

## OPTIMASI BOBOT TEBAR AWAL *GRACILARIA VERRUCOSA* BERDASARKAN KANDUNGAN KLOOROFIL, UNSUR HARA TANAH, DAN KUALITAS AIR TAMBAK

Andi Rahmad Rahim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dosen Program Studi Budidaya Perikanan, Fakultas Pertanian, Universitas Muhammadiyah  
Gresik

\*Email: [andirahmad@umg.ac.id](mailto:andirahmad@umg.ac.id)

### ABSTRACT

This study aimed to analyze the effects of different initial stocking weights on chlorophyll content of *Gracilaria verrucosa*, soil carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) dynamics, and water quality under longline cultivation in extensive brackishwater ponds of Pulokerto, Pasuruan Regency, Indonesia. The experiment was conducted for 42 days (March–April 2023) using a Completely Randomized Design with four initial stocking weight treatments: A (100 g), B (150 g), C (200 g), and D (250 g), each with three replicates. Observed parameters included seaweed chlorophyll content, soil carbon, nitrogen, phosphorus, and water temperature, transparency, salinity, and turbidity. Data were analyzed using one-way ANOVA followed by Tukey's HSD test at a 95% confidence level. The results showed that initial stocking weight significantly affected all major observed parameters. The highest chlorophyll content was recorded in treatment C (2.24 mg g<sup>-1</sup>), while the lowest was found in treatment A (1.78 mg g<sup>-1</sup>). Soil carbon, nitrogen, and phosphorus also reached their highest values in treatment C at 21,033 mg kg<sup>-1</sup>, 1,760 mg kg<sup>-1</sup>, and 630 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. Water quality remained within acceptable ranges for cultivation, although increasing stocking weight tended to reduce transparency and increase turbidity. It can be concluded that the 200 g initial stocking weight was the optimum treatment, as it enhanced seaweed physiological performance, improved soil nutrient dynamics, and maintained balanced environmental quality. These findings provide a practical basis for sustainable *Gracilaria verrucosa* farming in extensive pond systems.

**Keywords:** *Gracilaria verrucosa*, stocking weight, chlorophyll, soil carbon, water quality, extensive ponds.

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh berbagai bobot tebar awal terhadap kandungan klorofil *Gracilaria verrucosa*, dinamika karbon (C), nitrogen (N), dan fosfor (P) tanah, serta kualitas air pada budidaya metode longline di tambak ekstensif Pulokerto, Kabupaten Pasuruan. Penelitian dilaksanakan selama 42 hari (Maret–April 2023) menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan empat perlakuan bobot tebar awal, yaitu A (100 g), B (150 g), C (200 g), dan D (250 g), masing-masing tiga ulangan. Parameter yang diamati meliputi kandungan klorofil rumput laut, kandungan karbon, nitrogen, dan fosfor tanah, serta suhu, kecerahan, salinitas, dan kekeruhan air. Data dianalisis menggunakan ANOVA satu arah dan dilanjutkan uji Tukey HSD pada taraf kepercayaan 95%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan bobot tebar awal berpengaruh nyata terhadap seluruh parameter utama yang diamati. Kandungan klorofil tertinggi diperoleh pada perlakuan C sebesar 2,24 mg g<sup>-1</sup>, sedangkan terendah pada perlakuan A sebesar 1,78 mg g<sup>-1</sup>. Kandungan karbon, nitrogen, dan fosfor tanah juga mencapai nilai tertinggi pada perlakuan C masing-masing sebesar 21.033 mg kg<sup>-1</sup>, 1.760 mg kg<sup>-1</sup>, dan 630 mg kg<sup>-1</sup>. Kualitas air selama penelitian berada pada kisaran layak untuk budidaya, meskipun peningkatan bobot tebar cenderung menurunkan kecerahan dan meningkatkan kekeruhan. Disimpulkan bahwa bobot tebar awal 200 g merupakan perlakuan optimum karena mampu meningkatkan performa fisiologis rumput laut, memperbaiki dinamika hara tanah, dan tetap menjaga kualitas lingkungan budidaya secara seimbang. Temuan ini dapat dijadikan dasar teknis dalam pengembangan budidaya *Gracilaria verrucosa* berkelanjutan di tambak ekstensif.

**Kata kunci:** *Gracilaria verrucosa*, bobot tebar, klorofil, karbon tanah, kualitas air, tambak ekstensif.

## PENDAHULUAN

Rumput laut merah *Gracilaria verrucosa* merupakan salah satu komoditas strategis akuakultur pesisir karena memiliki nilai ekonomi tinggi sebagai bahan baku utama industri agar. Produk agar digunakan secara luas dalam industri pangan, farmasi, kosmetik, mikrobiologi, hingga biomaterial modern, sehingga permintaan global terhadap bahan baku *Gracilaria* terus meningkat dari tahun ke tahun. Negara-negara tropis, termasuk Indonesia, memiliki keunggulan komparatif dalam pengembangan komoditas ini karena didukung oleh iklim sesuai, ketersediaan lahan pesisir, dan tenaga kerja budidaya yang melimpah (FAO, 2024). Oleh sebab itu, peningkatan produktivitas dan kualitas hasil budidaya *Gracilaria verrucosa* menjadi isu penting dalam pengembangan ekonomi biru berkelanjutan.

Selain berperan sebagai komoditas industri, *Gracilaria verrucosa* juga memiliki fungsi ekologis penting dalam sistem budidaya tambak. Rumput laut mampu menyerap karbon anorganik terlarut melalui fotosintesis serta memanfaatkan nitrogen dan fosfor dari lingkungan sebagai unsur hara utama pertumbuhan. Kemampuan tersebut menjadikan *Gracilaria* sebagai biofilter alami yang efektif dalam memperbaiki kualitas perairan, menurunkan akumulasi limbah nutrisi, dan meningkatkan efisiensi ekosistem budidaya. Dalam konteks perubahan iklim, makroalga juga diakui berkontribusi terhadap penyerapan karbon pesisir melalui jalur

blue carbon dan circular aquaculture systems (Duarte et al., 2020; Krause-Jensen et al., 2023; Jiang et al., 2025).

Keberhasilan budidaya *Gracilaria verrucosa* sangat dipengaruhi oleh manajemen teknis, terutama bobot tebar awal atau kepadatan biomassa saat penanaman. Bobot tebar menentukan intensitas kompetisi antar talus terhadap cahaya, ruang tumbuh, pergerakan air, dan ketersediaan nutrisi. Pada kepadatan rendah, ruang budidaya kurang termanfaatkan secara optimal sehingga total produksi cenderung rendah. Sebaliknya, kepadatan terlalu tinggi dapat menyebabkan penumpukan biomassa, menurunkan penetrasi cahaya, menghambat sirkulasi air, serta meningkatkan stres fisiologis yang pada akhirnya menekan pertumbuhan dan kualitas jaringan (Buschmann et al., 2017; García-Poza et al., 2020; Duarte et al., 2022). Oleh karena itu, penentuan bobot tebar optimum menjadi kunci untuk memperoleh keseimbangan antara produktivitas dan kualitas hasil budidaya.

Salah satu indikator fisiologis penting yang mencerminkan respons rumput laut terhadap kondisi budidaya adalah kandungan klorofil. Klorofil berfungsi sebagai pigmen utama fotosintesis yang berperan menangkap energi cahaya dan mengubahnya menjadi energi kimia. Tingginya kandungan klorofil umumnya berkorelasi dengan meningkatnya aktivitas fotosintesis, efisiensi pemanfaatan cahaya, dan kapasitas pertumbuhan biomassa. Sebaliknya, penurunan klorofil sering dikaitkan dengan stres lingkungan, keterbatasan nutrisi, atau kompetisi berlebih akibat kepadatan tinggi (Raven & Beardall, 2021; Kumar et al., 2023). Dengan demikian, evaluasi kandungan klorofil penting dilakukan untuk menilai kondisi fisiologis *Gracilaria verrucosa* pada berbagai tingkat bobot tebar.

Dalam sistem tambak ekstensif, interaksi antara rumput laut dan sedimen juga memegang peranan penting. Dasar tambak merupakan reservoir unsur hara yang berfungsi menyimpan dan melepaskan karbon (C), nitrogen (N), dan fosfor (P) secara dinamis. Aktivitas budidaya rumput laut dapat memengaruhi kandungan unsur-unsur tersebut melalui deposisi bahan organik, serapan akar semu/talus dasar, serta perubahan proses mikrobiologis di sedimen. Peningkatan biomassa rumput laut berpotensi meningkatkan akumulasi karbon organik tanah, namun juga dapat mempercepat pemanfaatan nitrogen dan fosfor tergantung kondisi lingkungan dan kepadatan budidaya (Boyd & Tucker, 2019; Xu et al., 2024). Oleh karena itu, analisis C–N–P tanah penting dilakukan untuk memahami efisiensi ekologi sistem tambak berbasis rumput laut.

Selain faktor tanah, kualitas air tetap menjadi komponen utama yang menentukan keberhasilan budidaya *Gracilaria verrucosa*. Parameter seperti suhu, salinitas, kecerahan, dan kekeruhan sangat berpengaruh terhadap laju fotosintesis, osmoregulasi, metabolisme, serta penyerapan nutrisi. Perubahan kepadatan biomassa dapat mengubah karakteristik perairan, terutama melalui peningkatan bayangan talus, perubahan dinamika partikel tersuspensi, dan fluktuasi oksigen terlarut. Oleh sebab itu, evaluasi kualitas air secara simultan dengan pertumbuhan fisiologis dan kondisi tanah sangat diperlukan dalam pengelolaan budidaya modern (Neori et al., 2023; FAO, 2024).

Wilayah Pulokerto, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur, merupakan salah satu sentra potensial pengembangan *Gracilaria verrucosa* pada tambak air payau ekstensif. Kawasan ini memiliki karakteristik perairan yang sesuai, jaringan tambak luas, serta telah lama dimanfaatkan untuk budidaya perikanan pesisir. Namun, informasi ilmiah mengenai hubungan

antara bobot tebar awal dengan kandungan klorofil, dinamika unsur hara tanah, dan kualitas air pada sistem longline di lokasi tersebut masih terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menitikberatkan pada produksi biomassa atau mutu agar, sementara pendekatan ekofisiologi dan lingkungan budidaya belum banyak dikaji secara terpadu (Jiang et al., 2025; Kumar et al., 2023).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh berbagai bobot tebar awal terhadap kandungan klorofil *Gracilaria verrucosa*, dinamika karbon–nitrogen–fosfor tanah, serta kualitas air pada budidaya metode longline di tambak ekstensif Pulokerto, Kabupaten Pasuruan. Hipotesis penelitian ini adalah bahwa peningkatan bobot tebar hingga tingkat optimum akan meningkatkan kandungan klorofil dan efisiensi pemanfaatan unsur hara, namun pada kepadatan terlalu tinggi akan menurunkan performa fisiologis akibat meningkatnya kompetisi antar talus. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar ilmiah dalam menentukan bobot tebar optimum guna meningkatkan produktivitas, stabilitas lingkungan, dan keberlanjutan budidaya *Gracilaria verrucosa*.

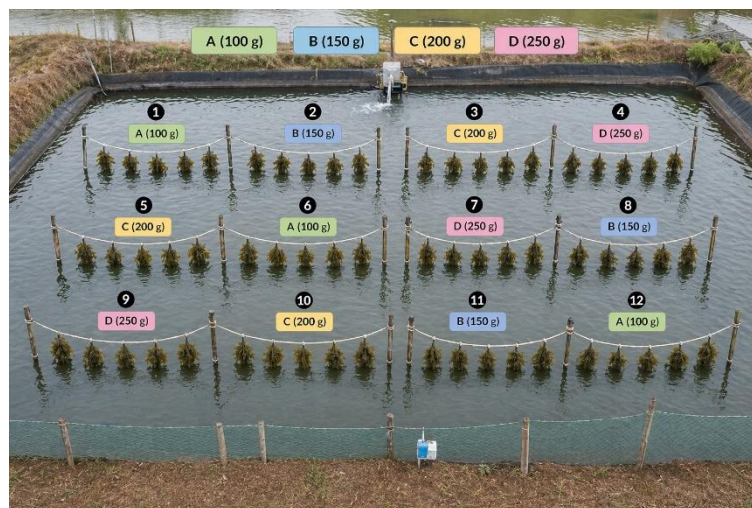
## METODE PENELITIAN

### 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 bobot 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 nutrien (García-Poza et al., 2020). Budidaya dilakukan pada kondisi alami tambak tanpa penambahan pupuk maupun input nutrien buatan, sehingga dinamika nutrien alami mengatur proses pertumbuhan dan penyerapan unsur hara (Duarte et al., 2022).

### **Pemanenan dan Persiapan Sampel**

Pada akhir masa pemeliharaan selama 42 hari, biomassa dari setiap unit percobaan dipanen. Sampel rumput laut segar digunakan untuk analisis kandungan klorofil, sedangkan sebagian lainnya dicuci menggunakan air bersih untuk menghilangkan kotoran dan epifit, kemudian dikeringkan hingga kadar air stabil untuk analisis lanjutan. Sampel tanah dan air juga diambil dari masing-masing unit percobaan pada akhir penelitian.

### **Pengukuran Kandungan Klorofil Rumput Laut**

Kandungan klorofil dianalisis menggunakan metode ekstraksi aseton 90%. Sampel talus segar ditimbang, dihancurkan, kemudian diekstraksi dalam pelarut aseton dingin dan disimpan dalam kondisi gelap selama 24 jam. Filtrat disentrifugasi dan absorbansi diukur menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 645 nm dan 663 nm. Kandungan klorofil total dihitung berdasarkan persamaan standar dan dinyatakan dalam  $\text{mg g}^{-1}$  bobot segar (Lichtenthaler, 1987).

### **Pengukuran Karbon, Nitrogen, dan Fosfor Tanah**

Sampel tanah tambak diambil dari lapisan atas sedimen (0–10 cm) pada tiap unit percobaan menggunakan soil corer. Sampel dikeringanginkan, dihaluskan, dan diayak sebelum analisis laboratorium. Kandungan karbon tanah ditentukan menggunakan metode Walkley–Black, nitrogen total dianalisis dengan metode Kjeldahl, sedangkan fosfor tersedia diukur menggunakan metode Bray I yang dibaca dengan spektrofotometer. Hasil analisis dinyatakan dalam  $\text{mg kg}^{-1}$  tanah kering (Boyd & Tucker, 2019; Shetty & Goyal, 2022).

### **Pengukuran Kualitas Air**

Parameter kualitas air diamati secara berkala selama penelitian dan dirata-ratakan pada akhir pemeliharaan. Suhu air diukur menggunakan termometer digital dan dinyatakan dalam °C. Kecerahan diukur menggunakan cakram Secchi dan dinyatakan dalam cm. Salinitas diukur menggunakan hand refractometer dan dinyatakan dalam ppt. Kekeruhan diukur menggunakan turbidimeter dan dinyatakan dalam NTU. Pengukuran dilakukan pada pagi hari untuk meminimalkan fluktuasi harian (APHA, 2017).

### **Analisis Data**

Data kandungan klorofil, karbon tanah, nitrogen tanah, fosfor tanah, serta parameter kualitas air dianalisis menggunakan analisis ragam satu arah (*one-way ANOVA*) untuk mengetahui pengaruh perbedaan bobot tebar awal. 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 hubungan antara bobot tebar awal, kondisi fisiologis rumput laut, dinamika unsur hara tanah, dan kualitas air selama budidaya (Xu et al., 2024).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kandungan Klorofil Rumput Laut

Kandungan klorofil *Gracilaria verrucosa* menunjukkan perbedaan antar perlakuan bobot tebar awal. Nilai terendah diperoleh pada perlakuan A (1,78 mg g<sup>-1</sup>), kemudian meningkat pada perlakuan B (2,01 mg g<sup>-1</sup>), dan mencapai nilai tertinggi pada perlakuan C (2,24 mg g<sup>-1</sup>). Perlakuan D menghasilkan nilai 2,11 mg g<sup>-1</sup> dan tidak berbeda nyata dengan perlakuan B maupun C berdasarkan uji Tukey HSD ( $p < 0,05$ ).

**Tabel 1.** Kandungan klorofil *Gracilaria verrucosa* pada berbagai perlakuan bobot tebar awal (mg g<sup>-1</sup>)

Perlakuan	Mean ± SD	Notasi	Keterangan
A (100 g)	1.78 ± 0.04	c	Berbeda nyata
B (150 g)	2.01 ± 0.03	b	Berbeda nyata
C (200 g)	2.24 ± 0.04	a	Berbeda nyata
D (250 g)	2.11 ± 0.04	ab	Tidak berbeda dengan B dan C

Keterangan: Nilai disajikan sebagai rata-rata ± standar deviasi (n = 3). Huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Tukey HSD taraf 95%.

Klorofil merupakan pigmen utama fotosintesis yang sangat dipengaruhi oleh kondisi fisiologis tanaman serta ketersediaan cahaya dan unsur hara. Kepadatan tebar yang optimum memungkinkan setiap talus memperoleh ruang tumbuh yang cukup, distribusi cahaya yang baik, dan pasokan nutrisi memadai sehingga sintesis klorofil berlangsung maksimal. Sebaliknya, kepadatan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan saling naung antar talus dan menurunkan efisiensi penangkapan cahaya, sehingga pembentukan pigmen fotosintetik menjadi kurang optimal (Lobban & Harrison, 1994; Kumar et al., 2023). Selain itu, nitrogen berperan penting dalam struktur molekul klorofil dan protein fotosistem. Oleh karena itu, kondisi lingkungan yang mendukung penyerapan nitrogen umumnya berkorelasi positif terhadap peningkatan kandungan klorofil pada makroalga budidaya (Holdt & Kraan, 2011).

### Kandungan Karbon Tanah

Kandungan karbon tanah berbeda nyata pada seluruh perlakuan. Nilai terendah terdapat pada perlakuan A sebesar 18.367 mg kg<sup>-1</sup>, meningkat pada perlakuan B sebesar 19.600 mg kg<sup>-1</sup>, dan tertinggi pada perlakuan C sebesar 21.033 mg kg<sup>-1</sup>. Perlakuan D menunjukkan nilai 20.400 mg kg<sup>-1</sup>, lebih rendah dibanding perlakuan C namun lebih tinggi dibanding perlakuan A dan B.

**Tabel 2.** Kandungan karbon tanah pada berbagai perlakuan bobot tebar awal ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

Perlakuan	Mean $\pm$ SD	Notasi	Keterangan
A (100 g)	18,367 $\pm$ 153	d	Berbeda nyata
B (150 g)	19,600 $\pm$ 200	c	Berbeda nyata
C (200 g)	21,033 $\pm$ 153	a	Berbeda nyata
D (250 g)	20,400 $\pm$ 200	b	Berbeda nyata

Keterangan: Nilai disajikan sebagai rata-rata  $\pm$  standar deviasi ( $n = 3$ ). Huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Tukey HSD taraf 95%.

Peningkatan karbon tanah mencerminkan akumulasi bahan organik yang berasal dari sisa biomassa, eksudat rumput laut, mikroorganisme, dan deposisi partikel organik di dasar tambak. Kehadiran biomassa rumput laut dalam jumlah optimum dapat meningkatkan fiksasi karbon melalui fotosintesis, kemudian sebagian karbon tersebut masuk ke sedimen melalui proses sedimentasi organik (Duarte et al., 2017). Sedimen tambak berfungsi sebagai penyimpan karbon penting dalam ekosistem pesisir. Sistem budidaya berbasis makroalga bahkan dipandang memiliki kontribusi terhadap konsep blue carbon karena mampu meningkatkan penyerapan dan penyimpanan karbon jangka menengah hingga panjang (Krause-Jensen & Duarte, 2016; Duarte et al., 2020).

### Kandungan Nitrogen Tanah

Kandungan nitrogen tanah meningkat dari perlakuan A hingga C. Perlakuan A memiliki nilai terendah sebesar  $1.423 \text{ mg kg}^{-1}$ , diikuti perlakuan B sebesar  $1.600 \text{ mg kg}^{-1}$ , dan perlakuan C sebesar  $1.760 \text{ mg kg}^{-1}$  sebagai nilai tertinggi. Perlakuan D menunjukkan nilai  $1.677 \text{ mg kg}^{-1}$  dan berada di antara perlakuan B dan C. Seluruh perlakuan berbeda nyata berdasarkan uji lanjut Tukey HSD.

**Tabel 3.** Kandungan nitrogen tanah pada berbagai perlakuan bobot tebar awal ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

Perlakuan	Mean $\pm$ SD	Notasi	Keterangan
A (100 g)	1,423 $\pm$ 25	d	Berbeda nyata
B (150 g)	1,600 $\pm$ 20	c	Berbeda nyata
C (200 g)	1,760 $\pm$ 20	a	Berbeda nyata
D (250 g)	1,677 $\pm$ 25	b	Berbeda nyata

Keterangan: Nilai disajikan sebagai rata-rata  $\pm$  standar deviasi ( $n = 3$ ). Huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Tukey HSD taraf 95%.

Nitrogen tanah pada tambak dipengaruhi oleh deposisi bahan organik, aktivitas mikroba, serta proses mineralisasi dan nitrifikasi. Biomassa rumput laut yang tumbuh baik mampu memanfaatkan nitrogen terlarut, sementara sisa jaringan dan detritus organik dapat memperkaya cadangan nitrogen di sedimen. Hal ini menunjukkan adanya hubungan erat antara produktivitas rumput laut dan dinamika nitrogen tanah (Boyd & Tucker, 2012). Nitrogen dalam

sedimen penting sebagai sumber hara jangka panjang karena dapat dilepaskan kembali ke kolom air melalui proses dekomposisi. Oleh sebab itu, sedimen berperan sebagai penyangga nutrisi pada sistem budidaya ekstensif (Avnimelech, 2015).

### Kandungan Fosfor Tanah

Kandungan fosfor tanah menunjukkan pola yang sama dengan karbon dan nitrogen tanah. Nilai terendah diperoleh pada perlakuan A sebesar  $510 \text{ mg kg}^{-1}$ , kemudian meningkat pada perlakuan B sebesar  $570 \text{ mg kg}^{-1}$ , dan tertinggi pada perlakuan C sebesar  $630 \text{ mg kg}^{-1}$ . Perlakuan D memiliki nilai  $600 \text{ mg kg}^{-1}$  dan berbeda nyata dengan perlakuan lainnya.

**Tabel 4.** Kandungan fosfor tanah pada berbagai perlakuan bobot tebar awal ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

Perlakuan	Mean $\pm$ SD	Notasi	Keterangan
A (100 g)	$510 \pm 10$	d	Berbeda nyata
B (150 g)	$570 \pm 10$	c	Berbeda nyata
C (200 g)	$630 \pm 10$	a	Berbeda nyata
D (250 g)	$600 \pm 10$	b	Berbeda nyata

Keterangan: Nilai disajikan sebagai rata-rata  $\pm$  standar deviasi ( $n = 3$ ). Huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Tukey HSD taraf 95%.

Fosfor di sedimen umumnya terikat pada partikel organik, mineral liat, atau senyawa kalsium dan besi. Dalam tambak budidaya, akumulasi fosfor sering terjadi melalui pengendapan bahan organik dan residu biologis dari aktivitas produksi. Rumput laut dapat membantu mendaur ulang fosfor melalui penyerapan dari air dan pengembalian sebagian ke sedimen melalui biomassa mati atau serpihan talus (Chopin et al., 2013). Ketersediaan fosfor yang seimbang penting untuk mendukung metabolisme energi, pembentukan ATP, dan pertumbuhan jaringan. Namun akumulasi berlebih perlu dikendalikan agar tidak meningkatkan risiko eutrofikasi ketika fosfor kembali terlarut ke perairan (Jiang et al., 2023).

### Kualitas Air

Parameter kualitas air selama penelitian berada pada kisaran yang relatif stabil antar perlakuan. Suhu berkisar antara  $30,4\text{--}30,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kecerahan tertinggi tercatat pada perlakuan A sebesar  $42,5 \text{ cm}$  dan terendah pada perlakuan D sebesar  $34,6 \text{ cm}$ . Salinitas berkisar antara  $27,5\text{--}28,5 \text{ ppt}$ . Nilai kekeruhan meningkat seiring perlakuan, dari  $18,2 \text{ NTU}$  pada perlakuan A hingga  $25,1 \text{ NTU}$  pada perlakuan D.

**Tabel 5.** Kualitas air selama penelitian pada berbagai perlakuan bobot tebar awal

Perlakuan	Suhu (°C)	Kecerahan (cm)	Salinitas (ppt)	Kekeruhan (NTU)
A (100 g)	30.8 ± 0.3 a	42.5 ± 2.1 a	28.5 ± 0.5 a	18.2 ± 1.5 d
B (150 g)	30.6 ± 0.2 ab	39.8 ± 1.8 ab	28.2 ± 0.4 ab	20.5 ± 1.2 c
C (200 g)	30.5 ± 0.2 b	37.2 ± 1.5 b	27.8 ± 0.3 b	22.8 ± 1.0 b
D (250 g)	30.4 ± 0.3 b	34.6 ± 1.7 c	27.5 ± 0.4 b	25.1 ± 1.3 a

Keterangan: Nilai disajikan sebagai rata-rata ± standar deviasi (n = 3). Huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji Tukey HSD taraf 95%.

Suhu, salinitas, kecerahan, dan kekeruhan merupakan faktor utama yang menentukan keberhasilan budidaya *Gracilaria verrucosa*. Suhu yang stabil mendukung aktivitas enzimatik dan fotosintesis, sedangkan salinitas yang sesuai menjaga tekanan osmotik sel tetap seimbang. Fluktuasi ekstrem pada kedua parameter tersebut dapat menurunkan laju pertumbuhan dan kualitas fisiologis rumput laut (Luhan & Sollesta, 2010). Kecerahan berkaitan langsung dengan penetrasi cahaya ke kolom air, sehingga memengaruhi fotosintesis. Penurunan kecerahan pada kepadatan biomassa tinggi umumnya disebabkan peningkatan partikel tersuspensi dan bayangan antar talus. Sementara itu, meningkatnya kekeruhan dapat menghambat penetrasi cahaya serta menurunkan efisiensi produksi primer (Boyd & Tucker, 2012). Oleh karena itu, pengelolaan kepadatan tebar dan sirkulasi air menjadi faktor penting dalam menjaga kualitas lingkungan budidaya yang stabil.

## PENUTUP

Perbedaan bobot tebar awal memberikan pengaruh nyata terhadap kandungan klorofil rumput laut, kandungan karbon, nitrogen, dan fosfor tanah, serta beberapa parameter kualitas air selama budidaya *Gracilaria verrucosa*. Perlakuan 200 g menunjukkan hasil terbaik dengan kandungan klorofil tertinggi, akumulasi unsur hara tanah terbesar, dan kondisi lingkungan yang masih optimal. Peningkatan bobot tebar hingga 250 g mulai menunjukkan indikasi penurunan performa fisiologis serta menurunnya kualitas optik perairan akibat meningkatnya kekeruhan. Dengan demikian, bobot tebar awal 200 g direkomendasikan sebagai kepadatan optimum untuk budidaya metode longline di tambak ekstensif Pulokerto.

## DAFTAR PUSTAKA

- APHA. 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. American Public Health Association, Washington DC.
- Avnimelech, Y. 2015. *Biofloc Technology: A Practical Guide Book*. 3rd ed. World Aquaculture Society, Baton Rouge.
- Boyd, C.E., & Tucker, C.S. 2012. *Pond Aquaculture Water Quality Management*. Springer, New York.
- Boyd, C.E., & Tucker, C.S. 2019. *Soil and Water Quality in Aquaculture*. Auburn University Press.

- Buschmann, A.H., Camus, C., Infante, J., Neori, A., Israel, A., Hernández-González, M.C., et al. 2017. Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity. *European Journal of Phycology*, 52: 391–406.
- Chopin, T., Cooper, J.A., Reid, G., Cross, S., & Moore, C. 2013. Open-water integrated multi-trophic aquaculture: environmental biomitigation and economic diversification. *Aquaculture Canada*, 111–130.
- Duarte, C.M., Krause-Jensen, D., & Hendriks, I.E. 2017. Marine climate change mitigation through blue carbon ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, 4: 1–6.
- Duarte, C.M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A., & Krause-Jensen, D. 2020. Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? *Frontiers in Marine Science*, 7: 1–18.
- Duarte, C.M., et al. 2022. The role of seaweed aquaculture in sustainable coastal production systems. *Nature Sustainability*, 5: 1–10.
- FAO. 2024. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- García-Poza, S., et al. 2020. Cultivation density effects on growth and biochemical composition of red seaweeds. *Algal Research*, 48: 101–109.
- Holdt, S.L., & Kraan, S. 2011. Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology*, 23: 543–597.
- Jiang, Z., et al. 2023. Nutrient cycling and environmental performance of macroalgal aquaculture systems. *Aquaculture Reports*, 28: 101–115.
- Jiang, Z., et al. 2025. Seaweed aquaculture for nutrient recovery and coastal sustainability. *Marine Pollution Bulletin*, 198: 115–128.
- Krause-Jensen, D., & Duarte, C.M. 2016. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*, 9: 737–742.
- Krause-Jensen, D., et al. 2023. Expanding blue carbon science to include seaweed ecosystems. *Global Change Biology*, 29: 1–15.
- Kumar, R., et al. 2023. Physiological responses of cultivated seaweeds to stocking density and nutrient availability. *Journal of Applied Phycology*, 35: 221–234.
- Lichtenthaler, H.K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148: 350–382.
- Lobban, C.S., & Harrison, P.J. 1994. *Seaweed Ecology and Physiology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Luhan, M.R.J., & Sollesta, H. 2010. Growth performance of *Gracilaria* under varying salinity conditions. *Philippine Journal of Science*, 139: 45–52.
- Mishra, P., et al. 2019. Statistical tools in agricultural experiments: ANOVA and post hoc tests. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 7: 1–9.
- Neori, A., et al. 2023. Water quality management in sustainable seaweed aquaculture. *Aquaculture Environment Interactions*, 15: 55–70.
- Raven, J.A., & Beardall, J. 2021. Photosynthesis and resource use efficiency in algae. *Phycologia*, 60: 1–15.
- Rejeki, S., et al. 2018. Seed quality and cultivation performance of *Gracilaria verrucosa* in Indonesian ponds. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 17: 45–53.

- Shetty, R., & Goyal, S. 2022. Soil nutrient analytical methods for aquatic farming systems. *Environmental Monitoring Review*, 14: 88–101.
- Xu, Y., et al. 2024. Sediment nutrient dynamics in integrated seaweed pond aquaculture. *Aquaculture Research*, 55: 2100–2115.