

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Produksi anggur laut (*Caulerpa* sp.) di Indonesia masih terkendala oleh ketergantungan pada musim dan kondisi lingkungan yang fluktuatif di perairan terbuka, sehingga mengakibatkan kelangkaan stok dari jenis rumput laut tersebut pada saat bukan musimnya. Sementara itu, peningkatan permintaan global akan sumber protein alternatif dan makanan fungsional telah mendorong minat yang lebih besar pada budidaya anggur laut (Neto *et al.*, 2022). *Caulerpa lentillifera* dikenal memiliki kandungan protein, mineral, dan serat yang tinggi, serta berbagai senyawa bioaktif seperti polifenol dan karotenoid yang memiliki potensi antioksidan dan anti-inflamasi (Nagappan *et al.*, 2019).

Proses budidaya bisa dilakukan di tambak, bak dan tempat yang lebih kecil bahkan dalam ruangan (*indoor*) namun sangat perlu memperhatikan faktor yang dapat menunjang atau menghambat keberhasilan budidaya. *Indoor farming* adalah metode budidaya dalam ruangan yang memungkinkan untuk pengendalian iklim, termasuk cahaya, suhu, evaporasi, dan sirkulasi udara, dan dapat memprediksi hasil dengan tepat serta signifikan untuk tujuan komersial (Kozai, 2018). Sistem ini diharapkan menjadi solusi yang efektif di masa depan, yang mampu menghasilkan produksi tanpa dipengaruhi iklim dan berkelanjutan.

Agar tercipta perikanan budidaya yang berkelanjutan, maka pada tahun 2019 Kementerian Kelautan dan Perikanan Indonesia telah mengeluarkan Keputusan Menteri Nomor 1/KEPMEN-KP/2019 tentang Pedoman Umum Pembudidayaan Rumput Laut yang bertujuan untuk mempercepat pengembangan budidaya rumput laut di Indonesia, termasuk anggur laut. Peraturan ini mencakup beberapa aspek, seperti tata cara pemberian izin budidaya, standar budidaya yang harus dipenuhi, dan pengawasan kegiatan budidaya. Meskipun demikian, masih ada beberapa kendala dalam pembudidayaan seperti permasalahan lingkungan akibat polusi dan kerusakan ekosistem laut serta keterbatasan teknologi budidaya.

Menurut Budiyan & Suwartimah (2012) faktor-faktor yang sangat berpengaruh pada kegiatan budidaya rumput laut adalah kualitas air (cahaya, pH, salinitas, suhu, pergerakan air/arus) dan unsur hara (ketersediaan nutrient) seperti nitrat dan fosfat dalam media. Sejalan dengan hal tersebut, Darmawati *et al.* (2016) menerangkan bahwa, kondisi lingkungan seperti salinitas, suhu, cahaya matahari, nutrien berpengaruh terhadap pertumbuhan dan kualitas rumput laut.

Matahari merupakan sumber utama cahaya di alam. Istilah "cahaya" mengacu pada aliran foton, yang berarti bahwa cahaya juga membawa energi. Radiasi elektromagnetik yang dapat dideteksi oleh mata manusia disebut cahaya tampak. Cahaya tampak terdiri dari tujuh spektrum warna, termasuk merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, dan ungu. Pengaruh langsung cahaya tampak terhadap

pertumbuhan dan perkembangan tanaman telah diakui (Arifin, 1988). Selanjutnya Sun *et al* (2018) menambahkan bahwa cahaya merupakan faktor kritis dalam fotosintesis dan metabolisme alga, dengan spektrum warna yang berbeda dapat mempengaruhi laju pertumbuhan dan komposisi biokimia tanaman air.

Menurut Tran *et al.* (2020), penggunaan cahaya LED dengan spektrum yang disesuaikan dapat meningkatkan efisiensi fotosintesis dan akumulasi metabolit sekunder pada berbagai spesies makroalga. Studi yang dilakukan oleh Lideman *et al.* (2021) menyatakan bahwa *C. lentillifera* memiliki respon yang berbeda terhadap intensitas cahaya yang bervariasi, namun efek dari warna cahaya yang berbeda belum dieksplorasi secara komprehensif. Oleh karena itu, eksplorasi lebih lanjut tentang respon *C. lentillifera* terhadap berbagai warna cahaya buatan menjadi sangat penting untuk pengembangan protokol budidaya yang efisien.

Optimalisasi produksi anggur laut melalui sistem indoor dengan pencahayaan yang tepat dapat menjadi solusi untuk memenuhi permintaan pasar yang terus meningkat, sekaligus mengurangi tekanan pada ekosistem alami. Pengembangan teknologi budidaya indoor dengan pencahayaan LED yang optimal tidak hanya akan meningkatkan produktivitas *C. lentillifera*, tetapi juga membuka peluang bagi pembudidaya untuk memproduksi anggur laut sepanjang tahun tanpa bergantung pada musim. Hal ini sejalan dengan program pemerintah dalam meningkatkan produksi rumput laut nasional dan mendukung ketahanan pangan (Kusuma *et al.*, 2024).

## 1.2 Teori

Sistem budidaya dalam ruangan (indoor) untuk makroalga perlu pemahaman lebih jauh tentang kebutuhan pencahayaan yang spesifik. Dalam hal ini, teknologi *Light Emitting Diode* (LED) dapat memberikan peluang untuk memanipulasi parameter pencahayaan secara presisi guna mengoptimalkan pertumbuhan *Caulerpa lentillifera*. Pengembangan sistem pencahayaan buatan yang efektif memerlukan pertimbangan karakteristik fotobiologi spesies target dan efisiensi energi (Kim *et al.*, 2020)<sup>a</sup>.

- Faktor yang Mempengaruhi Efektivitas Fotosintesis pada Budidaya *Caulerpa*

Efektivitas fotosintesis pada budidaya *Caulerpa* dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan yang saling berinteraksi. Intensitas cahaya merupakan faktor krusial yang mempengaruhi laju fotosintesis, dengan penelitian oleh Matsuda *et al.* (2020)<sup>a</sup> menunjukkan bahwa *Caulerpa lentillifera* mencapai tingkat fotosintesis optimal pada intensitas cahaya 100-150  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , sementara intensitas di atas 250  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$  dapat menyebabkan fotoinhibisi. Kualitas spektrum cahaya juga berperan penting, dengan studi oleh Kim *et al.* (2021)<sup>b</sup> membuktikan bahwa kombinasi cahaya biru (450-470 nm) dan merah (630-660 nm) menghasilkan efisiensi fotosintesis tertinggi pada *Caulerpa racemosa*. Suhu air memiliki pengaruh

signifikan terhadap aktivitas enzim fotosintesis, dengan rentang optimal 25-28°C sebagaimana dilaporkan oleh Liu *et al.* (2022)<sup>a</sup>.

Konsentrasi karbon anorganik terlarut (*Dissolved Inorganic Carbon*) juga mempengaruhi efisiensi fotosintesis, dimana penelitian Yang *et al.* (2023) menunjukkan peningkatan laju fotosintesis pada konsentrasi bikarbonat 2-3 mM. Faktor pH air berpengaruh pada ketersediaan karbon dan fungsi enzim fotosintesis, dengan Raven *et al.* (2020) menyimpulkan bahwa *Caulerpa* menunjukkan aktivitas fotosintesis optimal pada pH 8,0-8,3. Ketersediaan nutrisi, terutama nitrogen dan fosfor, berkorelasi positif dengan efisiensi fotosintesis sebagaimana dibuktikan oleh Gao *et al.* (2021) yang menemukan peningkatan kandungan klorofil dan laju fotosintesis pada rasio N:P optimal 16:1. Salinitas juga mempengaruhi fotosintesis, dengan Zhang *et al.* (2020)<sup>b</sup> melaporkan bahwa *Caulerpa* memiliki efisiensi fotosintesis tertinggi pada salinitas 30-35 ppt.

Faktor hidrodinamika seperti pergerakan air memainkan peran dalam pengangkutan nutrisi dan gas, dengan penelitian Huang *et al.* (2024) menunjukkan bahwa kecepatan aliran air moderat (5-10 cm/s) meningkatkan laju fotosintesis dibandingkan kondisi statis. Interaksi antar faktor ini menciptakan kompleksitas dalam optimalisasi fotosintesis pada budidaya *Caulerpa*, dengan Ramadhani *et al.* (2023) menekankan pentingnya pendekatan holistik dalam manajemen parameter lingkungan untuk memaksimalkan produktivitas fotosintesis.

- Kisaran Suhu Optimal pada Budidaya *Caulerpa*

*Caulerpa* merupakan makroalga hijau yang memiliki nilai ekonomis tinggi sebagai bahan pangan, sumber bioaktif, dan aplikasi bioteknologi. Berdasarkan penelitian terkini, suhu optimal untuk budidaya *Caulerpa* berkisar antara 22-30°C, dengan pertumbuhan optimal pada 25-28°C. Zuldin *et al.* (2020) melaporkan bahwa pertumbuhan *Caulerpa* *lentillifera* mencapai maksimal pada suhu 25±1°C, dengan penurunan signifikan pada suhu di atas 32°C. Sejalan dengan hal tersebut, studi oleh Nguyen *et al.* (2020) menunjukkan bahwa *Caulerpa racemosa* memiliki tingkat fotosintesis tertinggi pada rentang suhu 26-28°C, sementara suhu di bawah 20°C dan di atas 33°C menyebabkan stres termal yang ditandai dengan penurunan laju pertumbuhan dan peningkatan depigmentasi.

Penelitian yang dilakukan oleh Gao *et al.* (2022) mengungkapkan bahwa toleransi suhu bervariasi antar spesies *Caulerpa*, dengan beberapa strain *C. lentillifera* dari perairan tropis memperlihatkan adaptasi pada suhu hingga 30°C. Kumar *et al.* (2021) memaparkan bahwa fluktuasi suhu harian tidak boleh melebihi 3°C untuk menghindari stres fisiologis pada tanaman. Sementara itu, penelitian oleh Horstmann *et al.* (2023) menekankan bahwa dalam kondisi perubahan iklim, beberapa strain *Caulerpa* menunjukkan kapasitas adaptif terhadap peningkatan suhu rata-rata, namun dengan batas toleransi maksimal sekitar 32°C sebelum terjadi kerusakan jaringan yang irreversible. Dalam aktivitas budidaya terkontrol, Yong *et al.*

(2024)<sup>a</sup> merekomendasikan pengendalian suhu pada  $26\pm 1^\circ\text{C}$  untuk pertumbuhan optimal dengan mempertimbangkan efisiensi energi dan produksi biomassa.

- Pengaruh Suhu terhadap Aktivitas Enzim

Suhu merupakan faktor lingkungan krusial yang secara langsung memengaruhi aktivitas enzim dalam metabolisme *Caulerpa*, berdampak signifikan terhadap pertumbuhan dan produktivitasnya. Enzim sebagai biokatalisator berperan penting dalam proses fotosintesis, respirasi, dan metabolisme nutrisi pada makroalga. Menurut penelitian Liu *et al.* (2022)<sup>b</sup>, setiap enzim dalam *Caulerpa* memiliki suhu optimal spesifik untuk aktivitas maksimalnya, dengan enzim Rubisco (ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) menunjukkan aktivitas tertinggi pada rentang suhu  $25\text{-}28^\circ\text{C}$ . Di bawah suhu tersebut, kinetika reaksi melambat signifikan, sementara pada suhu di atas  $30^\circ\text{C}$  terjadi denaturasi progresif yang menurunkan efisiensi karboksilasi hingga 40%.

Sejalan dengan temuan tersebut, Zhang dan Wang (2021) mengidentifikasi bahwa nitrat reduktase, enzim kunci dalam asimilasi nitrogen, memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan suhu dengan aktivitas optimal pada  $26^\circ\text{C}$  dan penurunan drastis pada suhu di atas  $32^\circ\text{C}$ , yang berkorelasi dengan penurunan sintesis protein dan pertumbuhan. Kumar *et al.* (2020) mendemonstrasikan bahwa eksposi jangka panjang *C. lentillifera* pada suhu di luar rentang  $22\text{-}30^\circ\text{C}$  menginduksi perubahan konformasi protein enzim yang menyebabkan penurunan aktivitas ATP sintase dan gangguan produksi energi seluler. Penelitian proteomik oleh Chen *et al.* (2023) mengungkapkan bahwa *Caulerpa* merespons suhu suboptimal dengan mengekspresikan isoform enzim berbeda dan chaperones molekuler, namun kapasitas adaptasi ini memiliki batasan genetik.

Sensitivitas enzim terhadap suhu bervariasi antar spesies *Caulerpa*, sebagaimana dilaporkan Horstmann *et al.* (2023) yang menemukan bahwa strain dari perairan tropis memiliki termostabilitas enzim lebih tinggi dibandingkan strain subtropis. Park dan Kim (2024) mengungkapkan fenomena penting bahwa fluktuasi suhu harian yang melebihi  $5^\circ\text{C}$  menginduksi stres oksidatif pada *Caulerpa* dengan peningkatan aktivitas enzim antioksidan seperti superoksida dismutase dan peroksidase, yang mengalihkan energi dari pertumbuhan ke mekanisme pertahanan seluler.

- Intensitas Penyinaran dan Suhu pada Budidaya *Caulerpa*

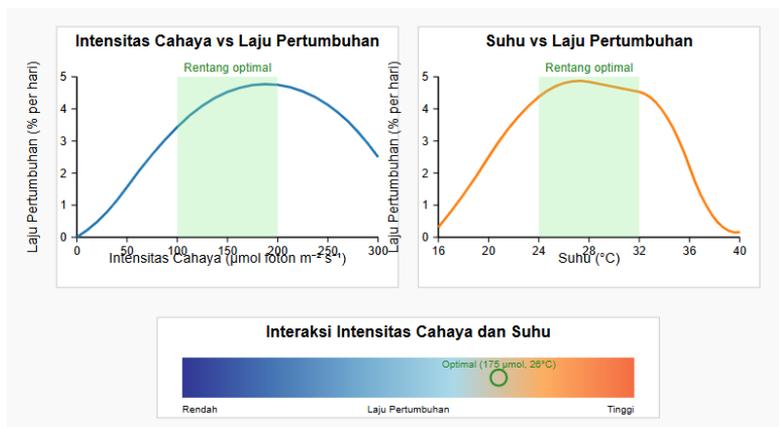
Intensitas penyinaran dan suhu merupakan faktor krusial yang mempengaruhi pertumbuhan dan produktivitas *Caulerpa* dalam sistem budidaya. Intensitas cahaya optimal untuk pertumbuhan *Caulerpa* berkisar antara  $100\text{-}200 \mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , dengan penelitian Matsuda *et al.* (2020)<sup>b</sup> menunjukkan bahwa pada intensitas di bawah  $50 \mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , laju fotosintesis menurun signifikan hingga 40% dari nilai maksimal. Sebaliknya, intensitas cahaya yang melebihi  $250 \mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$  dapat memicu fotoinhibisi dan mengakibatkan kerusakan aparatus fotosintesis.

Terkait dengan fotoperiode, Kim *et al.* (2021)<sup>a</sup> melaporkan bahwa rasio terang:gelap optimal adalah 12:12 hingga 14:10 jam, dengan produksi biomassa tertinggi terjadi pada fotoperiode 14:10 jam.

Untuk parameter suhu, Liu *et al.* (2022)<sup>c</sup> memaparkan bahwa *Caulerpa lentillifera* menunjukkan kurva pertumbuhan berbentuk lonceng dengan suhu optimal pada 25-28°C, di mana laju pertumbuhan relatif (RGR) mencapai 4,2±0,3% per hari. Studi jangka panjang oleh Horstmann *et al.* (2023) membuktikan bahwa pada suhu di bawah 20°C, metabolisme *Caulerpa* melambat signifikan dengan penurunan laju fotosintesis hingga 65%, sementara pada suhu di atas 32°C terjadi denaturasi protein dan kerusakan membran sel yang bersifat irreversible. Kombinasi optimal antara intensitas cahaya dan suhu telah diteliti oleh Zhang *et al.* (2020)<sup>a</sup>, yang mendemonstrasikan bahwa interaksi kedua faktor ini bersifat sinergis pada rentang 150-180  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$  dan 26-27°C, menghasilkan laju pertumbuhan hingga 5,1% per hari pada *Caulerpa racemosa* var. *uvifera*. Hasil ini konsisten dengan penelitian Yong *et al.* (2024)<sup>b</sup> yang menemukan bahwa efisiensi fotosintesis mencapai puncaknya pada kombinasi suhu 26°C dan intensitas cahaya 175  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , dengan produktivitas biomassa 23,4 g berat kering/m<sup>2</sup>/hari.

Intensitas penyinaran dan suhu merupakan parameter lingkungan yang sangat penting dalam budidaya *Caulerpa* karena keduanya secara langsung mempengaruhi proses fotosintesis dan metabolisme. Berdasarkan studi komprehensif oleh Matsuda *et al.* (2020)<sup>b</sup>, intensitas cahaya optimal untuk pertumbuhan *Caulerpa* berkisar antara 100-200  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , dengan puncak efisiensi fotosintesis tercapai pada 150-180  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Pada intensitas cahaya di bawah 50  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , laju fotosintesis menurun hingga 40% dari nilai maksimal karena keterbatasan energi untuk proses fotokimia. Sebaliknya, intensitas cahaya yang melebihi 250  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$  dapat memicu fotoinhibisi dan menyebabkan stres oksidatif, sebagaimana dilaporkan oleh Hong *et al.* (2023) yang mengamati penurunan aktivitas enzim antioksidan pada intensitas cahaya tinggi.

Fotoperiode juga berperan penting dalam budidaya *Caulerpa*, dengan studi oleh Kim *et al.* (2021)<sup>a</sup> menunjukkan bahwa rasio terang:gelap optimal adalah 12:12 hingga 14:10 jam. Penelitian ini menemukan bahwa produksi biomassa tertinggi terjadi pada fotoperiode 14:10 jam dengan peningkatan laju pertumbuhan sebesar 15% dibandingkan fotoperiode 12:12 jam. Fotoperiode yang lebih panjang dari 16 jam tidak disarankan karena dapat menyebabkan akumulasi energi berlebih dan stres metabolik.



Gambar 1. Hubungan Intensitas Cahaya dan Suhu terhadap Pertumbuhan *Caulerpa* sp.

Terkait parameter suhu, Liu *et al.* (2022)<sup>c</sup> mengidentifikasi bahwa *Caulerpa lentillifera* menunjukkan kurva respons pertumbuhan berbentuk lonceng dengan suhu optimal pada 25-28°C. Pada rentang suhu optimal ini, laju pertumbuhan relatif (RGR) mencapai  $4,2 \pm 0,3\%$  per hari dengan tingkat kelangsungan hidup (survival rate) di atas 95%. Studi jangka panjang oleh Horstmann *et al.* (2023) menunjukkan bahwa pada suhu di bawah 20°C, metabolisme *Caulerpa* melambat signifikan dengan penurunan laju fotosintesis hingga 65% dari nilai maksimal, yang berdampak pada reduksi konten klorofil dan produksi biomassa. Sementara itu, pada suhu di atas 32°C, *Caulerpa* mengalami stres termal yang ditandai dengan denaturasi protein dan kerusakan membran sel yang bersifat irreversible, dengan tingkat mortalitas mencapai 70% setelah paparan selama 72 jam.

Penelitian terbaru oleh Zhang *et al.* (2020)<sup>a</sup> mengungkapkan adanya interaksi sinergis antara intensitas cahaya dan suhu pada budidaya *Caulerpa racemosa* var. *uvifera*. Studi tersebut mengidentifikasi kombinasi optimal pada 150-180  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$  dan 26-27°C, yang menghasilkan laju pertumbuhan hingga 5,1% per hari. Temuan ini didukung oleh Yong *et al.* (2024)<sup>b</sup> yang melalui pendekatan eksperimental faktorial mendemonstrasikan bahwa efisiensi fotosintesis mencapai puncaknya pada kombinasi suhu 26°C dan intensitas cahaya 175  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , dengan produktivitas biomassa 23,4 g berat kering/m<sup>2</sup>/hari.

Ren *et al.* (2022) menemukan bahwa fluktuasi diurnal intensitas cahaya dan suhu dalam rentang moderat ( $\pm 2^\circ\text{C}$  dan  $\pm 30 \mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) dapat meningkatkan produksi metabolit sekunder dan kandungan nutrisi pada *Caulerpa lentillifera*, meskipun fluktuasi yang lebih besar dapat menyebabkan stres fisiologis. Studi ini menyimpulkan bahwa untuk sistem budidaya intensif, kontrol suhu dan intensitas cahaya menggunakan teknologi LED dan sistem termoregulasi dapat meningkatkan produktivitas hingga 35% dibandingkan dengan sistem konvensional.

- Klorofil A dan B: Rumus Kimia, Struktur, Berat Molekul, dan Peranannya dalam Penerimaan Cahaya

Klorofil merupakan pigmen fotosintesis utama pada tumbuhan yang memiliki peran penting dalam proses konversi energi cahaya menjadi energi kimia. Dua jenis klorofil yang paling umum ditemukan pada tumbuhan tingkat tinggi adalah klorofil a dan klorofil b. Kedua jenis klorofil ini memiliki karakteristik struktural dan fungsional yang berbeda namun saling melengkapi dalam proses fotosintesis.

Dari aspek rumus kimia, klorofil a memiliki rumus molekul  $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ , sedangkan klorofil b memiliki rumus molekul  $C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$ . Perbedaan utama antara keduanya terletak pada gugus fungsional yang terikat pada cincin tetrapyrrole. Klorofil a memiliki gugus metil ( $-CH_3$ ) pada posisi C-3, sementara klorofil b memiliki gugus formil ( $-CHO$ ) pada posisi yang sama. Perbedaan kecil dalam struktur molekul ini memberikan karakteristik penyerapan cahaya yang berbeda, yang memungkinkan tumbuhan untuk memanfaatkan spektrum cahaya yang lebih luas untuk fotosintesis.

Berdasarkan berat molekul, klorofil a memiliki berat molekul sekitar 893,5 g/mol, sedangkan klorofil b memiliki berat molekul sekitar 907,5 g/mol. Perbedaan berat molekul ini disebabkan oleh adanya perbedaan gugus fungsional pada struktur molekulnya. Struktur dasar kedua klorofil ini terdiri dari cincin porfirin dengan ion magnesium ( $Mg^{2+}$ ) di tengahnya dan rantai samping fitol yang panjang yang bersifat hidrofobik, yang membantu menambatkan klorofil pada membran tilakoid.

Kemampuan klorofil dalam menerima cahaya berkaitan erat dengan struktur molekulnya. Klorofil a dan b memiliki spektrum penyerapan cahaya yang berbeda, yang memungkinkan tumbuhan untuk memanfaatkan spektrum cahaya yang lebih luas untuk fotosintesis. Klorofil a menyerap cahaya maksimum pada panjang gelombang sekitar 430 nm (biru) dan 662 nm (merah), sementara klorofil b menyerap cahaya maksimum pada panjang gelombang sekitar 453 nm (biru) dan 642 nm (merah). Perbedaan pola penyerapan ini terkait dengan perbedaan struktur molekul, khususnya gugus fungsional pada cincin tetrapyrrole.

Penelitian terbaru oleh Tanaka dan Takabe (2022) mengungkapkan bahwa klorofil a lebih efisien dalam mengkonversi energi cahaya menjadi energi kimia dibandingkan klorofil b. Hal ini terkait dengan kemampuan klorofil a untuk berinteraksi langsung dengan pusat reaksi fotosistem I dan II. Sementara itu, klorofil b berfungsi terutama sebagai pigmen antena yang menyerap energi cahaya dan mentransferkannya ke klorofil a. Studi oleh Zheng *et al.* (2023) menunjukkan bahwa rasio klorofil a:b dapat berubah sebagai respons terhadap kondisi cahaya yang berbeda, yang memungkinkan tumbuhan untuk beradaptasi dengan lingkungan cahaya yang beragam.

Xu dan Liu (2024) melaporkan penemuan baru mengenai karakterisasi struktur kompleks protein-klorofil menggunakan teknik kristalografi sinar-X resolusi tinggi dan spektroskopi NMR. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa interaksi antara

klorofil dan protein pengikatnya mempengaruhi sifat penyerapan cahaya dan efisiensi transfer energi dalam fotosistem. Selain itu, Wang *et al.* (2023) menggunakan teknik mikroskopi elektron cryogenic untuk mengungkapkan organisasi supramolekular klorofil dalam membran tilakoid, yang memberikan pemahaman baru tentang mekanisme transfer energi dalam fotosintesis.

- Peranan Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) dalam Proses Fotosintesis

Sumber karbon memegang peran vital sebagai bahan baku untuk sintesis karbohidrat. Pada dasarnya, hanya karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) anorganik yang dapat langsung digunakan dalam proses fotosintesis, bukan karbon organik (Taiz *et al.*, 2023). CO<sub>2</sub> anorganik di atmosfer berdifusi ke dalam daun melalui stomata dan selanjutnya berdifusi ke dalam stroma kloroplast, di mana enzim RuBisCO (Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) akan mengkatalisasi fiksasi karbon dalam siklus Calvin. Percobaan dengan CO<sub>2</sub> bertanda isotop oleh Sharkey (2022) membuktikan secara definitif bahwa atom karbon yang terasimilasi ke dalam karbohidrat berasal langsung dari CO<sub>2</sub> anorganik atmosfer.

Meskipun CO<sub>2</sub> anorganik merupakan satu-satunya bentuk karbon yang dapat langsung digunakan dalam proses fotosintesis, CO<sub>2</sub> ini dapat berasal dari berbagai sumber. Di perairan, karbon anorganik dapat hadir dalam bentuk CO<sub>2</sub> terlarut, asam karbonat (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), bikarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), dan karbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), dengan proporsi yang bergantung pada pH air (Raven *et al.*, 2023). Beberapa spesies alga dan tumbuhan akuatik telah mengembangkan mekanisme untuk memanfaatkan bikarbonat sebagai sumber karbon melalui aktivitas enzim karbonat anhidrase, yang mengkonversi HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> menjadi CO<sub>2</sub> yang dapat digunakan dalam fotosintesis (Matsuda *et al.*, 2022).

Untuk menghasilkan CO<sub>2</sub> bebas yang dapat digunakan dalam fotosintesis, ion bikarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) harus bereaksi dengan ion hidrogen (H<sup>+</sup>) dalam reaksi yang dikatalisis oleh enzim karbonat anhidrase (CA). Reaksi ini dapat direpresentasikan sebagai:  $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ . Enzim karbonat anhidrase mempercepat reaksi ini hingga 10<sup>7</sup> kali lipat dibandingkan dengan laju reaksi tanpa katalis (DiMario *et al.*, 2023). Pada organisme fotosintetik akuatik, enzim karbonat anhidrase dapat ditemukan di berbagai lokasi seluler, termasuk di permukaan sel, dalam sitoplasma, di dalam kloroplas, dan pada tilakoid, masing-masing dengan peran spesifik dalam konversi dan transport karbon anorganik (Moroney & Ynalvez, 2024).

Karbon organik dari sumber eksternal tidak dapat langsung digunakan dalam proses fotosintesis. Namun, karbon organik yang dihasilkan oleh tumbuhan sendiri melalui respirasi dapat digunakan kembali dalam fotosintesis. Johnson dan Brown (2024) menunjukkan bahwa dalam kondisi tertentu, seperti ketika stomata tertutup pada siang hari karena stres air, CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari respirasi dapat menyumbang hingga 15-20% dari total CO<sub>2</sub> yang digunakan dalam fotosintesis.

Fenomena ini dikenal sebagai "recycling" CO<sub>2</sub> dan dapat membantu tumbuhan mempertahankan laju fotosintesis minimal selama periode stres.

Penelitian terbaru oleh Yamamoto *et al.* (2023) menggunakan teknik tracing isotop <sup>13</sup>C dan <sup>14</sup>C menunjukkan bahwa pada alga dan cyanobacteria, penggunaan berbagai bentuk karbon anorganik sangat bergantung pada spesies dan kondisi lingkungan. Mereka menemukan bahwa beberapa spesies mikroalga dapat menggunakan HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> sebagai sumber utama karbon anorganik pada pH tinggi, sementara spesies lain tetap bergantung pada difusi pasif CO<sub>2</sub>. Hal ini menunjukkan adanya diversifikasi mekanisme pengambilan karbon anorganik sebagai adaptasi evolusioner terhadap berbagai kondisi lingkungan.

Beberapa mikroalga dan cyanobacteria memiliki mekanisme konsentrasi karbon (CCM - *Carbon Concentrating Mechanism*) yang memungkinkan mereka meningkatkan konsentrasi CO<sub>2</sub> di sekitar RuBisCO, sehingga meningkatkan efisiensi fotosintesis (Badger dan Price, 2022). Mekanisme ini melibatkan pengambilan aktif HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dan konversinya menjadi CO<sub>2</sub> di dalam sel. Studi oleh Chen *et al.* (2024) pada *Chlamydomonas reinhardtii* menunjukkan bahwa CCM diregulasi oleh ketersediaan CO<sub>2</sub> dan intensitas cahaya, yang menegaskan pentingnya CO<sub>2</sub> anorganik dalam proses fotosintesis.

Pada tumbuhan CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*), CO<sub>2</sub> atmosfer diambil pada malam hari ketika stomata terbuka dan difiksasi menjadi asam malat. Pada siang hari ketika stomata tertutup, asam malat didekarboksilasi untuk melepaskan CO<sub>2</sub> yang kemudian digunakan dalam siklus Calvin (Winter dan Smith, 2023). Meskipun proses ini melibatkan intermediet organik (asam malat), CO<sub>2</sub> anorganik tetap merupakan bentuk karbon yang langsung digunakan dalam reaksi karboksilasi yang dikatalisis oleh RuBisCO.

- Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) pada Tumbuhan: Tinjauan Penelitian Boyd

Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) merupakan komponen vital dalam proses fotosintesis pada tumbuhan. Boyd (2022) menjelaskan bahwa CO<sub>2</sub> atmosfer bertindak sebagai substrat utama dalam reaksi fotosintesis yang menghasilkan karbohidrat dan oksigen. Dalam penelitiannya, Boyd menekankan bahwa konsentrasi CO<sub>2</sub> atmosfer memiliki hubungan langsung dengan laju fotosintesis pada berbagai jenis tumbuhan. Pada konsentrasi CO<sub>2</sub> ambien (sekitar 400 ppm), tumbuhan C<sub>3</sub> sering kali mengalami pembatasan fotosintesis karena aktivitas fotorespirasi yang kompetitif terhadap fiksasi karbon, sementara tumbuhan C<sub>4</sub> (asimilasi awal CO<sub>2</sub> menjadi asam organik berkarbon empat yakni oksaloasetat, malat, atau aspartat, yang terjadi di sel mesofil) dan CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*) umumnya lebih efisien dalam menggunakan CO<sub>2</sub> yang tersedia.

Penelitian lanjutan oleh Boyd dan Thompson (2023) menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> atmosfer hingga 600-800 ppm dapat meningkatkan laju fotosintesis pada tumbuhan C<sub>3</sub> sebesar 25-40%, sementara respons tumbuhan

C4 lebih moderat dengan peningkatan sekitar 10-15%. Fenomena ini terjadi karena enzim RuBisCO pada tumbuhan C3 tidak sepenuhnya tersaturasi pada konsentrasi CO<sub>2</sub> ambien dan memiliki afinitas ganda terhadap CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub>, sehingga peningkatan CO<sub>2</sub> menurunkan kompetisi dengan oksigen dan mengurangi fotorespirasi.

Boyd *et al.* (2024) juga mengkaji dampak jangka panjang peningkatan CO<sub>2</sub> terhadap pertumbuhan tanaman melalui studi FACE (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment). Hasil penelitian menunjukkan bahwa respons tanaman terhadap peningkatan CO<sub>2</sub> bervariasi tergantung pada spesies, kondisi lingkungan, dan ketersediaan nutrisi. Tanaman yang tumbuh dalam kondisi nutrisi optimal menunjukkan respons positif yang berkelanjutan terhadap peningkatan CO<sub>2</sub>, sementara tanaman dengan keterbatasan nutrisi, terutama nitrogen, menunjukkan aklimasi negatif setelah periode tertentu, yang ditandai dengan penurunan kapasitas fotosintesis dan konsentrasi nitrogen daun.

Aspek penting lainnya yang diteliti oleh Boyd dan Garcia (2023) adalah pengaruh peningkatan CO<sub>2</sub> terhadap pembukaan stomata dan efisiensi penggunaan air pada tumbuhan. Secara umum, konsentrasi CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi menyebabkan penutupan stomata sebagian, yang mengurangi transpirasi dan meningkatkan efisiensi penggunaan air. Mekanisme ini memberikan keuntungan adaptif bagi tumbuhan yang tumbuh di lingkungan dengan ketersediaan air terbatas.

Boyd dan Zhang (2024) mengamati bahwa peningkatan CO<sub>2</sub> atmosfer juga mempengaruhi interaksi tanaman dengan faktor biotik dan abiotik lainnya. Misalnya, tumbuhan yang tumbuh dalam kondisi CO<sub>2</sub> tinggi menunjukkan resistensi yang lebih rendah terhadap beberapa jenis herbivora dan patogen, kemungkinan karena perubahan dalam komposisi biokimia dan kualitas nutrisi jaringan tanaman. Selain itu, interaksi antara peningkatan CO<sub>2</sub> dan faktor stres lainnya seperti suhu tinggi dan kekeringan bersifat kompleks dan spesifik untuk setiap spesies dimana Boyd juga meneliti implikasi peningkatan CO<sub>2</sub> atmosfer terhadap kualitas nutrisi tanaman pangan. Boyd dan Martinez (2023) melaporkan bahwa tanaman biji-bijian dan legum yang tumbuh dalam kondisi CO<sub>2</sub> tinggi menunjukkan penurunan konsentrasi protein, beberapa mineral esensial, dan vitamin. Fenomena ini, yang disebut "efek pengenceran", terjadi karena peningkatan sintesis karbohidrat tidak diimbangi dengan peningkatan penyerapan nutrisi lainnya, sehingga berpotensi mempengaruhi kualitas nutrisi tanaman pangan di masa depan.

### 1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan masalah yang telah dikemukakan di atas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan LED berwarna putih, kuning, hijau dan biru terhadap pertumbuhan anggur laut?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan LED berwarna putih, kuning, hijau dan biru terhadap kandungan klorofil anggur laut?

### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Menganalisis penggunaan LED berwarna putih, kuning, hijau dan biru yang menghasilkan pertumbuhan anggur laut terbaik.
2. Menganalisis kandungan klorofil anggur laut dari penggunaan LED berwarna putih, kuning, hijau dan biru.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan informasi tentang pengaruh penggunaan LED berwarna terhadap pertumbuhan dan kandungan pigmen klorofil anggur laut sehingga menjadi landasan teoritis dalam pengembangan budidaya anggur laut skala indoor.

### 1.6 Kerangka Pikir

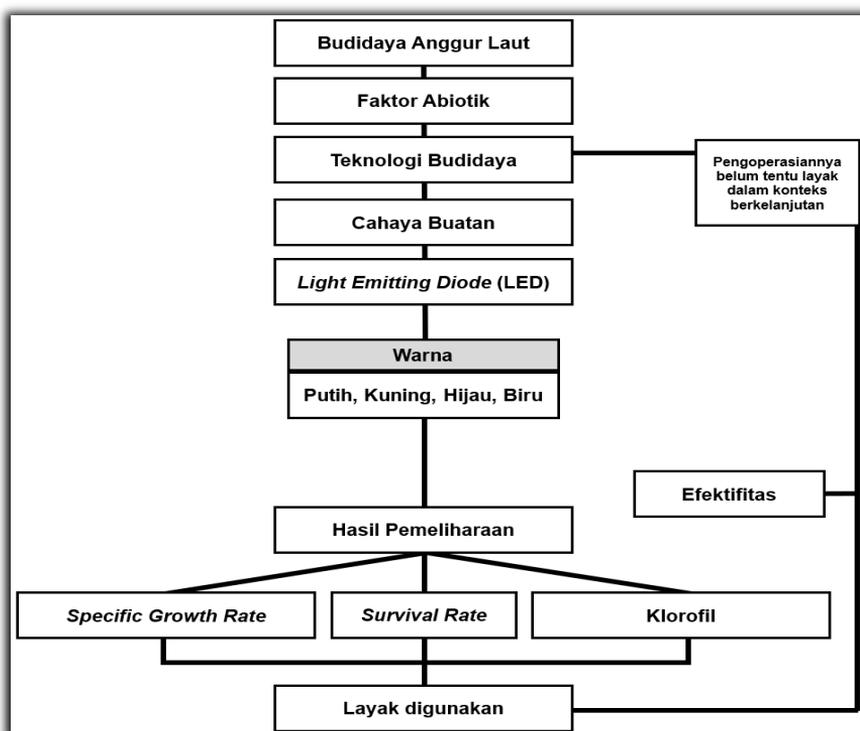
Permintaan global terhadap anggur laut terus meningkat karena potensinya sebagai sumber protein alternatif dan makanan fungsional yang kaya akan kandungan nutrisi seperti protein, mineral, serat, serta senyawa bioaktif. Produksi anggur laut (*Caulerpa lentillifera*) di Indonesia masih menghadapi kendala karena ketergantungan pada musim dan kondisi lingkungan yang fluktuatif di perairan terbuka sehingga memerlukan pengembangan teknologi untuk meningkatkan produktivitasnya.

Salah satu faktor abiotik yang sangat berpengaruh dalam budidaya anggur laut adalah cahaya. Penggunaan LED dengan warna yang berbeda dapat mempengaruhi laju pertumbuhan dan komposisi biokimia tanaman. Sistem budidaya indoor dapat menjadi solusi potensial karena memungkinkan pengendalian kondisi lingkungan secara optimal.

Dalam upaya optimalisasi cahaya untuk budidaya indoor, teknologi *Light Emitting Diode* (LED) dapat menjadi pilihan sumber cahaya karena memiliki berbagai keuntungan namun efektivitas pengoperasiannya dalam konteks budidaya berkelanjutan masih perlu dikaji lebih lanjut. Penelitian ini berfokus pada penggunaan LED dengan empat variasi warna yaitu putih, kuning, hijau, dan biru,

Untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan LED berwarna dalam budidaya anggur laut, penelitian ini akan mengukur beberapa parameter hasil pemeliharaan. Parameter tersebut mencakup *Specific Growth Rate* (SGR) untuk mengukur tingkat pertumbuhan, *Survival Rate* (SR) untuk mengetahui tingkat kelangsungan hidup, serta analisis kandungan klorofil untuk menilai kualitas anggur laut yang dihasilkan.

Hasil dari penelitian ini akan menentukan apakah penggunaan LED berwarna dengan variasi warna tersebut layak digunakan dalam budidaya anggur laut sistem indoor. Kelayakan ini akan dinilai berdasarkan efektivitas pertumbuhan, tingkat kelangsungan hidup, dan kandungan klorofil yang dihasilkan, yang pada akhirnya akan memberikan rekomendasi untuk pengembangan teknologi budidaya anggur laut yang berkelanjutan.



Gambar 2. Kerangka Pikir

## 1.7 Hipotesis

Hipotesis penelitian ini adalah :

1. Penggunaan LED berwarna (putih, kuning, hijau, dan biru) akan memberikan pengaruh yang berbeda terhadap pertumbuhan anggur laut, dengan salah satu warna cahaya menghasilkan pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan warna lainnya.
2. Penggunaan LED berwarna (putih, kuning, hijau, dan biru) akan menghasilkan perbedaan pada kandungan klorofil anggur laut, dengan salah satu warna

cahaya menyebabkan peningkatan kandungan klorofil yang lebih tinggi dibandingkan warna lainnya.

## BAB II METODE PENELITIAN

### 2.1 Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei 2024 s/d Juli 2024 di Laboratorium Teknologi Pembenuhan; Pengujian kandungan klorofil dan CO<sub>2</sub> dilakukan di Laboratorium Produktivitas dan Kualitas Perairan. Kedua laboratorium tersebut berada di Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, Universitas Hasanuddin.

### 2.2 Bahan dan Alat

Dalam penelitian ini, digunakan berbagai alat dan bahan seperti lampu LED 4 watt dengan variasi warna putih, kuning, hijau dan biru. Selain itu, terdapat instalasi listrik, timer analog, dan instalasi air. Wadah pemeliharaan yang digunakan berupa akuarium atau baskom dan juga menggunakan logger suhu, indikator CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> cair, pupuk cair, dan air laut. Kultivan yang dipilih adalah anggur laut (*Caulerpa lentillifera*). Alat pengukuran yang digunakan meliputi penggaris atau kaliper dan timbangan dengan ketelitian 1 gram. Untuk pendokumentasian, digunakan kamera, alat tulis kantor dan perangkat komputer digunakan untuk mendukung pencatatan dan pengolahan data.

### 2.3 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap (RAL), empat perlakuan dan tiga ulangan. Perlakuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Warna Putih / White (W) (kontrol) = W1, W2, W3
- Warna Kuning / Yellow (Y) = Y1, Y2, Y3
- Warna Hijau / Green (G) = G1, G2, G3
- Warna Biru / Blue (B) = B1, B2, B3

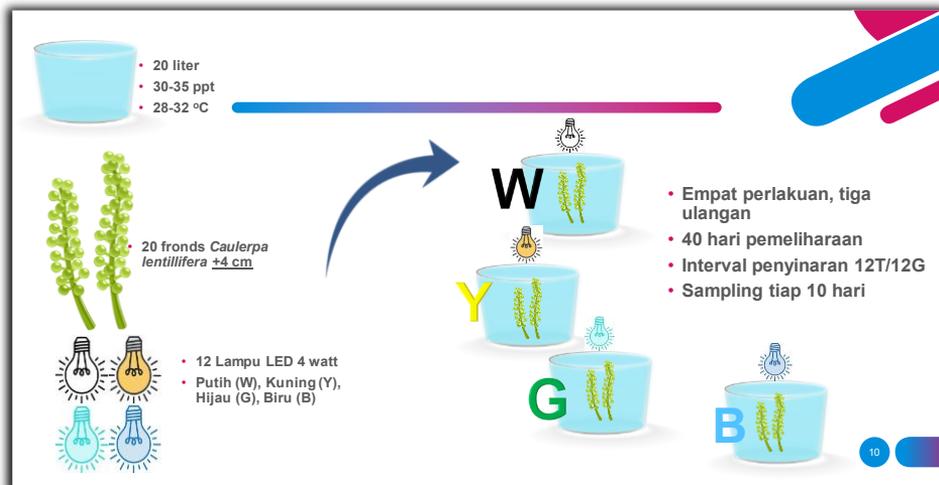
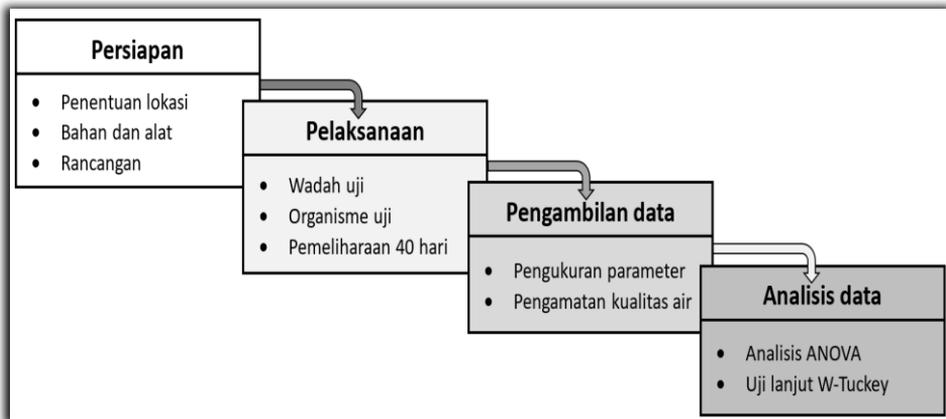
W1	G3	Y1	G2
B3	W2	B2	G1
Y3	B1	W3	Y2

Gambar 3. Hasil Pengacakan

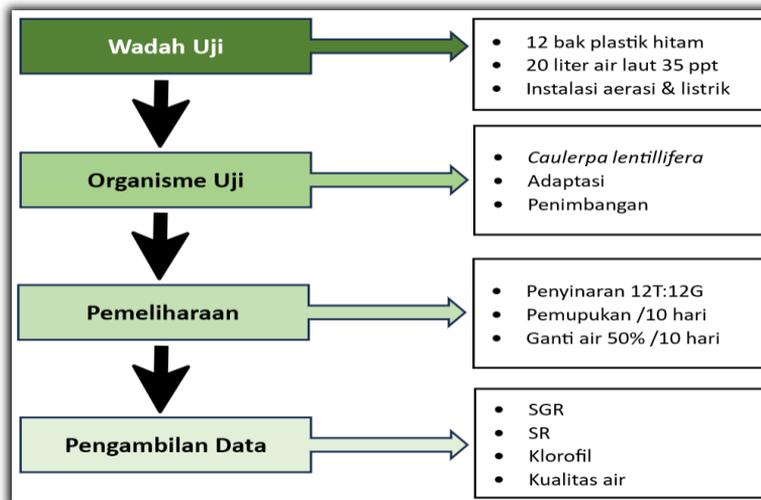
Keterangan :

- W, Y, G dan B = Perlakuan  
1, 2, dan 3 = Ulangan

## 2.4 Alur Pelaksanaan & Prosedur Penelitian



Gambar 4. Alur Pelaksanaan Penelitian



Gambar 5. Prosedur Penelitian

## 2.5 Persiapan wadah uji

Penelitian ini menggunakan wadah baskom bertutup berwarna hitam ukuran 50x50x30 cm sebanyak 12 buah sebagai media pemeliharaan yang diisi air laut yang telah disaring dengan kisaran salinitas 34-35 ppt, volume air laut 20 liter tiap wadah ditutup dan diusahakan berada pada kisaran suhu 28-30 °C. Pergerakan air menggunakan aerasi dan penggantian air setiap 10 hari sebanyak 50% bersamaan dengan pengambilan data.

Penyinaran dengan LED berwarna (putih, kuning, hijau, dan biru) yang berasal dari lampu LED 4 watt (360 lumen) atau 18.4  $\mu\text{mol}$  foton. Penyinaran diposisikan dari atas dengan jarak 17 cm, sebanyak satu buah LED tiap wadah sehingga total LED yang digunakan sebanyak 12 buah. Durasi penyinaran dilakukan selama 12 jam terang dan 12 jam gelap.

Pemeliharaan dilakukan selama 40 hari diluar proses persiapan dan adaptasi. Pemberian pupuk cair dan karbon cair komersil low concentration, yang diaplikasikan sesuai dosis pada kemasan (1 ml per 10 liter air). Selama penelitian juga akan diukur kualitas air media yaitu fisik dan kimia air.

Kandungan pigmen klorofil-a dan klorofil-b akan diukur pada awal dan akhir penelitian.

## 2.6 Persiapan Organisme Uji

Organisme uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah untai anggur laut (*Caulerpa lentillifera*) yang sehat diambil dari BPBAP Takalar lalu diadaptasikan di Hatchery sebelum digunakan. *C. lentillifera* yang digunakan adalah bagian untai/pelepah (*fronds*) dengan ukuran panjang  $\pm 4$  cm untuk memudahkan dalam

pengamatan dan pengambilan data pertumbuhan, Jumlah frond yang dimasukkan ke tiap wadah sebanyak 20 untai.

## 2.7 Parameter Penelitian

### 2.7.1 *Specific Growth Rate* (SGR)

Pengukuran bobot rumput laut dilakukan setiap 10 hari sekali menggunakan timbangan digital. Pengamatan morfometrik dilakukan dengan mengukur panjang pertumbuhan menggunakan caliper digital.

Laju pertumbuhan harian dihitung dengan persamaan :

$$SGR = \frac{\ln Wt - \ln W0}{t} \times 100\%$$

Keterangan:

SGR = Laju pertumbuhan harian (%)  
 Wt = Bobot awal (g)  
 W0 = Bobot akhir (g)  
 t = Lama pemeliharaan (hari)

### 2.7.2 *Survival Rate* (SR)

*Survival rate* (SR) merupakan ukuran keberhasilan dalam pengelolaan populasi di suatu perairan, baik perairan alami maupun lingkungan budidaya. SR menunjukkan persentase kultivan yang mampu bertahan hidup dari jumlah awal yang ditebar atau dilepas setelah periode waktu tertentu. Nilai SR dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kualitas air, ketersediaan makanan, predator, penyakit, serta teknik pengelolaan perairan.

Keberlangsungan hidup dihitung dengan rumus Effendi (2002) :

$$SR = \frac{Nt}{N0} \times 100\%$$

Keterangan :

SR = Survival Rate (%)  
 N<sub>t</sub> = Jumlah individu pada akhir penelitian  
 N<sub>0</sub> = Jumlah individu pada awal penelitian

### 2.7.3 Pengamatan pigmen klorofil-a dan klorofil-b

Analisa kandungan klorofil menggunakan metode sebagai berikut : Jaringan sebanyak 500 mg digerus dalam 10 ml aseton 80% sampai homogen, (Bagian tengah fronds digerus dalam suasana redup/remang) lalu disentrifus pada kecepatan 3000 rpm selama 15 menit untuk memperoleh supernatan. Butiran supernatan diekstrasi ulang melalui pencucian dengan 5 ml aseton 80% sampai tidak berwarna.

Hasil ekstrak tersebut diuji menggunakan spektrofotometer untuk mengetahui nilai absorbansinya, pada panjang gelombang 645 nm dan 663 nm untuk klorofil. Kandungan klorofil a dan b dihitung dengan persamaan :

$$\text{Klorofil a (mg/g)} = \frac{12,7 \times A_{663} - 2,69 \times A_{645}}{1000 \times W} \times V$$

Keterangan      A = Nilai Absorbansi pada masing-masing panjang gelombang  
                          V = Volume bahan pelarut (ml)  
                          W = Berat fronds anggur laut (g)

#### 2.7.4 Kualitas Air

Untuk pengukuran parameter kualitas air seperti CO<sub>2</sub> dilakukan setiap awal dan akhir sampling, Pengukuran pH dilakukan tiap sampling dengan menggunakan pH-meter. Pengukuran temperatur disetting setiap jam pada logger. Pengukuran kadar garam dilakukan setiap sampling menggunakan hand-refractometer. Adapun kualitas air yang diukur dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 1 Parameter Kualitas Air

No.	Parameter Kualitas Air	Alat	Waktu
1.	CO <sub>2</sub>	Titrasi	Awal dan akhir sampling
2.	pH	pH Meter	Setiap 10 hari
3.	Suhu	Logger termometer	Setiap jam
4.	Salinitas	Hand-refractometer	Setiap 10 hari
5.	Intensitas cahaya	Luxmeter	Awal penelitian

## 2.8 Analisis Data

Data yang diperoleh meliputi data SGR, SR, kandungan klorofil dan kualitas air. Pengamatan SGR dan SR dianalisis dengan menggunakan analisis ragam (ANOVA) dengan taraf kepercayaan 95% dan data yang berpengaruh nyata pengujian dilanjutkan dengan Uji Lanjut W-Tuckey untuk menentukan perbedaan antar perlakuan. Uji pembandingan nilai tengah Tuckey digunakan untuk membandingkan perbedaan antar perlakuan. Uji statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 26.0.