

**PENGARUH KEPADATAN TEBAR TERHADAP PROFIL SENYAWA
BIOAKTIF DAN SIFAT FUNGSIONAL *Gracilaria verrucosa* PADA
SISTEM BUDIDAYA LONGLINE DI TAMBAK**

**THE EFFECT OF STOCKING DENSITY ON THE BIOACTIVE
COMPOUND PROFILE AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF
Gracilaria verrucosa IN A LONGLINE CULTURE SYSTEM IN
BRACKISH WATER PONDS**

Andi Rahmad Rahim^{1*}

¹Program Studi Budidaya Perikanan Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Gresik
Jl. Sumatra No. 101 GKB, Kec. Kebomas, Kab. Gresik, Jawa Timur, Kode Pos: 61121

*Email: andirahmad@umg.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kepadatan biomassa terhadap profil senyawa bioaktif dan sifat fungsional rumput laut *Gracilaria verrucosa* dalam sistem budidaya longline di tambak. Percobaan dilakukan selama 42 hari dengan empat perlakuan kepadatan awal, yaitu 100 g, 150 g, 200 g, dan 250 g, masing-masing dengan tiga ulangan. Parameter yang diamati meliputi kandungan polisakarida (agar), fenolik total, flavonoid total, serta pigmen (klorofil dan karotenoid). Data dianalisis menggunakan analisis varians satu arah dan dilanjutkan dengan uji Tukey pada taraf signifikansi 5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh parameter mengalami peningkatan hingga mencapai titik optimum pada perlakuan 200 g, kemudian cenderung menurun pada kepadatan yang lebih tinggi. Kandungan agar tertinggi mencapai 32.4%, fenolik total 3.7 mg GAE g⁻¹, flavonoid total 2.7 mg QE g⁻¹, dan pigmen total 3.25 mg g⁻¹. Pola ini menunjukkan bahwa kepadatan biomassa berperan dalam mengoptimalkan alokasi karbon ke dalam komponen struktural dan metabolit sekunder. Kepadatan yang terlalu tinggi menyebabkan penurunan efisiensi akibat kompetisi cahaya dan nutrisi. Kesimpulan penelitian ini menunjukkan bahwa kepadatan 200 g merupakan kondisi optimal untuk menghasilkan keseimbangan antara produktivitas dan kualitas biokimia, serta memberikan implikasi penting dalam pengembangan strategi budidaya rumput laut berbasis kualitas.

Kata Kunci: Kepadatan biomassa, senyawa bioaktif, *Gracilaria verrucosa*, agar, metabolit sekunder, kualitas biokimia

ABSTRACT

*This study aimed to analyze the effect of biomass density on the profile of bioactive compounds and functional properties of the seaweed *Gracilaria verrucosa* cultured in a longline system in brackish water ponds. The experiment was conducted for 42 days with four initial density treatments, namely 100 g, 150 g, 200 g, and 250 g, each with three replicates. The observed parameters included polysaccharide (agar) content, total phenolics, total flavonoids, and pigments (chlorophyll and carotenoids). Data were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA), followed by Tukey's post hoc test at a 5% significance level. The results showed that all parameters increased and reached an optimum at the 200 g treatment, and then tended to decline at higher densities. The highest values recorded were 32.4% agar content, 3.7 mg GAE g⁻¹ total phenolics, 2.7 mg QE g⁻¹ total flavonoids, and 3.25 mg g⁻¹ total pigments. This pattern indicates that biomass density plays a significant role in optimizing carbon allocation toward structural components and secondary metabolites. Excessively high density led to reduced efficiency due to competition for light and nutrients. In conclusion, a density of 200 g was identified as the optimal condition for achieving a balance between productivity and biochemical quality. These findings provide important implications for the development of seaweed aquaculture strategies focused on product quality enhancement.*

Keywords: *Biomass density, bioactive compounds, *Gracilaria verrucosa*, agar, secondary metabolites, biochemical quality*

PENDAHULUAN

Produksi biomassa rumput laut yang bernilai tinggi tidak hanya ditentukan oleh kuantitas hasil panen, tetapi juga oleh kualitas biokimia dan sifat fungsional yang dihasilkan. Dalam sistem budidaya modern, orientasi produksi telah berkembang dari sekadar peningkatan biomassa menuju optimasi kandungan senyawa aktif yang memiliki nilai tambah dalam industri pangan, farmasi, dan bioteknologi. *Gracilaria verrucosa* merupakan salah satu komoditas utama yang berperan penting sebagai sumber agar dan senyawa bioaktif, termasuk polisakarida, fenolik, flavonoid, dan pigmen, yang berkontribusi terhadap aktivitas antioksidan dan kualitas fungsional produk (García-Poza et al., 2020; Jayakody et al., 2022).

Kualitas biokimia *Gracilaria* sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan serta strategi pengelolaan budidaya, salah satunya adalah kepadatan tebar. Kepadatan menentukan intensitas kompetisi dalam

pemanfaatan cahaya, karbon, dan nutrisi, yang pada akhirnya memengaruhi proses fotosintesis, asimilasi karbon, serta sintesis metabolit primer dan sekunder. Kepadatan yang tidak optimal dapat menyebabkan ketidakseimbangan dalam proses fisiologis, baik melalui keterbatasan sumber daya maupun efek peneduhan antar individu (Rejeki et al., 2018; Leakey et al., 2009). Oleh karena itu, kepadatan tebar menjadi faktor kunci dalam mengontrol produktivitas sekaligus kualitas biomassa rumput laut.

Dalam sistem budidaya tambak dengan metode longline, interaksi antara kolom air, sedimen, dan biomassa rumput laut membentuk suatu sistem yang terintegrasi secara biogeokimia. Dinamika karbon dalam sistem ini memainkan peran penting dalam menentukan alokasi karbon ke dalam jaringan tanaman, yang selanjutnya memengaruhi pembentukan struktur seluler dan sifat mekanik seperti viskositas dan kekuatan gel. Studi terbaru

menunjukkan bahwa makroalga memiliki kontribusi signifikan dalam penyerapan dan penyimpanan karbon di ekosistem pesisir (Krause-Jensen & Duarte, 2016; Duarte et al., 2022; Luo et al., 2024). Selain itu, variabilitas lingkungan, termasuk perubahan musiman dan kondisi nutrien, diketahui memengaruhi komposisi biokimia dan aktivitas antioksidan rumput laut (Marinho-Soriano et al., 2006; Menaka & Wijesekara, 2025).

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh faktor lingkungan terhadap pertumbuhan dan kualitas *Gracilaria*, sebagian besar masih bersifat parsial dan belum mengintegrasikan hubungan antara kepadatan tebar, dinamika karbon, serta profil senyawa bioaktif secara komprehensif. Kajian yang menghubungkan parameter lingkungan (air dan sedimen), respons fisiologis (seperti klorofil dan densitas sel), serta hasil akhir berupa sifat fungsional biomassa masih terbatas, khususnya pada sistem budidaya tambak di wilayah tropis (Dahl et al., 2020; Xu et al., 2025). Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan dalam memahami mekanisme aliran karbon dari lingkungan menuju pembentukan kualitas biomassa secara menyeluruh.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menawarkan pendekatan integratif dengan menganalisis pengaruh kepadatan tebar terhadap profil senyawa bioaktif dan sifat fungsional *Gracilaria verrucosa* melalui keterkaitan antara air, sedimen, dan biomassa. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada integrasi antara analisis biogeokimia karbon, respons fisiologis, dan karakteristik biokimia untuk menjelaskan mekanisme pembentukan kualitas biomassa secara sistemik. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam

pengembangan strategi budidaya yang lebih efisien dan berkelanjutan. Sejalan dengan itu, tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh kepadatan tebar terhadap profil senyawa bioaktif dan sifat fungsional *Gracilaria verrucosa* pada sistem budidaya longline di tambak, serta mengidentifikasi hubungan antara faktor lingkungan, respons fisiologis, dan kualitas biokimia yang dihasilkan.

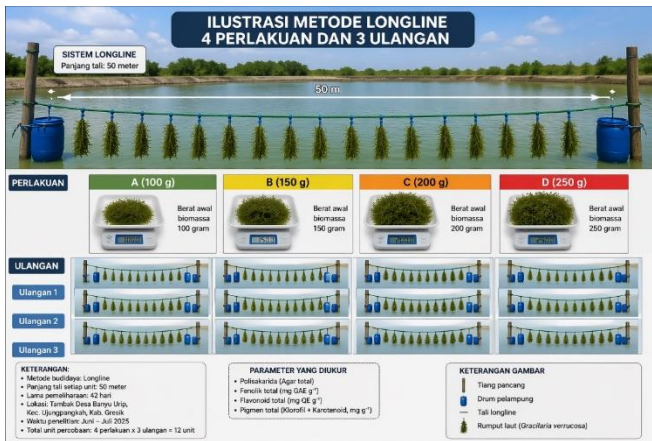
METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Juni–Juli 2025 selama 42 hari di tambak budidaya rumput laut di Desa Banyuurip. Analisis laboratorium dilakukan di Laboratorium Basah Universitas Muhammadiyah Gresik dan Laboratorium Teknologi Pertanian Universitas Brawijaya, Malang.

Rancangan Percobaan

Penelitian menggunakan rancangan eksperimen dengan empat perlakuan kepadatan biomassa awal *Gracilaria verrucosa* yang dibedakan berdasarkan berat awal, yaitu: A (100 g), B (150 g), C (200 g), dan D (250 g). Setiap perlakuan diulang sebanyak tiga kali sehingga diperoleh 12 unit percobaan. Budidaya dilakukan menggunakan metode longline dengan panjang tali 50 m pada setiap unit percobaan. Setiap unit longline merepresentasikan satu ulangan dari masing-masing perlakuan. Penempatan perlakuan dilakukan secara acak untuk meminimalkan pengaruh heterogenitas lingkungan tambak.



Gambar 1. Rancangan Penelitian Rumput Laut *Gracilaria verrucosa* dengan Berat Bibit yang Berbeda (Rahim, 2025).

Prosedur Budidaya

Bibit *Gracilaria verrucosa* yang digunakan memiliki kondisi seragam secara morfologis dan fisiologis untuk meminimalkan variabilitas awal antar perlakuan (Rejeki et al., 2018). Biomassa awal ditimbang menggunakan timbangan digital (± 0.01 g akurasi; Ohaus Corporation, USA) sesuai dengan perlakuan yang telah ditentukan. Rumput laut kemudian diikat pada tali longline dengan jarak tanam yang seragam untuk memastikan distribusi biomassa yang homogen dan mengurangi kompetisi ruang secara tidak merata (García-Poza et al., 2020). Pemeliharaan dilakukan selama 42 hari dalam kondisi lingkungan alami tambak, mengikuti praktik budidaya makroalga pada sistem perairan pesisir tropis (Duarte et al., 2022). Monitoring kualitas air meliputi suhu, salinitas, pH, dan oksigen terlarut dilakukan secara berkala menggunakan multiparameter water quality meter (YSI ProDSS, USA). Parameter kualitas air tersebut diketahui berperan penting dalam mengontrol proses fisiologis seperti fotosintesis, respirasi, dan asimilasi nutrisi pada rumput laut (Lobban &

Harrison, 1997; Krause-Jensen & Duarte, 2016).

Analisis Senyawa Bioaktif

Analisis senyawa bioaktif *Gracilaria verrucosa* meliputi polisakarida (agar total), fenolik total, flavonoid total, serta pigmen (klorofil dan karotenoid). Kandungan agar dianalisis menggunakan metode ekstraksi panas yang mengacu pada standar Food and Agriculture Organization dengan modifikasi, di mana sampel kering diekstraksi menggunakan air panas (90–100 °C), disaring, kemudian didinginkan hingga membentuk gel dan dikeringkan sampai berat konstan, selanjutnya dinyatakan sebagai persen berat kering (FAO, 1996). Fenolik total ditentukan menggunakan metode Folin–Ciocalteu method, dengan ekstraksi menggunakan metanol ($\geq 99.8\%$, Merck, Germany), direaksikan dengan reagen Folin–Ciocalteu (Sigma-Aldrich, USA) dan Na_2CO_3 ($\geq 99\%$, Merck, Germany), kemudian diukur absorbansinya pada 765 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UV-1800, Japan), dan hasil dinyatakan sebagai mg gallic acid equivalent per gram (mg GAE g⁻¹) (Singleton et al., 1999). Flavonoid total dianalisis menggunakan metode aluminium klorida (AlCl_3) dengan ekstraksi metanol ($\geq 99.8\%$, Merck, Germany), direaksikan dengan AlCl_3 ($\geq 98\%$, Sigma-Aldrich, USA), dan diukur pada panjang gelombang 415 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis yang sama, dengan hasil dinyatakan sebagai mg quercetin equivalent per gram (mg QE g⁻¹) (Chang et al., 2002). Pigmen total (klorofil dan karotenoid) dianalisis menggunakan metode spektrofotometri berdasarkan pendekatan Lichtenthaler, dengan ekstraksi menggunakan aseton ($\geq 99.5\%$, Merck, Germany), pengukuran absorbansi pada 470 nm, 645 nm, dan 663

nm, serta perhitungan konsentrasi menggunakan persamaan standar yang dinyatakan dalam mg g^{-1} berat kering (Lichtenthaler, 1987).

Analisis Data

Data hasil pengamatan dianalisis secara statistik menggunakan analisis varians satu arah (one-way ANOVA) untuk menguji pengaruh perlakuan kepadatan biomassa terhadap seluruh parameter yang diamati. Sebelum dilakukan analisis, data diuji terlebih dahulu terhadap asumsi normalitas menggunakan uji Shapiro–Wilk dan homogenitas varians menggunakan uji Levene untuk memastikan bahwa data memenuhi kriteria analisis parametrik (Mishra et al., 2019). Apabila hasil ANOVA menunjukkan perbedaan yang signifikan ($p < 0.05$), maka dilanjutkan dengan uji lanjut Tukey's Honestly Significant Difference (Tukey HSD) untuk mengetahui perbedaan nyata antar perlakuan secara spesifik (Gomez & Gomez, 1984). Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 26.0 (IBM Corp., USA) dan Minitab versi 21 (Minitab LLC, USA), yang umum digunakan dalam analisis desain percobaan dan pengujian hipotesis. Hasil analisis disajikan dalam bentuk rata-rata \pm standar deviasi, dengan tingkat signifikansi ditetapkan pada $\alpha = 0.05$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kepadatan biomassa *Gracilaria verrucosa* secara konsisten meningkatkan kualitas biokimia hingga mencapai titik optimum pada perlakuan C (200 g), sebelum mengalami penurunan pada kepadatan yang lebih tinggi (Tabel 1–4). Kandungan polisakarida (agar) meningkat signifikan dari 27.2% pada perlakuan A menjadi puncak 32.4% pada perlakuan C, kemudian menurun pada

perlakuan D (31.1%) (Tabel 1), mengindikasikan bahwa kepadatan moderat mampu mengoptimalkan alokasi karbon struktural, sedangkan kepadatan berlebih mulai menimbulkan kompetisi internal. Pola yang sama juga terlihat pada senyawa bioaktif lainnya, di mana fenolik dan flavonoid total mencapai nilai tertinggi pada perlakuan C (masing-masing $3.7 \text{ mg GAE g}^{-1}$ dan 2.7 mg QE g^{-1}) (Tabel 2 dan Tabel 3), yang mencerminkan respons metabolit sekunder terhadap kondisi lingkungan yang optimal namun tetap memberikan tekanan fisiologis ringan. Sementara itu, pigmen total (klorofil dan karotenoid) menunjukkan peningkatan progresif hingga perlakuan C (3.25 mg g^{-1}) sebelum menurun pada perlakuan D (Tabel 4), yang mengindikasikan efisiensi fotosintesis tertinggi pada kepadatan tersebut sebelum terjadi efek peneduhan. Kondisi morfologi dan kualitas awal biomassa yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2, yang memperlihatkan bibit *Gracilaria verrucosa* dengan kondisi seragam sebagai dasar perlakuan eksperimental. Secara keseluruhan, temuan ini mengungkap kebaruan bahwa kepadatan tebar tidak hanya mengontrol pertumbuhan, tetapi juga mengatur jalur alokasi karbon antara komponen struktural (agar) dan metabolit fungsional (fenolik, flavonoid, dan pigmen) dalam satu kerangka fisiologis terpadu. Dengan demikian, kepadatan 200 g dapat diidentifikasi sebagai titik keseimbangan optimal antara produktivitas dan kualitas biokimia, yang memberikan implikasi strategis dalam optimasi budidaya rumput laut berbasis kualitas, bukan sekadar kuantitas.



Gambar 2. Bibit rumput laut *Gracilaria verrucosa* yang digunakan untuk analisis senyawa bioaktif.

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa peningkatan perlakuan biomassa *Gracilaria verrucosa* dari 100 g hingga 200 g berkontribusi terhadap peningkatan kandungan polisakarida total (agar), dengan nilai tertinggi dicapai pada perlakuan C (200 g) sebesar $32,4 \pm 0,34\%$. Namun, pada perlakuan D (250 g), terjadi penurunan menjadi $31,1 \pm 0,54\%$, meskipun masih lebih tinggi dibandingkan perlakuan A dan B. Pola ini mengindikasikan adanya titik optimum dalam akumulasi agar, di mana peningkatan biomassa tidak selalu linier terhadap produksi polisakarida. Secara fisiologis, peningkatan kandungan agar hingga titik optimum dapat dikaitkan dengan kapasitas metabolisme sel rumput laut dalam mensintesis polisakarida struktural sebagai respons terhadap kondisi lingkungan dan ketersediaan nutrisi. Agar merupakan komponen utama dinding sel alga merah yang berfungsi dalam menjaga integritas sel serta sebagai cadangan karbon (Armisen & Galatas, 2009). Pada biomassa sedang (200 g), kemungkinan terjadi keseimbangan optimal antara pertumbuhan sel dan biosintesis polisakarida, sehingga akumulasi agar menjadi maksimal. Sebaliknya, penurunan kandungan agar

pada perlakuan 250 g diduga disebabkan oleh meningkatnya kompetisi intra-spesifik terhadap nutrisi dan cahaya. Kepadatan biomassa yang terlalu tinggi dapat menghambat penetrasi cahaya serta difusi nutrisi ke seluruh bagian talus, sehingga proses fotosintesis dan sintesis metabolit sekunder, termasuk agar, menjadi kurang efisien (Lobban & Harrison, 1994). Selain itu, kondisi ini juga dapat memicu stres fisiologis yang menyebabkan alokasi energi lebih difokuskan pada pemeliharaan sel daripada produksi senyawa cadangan. Perbedaan notasi Tukey menunjukkan bahwa perlakuan B dan C tidak berbeda nyata, namun keduanya berbeda signifikan terhadap perlakuan lainnya. Hal ini memperkuat indikasi bahwa kisaran 150–200 g merupakan rentang biomassa yang efektif untuk menghasilkan kandungan agar tinggi tanpa menimbulkan efek negatif dari kepadatan berlebih. Dengan demikian, pendekatan optimasi biomassa menjadi penting dalam sistem budidaya untuk meningkatkan kualitas hasil, bukan hanya kuantitas produksi. Temuan ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa produksi agar pada alga merah sangat dipengaruhi oleh faktor kepadatan, intensitas cahaya, serta ketersediaan nutrisi makro seperti nitrogen dan fosfor (Craigie, 2011; Hurtado et al., 2014). Oleh karena itu, strategi budidaya yang mengatur kepadatan tanam secara optimal dapat menjadi kunci dalam meningkatkan nilai ekonomi *Gracilaria verrucosa* sebagai sumber agar komersial.

Tabel 1. Kandungan polisakarida total (agar) pada *Gracilaria verrucosa* (% berat kering).

Perlakuan	Rata-rata \pm SD	Notasi
A (100 g)	27.2 \pm 0.31	a
B (150 g)	29.8 \pm 0.48	b
C (200 g)	32.4 \pm 0.34	b
D (250 g)	31.1 \pm 0.54	c

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa kandungan fenolik total pada *Gracilaria verrucosa* mengalami peningkatan dari perlakuan A (2,7 \pm 0,14 mg GAE g⁻¹) ke perlakuan C (3,7 \pm 0,19 mg GAE g⁻¹), kemudian sedikit menurun pada perlakuan D (3,4 \pm 0,15 mg GAE g⁻¹). Meskipun demikian, hasil uji lanjut Tukey mengindikasikan bahwa perlakuan B, C, dan D tidak berbeda nyata, tetapi ketiganya berbeda signifikan dibandingkan perlakuan A. Pola ini menunjukkan adanya respons peningkatan senyawa fenolik hingga kisaran optimum, sebelum cenderung stabil atau sedikit menurun. Secara biokimia, senyawa fenolik pada alga merah berperan sebagai metabolit sekunder yang terkait erat dengan mekanisme pertahanan terhadap stres lingkungan, seperti radiasi cahaya tinggi, fluktuasi salinitas, maupun tekanan oksidatif. Peningkatan kandungan fenolik dari perlakuan A ke C mengindikasikan bahwa kondisi perlakuan mendorong aktivasi jalur biosintesis fenolik, kemungkinan melalui peningkatan aktivitas enzim fenilalanin amonia-liase (PAL), yang merupakan kunci dalam pembentukan senyawa fenolik (Fleurence & Levine, 2016). Pada kondisi ini, alga mengalokasikan lebih banyak energi untuk sintesis senyawa antioksidan guna

melindungi struktur sel dari kerusakan oksidatif. Namun, pada perlakuan D, terjadi kecenderungan penurunan kandungan fenolik meskipun tidak berbeda nyata secara statistik. Hal ini dapat diinterpretasikan sebagai indikasi bahwa peningkatan intensitas perlakuan telah melampaui kondisi optimum, sehingga efisiensi metabolisme sekunder menurun. Pada kepadatan atau tekanan lingkungan yang terlalu tinggi, energi metabolik cenderung dialihkan untuk mempertahankan fungsi dasar sel (homeostasis), bukan untuk sintesis metabolit sekunder seperti fenolik (Holdt & Kraan, 2011). Dengan kata lain, terjadi trade-off antara pertumbuhan, pemeliharaan sel, dan produksi senyawa bioaktif. Menariknya, nilai tertinggi pada perlakuan C menegaskan bahwa kondisi tersebut merupakan titik optimal untuk akumulasi fenolik. Hal ini penting secara aplikatif karena kandungan fenolik berkorelasi dengan aktivitas antioksidan yang bernilai tinggi dalam industri pangan, farmasi, dan kosmetik. Dengan demikian, optimasi kondisi budidaya tidak hanya berpengaruh terhadap produktivitas biomassa, tetapi juga kualitas bioaktif dari *Gracilaria verrucosa*. Temuan ini konsisten dengan berbagai studi yang melaporkan bahwa kandungan fenolik pada makroalga sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan kondisi stres moderat, yang justru dapat meningkatkan produksi senyawa bioaktif (Holdt & Kraan, 2011; Cox et al., 2010). Oleh karena itu, pendekatan “controlled stress” dalam budidaya dapat menjadi strategi potensial untuk meningkatkan nilai fungsional rumput laut tanpa mengorbankan pertumbuhan secara signifikan.

Tabel 2. Kandungan fenolik total pada *Gracilaria verrucosa* (mg GAE g⁻¹ berat kering).

Perlakuan	Rata-rata ± SD	Notasi
A	2.7 ± 0.14	a
B	3.1 ± 0.18	b
C	3.7 ± 0.19	b
D	3.4 ± 0.15	b

Hasil pada Tabel 3 menunjukkan bahwa kandungan flavonoid total pada *Gracilaria verrucosa* meningkat secara bertahap dari perlakuan A (1,85 ± 0,05 mg QE g⁻¹) hingga mencapai nilai tertinggi pada perlakuan C (2,7 ± 0,1 mg QE g⁻¹), kemudian mengalami penurunan pada perlakuan D (2,45 ± 0,05 mg QE g⁻¹). Uji lanjut Tukey memperlihatkan adanya perbedaan nyata antar perlakuan, di mana setiap perlakuan memiliki notasi berbeda kecuali B dan D yang berada pada kelompok yang sama. Hal ini menegaskan bahwa respons kandungan flavonoid bersifat sensitif terhadap perubahan perlakuan dan menunjukkan pola optimum pada kondisi tertentu. Secara fisiologis, flavonoid merupakan bagian dari senyawa fenolik yang berfungsi sebagai antioksidan alami dan pelindung terhadap stres oksidatif. Peningkatan signifikan dari perlakuan A ke C mengindikasikan bahwa kondisi perlakuan mampu merangsang jalur biosintesis flavonoid secara optimal. Dalam alga, sintesis flavonoid umumnya berkaitan dengan peningkatan aktivitas enzim dalam jalur fenilpropanoid, yang dipicu oleh faktor lingkungan seperti intensitas cahaya, ketersediaan nutrisi, dan tekanan oksidatif (Kumar et al., 2008). Pada kondisi optimum (perlakuan C), alokasi energi untuk

produksi metabolit sekunder tampaknya berada pada tingkat maksimal, sehingga menghasilkan akumulasi flavonoid tertinggi. Penurunan pada perlakuan D menunjukkan adanya indikasi bahwa kondisi yang terlalu tinggi atau padat dapat menekan efisiensi sintesis flavonoid. Ketika organisme mengalami stres berlebih, energi metabolik cenderung dialihkan untuk mempertahankan fungsi vital sel dibandingkan untuk produksi senyawa bioaktif. Fenomena ini mencerminkan adanya trade-off antara pertumbuhan dan produksi metabolit sekunder, yang umum terjadi pada makroalga (Holdt & Kraan, 2011). Dengan demikian, peningkatan perlakuan tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kandungan flavonoid. Jika dibandingkan dengan kandungan fenolik total (Tabel 2), pola peningkatan flavonoid menunjukkan kecenderungan yang sejalan, di mana perlakuan C juga menjadi titik optimum. Hal ini menguatkan bahwa flavonoid merupakan bagian penting dari fraksi fenolik yang berkontribusi terhadap kapasitas antioksidan pada *Gracilaria verrucosa*. Namun, perbedaan respons antar perlakuan juga menunjukkan bahwa komposisi senyawa fenolik tidak homogen, sehingga masing-masing fraksi (total fenolik vs flavonoid) dapat memiliki dinamika biosintesis yang berbeda tergantung kondisi lingkungan. Secara aplikatif, tingginya kandungan flavonoid pada perlakuan C memberikan implikasi penting dalam pengembangan produk berbasis rumput laut sebagai sumber antioksidan alami. Optimalisasi kondisi budidaya yang mampu meningkatkan kandungan flavonoid dapat meningkatkan nilai tambah *Gracilaria verrucosa*, terutama dalam industri pangan fungsional dan farmasi. Oleh karena itu, pendekatan

manajemen budidaya berbasis kualitas bioaktif menjadi semakin relevan dibandingkan sekadar mengejar produksi biomassa.

Tabel 3. Kandungan flavonoid total pada *Gracilaria verrucosa* (mg QE g⁻¹ berat kering).

Perlakuan	Rata-rata ± SD	Notasi
A	1.85 ± 0.03	a
B	2.25 ± 0.02	b
C	2.7 ± 0.1	c
D	2.45 ± 0.05	b

Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa kandungan pigmen total (klorofil dan karotenoid) pada *Gracilaria verrucosa* meningkat secara konsisten dari perlakuan A (2,45 ± 0,03 mg g⁻¹) hingga mencapai nilai maksimum pada perlakuan C (3,25 ± 0,055 mg g⁻¹), kemudian mengalami sedikit penurunan pada perlakuan D (3,05 ± 0,047 mg g⁻¹). Uji Tukey memperlihatkan perbedaan nyata antar perlakuan, dengan setiap kelompok memiliki notasi berbeda kecuali B dan D yang berada pada kelompok yang sama. Pola ini mengindikasikan adanya titik optimum pada kepadatan biomassa tertentu yang mendukung akumulasi pigmen fotosintetik secara maksimal. Peningkatan kandungan pigmen dari perlakuan A ke C berkaitan erat dengan peningkatan kapasitas fotosintesis. Klorofil berperan utama dalam penyerapan cahaya untuk proses fotosintesis, sedangkan karotenoid berfungsi sebagai pigmen aksesori sekaligus pelindung terhadap kerusakan akibat radiasi berlebih melalui mekanisme fotoproteksi. Pada kondisi biomassa sedang (perlakuan C),

distribusi cahaya dan nutrien diduga masih optimal sehingga mendorong sintesis pigmen secara efisien. Kondisi ini memungkinkan *Gracilaria verrucosa* memaksimalkan penyerapan energi cahaya tanpa mengalami stres fotooksidatif (Lobban & Harrison, 1994). Penurunan kandungan pigmen pada perlakuan D mengindikasikan bahwa peningkatan kepadatan biomassa mulai memberikan efek negatif, terutama melalui mekanisme self-shading (penaungan antar talus). Kepadatan yang terlalu tinggi dapat mengurangi penetrasi cahaya ke lapisan bawah, sehingga menurunkan sintesis klorofil. Selain itu, keterbatasan nutrien akibat kompetisi yang lebih intens juga dapat menghambat pembentukan pigmen (Falkowski & Raven, 2007). Dalam kondisi ini, alga cenderung menyesuaikan diri dengan menurunkan kandungan pigmen untuk mengurangi kebutuhan energi dalam proses fotosintesis yang kurang efisien. Menariknya, pola kandungan pigmen total ini sejalan dengan hasil pada kandungan flavonoid dan fenolik (Tabel 2 dan 3), di mana perlakuan C juga menunjukkan nilai optimum. Hal ini mengindikasikan adanya keterkaitan antara efisiensi fotosintesis dan produksi metabolit sekunder. Pigmen fotosintetik yang optimal akan meningkatkan produksi energi (ATP dan NADPH), yang selanjutnya mendukung jalur biosintesis senyawa bioaktif, termasuk fenolik dan flavonoid. Dengan demikian, kondisi lingkungan yang mendukung sintesis pigmen juga secara tidak langsung meningkatkan kualitas biokimia *Gracilaria verrucosa*. Secara aplikatif, hasil ini menegaskan bahwa pengaturan kepadatan biomassa merupakan faktor kunci dalam budidaya rumput laut, tidak hanya untuk meningkatkan pertumbuhan tetapi juga untuk mengoptimalkan kandungan pigmen

yang berperan penting dalam nilai nutrisi dan aktivitas antioksidan. Karotenoid, misalnya, memiliki potensi sebagai agen antioksidan dan provitamin A, sehingga peningkatan kandungan pigmen dapat meningkatkan nilai tambah produk rumput laut di pasar pangan fungsional dan industri kesehatan.

Tabel 4. Kandungan pigmen total (klorofil dan karotenoid, mg g⁻¹ berat kering) pada *Gracilaria verrucosa* pada berbagai perlakuan kepadatan biomassa.

Perlakuan	Rata-rata ± SD	Notasi
A	2.45 ± 0.03	a
B	2.85 ± 0.012	b
C	3.25 ± 0.055	c
D	3.05 ± 0.047	b

KESIMPULAN DAN SARAN

Peningkatan kepadatan biomassa *Gracilaria verrucosa* terbukti tidak hanya memengaruhi kuantitas pertumbuhan, tetapi juga secara fundamental mengatur kualitas biokimia melalui mekanisme alokasi energi dan karbon yang terintegrasi. Secara umum, kepadatan biomassa pada tingkat moderat menghasilkan kondisi fisiologis paling efisien, ditandai oleh optimalnya sintesis komponen struktural seperti agar, serta meningkatnya akumulasi metabolit fungsional meliputi fenolik, flavonoid, dan pigmen fotosintetik. Ketika kepadatan melebihi batas optimum, terjadi pergeseran alokasi energi menuju pemeliharaan sel akibat meningkatnya kompetisi terhadap cahaya dan nutrisi, sehingga menurunkan efisiensi biosintesis senyawa bioaktif. Temuan ini mengarah pada suatu generalisasi bahwa terdapat titik keseimbangan ekologis-fisiologis dalam

sistem budidaya rumput laut, di mana interaksi antara kepadatan biomassa dan faktor lingkungan menentukan arah pemanfaatan energi metabolik antara pertumbuhan, struktur, dan fungsi protektif. Dengan demikian, pengelolaan kepadatan biomassa yang tepat dapat dipandang sebagai strategi kunci dalam mengoptimalkan kualitas biokimia *Gracilaria verrucosa*, sekaligus memperkuat pendekatan budidaya berbasis kualitas sebagai paradigma yang lebih adaptif dan bernilai tambah tinggi dibandingkan orientasi produksi semata.

DAFTAR PUSTAKA

- Armisen, R., & Galatas, F. (2015). Agar. In G. O. Phillips & P. A. Williams (Eds.), *Handbook of Hydrocolloids* (3rd ed., pp. 207–227). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.00007-6>
- Chang, C., Yang, M., Wen, H., & Chern, J. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178–182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>
- Cox, S., Abu-Ghannam, N., & Gupta, S. (2017). An assessment of the antioxidant and antimicrobial activity of six species of edible Irish seaweeds. *International Food Research Journal*, 24(1), 205–220.
- Dahl, M., Paul, N. A., & de Nys, R. (2020). Seaweed cultivation for sustainable aquaculture: Biochemical responses and environmental interactions. *Algal Research*, 49, 101954.

- <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101954>
- Duarte, C. M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A., & Krause-Jensen, D. (2022). Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? *Frontiers in Marine Science*, *9*, 865040. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.865040>
- FAO. (2016). *The global status of seaweed production, trade and utilization*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Diakses pada 20 Juni 2025, dari <https://www.fao.org>
- Fleurence, J., & Levine, I. (2016). *Seaweed in Health and Disease Prevention*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04900-1>
- García-Poza, S., Leandro, A., Cotas, J., Cotas, C., Marques, J. C., Pereira, L., & Gonçalves, A. M. M. (2020). The evolution road of seaweed aquaculture: Cultivation technologies and the industry 4.0. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(17), 6528. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176528>
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical Procedures for Agricultural Research* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Holdt, S. L., & Kraan, S. (2011). Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology*, *23*(3), 543–597. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9632-5>
- Jayakody, K. K. R., Kumari, S. S., & Ranasinghe, P. (2022). Nutritional composition and bioactive properties of red seaweeds: A review. *Journal of Applied Phycology*, *34*(5), 2561–2575. <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02785-4>
- Krause-Jensen, D., & Duarte, C. M. (2016). Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*, *9*(10), 737–742. <https://doi.org/10.1038/ngeo2790>
- Leakey, R. J. G., et al. (2009). Environmental control of phytoplankton and macroalgae productivity. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *368*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2008.09.012>
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, *148*, 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Lobban, C. S., & Harrison, P. J. (1997). *Seaweed Ecology and Physiology*. Cambridge University Press.
- Luo, M., Kim, J. K., & Yarish, C. (2024). Seaweed aquaculture and carbon dynamics in coastal ecosystems. *Algal Research*, *74*, 103187. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103187>
- Marinho-Soriano, E., Fonseca, P. C., Carneiro, M. A. A., & Moreira, W. S. C. (2006). Seasonal variation in the chemical composition of two tropical seaweeds. *Bioresource Technology*, *97*(18), 2402–2406.

- <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.10.014>
- Menaka, S., & Wijesekara, I. (2025). Environmental variability and antioxidant properties of tropical seaweeds. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(2), 145.
<https://doi.org/10.3390/jmse13020145>
- Mishra, P., Singh, U., Pandey, C. M., Mishra, P., & Pandey, G. (2019). Application of student's t-test, ANOVA, and covariance. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(4), 407–411.
https://doi.org/10.4103/aca.ACA_94_19
- Rejeki, S., Aryati, R. W., & Widowati, I. (2018). Effect of seed weight and planting distance on growth of *Gracilaria verrucosa*. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 11(4), 1231–1239.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178.
[https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Xu, Z., Zou, D., & Gao, K. (2025). Interactive effects of environmental factors on macroalgal physiology and biochemistry. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1456789.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1456789>