

**KEPADATAN BIOMASSA MENGATUR KANDUNGAN KARBON,
NITROGEN, DAN FOSFOR *Gracilaria verrucosa* DALAM SISTEM
BUDIDAYA LONGLINE DI TAMBAK EKSTENSIF**

**BIOMASS DENSITY REGULATES CARBON, NITROGEN, AND
PHOSPHORUS CONTENT OF *Gracilaria verrucosa* IN A LONGLINE
CULTIVATION SYSTEM IN EXTENSIVE 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 kandungan karbon (C), nitrogen (N), dan fosfor (P) pada *Gracilaria verrucosa* dalam sistem budidaya longline di tambak ekstensif. Penelitian dilaksanakan selama 42 hari (Juni–Juli 2025) di Desa Banyuurip, Gresik, dengan menggunakan rancangan acak lengkap yang terdiri atas empat perlakuan kepadatan biomassa awal, yaitu 100 g, 150 g, 200 g, dan 250 g, masing-masing dengan tiga ulangan. Analisis kandungan C, N, dan P dilakukan menggunakan metode pembakaran kering, Kjeldahl, dan spektrofotometri. Data dianalisis menggunakan ANOVA satu arah yang dilanjutkan dengan uji Tukey HSD ($p < 0,05$). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kepadatan biomassa berpengaruh nyata terhadap kandungan karbon, nitrogen, dan fosfor *Gracilaria verrucosa*. Nilai tertinggi untuk ketiga parameter diperoleh pada perlakuan 200 g, yaitu karbon 16,10%, nitrogen 2,38%, dan fosfor 0,39%. Pola yang terbentuk menunjukkan hubungan non-linear (unimodal), di mana kandungan C, N, dan P meningkat seiring peningkatan kepadatan biomassa hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun pada kepadatan yang lebih tinggi. Penurunan pada kepadatan 250 g mengindikasikan adanya peningkatan kompetisi terhadap cahaya dan nutrisi yang menurunkan efisiensi penyerapan. Penelitian ini mengungkap bahwa kepadatan biomassa merupakan faktor kunci dalam mengatur efisiensi akumulasi karbon dan nutrisi dalam sistem budidaya rumput laut. Kepadatan 200 g direkomendasikan sebagai kondisi optimal untuk memaksimalkan kualitas biomassa berbasis kandungan C–N–P dalam tambak ekstensif. Temuan ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan strategi budidaya yang lebih efisien dan berkelanjutan secara biogeokimia.

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

ABSTRACT

This study aimed to analyze the effect of biomass density on carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) content in Gracilaria verrucosa cultivated using a longline system in extensive ponds. The experiment was conducted for 42 days (June–July 2025) in Banyuurip Village, Gresik, Indonesia, using a completely randomized design with four initial biomass density treatments: 100 g, 150 g, 200 g, and 250 g, each with three replicates. The contents of C, N, and P were analyzed using dry combustion, Kjeldahl, and spectrophotometric methods, respectively. Data were analyzed using one-way ANOVA followed by Tukey's HSD test ($p < 0.05$). The results showed that biomass density significantly affected the carbon, nitrogen, and phosphorus content of Gracilaria verrucosa. The highest values for all parameters were recorded at the 200 g treatment, with carbon at 16.10%, nitrogen at 2.38%, and phosphorus at 0.39%. The observed pattern followed a non-linear (unimodal) relationship, where C, N, and P contents increased with increasing biomass density up to an optimal point and then declined at higher density levels. The decrease at 250 g indicates increased competition for light and nutrients, leading to reduced nutrient uptake efficiency. This study demonstrates that biomass density is a key factor regulating carbon and nutrient accumulation efficiency in seaweed cultivation systems. A density of 200 g is recommended as the optimal condition to maximize biomass quality based on C–N–P content in extensive pond systems. These findings provide important insights for developing more efficient and biogeochemically sustainable seaweed farming strategies.

Keywords: *Gracilaria verrucosa, biomass density, carbon, nitrogen, phosphorus, longline cultivation, extensive ponds.*

PENDAHULUAN

Budidaya rumput laut, khususnya *Gracilaria verrucosa*, merupakan salah satu komponen penting dalam sistem akuakultur pesisir yang tidak hanya berkontribusi terhadap produksi komoditas bernilai ekonomi seperti agar, tetapi juga berperan dalam siklus karbon dan nutrisi di lingkungan perairan. Makroalga diketahui memiliki kapasitas tinggi dalam menyerap karbon anorganik terlarut serta nutrisi seperti nitrogen dan fosfor, sehingga berfungsi sebagai biofilter alami sekaligus komponen penting dalam mitigasi perubahan iklim melalui mekanisme karbon biru (Duarte et al., 2017; Krause-Jensen & Duarte, 2016; Luo et al., 2024). Dalam sistem tambak ekstensif, peran ini menjadi semakin krusial karena interaksi antara organisme budidaya dan lingkungan berlangsung secara langsung tanpa kontrol intensif terhadap input nutrisi.

Kandungan karbon (C), nitrogen (N), dan fosfor (P) dalam jaringan rumput laut mencerminkan kondisi fisiologis organisme sekaligus efisiensi asimilasi nutrisi dari lingkungan. Variasi komposisi C–N–P tidak hanya menentukan kualitas biomassa secara biokimia, tetapi juga memengaruhi fungsi ekologis rumput laut dalam menyerap dan menyimpan karbon serta mendaur ulang nutrisi dalam ekosistem perairan (Hartmann et al., 2020; Jiang et al., 2023; Xu et al., 2025). Selain itu, rasio stoikiometri C–N–P pada makroalga sering digunakan sebagai indikator keterbatasan nutrisi (nutrient limitation) dan efisiensi penggunaan sumber daya dalam sistem budidaya (Guan et al., 2025).

Salah satu faktor teknis yang berpotensi mengontrol dinamika C–N–P dalam biomassa rumput laut adalah kepadatan biomassa. Kepadatan yang

berbeda akan memengaruhi tingkat kompetisi terhadap cahaya, ruang, dan nutrisi, yang pada akhirnya menentukan kapasitas fotosintesis dan penyerapan unsur hara (García-Poza et al., 2020; Duarte et al., 2022). Pada kepadatan rendah, pemanfaatan nutrisi belum optimal karena kapasitas serapan terbatas, sedangkan pada kepadatan tinggi, kompetisi dapat menyebabkan penurunan efisiensi asimilasi akibat keterbatasan difusi nutrisi dan penurunan penetrasi cahaya. Dengan demikian, terdapat kemungkinan adanya ambang kepadatan optimum yang mampu memaksimalkan akumulasi karbon dan nutrisi dalam jaringan rumput laut.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menitikberatkan pada pertumbuhan biomassa, kandungan agar, atau produktivitas budidaya, sementara hubungan langsung antara kepadatan biomassa dan kandungan unsur C–N–P masih belum banyak dikaji secara mendalam, terutama pada sistem budidaya longline di tambak ekstensif. Padahal, pemahaman terhadap hubungan ini sangat penting untuk mengoptimalkan efisiensi penggunaan nutrisi sekaligus meningkatkan kualitas biomassa secara berkelanjutan (Deng et al., 2025; Wahdaningsih et al., 2025).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kepadatan biomassa terhadap kandungan karbon, nitrogen, dan fosfor pada *Gracilaria verrucosa* dalam sistem budidaya longline di tambak ekstensif. Data hasil penelitian menunjukkan adanya pola peningkatan kandungan C, N, dan P seiring dengan peningkatan kepadatan biomassa hingga tingkat tertentu, kemudian mengalami penurunan pada kepadatan lebih tinggi. Pola ini mengindikasikan adanya hubungan non-linear yang mencerminkan

keseimbangan antara kapasitas serapan nutrisi dan tingkat kompetisi antar individu.

Dengan demikian, kebaruan (novelty) utama penelitian ini terletak pada identifikasi mekanisme pengaturan kandungan C–N–P berbasis kepadatan biomassa dalam sistem budidaya nyata, serta pengungkapan adanya titik optimum yang menghubungkan efisiensi nutrisi dengan struktur biomassa rumput laut. Temuan ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan strategi budidaya yang tidak hanya berorientasi pada produksi, tetapi juga pada efisiensi biogeokimia dan keberlanjutan ekosistem perairan.

METODE PENELITIAN

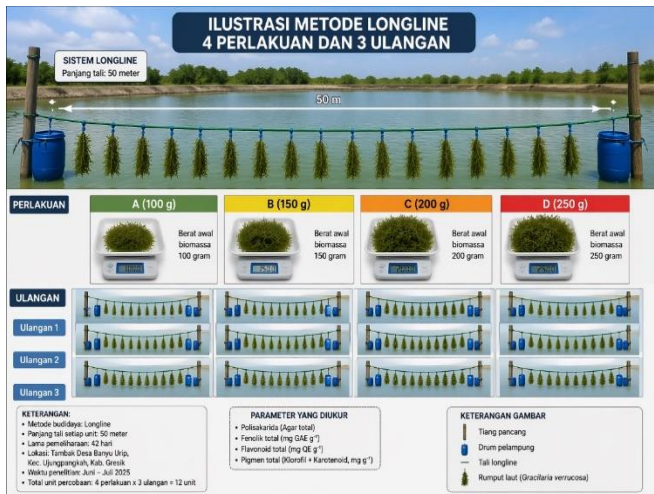
Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 42 hari pada bulan Juni–Juli 2025 di tambak budidaya rumput laut di Desa Banyuurip, Kabupaten Gresik, Jawa Timur, Indonesia. Analisis kandungan karbon, nitrogen, dan fosfor 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 (*completely randomized design*) untuk meminimalkan pengaruh heterogenitas

lingkungan tambak (García-Poza et al., 2020).



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

Prosedur Budidaya

Bibit *Gracilaria verrucosa* yang digunakan memiliki kondisi morfologis dan fisiologis yang seragam untuk mengurangi variabilitas awal antar perlakuan (Rejeki et al., 2018). Biomassa awal ditimbang menggunakan timbangan digital dengan ketelitian $\pm 0,01$ g sesuai dengan perlakuan yang telah ditentukan. Rumput laut diikat pada tali longline dengan jarak tanam yang seragam untuk memastikan distribusi biomassa yang homogen serta meminimalkan kompetisi ruang dan cahaya yang tidak merata (García-Poza et al., 2020). Pemeliharaan dilakukan selama 42 hari pada kondisi alami tambak ekstensif tanpa penambahan nutrisi buatan, sehingga interaksi antara organisme dan lingkungan berlangsung secara alami (Duarte et al., 2022). Monitoring kualitas air dilakukan secara berkala setiap 7 hari meliputi suhu, salinitas, pH, dan oksigen terlarut menggunakan multiparameter water quality meter (YSI ProDSS, USA). Parameter kualitas air tersebut diketahui berperan penting dalam mengontrol proses fisiologis seperti fotosintesis, respirasi, dan asimilasi

nutrien pada rumput laut (Krause-Jensen & Duarte, 2016).

Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel biomassa dilakukan pada akhir masa pemeliharaan (hari ke-42). Sampel rumput laut dari masing-masing unit percobaan diambil secara acak, kemudian dicuci menggunakan air laut bersih untuk menghilangkan kotoran dan organisme epifit. Selanjutnya, sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C hingga mencapai berat konstan untuk memperoleh berat kering biomassa (Marinho-Soriano et al., 2006).

Analisis Kandungan Karbon, Nitrogen, dan Fosfor

Analisis kandungan unsur hara dilakukan pada sampel biomassa kering *Gracilaria verrucosa* menggunakan metode standar yang umum digunakan dalam studi biogeokimia. Kandungan karbon (C) dianalisis menggunakan metode pembakaran kering (*dry combustion*) dengan *elemental analyzer* untuk menentukan karbon total dalam jaringan (Shetty & Goyal, 2022). Kandungan nitrogen (N) ditentukan menggunakan metode Kjeldahl yang meliputi tahap destruksi, destilasi, dan titrasi untuk memperoleh nilai nitrogen total dalam biomassa (Jayakody et al., 2022). Sementara itu, kandungan fosfor (P) dianalisis menggunakan metode spektrofotometri dengan pendekatan molibdenum biru setelah proses destruksi asam, dengan pembacaan absorbansi menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Zhang et al., 2022). Seluruh hasil analisis dinyatakan dalam persen (%) terhadap berat kering biomassa untuk memastikan konsistensi dan keterbandingan antar perlakuan.

Analisis Data

Data kandungan karbon, nitrogen, dan fosfor dianalisis menggunakan analisis varians (ANOVA) satu arah untuk menguji

pengaruh kepadatan biomassa terhadap masing-masing parameter. Apabila hasil ANOVA menunjukkan perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$), maka dilanjutkan dengan uji lanjut Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) untuk mengidentifikasi perbedaan nyata antar perlakuan (Mishra et al., 2019). Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak Minitab (Minitab Inc., USA). Selain itu, analisis deskriptif digunakan untuk mengidentifikasi pola perubahan kandungan karbon, nitrogen, dan fosfor (C–N–P) antar perlakuan, sehingga dapat menggambarkan hubungan antara kepadatan biomassa dan efisiensi penyerapan nutrisi dalam sistem budidaya (Xu et al., 2025).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kandungan Karbon Rumput Laut

Hasil menunjukkan bahwa kepadatan biomassa memberikan perbedaan nyata terhadap kandungan karbon *Gracilaria verrucosa*. Nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan C (200 g) dan berbeda signifikan dibandingkan perlakuan lainnya, yang menandakan bahwa kepadatan ini merupakan kondisi paling optimal untuk akumulasi karbon. Peningkatan kandungan karbon dari 100 g ke 200 g menunjukkan bahwa bertambahnya biomassa meningkatkan kapasitas fotosintesis dan penyerapan karbon. Namun, penurunan pada kepadatan 250 g mengindikasikan adanya kompetisi antar individu terhadap cahaya dan sumber daya, sehingga menurunkan efisiensi akumulasi karbon. Pola ini menegaskan adanya hubungan non-linear dengan titik optimum pada kepadatan menengah.

Tabel 1. Rata-rata kandungan karbon *Gracilaria verrucosa* pada berbagai kepadatan biomassa berdasarkan uji lanjut Tukey HSD.

Perlakuan	Mean	Notasi
C (200 g)	16.10	a
B (150 g)	15.80	b
D (250 g)	15.70	b
A (100 g)	15.50	c

Notes: Data merupakan rata-rata ($n = 3$). Huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata (Tukey HSD, $p < 0,05$). Analisis dilakukan menggunakan ANOVA satu arah dengan bantuan perangkat lunak Minitab.

Nilai kandungan karbon tertinggi yang diperoleh pada kepadatan 200 g mengindikasikan bahwa pada kondisi tersebut terjadi keseimbangan optimal antara ketersediaan sumber daya lingkungan dan kapasitas fisiologis organisme dalam melakukan fotosintesis serta asimilasi karbon. Makroalga diketahui memiliki kemampuan tinggi dalam menyerap karbon anorganik terlarut melalui proses fotosintesis, sehingga peningkatan biomassa hingga batas tertentu akan meningkatkan total kapasitas penyerapan karbon dalam sistem budidaya (Krause-Jensen & Duarte, 2016; Duarte et al., 2017).

Peningkatan kandungan karbon dari perlakuan 100 g hingga 200 g menunjukkan bahwa pada kepadatan rendah hingga menengah, kompetisi antar individu relatif kecil sehingga pemanfaatan cahaya dan nutrisi masih berlangsung secara efisien. Kondisi ini memungkinkan peningkatan aktivitas fotosintesis dan akumulasi karbon dalam jaringan. Fenomena ini sejalan dengan konsep alokasi karbon pada tumbuhan akuatik, di mana efisiensi penyerapan karbon sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan kepadatan populasi (Hartmann et al., 2020). Selain itu, dalam sistem budidaya, peningkatan biomassa

juga dapat meningkatkan kapasitas serapan karbon secara kolektif selama tidak terjadi keterbatasan sumber daya (Luo et al., 2024).

Sebaliknya, penurunan kandungan karbon pada kepadatan 250 g menunjukkan adanya tekanan kompetisi yang mulai membatasi proses fisiologis. Pada kepadatan tinggi, keterbatasan penetrasi cahaya, difusi karbon anorganik, serta ruang tumbuh dapat menurunkan efisiensi fotosintesis per individu. Kondisi ini menyebabkan penurunan akumulasi karbon meskipun total biomassa meningkat. Fenomena ini umum terjadi dalam sistem budidaya makroalga, di mana kepadatan yang terlalu tinggi justru menurunkan efisiensi penyerapan karbon akibat kompetisi internal dan penurunan kualitas lingkungan mikro (Duarte et al., 2022; Deng et al., 2025).

Pola yang terbentuk dalam penelitian ini menunjukkan hubungan non-linear (unimodal), di mana kandungan karbon meningkat hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun pada kepadatan yang lebih tinggi. Pola ini mengindikasikan adanya batas optimal kepadatan biomassa yang mengontrol efisiensi penyerapan karbon dalam sistem budidaya. Temuan ini penting karena menunjukkan bahwa pengelolaan kepadatan tidak hanya berpengaruh terhadap pertumbuhan, tetapi juga terhadap fungsi biogeokimia rumput laut sebagai penyerap karbon. Dengan demikian, kepadatan biomassa sekitar 200 g dapat dipertimbangkan sebagai kondisi optimal untuk memaksimalkan akumulasi karbon *Gracilaria verrucosa* dalam sistem tambak ekstensif.

Kandungan Nitrogen Rumput Laut

Hasil menunjukkan bahwa kepadatan biomassa memberikan pengaruh nyata terhadap kandungan nitrogen *Gracilaria verrucosa*, dengan nilai

tertinggi diperoleh pada perlakuan C (200 g) yang berbeda signifikan dibandingkan perlakuan lainnya. Peningkatan kandungan nitrogen dari 100 g hingga 200 g mengindikasikan bahwa pada kepadatan rendah hingga menengah, proses penyerapan dan asimilasi nitrogen berlangsung lebih efisien. Kondisi ini kemungkinan didukung oleh ketersediaan nutrisi yang masih mencukupi serta minimnya kompetisi antar individu, sehingga rumput laut mampu mengoptimalkan pengambilan nitrogen untuk mendukung pertumbuhan dan sintesis protein. Sebaliknya, penurunan kandungan nitrogen pada kepadatan 250 g menunjukkan mulai terjadinya kompetisi terhadap nutrisi terlarut di perairan. Pada kepadatan tinggi, peningkatan biomassa tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi penyerapan nitrogen karena keterbatasan difusi nutrisi dan meningkatnya persaingan antar talus. Akibatnya, kemampuan individu dalam mengakumulasi nitrogen menjadi menurun meskipun total biomassa lebih besar. Secara keseluruhan, pola ini menunjukkan adanya hubungan non-linear dengan titik optimum pada kepadatan 200 g, di mana efisiensi penyerapan nitrogen berada pada kondisi maksimal. Temuan ini menegaskan bahwa pengaturan kepadatan biomassa merupakan faktor kunci dalam mengoptimalkan pemanfaatan nitrogen dalam sistem budidaya *Gracilaria verrucosa*.

Tabel 2. Rata-rata kandungan nitrogen *Gracilaria verrucosa* pada berbagai kepadatan biomassa berdasarkan uji lanjut Tukey HSD.

Perlakuan	Mean	Notasi
C (200 g)	2.38	a
D (250 g)	2.28	b
B (150 g)	2.22	b
A (100 g)	2.08	c

Notes: Data merupakan rata-rata ($n = 3$). Huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata (Tukey HSD, $p < 0,05$). Analisis dilakukan menggunakan ANOVA satu arah dengan bantuan perangkat lunak Minitab.

Kandungan nitrogen *Gracilaria verrucosa* menunjukkan respons yang jelas terhadap variasi kepadatan biomassa, dengan nilai tertinggi pada perlakuan 200 g. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada kepadatan menengah terjadi keseimbangan optimal antara ketersediaan nitrogen di lingkungan dan kapasitas serapan organisme. Nitrogen merupakan unsur esensial yang berperan dalam sintesis protein, enzim, dan klorofil, sehingga sangat menentukan aktivitas metabolisme dan pertumbuhan rumput laut. Pada kondisi lingkungan yang mendukung, makroalga mampu menyerap nitrogen anorganik terlarut secara efisien untuk menunjang proses fisiologis tersebut (Duarte et al., 2022; Xu et al., 2025).

Peningkatan kandungan nitrogen dari perlakuan 100 g hingga 200 g menunjukkan bahwa pada kepadatan rendah hingga menengah, kompetisi terhadap nutrisi masih relatif kecil sehingga proses difusi dan penyerapan nitrogen berlangsung optimal. Selain itu, peningkatan biomassa dalam batas tertentu dapat meningkatkan kapasitas serapan nitrogen secara kolektif tanpa menurunkan efisiensi per individu. Fenomena ini sejalan dengan konsep efisiensi penggunaan nutrisi, di mana organisme akuatik menunjukkan peningkatan akumulasi nitrogen ketika ketersediaan nutrisi masih mencukupi dan tekanan kompetisi rendah (Guan et al., 2025).

Namun demikian, penurunan kandungan nitrogen pada kepadatan 250 g mengindikasikan mulai terjadinya keterbatasan nutrisi akibat meningkatnya kompetisi antar individu. Pada kepadatan tinggi, penyerapan nitrogen menjadi kurang

efisien karena terbatasnya suplai nitrogen terlarut serta terhambatnya difusi nutrisi ke permukaan talus. Selain itu, penurunan penetrasi cahaya pada kepadatan tinggi juga dapat menurunkan aktivitas fotosintesis, yang secara tidak langsung menghambat proses asimilasi nitrogen dalam jaringan (Krause-Jensen & Duarte, 2016). Kondisi ini menyebabkan akumulasi nitrogen tidak meningkat seiring dengan bertambahnya biomassa, bahkan cenderung menurun.

Pola yang terbentuk menunjukkan hubungan non-linear (unimodal), di mana kandungan nitrogen meningkat hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun pada kepadatan yang lebih tinggi. Pola ini menegaskan bahwa kepadatan biomassa tidak hanya memengaruhi pertumbuhan, tetapi juga efisiensi penyerapan dan pemanfaatan nutrisi dalam sistem budidaya. Temuan ini penting dalam konteks pengelolaan akuakultur, karena menunjukkan bahwa kepadatan sekitar 200 g merupakan kondisi optimal untuk memaksimalkan akumulasi nitrogen *Gracilaria verrucosa* sekaligus menjaga efisiensi penggunaan nutrisi dalam sistem tambak ekstensif.

Kandungan Fosfor Rumput Laut

Hasil menunjukkan bahwa kepadatan biomassa memberikan pengaruh nyata terhadap kandungan fosfor *Gracilaria verrucosa*. Nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan C (200 g) dan berbeda signifikan dibandingkan perlakuan lainnya, yang menunjukkan bahwa kepadatan ini merupakan kondisi paling optimal untuk akumulasi fosfor. Peningkatan kandungan fosfor dari 100 g hingga 200 g mengindikasikan bahwa pada kepadatan rendah hingga menengah, penyerapan nutrisi masih berlangsung secara efisien karena ketersediaan fosfat mencukupi dan kompetisi antar individu relatif rendah. Namun, pada kepadatan 250 g terjadi penurunan kandungan fosfor, yang

menunjukkan adanya peningkatan kompetisi terhadap nutrien dalam sistem budidaya. Pada kondisi ini, kemampuan individu dalam menyerap fosfor menjadi terbatas karena meningkatnya kebutuhan nutrien yang tidak seimbang dengan ketersediaannya di lingkungan. Selain itu, kepadatan yang terlalu tinggi dapat menghambat sirkulasi air dan distribusi nutrien, sehingga menurunkan efisiensi penyerapan. Secara keseluruhan, pola ini menunjukkan hubungan non-linear dengan titik optimum pada kepadatan 200 g, di mana efisiensi penyerapan fosfor berada pada kondisi maksimal. Hal ini menegaskan bahwa pengaturan kepadatan biomassa menjadi faktor penting dalam mengoptimalkan pemanfaatan fosfor dalam budidaya *Gracilaria verrucosa*.

Tabel 3. Rata-rata kandungan fosfor *Gracilaria verrucosa* pada berbagai kepadatan biomassa berdasarkan uji lanjut Tukey HSD.

Perlakuan	Mean	Notasi
C (200 g)	0.39	a
D (250 g)	0.36	b
B (150 g)	0.35	b
A (100 g)	0.31	c

Notes: Data merupakan rata-rata ($n = 3$). Huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata (Tukey HSD, $p < 0,05$). Analisis dilakukan menggunakan ANOVA satu arah dengan bantuan perangkat lunak Minitab.

Kandungan fosfor *Gracilaria verrucosa* menunjukkan respons yang jelas terhadap variasi kepadatan biomassa, dengan nilai tertinggi pada perlakuan 200 g. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kepadatan menengah terjadi keseimbangan optimal antara ketersediaan fosfat di lingkungan dan kapasitas serapan organisme. Fosfor merupakan unsur esensial yang berperan dalam transfer energi (ATP), sintesis asam nukleat, serta

pembentukan struktur sel, sehingga sangat menentukan aktivitas metabolisme dan pertumbuhan makroalga (Xu et al., 2025; Guan et al., 2025). Peningkatan kandungan fosfor dari 100 g hingga 200 g menunjukkan bahwa pada kepadatan rendah hingga menengah, kompetisi terhadap nutrien masih relatif rendah sehingga proses difusi dan penyerapan fosfat berlangsung lebih efisien. Dalam kondisi ini, rumput laut mampu mengoptimalkan pemanfaatan fosfor untuk mendukung aktivitas fisiologis secara maksimal. Fenomena ini sejalan dengan konsep efisiensi penggunaan nutrien, di mana ketersediaan nutrien yang cukup dan tekanan kompetisi yang rendah akan meningkatkan akumulasi unsur hara dalam jaringan organisme akuatik (Jiang et al., 2023).

Sebaliknya, penurunan kandungan fosfor pada kepadatan 250 g mengindikasikan adanya keterbatasan nutrien akibat meningkatnya kompetisi antar individu. Pada kepadatan tinggi, difusi fosfat dari kolom air menuju permukaan talus menjadi terhambat, sehingga menurunkan efisiensi penyerapan. Selain itu, peningkatan biomassa juga dapat menyebabkan perubahan kondisi mikro lingkungan, seperti penurunan sirkulasi air dan ketersediaan nutrien terlarut, yang pada akhirnya membatasi akumulasi fosfor dalam jaringan (Duarte et al., 2022). Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan biomassa tidak selalu diikuti oleh peningkatan kandungan nutrien apabila telah melampaui kapasitas dukung lingkungan. Pola yang terbentuk dalam penelitian ini menunjukkan hubungan non-linear (unimodal), di mana kandungan fosfor meningkat hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun pada kepadatan yang lebih tinggi. Hal ini menegaskan bahwa kepadatan biomassa merupakan faktor kunci dalam mengontrol

efisiensi penyerapan fosfor dalam sistem budidaya. Dengan demikian, kepadatan sekitar 200 g dapat dianggap sebagai kondisi optimal untuk memaksimalkan akumulasi fosfor *Gracilaria verrucosa* dalam tambak ekstensif, sekaligus menjaga keseimbangan antara kebutuhan nutrisi dan kapasitas lingkungan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kepadatan biomassa berpengaruh nyata terhadap kandungan karbon (C), nitrogen (N), dan fosfor (P) *Gracilaria verrucosa* dalam sistem budidaya longline di tambak ekstensif. Pola yang terbentuk pada ketiga parameter menunjukkan hubungan non-linear (unimodal), di mana kandungan C, N, dan P meningkat seiring peningkatan kepadatan biomassa hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun pada kepadatan yang lebih tinggi. Kepadatan 200 g terbukti sebagai kondisi paling optimal untuk memaksimalkan akumulasi karbon, nitrogen, dan fosfor dalam jaringan rumput laut. Hal ini mencerminkan adanya keseimbangan antara kapasitas serapan nutrisi dan tingkat kompetisi antar individu. Dengan demikian, kepadatan biomassa tidak hanya memengaruhi pertumbuhan, tetapi juga efisiensi biogeokimia dalam pemanfaatan nutrisi pada sistem budidaya.

Saran

Disarankan untuk menerapkan kepadatan biomassa sekitar 200 g dalam praktik budidaya *Gracilaria verrucosa* di tambak ekstensif guna mengoptimalkan kualitas biomassa berdasarkan kandungan C, N, dan P. Penelitian selanjutnya perlu mengkaji lebih lanjut dinamika rasio stoikiometri C–N–P serta keterkaitannya dengan produktivitas agar dan kualitas produk turunan lainnya. Selain itu, studi lanjutan juga penting dilakukan dengan

mempertimbangkan variasi faktor lingkungan seperti musim, kualitas air, dan interaksi dengan sedimen untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif dalam pengelolaan budidaya rumput laut berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Deng, Y., Zhang, Y., Liu, T., & Chen, X. (2025). Biomass density effects on nutrient uptake efficiency and growth performance in cultivated macroalgae. *Aquaculture Reports*, 35, 101234. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.101234>
- Duarte, C. M., Krause-Jensen, D., & Hendriks, I. E. (2017). Marine vegetation and the global carbon budget. *Nature Geoscience*, 10(9), 654–662. <https://doi.org/10.1038/ngeo2997>
- 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, 865041. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.865041>
- García-Poza, S., Leandro, A., Cotas, J., & Pereira, L. (2020). Culture of seaweed and its applications. In *Seaweed Biotechnology* (pp. 25–52). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35796-9_2
- Guan, C., Li, H., Wang, X., & Zhao, Y. (2025). Stoichiometric responses of macroalgae to nutrient variability in coastal ecosystems. *Marine Environmental Research*, 198, 106345. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.106345>

- Hartmann, J., West, A. J., Renforth, P., Köhler, P., De La Rocha, C. L., Wolf-Gladrow, D. A., & Scheffran, J. (2020). Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(4), e2019GB006331. <https://doi.org/10.1029/2019GB006331>
- Jayakody, R., Gunathilaka, M., & Herath, H. (2022). Evaluation of Kjeldahl and alternative methods for nitrogen determination in aquatic biomass. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2022, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2022/4567890>
- Jiang, Z., Liu, J., Li, S., Chen, Y., Du, P., Zhu, Y., & Zhang, J. (2023). Nutrient dynamics and stoichiometric characteristics of macroalgae in coastal ecosystems. *Science of the Total Environment*, 857, 159531. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159531>
- 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>
- Luo, H., Li, X., Zhang, Y., & Chen, W. (2024). Carbon sequestration potential of seaweed aquaculture in coastal environments. *Journal of Cleaner Production*, 428, 139345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139345>
- 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>
- Mishra, P., Singh, U., Pandey, C. M., Mishra, P., & Pandey, G. (2019). Application of Tukey's test in statistical analysis. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(4), 407–411. https://doi.org/10.4103/aca.ACA_157_18
- Rejeki, S., Aryati, R. W., & Widowati, L. L. (2018). Growth performance and agar yield of *Gracilaria verrucosa* cultivated in different environments. *AAFL Bioflux*, 11(2), 356–364.
- Shetty, P., & Goyal, A. (2022). Determination of total carbon in biomass using dry combustion method. *MethodsX*, 9, 101756. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101756>
- Wahdaningsih, S., Nurjanah, N., & Santoso, J. (2025). Optimization of seaweed cultivation systems for sustainable production and nutrient efficiency. *Indonesian Aquaculture Journal*, 20(1), 45–56.
- Xu, D., Gao, Z., Zhang, X., Fan, X., & Wang, Y. (2025). Nutrient uptake strategies and stoichiometric plasticity in marine macroalgae under changing environments. *Algal Research*, 78, 103456. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.103456>
- Zhang, W., Liu, X., Wang, Y., & Li, J. (2022). Spectrophotometric determination of phosphorus in biological samples using molybdenum blue method. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 1123–1130. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01345-6>