

Optimization of Initial Weight and Depth in Vertical Culture of *Caulerpa lentillifera* Using Monofilament Nylon Rope

(Optimasi Berat Awal dan Kedalaman pada Vertikultur *Caulerpa lentillifera* Menggunakan Tali Nilon Monofilamen)

Edwin L. A Ngangi¹, Adnan S. Wantasen², Sammy N.J. Longdong¹,
Unstain N.W.J. Rembet², Joppy D. Mudeng¹

¹ Aquaculture Study Program, Faculty of Fisheries and Marine Sciences, Sam Ratulangi University, Manado, Indonesia

² Aquatic Resources Management Study Program, Faculty of Fisheries and Marine Sciences, Sam Ratulangi University, Manado, Indonesia

*Corresponding authors edwin.ngangi@unsrat.ac.id

Manuscript received: 19 Des 2025. Revision accepted: 16 Jan. 2026

Abstract. This study aimed to analyze the effects of initial seed weight and cultivation depth on the growth of *Caulerpa lentillifera* in a vertical culture system using monofilament nylon rope as the planting medium in the coastal waters of Bahoi Village, North Minahasa. A 3×3 factorial design was applied, consisting of three initial weights (50 g, 100 g, and 150 g) and three depths (20 cm, 70 cm, and 120 cm), each with three replications. Observed parameters included absolute growth and specific growth rate (SGR) over a 28-day cultivation period. The results indicated that initial weight significantly affected growth, whereas depth had no significant effect and no interaction was detected between the two factors. The 50 g treatment produced the highest growth performance with an SGR of $1.39 \pm 0.08\% \text{ day}^{-1}$, which falls within the productivity range of tropical open-sea farming systems. These findings highlight that optimizing seed weight plays a more critical role than shallow depth variation in improving the cultivation efficiency of *C. lentillifera* under a monofilament nylon-based vertical culture system.

Keywords: initial weight; marine aquaculture; *C. lentillifera*; monofilament nylon; vertical culture system.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh berat awal bibit dan kedalaman pemeliharaan terhadap pertumbuhan *Caulerpa lentillifera* pada sistem vertikultur menggunakan tali nilon monofilamen sebagai media tanam di perairan Desa Bahoi, Minahasa Utara. Percobaan menggunakan rancangan faktorial 3×3 dengan tiga taraf berat awal (50 g, 100 g, dan 150 g) serta tiga taraf kedalaman (20 cm, 70 cm, dan 120 cm), masing-masing tiga ulangan. Parameter yang diamati meliputi pertumbuhan mutlak dan laju pertumbuhan harian (SGR) selama 28 hari. Hasil analisis menunjukkan bahwa berat awal berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan, sedangkan kedalaman tidak berpengaruh nyata dan tidak terdapat interaksi antara kedua faktor. Perlakuan 50 g menghasilkan pertumbuhan tertinggi dengan nilai SGR $1,39 \pm 0,08\%$ per hari. Nilai tersebut berada dalam kisaran produktivitas sistem budidaya laut terbuka tropis. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa optimasi ukuran bibit lebih menentukan dibandingkan variasi kedalaman dangkal dalam meningkatkan efisiensi budidaya *C. lentillifera* pada sistem vertikultur berbasis tali nilon monofilamen.

Kata kunci: berat bibit; budidaya laut; *C. lentillifera*; nilon monofilamen; sistem vertikal

PENDAHULUAN

Makroalga laut merupakan komponen penting dalam pengembangan akuakultur pesisir tropis sebagai sumber pangan, bahan baku industri, serta bagian dari sistem budidaya berkelanjutan. Diversifikasi komoditas alga diperlukan untuk meningkatkan nilai tambah dan ketahanan ekonomi masyarakat pesisir. Secara global, produksi rumput laut terus meningkat dalam dua dekade terakhir dan menjadi komponen penting dalam pengembangan akuakultur laut berkelanjutan (Buschmann *et al.*, 2017). Salah satu spesies yang berpotensi dikembangkan yaitu *Caulerpa lentillifera* ("sea grape"), alga hijau konsumsi bernilai gizi tinggi yang telah dibudidayakan secara luas di Asia.

Spesies ini mengandung protein, serat, mineral, dan senyawa bioaktif dengan potensi antioksidan (Setthamongkol *et al.*, 2019). Pengembangan teknik budidaya rumput laut tropis telah menunjukkan variasi produktivitas yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan metode kultur yang diterapkan (Hurtado *et al.*, 2013). Selain itu, biomassa dan komponen bioaktifnya dilaporkan berpotensi dalam sistem akuakultur terintegrasi dan pengolahan limbah (Chen *et al.*, 2019). Karakter pertumbuhan *C. lentillifera* relatif cepat serta adaptasi pada perairan tropis dangkal menjadikannya kandidat potensial untuk budidaya skala masyarakat.

Budidaya makroalga umumnya dilakukan melalui sistem terkontrol berbasis darat maupun sistem laut terbuka yang memanfaatkan kondisi alami perairan (Chen *et al.*, 2019). Budidaya rumput laut di Indonesia, sistem laut terbuka lebih banyak diterapkan karena sederhana dan berbiaya relatif rendah. Walaupun demikian, produktivitasnya sangat dipengaruhi oleh pengelolaan faktor teknis yang belum selalu teroptimasi.

Salah satu pendekatan yang berkembang adalah sistem vertikultur, yaitu metode budidaya secara bertingkat dalam kolom air untuk memaksimalkan pemanfaatan ruang vertikal. Sistem ini berpotensi meningkatkan produksi per satuan luas, sehingga relevan pada wilayah pesisir dengan keterbatasan ruang. Keberhasilannya tidak hanya ditentukan oleh konstruksi, tetapi juga oleh faktor biologis seperti berat awal bibit dan kedalaman instalasi wadah budidaya.

Berat awal bibit rumput laut memengaruhi rasio luas permukaan terhadap volume, efisiensi penyerapan nutrisi, dan dinamika metabolisme jaringan. Biomassa awal yang terlalu besar dapat meningkatkan kompetisi internal dan efek *self-shading*, sehingga menurunkan efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan (Guo *et al.*, 2015a). Studi pada *Kappaphycus alvarezii* menunjukkan bahwa berat awal yang lebih rendah dapat menghasilkan laju pertumbuhan relatif lebih tinggi (Ismail *et al.*, 2015), ini menegaskan pentingnya optimasi ukuran bibit dalam budidaya rumput laut.

Kedalaman instalasi wadah budidaya rumput laut berkaitan langsung dengan ketersediaan cahaya sebagai sumber energi fotosintesis. Intensitas cahaya menurun seiring bertambahnya kedalaman akibat penyerapan dan distribusi dalam kolom air. Pada perairan tropis yang relatif jernih, penetrasi cahaya masih berada dalam zona eufotik hingga lebih dari satu meter dan mendukung pertumbuhan makroalga (Marinho-Soriano *et al.*, 2011). *C. lentillifera* juga menunjukkan plastisitas fisiologis terhadap variasi intensitas cahaya selama berada di atas titik kompensasi fotosintesis (Guo *et al.*, 2015a).

Interaksi antara berat awal dan kedalaman dalam sistem vertikultur penting dikaji karena keduanya dapat memengaruhi distribusi cahaya dan nutrisi dalam rumput laut. Meskipun beberapa penelitian telah mengevaluasi pertumbuhan *C. lentillifera* pada kondisi berbeda, kajian yang secara simultan menguji kedua faktor tersebut dalam sistem vertikultur laut terbuka, khususnya pada perairan tropis Indonesia, masih terbatas. Sebagian besar studi sebelumnya berfokus pada sistem terkontrol atau satu faktor tunggal.

Perairan Desa Bahoi, Minahasa Utara yang berbentuk di teluk, relatif jernih dan berarus stabil, menyediakan kondisi yang sesuai untuk pengujian sistem vertikultur. Pengembangan teknik budidaya berbasis kondisi lokal menjadi penting untuk mendukung diversifikasi usaha pesisir dan meningkatkan efisiensi produksi.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh berat awal bibit dan kedalaman pemeliharaan terhadap pertumbuhan *Caulerpa lentillifera* dalam sistem vertikultur laut terbuka, serta mengevaluasi interaksi antara kedua faktor tersebut sebagai dasar optimasi budidaya yang efisien dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Desain Eksperimen dan Pemeliharaan

Penelitian ini dilaksanakan pada Mei–Juli 2023 di perairan Desa Bahoi, Kecamatan Likupang Barat, Minahasa Utara, Sulawesi Utara. Sistem vertikultur menggunakan tali nilon monofilamen sebagai tali ris utama dan cabang, karena memiliki ketahanan terhadap abrasi dan minim penyerapan air, sehingga mampu menjaga stabilitas posisi bibit selama periode pemeliharaan.

Wadah sistem vertikultur ini dipasang searah dengan arus yang dominan di lokasi penelitian (Perairan Bahoi). Teknik pemasangan ini untuk meminimalkan gesekan antar tali dan mengurangi potensi kerusakan thallus. Jarak antar ikatan rumpun bibit ± 15 cm untuk mencegah saling tumpang tindih rumput laut selama fase pertumbuhan. Penimbangan dilakukan setelah air di bibit ditiriskan selama ± 3 menit untuk mengurangi bias akibat adanya air di permukaan thallus.

Penelitian menggunakan rancangan faktorial 3×3 dalam Rancangan Acak Lengkap

(RAL). Faktor pertama yaitu berat awal bibit yang terdiri atas 50 g, 100 g, dan 150 g. Faktor kedua yaitu kedalaman pemeliharaan: 20 cm, 70 cm, dan 120 cm dari permukaan air. Setiap kombinasi perlakuan diulang sebanyak tiga kali sehingga terdapat 27 unit percobaan.

Bibit *Caulerpa lentillifera* diperoleh dari populasi alami lokal yang sehat dan seragam. Bibit ditimbang menggunakan timbangan digital sebelum diikat pada tali ris cabang jenis nilon monofilamen dengan jarak antar ikatan ± 15 cm. Sistem vertikultur dipasang secara tegak dengan pelampung di bagian atas dan pemberat di bagian bawah untuk menjaga posisi selama budidaya.

Parameter Pengamatan dan Analisis Statistik

Pengamatan dilakukan setiap tujuh hari selama 28 hari. Parameter yang diukur meliputi pertumbuhan mutlak, pertumbuhan nisbi, dan laju pertumbuhan harian (*Specific Growth Rate/SGR*). Pengukuran berat dilakukan setelah bibit dibersihkan dari partikel dengan cara thallus dikibas-kibaskan dalam air, dan melepas organisme penempel apabila ada.

Kualitas air yang diamati meliputi suhu, salinitas, oksigen terlarut (DO), dan kecerahan. Pengukuran dilakukan setiap sebelum penimbangan *C. lentillifera* untuk memastikan kondisi lingkungan berada dalam kisaran optimal bagi pertumbuhan *C. lentillifera*.

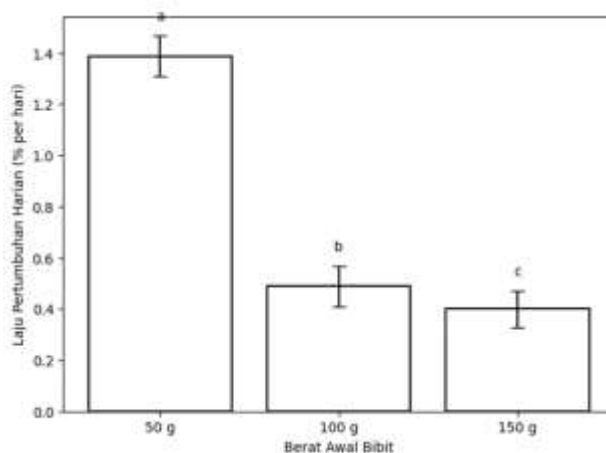
Data dianalisis menggunakan analisis varians (ANOVA) dua arah pada taraf signifikansi 5% untuk mengetahui pengaruh berat awal, kedalaman, serta interaksi kedua faktor terhadap pertumbuhan.

HASIL

Dinamika Pertumbuhan Biomassa

Berdasarkan hasil pengamatan selama 28 hari pemeliharaan, seluruh perlakuan menunjukkan kecenderungan peningkatan biomassa dari waktu ke waktu. Pada minggu pertama (hari ke-7, penimbangan ke-2), sebagian perlakuan mengalami penurunan berat relatif kecil, terutama pada berat awal 100 g dan 150 g. Penurunan awal ini diduga berkaitan dengan proses adaptasi fisiologis terhadap lingkungan baru serta kemungkinan kehilangan mukus (lendir) atau bagian thallus yang rusak saat penanaman.

Setelah fase adaptasi awal, seluruh perlakuan menunjukkan pola pertumbuhan progresif hingga hari ke-28. Pada berat awal 50 g, peningkatan biomassa terlihat konsisten dan relatif stabil setiap minggu. Sebaliknya, pada berat awal 100 g dan 150 g, laju kenaikan berat cenderung lebih lambat dan fluktuatif, meskipun tetap menunjukkan tren peningkatan secara keseluruhan.



Gambar 1. Laju pertumbuhan harian (SGR) *Caulerpa lentillifera* pada berbagai berat awal (rerata $\pm$ SD, n = 9). Huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0,05$).

Kenaikan biomassa paling nyata terjadi antara hari ke-14 (penimbangan ke-3) hingga hari ke-28 (penimbangan ke-5), yang mengindikasikan bahwa fase pertumbuhan eksponensial berlangsung setelah periode adaptasi awal (hari ke-7, penimbangan ke-2). Pola ini menunjukkan bahwa sistem vertikultur mampu mendukung pertumbuhan *Caulerpa lentillifera* secara berkelanjutan dalam rentang waktu pemeliharaan 28 hari.

Pengaruh Berat Awal

Analisis pertumbuhan mutlak menunjukkan bahwa perlakuan berat awal 50 g menghasilkan nilai tertinggi (24,3 g), diikuti oleh 150 g (17,3 g), dan terendah pada 100 g (14,9 g). Secara statistik, perbedaan berat awal memberikan pengaruh sangat nyata terhadap pertumbuhan mutlak ($p < 0,01$).

Pada pertumbuhan nisbi, berat awal 50 g juga menunjukkan nilai tertinggi (16,2%), kemudian 100 g (14,9%), dan terendah 150 g (11,5%). Pola serupa terlihat pada laju pertumbuhan harian (SGR), di mana berat awal 50 g mencapai 1,39% hari⁻¹, lebih tinggi dibanding 100 g (0,53%) dan 150 g (0,41%).

Hasil ini menunjukkan bahwa biomassa awal yang lebih kecil memberikan respons pertumbuhan relatif yang lebih baik. Secara biologis, kondisi ini dapat dikaitkan dengan rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih besar pada bibit berukuran kecil, sehingga efisiensi penyerapan nutrisi dan cahaya relatif lebih optimal. Selain itu, kepadatan thallus yang lebih rendah kemungkinan mengurangi kompetisi internal dalam memperoleh unsur hara.

Uji lanjut kontras memperlihatkan bahwa berat awal 50 g berbeda sangat nyata dibanding 100 g pada pertumbuhan mutlak. Namun, perbedaan antara 100 g dan 150 g tidak selalu menunjukkan perbedaan signifikan pada seluruh parameter, mengindikasikan bahwa penurunan laju pertumbuhan mulai terjadi pada kisaran biomassa menengah hingga tinggi.

Pengaruh Kedalaman

Pertumbuhan mutlak tertinggi berdasarkan kedalaman diperoleh pada 70 cm (20,22 g), diikuti 20 cm (18,33 g), dan terendah pada 120 cm (17,93 g). Meskipun secara numerik kedalaman 70 cm menunjukkan nilai tertinggi, analisis sidik ragam menunjukkan bahwa perbedaan kedalaman tidak memberikan pengaruh nyata terhadap pertumbuhan mutlak ($p > 0,05$).

Hal serupa terjadi pada pertumbuhan nisbi dan laju pertumbuhan harian. Nilai pertumbuhan nisbi tertinggi tercatat pada 70 cm (26,8%), sedangkan kedalaman 20 cm dan 120 cm menunjukkan nilai relatif serupa. Laju pertumbuhan harian berkisar antara 0,7–0,8% hari⁻¹ tanpa perbedaan signifikan secara statistik.

Tidak signifikannya perbedaan ini menunjukkan bahwa rentang kedalaman 20–120 cm masih berada dalam zona eufotik optimal di lokasi penelitian. Intensitas cahaya pada seluruh kedalaman tersebut tampaknya masih mencukupi untuk mendukung aktivitas fotosintesis *C. lentillifera*. Dengan demikian, dalam konteks perairan Desa Baho, kedalaman hingga 120 cm belum menjadi faktor pembatas pertumbuhan.

Interaksi Faktor

Hasil analisis *two-way* ANOVA menunjukkan bahwa tidak terdapat interaksi signifikan antara berat awal dan kedalaman terhadap pertumbuhan mutlak, pertumbuhan nisbi, maupun laju pertumbuhan harian ($p > 0,05$).

Hal ini berarti respons pertumbuhan akibat variasi berat awal bersifat konsisten pada seluruh kedalaman yang diuji. Dengan kata lain, efek dominan berasal dari faktor berat awal, sementara variasi kedalaman dalam rentang yang diuji tidak memodifikasi pola pertumbuhan yang dihasilkan oleh ukuran bibit.

Ketiadaan interaksi juga mengindikasikan bahwa dalam sistem vertikultur dangkal seperti yang diterapkan pada penelitian ini, optimasi produksi lebih efektif difokuskan pada pemilihan ukuran bibit dibandingkan penyesuaian kedalaman tanam dalam rentang kurang dari 1,5 meter.

Kualitas Air

Selama penelitian, suhu berkisar antara 29,21–30,39 °C, salinitas 31,22–31,62 ppt, oksigen terlarut 6,59 mg L⁻¹, kecepatan arus 0,24 m s⁻¹, dan kecerahan dengan menggunakan *secchi disk* mendapatkan bahwa visibilitas penuh (100%) hingga kedalaman 3 m selama periode pengamatan.

Seluruh parameter tersebut berada dalam kisaran yang mendukung pertumbuhan optimal *Caulerpa lentillifera*. Stabilitas kualitas air selama masa pemeliharaan kemungkinan menjadi salah satu faktor yang menyebabkan tidak terdeteksinya pengaruh kedalaman secara signifikan. Kondisi lingkungan yang relatif homogen pada kolom air dangkal memungkinkan pertumbuhan berlangsung relatif seragam di seluruh perlakuan kedalaman.

PEMBAHASAN

Penelitian ini merupakan pengembangan lanjutan dari studi sebelumnya yang mengevaluasi pengaruh berat awal bibit pada sistem rawai permukaan (Mamesah *et al.*, 2025). Berbeda dengan pendekatan tersebut, penelitian ini menerapkan sistem vertikultur yang memanfaatkan kolom air secara vertikal dan menguji secara simultan pengaruh berat awal serta kedalaman tanam. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mereplikasi desain sebelumnya, tetapi memperluas cakupan analisis melalui konfigurasi ruang yang berbeda serta pendekatan faktorial dua arah untuk mengevaluasi potensi optimasi produksi secara lebih komprehensif.

Peran Berat Awal

Hasil penelitian ini menunjukkan secara konsisten bahwa berat awal bibit merupakan faktor yang paling menentukan dalam pertumbuhan *Caulerpa lentillifera* pada sistem vertikultur. Perlakuan 50 g memberikan pertumbuhan mutlak, pertumbuhan nisbi, dan laju pertumbuhan harian tertinggi dibandingkan berat awal 100 g dan 150 g. Temuan ini menegaskan bahwa pengelolaan biomassa awal bukan sekadar aspek teknis penanaman, melainkan komponen biologis yang secara langsung memengaruhi dinamika pertumbuhan di lapangan.

Secara fisiologis, biomassa awal yang lebih kecil memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih besar, sehingga difusi nutrisi dan pertukaran gas dapat berlangsung lebih efisien, yang pada akhirnya mendukung pertumbuhan relatif yang lebih tinggi (Guo *et al.*, 2015a). Hasil serupa dilaporkan pada sistem rawai panjang berkeramba jaring, di mana bobot awal tanam 25 g memberikan pertumbuhan terbaik (Susilowati *et al.*, 2019). Penggunaan keramba jaring nilon efektif melindungi rumput laut dari gangguan ikan herbivora di perairan terbuka (Susilowati *et al.*, 2019). Pada makroalga fotosintetik seperti *C. lentillifera*, ketersediaan nitrogen dan fosfor berperan penting dalam pembentukan jaringan baru (Guo *et al.*, 2015b). Ketika biomassa awal terlalu besar, kepadatan thallus dapat meningkatkan efek peneduhan diri (self-shading), sehingga distribusi cahaya di dalam rumpun menjadi kurang merata dan efisiensi fotosintesis menurun (Guo *et al.*, 2015a). Fenomena ini sejalan dengan prinsip fisiologi makroalga, di mana peningkatan biomassa dalam satuan ruang dapat memengaruhi penetrasi cahaya dan rasio luas permukaan terhadap volume talus (Lobban & Harrison, 2009).

Selain itu, biomassa besar memerlukan energi pemeliharaan yang lebih tinggi untuk mempertahankan jaringan yang telah terbentuk. Sebagian energi yang tersedia akan terserap

untuk kebutuhan metabolisme dasar, sehingga alokasi untuk pertumbuhan baru menjadi relatif lebih kecil. Kondisi ini dapat menjelaskan mengapa perlakuan 150 g tidak menunjukkan pertumbuhan relatif lebih tinggi meskipun biomassa awalnya lebih besar. Pola serupa juga dilaporkan pada *Kappaphycus alvarezii*, di mana berat awal yang lebih rendah menghasilkan laju pertumbuhan relatif lebih baik (Ismail *et al.*, 2015).

Temuan ini memperlihatkan bahwa dalam sistem vertikultur, terdapat keseimbangan antara kepadatan awal dan kapasitas lingkungan dalam menyediakan sumber daya. Peningkatan biomassa awal tanpa mempertimbangkan daya dukung lingkungan tidak selalu menghasilkan peningkatan produktivitas. Secara praktis, sistem vertikultur berpotensi meningkatkan kepadatan titik tanam (rumpun bibit) tanpa peningkatan luas area budidaya, sehingga berimplikasi pada efisiensi ruang dan bahan konstruksi sebagai bentuk intensifikasi budidaya.

Fase Adaptasi

Penurunan berat pada minggu pertama, khususnya pada perlakuan 100 g dan 150 g, menunjukkan adanya fase adaptasi fisiologis setelah bibit dipindahkan ke sistem vertikultur. Pada praktik budidaya lapangan, fase ini sering terjadi akibat perubahan kondisi hidrodinamika, intensitas cahaya, dan manipulasi mekanis saat pemasangan bibit.

Penyesuaian terhadap lingkungan baru memerlukan waktu untuk stabilisasi proses fotosintesis dan metabolisme seluler (Guo *et al.*, 2015a). Setelah fase adaptasi terlewati, pertumbuhan meningkat secara progresif hingga hari ke-28, menunjukkan bahwa sistem vertikultur mampu mendukung fase pertumbuhan eksponensial yang relatif stabil.

Pola lag-eksponensial ini konsisten dengan dinamika pertumbuhan makroalga tropis pada sistem budidaya laut terbuka (Marinho-Soriano *et al.*, 2011). Hal ini mengindikasikan bahwa respons yang diamati bukan fenomena insidental, melainkan bagian dari dinamika biologis yang umum pada makroalga dalam sistem budidaya alami.

Pengaruh Kedalaman

Variasi kedalaman 20–120 cm tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap pertumbuhan. Dalam konteks perairan tropis yang jernih seperti di lokasi penelitian, penetrasi cahaya hingga kedalaman lebih dari satu meter masih memungkinkan aktivitas fotosintesis berlangsung optimal (Marinho-Soriano *et al.*, 2011). Dalam sistem tertutup, laju pertumbuhan optimal umumnya dilaporkan terjadi pada minggu kedua dengan kandungan protein biomassa yang relatif lebih tinggi (Sompong *et al.*, 2020).

C. lentillifera memiliki kemampuan adaptif terhadap variasi intensitas cahaya selama berada di atas titik kompensasi fotosintesis (Guo *et al.*, 2015a). Dengan demikian, tidak signifikannya perbedaan antar kedalaman menunjukkan bahwa rentang yang diuji masih berada dalam zona yang mendukung pertumbuhan. Pemberian naungan dilaporkan dapat meningkatkan performa pertumbuhan dibandingkan kondisi tanpa naungan (Valentine *et al.*, 2021).

Kecenderungan nilai pertumbuhan yang sedikit lebih tinggi pada kedalaman 70 cm dapat dikaitkan dengan kondisi mikrohabitat yang lebih stabil dibandingkan lapisan permukaan yang lebih fluktuatif akibat paparan langsung cahaya dan arus. Kedalaman menengah sering kali memberikan keseimbangan antara ketersediaan cahaya dan stabilitas hidrodinamika.

Interaksi Faktor dalam Sistem Vertikultur

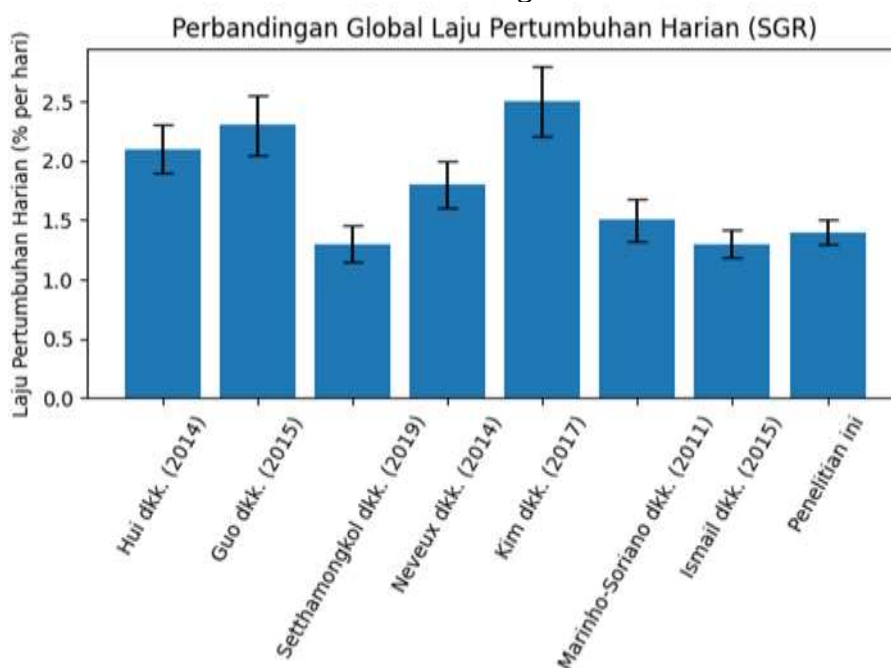
Ketiadaan interaksi signifikan antara berat awal dan kedalaman menunjukkan bahwa respons pertumbuhan akibat variasi biomassa awal relatif konsisten pada seluruh kedalaman yang diuji. Hal ini mengindikasikan bahwa faktor internal lebih dominan dibandingkan variasi vertikal pada kolom air dangkal.

Temuan ini menunjukkan bahwa optimasi biomassa awal dalam sistem vertikultur tidak semata-mata merupakan persoalan teknis penanaman, tetapi berkaitan langsung dengan prinsip efisiensi metabolik dan pemanfaatan ruang budidaya pada skala produksi pesisir. Dengan demikian, pengelolaan ukuran bibit menjadi bagian dari strategi intensifikasi yang berbasis pada respons fisiologis organisme, bukan sekadar pertimbangan praktis lapangan.

Posisi Global dan Implikasi Produksi

Nilai SGR maksimum sebesar 1,39% hari⁻¹ menunjukkan bahwa sistem vertikultur yang digunakan mampu menghasilkan pertumbuhan yang kompetitif dan masih berada dalam kisaran sistem budidaya laut terbuka tropis yang dilaporkan pada berbagai konfigurasi kultur *Caulerpa lentillifera* (Marinho-Soriano *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2015a; Paul *et al.*, 2014; Anh *et al.*, 2022).

Studi terbaru pada sistem polikultur juga melaporkan bahwa performa pertumbuhan *C. lentillifera* tetap berada dalam kisaran produktivitas moderat hingga tinggi ketika kondisi kualitas air terjaga dengan baik (Anh *et al.*, 2022), sehingga capaian penelitian ini dapat dikategorikan realistis dan aplikatif pada skala budidaya pesisir. Dari perspektif pembudidaya skala pesisir, penggunaan bibit 50 g tidak hanya meningkatkan laju pertumbuhan relatif tetapi juga memungkinkan distribusi titik tanam yang lebih banyak dalam satu unit vertikultur tanpa meningkatkan kebutuhan bahan konstruksi secara signifikan.



Gambar 1. Perbandingan global laju pertumbuhan harian (SGR) *Caulerpa lentillifera* dan makroalga tropis pada berbagai sistem budidaya.

Grafik perbandingan global yang disajikan (Gambar 3) memperlihatkan bahwa variasi produktivitas antar penelitian lebih banyak dipengaruhi oleh tipe sistem budidaya dibandingkan faktor teknis seperti kedalaman dangkal. Dengan demikian, capaian penelitian ini dapat dikategorikan sebagai produktivitas moderat namun stabil dan realistis untuk skala pesisir.

Dalam pengembangan budidaya di wilayah tropis, stabilitas produksi dan kesederhanaan teknologi sering kali lebih relevan dibandingkan pencapaian pertumbuhan maksimum dalam sistem terkontrol. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip pengelolaan akuakultur berkelanjutan yang menekankan konsistensi produksi dan efisiensi sumber daya

dalam jangka panjang.

Stabilitas sistem menjadi faktor penting selain capaian pertumbuhan maksimum. Penggunaan tali nilon monofilamen sebagai tali ris turut mendukung stabilitas struktur vertikultur selama penelitian. Stabilitas tersebut memungkinkan distribusi bibit yang relatif seragam pada berbagai kedalaman serta meminimalkan gangguan mekanis yang dapat memengaruhi pertumbuhan alga. Dengan demikian, kombinasi optimasi berat awal dan struktur vertikultur yang stabil berkontribusi terhadap performa pertumbuhan yang konsisten selama periode pemeliharaan.

Stabilitas suhu, salinitas, oksigen terlarut, dan arus selama penelitian memberikan kondisi yang mendukung pertumbuhan *C. lentillifera*. Dengan lingkungan yang relatif homogen, respons pertumbuhan lebih mencerminkan pengaruh perlakuan dibandingkan tekanan lingkungan eksternal. Kondisi perairan Bahoi yang relatif terlindung dari gelombang besar serta memiliki arus sedang ($0,24 \text{ m s}^{-1}$) memungkinkan stabilitas posisi vertikultur selama periode pemeliharaan. Stabilitas ini berkontribusi terhadap distribusi cahaya dan nutrisi yang relatif homogen dalam kolom air dangkal.

Dari sudut pandang produksi, penggunaan bibit 50 g memberikan efisiensi biomassa awal sekaligus laju pertumbuhan relatif yang lebih tinggi. Strategi ini memungkinkan peningkatan jumlah titik tanam dalam satu unit vertikultur tanpa perlu memperluas area budidaya. Pendekatan tersebut selaras dengan konsep intensifikasi budidaya makroalga yang menekankan optimasi manajemen dan efisiensi ruang dalam meningkatkan produktivitas (Chen *et al.*, 2019; Neori *et al.*, 2004).

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama 28 hari pada satu periode musim dengan kondisi perairan relatif stabil. Variasi musiman, fluktuasi nutrisi, serta pengaruh kedalaman lebih dari 120 cm belum dievaluasi. Selain itu, analisis kualitas biomassa seperti kandungan klorofil dan komponen bioaktif belum dilakukan. Oleh karena itu, generalisasi hasil pada kondisi hidrodinamika yang berbeda perlu dilakukan dengan hati-hati.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa berat awal bibit merupakan faktor utama dalam menentukan pertumbuhan *Caulerpa lentillifera* pada sistem vertikultur, sedangkan variasi kedalaman dalam rentang dangkal tidak berpengaruh signifikan. Dalam konteks global, produktivitas yang diperoleh berada dalam kisaran sistem budidaya laut terbuka tropis yang kompetitif dan aplikatif untuk skala pesisir. Temuan ini menegaskan bahwa optimasi ukuran bibit merupakan langkah strategis dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan budidaya alga hijau tropis.

Secara konseptual, pendekatan vertikultur dalam penelitian ini merepresentasikan langkah menuju intensifikasi budidaya makroalga berbasis efisiensi ruang dan respons fisiologis organisme, yang relevan bagi pengembangan sistem produksi pesisir tropis secara berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa berat awal bibit berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan *Caulerpa lentillifera* pada sistem vertikultur, dengan berat awal 50 g memberikan performa terbaik. Variasi kedalaman 20–120 cm tidak berpengaruh nyata dan tidak ditemukan interaksi antara kedua faktor. Hasil ini menegaskan bahwa dalam rentang kedalaman eufotik, optimasi ukuran bibit lebih menentukan dibandingkan pengaturan posisi vertikal dalam kolom air. Temuan ini memberikan dasar teknis yang jelas untuk meningkatkan efisiensi budidaya *C. lentillifera* di perairan tropis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh PNPB BLU Universitas Sam Ratulangi melalui Program Riset Terapan Unggulan Unsrat Klaster 1 (RTUU_K1) Tahun Anggaran 2023 berdasarkan Surat Kontrak Nomor: 782/UN12/LL/2023/UN12.13/LT/2023. Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih atas dukungan pendanaan yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anh, N. T. N., Murungu, D. K., Khanh, L. V., & Hai, T. N. (2022). Polyculture of sea grape (*Caulerpa lentillifera*) with different stocking densities of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*): Effects on water quality, shrimp performance and sea grape proximate composition. *Algal Research*, 67, 102845. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102845>
- Buschmann, A. H., Camus, C., Infante, J., Neori, A., Israel, Á., Hernández-González, M. C., Pereda, S. V., Gómez-Pinchetti, J. L., Golberg, A., Tadmor-Shalev, N., & Critchley, A. T. (2017). Seaweed production: Overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity. *European Journal of Phycology*, 52(4), 391–406. <https://doi.org/10.1080/09670262.2017.1365175>
- Chen, X., Sun, Y., Liu, H., Liu, S., Qin, Y., & Li, P. (2019). Advances in cultivation, wastewater treatment application, bioactive components of *Caulerpa lentillifera* and their biotechnological applications. *PeerJ*, 7, e6118. <https://doi.org/10.7717/peerj.6118>
- Guo, H., Yao, J., Sun, Z., & Duan, D. (2015a). Effect of temperature and irradiance on the growth of the green alga *Caulerpa lentillifera*. *Journal of Applied Phycology*, 27(2), 879–885. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0358-7>
- Guo, H., Yao, J., Sun, Z., & Duan, D. (2015b). Effects of salinity and nutrients on the growth and chlorophyll fluorescence of *Caulerpa lentillifera*. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33(2), 410–418. <https://doi.org/10.1007/s00343-015-4105-y>
- Hurtado, A. Q., Gerung, G. S., Yasir, S., & Critchley, A. T. (2013). Cultivation of tropical red seaweeds in the BIMP-EAGA region. *Journal of Applied Phycology*, 26(2), 707–718. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0116-2>
- Ismail, A., Tuiyo, R., & Mulis. (2015). Effect of initial seed weight on growth of *Kappaphycus alvarezii*. *Nike: Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 3(4), 137–141.
- Lobban, C. S., & Harrison, P. J. (2009). *Seaweed ecology and physiology* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Mamesah, J. F. T., Mudeng, J. D., Ngangi, E. L. A., Kreckhoff, R. L., Salindeho, I. R. N., Sambali, H., & Mokolensang, J. F. (2025). Kultivasi rumput laut *Caulerpa lentillifera* menggunakan berat awal berbeda dengan metode rawai permukaan. *e-Journal Budidaya Perairan*, 13(1), 15-22. <https://doi.org/10.35800/bdp.v13i1.60331>
- Marinho-Soriano, E., Fonseca, P. C., Carneiro, M. A. A., & Moreira, W. S. C. (2011). Seasonal variation in the biomass and nutrient content of tropical seaweeds cultivated in coastal waters. *Aquaculture*, 319, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.06.012>
- Neori, A., Troell, M., Chopin, T., Yarish, C., Critchley, A., & Buschmann, A. H. (2004). The need for a balanced ecosystem approach to aquaculture. *Aquaculture*, 231, 361–391. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.11.015>
- Paul, N. A., Neveux, N., Magnusson, M., & de Nys, R. (2014). Comparative production and nutritional value of “sea grapes”—the tropical green seaweeds *Caulerpa lentillifera* and *C. racemosa*. *Journal of Applied Phycology*, 26(4), 1833–1844. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0227-9>
- Setthamongkol, P., Tunkijjanukij, S., Satapornvanit, K., & Salaenoi, J. (2019). Nutritional

- composition and antioxidant activity of sea grape (*Caulerpa lentillifera*). *Aquaculture Reports*, 15, 100222. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100222>
- Sompong, U., Mingkaew, J., Amornlerdpison, D., & Mengumphan, K. (2020). Sea grape (*Caulerpa lentillifera*) cultivation in artificial seawater closed system. *Maejo International Journal of Energy and Environment Communication*, 2(1), 17–22.
- Susilowati, T., Fawwaz, C. B., Harwanto, D., Haditomo, A. H. C., & Sarjito. (2019). Growth of seaweed *Gracilaria verrucosa* cultured on different initial weight with longline methods in Karimunjawa waters. *Scripta Biologica*, 6(4), 1–7. <https://doi.org/10.20884/1.SB.2019.5.4.1120>
- Valentine, R. Y., Sudiarsa, I. N., Tangguda, S., & Hariyadi, D. R. (2021). Kinerja pertumbuhan dan dinamika kualitas air pada budidaya anggur laut (*Caulerpa* sp.) dengan naungan berbeda. *Jurnal Agroqua*, 19(1), 15–23.