for each species. *S. ilicifolium* exhibited significantly higher mineral content, particularly ash and phosphorus, whereas *S. polycystum* was richer in carbohydrates and crude fiber. A marked divergence was observed in their fatty acid profiles: *S. ilicifolium* was predominantly characterized by palmitic acid, while *S. polycystum* was dominated by myristic acid. Although *S. ilicifolium* had slightly lower total protein, it displayed a superior profile for sports nutrition, with significantly higher concentrations of key branched-chain amino acids (BCAAs), such as leucine. These findings demonstrate that sympatric *Sargassum* species exhibit unique biochemical profiles, supporting a species-specific approach for targeted functional food applications. Specifically, *S. ilicifolium* is suited for mineral supplementation and sports nutrition markets, while *S. polycystum* is better positioned for general food fortification and as a source of specific oleochemicals.*

Keywords: *biochemical divergence, chemical profile, macroalgae, marine-based food, precision bioprospecting.*

I. Pendahuluan

Upaya pemanfaatan makroalga sebagai bahan baku industri pangan fungsional menghadapi tantangan kritis yaitu generalisasi. Seringkali, potensi sebuah genus, seperti *Sargassum*, dianggap sebagai satu entitas tunggal. Padahal, pandangan monolitik ini menghambat inovasi dan optimalisasi pemanfaatan, karena mengabaikan fakta fundamental bahwa keanekaragaman hayati yang sebenarnya terletak pada level spesies. Untuk beralih dari sekadar pemanfaatan menjadi bioprospeksi yang presisi, diperlukan pemahaman mendalam mengenai

bagaimana spesies yang berbeda, meskipun berkerabat dekat, mengekspresikan profil biokimia yang unik (Tulp & Bohlin, 2002).

Secara ekologis, spesies dari genus yang sama yang hidup berdampingan di habitat yang sama (*simpatrik*) merupakan subjek studi yang sangat menarik (Butlin *et al.*, 2008). Tumbuh di bawah tekanan lingkungan yang identik—seperti suhu, salinitas, dan ketersediaan nutrisi—perbedaan signifikan dalam komposisi kimia mereka kemungkinan besar didorong oleh faktor genetik dan strategi fisiologis yang berbeda (Dufour *et al.*, 2015). Variasi intrinsik inilah yang menjadi kunci untuk membuka potensi spesifik dari masing-masing spesies (Biancarosa *et al.*, 2018). Apakah satu spesies lebih efisien dalam mengakumulasi mineral, atau memprioritaskan sintesis jenis asam lemak tertentu? Jawaban atas masalah ini, nantinya dapat menjelaskan implikasi langsung terhadap nilai ekonomis dan fungsionalnya.

Perairan Kepulauan Spermonde, Sulawesi Selatan, Indonesia (Kench & Mann, 2017), menyediakan laboratorium alami yang ideal untuk menginvestigasi fenomena ini. Pada kawasan perairan ini, dua spesies alga cokelat (Phaeophyceae), *Sargassum polycystum* dan *Sargassum ilicifolium*, tumbuh melimpah secara simpatrik (Widyaswari *et al.*, 2024). Karakterisasi komprehensif terhadap profil nutrisi *S. polycystum* telah mengungkap potensinya sebagai bahan pangan fungsional (Widyaswari *et al.*, 2025), pengetahuan ini tidak dapat dan tidak seharusnya diekstrapolasi pada *S. ilicifolium*. Mengasumsikan keduanya memiliki profil nutrisi yang sama adalah sebuah kesalahan yang dapat menyebabkan inefisiensi dalam pengembangan produk. Celah pengetahuan yang fundamental saat ini bukanlah "apakah *Sargassum* bergizi?", melainkan "*Sargassum* yang mana yang paling cocok untuk aplikasi tertentu?"

Oleh karena itu, penelitian ini beranjak dari hipotesis bahwa kedua spesies *Sargassum* yang simpatrik ini akan menunjukkan divergensi yang signifikan dalam profil nutrisinya sebagai cerminan dari strategi adaptasi biokimia yang berbeda. Tujuan dari studi ini adalah untuk melakukan analisis kimia komparatif pertama antara *S. ilicifolium* dan *S. polycystum* dari ekosistem yang sama. Dengan membedah dan membandingkan komposisi proksimat, mineral, asam lemak, dan asam amino keduanya, kami bertujuan untuk membangun "peta jalan nutrisi" yang spesifik untuk masing-masing spesies, sehingga memberikan landasan ilmiah yang kuat untuk pengembangan produk pangan fungsional yang lebih tepat sasaran dan berbasis bukti.

II. Metodologi Penelitian

Bahan dan alat

Penelitian ini merupakan bagian dari proyek yang sama dan dilaksanakan dalam rentang waktu yang sama dengan studi sebelumnya, yaitu dari Maret hingga Agustus 2022. Sampel alga cokelat, *Sargassum ilicifolium*, dikoleksi secara simultan bersamaan dengan *Sargassum polycystum*. Pengambilan sampel

dilakukan dengan teknik *hand-picking random sampling* dari dua lokasi di perairan Kepulauan Spermonde, Makassar, yaitu Pulau Gusung Tallang (5°7'21.2016" LS, 119°28'39.354" BT) dan Pulau Kayangan (5°6'55.0368" LS, 119°23'54.9852" BT) pada kedalaman 1–2 meter di area perairan dangkal yang didominasi substrat pasir dengan sedikit lamun (*seagrass*) dan rata-rata terumbu (*reef flat*). Koleksi sampel dilakukan pada pagi hari (pukul 09:00–12:00 WITA), dengan total biomassa basah sekitar 1–2 kg untuk setiap spesies. Identifikasi spesies didasarkan pada analisis morfologi kunci seperti bentuk talus, warna, dan pola percabangan, dengan merujuk pada literatur taksonomi yang relevan (Verheij & Prud'homme van Reine, 1993).

Prosedur preparasi sampel di laboratorium dijalankan secara seragam untuk semua sampel guna menjamin konsistensi. Sampel yang baru diambil dari perairan segera dicuci menggunakan air keran, disikat dengan sikat halus untuk menghilangkan epifit dan kotoran, lalu dibilas dengan air distilasi. Selanjutnya, sampel dikeringkan dengan paparan sinar matahari langsung pada suhu sekitar 27–32 °C selama kurang lebih 24 jam hingga mencapai tingkat kekeringan yang optimal. Sampel kering kemudian dihaluskan menjadi bubuk menggunakan *mechanical grinder* dan diayak untuk memperoleh partikel berukuran seragam. Bubuk sampel yang telah homogen kemudian dimasukkan ke dalam kantong plastik bersegel (*sealed plastic bags*) untuk segera ditransportasikan dan dianalisis di laboratorium (Widyaswari *et al.*, 2025).

Analisis Komponen Kimia

Untuk memastikan validitas perbandingan, seluruh prosedur analisis kimia yang diterapkan pada *S. ilicifolium* mengikuti metode yang sama persis dengan yang telah digunakan dan divalidasi pada studi untuk *S. polycystum* (Widyaswari *et al.*, 2025). Semua pengujian dilakukan dalam tiga kali ulangan (*triplo*).

- Analisis Proksimat dan Mineral: Analisis proksimat (kadar air, abu, protein, lemak kasar, serat kasar, dan karbohidrat *by difference*) serta analisis mineral (Kalsium, Fosfor, Natrium, Besi) dilakukan di Laboratorium Bioteknologi Terpadu, Fakultas Peternakan, Universitas Hasanuddin (UNHAS), Makassar, dengan mengacu pada metode standar AOAC (Latimer, 2023).
- Analisis Profil Asam Amino dan Asam Lemak: Profil asam amino dianalisis menggunakan *Ultra-Performance Liquid Chromatography* (UPLC), sementara profil asam lemak dianalisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS). Kedua analisis ini dilaksanakan di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT) Universitas Gadjah Mada (UGM), Yogyakarta.

Analisis Data

Data disajikan sebagai nilai rata-rata $\pm$ standar deviasi (*mean* $\pm$ SD) dari tiga ulangan ($n=3$). Uji statistik untuk membandingkan nilai rata-rata setiap parameter

antara kedua spesies dilakukan menggunakan Uji-t sampel independen. Perbedaan dianggap signifikan secara statistik jika nilai probabilitas (p) lebih kecil dari 0.05 ($p < 0.05$). Analisis ini dieksekusi menggunakan bahasa pemrograman Python (versi 3.13) dan perangkat lunak RStudio dengan memanfaatkan *library* SciPy (Virtanen *et al.*, 2020). Secara spesifik, fungsi `ttest_ind_from_stats` dari modul `scipy.stats` digunakan, karena fungsi ini dirancang untuk menghitung Uji-t langsung dari data ringkasan (rata-rata, standar deviasi, dan jumlah sampel) yang tersedia. Data lengkap hasil analisis statistik Uji-t dalam penelitian ini dapat diakses secara daring (terbuka) di repositori Zenodo dengan tautan permanen (DOI) berikut: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17373948>. Visualisasi data dalam bentuk grafik dibuat menggunakan *library* Matplotlib (Hunter, 2007) untuk pembuatan plot, dan Pandas (The pandas development team, 2020) untuk strukturasi data.

III. Hasil dan Pembahasan

Pada umumnya telah dilaporkan bahwa plastisitas fenotipik, yang didorong oleh variasi habitat, merupakan sumber utama keragaman biokimia pada makroalga atau spesies lainnya (Blewett *et al.*, 2022). Namun, dengan menggunakan desain sampling simpatrik yang secara efektif mengontrol variabel lingkungan, penelitian ini berhasil mengisolasi dan membandingkan strategi metabolisme inheren yang diatur oleh karakter masing-masing spesies. Analisis kimia terhadap *Sargassum ilicifolium* dan perbandingannya dengan data *Sargassum polycystum* kemudian mengungkapkan perbedaan profil nutrisi yang signifikan dan spesifik. Temuan ini secara meyakinkan mengkonfirmasi bahwa bahkan spesies yang tumbuh berdampingan sekalipun akan mengembangkan strategi biokimia yang berbeda, sebuah perbedaan yang tidak hanya penting secara ekologis tetapi juga sangat menentukan potensi aplikasi fungsionalnya.

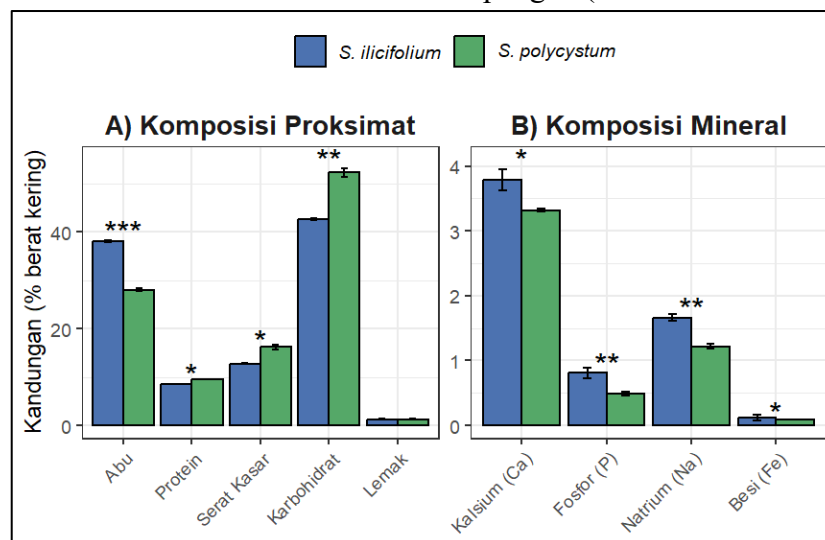
Komposisi Proksimat dan Mineral

Analisis kimia menunjukkan adanya perbedaan fundamental dalam strategi alokasi sumber daya antara kedua spesies, seperti yang divisualisasikan pada Gambar 1. Perbedaan paling signifikan terungkap pada kadar abu, di mana *S. ilicifolium* menunjukkan nilai yang sangat tinggi sebesar $38.07 \pm 0.22\%$, yang secara statistik sangat signifikan lebih tinggi ($p < 0.001$) dibandingkan *S. polycystum* sebesar $28.07 \pm 0.22\%$ (Widyaswari *et al.*, 2025). Kadar abu yang hampir 36% lebih tinggi ini merupakan indikator kuat bahwa *S. ilicifolium* memiliki kapasitas sebagai bio-akumulator mineral yang jauh lebih superior di antara keduanya.

Fenomena ini diperkuat oleh adanya *trade-off* biokimia yang jelas. Sebaliknya, *S. polycystum* tampak lebih efisien dalam sintesis dan penyimpanan polisakarida. Hal ini dibuktikan oleh kandungan karbohidrat ($52.31 \pm 0.85\%$) dan serat kasar ($16.20 \pm 0.52\%$) yang juga secara signifikan lebih tinggi (masing-

masing $p < 0.01$ dan $p < 0.05$) dibandingkan *S. ilicifolium* (masing-masing $42.64 \pm 0.13\%$ dan $12.80 \pm 0.06\%$). Sementara itu, kandungan protein *S. polycystum* tercatat sedikit lebih tinggi secara signifikan ($p < 0.05$) (*S. ilicifolium*: $8.55 \pm 0.04\%$; *S. polycystum*: $9.51 \pm 0.06\%$), dan kandungan lemak tidak menunjukkan perbedaan statistik ($1.30 \pm 0.05\%$). Data ini secara kolektif mengindikasikan bahwa sementara *S. polycystum* lebih fokus pada produksi senyawa organik untuk energi dan struktur, *S. ilicifolium* justru memprioritaskan penyerapan dan penyimpanan senyawa anorganik.

Kapasitas superior *S. ilicifolium* dalam mengakumulasi mineral terkonfirmasi lebih lanjut pada analisis komponen spesifiknya. Spesies ini secara konsisten lebih unggul di semua parameter yang diukur. Kandungan Kalsium (Ca) ($3.79 \pm 0.16\%$) dan Besi (Fe) ($0.12 \pm 0.05\%$) secara signifikan lebih tinggi ($p < 0.05$), sementara kandungan Fosfor (P) ($0.81 \pm 0.08\%$) dan Natrium (Na) ($1.66 \pm 0.05\%$) bahkan sangat signifikan lebih tinggi ($p < 0.01$) dibandingkan *S. polycystum*. Perbedaan kandungan Fosfor yang mencapai 65% ini sangat signifikan secara nutrasetikal. Lebih jauh, rasio Ca:P, yang penting untuk penyerapan nutrisi, juga menunjukkan perbedaan, yaitu sekitar 4.7:1 untuk *S. ilicifolium* dan 6.8:1 untuk *S. polycystum*, yang dapat mempengaruhi bioavailabilitasnya dalam aplikasi pangan (Circuncisão *et al.*, 2018; Afonso *et al.*, 2019). Tren keunggulan ini juga berlanjut pada kandungan Natrium (Na) ($1.66 \pm 0.05\%$ vs $1.22 \pm 0.04\%$) dan Besi (Fe) ($0.12 \pm 0.05\%$ vs $0.09 \pm 0.00\%$). Keunggulan mineral yang konsisten ini, meskipun hidup di kolom air yang sama, menunjukkan adanya mekanisme fisiologis transpor ion yang secara inheren lebih efisien pada *S. ilicifolium*, menjadikannya kandidat utama untuk pengembangan suplemen mineral alami dan bahan fortifikasi pangan (Fithriani & Melanie, 2022).

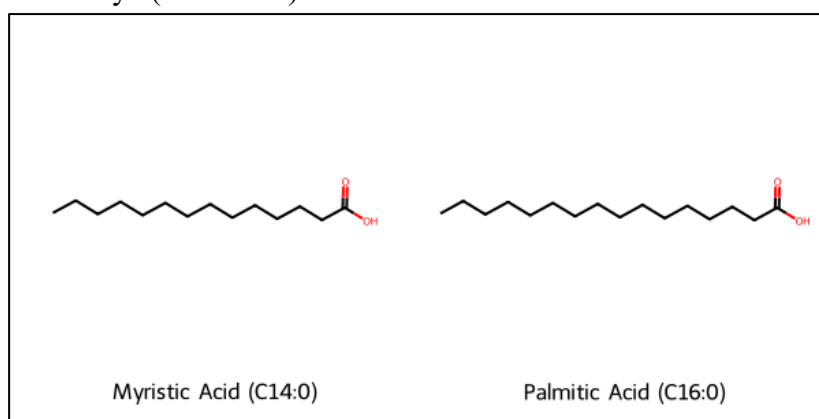


Gambar 1. Perbandingan komposisi kimia antara *Sargassum ilicifolium* dan *S. polycystum*. Grafik disajikan dalam dua panel: (A) Komposisi Proksimat dan (B) Komposisi Mineral. Setiap bar menunjukkan nilai rata-rata (% berat kering) $\pm$ standar deviasi ($n=3$). Tanda bintang menunjukkan perbedaan yang signifikan secara statistik antara kedua spesies, di mana: * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$), dan *** ($p < 0.001$).

Profil Asam Lemak: Divergensi Jalur Biosintesis Lipid

Meskipun kedua spesies *Sargassum* menunjukkan kandungan lemak total yang identik (1.30%), analisis profil asam lemaknya mengungkap adanya divergensi biokimia yang sangat tajam. Hal ini mengindikasikan perbedaan fundamental pada jalur biosintesis lipid antara kedua spesies (Pereira *et al.*, 2012), sebuah temuan dengan implikasi signifikan bagi pemanfaatannya.

Hasil analisis menunjukkan pergeseran dominasi asam lemak jenuh yang jelas (Tabel 1). Pada *S. polycystum*, profilnya didominasi oleh Asam Miristat (C14:0), yang mencakup 50,11% dari total asam lemak (Widyaswari *et al.*, 2025). Sebaliknya, pada *S. ilicifolium*, terjadi peralihan dominasi ke asam lemak dengan rantai karbon yang lebih panjang, yaitu Asam Palmitat (C16:0), yang mencapai konsentrasi luar biasa sebesar 59,85%. Perbedaan dominasi pada kedua asam lemak kunci ini terbukti sangat signifikan sekali secara statistik ($p < 0.001$). Perbedaan struktural antara kedua molekul ini, meskipun hanya selisih dua atom karbon pada rantai alifatiknya, sangat menentukan sifat fisikokimia dan potensi aplikasi industrinya (Gambar 2).



Gambar 2. Perbandingan struktur kimia Asam Miristat (C14:0), dominan pada *S. polycystum*, dan Asam Palmitat (C16:0), dominan pada *S. ilicifolium* (Sumber: library RDKit).

Perbedaan yang sangat spesifik ini mengarah pada hipotesis bahwa kompleks enzim *Fatty Acid Synthase* (FAS) pada kedua spesies memiliki efisiensi atau mekanisme terminasi yang berbeda (Dufour *et al.*, 2015). Sistem FAS pada *S. polycystum* tampaknya cenderung mengakhiri proses elongasi pada rantai C14, sementara pada *S. ilicifolium*, proses tersebut berlanjut satu siklus lagi untuk menghasilkan rantai C16 sebagai produk mayoritas (Gambar 2). Fenomena ini adalah bukti kuat adanya diferensiasi fungsional pada level metabolisme dasar sebagai hasil dari evolusi spesifik per spesies (Sohrabipour, 2019).

Implikasi praktis dari temuan ini sangat signifikan. Hal ini memungkinkan kita untuk beralih dari pendekatan generalis menjadi bioprospeksi presisi. Industri yang memerlukan asam miristat sebagai bahan baku surfaktan atau kosmetik (de Luca *et al.*, 2021) dapat secara spesifik menargetkan pemanenan atau budidaya

jenis *S. polycystum*. Sementara itu, makroalga jenis *S. ilicifolium* dapat diposisikan sebagai sumber daya hayati laut alternatif yang sangat potensial untuk asam palmitat, yang memiliki aplikasi luas dalam industri pangan dan oleokimia (Masri *et al.*, 2018; Sohrabipour, 2019). Dengan demikian, pemahaman pada level spesies ini tidak hanya memperkaya pengetahuan ilmiah tetapi juga membuka jalan bagi pemanfaatan sumber daya alga yang lebih cerdas, efisien, dan bernilai tambah tinggi.

Tabel 1. Perbandingan komposisi asam lemak (% dari total asam lemak) antara *Sargassum ilicifolium* (penelitian ini) dan *S. polycystum* (Widyaswari *et al.*, 2025)

No	Asam Lemak	Formula Kimia	Kategori	<i>S. polycystum</i> (% total)	<i>S. ilicifolium</i> (% total)
1	Butirat	C ₄ H ₈ O ₂	SFA	0.25 ± 0.05	0.19 ± 0.02 ^{ns}
2	Heksanoat	C ₆ H ₁₂ O ₂	SFA	0.38 ± 0.07	0.41 ± 0.04 ^{ns}
3	Oktanoat	C ₈ H ₁₆ O ₂	SFA	1.81 ± 0.12	0.26 ± 0.03***
4	Dekanoat	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	SFA	0.66 ± 0.10	0.35 ± 0.04*
5	Undekanoat	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	SFA	12.78 ± 0.95	0.26 ± 0.03***
6	Laurat	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	SFA	0.50 ± 0.08	1.52 ± 0.15**
7	Tridekanoat	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	SFA	0.98 ± 0.06	0.37 ± 0.04**
8	Miristat	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	SFA	50.11 ± 1.20	15.53 ± 1.55***
9	Miristoleat	C ₁₄ H ₂₆ O ₂	MUFA	7.79 ± 0.35	0.66 ± 0.07***
10	Pentadekanoat	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	SFA	1.03 ± 0.07	0.35 ± 0.04***
11	Palmitat	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	SFA	4.36 ± 0.15	59.85 ± 5.99***
12	Palmitoleat	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	MUFA	13.00 ± 0.30	3.68 ± 0.37***
13	Heptadekanoat	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	SFA	2.34 ± 0.14	0.56 ± 0.06***
14	Stearat	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	SFA	1.87 ± 0.09	3.03 ± 0.30*
15	Linoleat	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	PUFA	1.11 ± 0.12	1.11 ± 0.11 ^{ns}
16	Arakidat	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	SFA	0.78 ± 0.07	0.78 ± 0.08 ^{ns}
17	Erukat	C ₂₂ H ₄₂ O ₂	MUFA	1.48 ± 0.11	1.48 ± 0.15 ^{ns}
18	Oleat	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	MUFA	7.68 ± 0.18	-
19	Asam Cis-10-Pentadekenoat	C ₁₅ H ₂₈ O ₂	MUFA	0.94 ± 0.09	-
20	Asam Cis-10-Heptadekenoat	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	MUFA	1.21 ± 0.11	-

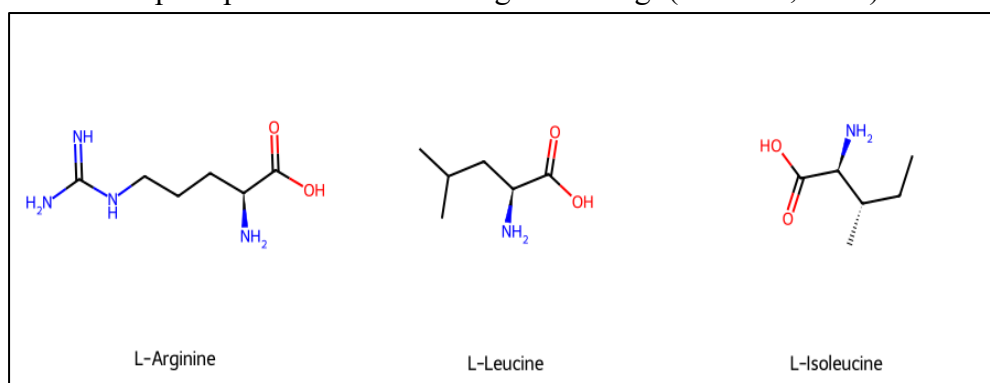
Keterangan: SFA: Asam Lemak Jenuh (*Saturated Fatty Acid*), MUFA: Asam Lemak Tak Jenuh Tunggal (*Monounsaturated Fatty Acid*), PUFA: Asam Lemak Tak Jenuh Ganda (*Polyunsaturated Fatty Acid*). Tanda (-) menunjukkan data tidak terdeteksi (atau kecil sekali) pada spesies tersebut. simbol *** : Perbedaan sangat signifikan sekali ($p < 0.001$), ** : Perbedaan sangat signifikan ($p < 0.01$), * : Perbedaan signifikan ($p < 0.05$), ^{ns} : Perbedaan tidak signifikan (*not significant*, $p > 0.05$).

Profil Asam Amino: Kualitas Protein Serupa, Potensi Aplikasi Berbeda

Seperti halnya analisis asam lemak, nilai "protein total" hanya memberikan gambaran umum. Kekuatan nutrisi sebuah protein justru terletak pada komposisi dan proporsi asam amino penyusunnya (Gorissen *et al.*, 2018). Analisis pada kedua spesies *Sargassum* menunjukkan bahwa meskipun kuantitas protein totalnya hanya berbeda tipis secara statistik (9,51% pada *S. polycystum* vs 8,55% pada *S. ilicifolium*), profil asam aminonya—"kualitas" proteinnya—mengungkapkan potensi fungsional yang berbeda dan sangat spesifik.

Secara kualitatif, profil kedua spesies menunjukkan kemiripan yang positif (Tabel 2). Keduanya sama-sama kaya akan tiga asam amino yang sangat bermanfaat: Arginin, dan dua Asam Amino Rantai Cabang (BCAA), Leusin dan Isoleusin (Gambar 3). L-Arginin merupakan asam amino semi-esensial yang berperan sebagai prekursor biosintesis Nitrat Oksida (NO) (Wu *et al.*, 2021). NO adalah molekul sinyal vital yang mengatur pelebaran pembuluh darah (vasodilatasi), sehingga meningkatkan aliran darah dan suplai oksigen ke jaringan (Helms *et al.*, 2018). Kandungan arginin yang tinggi pada kedua spesies merupakan nilai tambah untuk aplikasi kesehatan kardiovaskular dan imunitas secara umum.

L-Leusin dan L-Isoleusin, keduanya adalah Asam Amino BCAA esensial. Keunikan BCAA adalah kemampuannya untuk dimetabolisme langsung di jaringan otot, bukan di hati (Mann *et al.*, 2021). Leusin, khususnya, dikenal sebagai pemicu utama sintesis protein otot (*Muscle Protein Synthesis* - MPS), menjadikannya asam amino paling anabolik (Duan *et al.*, 2016). Isoleusin juga berkontribusi pada perbaikan otot dan regulasi energi (Gu *et al.*, 2019).



Gambar 3. Struktur kimia dari asam amino fungsional kunci yang diidentifikasi dalam penelitian ini: Arginin, dan dua Asam Amino Rantai Cabang (BCAA) esensial, Leusin dan Isoleusin (Sumber: *library* RDKit).

Lebih lanjut, meskipun memiliki kandungan protein total yang hanya berbeda tipis, *S. ilicifolium* menunjukkan konsentrasi BCAA yang secara substansial lebih tinggi. Kandungan Leusin ($2.97 \pm 0.30\%$) dan Isoleusin ($2.38 \pm 0.24\%$) tercatat sangat signifikan lebih tinggi ($p < 0.01$) dibandingkan pada *S.*

polycystum (masing-masing $1.53 \pm 0.09\%$ dan $1.22 \pm 0.08\%$). Ini menciptakan sebuah "paradoks" yang terbukti secara statistik: secara kuantitas, protein total mungkin sebanding, namun secara kualitas fungsional untuk aplikasi anabolik, protein dari *S. ilicifolium* jauh lebih poten. Artinya, untuk mendapatkan jumlah leusin yang sama, dibutuhkan massa protein *S. polycystum* yang jauh lebih banyak.

Perbedaan profil ini memungkinkan segmentasi pasar yang jelas dan berbasis ilmiah. *Sargassum polycystum*, dengan kandungan protein total yang solid dan arginin yang tinggi, cocok sebagai bahan fortifikasi pangan umum untuk meningkatkan nilai gizi dan mendukung kesehatan populasi umum (Ward & Deyab, 2021). Di sisi lain, *Sargassum ilicifolium*, dengan konsentrasi BCAA yang superior, merupakan kandidat premium untuk pasar nutrisi olahraga dan gaya hidup aktif (Xu *et al.*, 2025). Potensinya sangat besar untuk dijadikan bahan baku dalam produk bernilai tinggi seperti bubuk protein dan minuman pemulihan yang menargetkan pembentukan serta perbaikan massa otot.

Hasil analisis pada level asam amino membuktikan sekali lagi bahwa karakterisasi spesifik per spesies adalah kunci. Ini memungkinkan kita untuk mengidentifikasi dan mengoptimalkan potensi unik yang tersembunyi di dalam keanekaragaman hayati laut, mengarahkan setiap sumber daya ke jalur aplikasi yang paling sesuai dan bernilai

Tabel 2. Perbandingan komposisi asam amino (% berat kering) antara *Sargassum ilicifolium* (penelitian ini) dan *S. Polycystum* (Widyaswari *et al.*, 2025).

No	Asam Amino	Formula Kimia	Kategori	<i>S. polycystum</i>	<i>S. ilicifolium</i>
1	Arginin	$C_6H_{14}N_4O_2$	NEAA	4.47 ± 0.25	3.92 ± 0.39^{ns}
2	Histidin	$C_6H_9N_3O_2$	EAA	0.76 ± 0.10	$0.11 \pm 0.01^{**}$
3	Lisin	$C_6H_{14}N_2O_2$	EAA	0.14 ± 0.05	$0.02 \pm 0.00^*$
4	Fenilalanin	$C_9H_{11}NO_2$	EAA	0.15 ± 0.07	$0.02 \pm 0.00^*$
5	Isoleusin	$C_6H_{13}NO_2$	EAA, BCAA	1.22 ± 0.08	$2.38 \pm 0.24^{**}$
6	Leusin	$C_6H_{13}NO_2$	EAA, BCAA	1.53 ± 0.09	$2.97 \pm 0.30^{**}$
7	Tirosin	$C_9H_{11}NO_3$	NEAA	0.14 ± 0.06	$0.02 \pm 0.00^*$
8	Metionin	$C_5H_{11}NO_2S$	EAA	0.53 ± 0.11	$0.09 \pm 0.01^{**}$
9	Valin	$C_5H_{11}NO_2$	EAA, BCAA	0.92 ± 0.07	$0.14 \pm 0.01^{***}$
10	Prolin	$C_5H_9NO_2$	NEAA	0.14 ± 0.04	$0.01 \pm 0.00^{**}$
11	Asam Glutamat	$C_5H_9NO_4$	NEAA	0.22 ± 0.06	-
12	Asam Aspartat	$C_4H_7NO_4$	NEAA	0.35 ± 0.08	$0.04 \pm 0.00^{**}$
13	Sistein	$C_3H_7NO_2S$	NEAA	0.23 ± 0.09	0.11 ± 0.01^{ns}
14	Treonin	$C_4H_9NO_3$	EAA	0.11 ± 0.05	$0.01 \pm 0.00^*$
15	Serin	$C_3H_7NO_3$	NEAA	-	-

No	Asam Amino	Formula Kimia	Kategori	<i>S. polycystum</i>	<i>S. ilicifolium</i>
16	Alanin	C ₃ H ₇ NO ₂	NEAA	-	-
17	Glisin	C ₂ H ₅ NO ₂	NEAA	-	-
18	Triptofan	C ₁₁ H ₁₂ N ₂ O ₂	EAA	0.18 ± 0.07	0.02 ± 0.00*
19	Glutamin	C ₅ H ₁₀ N ₂ O ₃	NEAA	-	-
20	Sistin	C ₆ H ₁₂ N ₂ O ₄ S ₂	NEAA	0.01 ± 0.01	0.00 ± 0.00 ^{ns}
21	Asparagin	C ₄ H ₈ N ₂ O ₃	NEAA	-	-

Keterangan: EAA: Asam Amino Esensial (*Essential Amino Acid*), NEAA: Asam Amino Non-Esensial (*Non-Essential Amino Acid*), BCAA: Asam Amino Rantai Cabang (*Branched-Chain Amino Acid*). Tanda (-) menunjukkan data tidak terdeteksi (atau kecil sekali) pada spesies tersebut. Simbol *** : Perbedaan sangat signifikan sekali ($p < 0.001$), ** : Perbedaan sangat signifikan ($p < 0.01$), * : Perbedaan signifikan ($p < 0.05$), ^{ns} : Perbedaan tidak signifikan (*not significant*, $p > 0.05$).

Batasan penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Pertama, jumlah ulangan yang digunakan relatif kecil ($n=3$), yang mungkin belum sepenuhnya menangkap variabilitas biokimia alami dalam populasi. Meskipun demikian, tingkat signifikansi statistik yang sangat tinggi pada perbedaan antarspesies memberikan keyakinan bahwa temuan utama dalam studi ini bersifat robust. Kedua, fokus penelitian ini adalah pada profil nutrisi makro (proksimat, mineral, asam lemak, dan asam amino) dan belum mencakup analisis komponen lain yang krusial untuk aplikasi pangan. Kandungan senyawa anti-nutrisi seperti florotanin (yang dapat mempengaruhi rasa dan bioavailabilitas protein), potensi akumulasi logam berat (terkait keamanan pangan), serta kadar iodin yang umumnya tinggi pada alga cokelat, belum dievaluasi. Oleh karena itu, investigasi lebih lanjut mengenai aspek-aspek keamanan dan fungsionalitas tambahan ini merupakan langkah esensial berikutnya sebelum merekomendasikan pemanfaatan kedua spesies *Sargassum* ini secara luas sebagai bahan baku pangan fungsional.

IV. Kesimpulan

Dengan mengontrol variabel lingkungan melalui desain sampling simpatrik, penelitian ini secara konklusif membuktikan bahwa *S. ilicifolium* dan *S. polycystum* mengekspresikan profil biokimia yang sangat berbeda dan spesifik. Makroalga jenis *S. ilicifolium* menunjukkan keunggulan sebagai bio-akumulator mineral yang superior dan sumber BCAA yang lebih poten, sementara *S. polycystum* memiliki profil yang lebih kaya akan karbohidrat, serat kasar, dan didominasi oleh asam miristat sebagai asam lemak utamanya. Divergensi yang tajam ini secara fundamental memvalidasi pendekatan bioprospeksi presisi, yang menolak pandangan generalis terhadap genus *Sargassum*. Temuan ini memberikan landasan ilmiah untuk mengarahkan pemanfaatan *S. ilicifolium* bagi

pasar nutrisi olahraga dan suplemen mineral, seraya memposisikan *S. polycystum* sebagai bahan fungsional yang ideal untuk fortifikasi pangan umum dan sebagai sumber oleokimia spesifik.

Ucapan Terima Kasih

Author kedua mengucapkan terimakasih kepada Prof. Metusalach, Kasmiati, dan Nursinah Amir (Universitas Hasanuddin) dalam rangka supervisi dan arahan selama SGW melakukan penelitian di Universitas Hasanuddin. Pelaksanaan penelitian ini tidak menggunakan sumber dana dari sponsor pihak manapun.

Daftar Pustaka

- Afonso NC, Catarino MD, Silva AMS & Cardoso SM. 2019. Brown Macroalgae as Valuable Food Ingredients. *Antioxidants*, 8(9): 365.
- Biancarosa I, Belghit I, Bruckner CG, Liland NS, Waagbø R, Amlund H, Heesch S & Lock E. 2018. Chemical characterization of 21 species of marine macroalgae common in Norwegian waters: benefits of and limitations to their potential use in food and feed. *J. Sci. Food Agric.*, 98(5): 2035–2042.
- Blewett TA, Binning SA, Weinrauch AM, Ivy CM, Rossi GS, Borowiec BG, Lau GY, Overduin SL, Aragao I & Norin T. 2022. Physiological and behavioural strategies of aquatic animals living in fluctuating environments. *J. Exp. Biol.*, 225(9):.
- Butlin RK, Galindo J & Grahame JW. 2008. Sympatric, parapatric or allopatric: the most important way to classify speciation? *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, 363(1506): 2997–3007.
- Circuncisão AR, Catarino MD, Cardoso SM & Silva AMS. 2018. Minerals from Macroalgae Origin: Health Benefits and Risks for Consumers. *Mar. Drugs*, 16(11): 400.
- de Luca M, Pappalardo I, Limongi AR, Viviano E, Radice RP, Todisco S, Martelli G, Infantino V & Vassallo A. 2021. Lipids from Microalgae for Cosmetic Applications. *Cosmetics*, 8(2): 52.
- Duan Y, Li F, Li Y, Tang Y, Kong X, Feng Z, Anthony TG, Watford M, Hou Y, Wu G & Yin Y. 2016. The role of leucine and its metabolites in protein and energy metabolism. *Amino Acids*, 48(1): 41–51.
- Dufour CMS, Meynard C, Watson J, Rioux C, Benhamou S, Perez J, du Plessis JJ, Avenant N, Pillay N & Ganem G. 2015. Space Use Variation in Co-Occurring Sister Species: Response to Environmental Variation or Competition? *PLoS One*, 10(2): e0117750.
- Fithriani D & Melanie S. 2022. Vitamin and mineral content of microalgae *Phorpyridium* and *Chlorella* and development prospects for food raw materials in Indonesia. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 1034(1): 012043.
- Gorissen SHM, Crombag JJR, Senden JMG, Waterval WAH, Bierau J, Verdijk LB & van Loon LJC. 2018. Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates. *Amino Acids*, 50(12):

- 1685–1695.
- Gu C, Mao X, Chen D, Yu B & Yang Q. 2019. Isoleucine Plays an Important Role for Maintaining Immune Function. *Curr. Protein Pept. Sci.*, 20(7): 644–651.
- Helms CC, Gladwin MT & Kim-Shapiro DB. 2018. Erythrocytes and Vascular Function: Oxygen and Nitric Oxide. *Front. Physiol.*, 9.
- Hunter JD. 2007. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Comput. Sci. Eng.*, 9(3): 90–95.
- Kench PS & Mann T. 2017. Reef Island Evolution and Dynamics: Insights from the Indian and Pacific Oceans and Perspectives for the Spermonde Archipelago. *Front. Mar. Sci.*, 4.
- Latimer GW (Ed). 2023. Official Methods of Analysis. In *Official Methods of Analysis of AOAC International*. New York: Oxford University Press.
- Mann G, Mora S, Madu G & Adegoke OAJ. 2021. Branched-chain Amino Acids: Catabolism in Skeletal Muscle and Implications for Muscle and Whole-body Metabolism. *Front. Physiol.*, 12.
- Masri MA, Jurkowski W, Shaigani P, Haack M, Mehlmer N & Brück T. 2018. A waste-free, microbial oil centered cyclic bio-refinery approach based on flexible macroalgae biomass. *Appl. Energy*, 224 1–12.
- Pereira H, Barreira L, Figueiredo F, Custódio L, Vizetto-Duarte C, Polo C, Rešek E, Engelen A & Varela J. 2012. Polyunsaturated Fatty Acids of Marine Macroalgae: Potential for Nutritional and Pharmaceutical Applications. *Mar. Drugs*, 10(9): 1920–1935.
- Sohrabipour J. 2019. Fatty Acids Composition of Marine Macroalgae (Review). *J. Phycol. Res.*, 3(2): 348–374.
- The pandas development team. 2020. pandas-dev/pandas: Pandas (v1.0.0).
- Tulp M & Bohlin L. 2002. Functional versus chemical diversity: is biodiversity important for drug discovery? *Trends Pharmacol. Sci.*, 23(5): 225–231.
- Verheij E & Prud'homme van Reine WF. 1993. Seaweeds of the Spermonde Archipelago, SW Sulawesi, Indonesia. *Blumea - Biodiversity, Evol. Biogeogr. Plants*, 37(2): 385–510.
- Virtanen P, Gommers R, Oliphant TE, Haberland M, Reddy T, Cournapeau D, Burovski E, Peterson P, Weckesser W, Bright J, van der Walt SJ, Brett M, Wilson J, Millman KJ, Mayorov N, Nelson ARJ, Jones E, Kern R, Larson E, Carey CJ, Polat İ, Feng Y, Moore EW, VanderPlas J, Laxalde D, Perktold J, Cimrman R, Henriksen I, Quintero EA, Harris CR, Archibald AM, Ribeiro AH, Pedregosa F, van Mulbregt P, Vijaykumar A, Bardelli A Pietro, Rothberg A, Hilboll A, Kloeckner A, Scopatz A, Lee A, Rokem A, Woods CN, Fulton C, Masson C, Häggström C, Fitzgerald C, Nicholson DA, Hagen DR, Pasechnik D V., Olivetti E, Martin E, Wieser E, Silva F, Lenders F, Wilhelm F, Young G, Price GA, Ingold G-L, Allen GE, Lee GR, Audren H, Probst I, Dietrich JP, Silterra J, Webber JT, Slavič J, Nothman J, Buchner J,

- Kulick J, Schönberger JL, de Miranda Cardoso JV, Reimer J, Harrington J, Rodríguez JLC, Nunez-Iglesias J, Kuczynski J, Tritz K, Thoma M, Newville M, Kümmerer M, Bolingbroke M, Tartre M, Pak M, Smith NJ, Nowaczyk N, Shebanov N, Pavlyk O, Brodtkorb PA, Lee P, McGibbon RT, Feldbauer R, Lewis S, Tygier S, Sievert S, Vigna S, Peterson S, More S, Pudlik T, Oshima T, Pingel TJ, Robitaille TP, Spura T, Jones TR, Cera T, Leslie T, Zito T, Krauss T, Upadhyay U, Halchenko YO & Vázquez-Baeza Y. 2020. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nat. Methods*, 17(3): 261–272.
- Ward FM & Deyab MA. 2021. Comparative Study of Nutritional Importance of Some Marine Macroalgae as a Novel Natural Source of Amino Acids. *Russ. J. Mar. Biol.*, 47(1): 39–46.
- Widyaswari SG, Metusalach, Kasmianti & Amir N. 2024. Bioactive compounds and DPPH antioxidant activity of underutilized macroalgae (*Sargassum* spp.) from coastal water of Makassar, Indonesia. *Biodiversitas J. Biol. Divers.*, 25(1): 162–168.
- Widyaswari SG, Metusalach M, Kasmianti K & Amir N. 2025. Nutritional Composition of *Sargassum polycystum* C. Agardh 1824 from the Spermonde Archipelago, South Sulawesi, Indonesia. *Thalass. An Int. J. Mar. Sci.*, 41(1): 51.
- Wu G, Meininger CJ, McNeal CJ, Bazer FW & Rhoads JM. 2021. Role of L-Arginine in Nitric Oxide Synthesis and Health in Humans. In Wu G (ed) *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol 1332. Cham: Springer, pp. 167–187.
- Xu M, Hu D, Liu X, Li Z & Lu L. 2025. Branched-Chain Amino Acids and Inflammation Management in Endurance Sports: Molecular Mechanisms and Practical Implications. *Nutrients*, 17(8): 1335.