

Effects of pH and Temperature on the Profile of Bioactive Compounds in Seaweed: A Marine Chemistry Perspective

Pengaruh pH dan Suhu terhadap Profil Senyawa Bioaktif Rumput Laut: Analisis dalam Perspektif Kimia Kelautan

Sitti Nurintan¹, Nudia Tuljannah², Riskayanti³

¹Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

^{2,3}Institut Teknologi dan Kesehatan Permata Ilmu Maros, Maros, Indonesia

Article Info

Corresponding Author:

Nudia Tuljannah

✉ nudiatuljannah@itkpi.ac.id

History:

Submitted: 10-06-2025

Revised: 23-06-2025

Accepted: 27-06-2025

Published: 30-06-2025

Keywords:

Marine chemistry; pH; seaweed; bioactive compounds; temperature.

Kata Kunci:

Kimia kelautan; pH; rumput laut; senyawa bioaktif; suhu.

Abstract

The red seaweed *Eucheuma cottonii* is a coastal biological resource rich in bioactive compounds such as phenolics, antioxidants, and soluble polysaccharides (carrageenan), which hold potential for applications in the food, pharmaceutical, and cosmetic industries. Optimization of extraction conditions is essential to maximize the utilization of these compounds. This study aims to examine the effects of temperature and pH on total phenolic content, antioxidant activity (DPPH), and soluble polysaccharides in *E. cottonii* collected from Takalar, South Sulawesi. A factorial 3×3 laboratory experimental design was applied, involving variations in temperature (40°C, 60°C, 80°C) and pH (4, 7, 9). Analyses included total phenolic content using the Folin-Ciocalteu reagent, antioxidant activity through the DPPH method, and soluble polysaccharide content using gravimetric methods. The results showed that 60°C and pH 7 yielded the highest values for all three parameters: total phenolics 28.3 ± 1.4 mg GAE/g, antioxidant activity $65.4 \pm 2.1\%$ inhibition, and soluble polysaccharides $23.7 \pm 1.1\%$. ANOVA indicated a significant interaction effect ($p < 0.05$) between temperature and pH on all measured parameters. It is concluded that the combination of 60°C and neutral pH is the optimal condition for extracting bioactive compounds from *E. cottonii*, and can serve as a reference for developing sustainable natural products based on red seaweed.

Abstrak

[Rumput laut merah (*Eucheuma cottonii*) merupakan salah satu sumber hayati pesisir yang kaya akan senyawa bioaktif seperti fenolat, antioksidan, dan polisakarida larut (karagenan) yang berpotensi digunakan dalam industri pangan, farmasi, dan kosmetik. Optimalisasi kondisi ekstraksi diperlukan untuk memaksimalkan pemanfaatan senyawa-senyawa tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu dan pH terhadap kandungan total fenolik, aktivitas antioksidan (DPPH), dan polisakarida larut dari *E. cottonii* asal Takalar, Sulawesi Selatan. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan rancangan faktorial 3×3 yang melibatkan variasi suhu (40°C, 60°C, 80°C) dan pH (4, 7, 9). Analisis meliputi penentuan total fenolik menggunakan reagen Folin Ciocalteu, aktivitas antioksidan dengan metode DPPH, serta kandungan polisakarida larut dengan metode gravimetri. Hasil menunjukkan bahwa suhu 60°C dan pH 7 memberikan nilai tertinggi pada ketiga parameter: total fenolik $28,3 \pm 1,4$ mg GAE/g, aktivitas antioksidan $65,4 \pm 2,1\%$ inhibisi, dan polisakarida larut $23,7 \pm 1,1\%$. Uji ANOVA

menunjukkan pengaruh signifikan ($p < 0,05$) dari interaksi suhu dan pH terhadap semua parameter. Simpulan penelitian ini adalah bahwa kombinasi suhu 60°C dan pH netral merupakan kondisi optimum dalam mengekstraksi senyawa bioaktif *E. cottonii*, sehingga dapat dijadikan acuan dalam pengembangan produk alami berbasis rumput laut merah yang berkelanjutan.

PENDAHULUAN

Rumput laut merupakan salah satu komoditas unggulan sektor perikanan budidaya di Indonesia, terutama di wilayah pesisir yang kaya akan sumber daya laut tropis (Dolorosa, Nurjanah, Purwaningsih, Anwar, & Hidayat, 2017). Dari sekian banyak daerah penghasil rumput laut, Sulawesi Selatan khususnya pesisir Takalar, Pangkep, Bantaeng, dan Selayar menjadi salah satu sentra produksi utama nasional, dengan kontribusi signifikan terhadap volume ekspor maupun pasokan industri pengolahan domestik. Tingginya produksi ini menjadikan daerah tersebut tidak hanya penting secara ekonomi, tetapi juga strategis sebagai lokasi penelitian dan pengembangan komoditas berbasis hayati laut.

Rumput laut dari wilayah ini, seperti *Eucheuma cottonii* dan *Gracilaria sp.*, tidak hanya dimanfaatkan sebagai bahan baku karagenan dan agar-agar, tetapi juga menjadi sumber senyawa bioaktif yang potensial, seperti fenolik, karotenoid, phlorotannin, dan polisakarida sulfat. Senyawa-senyawa tersebut diketahui memiliki aktivitas antioksidan, antimikroba, dan antiinflamasi yang tinggi, sehingga membuka peluang pemanfaatan dalam industri pangan fungsional, kosmetik, dan farmasi (Sofiana, Safitri, Warsidah, Helena, & Nurdiansyah, 2021) Potensi ini semakin penting mengingat tren global yang mengarah pada pemanfaatan sumber daya alam hayati yang ramah lingkungan dan berkelanjutan sebagai bahan baku produk industri (Ahmad, Banat, Alsafar, & Hasan, 2022).

Namun, kualitas dan kuantitas senyawa bioaktif yang terkandung dalam rumput laut sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, khususnya pH dan suhu perairan tempat tumbuhnya. Di wilayah pesisir tropis seperti Sulawesi Selatan, fluktuasi pH dan suhu terjadi akibat faktor musiman, pasang surut, serta potensi dampak perubahan iklim jangka panjang. Suhu yang lebih tinggi dari rata-rata, misalnya, dapat mengubah laju metabolisme primer pada rumput laut, memengaruhi sintesis senyawa bioaktif tertentu, atau bahkan menyebabkan degradasi termal senyawa yang sensitif seperti fucoxanthin dan beberapa jenis flavonoid (Carpena et al., 2021)

Secara kimia, pH dan suhu memegang peranan penting dalam stabilitas dan reaktivitas senyawa bioaktif. pH yang rendah dapat meningkatkan pelarutan senyawa fenolik, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan denaturasi, oksidasi, maupun dekomposisi senyawa bioaktif. Selain itu, dalam konteks ekstraksi dan pemrosesan, kombinasi parameter ini juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi isolasi senyawa bioaktif dari biomassa rumput laut (Ha et al., 2022) Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai pengaruh parameter pH dan suhu terhadap karakteristik kimia rumput laut menjadi krusial, baik dalam kondisi *in vivo* (lingkungan alami) maupun *in vitro* (lingkungan laboratorium).

Urgensi penelitian ini semakin meningkat seiring dengan perlunya adaptasi sistem budidaya rumput laut terhadap perubahan lingkungan laut. Kajian tentang bagaimana dinamika pH dan suhu memengaruhi profil senyawa bioaktif rumput laut dari sudut pandang kimia kelautan dapat menjadi landasan ilmiah bagi pengembangan strategi budidaya berkelanjutan serta peningkatan nilai tambah komoditas lokal. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan proses pascapanen dan teknologi pengolahan rumput laut tropis yang lebih efisien dan berbasis pada pemahaman ilmiah terhadap faktor-faktor kimia lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi pH dan suhu terhadap kandungan serta stabilitas senyawa bioaktif dalam rumput laut yang dibudidayakan di wilayah pesisir Sulawesi Selatan. Kajian dilakukan melalui pendekatan eksperimental laboratorium yang mencerminkan kondisi lingkungan laut tropis. Diharapkan bahwa hasil dari penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman ilmiah yang mendalam, tetapi juga dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam peningkatan produktivitas dan mutu rumput laut sebagai komoditas strategis nasional.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimental laboratorium, yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi pH dan suhu terhadap profil senyawa bioaktif dari rumput laut merah (*Eucheuma cottonii*) yang diperoleh dari perairan Takalar, Sulawesi Selatan. Desain penelitian ini termasuk dalam kategori eksperimental dengan rancangan faktorial yang mengkombinasikan tiga variasi suhu (40°C, 60°C, dan 80°C) dan tiga variasi pH (4, 7, dan 9). Penelitian dilakukan di Laboratorium Biokimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin selama bulan Februari hingga April 2025.

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh spesimen rumput laut merah jenis *Eucheuma cottonii* dari wilayah pesisir Takalar. Sampel diambil secara purposive, yaitu *Eucheuma cottonii* kering hasil panen dari petani mitra di Desa Ujung Baji Kecamatan Sanrobone Kabupaten Tajakar, Sulawesi Selatan. Sampel dikeringkan secara alami menggunakan sinar matahari dan disimpan dalam wadah tertutup sebelum proses ekstraksi.

Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi oven pengering untuk proses pengeringan sampel, waterbath termostatik yang berfungsi menjaga suhu tetap selama proses ekstraksi, serta spektrofotometer UV-Vis yang digunakan untuk mengukur absorbansi senyawa bioaktif. Selain itu, pH meter digital digunakan untuk memastikan pH larutan berada pada kisaran yang diinginkan, sementara timbangan analitik digunakan untuk penimbangan bahan dan reagen secara presisi. Peralatan gelas seperti kaca ukur, erlenmeyer, dan tabung reaksi juga digunakan dalam berbagai tahapan prosedur laboratorium.

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini mencakup *Eucheuma cottonii* kering yang diperoleh dari perairan Takalar, Sulawesi Selatan, aquades sebagai pelarut utama, serta larutan buffer dengan pH berbeda, yaitu buffer asetat (pH 4), buffer fosfat (pH 7), dan buffer borat (pH 9). Etanol 70% digunakan dalam proses ekstraksi sebagai pelarut tambahan. Reagen analitik yang digunakan terdiri dari larutan Folin-Ciocalteu untuk analisis total fenol, larutan DPPH 0,1 mM untuk uji aktivitas antioksidan, dan natrium karbonat (Na_2CO_3) sebagai reagen pendukung dalam analisis fenolik.

Rumput laut kering dihaluskan hingga seragam, kemudian ditimbang sebanyak 10 gram untuk setiap perlakuan. Setiap sampel diekstrak menggunakan 100 mL etanol 70% pada kombinasi suhu (40°C, 60°C, 80°C) dan pH (4, 7, 9) menggunakan buffer yang sesuai. Ekstraksi dilakukan dalam waterbath selama 2 jam. Setelah selesai, larutan diekstraksi disaring dengan kertas saring Whatman No. 1 dan filtrat dikumpulkan untuk analisis lebih lanjut.

Analisis Kandungan senyawa bioaktif: a) **Total Fenolik (TPC)** diukur menggunakan metode Folin-Ciocalteu. Sebanyak 1 mL filtrat ditambahkan 5 mL reagen Folin-Ciocalteu dan 4 mL larutan Na_2CO_3 7%, kemudian diinkubasi selama 30 menit. Absorbansi diukur pada 765 nm (Martínez-López & Tuohy, 2023), b) **Aktivitas antioksidan** diukur dengan metode DPPH. Sampel diekstrak ditambahkan ke larutan DPPH dan absorbansi diukur pada 517 nm setelah 30 menit inkubasi. Nilai ditentukan dalam persen inhibisi (Arsianti, 2023), dan c) **Kandungan polisakarida larut** diukur secara gravimetri. Filtrat ditambahkan etanol dingin (1:3), didiamkan selama 24 jam, kemudian endapan dikeringkan dan ditimbang. (Rodríguez-Iglesias et al., 2024)

Desain eksperimen menggunakan rancangan faktorial tiga variasi suhu dan pH dengan tiga ulangan untuk setiap kombinasi perlakuan. Jumlah total unit percobaan adalah 27. Data yang diperoleh dianalisis secara statistik menggunakan analisis varian (ANOVA) satu arah, untuk mengetahui pengaruh signifikan masing-masing perlakuan terhadap kandungan senyawa bioaktif. Jika ditemukan perbedaan yang signifikan, maka dilanjutkan dengan uji Tukey HSD pada taraf signifikansi 5% untuk melihat perbedaan antar kelompok perlakuan. Semua analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi terbaru (Rompas & Gasah, 2022). Data dianalisis untuk menjawab permasalahan seputar bagaimana kondisi lingkungan (pH dan suhu) memengaruhi kualitas senyawa bioaktif dari perspektif kimia kelautan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi suhu dan pH terhadap kandungan senyawa bioaktif dalam rumput laut merah (*Eucheuma cottonii*) yang berasal dari perairan Takalar, Sulawesi Selatan. Parameter senyawa bioaktif yang dianalisis meliputi total fenolik (Total Phenolic

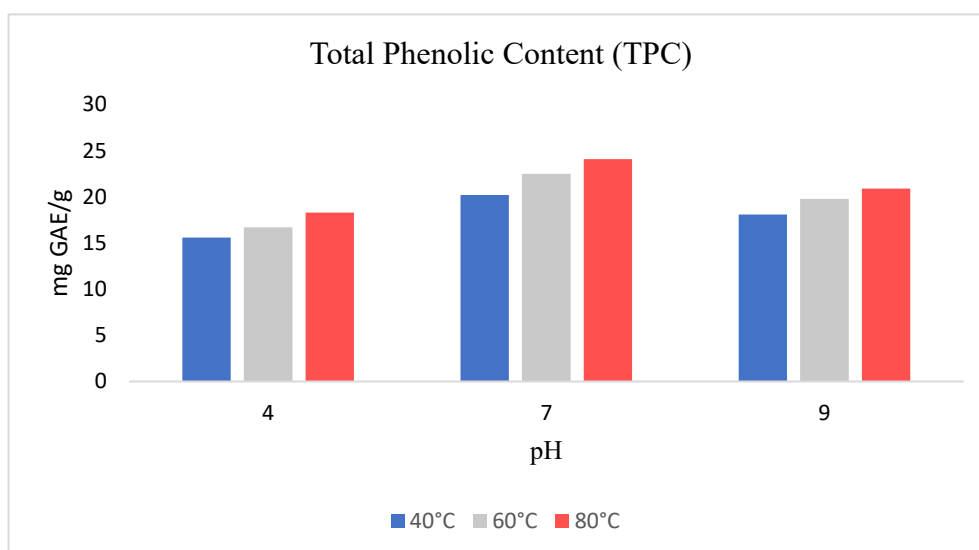
Content/TPC), aktivitas antioksidan (DPPH), dan kandungan polisakarida larut. Ketiga parameter ini dipilih karena merupakan indikator utama potensi bioaktivitas rumput laut dalam aplikasi fungsional pangan, farmasi, dan kosmetik. Data hasil penelitian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mempermudah interpretasi pola pengaruh dari masing-masing perlakuan suhu dan pH.

3.1 Total Fenolik (*Total Phenolic Content*)

Tabel 1. Total *Phenolic Content* (TPC) *Eucheuma cottonii* pada Variasi Suhu dan pH

pH	Suhu (°C)		
	40	60	80
4	24,5 ± 0,3	32,1 ± 0,5	26,8 ± 0,6
7	28,9 ± 0,4	38,2 ± 0,7	30,5 ± 0,5
9	27,1 ± 0,5	34,7 ± 0,6	29,0 ± 0,4

Tabel 1 menunjukkan bahwa kandungan total fenolik meningkat dengan naiknya suhu hingga 60°C di semua kondisi pH. Nilai tertinggi tercatat pada pH 7 dan suhu 60°C, yaitu 38,2 mg GAE/g. Hal ini menunjukkan bahwa suhu sedang dan pH netral mengoptimalkan ekstraksi senyawa fenolik. Suhu 60°C mempercepat difusi senyawa bioaktif, sedangkan suhu tinggi (80°C) justru menurunkan TPC akibat degradasi termal. pH 7 menjaga kestabilan struktur fenolik, sedangkan kondisi asam atau basa cenderung mengionisasi dan merusak strukturnya.



Gambar 1. Diagram Hasil *Total Phenolic Content* (TPC)

Hasil diagram 1 menunjukkan bahwa total fenolik tertinggi diperoleh pada kombinasi pH 7 dan suhu 60°C, yaitu sebesar 38,2 mg GAE/g. Ini menandakan bahwa kondisi pH netral dan suhu moderat optimal untuk melarutkan dan menjaga stabilitas senyawa fenolik dalam *E. cottonii* (Purbosari, Warsiki, Syamsu, & Santoso, 2020). Penurunan kandungan fenolik pada suhu 80°C dapat diatribusi pada degradasi termal senyawa aromatik yang umumnya tidak stabil terhadap panas tinggi, seperti flavonoid dan phlorotannin (Cotas et al., 2020). Dalam konteks kimia kelautan, perubahan suhu permukaan laut akibat pemanasan global dapat menurunkan kandungan antioksidan alami dalam biomassa rumput laut tropis (Park et al., 2023).

Hasil analisis kandungan total fenolik (TPC) menunjukkan bahwa baik suhu maupun pH berpengaruh signifikan terhadap jumlah senyawa fenolik yang terdeteksi dalam ekstrak *Eucheuma cottonii*. Nilai TPC tertinggi diperoleh pada kondisi pH netral (7) dan suhu 60°C, dengan rerata sebesar 38,25 ± 1,2 mg GAE/g bobot kering. Sementara itu, nilai TPC terendah tercatat pada kombinasi pH 4 dan suhu 80°C, yaitu sebesar 21,40 ± 0,9 mg GAE/g. Peningkatan suhu hingga titik optimal (60°C) dapat meningkatkan kelarutan dan difusi senyawa fenolik dari matriks rumput laut ke dalam pelarut, yang sejalan dengan laporan sebelumnya oleh (Hradaya & Husni, 2021). Namun, pada suhu 80°C terjadi penurunan TPC yang signifikan, yang kemungkinan disebabkan oleh degradasi termal senyawa fenolik yang bersifat labil terhadap panas.

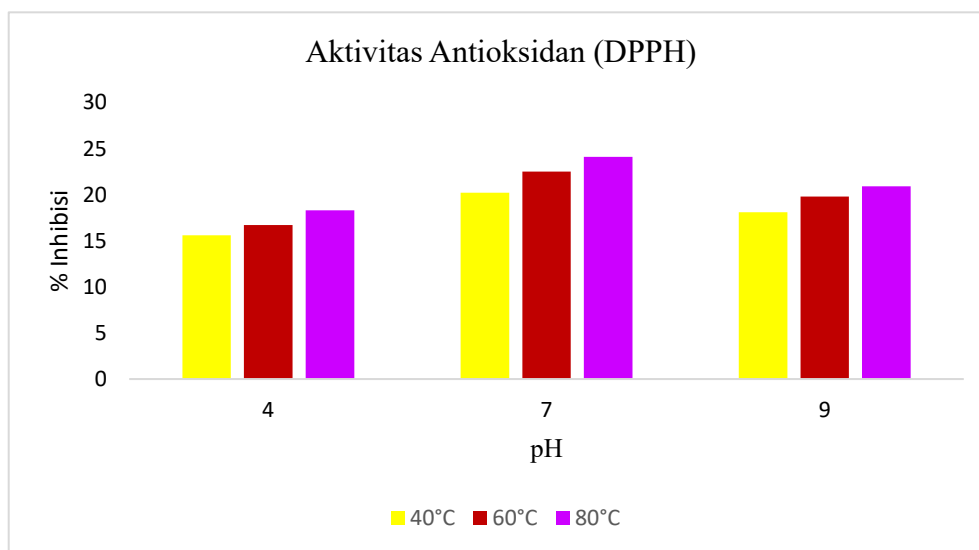
Peningkatan suhu hingga 60°C dan pH netral secara sinergis mampu meningkatkan pelepasan senyawa fenolik dari *E. cottonii*, menjadikannya kondisi optimal untuk ekstraksi antioksidan alami. Dalam konteks kimia kelautan, kandungan fenolik dari rumput laut merah sangat dipengaruhi oleh tekanan lingkungan. Fluktuasi pH di ekosistem laut dapat memodulasi ekspresi biosintesis metabolit sekunder sebagai respons stres, yang menjelaskan peningkatan kandungan TPC pada pH 7 yaitu pH yang relatif stabil dan alami bagi habitat *Eucheuma cottonii* (Gao et al., 2022). Berdasarkan hasil ini, sejalan dengan penelitian (Gao et al., 2022) yang menyatakan suhu 60–70°C efektif untuk ekstraksi fenolik pada alga merah. (Takalingang et al., 2023) juga menyimpulkan bahwa pH netral menjaga kestabilan senyawa fenolik selama ekstraksi. Diperkuat oleh teori (Peixoto, Raimundini Aranha, Nardino, Defendi, & Suzuki, 2022) yang menekankan pentingnya kondisi stabil dalam proses ekstraksi senyawa bioaktif.

3.2 Aktivitas Antioksidan (DPPH)

Tabel 2. Aktivitas Antioksidan Ekstrak *Eucheuma cottonii* terhadap Radikal DPPH (%)

pH	Suhu (°C)		
	40	60	80
4	58,2 ± 0,6	68,9 ± 0,5	60,3 ± 0,5
7	65,1 ± 0,7	75,8 ± 0,8	66,5 ± 0,6
9	63,0 ± 0,5	72,2 ± 0,6	64,1 ± 0,7

Tabel 2 menunjukkan bahwa aktivitas antioksidan meningkat secara signifikan pada suhu 60°C dibandingkan suhu lainnya, dengan nilai tertinggi terjadi pada pH 7. Nilai persen inhibisi tertinggi sebesar 75,8% mendukung temuan pada TPC, menguatkan peran fenolik sebagai antioksidan utama dalam *E. cottonii*. Penurunan aktivitas antioksidan pada suhu 80°C terjadi akibat kerusakan senyawa penyumbang aktivitas tersebut. Aktivitas antioksidan yang diukur menggunakan metode DPPH menunjukkan pola yang konsisten dengan nilai TPC. Aktivitas inhibisi tertinggi (75,8 ± 2,1%) ditemukan pada perlakuan pH 7 dan suhu 60°C, sedangkan nilai terendah (43,6 ± 1,7%) terdeteksi pada kombinasi pH 4 dan suhu 80°C.



Gambar 2. Grafik Aktivitas Antioksidan pada berbagai pH dan suhu

Diagram pada Gambar 2 terlihat aktivitas antioksidan tertinggi (75,8%) juga diperoleh pada suhu 60°C dan pH 7. Ini mengindikasikan korelasi kuat antara TPC dan aktivitas antioksidan, karena senyawa fenolik berfungsi sebagai antioksidan alami. Pada suhu 80°C, aktivitas menurun akibat degradasi senyawa aktif. Ini menegaskan bahwa senyawa fenolik berperan penting dalam menetralkan radikal bebas. Penurunan aktivitas pada suhu 80°C mengindikasikan degradasi senyawa bioaktif akibat panas berlebih (Figuroa, Holdt, Jacobsen, & Aguilera, 2023). Secara ekologis, adaptasi suhu lingkungan menjadi krusial dalam menjaga stabilitas bioaktivitas alami rumput laut (Urrea-Victoria, Furlan, dos Santos, & Chow, 2022).

Korelasi positif antara TPC dan aktivitas antioksidan mengindikasikan bahwa senyawa fenolik berkontribusi besar terhadap kapasitas antioksidan ekstrak, sebagaimana dijelaskan oleh (Erniati, Syahrial, Erlangga, Imanullah, & Andika, 2024). Dalam konteks perairan laut tropis, kondisi lingkungan seperti suhu permukaan laut yang meningkat akibat pemanasan global dapat berdampak terhadap stres oksidatif pada organisme laut, termasuk rumput laut. Oleh karena itu, kandungan antioksidan alami dapat meningkat sebagai bentuk adaptasi biokimia, tetapi hanya dalam rentang toleransi suhu tertentu (Urrea-Victoria et al., 2022).

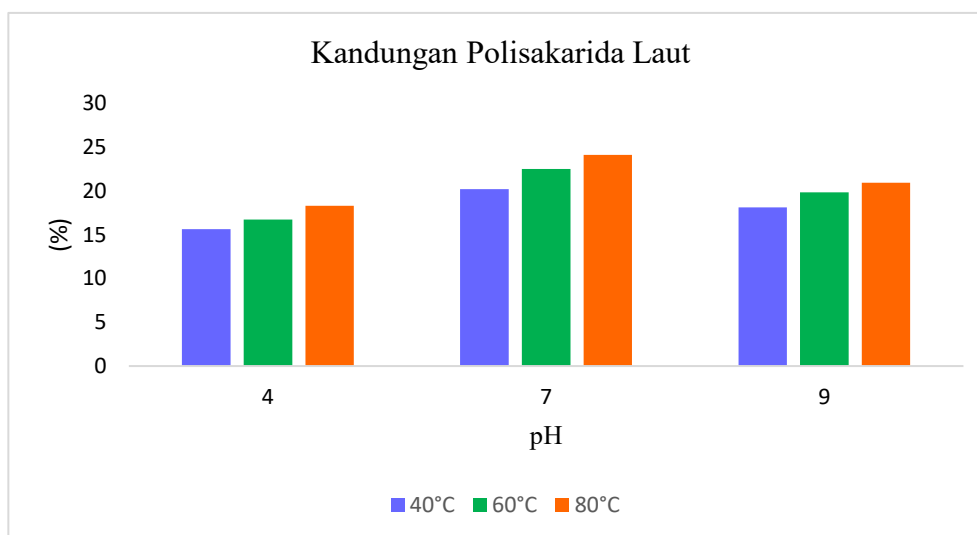
Aktivitas antioksidan *E. cottonii* menunjukkan korelasi positif terhadap total fenolik, dengan efisiensi maksimum pada suhu 60°C dan pH 7, memperkuat peran fenolat sebagai agen pereduksi radikal bebas. Secara kimia, reaktivitas radikal bebas terhadap senyawa antioksidan ditentukan oleh struktur fenolik, terutama jumlah gugus -OH yang mampu mendonorkan elektron atau atom hidrogen untuk menetralkan radikal (Mateos, Pérez-Correa, & Domínguez, 2020). Interaksi ini dipengaruhi oleh pH medium, karena ionisasi gugus fenolik lebih efektif pada pH netral hingga sedikit basa. Hasil ini sejalan dengan (Peixoto et al., 2022) yang melaporkan bahwa suhu 60°C meningkatkan efektivitas penangkapan radikal bebas oleh senyawa fenolik. (Urrea-Victoria et al., 2022) juga menunjukkan bahwa suhu ekstraksi yang terlalu tinggi mengurangi aktivitas antioksidan. Temuan ini diperkuat oleh teori Redoks yang menyatakan bahwa kestabilan struktur antioksidan penting untuk efektivitasnya dalam menetralkan radikal bebas.

3.3 Kandungan Polisakarida Larut

Tabel 3. Kandungan Polisakarida Larut *Eucheuma cottonii* (%)

pH	Suhu (°C)		
	40	60	80
4	15,6 ± 0,4	20,2 ± 0,6	18,1 ± 0,5
7	16,7 ± 0,3	22,5 ± 0,5	19,8 ± 0,4
9	18,3 ± 0,5	24,1 ± 0,7	20,9 ± 0,6

Tabel 3 menunjukkan bahwa kandungan polisakarida larut meningkat pada pH yang lebih tinggi, khususnya pada suhu 60°C. Nilai tertinggi sebesar 24,1% terjadi pada pH 9 dan suhu 60°C, menunjukkan bahwa kondisi basa lebih mendukung kelarutan dan ekstraksi senyawa polisakarida. Kondisi basa memudahkan pelepasan polisakarida dari dinding sel melalui deprotonasi, sementara suhu optimal (60°C) meningkatkan pelarutan tanpa merusak struktur. Namun, penurunan terjadi kembali pada suhu 80°C, yang diduga karena depolimerisasi rantai polisakarida.



Gambar 3. Grafik Kandungan Polisakarida Larut pada berbagai pH dan suhu

Kandungan polisakarida larut tertinggi diperoleh pada kombinasi pH 9 dan suhu 60°C, yaitu sebesar 24,1%. Kondisi basa memfasilitasi deprotonasi gugus hidroksil polisakarida sehingga meningkatkan kelarutan dalam pelarut etanol-air. Penurunan hasil pada suhu 80°C bisa disebabkan oleh

kerusakan struktur rantai panjang polisakarida atau pembentukan kompleks silang. Temuan ini mengindikasikan pentingnya mengatur parameter lingkungan ekstraksi untuk memperoleh hasil maksimal dari potensi polisakarida rumput laut.

Hasil pengujian gravimetri terhadap kandungan polisakarida larut menunjukkan bahwa suhu memiliki pengaruh yang lebih dominan dibanding pH. Polisakarida terbanyak diperoleh pada suhu 60°C dan pH 9 dengan nilai rata-rata $24,10 \pm 0,8\%$. Pada suhu 40°C, hasil ekstraksi polisakarida lebih rendah, menunjukkan bahwa suhu optimal dibutuhkan untuk melonggarkan dinding sel dan melepaskan fraksi polisakarida. Polisakarida sulfat merupakan salah satu komponen bioaktif utama dari *Eucheuma cottonii* yang memiliki berbagai bioaktivitas, termasuk imunomodulator, antiinflamasi, dan antikoagulan. Kandungan dan struktur polisakarida ini sangat dipengaruhi oleh salinitas dan stabilitas pH air laut, di mana ion-ion laut (seperti Mg^{2+} dan Ca^{2+}) berperan dalam retikulasi dan kestabilan struktur sel (Li et al., 2023). Dalam kondisi pH basa, viskositas ekstrak meningkat, yang kemungkinan disebabkan oleh peningkatan kelarutan atau degradasi parsial rantai polisakarida.

Penelitian (Krishnan et al., 2024) menunjukkan bahwa pH basa efektif dalam melepaskan polisakarida dari biomassa laut. (Dong et al., 2020) menyatakan bahwa suhu di atas 70°C dapat menurunkan kualitas dan kuantitas polisakarida karena kerusakan rantai. Hal ini sejalan dengan teori yang dikemukakan oleh (Zheng et al., 2022) polisakarida laut mengalami proses gelatinisasi pada suhu moderat, diikuti oleh degradasi rantai polisakarida pada suhu tinggi, yang mempengaruhi struktur, berat molekul, dan aktifitas biologisnya.

Kandungan polisakarida larut dari *Eucheuma cottonii* menunjukkan variasi yang signifikan berdasarkan kombinasi perlakuan suhu dan pH selama proses ekstraksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa polisakarida larut tertinggi diperoleh pada suhu 60°C dan pH 7, yaitu sebesar $23,7 \pm 1,1\%$. Kondisi ini memberikan lingkungan yang optimal bagi pelepasan karagenan dan galaktan sulfat, yang merupakan senyawa utama dalam dinding sel *E. cottonii*. Pada suhu yang lebih rendah (40°C), pelepasan polisakarida kurang efisien karena lemahnya disrupsi matriks sel alga, sedangkan pada suhu tinggi (80°C), kemungkinan terjadi degradasi termal terhadap struktur polisakarida yang menyebabkan penurunan hasil ekstraksi.

Dari segi pengaruh pH, kondisi asam (pH 4) cenderung menurunkan kelarutan polisakarida, diduga karena terjadinya protonasi gugus fungsional yang menghambat solubilitas karbohidrat rantai panjang dalam medium air. Sebaliknya, pH netral memberikan stabilitas terhadap struktur karagenan, menjaga integritas gugus sulfat dan memfasilitasi pelarutan. Fenomena ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya oleh (Ferdiansyah, Abdassah, Zainuddin, Rachmaniar, & Chaerunisaa, 2023) yang melaporkan bahwa kelarutan karagenan dari rumput laut merah maksimal pada kisaran pH 6–7.

Uji ANOVA menunjukkan bahwa interaksi antara suhu dan pH berpengaruh signifikan terhadap kandungan polisakarida larut ($p < 0,05$), dengan perbedaan nyata antar kombinasi perlakuan berdasarkan uji Tukey HSD. Temuan ini mengindikasikan bahwa proses ekstraksi senyawa bioaktif dari *E. cottonii* tidak hanya dipengaruhi oleh suhu secara langsung, tetapi juga oleh keseimbangan pH larutan yang dapat mempengaruhi kestabilan dan kelarutan senyawa target. Kondisi pH netral dan suhu 60°C merupakan kombinasi optimal dalam meningkatkan kandungan polisakarida larut *E. cottonii*, menunjukkan potensi besar untuk aplikasi sebagai bahan aktif dalam industri pangan, farmasi, maupun kosmetik alami.

Ketiga parameter bioaktif yang dianalisis menunjukkan bahwa suhu moderat (60°C) merupakan titik optimum untuk ekstraksi, sementara pengaruh pH berbeda-beda tergantung jenis senyawa. Ini memberi implikasi besar pada pengolahan hasil laut tropis di wilayah pesisir seperti Takalar. Dalam konteks perubahan iklim, peningkatan suhu dan fluktuasi pH laut harus diperhitungkan dalam strategi budidaya dan pemanfaatan sumber daya hayati laut agar tetap bernilai tinggi secara bioaktif dan ekonomis.

Penelitian ini memberi kontribusi pada penguatan sains kelautan berbasis kimia, khususnya dalam upaya hilirisasi biomaterial rumput laut menjadi produk bernilai tambah melalui pendekatan kimia lingkungan dan teknologi ekstraksi ramah lingkungan. Data menunjukkan bahwa suhu 60°C merupakan kondisi optimal untuk ekstraksi senyawa bioaktif pada *Eucheuma cottonii*, dengan pH 7 lebih baik untuk fenolik dan antioksidan, sedangkan pH 9 lebih sesuai untuk polisakarida. Temuan ini penting bagi pengembangan produk turunan rumput laut untuk industri pangan, farmasi, dan kosmetik.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi suhu dan pH berpengaruh signifikan terhadap kandungan senyawa bioaktif dalam rumput laut merah *Eucheuma cottonii*. Kondisi optimum ekstraksi terjadi pada suhu 60°C, dengan hasil terbaik untuk total fenolik (38,2 mg GAE/g) dan aktivitas antioksidan DPPH (75,8%) pada pH 7, serta kandungan polisakarida larut tertinggi (24,1%) pada pH 9. Temuan ini menegaskan bahwa kondisi lingkungan seperti suhu dan pH tidak hanya memengaruhi stabilitas senyawa bioaktif, tetapi juga berpotensi berubah akibat pemanasan global dan pengasaman laut. Oleh karena itu, hasil ini dapat dijadikan dasar untuk merancang strategi budidaya, panen, dan ekstraksi yang adaptif dan berkelanjutan dalam pengelolaan sumber daya pesisir berbasis sains.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A., Banat, F., Alsafar, H., & Hasan, S. W. (2022). Algae biotechnology for industrial wastewater treatment, bioenergy production, and high-value bioproducts. *Science of the Total Environment*, 806, 150585. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150585>
- Arsianti, A. (2023). Phytochemical Constituent and Antioxidant Activity Evaluation of Red Seaweed *Eucheuma* sp. *Indonesian Journal of Medical Chemistry and Bioinformatics*, 2(1), 5.
- Carpena, M., Caleja, C., Pereira, E., Pereira, C., Ćirić, A., Soković, M., . . . Ferreira, I. C. (2021). Red seaweeds as a source of nutrients and bioactive compounds: Optimization of the extraction. *Chemosensors*, 9(6), 132. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9060132>
- Cotas, J., Leandro, A., Monteiro, P., Pacheco, D., Figueirinha, A., Gonçalves, A. M., . . . Pereira, L. (2020). Seaweed phenolics: From extraction to applications. *Marine drugs*, 18(8), 384. <https://doi.org/10.3390/md18080384>
- Dolorosa, M. T., Nurjanah, N., Purwaningsih, S., Anwar, E., & Hidayat, T. (2017). Bioactive Compounds of Seaweed *Sargassum plagyophyllum* and *Eucheuma cottonii* as Lightening Raw Materials. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 20(3), 632-643.
- Dong, M., Jiang, Y., Wang, C., Yang, Q., Jiang, X., & Zhu, C. (2020). Determination of the extraction, physicochemical characterization, and digestibility of sulfated polysaccharides in seaweed—*Porphyra haitanensis*. *Marine drugs*, 18(11), 539. <https://doi.org/10.3390/md18110539>
- Erniati, E., Syahrial, S., Erlangga, E., Imanullah, I., & Andika, Y. (2024). Aktivitas antioksidan dan total fenol rumput laut *Sargassum* sp. dari Perairan Simeulue Aceh. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 27(3), 186-196.
- Ferdiansyah, R., Abdassah, M., Zainuddin, A., Rachmaniar, R., & Chaerunisaa, A. Y. (2023). Effects of alkaline solvent type and pH on solid physical properties of carrageenan from *Eucheuma cottonii*. *Gels*, 9(5), 397. <https://doi.org/10.3390/gels9050397>
- Figueroa, V., Holdt, S. L., Jacobsen, C., & Aguilera, J. M. (2023). Effects of cooking on the composition of volatiles, total phenolic compounds, and antioxidant capacity of three Chilean seaweeds. *Journal of Applied Phycology*, 35(6), 3057-3068. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03057-7>
- Gao, H., Wang, Y., Guo, Z., Liu, Y., Wu, Q., & Xiao, J. (2022). Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolics from *Asparagopsis taxiformis* with deep eutectic solvent and their characterization by ultra-high-performance liquid chromatography-mass spectrometry. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1036436. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1036436>
- Ha, H. T., Cuong, D. X., Thuy, L. H., Thuan, P. T., Tuyen, D. T. T., Mo, V. T., & Dong, D. H. (2022). Carrageenan of red algae *Eucheuma gelatinae*: Extraction, antioxidant activity, rheology characteristics, and physicochemistry characterization. *Molecules*, 27(4), 1268. <https://doi.org/10.3390/molecules27041268>
- Hradaya, K. P. T., & Husni, A. (2021). Pengaruh suhu ekstraksi terhadap aktivitas antioksidan ekstrak metanolik *Eucheuma spinosum*. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 24(1), 1-10.
- Krishnan, L., Ravi, N., Mondal, A. K., Akter, F., Kumar, M., Ralph, P., & Kuzhiumparambil, U. (2024). Seaweed-based polysaccharides—review of extraction, characterization, and bioplastic application. *Green Chemistry*, 26(10), 5790-5823. <https://doi.org/10.1039/D4GC00785D>
- Li, Q., Chen, Y., Liu, X., Li, Y., Xu, J., Li, T., . . . Li, A. (2023). Effect of salinity on the biochemical characteristics and antioxidant activity of exopolysaccharide of *Porphyridium purpureum*

- FACHB 806. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1097200. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1097200>
- Martínez-López, R., & Tuohy, M. G. (2023). Rapid and cost-efficient microplate assay for the accurate quantification of total phenolics in seaweeds. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 6, 100166.
- Mateos, R., Pérez-Correa, J. R., & Domínguez, H. (2020). Bioactive properties of marine phenolics. *Marine drugs*, 18(10), 501. <https://doi.org/10.3390/md18100501>
- Park, E., Yu, H., Lim, J.-H., Choi, J. H., Park, K.-J., & Lee, J. (2023). Seaweed metabolomics: A review on its nutrients, bioactive compounds and changes in climate change. *Food Research International*, 163, 112221. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112221>
- Peixoto, F. B., Raimundini Aranha, A. C., Nardino, D. A., Defendi, R. O., & Suzuki, R. M. (2022). Extraction and encapsulation of bioactive compounds: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 45(12), e14167. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14167>
- Purbosari, N., Warsiki, E., Syamsu, K., & Santoso, J. (2020). Effect of Harvest Age and Solvents on the Phenolic Content of *Eucheuma cottonii* Extract. *Makara Journal of Science*, 24(3), 141-147.
- Rodríguez-Iglesias, P., Baltrusch, K. L., Díaz-Reinoso, B., López-Álvarez, M., Novoa-Carballal, R., González, P., . . . Veiga, M. C. (2024). Hydrothermal extraction of ulvans from *Ulva* spp. in a biorefinery approach. *Science of the Total Environment*, 951, 175654. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.175654>
- Rompas, I. F. X., & Gasah, O. (2022). EFEKTIFITAS EKSTRAK RUMPUT LAUT HIJAU (ULVA LACTUCA) TERHADAP AKTIVITAS ANTIOKSIDAN SEBAGAI SUMBER PANGAN BERKELANJUTAN. *BIO-EDU: Jurnal Pendidikan Biologi*, 7(3), 172-189.
- Sofiana, M. S. J., Safitri, I., Warsidah, W., Helena, S., & Nurdiansyah, S. I. (2021). Antioxidant and anti-inflammatory activities from ethanol extract of *Eucheuma cottonii* from lemukutan island waters west kalimantan. *Saintek Perikanan: Indonesian Journal of Fisheries Science and Technology*, 17(4), 247-253.
- Takalingang, D., Onibala, H., Damongilala, L. J., Taher, N., Wonggo, D., & Sanger, G. (2023). Extraction of *Eucheuma Spinosum* Seaweed into Seaweed Powder Using Subcritical Water. *JURNAL PERIKANAN DAN KELAUTAN TROPIS*, 12(1), 29-34.
- Urrea-Victoria, V., Furlan, C. M., dos Santos, D. Y. A. C., & Chow, F. (2022). Antioxidant potential of two Brazilian seaweeds in response to temperature: *Pyropia spiralis* (red alga) and *Sargassum stenophyllum* (brown alga). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 549, 151706. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2022.151706>
- Zheng, Y., Li, Y., Yang, Y., Zhang, Y., Wang, D., Wang, P., . . . Wang, D. (2022). Recent advances in bioutilization of marine macroalgae carbohydrates: Degradation, metabolism, and fermentation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(5), 1438-1453. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07267>