

Effect of Different Nitrogen Concentrations on the Growth Rate of *Caulerpa lentillifera* Sea Grapes

Rofifah Aulia Amanda¹, Alis Mukhlis^{1*}, Salnida Yuniarti Lumbessy¹

¹Program Studi Budidaya Perairan, Fakultas Pertanian Universitas Mataram, Mataram, Indonesia;

Article History

Received : June 16th, 2025

Revised : July 17th, 2025

Accepted : August 08th, 2025

*Corresponding Author:

Alis Mukhlis,

Program Studi Budidaya Perairan,

Fakultas Pertanian Universitas

Mataram, Mataram, Indonesia;

Email: alismukhlis@unram.ac.id

Abstract: *Caulerpa lentillifera* is a strategic macroalgae commodity in controlled cultivation that requires nutrient management optimization for maximum productivity. This study evaluated the effect of nitrogen concentration variations (0, 15, 30, 45 ppm) on algae growth parameters in a complete randomized design with three replicates over 15 days (12 experimental units). Data analysis was carried out using One-Way ANOVA (95% confidence level) and Duncan post-hoc test to compare parameters such as absolute and relative biomass, specific growth rate, rate of decline, biomass residue, and chlorophyll-a content. The results showed that the concentration of 45 ppm resulted in the highest absolute biomass (23 g) and optimal relative growth (36.59%), while 30 ppm provided the highest specific growth rate (7.40 %/day) and the lowest specific decline rate (2.3 %/day). Surprisingly, the control (0 ppm) recorded the highest chlorophyll-a (20 µg/g), while at 45 ppm there was a significant decrease (9.67 µg/g). It is concluded that the optimal nitrogen range is 15–30 ppm, as it offers the best balance between productivity and physiological stability. At the applicative level, it is recommended the use of moderate nitrogen concentrations in commercial cultivation of *C. lentillifera* for economic efficiency without sacrificing biomass quality.

Keywords: Aquaculture, *Caulerpa lentillifera*, Nitrogen concentration; Plants.

Pendahuluan

Makroalga memiliki peran penting dalam sistem akuakultur laut dan pesisir, dengan kontribusi mencapai lebih dari 50% dari total produksi global. Berdasarkan data tahun 2020, produksi makroalga mencapai sekitar 35 juta ton berat basah, yang sebagian besar dimanfaatkan untuk konsumsi manusia secara langsung (Chopin & Tacon, 2021). Produksi global ini didominasi oleh delapan genera makroalga merah dan coklat yang telah terkomersialkan, sedangkan makroalga hijau masih memberikan kontribusi relatif kecil, yaitu kurang dari 1% (Moreira et al., 2022). Namun demikian, genus *Caulerpa* menunjukkan peningkatan popularitas yang signifikan dan konsisten menjadi penyumbang terbesar dalam budidaya makroalga hijau sejak 1950-2019, dengan rata-rata produksi tahunan 6.404 ton, meskipun sempat mengalami penurunan drastis menjadi 1.090 ton pada 2019

(Cai et al. 2021). Spesies seperti *C. racemosa* dan *C. lentillifera*, yang dikenal sebagai "anggur laut" atau "kaviar hijau", populer di kawasan Indo-Pasifik dan dikonsumsi baik segar maupun diasinkan (Stuthman et al. 2023). Keunikan tekstur, kandungan gizi tinggi, senyawa bioaktif, serta asam lemak tak jenuh ganda (PUFA) menjadi faktor pendorong meningkatnya permintaan global (Darmawan et al. 2021).

Pemupukan merupakan strategi fundamental dalam budidaya makroalga untuk menyediakan nutrisi esensial yang dibutuhkan organisme budidaya, khususnya nitrogen (N) dan fosfor (P). Pemupukan bertujuan untuk mengatasi keterbatasan nutrisi yang tersedia secara alami di lingkungan perairan, sehingga dapat mengoptimalkan pertumbuhan dan produksi (Yongyod & Kamolrat, 2025). Nitrogen berperan penting sebagai komponen protein, klorofil, dan asam nukleat, serta mendukung pembentukan dinding sel yang tipis untuk

efisiensi produksi (Dini *et al.* 2021). Fosfor, di sisi lain, berfungsi dalam pembentukan jaringan meristem, pembelahan sel, dan perbaikan jaringan (Syamsuddin & Rahman, 2020). Ketersediaan nitrat dan fosfat yang optimal menjadi faktor penentu pertumbuhan karena berperan dalam sintesis protein intraseluler (Zainuddin & Nofianti, 2022). Efektivitas penyerapan dan pemanfaatan nutrisi ini dipengaruhi oleh faktor fisik, kimia, dan biologi perairan (Bambaranda *et al.* 2021).

Permasalahan yang dihadapi dalam budidaya *Caulerpa* adalah belum optimalnya strategi pemupukan, khususnya dalam pengaturan konsentrasi nitrogen yang tepat untuk memaksimalkan pertumbuhan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa suplementasi nitrogen, seperti melalui pupuk urea atau NPK, dapat meningkatkan laju pertumbuhan spesifik *C. racemosa* var. *uvifera* secara signifikan (Setiaji *et al.* 2022). Namun, data empiris yang membahas pengaruh variasi konsentrasi nitrogen terhadap *C. lentillifera* pada sistem budidaya terkontrol masih terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini memiliki urgensi untuk mengkaji pengaruh perbedaan konsentrasi nitrogen terhadap pertumbuhan *C. lentillifera* dalam sistem budidaya terkontrol. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah yang relevan untuk pengembangan strategi budidaya anggur laut secara berkelanjutan, meningkatkan efisiensi produksi, dan mendukung pemanfaatan sumber daya laut yang ramah lingkungan.

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November – Desember 2024 di Laboratorium Produksi dan Reproduksi Ikan, Program Studi Budidaya Perairan, Fakultas Pertanian, dan Laboratorium Kimia Analitik, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mataram.

Desain/Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental kuantitatif dengan menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) yang berlangsung selama 15 hari. Desain eksperimen terdiri dari 4 perlakuan konsentrasi nitrogen

dengan 3 ulangan, yaitu: perlakuan A (0 ppm sebagai kontrol), perlakuan B (15 ppm), perlakuan C (30 ppm), dan perlakuan D (45 ppm), sehingga menghasilkan total 12 unit percobaan yang dianalisis secara statistik.

Populasi dan Sampel Penelitian

Populasi penelitian adalah seluruh individu *Caulerpa lentillifera* yang dibudidayakan dalam kondisi terkontrol. Sampel penelitian berupa bibit *C. lentillifera* dengan bobot awal seragam yang diperoleh melalui teknik purposive sampling berdasarkan kriteria morfologi dan kondisi fisiologis yang optimal. Variabel penelitian meliputi variabel bebas berupa konsentrasi nitrogen (0, 15, 30, 45 ppm) dan variabel terikat berupa parameter pertumbuhan makroalga. Pengambilan data dilakukan melalui pengukuran biomassa setiap tiga hari sekali selama periode pemeliharaan. Alat yang digunakan meliputi timbangan analitik, pH meter, DO meter, refraktometer, termometer, dan lux meter, sedangkan bahan penelitian terdiri dari bibit *C. lentillifera*, pupuk nitrogen, air laut steril, dan bahan kimia untuk analisis klorofil.

Prosedur penelitian

Prosedur penelitian meliputi persiapan wadah, persiapan media air, persiapan sistem aerasi, pembuatan pupuk, persiapan bibit *C. lentillifera*, aklimatisasi bibit *C. lentillifera*, pemberian pupuk, pemeliharaan, dan pengamatan bibit *C. lentillifera*, uji klorofil.

Analisis data

Data yang diperoleh diinput pada aplikasi SPSS (Statistical Product and Service Solutions) untuk dilakukan analisis sidik ragam (Anova), dengan tingkat analisis 95%. Hasil yang berpengaruh nyata dilanjutkan dengan uji Duncan pada tingkat kepercayaan 95%.

Parameter penelitian

Parameter yang dianalisis yaitu biomassa, pertumbuhan mutlak, pertumbuhan relatif, laju pertumbuhan spesifik, laju penurunan spesifik, residu biomassa, kandungan klorofil, dan kualitas air.

Biomassa (Bobot Basah)

Biomassa adalah rata-rata bobot basah rumput laut yang diukur pada saat sampling setiap tiga hari sekali selama 15 hari

pemeliharaan.

Pertumbuhan Mutlak

Pertumbuhan Mutlak dapat dihitung menggunakan rumus Effendie (1997):

$$W = W_t - W_o$$

Keterangan:

- W : Pertumbuhan mutlak rata-rata (g/hari).
 W_t : Bobot bibit pada akhir penelitian (g).
 W_o : Bobot bibit pada awal penelitian (g).

Pertumbuhan Relatif

Pertumbuhan Relatif (%) dapat dihitung dengan menggunakan rumus Effendie (1997) sebagai berikut :

$$Gr = \frac{W_t - W_o}{W_o} \times 100\%$$

Keterangan:

- Gr : Pertumbuhan Relatif (%).
 W_t : Bobot bibit pada akhir penelitian (g).
 W_o : Bobot bibit pada awal penelitian (g).

Laju Pertumbuhan Spesifik

Laju pertumbuhan spesifik (% per hari) dihitung dengan menggunakan rumus yang diturunkan dari Huisman (2021) sebagai berikut:

$$LPS = [(W_p : W_o)^{1/t} - 1] \times 100\%$$

Keterangan:

- LPS : Laju Pertumbuhan Spesifik (%/hari).
 W_p : Bobot bibit pada puncak penelitian (g).
 W_o : Bobot bibit pada awal penelitian (g).
 t : Lama waktu pemeliharaan (hari).

Laju Penurunan Spesifik

Laju penurunan spesifik (% per hari) diukur pada saat pertumbuhan puncak sampai saat akhir masa penurunan. Perhitungan dengan menggunakan rumus yang diturunkan dari (Huisman, 2021) sebagai berikut:

$$LPnS = [(W_t : W_p)^{1/t} - 1] \times 100\%$$

Keterangan:

- LPnS : Laju Penurunan Spesifik (%/hari).
 W_t : Bobot bibit pada akhir penelitian (g).
 W_p : Bobot bibit pada puncak penelitian (g).
 t : Lama waktu pemeliharaan (hari).

Residu Biomassa

Perhitungan residu biomassa dilakukan dengan menghitung biomassa rumput laut yang hidup di akhir penelitian (B_f) dan biomassa puncak rumput laut pada saat akhir pertumbuhan (B_p) dengan menggunakan rumus:

$$RB = \frac{B_f}{B_p} \times 100\%$$

Keterangan:

- RB : Residu Biomassa (%).
 B_f : Biomassa rumput laut yang hidup di akhir pemeliharaan (g).
 B_p : Biomassa puncak rumput laut pada akhir pertumbuhan (g).

Kandungan Klorofil

Untuk mengetahui kadar klorofil maka dilakukan pembuatan larutan standar klorofil a dan diukur dengan panjang gelombang yang sama (Zunnuraini *et al.* 2023). Kandungan klorofil dapat dihitung menggunakan rumus (Mahardika *et al.* 2021):

$$\text{Klorofil-a (mg/L)} = 11.93 (A_{664}) - 1.93 (A_{647})$$

Keterangan:

- A : Absorban pada masing-masing panjang gelombang

Kualitas Air

Parameter kualitas air yang diukur meliputi suhu, salinitas, pH, DO (*Dissolved Oxygen*), dan intensitas cahaya. Pengukuran dilakukan dengan Termometer untuk mengukur suhu, pH meter untuk mengukur pH, DO meter untuk mengukur oksigen terlarut, refractometer untuk mengukur

nilai salinitas, serta lux meter mengukur intensitas cahaya. Pengukuran dilakukan sebanyak 2 kali selama kegiatan penelitian yaitu pada awal pemeliharaan, hari ke- 1 dan terakhir hari ke- 15 dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

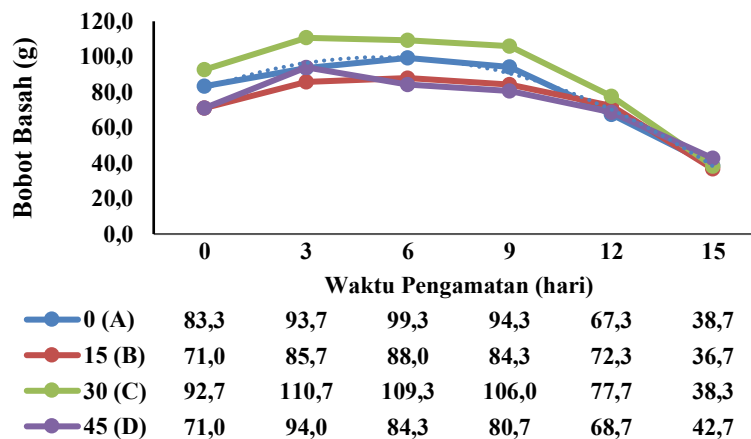
Tabel 1. Parameter kualitas air dan kisaran optimal untuk budidaya *C. lentillifera*

No	Parameter	Alat	Pustaka
1.	Suhu (°C)	Terrmometer	25°C-30°C (Apriliyanti <i>et al.</i> 2024)
2.	Salinitas (ppt)	Refractometer	30-40 (Sompong <i>et al.</i> 2020)
3.	pH	pH Meter	7,0-8,5 (Safitri & Rachmadiarti, 2023)
4.	DO (ppm)	DO Meter	3,8-8,0 (Nur <i>et al.</i> 2024)
5.	Intensitas Cahaya	Lux Meter	400-3500 (Delan <i>et al.</i> 2021)

Hasil dan Pembahasan

Biomassa (Bobot Basah)

Hasil pengamatan bobot basah rumput laut setiap 3 hari sekali menunjukkan bahwa perlakuan tanpa penambahan nitrogen sebagai kontrol (A) dan perlakuan konsentrasi nitrogen 15 ppm (B) dapat meningkatkan bobot basah *C. lentillifera* sampai pada pemeliharaan hari ke-6 dan selanjutnya mengalami penurunan bobot basah sampai akhir masa pemeliharaan (hari ke-15). Sementara perlakuan konsentrasi nitrogen 30 ppm (C) dan konsentrasi 45 ppm (D) hanya dapat meningkatkan bobot basah *C. lentillifera* sampai pada pemeliharaan hari ke-3 dan hari ke-9 selanjutnya mengalami penurunan bobot basah sampai akhir masa pemeliharaan (hari ke-15) (Gambar 1).



Gambar 1. Bobot Basah *C. lentillifera* pada Media Pemeliharaan dengan berbagai Konsentrasi Nitrogen.

Gambar 1 menunjukkan bahwa perlakuan konsentrasi nitrogen 30 ppm (C) menunjukkan biomassa *C. lentillifera* tertinggi pada hari ke-3, ke-6, dan ke-9, dengan bobot masing-masing sebesar 110,7 g, 109,3 g, dan 106,0 g. Namun, peningkatan biomassa pada perlakuan ini hanya berlangsung optimal hingga hari ke-3, kemudian mengalami penurunan mulai hari ke-6 hingga akhir masa pemeliharaan. Sebaliknya, perlakuan kontrol (A) dan 15 ppm (B) menunjukkan peningkatan bobot basah yang lebih stabil dan optimal hingga hari ke-6.

Analisis pola pertumbuhan menunjukkan adanya fase bifasik yang konsisten pada semua perlakuan, yakni fase akselerasi awal yang diikuti oleh fase penurunan biomassa. Konsentrasi 30 ppm (C) mampu

mempertahankan biomassa maksimal selama fase pertumbuhan optimal, mencapai puncaknya pada hari ke-3. Hal ini menunjukkan bahwa nitrogen yang tersedia sudah cocok dengan aktivitas sel. Penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa kisaran nitrogen 25–35 ppm merupakan rentang yang paling efisien dalam mendukung proses fotosintesis dan sintesis protein struktural pada makroalga hijau tropik (Tong *et al.* 2025).

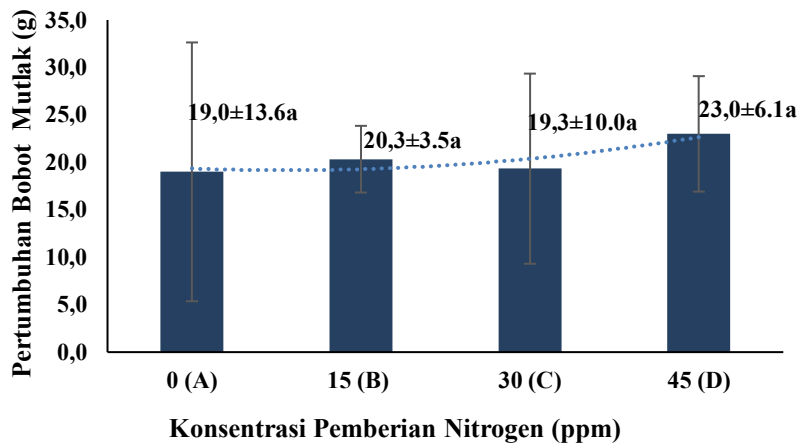
Setelah hari ke-6, terjadi penurunan biomassa yang mengindikasikan transisi dari fase pertumbuhan eksponensial ke fase stasioner dan deklinasi. Penurunan ini disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk kompetisi intraspesifik karena tingginya densitas biomassa, *self-shading* yang mengurangi intensitas cahaya

yang diterima, serta penurunan nutrisi dalam sistem tertutup. Studi menyebutkan bahwa biomassa yang melebihi 30–35 g/L dapat menurunkan efisiensi fotosintesis karena keterbatasan ruang dan sirkulasi nutrisi (Xiao *et al.* 2021). Selain itu, akumulasi metabolit sekunder juga dapat menghambat pertumbuhan lebih lanjut. Oleh karena itu, sistem budidaya tertutup perlu pengelolaan kualitas air dan suplai nutrisi yang diperbarui secara berkala untuk

menjaga produktivitas dalam jangka panjang (Hadley *et al.* 2022).

Pertumbuhan Bobot Mutlak *C. lentillifera*

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pemberian perlakuan konsentrasi nitrogen yang berbeda pada media pemeliharaan memberikan pertumbuhan berat mutlak *C. lentillifera* yang bervariasi pada berbagai tingkat perlakuan selama 15 hari masa pemeliharaan (Gambar 2).



Gambar 2. Pertumbuhan Bobot Mutlak *C. lentillifera* pada Media Pemeliharaan dengan berbagai Konsentrasi Nitrogen.

Gambar 2. Menunjukkan bahwa perlakuan dengan konsentrasi 45 ppm (D) menghasilkan biomassa tertinggi sebesar 23 g, mencerminkan optimalisasi metabolisme anabolik pada konsentrasi tersebut. Perlakuan 15 ppm (B) menghasilkan bobot mutlak sebesar 20,3 g, diikuti oleh 30 ppm (C) sebesar 19,3 g. Sementara itu, kontrol tanpa nitrogen (A) menghasilkan pertumbuhan terendah, yaitu 19 g. Pola pertumbuhan ini mempertegas peran nitrogen sebagai faktor pembatas dalam sintesis protein dan pembentukan struktur jaringan. Walaupun terdapat perbedaan antarperlakuan, selisih nilai yang relatif kecil menunjukkan kemungkinan adanya mekanisme kompensasi dan adaptasi fisiologis dari *C. lentillifera* dalam memanfaatkan nitrogen yang tersedia, baik dari dalam tubuh (endogen) maupun dari media budidaya (eksogen).

Hasil analisis statistik menggunakan *One-Way* (ANOVA) menunjukkan bahwa perbedaan konsentrasi nitrogen tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pertumbuhan bobot mutlak *C. lentillifera* karena

nilai *F* hitung < *F* tabel. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun terdapat perbedaan nilai pertumbuhan mutlak antar perlakuan, perbedaan tersebut tidak cukup besar untuk dinyatakan signifikan secara statistik.

Analisis mendalam terhadap pola pertumbuhan bobot mutlak mengungkapkan kompleksitas metabolisme nitrogen dalam mendukung akumulasi biomassa *C. lentillifera*. Superioritas perlakuan 45 ppm (D) dalam menghasilkan pertumbuhan mutlak tertinggi mencerminkan optimalisasi jalur biosintesis protein dan karbohidrat struktural yang difasilitasi oleh ketersediaan nitrogen yang adekuat. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui teori *Liebig's law of minimum*, dimana nitrogen menjadi faktor pembatas utama dalam pertumbuhan maksimum makroalga. Spesies *Caulerpa* menunjukkan respons positif terhadap peningkatan nitrogen hingga 50 ppm, dengan biomassa meningkat seiring ketersediaan nitrogen untuk sintesis asam amino esensial. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang menemukan bahwa konsentrasi optimal nitrogen

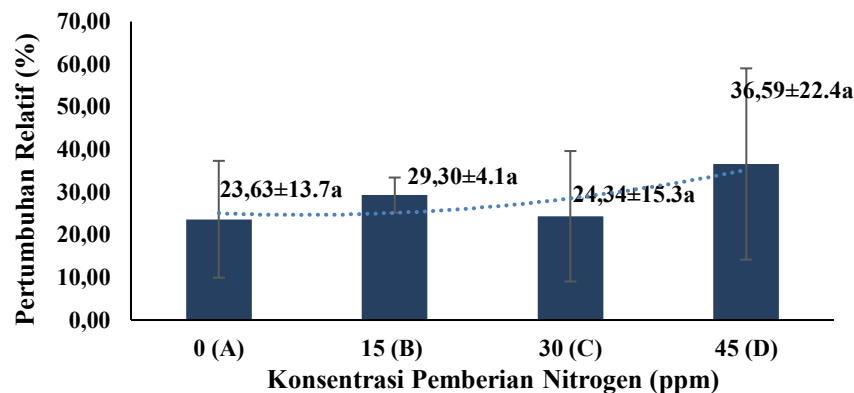
untuk makroalga tropis berada di kisaran 40–50 ppm. Dibandingkan *C. racemosa* yang mencapai pertumbuhan maksimum pada 35 ppm, perbedaan ini mengindikasikan variasi antar spesies *Caulerpa* dalam memanfaatkan nitrogen (Budiyani et al. 2020).

Argumentasi terkait efisiensi utilisasi nitrogen dalam pertumbuhan mutlak *C. lentillifera* menunjukkan adanya *trade-off* antara konsentrasi substrat dan efisiensi konversi metabolik. Meskipun perlakuan 45 ppm menghasilkan biomassa tertinggi, peningkatan hanya 3,37 g dibandingkan perlakuan 15 ppm bisa jadi tidak efisien secara ekonomi. Teori *enzyme kinetics Michaelis-Menten* menjelaskan bahwa pada konsentrasi substrat berlebih, laju reaksi mencapai titik maksimum (V_{max}), dan tambahan substrat tidak banyak menambah hasil. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa konsentrasi nitrogen optimal secara ekonomi biasanya hanya 60–70% dari konsentrasi biologis

maksimum (Mardawati *et al.* 2020). Studi pada *Ulva lactuca* menunjukkan pertumbuhan hingga 60 ppm, menandakan adanya perbedaan mendasar dalam metabolisme nitrogen antar genera makroalga. Secara praktis, pemupukan nitrogen dalam budidaya *C. lentillifera* harus mempertimbangkan keseimbangan antara hasil biologis dan kelayakan ekonomi (Bews *et al.* 2021). Temuan ini menjadi dasar bagi pengembangan protokol budidaya berkelanjutan dengan input nutrisi minimal namun tetap menghasilkan produktivitas tinggi (Huo *et al.* 2024).

Pertumbuhan Relatif *C. lentillifera*

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pemberian perlakuan konsentrasi nitrogen yang berbeda pada media pemeliharaan memberikan pertumbuhan relatif *C. lentillifera* yang bervariasi pada berbagai tingkat perlakuan selama 15 hari masa pemeliharaan (Gambar 3).



Gambar 3. Pertumbuhan Relatif *C. lentillifera* pada Media Pemeliharaan dengan berbagai Konsentrasi Nitrogen.

Gambar 3 menunjukkan bahwa perlakuan dengan penambahan nitrogen sebesar 45 ppm (D) menghasilkan pertumbuhan relatif tertinggi sebesar 36,59%. Perlakuan dengan konsentrasi nitrogen 15 ppm (B) juga menunjukkan hasil yang cukup tinggi dengan pertumbuhan relatif sebesar 29,30%, sementara perlakuan 30 ppm (C) menghasilkan pertumbuhan relatif sebesar 24,34%. Kedua nilai ini masih lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan 0 ppm (kontrol) mencapai pertumbuhan relatif sebesar 23,63%. Perbedaan antara kelompok kontrol dan perlakuan dengan tambahan nitrogen menegaskan peran penting unsur ini dalam pertumbuhan *C. lentillifera*. Berdasarkan hasil uji analisis variansi satu arah

One-Way (ANOVA), dapat diketahui bahwa variasi konsentrasi nitrogen memberikan pengaruh yang tidak berbeda nyata ($p > 0,05$) terhadap pertumbuhan relatif *C. lentillifera*. Hal ini ditunjukkan oleh nilai F hitung $< F$ tabel. Meskipun pemberian nitrogen dalam konsentrasi yang lebih tinggi cenderung meningkatkan pertumbuhan relatif, secara statistik namun tidak terdapat perbedaan yang signifikan antar perlakuan, sehingga hipotesis nol (H_0) diterima dan hipotesis alternatif (H_1) ditolak.

Evaluasi komprehensif terhadap parameter pertumbuhan mengungkapkan respons yang beragam terhadap variasi konsentrasi nitrogen, meskipun analisis statistik menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan

antar perlakuan. Perlakuan konsentrasi nitrogen 45 ppm (D) menghasilkan pertumbuhan mutlak dan relatif tertinggi dengan nilai 23 g dan 36,59% secara berturut-turut, mengindikasikan kapasitas penyerapan dan utilisasi nitrogen yang optimal pada konsentrasi tersebut. Peningkatan ini dikaitkan dengan intensifikasi aktivitas fotosintesis dan accelerasi metabolisme seluler yang difasilitasi oleh ketersediaan nitrogen yang adekuat untuk sintesis klorofil dan enzim fotosintesis. *C. lentillifera* menunjukkan respons pertumbuhan positif hingga konsentrasi nitrogen 50 ppm, dengan peningkatan laju fotosintesis dan akumulasi biomassa yang signifikan.

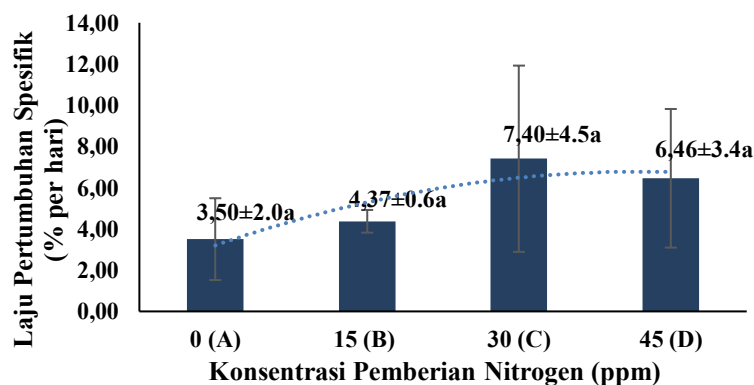
Sebaliknya, laju pertumbuhan spesifik harian mencapai optimum pada perlakuan 30 ppm (C) dengan nilai 7,40% per hari, menunjukkan efisiensi konversi nutrisi yang superior dibandingkan konsentrasi yang lebih tinggi (Bambaranda *et al.* 2021). Fenomena ini mengkonfirmasi konsep "*luxury consumption*", dimana makroalga dapat menyerap nitrogen melebihi kebutuhan metabolisme *immediate*, namun utilisasi yang berlebihan dapat mengganggu keseimbangan stoikiometrik seluler (Subur *et al.* 2021). Tidak adanya signifikansi statistik antar perlakuan mengindikasikan bahwa rentang konsentrasi nitrogen yang diuji berada dalam zona toleransi fisiologis *C. lentillifera*, memberikan fleksibilitas dalam optimalisasi

protokol budidaya (Malta *et al.* 2021). Variabilitas biologis intrinsik dan interaksi dengan faktor lingkungan lainnya dapat mengkompensasi pengaruh konsentrasi nitrogen dalam rentang moderat (Robles & Tahliluddin, 2022).

Implikasi praktis dari temuan ini menunjukkan potensi optimalisasi ekonomis dalam budidaya komersial *C. lentillifera*. Konsentrasi nitrogen 15 ppm (B) telah menghasilkan pertumbuhan relatif sebesar 29,30%, yang secara ekonomis lebih efisien dibandingkan konsentrasi yang lebih tinggi tanpa perbedaan signifikan dalam produktivitas. Hal ini sejalan dengan prinsip *sustainable aquaculture* yang menekankan efisiensi penggunaan sumber daya dan minimalisasi dampak lingkungan. Peneliti merekomendasikan pendekatan *cost-benefit analysis* dalam menentukan konsentrasi nutrisi optimal untuk budidaya makroalga skala komersial (Wu *et al.* 2022).

Laju Pertumbuhan Spesifik *C. lentillifera*

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pemberian perlakuan konsentrasi nitrogen yang berbeda pada media pemeliharaan memberikan laju pertumbuhan spesifik *C. lentillifera* yang bervariasi pada berbagai tingkat perlakuan selama 15 hari masa pemeliharaan (Gambar 4).



Gambar 4. Laju Pertumbuhan Spesifik *C. lentillifera* pada Media Pemeliharaan dengan berbagai Konsentrasi Nitrogen.

Gambar 4. menunjukkan bahwa perlakuan dengan penambahan konsentrasi nitrogen 30 ppm (C) mengalami laju pertumbuhan spesifik tertinggi sebesar 7,40% per hari. Perlakuan 45 ppm (D) menghasilkan 6,46% per hari, diikuti 15 ppm (4,37% per hari), dan perlakuan tanpa nitrogen 0 ppm (A) paling

rendah, yaitu 3,50% per hari. Hal ini menunjukkan bahwa ada konsentrasi nitrogen optimal yang mendukung metabolisme sel *C. lentillifera* secara efisien. Penurunan pertumbuhan pada 45 ppm menunjukkan bahwa kelebihan nitrogen dapat mengganggu keseimbangan fisiologis alga. Jadi, penambahan

nitrogen tidak selalu meningkatkan pertumbuhan, tetapi mengikuti pola optimum dengan batas tertentu. Variasi respons antar perlakuan menunjukkan bahwa alga ini sensitif terhadap perubahan nutrisi.

Berdasarkan hasil uji analisis variansi satu arah *One-Way* (ANOVA), dapat diketahui bahwa variasi konsentrasi nitrogen memberikan pengaruh yang tidak berbeda nyata ($p > 0,05$) terhadap laju pertumbuhan spesifik *C. lentillifera*. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *F* hitung $< F$ tabel. Dengan demikian, perlakuan konsentrasi nitrogen dalam kisaran 0 – 45 ppm tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap laju pertumbuhan spesifik *C. lentillifera*. Hal ini membuka peluang untuk optimalisasi penggunaan nitrogen dalam budidaya *C. lentillifera*, penelitian menunjukkan adanya efisiensi penggunaan nutrisi dapat ditingkatkan tanpa mengorbankan laju pertumbuhan secara signifikan.

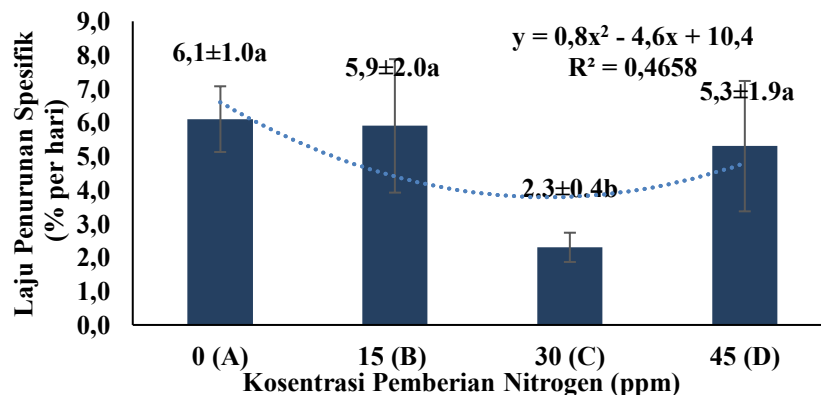
Respon terbaik terjadi pada 30 ppm, menandakan adanya keseimbangan antara ketersediaan nitrogen dan kemampuan metabolisme sel. Nitrogen berperan dalam proses fotosintesis dan sintesis protein. Penurunan pertumbuhan pada 45 ppm mendukung dugaan bahwa kelebihan nitrogen bisa menghambat metabolisme. Hal ini sesuai dengan hukum *Liebig*, yang menyatakan bahwa kelebihan atau kekurangan nutrisi dapat membatasi pertumbuhan (Dolman & Wiedner, 2020). Studi sebelumnya pada *Caulerpa taxifolia* menunjukkan pertumbuhan optimal pada 28–32 ppm. *C. racemosa* mengalami penurunan pertumbuhan 15–20% jika nitrogen melebihi 40 ppm (Budiyani et al. 2020). Ini menunjukkan

bahwa genus *Caulerpa* memiliki ambang batas nitrogen yang serupa (Chen et al. 2021).

Tidak adanya perbedaan signifikan antar perlakuan juga menunjukkan bahwa faktor lingkungan dan genetik bibit lebih berpengaruh terhadap pertumbuhan dibanding nitrogen. Ini didukung oleh koefisien variasi tinggi, yang mencerminkan keragaman genetik bibit dari alam dan kemampuan adaptasi terhadap lingkungan kultur (Lideman et al. 2024). Berdasarkan teori *ecological stoichiometry* dari Sterner & Elser, pertumbuhan optimal terjadi bila rasio C:N:P dalam jaringan alga seimbang. Nitrogen hanya efektif bila tersedia bersama karbon dan fosfor dalam proporsi ideal (Dewi et al. 2024). Penelitian lain mencatat bahwa pertumbuhan *C. lentillifera* di alam berkisar antara 4,2–8,1% per hari, dan di laboratorium 3,8–7,6% per hari (Kartika et al. 2023). Perbedaan hasil pada studi ini terletak pada pertumbuhan tinggi yang hanya berlangsung hingga hari ke-9, sedangkan studi lain mencatat pertumbuhan hingga 21 hari dengan penggantian nutrisi secara berkala (Subur et al. 2021). Secara praktis, budidaya *C. lentillifera* yang optimal memerlukan pendekatan terpadu yang mencakup pengaturan konsentrasi nitrogen, waktu pemberian, kualitas bibit, dan manajemen lingkungan agar produktivitas tetap tinggi dan berkelanjutan (Astuti et al., 2021).

Laju Penurunan Spesifik *C. lentillifera*

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pemberian perlakuan konsentrasi nitrogen yang berbeda pada media pemeliharaan memberikan laju penurunan spesifik *C. lentillifera* yang bervariasi pada berbagai tingkat perlakuan selama 15 hari masa pemeliharaan (Gambar 5).



Gambar 5. Laju Penurunan Spesifik *C. lentillifera* pada Media Pemeliharaan dengan berbagai Konsentrasi Nitrogen

Gambar 5 menunjukkan bahwa, laju penurunan spesifik tertinggi terjadi pada perlakuan tanpa nitrogen 0 ppm (A) sebesar 6,1% per hari, diikuti oleh perlakuan 15 ppm (B) sebesar 5,9% per hari, dan 45 ppm (D) sebesar 5,3% per hari. Nilai terendah ditemukan pada konsentrasi 30 ppm (C) yaitu sebesar 2,3% per hari, menunjukkan bahwa pada konsentrasi ini tanaman mengalami penurunan paling lambat. Hal ini mengindikasikan bahwa konsentrasi nitrogen 30 ppm cenderung memberikan kondisi optimal dalam memperlambat penurunan biomassa *C. lentillifera*.

Berdasarkan hasil uji lanjut laju penurunan spesifik *C. lentillifera* menggunakan metode *One-Way* (ANOVA) memperlihatkan bahwa pemberian perlakuan dengan konsentrasi nitrogen yang berbeda berpengaruh nyata ($P < 0,05$) terhadap laju penurunan spesifik pada perlakuan dengan konsentrasi nitrogen 30 ppm (C). Hasil uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa laju penurunan spesifik yang terendah terdapat pada perlakuan dengan konsentrasi nitrogen 30 ppm (C) dan berbeda nyata dengan semua perlakuan lainnya.

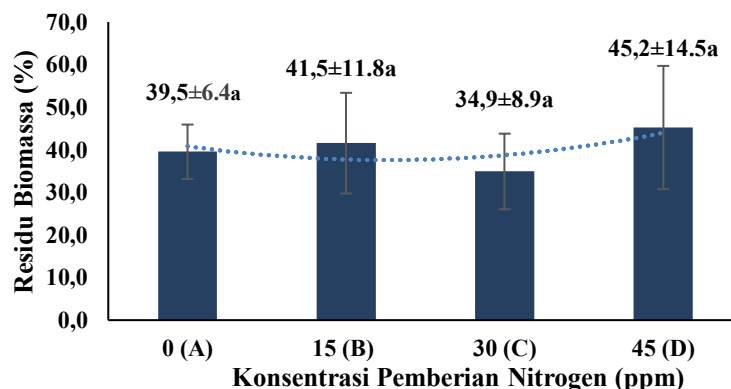
Analisis laju penurunan spesifik mengungkapkan pengaruh signifikan konsentrasi nitrogen terhadap stabilitas biomassa post-peak density, dengan perlakuan 30 ppm (C) menunjukkan laju penurunan terendah sebesar 2,3% per hari. Superioritas perlakuan ini mengindikasikan tercapainya keseimbangan metabolisme optimal yang memungkinkan *C. lentillifera* mempertahankan integritas struktural dan fisiologis dalam kondisi stress lingkungan.

Konsentrasi nitrogen pada level ini diduga memfasilitasi homeostasis seluler melalui regulasi osmotik yang stabil dan minimalisasi akumulasi metabolit toksik. Nitrogen dalam konsentrasi optimal berperan dalam *maintaining cellular turgor pressure* dan stabilisasi membran sel makroalga terhadap fluktuasi lingkungan.

Hubungan kuadratik antara konsentrasi nitrogen dan laju penurunan spesifik dengan persamaan ($y = 0,8x^2 - 4,6x + 10,4$), serta nilai ($R^2 = 0,4658$) menunjukkan bahwa 46,58% variasi laju penurunan dapat dijelaskan oleh perbedaan konsentrasi nitrogen, sementara 53,42% sisanya dipengaruhi oleh faktor eksternal. Faktor-faktor tersebut meliputi proses aklimatisasi yang suboptimal, stress osmotik akibat transisi dari habitat alami ke lingkungan kultur terkontrol, serta variabilitas genetik intrinsik bibit yang digunakan. Observation perubahan pigmentasi dari putih ke hijau-kekuningan pada perlakuan dengan nitrogen menunjukkan gangguan homeostasis pigmen fotosintesis dan destabilisasi tekanan osmotik seluler. Makroalga memerlukan periode aklimatisasi 7-14 hari untuk adaptasi optimal terhadap perubahan kondisi lingkungan dan komposisi nutrisi media.

Tingkat Residu Biomassa pada Pertumbuhan *C. lentillifera*

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pemberian perlakuan konsentrasi nitrogen yang berbeda pada media pemeliharaan memberikan residu biomassa pada *C. lentillifera* yang bervariasi pada berbagai tingkat perlakuan selama 15 hari masa pemeliharaan (Gambar 6).



Gambar 6. Residu Biomassa *C. lentillifera* pada Media Pemeliharaan dengan berbagai Konsentrasi Nitrogen

Gambar 6 menunjukkan bahwa pada perlakuan dengan konsentrasi nitrogen 45 ppm (D)

mengalami peningkatan residu biomassa sebesar 45,2%, selanjutnya pada perlakuan dengan

konsentrasi nitrogen 15 ppm (B) sebesar 41,5%, pada perlakuan konsentrasi 0 ppm (A) sebesar 39,5% dan perlakuan yang paling rendah tingkat residu biomassa pada perlakuan dengan konsentrasi nitrogen 30 ppm (C) sebesar 34,9% pada masa pemeliharaan.

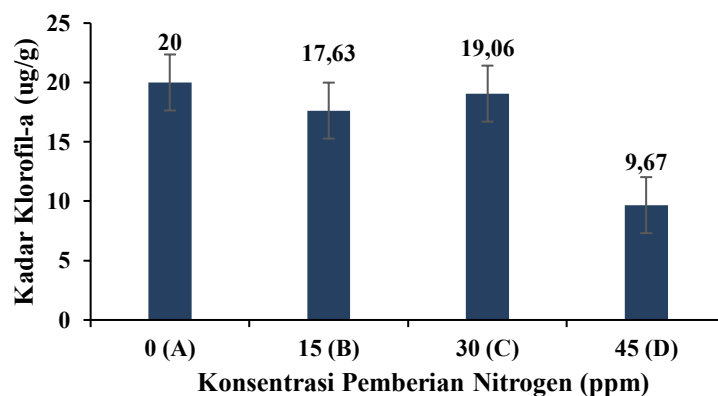
Berdasarkan hasil uji analisis variansi satu arah *One-Way* (ANOVA), dapat diketahui bahwa variasi konsentrasi nitrogen memberikan pengaruh yang tidak berbeda nyata ($p > 0,05$) terhadap residu biomassa *C. lentillifera*. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *F* hitung $< F$ tabel. Dengan kata lain, variasi perlakuan yang diberikan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap residu biomassa *C. lentillifera*. Hasil pengukuran residu biomassa menunjukkan bahwa efisiensi penggunaan nitrogen berbeda pada tiap perlakuan. Nilai residu paling rendah pada 30 ppm (C) mengindikasikan pemanfaatan nitrogen yang lebih efisien, di mana sebagian besar nitrogen terserap dan digunakan untuk membentuk biomassa aktif. Sebaliknya, peningkatan residu pada 15 ppm (B) dan 45 ppm (D) menunjukkan adanya ketidakseimbangan antara penyerapan dan pemanfaatan nitrogen. Pada kadar rendah, enzim metabolik mungkin terbatas sehingga nitrogen tidak sepenuhnya digunakan. Sementara itu, pada kadar tinggi, sistem transportasi nutrisi menjadi jenuh dan menyebabkan penumpukan nitrogen yang tidak digunakan.

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa *C. lentillifera* paling efisien menyerap nitrogen

pada kisaran 28-32 ppm. Konsentrasi yang lebih tinggi dapat menyebabkan hambatan balik (*feedback inhibition*) dan menurunkan efisiensi penyerapan. Faktor lingkungan seperti intensitas cahaya, suhu, dan sirkulasi media juga memengaruhi residu biomassa karena berdampak pada metabolisme dan transportasi nutrisi. Oleh karena itu, pengelolaan budidaya makroalga harus memperhatikan keterkaitan antara ketersediaan nutrisi, kondisi lingkungan, dan respons fisiologis tanaman (Xiao *et al.*, 2021).

Kandungan Klorofil *C. lentillifera*

Pengukuran kandungan klorofil-a pada *C. lentillifera*, hanya dilakukan pada akhir pengamatan (setelah kultur mencapai puncak atau menjelang akhir periode). Tujuan pengukuran ini adalah untuk menilai kondisi akhir fisiologis dari *C. lentillifera* dan pendekatan ini efisien dalam penggunaan sumber daya penelitian. Jadi, pengujian klorofil sangat penting dilakukan untuk mendapatkan informasi yang akurat dan praktis tentang hasil akhir kultur. Sifatnya yang destruktif, dipilih untuk mendapatkan data kondisi akhir kultur, serta lebih efisien dan praktis dibanding sampling berkali-kali. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kadar klorofil-a *C. lentillifera* pada berbagai media perlakuan dengan konsentrasi nitrogen yang berbeda berkisar antara 9,67 $\mu\text{g/g}$ – 20 $\mu\text{g/g}$. (Gambar 7).



Gambar 7. Kandungan Klorofil *C. lentillifera* pada Media Pemeliharaan dengan berbagai Konsentrasi Nitrogen.

Gambar 7 menunjukkan bahwa perlakuan dengan konsentrasi nitrogen memberikan pengaruh berbeda terhadap kadar

klorofil-a pada *C. lentillifera*. Perlakuan tanpa nitrogen (0 ppm) menghasilkan kadar klorofil-a tertinggi sebesar 20 $\mu\text{g/g}$. Kadar ini menurun

pada perlakuan 45 ppm, yaitu hanya sebesar 9,67 µg/g. Sementara itu, perlakuan dengan nitrogen 15 ppm dan 30 ppm menghasilkan kadar klorofil-a yang cukup tinggi, yaitu masing-masing sebesar 17,63 µg/g dan 19,06 µg/g. Secara umum, kadar klorofil-a tinggi pada rentang nitrogen 0-30 ppm, namun menurun tajam pada konsentrasi 45 ppm.

Penurunan kadar klorofil-a pada nitrogen tinggi (45 ppm) menunjukkan adanya stres oksidatif akibat kelebihan nitrogen. Nitrogen berlebih dapat memicu pembentukan senyawa ROS (*Reactive Oxygen Species*) yang merusak struktur klorofil dan mengganggu sistem fotosintesis. Hal ini menyebabkan degradasi klorofil dan penurunan efisiensi fotosintesis. *Caulerpa* yang terpapar nitrogen berlebih bisa mengalami klorosis dan gangguan pada metabolisme kloroplas (Chen et al., 2023). Hasil ini juga menunjukkan bahwa kadar klorofil-a cukup stabil pada kisaran nitrogen 0-30 ppm, yang menunjukkan bahwa *C. lentillifera* mampu beradaptasi terhadap variasi nitrogen dalam batas tertentu. Nitrogen berperan penting dalam pembentukan klorofil karena merupakan bagian dari struktur pigmen dan protein fotosintetik. Dalam jumlah yang sesuai, nitrogen membantu menjaga dan memperbaiki pigmen fotosintesis. Namun, kekurangan atau kelebihan nitrogen bisa mengganggu keseimbangan ini.

Kandungan klorofil dapat digunakan sebagai indikator untuk mengetahui kondisi fisiologis dan kemampuan fotosintesis makroalga. Oleh karena itu, pemantauan kadar klorofil dapat menjadi alat peringatan dini (*early warning*) untuk mendeteksi stres nutrisi dalam sistem budidaya *C. lentillifera*. Penurunan signifikan klorofil menandakan perlunya penyesuaian dosis nitrogen untuk menjaga hasil dan kualitas biomassa (Zhao et al. 2021).

Kualitas Air Media Pemeliharaan

Secara keseluruhan, parameter kualitas air yang diukur menunjukkan kondisi yang cukup ideal untuk pertumbuhan dan perkembangan *C. lentillifera* dalam sistem kultur yang digunakan (Tabel 2). Stabilitas pH, suhu, salinitas, DO dan intensitas cahaya mengindikasikan bahwa wadah kontainer 45 liter mampu menyediakan lingkungan yang terkontrol dan sesuai untuk budidaya anggur laut ini (Bambaranda et al. 2021).

Tabel 2. Parameter Kualitas Air

No	Parameter	Kisaran yang diperoleh	Pustaka
1.	Suhu (°C)	26-28°C	25°C-30°C (Apriliyanti et al. 2024)
2.	Salinitas (ppt)	31,75-33	30-40 (Sompong et al. 2020)
3.	pH	7,25-8,3	7,0-8,5 (Safitri & Rachmadiarti, 2023)
4.	DO (ppm)	8	3,8-8,0 (Nur et al. 2024)
5.	Intensitas Cahaya	411-473	400-3500 (Delan et al. 2021)

Kualitas Air sebagai Faktor Pendukung Pertumbuhan *C. lentillifera*

Optimalisasi parameter fisika-kimia perairan merupakan prerequisite fundamental dalam mencapai produktivitas maksimal budidaya *C. lentillifera*, dimana setiap parameter berfungsi sebagai determinan kritis terhadap efisiensi metabolisme seluler dan stabilitas fisiologis makroalga. Monitoring komprehensif terhadap suhu, pH, salinitas, *dissolved oxygen* (DO), dan intensitas cahaya memiliki peran penting dalam mendukung proses metabolisme dan kesehatan tanaman. Jika salah satu parameter tidak stabil, hal ini bisa memengaruhi parameter lainnya dan menurunkan kinerja budidaya secara keseluruhan. Pemantauan menyeluruh terhadap parameter-parameter tersebut membantu menjaga kondisi optimal sehingga pertumbuhan tanaman bisa berlangsung dengan cepat dan biomassa meningkat secara signifikan dalam sistem budidaya yang terkontrol (Ly et al. 2021). Kondisi air yang stabil mampu meningkatkan hasil panen hingga 40-60% dibandingkan kondisi yang berubah-ubah, karena mendukung aktivitas enzim dan metabolisme sel yang lebih efisien. Dalam penelitian ini, hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh parameter berada dalam kisaran optimal bagi pertumbuhan *C. lentillifera*. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan wadah kultur 45 liter sudah cukup efektif untuk menciptakan lingkungan yang sesuai bagi pertumbuhan tanaman (Ly et al. 2021).

Setiap parameter kualitas air saling berkaitan dan membentuk kondisi lingkungan (*niche*) yang mendukung kehidupan tanaman ini. Jika satu parameter berubah, bisa memengaruhi parameter lainnya dan mengganggu keseluruhan sistem budidaya. Menjaga pH antara 7,25 hingga

8,3 penting untuk mendukung proses penyerapan karbon dalam fotosintesis. Suhu air ideal berada di kisaran 26-28°C karena mendukung kerja enzim dan kelenturan membran sel. Salinitas yang stabil antara 31,75 sampai 33 ppt menjaga keseimbangan tekanan osmotik dan struktur sel *C. lentillifera* (Margono *et al.* 2021). Mengelola kualitas air secara menyeluruh menghasilkan pertumbuhan yang 35% lebih tinggi dibandingkan hanya memantau satu parameter saja. Interaksi antara kadar oksigen terlarut (DO) sekitar 8 ppm dan intensitas cahaya sebesar 411-473 lux membantu meningkatkan efisiensi fotosintesis dan produksi oksigen, yang mendukung metabolisme aerobik dalam sistem budidaya tertutup (Ameyaw & Okyer, 2021).

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa suplementasi nitrogen mempengaruhi pertumbuhan *C. lentillifera* secara bervariasi, meskipun sebagian besar parameter tidak berbeda signifikan secara statistik. Konsentrasi 45 ppm menghasilkan biomassa tertinggi, sementara 30 ppm memberikan efisiensi metabolisme terbaik. Konsentrasi nitrogen berlebihan (45 ppm) dapat memicu degradasi klorofil-a akibat stres oksidatif. Konsentrasi 15-30 ppm direkomendasikan untuk keseimbangan antara pertumbuhan, stabilitas fisiologis, dan efisiensi nutrisi. Pola pertumbuhan bifasik menunjukkan perlunya manajemen kualitas air yang berkelanjutan. Diperlukan penelitian lanjutan untuk membandingkan pengaruh dua sumber nitrogen, nitrat (NaNO_3) dan amonium (NH_4NO_3), terhadap pertumbuhan *C. lentillifera*.

Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada Tim Peneliti *Caulerpa*, termasuk Rizky Amrina Rossada dan Arman Maolana atas bantuan teknis yang tak ternilai, diskusi yang mendalam, dan dukungan kolaboratif mereka selama proses penelitian. Kontribusi mereka secara signifikan meningkatkan desain eksperimen, analisis data, dan interpretasi hasil. Penelitian ini sangat bermanfaat dari keahlian dan dedikasi mereka, dan para penulis sangat menghargai komitmen mereka untuk memajukan pemahaman ilmiah

tentang Pengaruh konsentrasi Nitrogen Terhadap Pertumbuhan *C. lentillifera*.

Referensi

- Ameyaw, Y., & Okyer, M. (2021). Concept Mapping Instruction as an Activator of Students' Performance in the Teaching and Learning of Excretion. *Current Trends in Biomedical Engineering & Biosciences*, 14(5), 93–102. <https://doi.org/10.19080/ctbeb.2018.14.555900>.
- Apriliyanti, F. J., Risjani, Y., Hertika, A. M. S., & Paricahya, A. F. (2024). Growth Analysis of *Caulerpa lentillifera* Cultivated at Laboratory Scale with Different Light Intensities. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(5), 2346–2353. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i5.6126>
- Astuti, N. A., Cokrowati, N., & Mukhlis, A. (2021). Cultivation of seagrasses (*Caulerpa lentillifera*) in Controlled Containers with the Addition of Different Doses of Fertilizers. *Journal of Coastal and Ocean Sciences*, 2(1), 1–6. <https://doi.org/10.31258/jocos.2.1.1-6>
- Bambaranda, B. V. A. S. M., Sasaki, N., Chirapart, A., Salin, K. R., & Tsusaka, T. W. (2021). Optimization of Macroalgal Density and Salinity for Nutrient Removal by *Caulerpa lentillifera* from Aquaculture Effluent. *Processes*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/pr7050303>
- Bambaranda, B. V. A. S. M., Tsusaka, T. W., Chirapart, A., Salin, K. R., & Sasaki, N. (2021). Capacity of *Caulerpa lentillifera* in the Removal of Fish Culture Effluent in a Recirculating Aquaculture System. *Processes*, 7(7), 1–15. <https://doi.org/10.3390/pr7070440>
- Bews, E., Booher, L., Polizzi, T., Long, C., Kim, J. H., & Edwards, M. S. (2021). Effects of Salinity and Nutrients on Metabolism and Growth of *Ulva lactuca*: Implications for Bioremediation of Coastal Watersheds. *Marine Pollution Bulletin*, 166(March). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112199>
- Budiyani, F. B., Suwartimah, K., & Sunaryo.

- (2020). Pengaruh Penambahan Nitrogen dengan Konsentrasi yang Berbeda terhadap Laju Pertumbuhan Rumput Laut *Caulerpa racemosa* var. *uvifera*. *Journal of Marine Research*, 1(1), 10–18. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jm/article/view/881>
- Cai, Y., Li, G., Zou, D., Hu, S., & Shi, X. (2021). Rising Nutrient Nitrogen Reverses The Impact of Temperature on Photosynthesis and Respiration of a Macroalga *Caulerpa lentillifera* (Ulvophyceae, Caulerpacae). *Journal of Applied Phycology*, 33(1), 1115–1123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10811-020-02340-9>
- Chen, X., Sun, Y., Liu, H., Liu, S., Qin, Y., & Li, P. (2021). Advances in Cultivation, Wastewater Treatment Application, bioactive Components of *Caulerpa lentillifera* and Their Biotechnological applications. *PeerJ*, 2(1), 1–15. <https://doi.org/10.7717/peerj.6118>
- Chen, Y., Lan, L., Zhang, J., Wang, Q., Liu, Y., Li, H., Gong, Q., & Gao, X. (2023). Physiological Impacts of Nitrogen Starvation and Subsequent Recovery on the Red Seaweed *Grateloupia turuturu* (Halymeniaceae, Rhodophyta). *Sustainability (Switzerland)*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/su15097032>
- Chopin, T., & Tacon, A. G. J. (2021). Importance of Seaweeds and Extractive Species in Global Aquaculture Production. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*, 29(2), 139–148. <https://doi.org/10.1080/23308249.2020.1810626>
- Darmawan, M., Zamani, N. P., Irianto, H. E., & Madduppa, H. (2021). Molecular Characterization of *Caulerpa racemosa* (Caulerpales, Chlorophyta) from Indonesia Based on the Plastid tufA Gene. *Squalen Bulletin of Marine and Fisheries Postharvest and Biotechnology*, 16(3), 101–109. <https://doi.org/10.15578/SQUALEN.588>
- Delan, G. G., Legados, J. A., Pepito, A. R., Cunado, V. D., Rica, R. L., Abdon, H. C., & Ilano, A. S. (2021). The Influence of Habitat on the Quality Characteristics of the Green Macro Alga *Caulerpa lentillifera* Agardh (Caulerpacae, Chlorophyta). *Tropical Technology Journal*, 19(1), 1–7. <https://doi.org/10.7603/s40934-015-0010-4>
- Dewi, M. A., Adam, M. A., Lumbessy, S. Y., & Kotta, R. (2024). Application of Different Fertilizers and Depths in The Rearing of Seaweed *Caulerpa racemosa* Using a Concrete Tank. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(1), 275–283. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i1.5472>
- Dini, P. S. R., Susanto, A. B., & Pramesti, R. (2021). Pengaruh Konsentrasi Pupuk Cair Terhadap Pertumbuhan dan Kandungan Klorofil-a Rumput Laut *Gracilaria verrucosa* (Harvey). *Journal of Marine Research*, 10(3), 327–332. <https://doi.org/10.14710/jmr.v10i3.29183>
- Dolman, A. M., & Wiedner, C. (2020). Predicting Phytoplankton Biomass and Estimating Critical N:P Ratios with Piecewise Models that Conform to Liebig's Law of the Minimum. *Freshwater Biology*, 60(4), 686–697. <https://doi.org/10.1111/fwb.12518>
- Hadley, S., Wild-Allen, K., Johnson, C., & Macleod, C. (2022). Modeling Macroalgae Growth and Nutrient Dynamics for Integrated Multi-trophic Aquaculture. *Journal of Applied Phycology*, 27(2), 901–916. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0370-y>
- Huisman, E. A. (2021). Food Conversion Efficiencies at Maintenance and Production Levels for Carp, *Cyprinus carpio* L., and Rainbow Trout, *Salmo gairdneri* Richardson. *Aquaculture*, 9(3), 259–273. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486\(76\)90068-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486(76)90068-5)
- Huo, Y., Elliott, M. S., & Drawbridge, M. (2024). Growth, Productivity and Nutrient Uptake Rates of *Ulva lactuca* and *Devaleraea mollis* Co-Cultured with *Atractoscion nobilis* in a Land-Based Seawater Flow-Through Cascade IMTA System. *Fishes*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/fishes9100417>
- Kartika, B. N., Adam, M. A., & Lestari, D. P.

- (2023). Analisis Pengaruh Penambahan Pupuk Air Nira Terhadap Pertumbuhan Rumput Laut *Caulerpa racemose* dengan Kedalaman yang Berbeda. *Samakia : Jurnal Ilmu Perikanan*, 14(2), 179–189. <https://doi.org/10.35316/jsapi.v14i2.3609>
- Lideman, Supriyono, E., Arifka, A. R., Laining, A., & Rosyida, E. (2024). Effect of Inorganic and Organic Fertilizers on Growth, Survival Rate and Chlorophyll-a Content of Green Seaweed *Caulerpa racemosa*. *BIO Web of Conferences*, 112(June). <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411201010>
- Liu, T., Chen, Z., Xiao, Y., Yuan, M., Zhou, C., Liu, G., Fang, J., & Yang, B. (2022). Biochemical and Morphological Changes Triggered by Nitrogen Stress in the Oleaginous Microalga *Chlorella vulgaris*. *Microorganisms*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030566>
- Ly, K. Van, Murungu, D. K., Nguyen, D. P., & Nguyen, N. A. T. (2021). Effects of Different Densities of Sea Grape *Caulerpa lentillifera* on Water Quality, Growth and Survival of the Whiteleg Shrimp *Litopenaeus vannamei* in Polyculture System. *Fishes*, 6(2), 19. <https://doi.org/10.3390/fishes6020019>
- Mahardika, S. A., Junaidi, M., & Marzuki, M. (2021). Kandungan Klorofil-a Dan Fikoeritrin Pada Rumput Laut (*Eucheuma Cottonii*) Budidaya Sistem Longline Dengan Kedalaman Berbeda. *E-Journal BUDIDAYA PERAIRAN*, 1(4), 8–13. <https://eprints.unram.ac.id/id/eprint/11200>
- Malta, E. J., Ferreira, D. G., Vergara, J. J., & Pérez-Lloréns, J. L. (2021). Nitrogen Load and Irradiance Affect Morphology, Photosynthesis and Growth of *Caulerpa prolifera* (Bryopsidales: Chlorophyta). *Marine Ecology Progress Series*, 298(May), 101–114. <https://doi.org/10.3354/meps298101>
- Mardawati, E., Harahap, B. M., Andoyo, R., & Wulandari, N. (2020). Karakterisasi Produk dan Pemodelan Kinetika Enzimatik Alfa-Amilase pada Produksi Sirup Glukosa dari Pati. *Jurnal Industri Pertanian*, 1(1), 11–20.
- Margono, Anggadiredja, J. T., & Nurhudah, M. (2021). Effectiveness of Seaweed (*Caulerpa lentillifera*) as Biofilter in Vanamei Shrimp (*litopenaeus vannamei*) Culture. *AACL Bioflux*, 14(3), 1734–1746.
- Moreira, A., Cruz, S., Marques, R., & Cartaxana, P. (2022). The Underexplored Potential of Green Macroalgae in Aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 5–26. <https://doi.org/10.1111/raq.12580>
- Nur, A., Rizkiyanti, I., Widyany, D. A., Ruliaty, L., Soleh, M., Suwoyo, D., & Taslihan, A. (2024). Water Quality and Immunological Response of Banana Shrimp (*Fenneropenaeus merguiensis*) Co-Cultured with Green Seaweed (*Caulerpa lentillifera*) in the laboratory. *BIO Web of Conferences*, 136, 0–3. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413601001>
- Robles, R. J. F., & Tahiluddin, A. B. (2022). A Preliminary Study on the Effects of Inorganic Nutrient Enrichment on the Growth and Survival Rates of Green seaweed *Caulerpa racemosa*. *Dergisi*, 8(2), 69–74.
- Safitri, E., & Rachmadiarti, F. (2023). Analisis Parameter Kualitas Air Untuk Habitat Rumput Laut *Caulerpa racemosa* Di Pantai Joko Mursodo, Lohgung, Lamongan. *LenteraBio : Berkala Ilmiah Biologi*, 12(3), 299–306. <https://doi.org/10.26740/lenterabio.v12n3.p299-306>
- Setiaji, K., Santosa, G. W., & Sunaryo, S. (2022). Pengaruh Penambahan NPK dan Urea pada Media Air Pemeliharaan terhadap Pertumbuhan Rumput Laut *Caulerpa racemosa* var. *uvifera*. *Journal of Marine Research*, 1(2), 45–50.
- 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 Enviromental Communication*, 2(1), 17–22. <https://ph02.tcithaijo.org/index.php/MIJE-EC>
- Stuthmann, L. E., Brix da Costa, B., Springer, K., & Kunzmann, A. (2023). Sea Grapes (*Caulerpa lentillifera* J. Agardh,

- Chlorophyta*) for Human use: Structured Review on Recent Research in Cultivation, Nutritional Value, and Post-Harvest Management. *Journal of Applied Phycology*, 35(6), 2957–2983. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03031-x>
- Subur, R., Irfan, M., & Akbar, N. (2021). The Effect of NPK Fertilizer with Different Dosage on the Growth Rate Seaweed (*Caulerpa racemosa*). *Depik*, 10(3), 207–210. <https://doi.org/10.13170/depik.10.3.20848>
- Syamsuddin, R., & Rahman, A. (2020). Penanggulangan Penyakit *Ice-Ice* pada Rumput Laut *Kappaphycus alvarezii* Melalui Penggunaan Pupuk N, P, dan K. *Simposium Nasional I Kelautan Dan Perikanan*, 2(1), 1–9. https://academia.edu/14733710/Penanggu-langan_penyakit_ice_ice_pada_rumput_laut_Kappaphycus_alvarezii_melalui_pen-ggunaan_pupuk_N_P_dan_K
- Tong, Y., Sun, Y., Xia, J., & Liu, J. (2025). Research Progress on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Uptake by *Ulva prolifera*, the Dominant Macroalga Responsible for Green Tides in the Yellow Sea. *Coasts*, 5(1), 10. <https://doi.org/10.3390/coasts5010010>
- Wu, J., Rogers, S. W., Schaumann, R., & Price, N. N. (2022). Comparison of Multiple Macroalgae Cultivation Systems and End-Use Strategies Based Upon Techno-Economic and Life Cycle Assessment. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4119266>
- Xiao, X., Agusti, S., Lin, F., Xu, C., Yu, Y., Pan, Y., Li, K., Wu, J., & Duarte, C. M. (2021). Resource (Light and Nitrogen) and Density-Dependence of Seaweed Growth. *Frontiers in Marine Science*, 6(October), 1–5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00618>
- Yongyod, R., & Kamolrat, N. (2025). Effects of Different Nitrogen and Phosphorus Ratios on the Growth, Nutritional Value, and Nutrient Removal Efficiency of *Wolffia globosa*. *Sci*, 7(2), 53. <https://doi.org/10.3390/sci7020053>
- Zainuddin, F., & Nofianti, T. (2022). Pengaruh Nutrient N dan P terhadap Pertumbuhan Rumput Laut Pada Budidaya Sistem Tertutup. *Jurnal Perikanan Unram*, 12(1), 116–124. <https://doi.org/10.29303/jp.v12i1.279>
- Zhao, L. S., Li, K., Wang, Q. M., Song, X. Y., Su, H. N., Xie, B. Bin, Zhang, X. Y., Huang, F., Chen, X. L., Zhou, B. C., & Zhang, Y. Z. (2021). Nitrogen Starvation Impacts the Photosynthetic Performance of *Porphyridium cruentum* as Revealed by Chlorophyll a Fluorescence. *Scientific Reports*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08428-6>
- Zunnuraini, Cokrowati, N., & Diniarti, N. (2023). Profil Klorofil Selada Laut *Ulva* Sp. dengan Umur Panen yang Berbeda pada Budidaya Terkontrol. *E-Journal Budidaya Perairan*, 11(1), 68–78. <https://doi.org/https://doi.org/10.35800/bd p.v11i1.47641>