

KETERKAITAN YANG DIPENGARUHI KEPADATAN ANTARA PERTUMBUHAN BIOMASSA DAN DINAMIKA C–N–P AIR PADA BUDIDAYA LONGLINE *Gracilaria verrucosa* DI TAMBAK EKSTENSIF

Andi Rahmad Rahim^{1*}

¹Dosen Program Studi Budidaya Perikanan, Fakultas Pertanian, Universitas Muhammadiyah
Gresik

*Email: andirahmad@umg.ac.id

ABSTRACT

This study aimed to analyze the effect of different initial stocking weights on the biomass growth of *Gracilaria verrucosa* and the dynamics of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in an extensive pond longline cultivation system. The experiment was conducted for 42 days in a brackishwater pond located in Pulokerto Village, Pasuruan, East Java, Indonesia, using a completely randomized design with four initial stocking weight treatments: 100 g, 150 g, 200 g, and 250 g, each with three replicates. Observed parameters included absolute seaweed biomass and water carbon, nitrogen, and phosphorus contents at the end of cultivation. Data were analyzed using ANOVA followed by Tukey's HSD test at a 95% confidence level. The results showed that initial stocking weight significantly affected all observed parameters. Absolute biomass increased from 313.3 g in the 100 g treatment to 471.7 g in the 250 g treatment, although the 200 g and 250 g treatments were not significantly different. Meanwhile, water carbon, nitrogen, and phosphorus contents decreased with increasing stocking weight. Water carbon declined from 43.17 to 38.20 mg L⁻¹, nitrogen from 1.82 to 1.28 mg L⁻¹, and phosphorus from 0.142 to 0.098 mg L⁻¹. It was concluded that the 200 g stocking weight was the most efficient level, producing high biomass with lower seed input while enhancing dissolved nutrient and carbon uptake.

Keywords: *Gracilaria verrucosa*, biomass, stocking density, carbon, nitrogen, phosphorus, extensive pond

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh berbagai bobot tebar awal terhadap pertumbuhan biomassa *Gracilaria verrucosa* serta dinamika karbon (C), nitrogen (N), dan fosfor (P) pada tambak ekstensif dengan sistem longline. Penelitian dilaksanakan selama 42 hari di tambak air payau Desa Pulokerto, Pasuruan, Jawa Timur, menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan empat perlakuan bobot tebar awal, yaitu 100 g, 150 g, 200 g, dan 250 g, masing-masing tiga ulangan. Parameter yang diamati meliputi biomassa mutlak rumput laut serta kandungan karbon, nitrogen, dan fosfor air pada akhir pemeliharaan. Data dianalisis menggunakan ANOVA dan uji lanjut Tukey HSD pada taraf kepercayaan 95%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bobot tebar awal berpengaruh nyata terhadap seluruh parameter yang diamati. Biomassa mutlak meningkat dari 313,3 g pada perlakuan 100 g menjadi 471,7 g pada perlakuan 250 g, namun perlakuan 200 g dan 250 g tidak berbeda nyata. Sementara itu, kandungan karbon, nitrogen, dan fosfor air menurun seiring peningkatan bobot tebar. Nilai karbon air menurun dari 43,17 menjadi 38,20 mg L⁻¹, nitrogen dari 1,82 menjadi 1,28 mg L⁻¹, dan fosfor dari 0,142 menjadi 0,098 mg L⁻¹. Disimpulkan bahwa bobot tebar 200 g merupakan tingkat paling efisien karena menghasilkan biomassa tinggi dengan penggunaan bibit lebih rendah, sekaligus meningkatkan penyerapan unsur hara dan karbon terlarut.

Kata kunci: *Gracilaria verrucosa*, biomassa, kepadatan tebar, karbon, nitrogen, fosfor, tambak ekstensif.

PENDAHULUAN

Akuakultur rumput laut, khususnya *Gracilaria verrucosa*, memiliki peran strategis dalam sistem budidaya pesisir karena fungsi gandanya sebagai komoditas bernilai ekonomi tinggi (misalnya bahan baku agar) serta sebagai komponen ekologis yang berperan dalam siklus karbon dan hara. Makroalga memiliki kemampuan tinggi dalam menyerap karbon anorganik terlarut serta unsur hara penting seperti nitrogen dan fosfor, sehingga berfungsi sebagai biofilter alami dan berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim melalui jalur *blue carbon* (Duarte et al., 2017; Krause-Jensen & Duarte, 2016; Duarte et al., 2020). Pada sistem tambak ekstensif, peran ini menjadi semakin penting karena interaksi biotik dan abiotik berlangsung dengan pengendalian nutrien eksternal yang minimal, sehingga proses internal ekosistem menjadi faktor utama yang menentukan produktivitas dan dinamika hara.

Kinerja pertumbuhan *Gracilaria verrucosa* sangat berkaitan erat dengan kondisi lingkungan dan praktik budidaya, terutama kepadatan tebar awal. Kepadatan biomassa merupakan faktor penting yang memengaruhi pemanfaatan sumber daya seperti cahaya, ruang, dan ketersediaan nutrien. Kepadatan tebar yang rendah sering kali menyebabkan penyerapan nutrien kurang optimal karena jumlah biomassa terbatas, sedangkan kepadatan yang terlalu tinggi dapat meningkatkan persaingan, mengurangi penetrasi cahaya, dan membatasi difusi nutrien, sehingga pada akhirnya menekan efisiensi pertumbuhan (García-Poza et al., 2020; Duarte et al., 2022). Oleh karena itu, penentuan kepadatan tebar yang optimal sangat penting untuk memaksimalkan produksi biomassa sekaligus menjaga efisiensi pemanfaatan sumber daya.

Selain memengaruhi pertumbuhan, budidaya rumput laut juga memiliki implikasi penting terhadap kualitas air, khususnya dalam mengatur konsentrasi karbon (C), nitrogen (N), dan fosfor (P) pada sistem budidaya. Unsur-unsur tersebut merupakan komponen utama dalam siklus biogeokimia

perairan dan sangat berkaitan dengan proses eutrofikasi. Rumput laut mampu mengasimilasi nutrisi terlarut secara langsung dari kolom air, sehingga dapat menurunkan beban nutrisi dan memperbaiki kualitas air (Chopin et al., 2013; Jiang et al., 2023). Dengan demikian, perubahan konsentrasi C–N–P air selama masa budidaya dapat digunakan sebagai indikator efisiensi penyerapan nutrisi dan fungsi ekosistem.

Penelitian sebelumnya umumnya lebih banyak berfokus pada produksi biomassa, rendemen agar, atau komposisi nutrisi jaringan *Gracilaria*, sedangkan kajian mengenai hubungan simultan antara kepadatan tebar, performa pertumbuhan, dan dinamika nutrisi di perairan sekitar masih relatif terbatas, terutama pada sistem tambak ekstensif dengan metode longline. Pemahaman terhadap hubungan ini sangat penting untuk mengembangkan praktik akuakultur berkelanjutan yang mengintegrasikan efisiensi produksi dengan pengelolaan lingkungan (Deng et al., 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh berbagai kepadatan tebar awal terhadap performa pertumbuhan *Gracilaria verrucosa* serta dinamika konsentrasi karbon, nitrogen, dan fosfor pada perairan tambak ekstensif menggunakan sistem budidaya longline. Hipotesis penelitian ini adalah bahwa peningkatan kepadatan biomassa akan meningkatkan pertumbuhan dan penyerapan nutrisi hingga mencapai ambang optimum, kemudian menurun setelah melewati batas tersebut akibat meningkatnya persaingan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah dalam menentukan kepadatan tebar optimal guna mencapai produktivitas tinggi sekaligus meningkatkan efisiensi biogeokimia pada sistem budidaya rumput laut berkelanjutan.

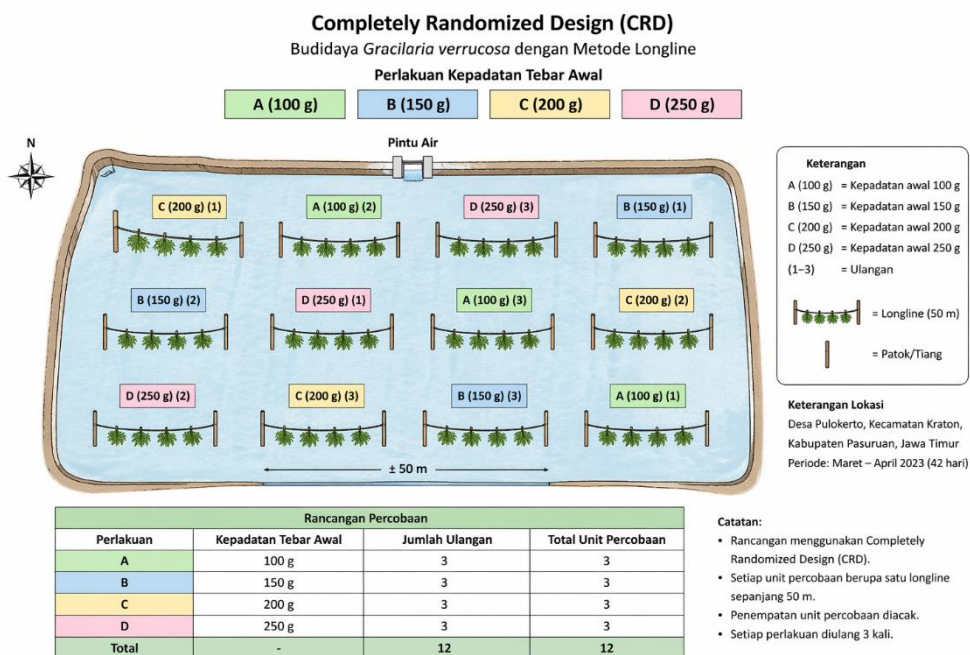
METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 42 hari, dari bulan Maret hingga April 2023, di tambak air payau ekstensif yang berlokasi di Desa Pulokerto, Kecamatan Kraton, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur, Indonesia. Sistem tersebut mewakili lingkungan akuakultur ekstensif yang khas, ditandai dengan minimnya input eksternal dan ketergantungan yang tinggi terhadap proses daur hara alami (Duarte et al., 2020).

Rancangan Percobaan

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri atas empat perlakuan kepadatan tebar awal *Gracilaria verrucosa*, yaitu A (100 g), B (150 g), C (200 g), dan D (250 g). Masing-masing perlakuan diulang sebanyak tiga kali sehingga terdapat total 12 unit percobaan. Setiap unit percobaan berupa satu tali longline sepanjang 50 m yang dipasang di tambak. Perlakuan ditempatkan secara acak untuk meminimalkan heterogenitas lingkungan dan bias percobaan (García-Poza et al., 2020).



Gambar 1. Denah Rancangan Penelitian (Rancangan Acak Lengkap)

Prosedur Budidaya

Talus *Gracilaria verrucosa* yang seragam dan sehat dipilih untuk mengurangi variasi awal antar perlakuan (Rejeki et al., 2018). Biomassa ditimbang sesuai tingkat perlakuan, kemudian diikat secara merata sepanjang tali longline dengan jarak yang konsisten agar distribusi homogen dan mengurangi persaingan yang tidak merata terhadap cahaya serta nutrisi (García-Poza et al., 2020). Budidaya dilakukan pada kondisi alami tambak tanpa penambahan pupuk maupun input nutrisi buatan, sehingga dinamika nutrisi alami mengatur proses pertumbuhan dan penyerapan unsur hara (Duarte et al., 2022).

Pengukuran Pertumbuhan

Pada akhir masa pemeliharaan selama 42 hari, biomassa dari setiap unit percobaan dipanen dan ditimbang. Pertumbuhan mutlak (g) dihitung sebagai selisih antara biomassa akhir dan biomassa awal. Pendekatan ini umum digunakan untuk mengevaluasi performa pertumbuhan pada penelitian budidaya rumput laut (Marinho-Soriano et al., 2006).

Pengambilan Sampel Air dan Analisis Nutrien

Sampel air diambil dari setiap unit percobaan pada akhir periode budidaya untuk mengevaluasi dinamika nutrisi. Konsentrasi karbon (C) ditentukan menggunakan metode pembakaran kering (*dry combustion*), nitrogen (N) dianalisis dengan metode Kjeldahl, dan fosfor (P) diukur menggunakan analisis spektrofotometri dengan metode molibdenum biru setelah proses destruksi asam (Jayakody et al., 2022; Shetty & Goyal, 2022; Zhang et al., 2022). Metode standar tersebut banyak digunakan dalam studi biogeokimia perairan untuk mengukur konsentrasi nutrisi secara akurat.

Analisis Data

Data pertumbuhan biomassa dan konsentrasi nutrisi (C, N, dan P) dianalisis menggunakan analisis ragam satu arah (*one-way ANOVA*) untuk mengetahui pengaruh perbedaan kepadatan tebar. Apabila terdapat perbedaan nyata ($p < 0,05$), dilanjutkan dengan uji lanjut Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) untuk membandingkan antar perlakuan (Mishra et al., 2019). Analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak Minitab. Selain itu, analisis deskriptif dilakukan untuk

mengidentifikasi pola dan hubungan antara kepadatan biomassa, performa pertumbuhan, serta dinamika nutrisi (Xu et al., 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Biomassa Mutlak Rumpuk Laut

Biomassa mutlak rumput laut meningkat seiring bertambahnya bobot tebar awal dari perlakuan A hingga D. Nilai terendah diperoleh pada perlakuan A (313,3 g), kemudian meningkat nyata pada B (403,3 g) dan C (461,7 g). Biomassa tertinggi tercatat pada perlakuan D (471,7 g), namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan C. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan bobot tebar hingga 200 g masih efektif meningkatkan produksi biomassa, sedangkan penambahan hingga 250 g tidak lagi memberikan peningkatan yang signifikan. Dengan demikian, bobot tebar 200 g merupakan tingkat yang paling efisien karena menghasilkan biomassa tinggi tanpa kelebihan padat tebar.

Tabel 1. Biomassa mutlak rumput laut pada berbagai perlakuan bobot tebar awal (g).

Treatment	Mean \pm SD	HSD Notation	Significance
A (100 g)	313.3 \pm 7.3	c	Significantly different
B (150 g)	403.3 \pm 7.7	b	Significantly different
C (200 g)	461.7 \pm 7.1	a	Not different from D
D (250 g)	471.7 \pm 7.2	a	Not different from C

Keterangan: Nilai disajikan sebagai rata-rata \pm standar deviasi ($n = 3$). Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Tukey's HSD pada taraf kepercayaan 95% ($p < 0,05$).

Biomassa mutlak rumput laut meningkat seiring kenaikan bobot tebar awal dari 100 g hingga 250 g. Perlakuan A menghasilkan biomassa terendah, kemudian meningkat nyata pada perlakuan B dan C, sedangkan perlakuan D memberikan nilai tertinggi namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan C. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan kepadatan tebar pada fase awal mampu menambah total biomassa melalui peningkatan jumlah talus produktif dan pemanfaatan ruang budidaya yang lebih optimal. Pada kepadatan sedang, rumput laut masih mampu memanfaatkan cahaya, nutrisi, dan sirkulasi air secara efisien sehingga pertumbuhan total meningkat (García-Poza et al., 2020).

Tidak adanya perbedaan nyata antara perlakuan C dan D mengindikasikan bahwa sistem budidaya mulai mencapai titik jenuh biologis. Pada kepadatan tinggi, kompetisi antar talus terhadap cahaya, ruang, dan difusi nutrisi menjadi lebih intensif sehingga laju pertumbuhan individu menurun walaupun biomassa total masih tinggi. Penumpukan biomassa juga dapat mengurangi penetrasi cahaya ke bagian bawah rumpuk dan menurunkan efisiensi fotosintesis, yang pada akhirnya membatasi peningkatan produksi lebih lanjut (Duarte et al., 2022).

Hasil ini menegaskan bahwa peningkatan bobot tebar tidak selalu linier terhadap hasil panen. Terdapat kisaran optimum dimana biomassa total maksimum dapat dicapai tanpa menimbulkan kompetisi berlebihan. Berdasarkan data ini, bobot tebar 200 g merupakan tingkat paling efisien karena menghasilkan biomassa tinggi dan setara secara statistik dengan 250 g, tetapi dengan penggunaan bibit yang lebih rendah. Prinsip kepadatan optimum seperti ini penting diterapkan dalam budidaya rumput laut berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi input (Deng et al., 2024).

Kandungan Karbon Air

Kandungan karbon air menurun secara konsisten seiring meningkatnya bobot tebar awal rumput laut. Nilai tertinggi terdapat pada perlakuan A (43,17 mg L⁻¹), kemudian menurun nyata pada perlakuan B (41,80 mg L⁻¹), C (40,00 mg L⁻¹), dan terendah pada perlakuan D (38,20 mg L⁻¹). Seluruh

perlakuan menunjukkan perbedaan nyata satu sama lain. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi biomassa rumput laut yang ditebar, semakin besar kemampuan sistem budidaya dalam menyerap karbon terlarut dari perairan. Peningkatan jumlah talus menyebabkan aktivitas fotosintesis dan asimilasi karbon berlangsung lebih intensif, sehingga konsentrasi karbon tersisa di air menjadi lebih rendah. Dengan demikian, kepadatan tebar yang lebih tinggi berperan dalam meningkatkan pemanfaatan karbon serta memperkuat fungsi rumput laut sebagai penyerap karbon di tambak budidaya.

Tabel 2. Kandungan karbon air pada berbagai perlakuan bobot tebar awal (mg L^{-1}).

Treatment	Mean \pm SD	HSD Notation	Significance
A (100 g)	43.17 \pm 0.35	a	Significantly different
B (150 g)	41.80 \pm 0.30	b	Significantly different
C (200 g)	40.00 \pm 0.20	c	Significantly different
D (250 g)	38.20 \pm 0.30	d	Significantly different

Keterangan: Nilai disajikan sebagai rata-rata \pm standar deviasi ($n = 3$). Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Tukey's HSD pada taraf kepercayaan 95% ($p < 0,05$).

Penurunan kandungan karbon air pada kepadatan tebar yang lebih tinggi menunjukkan bahwa peningkatan biomassa rumput laut memperbesar kapasitas penyerapan karbon anorganik terlarut dari kolom air. Semakin banyak talus yang aktif berfotosintesis, semakin besar kebutuhan karbon sebagai bahan baku pembentukan jaringan, sehingga karbon di perairan dimanfaatkan lebih cepat dan lebih efisien. Kondisi ini menegaskan peran *Gracilaria verrucosa* sebagai komponen biologis penting dalam pengikatan karbon pada sistem tambak pesisir (Krause-Jensen & Duarte, 2016). Selain melalui fotosintesis, penurunan karbon air juga berkaitan dengan meningkatnya stabilisasi pH dan keseimbangan sistem karbonat akibat aktivitas makroalga. Penyerapan CO_2 bebas dan bikarbonat oleh rumput laut dapat menggeser dinamika karbon terlarut sehingga konsentrasi karbon tersedia di air menurun. Mekanisme ini umum terjadi pada budidaya makroalga dengan biomassa tinggi, terutama pada perairan dangkal dengan intensitas cahaya cukup baik (Duarte et al., 2017). Dari sudut pandang budidaya, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kepadatan tebar dapat memperkuat fungsi ekologis tambak sebagai unit serapan karbon sekaligus sistem produksi. Rumput laut tidak hanya menghasilkan biomassa ekonomis, tetapi juga membantu menurunkan akumulasi karbon terlarut yang berpotensi memengaruhi kualitas air. Dengan demikian, pengaturan kepadatan tebar yang tepat dapat diarahkan tidak hanya untuk produktivitas panen, tetapi juga untuk meningkatkan efisiensi biogeokimia dan kontribusi terhadap konsep akuakultur rendah emisi (Duarte et al., 2020; Deng et al., 2024).

Kandungan Nitrogen Air

Kandungan nitrogen air menurun secara bertahap seiring meningkatnya bobot tebar awal rumput laut. Nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan A ($1,82 \text{ mg L}^{-1}$), kemudian menurun nyata pada perlakuan B ($1,62 \text{ mg L}^{-1}$), C ($1,40 \text{ mg L}^{-1}$), dan terendah pada perlakuan D ($1,28 \text{ mg L}^{-1}$). Seluruh perlakuan menunjukkan perbedaan nyata satu sama lain berdasarkan uji Tukey's HSD ($p < 0,05$). Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi bobot tebar awal, semakin rendah kandungan nitrogen yang tersisa di perairan.

Tabel 3. Kandungan nitrogen air pada berbagai perlakuan bobot tebar awal (mg L^{-1}).

Treatment	Mean \pm SD	HSD Notation	Significance
A (100 g)	1.82 \pm 0.04	a	Significantly different
B (150 g)	1.62 \pm 0.03	b	Significantly different
C (200 g)	1.40 \pm 0.02	c	Significantly different
D (250 g)	1.28 \pm 0.03	d	Significantly different

Keterangan: Nilai disajikan sebagai rata-rata \pm standar deviasi ($n = 3$). Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Tukey's HSD pada taraf kepercayaan 95% ($p < 0,05$).

Penurunan nitrogen terlarut menunjukkan bahwa peningkatan biomassa rumput laut memperbesar kapasitas penyerapan unsur hara untuk mendukung pertumbuhan jaringan baru. Nitrogen merupakan komponen utama asam amino, protein, klorofil, dan enzim, sehingga kebutuhannya meningkat seiring bertambahnya aktivitas metabolisme dan fotosintesis. Pada kepadatan biomassa yang lebih tinggi, jumlah talus aktif yang menyerap nitrogen juga meningkat, sehingga konsentrasi nitrogen di kolom air menurun lebih cepat (Chopin et al., 2013).

Kemampuan *Gracilaria verrucosa* dalam memanfaatkan nitrogen terlarut menjadikannya organisme biofilter yang efektif pada sistem tambak. Penyerapan amonium dan nitrat oleh rumput laut dapat mengurangi akumulasi limbah nutrisi yang berpotensi memicu eutrofikasi serta menurunkan kualitas air. Oleh karena itu, integrasi rumput laut dalam tambak budidaya sering dipandang sebagai pendekatan ekologis untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara dan menjaga kestabilan lingkungan budidaya (Neori et al., 2004; Jiang et al., 2023).

Dari sisi manajemen produksi, temuan ini menunjukkan bahwa pengaturan kepadatan tebar dapat digunakan sebagai alat pengendalian nitrogen di perairan. Kepadatan yang sesuai memungkinkan keseimbangan antara kebutuhan nutrisi untuk pertumbuhan dan kemampuan sistem menyediakan hara secara alami. Strategi tersebut penting dalam pengembangan akuakultur berkelanjutan yang menekankan produktivitas tinggi sekaligus minimalisasi beban limbah nutrisi ke lingkungan sekitar (Deng et al., 2024).

Kandungan Fosfor Air

Kandungan fosfor air menurun secara konsisten seiring meningkatnya bobot tebar awal rumput laut. Nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan A ($0,142 \text{ mg L}^{-1}$), kemudian menurun nyata pada perlakuan B ($0,128 \text{ mg L}^{-1}$), C ($0,110 \text{ mg L}^{-1}$), dan terendah pada perlakuan D ($0,098 \text{ mg L}^{-1}$). Seluruh perlakuan menunjukkan perbedaan nyata satu sama lain berdasarkan uji Tukey's HSD ($p < 0,05$). Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi bobot tebar awal, semakin rendah kandungan fosfor yang tersisa di perairan.

Tabel 4. Kandungan fosfor air pada berbagai perlakuan bobot tebar awal (mg L^{-1}).

Treatment	Mean \pm SD	HSD Notation	Significance
A (100 g)	0.142 \pm 0.004	a	Significantly different
B (150 g)	0.128 \pm 0.003	b	Significantly different
C (200 g)	0.110 \pm 0.002	c	Significantly different
D (250 g)	0.098 \pm 0.003	d	Significantly different

Keterangan: Nilai disajikan sebagai rata-rata \pm standar deviasi ($n = 3$). Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Tukey's HSD pada taraf kepercayaan 95% ($p < 0,05$).

Fosfor merupakan unsur hara esensial yang berperan penting dalam pembentukan ATP, asam nukleat, fosfolipid membran, serta proses transfer energi di dalam sel. Oleh karena itu, meningkatnya biomassa rumput laut akan diikuti oleh meningkatnya kebutuhan fosfor untuk menunjang pertumbuhan, pembelahan sel, dan pembentukan jaringan baru. Pada kondisi biomassa tinggi, total permukaan talus yang aktif menyerap ortofosfat juga bertambah sehingga pemanfaatan fosfor di kolom air menjadi lebih intensif (Lobban & Harrison, 1994).

Kemampuan *Gracilaria verrucosa* dalam menyerap fosfor menunjukkan fungsinya sebagai biofilter alami pada sistem tambak. Penyerapan fosfat oleh rumput laut membantu menekan akumulasi nutrisi yang dapat memicu ledakan fitoplankton, peningkatan kekeruhan, dan penurunan kualitas air. Dengan demikian, keberadaan rumput laut berkontribusi terhadap kestabilan ekosistem budidaya melalui pengendalian beban fosfor terlarut (Chopin et al., 2013; Jiang et al., 2023).

Dari perspektif pengelolaan budidaya, pengaturan kepadatan tebar yang tepat dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan fosfor sekaligus mendukung produktivitas biomassa. Sistem budidaya yang mampu mengonversi fosfor terlarut menjadi biomassa ekonomis akan lebih efisien dan ramah lingkungan. Pendekatan ini sejalan dengan konsep akuakultur berkelanjutan yang menekankan integrasi antara produksi, remediasi nutrisi, dan efisiensi ekologi dalam satu sistem budidaya (Duarte et al., 2020; Deng et al., 2024).

PENUTUP

Penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan bobot tebar awal *Gracilaria verrucosa* berpengaruh nyata terhadap biomassa mutlak serta dinamika karbon, nitrogen, dan fosfor pada perairan tambak ekstensif. Peningkatan bobot tebar mampu meningkatkan produksi biomassa hingga mencapai tingkat optimum, kemudian cenderung melambat pada kepadatan yang lebih tinggi akibat meningkatnya kompetisi antar talus. Perlakuan 200 g merupakan tingkat tebar paling efisien karena menghasilkan biomassa tinggi dan setara secara statistik dengan 250 g, namun menggunakan bibit lebih sedikit. Peningkatan kepadatan tebar juga terbukti menurunkan kandungan karbon, nitrogen, dan fosfor di perairan, yang menunjukkan meningkatnya kemampuan rumput laut dalam menyerap unsur hara dan karbon terlarut. Temuan ini menegaskan bahwa *Gracilaria verrucosa* tidak hanya berfungsi sebagai komoditas produksi, tetapi juga sebagai biofilter alami yang mampu meningkatkan kualitas air dan efisiensi biogeokimia tambak. Dengan demikian, pengaturan kepadatan tebar yang tepat menjadi strategi penting untuk mengoptimalkan produktivitas sekaligus mendukung pengembangan budidaya rumput laut yang berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Chopin, T., Cooper, J. A., Reid, G., Cross, S., & Moore, C. (2013). Open-water integrated multi-trophic aquaculture: Environmental biomitigation and economic diversification of fed aquaculture by extractive aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 4(4), 209–220.
- Deng, Y., Zhang, X., Liu, Q., & Chen, H. (2024). Sustainable seaweed aquaculture: Linking biomass productivity, nutrient removal, and ecosystem services. *Aquaculture Reports*, 34, 101945.
- Duarte, C. M., Krause-Jensen, D., & Hendriks, I. E. (2017). Marine vegetation and the global carbon budget. *Nature Climate Change*, 7, 961–968.
- Duarte, C. M., Krause-Jensen, D., & Lavery, P. S. (2020). Blue carbon pathways in coastal ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 12, 339–366.
- 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*, 8, 791942.

- 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(18), 6528.
- Jayakody, H., Dahanayake, D., & Perera, N. (2022). Determination of total carbon in aquatic samples using dry combustion method. *MethodsX*, 9, 101756.
- Jiang, Z., Fang, J., Mao, Y., Wang, X., & Ren, J. (2023). Seaweed aquaculture as a nature-based solution for nutrient remediation and coastal sustainability. *Science of the Total Environment*, 857, 159512.
- Krause-Jensen, D., & Duarte, C. M. (2016). Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*, 9, 737–742.
- Lobban, C. S., & Harrison, P. J. (1994). *Seaweed Ecology and Physiology*. Cambridge University Press.
- Marinho-Soriano, E., Morales, C., & Moreira, W. S. C. (2006). Cultivation of *Gracilaria* species in tropical environments and biomass performance evaluation. *Bioresource Technology*, 97(6), 967–973.
- Mishra, P., Singh, U., Pandey, C. M., Mishra, P., & Pandey, G. (2019). Application of student's t-test, analysis of variance, and covariance. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(4), 407–411.
- Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A. H., Kraemer, G. P., Halling, C., Shpigel, M., & Yarish, C. (2004). Integrated aquaculture: Rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration. *Aquaculture*, 231, 361–391.
- Rejeki, S., Widowati, L. L., & Ariyati, R. W. (2018). Growth performance of *Gracilaria verrucosa* under different seed quality and cultivation methods. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 17(2), 115–123.
- Shetty, P., & Goyal, A. (2022). Kjeldahl nitrogen determination in aquatic environmental samples: Recent applications and improvements. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 522.
- Xu, H., Li, Y., Wang, M., & Zhao, T. (2024). Statistical pattern analysis for biomass–nutrient interactions in aquaculture ecosystems. *Ecological Informatics*, 80, 102481.
- Zhang, L., Chen, X., & Wu, Y. (2022). Spectrophotometric determination of phosphorus in environmental waters using molybdenum blue method. *Water Research*, 215, 118258.