

Respon Pertumbuhan dan Pigmen Fotosintetik Klorofil-a *Spirulina platensis* pada Intensitas Cahaya Berbeda

Muhamad Amrulloh* dan Rose Dewi

Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman
Jl. Dr. Suparno. Komplek GOR Susilo Sudarman Karangwangkal, Purwokerto 53122
Email: m.amrull25@gmail.com

Abstrak

Intensitas cahaya merupakan faktor utama yang memengaruhi fotosintesis, pertumbuhan, dan biosintesis pigmen pada mikroalga. *Spirulina platensis* memiliki kemampuan adaptasi fisiologis yang tinggi terhadap variasi cahaya, namun informasi mengenai respons pertumbuhan dan dinamika klorofil-a dalam satuan lux masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh intensitas cahaya terhadap kepadatan sel, laju pertumbuhan, dan kandungan klorofil-a *S. platensis*. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan rancangan acak lengkap dengan tiga perlakuan intensitas cahaya (500, 1029, dan 2000 lux) dan tiga ulangan. Kultivasi berlangsung selama tujuh hari dengan kepadatan awal 8,910 sel/mL menggunakan media Walne. Kepadatan sel diamati setiap hari, laju pertumbuhan dihitung pada fase eksponensial, dan klorofil-a dianalisis secara spektrofotometri. Hasil menunjukkan bahwa perlakuan 2000 lux menghasilkan kepadatan sel tertinggi ($29,232 \pm 8,907$ sel/mL), laju pertumbuhan tertinggi ($0,23 \pm 0,05$ hari⁻¹), serta kandungan klorofil-a tertinggi ($0,333 \pm 0,0085$ µg/L). Uji ANOVA ($\alpha = 0,05$) menunjukkan bahwa intensitas cahaya berpengaruh signifikan terhadap kandungan klorofil-a, dengan perlakuan 2000 lux berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya. Analisis regresi menunjukkan hubungan positif yang kuat antara klorofil-a dan laju pertumbuhan ($R^2 = 0,7991$). Pola ini mencerminkan mekanisme fotoaklimatisasi, di mana peningkatan klorofil-a mendukung efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan *S. platensis*.

Kata kunci: intensitas cahaya, klorofil-a, pertumbuhan, *Spirulina platensis*

Abstract

Response of Growth and Photosynthetic Pigment (Chlorophyll-a) of *Spirulina platensis* under Different Light Intensities

Light intensity is a major factor affecting photosynthesis, growth, and pigment biosynthesis in microalgae. *Spirulina platensis* exhibits high physiological adaptability to light variation; however, information on growth responses and chlorophyll-a dynamics under different light intensities expressed in lux remains limited. This study aimed to analyze the effects of light intensity on cell density, growth rate, and chlorophyll-a content of *S. platensis*. The experiment was conducted using a completely randomized design with three light intensity treatments (500, 1029, and 2000 lux), each with three replicates. Cultivation was performed for seven days with an initial density of 8,910 cells/mL using Walne medium. Cell density was observed daily, growth rate was calculated during the exponential phase, and chlorophyll-a content was determined spectrophotometrically. The results showed that 2000 lux produced the highest cell density ($29,232 \pm 8,907$ cells/mL), growth rate (0.23 ± 0.05 day⁻¹), and chlorophyll-a content (0.333 ± 0.0085 µg/L). One-way ANOVA ($\alpha = 0.05$) indicated that light intensity significantly affected chlorophyll-a content, with the 2000 lux treatment being significantly different from the other treatments. Regression analysis revealed a strong positive relationship between chlorophyll-a content and specific growth rate ($R^2 = 0.7991$). These results reflect photoacclimation mechanisms, in which increased chlorophyll-a enhances photosynthetic efficiency and growth of *S. platensis*.

Keywords: chlorophyll-a, growth, light intensity, *Spirulina platensis*

*Corresponding author

DOI:10.14710/buloma.v15i1.73449

<http://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma>

Diterima/Received : 21-05-2025

Disetujui/Accepted : 11-02-2026

PENDAHULUAN

Mikroalga merupakan mikroorganisme fotosintetik yang memanfaatkan cahaya sebagai sumber energi utama dalam proses fotosintesis. Variasi intensitas cahaya memengaruhi efisiensi fotosintesis dan kandungan klorofil pada mikroalga dan sianobakteria yang berperan penting dalam menentukan pertumbuhan dan produktivitas biomassa (Sohani *et al.*, 2023). Fotosintesis merupakan proses fundamental pada mikroorganisme fotosintetik, termasuk mikroalga dan sianobakteri, yang mengonversi energi cahaya menjadi energi kimia melalui fiksasi karbon (Mohanty & Mohanty, 2025; Niangoran *et al.*, 2021). Proses ini mencakup metabolisme primer berupa reaksi terang yang menghasilkan pigmen fotosintetik, serta metabolisme sekunder atau reaksi gelap yang berperan dalam pembentukan senyawa bernilai tinggi seperti vitamin, lipid, dan asam amino (Melis *et al.*, 2024; Zuurro *et al.*, 2025). Regulasi cahaya, baik dari segi intensitas maupun kualitas spektrum, berperan penting dalam menentukan efisiensi fotosintesis dan distribusi produk metabolit pada mikroalga (Simkin *et al.*, 2022).

Spirulina platensis merupakan mikroalga dari divisi *cyanophyta* berfilamentous yang banyak dibudidayakan karena efisiensi fotosintesis serta kemampuan adaptasinya terhadap variasi kondisi lingkungan, termasuk cahaya (Lao dan Edullantes, 2025). Sistem pigmen fotosintetik pada *Spirulina platensis* didominasi oleh klorofil-a sebagai pigmen utama, disertai pigmen aksesoris berupa fikobiliprotein seperti fikosianin dan alofikosianin yang berperan penting dalam memperluas spektrum penyerapan Cahaya. Keunggulan *Spirulina platensis* lainnya meliputi laju pertumbuhan yang relatif cepat, toleransi lingkungan yang luas, serta kemudahan kultivasi, sehingga menjadikannya organisme model yang potensial untuk studi fisiologi fotosintesis dan produksi biomassa (Novoveska *et al.*, 2023). Kombinasi karakter fisiologis dan komposisi pigmen tersebut menjadikan *Spirulina platensis* memiliki nilai ekonomi tinggi dan relevan untuk dikembangkan dalam penelitian terkait pengaruh intensitas cahaya terhadap pertumbuhan dan kandungan klorofil (Melis *et al.*, 2024).

Variasi intensitas cahaya memengaruhi respons fisiologis *Spirulina platensis*, termasuk laju pertumbuhan, akumulasi biomassa, dan biosintesis pigmen fotosintetik seperti klorofil-a (Chunzhuk *et al.*, 2023). Studi pengaruh intensitas

cahaya pada *Spirulina platensis* menunjukkan bahwa peningkatan level cahaya dari rendah ke menengah cenderung meningkatkan laju pertumbuhan dan konsentrasi klorofil, meskipun efek spesifik bergantung pada kondisi kultur dan spektrum cahaya yang digunakan (Dianursanti dan Hafidzah, 2021). Klorofil-a berperan sebagai indikator utama aktivitas fotosintesis, sementara pigmen fikobiliprotein berfungsi sebagai pigmen aksesoris yang mencerminkan kemampuan adaptasi terhadap variasi kondisi cahaya (Zuurro *et al.*, 2025). Perubahan konsentrasi dan rasio klorofil-a merefleksikan kondisi fisiologis sel, termasuk tingkat stres cahaya dan efisiensi fotosistem (Rahman *et al.*, 2023).

Pengaruh intensitas cahaya dalam satuan lux telah banyak diteliti pada berbagai mikroalga dan menunjukkan adanya kisaran intensitas optimal bagi pertumbuhan. Prasetyo *et al.* (2022) melaporkan bahwa intensitas cahaya sekitar 2.000–2.500 lux menghasilkan densitas sel dan biomassa tertinggi pada *Chaetoceros calcitrans*, sementara intensitas yang lebih rendah membatasi laju fotosintesis. Masitoh *et al.* (2022) juga menunjukkan bahwa respons pertumbuhan *Chlorella sp.* dan *Dunaliella sp.* berada pada kisaran optimal 1.000–5.000 lux, dengan penurunan pertumbuhan pada intensitas yang terlalu tinggi akibat potensi stres cahaya. Selain itu, Chriswardana *et al.* (2022) menegaskan bahwa intensitas cahaya optimal untuk *Chlorella vulgaris* berada pada rentang 400–800 lux, bergantung pada kondisi kultur dan karakteristik sumber cahaya. Pada *Spirulina platensis*, Indrastuti *et al.* (2014) melaporkan bahwa variasi intensitas cahaya tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pertumbuhan dan kandungan klorofil-a dalam skala laboratorium.

Meskipun pengaruh cahaya terhadap mikroalga telah banyak dilaporkan, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada variasi spektrum cahaya dan faktor nutrisi. Kajian mengenai pengaruh variasi intensitas cahaya terhadap pertumbuhan dan kandungan klorofil-a pada *Spirulina platensis* secara simultan masih terbatas. Umumnya, penelitian terdahulu menitikberatkan pada pengukuran klorofil-a dan kepadatan sel sebagai indikator produktivitas, tanpa mengkaji keterkaitan antara dinamika pigmen, respons pertumbuhan, dan parameter kualitas air secara terpadu. Keterbatasan kajian terpadu tersebut menyebabkan respons fisiologis *Spirulina platensis* terhadap variasi intensitas cahaya belum

sepenuhnya dipahami. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi intensitas cahaya terhadap pertumbuhan dan kandungan klorofil-a *Spirulina platensis* dengan disertai pemantauan parameter kualitas air sebagai dasar ilmiah pengembangan strategi optimasi kultivasi.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) dengan tiga tingkat intensitas cahaya sebagai perlakuan dan tiga ulangan pada setiap perlakuan. Intensitas cahaya yang digunakan dalam penelitian ini adalah 500 lux, 1029 lux, dan 2000 lux, yang merepresentasikan kondisi cahaya rendah, sedang, dan tinggi pada kultivasi *Spirulina platensis*. Pemilihan ketiga tingkat intensitas tersebut didasarkan pada pertimbangan fisiologis dan empiris dari penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa mikroalga masih mampu melakukan fotosintesis dan mempertahankan pertumbuhan pada intensitas cahaya rendah, meskipun dengan laju yang terbatas. Intensitas cahaya menengah-tinggi umumnya merupakan kondisi optimal bagi pertumbuhan mikroalga sebelum terjadinya fotoinhibisi, sedangkan intensitas cahaya yang terlalu tinggi berpotensi menurunkan efisiensi fotosintesis. Oleh karena itu, intensitas 500 lux dipilih sebagai batas bawah untuk merepresentasikan kondisi cahaya rendah adaptif, sedangkan 2000 lux digunakan sebagai batas atas perlakuan untuk merepresentasikan kondisi cahaya tinggi yang masih berada dalam kisaran optimal dan relevan untuk evaluasi respons fisiologis *Spirulina platensis* pada skala laboratorium.

Kondisi Kultivasi Inokulum Mikroalga *Spirulina platensis*

Strain mikroalga *Spirulina platensis* diperoleh dari Balai Besar Perikanan Budidaya Air Payau (BBPBAP) Jepara, Jawa Tengah. Kultivasi *Spirulina platensis* dilakukan menggunakan media walne. Air laut terlebih dahulu disaring dan disterilisasi menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 20 menit untuk menghilangkan mikroorganisme kontaminan. Setelah didinginkan hingga suhu ruang, air laut steril diperkaya dengan larutan stok Walne, kemudian digunakan sebagai media kultur untuk inokulasi *Spirulina platensis*. Media Walne yang digunakan dalam penelitian ini mengandung NaNO_3 , $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Na_2EDTA , $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, H_3BO_3 , ZnCl_2 ,

$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, dan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, serta vitamin berupa thiamine hydrochloride (vitamin B₁) dan cyanocobalamin (vitamin B₁₂). Seluruh komponen tersebut disiapkan dalam bentuk larutan stok dan dicampurkan ke dalam air laut steril sesuai dengan formulasi Walne (1970).

Kultivasi *Spirulina platensis*

Kultivasi *Spirulina platensis* dilakukan dengan menambahkan masing-masing 1 mL pupuk Walne dan 1 mL vitamin B12 ke dalam wadah kultur yang berisi 1 L air laut steril. Selanjutnya, inokulum *Spirulina platensis* sebanyak 100 mL dengan kepadatan awal 8.910 sel/mL dimasukkan ke dalam setiap media kultur. Setiap wadah kultur dilengkapi dengan sistem aerasi untuk memastikan pencampuran media secara homogen serta menjaga ketersediaan oksigen terlarut yang merata selama proses kultivasi.

Pengukuran Kepadatan Sel *Spirulina platensis*

Selama periode kultivasi, pengamatan dilakukan setiap hari dengan cara mengambil sampel *Spirulina platensis* dari media kultur sebanyak 1 mL menggunakan spuit, yang dilakukan setiap 6 jam sekali pada pukul 00.00, 06.00, 12.00, dan 18.00 WIB selama 7 hari. Perhitungan kepadatan *Spirulina platensis* dilakukan sejak awal penebaran inokulan hingga hari ke-7 kultivasi. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan spuit yang berbeda untuk setiap media kultur guna menghindari terjadinya kontaminasi silang. Sampel yang diperoleh selanjutnya diteteskan pada object glass, ditutup dengan cover glass, kemudian diamati di bawah mikroskop dengan perbesaran 40× yang terhubung dengan kamera Optilab. Perhitungan jumlah sel *Spirulina platensis* dilakukan menggunakan hand counter berdasarkan tampilan citra yang ditampilkan pada Optilab. Kepadatan sel kemudian dihitung menggunakan persamaan $N \times 10^4$ sel/mL, dengan N merupakan jumlah sel *Spirulina platensis* yang terhitung di bawah mikroskop (Isnansetyo dan Kurniastuty, 1995).

Perhitungan Laju Pertumbuhan

Setelah didapatkan data kepadatan sel *Spirulina platensis*, selanjutnya laju pertumbuhan dihitung dengan menggunakan persamaan dari (Kandasamy *et al.*, 2021):

$$\text{Laju Pertumbuhan Spesifik, } \mu = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{T_x - T_0}$$

Keterangan: N_0 = Kepadatan awal *S.platensis* (sel/mL); N_t = Kepadatan awal *S.platensis* (sel/mL); T_0 = Awal fase eksponensial (hari); T_x = Akhir fase eksponensial (hari)

Perhitungan Konsentrasi Klorofil-a

Perhitungan nilai konsentrasi klorofil-a dilakukan dengan mengukur nilai absorbansi larutan sampel pada panjang gelombang 663–750 nm, kemudian dihitung menggunakan rumus yang mengacu pada Parsons *et al.*, (1984):

$$\begin{aligned} \text{klorofil a } (\mu\text{g/L}) &= 11,85 \times (A_{664} - A_{750}) - \\ &1,54 \times (A_{647} - A_{750}) - 0,08 \times (A_{630} - \\ &A_{750}) \\ &\times (V_a / (V_s \times d)) \times 1000 \\ k &= V_a V_s \times d \end{aligned}$$

Keterangan: E_{664} = absorbansi 664 – 750 nm; E_{647} = absorbansi 647 – 750 nm; E_{630} = absorbansi 630 – 750 nm; V_a = volume ekstrak aseton 90% (v/v) (mL); V_s volume sampel yang disaring (mL); d = lebar diameter kuvet (1 cm)

Analisis Data

Data penelitian dianalisis menggunakan pendekatan statistik deskriptif dan komparatif. Data kandungan klorofil-a dan laju pertumbuhan spesifik dianalisis menggunakan analisis varians satu arah (one-way ANOVA) pada taraf kepercayaan 95% untuk mengetahui pengaruh variasi intensitas cahaya, kemudian dilanjutkan dengan uji Tukey untuk mengetahui perbedaan antar perlakuan. Hubungan antara kandungan

klorofil-a dan laju pertumbuhan spesifik (μ) dianalisis menggunakan uji korelasi dan regresi. Seluruh data yang diperoleh ditabulasi dan divisualisasikan dalam bentuk grafik menggunakan Microsoft Excel dan perangkat lunak Origin 2025.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data kepadatan sel menunjukkan bahwa *Spirulina platensis* merespons variasi intensitas cahaya secara non-linier, yang merupakan karakteristik umum mikroalga dan sianobakteri di mana peningkatan intensitas cahaya tidak selalu diikuti oleh peningkatan kepadatan sel. Pada akhir periode kultivasi (hari ke-7), kepadatan sel tertinggi dicapai pada intensitas cahaya 2000 lux ($29,232 \pm 8907$ sel/mL), diikuti oleh 500 lux ($28,334 \pm 6459$ sel/mL), sementara kepadatan sel terendah diperoleh pada 1029 lux ($21,294 \pm 11707$ sel/mL). Pola ini mengindikasikan adanya kisaran intensitas cahaya yang paling mendukung aktivitas fotosintesis, serta terjadinya penurunan efisiensi fotosintesis pada intensitas cahaya menengah sebelum sel mampu beradaptasi terhadap intensitas cahaya yang lebih tinggi (Tabel 1).

Selama kultivasi, mikroalga merespons fotosintesis terhadap intensitas cahaya umumnya berlangsung melalui tiga fase, yaitu fase pembatasan cahaya, kejenuhan cahaya, dan fotoinhibisi. Pada fase pembatasan cahaya, laju fotosintesis meningkat seiring bertambahnya intensitas cahaya, sedangkan pada fase kejenuhan cahaya laju fotosintesis mencapai nilai maksimum dan tidak lagi meningkat. Sebaliknya, pada fase fotoinhibisi, intensitas cahaya yang berlebihan

Tabel 1. Kepadatan sel *Spirulina platensis* selama 7 hari kultivasi

Hari Ke	Kepadatan (sel/mL)		
	500 lux	1029 lux	2000 lux
1	12360 ± 4854	9148.33 ± 2351	7562.5 ± 1195
2	14996.7 ± 4865	13988.3 ± 5047	11999.2 ± 3618
3	17517.5 ± 6839	13475 ± 6331	13777.5 ± 6211
4	15546.7 ± 2517	13438.3 ± 3874	14987.5 ± 7718
5	15070 ± 4984	11825 ± 18422	11751.7 ± 3082
6	20808.3 ± 6989	14263.3 ± 6841	19928.3 ± 10354
7	28334.2 ± 6459	21294.2 ± 11707	29232.5 ± 8907

Keterangan: Angka bercetak tebal menunjukkan puncak kepadatan

menyebabkan kerusakan aparatus fotosintetik sehingga menurunkan laju pertumbuhan dan fotosintesis (Esteves *et al.*, 2024).

Pada intensitas cahaya rendah (500 lux), kepadatan sel yang relatif tinggi menunjukkan adanya mekanisme adaptasi fisiologis berupa peningkatan efisiensi penangkapan cahaya melalui regulasi pigmen fotosintetik, sehingga fotosintesis tetap dapat berlangsung secara efektif meskipun energi cahaya terbatas. Menurut Maltsev *et al.* (2021), respons fisiologis mikroalga terhadap cahaya mencakup modifikasi kompleks penangkapan cahaya untuk memaksimalkan absorbansi foton pada intensitas rendah, sehingga efisiensi fotosintesis tetap terjaga meskipun jumlah energi cahaya terbatas. Adaptasi pada berbagai kondisi cahaya mencerminkan kemampuan fotoaklimasi yang berkontribusi terhadap pertumbuhan sel. Studi dari Palikrousis *et al.* (2024), mengevaluasi pertumbuhan *Chlorella sorokiniana* pada intensitas cahaya rendah–menengah, pertumbuhan sel dan kandungan klorofil meningkat, menunjukkan bahwa *C. sorokiniana* mampu memaksimalkan efisiensi fotosintesis di rentang *low light* melalui adaptasi fotosintetik. Penelitian lain mengungkapkan bahwa, pada intensitas cahaya rendah–menengah, *Scenedesmus obliquus* menunjukkan peningkatan densitas sel dan produksi β -karoten, yang menunjukkan aktivitas fotosintesis efisien pada *low light* (Ali *et al.*, 2021).

Pada intensitas menengah seperti 1029 lux, sel berada pada fase transisi di mana aparatus fotosintetik masih melakukan penyesuaian terhadap ketersediaan energi cahaya, sehingga efisiensi fotosintesis belum optimal dan kepadatan sel lebih rendah. Proses adaptasi ini mencakup modifikasi pigmentasi dan struktur fotosistem untuk memaksimalkan penyerapan dan konversi energi cahaya menjadi biomassa, yang pada akhirnya memengaruhi kepadatan populasi sel secara keseluruhan (Pniewski&Piasecka-j, 2020). Menurut Michael *et al.* (2022) penelitian pada *Picochlorum* sp. menunjukkan bahwa mikroalga memerlukan fase adaptasi fisiologis ketika terpapar pada intensitas cahaya yang berbeda, termasuk penyesuaian komposisi pigmen fotosintetik, sehingga pertumbuhan awal dapat berlangsung lebih lambat sebelum sel mencapai efisiensi fotosintesis dan laju pertumbuhan yang optimal. Selain itu, mikroalga dapat memodifikasi proporsi pigmen dan mekanisme photoprotective untuk menyeimbangkan kemampuan menangkap cahaya

dengan kebutuhan fisiologisnya saat intensitas cahaya berubah, yang tercermin dalam perubahan pigmentasi pada fase adaptasi awal pertumbuhan (Abou-sreca *et al.*, 2022). Secara keseluruhan, fotoaklimasi ini membantu menjelaskan mengapa *Spirulina platensis* dalam penelitian ini menunjukkan variasi kohesif dalam kepadatan sel pada intensitas cahaya yang berbeda, dengan fase adaptasi yang mencerminkan perubahan efisiensi fotosintesis sebelum mencapai keadaan fisiologis yang optimal.

Peningkatan kepadatan sel *Spirulina platensis* pada intensitas cahaya tertinggi (2000 lux) menunjukkan bahwa intensitas tersebut masih berada dalam rentang cahaya yang mendukung aktivitas fotosintesis dan pertumbuhan sel. Pada kisaran ini, energi cahaya yang tersedia mampu dimanfaatkan secara efisien untuk mendukung reaksi terang fotosintesis, sehingga meningkatkan laju pembelahan sel dan akumulasi biomassa (Chunzhuk *et al.*, 2023). Penelitian pada *Chlorella vulgaris* menunjukkan bahwa intensitas cahaya yang lebih tinggi mempercepat laju pertumbuhan dan produktivitas biomassa dibanding intensitas yang lebih rendah, namun juga mengubah komposisi pigmen selama fase pertumbuhan. Hal ini menegaskan bahwa intensitas cahaya bukan hanya memengaruhi laju pembelahan sel tetapi juga kondisi fisiologis yang berkaitan dengan pigmen dan metabolit lainnya (Dianursanti dan Hafidzah, 2021). Selain itu, Palikrousis *et al.* (2024) melaporkan bahwa *Chlorella sorokiniana* menunjukkan peningkatan biomassa yang hampir linear seiring peningkatan intensitas cahaya hingga mendekati titik saturasi. *Spirulina platensis* memiliki sistem pigmen fikobiliprotein yang efektif dalam menyerap dan mendistribusikan energi cahaya, sehingga meningkatkan toleransi terhadap intensitas cahaya yang lebih tinggi dibandingkan beberapa mikroalga hijau. Penelitian ini dibatasi pada periode kultivasi selama tujuh hari, sehingga fase stasioner dan fase penurunan pertumbuhan *Spirulina platensis* belum teramati. Dengan demikian, hasil yang diperoleh terutama merepresentasikan respons fisiologis dan pertumbuhan organisme pada fase eksponensial, khususnya dalam kaitannya dengan variasi intensitas cahaya yang diberikan.

Pola dan Laju Pertumbuhan *Spirulina platensis*

Pertumbuhan *Spirulina platensis* mengikuti pola pertumbuhan mikroorganisme seperti pada umumnya yaitu fase adaptasi, fase logaritmik, fase

stasioner, dan fase kematian. Pola pertumbuhan *Spirulina platensis* pada intensitas cahaya berbeda selama 7 hari disajikan dalam bentuk grafik (Gambar 1). Pada hari ke-0 sampai hari ke-4, *Spirulina platensis* memasuki fase adaptasi yang mana merupakan fase penyesuaian *Spirulina platensis* terhadap media kultur (lingkungan). Pertumbuhan pada fase adaptasi tergolong lambat ditandai dengan pertumbuhan yang konstan. Hal ini diduga karena alokasi energi sebagian besar digunakan untuk penyesuaian diri sehingga hanya sebagian kecil energi yang digunakan untuk pertumbuhan. Sebagaimana menurut Fithria *et al.* (2022) keberadaan nutrisi menjadi salah satu faktor yang menyebabkan pertumbuhan *Spirulina platensis* pada fase adaptasi menjadi lambat, dikarenakan konsentrasi nutrisi pada media baru jauh lebih tinggi sehingga *Spirulina platensis* pada fase awal perlu adaptasi. Meskipun intensitas cahaya tetap konstan selama kultivasi, penurunan sementara pertumbuhan pada hari ke-4 - 5 yang diikuti peningkatan pada hari ke-6 dapat dijelaskan sebagai bagian dari proses fotoaklimasi dinamis. Pada fase ini, *Spirulina platensis* melakukan penyesuaian aparatus fotosintetik terhadap kondisi cahaya, yang sementara memengaruhi efisiensi fotosintesis sebelum kembali stabil. Fenomena ini mencerminkan respons fisiologis internal sel terhadap pencahayaan kontinu, bukan akibat perubahan perlakuan eksternal (Masuda *et al.*, 2021; Ritchie dan Air, 2023).

Pertumbuhan pada hari ke 5–7 memasuki fase eksponensial. Fase eksponensial ditandai dengan pertumbuhan *Spirulina platensis* yang relatif cepat. Pada semua intensitas cahaya (500 lux, 1029 lux, dan 2000 lux) mengalami kenaikan pertumbuhan yang signifikan sehingga menandakan kepadatan sel *Spirulina platensis* semakin meningkat. Menurut Widawati *et al.* (2022), bahwa fase eksponensial adalah fase pertumbuhan yang cepat karena aktivitas fotosintesis yang meningkat sehingga menghasilkan biomassa yang tinggi. Cahaya merupakan salah satu sumber energi bagi *Spirulina platensis* untuk melakukan metabolisme.

Laju pertumbuhan merupakan parameter yang menggambarkan kecepatan pertambahan sel mikroalga per satuan waktu. Hasil perhitungan kepadatan sel digunakan sebagai acuan analisa laju pertumbuhan untuk mengetahui lama waktu yang diperlukan *Spirulina platensis* dalam sekali pembelahan (Utomo *et al.*, 2024). Nilai laju pertumbuhan *Spirulina platensis* tertinggi pada

intensitas cahaya sebesar 2000 lux yaitu $0,23 \pm 0,05$ sel/hari, kemudian diikuti oleh perlakuan intensitas cahaya 500 lux yaitu $0,19 \pm 0,08$ dan terendah terdapat pada perlakuan 1029 lux yaitu $0,16 \pm 0,09$ (Gambar 1).

Laju pertumbuhan *Spirulina platensis* menunjukkan respons non-linear terhadap peningkatan intensitas cahaya, di mana pertumbuhan pada 500 lux lebih tinggi dibandingkan 1029 lux, namun mencapai nilai maksimum pada 2000 lux. Pola ini mengindikasikan adanya fase aklimatisasi fotosintetik pada intensitas menengah, di mana sel belum sepenuhnya menyesuaikan kapasitas fotosistem terhadap peningkatan energi cahaya. Pada fase ini, sebagian energi dialokasikan untuk mekanisme fotoproteksi dan penyesuaian pigmen, sehingga menurunkan efisiensi pertumbuhan. Setelah aklimatisasi tercapai pada intensitas 2000 lux, energi cahaya dapat dimanfaatkan secara optimal untuk fotosintesis dan pembentukan biomassa, menghasilkan laju pertumbuhan tertinggi. Fenomena serupa telah dilaporkan pada *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, dan *Scenedesmus obliquus* yang menunjukkan penurunan sementara pertumbuhan pada intensitas cahaya menengah sebelum mencapai kondisi optimal (Battistuzzi *et al.*, 2023; Palupi *et al.*, 2024).

Peningkatan laju pertumbuhan pada intensitas cahaya yang lebih tinggi dapat dijelaskan oleh peningkatan jumlah foton yang tersedia untuk fotosintesis, yang mendukung reaksi terang dan pembentukan ATP serta NADPH untuk fiksasi karbon dan pembelahan sel (Iwasaki *et al.*, 2021). Pola laju pertumbuhan umumnya meningkat seiring dengan peningkatan intensitas cahaya sampai mencapai titik saturasi yang spesies-spesifik. Penelitian terhadap *Chlorella sorokiniana* menunjukkan bahwa intensitas cahaya tinggi ($162 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) meningkatkan produksi biomassa hingga sekitar lima kali lipat dibanding intensitas rendah, yang mencerminkan peningkatan laju pertumbuhan seiring dengan meningkatnya ketersediaan energi cahaya sebelum batas saturasi tercapai (Palikrousis *et al.*, 2024). Selain itu, penelitian pada *Chlorella sp.* dan *Dunaliella sp.* menemukan bahwa intensitas cahaya sebesar 1000 lux menghasilkan densitas sel tertinggi dibanding intensitas yang sangat tinggi (7000 lux), yang menegaskan bahwa hubungan cahaya dengan laju pertumbuhan bersifat non-linier dan sangat tergantung pada toleransi fisiologis tiap spesies

(Masitoh *et al.*, 2022). Menurut Hasim *et al.* (2022), intensitas cahaya yang terlalu tinggi dapat menyebabkan fotoinhibisi dan pemanasan. Fotoinhibisi merupakan terhambatnya proses fotosintesis yang diakibatkan oleh tingginya intensitas cahaya, sehingga pada proses ini terjadi eksitasi cahaya dengan jumlah berlebih yang mampu mengakibatkan kerusakan pada kloroplas. Proses tersebut mampu mengakibatkan laju fotosintesis menurun dan menghambat laju pertumbuhan.

Hasil uji ANOVA pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$) menunjukkan bahwa intensitas cahaya berpengaruh signifikan terhadap laju pertumbuhan spesifik. Perlakuan 2000 lux menghasilkan nilai pertumbuhan tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan 500 lux dan 1029 lux. Sementara itu, tidak terdapat perbedaan signifikan antara perlakuan 500 lux dan 1029 lux. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan intensitas cahaya hingga 2000 lux mampu meningkatkan aktivitas fotosintesis dan pertumbuhan sel secara optimal.

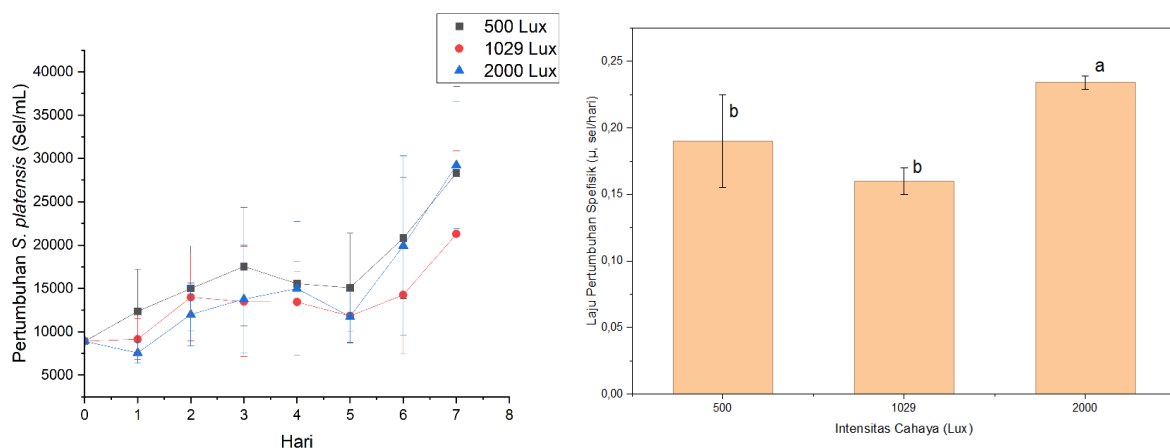
Nilai Parameter Fisika-Kimia

Faktor penting yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga selama kultur adalah faktor lingkungan berupa kualitas air pada media kultur. Parameter kualitas air yang diukur sebagai data pendukung selama penelitian yaitu suhu, salinitas, pH, dan DO (oksigen terlarut). Menurut Silviani *et al.* (2022) menyatakan bahwa parameter lingkungan merupakan faktor pembatas pertumbuhan dan keanekaragaman mikroalga. Kisaran hasil pengukuran parameter fisika kimia selama penelitian dapat dilihat pada (Tabel 2).

Data hasil pengukuran parameter fisika dan kimia menunjukkan bahwa selama kultur kondisi lingkungan berada dalam kondisi optimal. Nilai suhu selama kultur menunjukkan kisaran angka 25 – 28 °C. Menurut Sepriyaningsih dan Harmoko *et al.* (2022) menyatakan bahwa suhu optimum untuk pertumbuhan mikroalga berkisar antara 20 – 30 °C. Nilai suhu mempengaruhi kandungan karbondioksida (CO₂) yang digunakan dalam proses fotosintesis (Shekina *et al.*, 2024). Derajat keasaman (pH)

Tabel 2. Parameter fisika–kimia media kultur *Spirulina platensis* selama 7 hari kultivasi

Parameter	Satuan	Hasil Pengukuran			Kisaran Optimal	Sumber
		Intensitas Cahaya (lux)				
		500	1029	2000		
Fisika						
Suhu	°C	28	26	25	20–30	(Samudra <i>et al.</i> , 2022)
Kimia						
Salinitas	ppt	35,7	32,6	31,4	0-35	(BBPBL, 2007)
pH		7,8	7,8	7,9	7 – 8	(KMNLH, 2004)
DO	mg/L	6,4	6,8	6,6	>5	(KMNLH, 2004)



Gambar 1. Pertumbuhan dan Laju Pertumbuhan Spesifik *Spirulina platensis*. Huruf yang berbeda (a, b) menunjukkan perbedaan yang signifikan antar perlakuan berdasarkan uji ANOVA dan uji lanjut pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$).

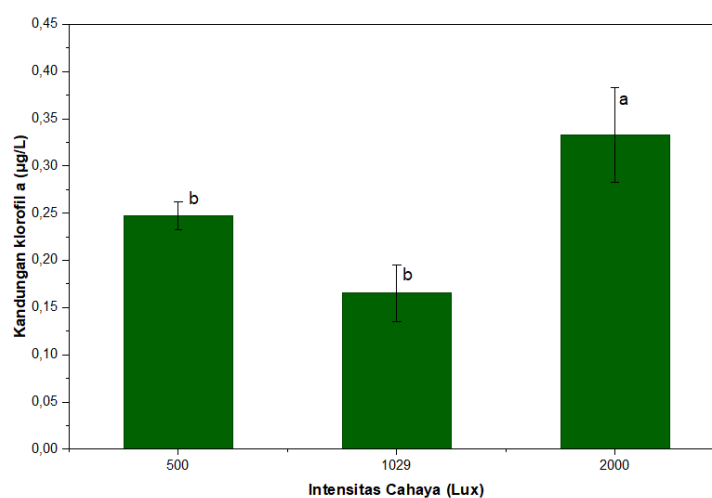
merupakan pembatas kehidupan mikroalga, biota perairan tawar maupun laut sensitif terhadap perubahan pH (Habibie *et al.*, 2025). Nilai pH selama penelitian berkisar antara 7,9 – 7,8 mg/L. Nilai pH optimum yang tergolong produktif bagi pertumbuhan mikroalga adalah 7 – 8 (KMNLH, 2004). Oksigen terlarut dibutuhkan oleh semua jasad hidup untuk pernapasan, proses metabolisme atau pertukaran zat yang kemudian menghasilkan energi untuk pertumbuhan dan pembiakan (Pratiwi *et al.*, 2022). Hasil pengukuran oksigen terlarut (DO) yang terkandung dalam kultur *Spirulina platensis* pada skala laboratorium adalah 6,4 – 6,8 mg/L. Menurut KMNLH (2004) minimal jumlah DO yang dibutuhkan untuk respirasi biota laut adalah 5 mg/L. Nilai salinitas dalam skala laboratorium berkisar antara 31,4 – 35,7 ppt. Nilai tersebut masih dalam kisaran optimal yaitu dalam rentang 0 – 35 ppt (BBPBL, 2007).

Nilai Konsentrasi Pigmen Klorofil *Spirulina platensis*

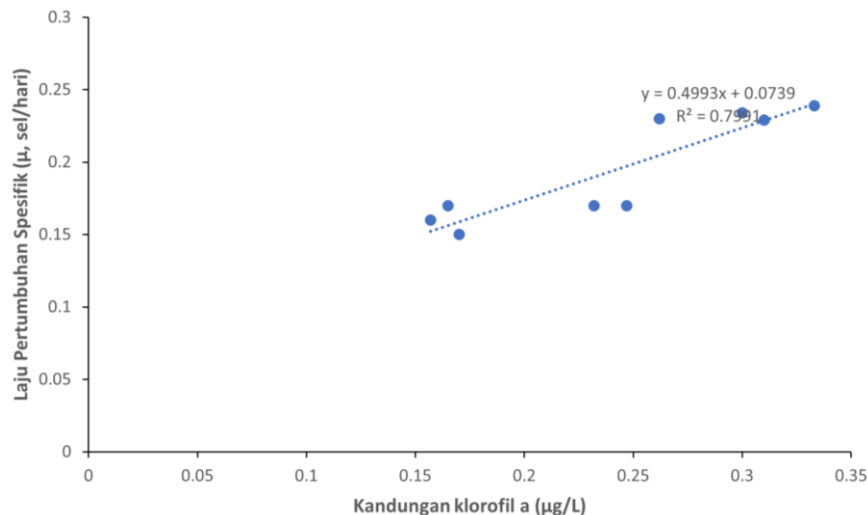
Nilai klorofil-a berkisar antara (0,165–0,333 µg/L) (Gambar 2), pada intensitas cahaya 2000 lux memiliki nilai tertinggi sebesar (0,333 ± 0,0085 µg/L). Berdasarkan hasil pengamatan, nilai konsentrasi klorofil-a tertinggi terdapat pada perlakuan intensitas cahaya sebesar 2000 lux. Hal ini diduga karena peningkatan kadar klorofil-a mikroalga dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang tinggi, sehingga proses foto period dan penyerapan cahaya lebih optimal yang akan meningkatkan proses metabolisme sel dan pembentukan klorofil-

a. Hal ini sesuai dengan pernyataan menurut Rizzi *et al.* (2021) menyatakan bahwa semakin tingginya kadar klorofil akan menyebabkan proses fotosintesis berjalan dengan maksimal sehingga laju pertumbuhan sel *Spirulina platensis* meningkat secara eksponensial yang berakibat pada peningkatan kandungan klorofil-a.

Klorofil-a merupakan pigmen utama yang menentukan keberlangsungan proses fotosintesis dan sebagai respon awal pelepasan oksigen pada saat pembentukan karbohidrat (Dewi *et al.*, 2023). Pada intensitas cahaya 1029 lux, nilai klorofil-a terlihat kurang adaptif dibandingkan dengan kedua perlakuan lain. Nilai konsentrasi klorofil-a yang dihasilkan oleh *Spirulina platensis* pada intensitas cahaya 1029 lux menghasilkan nilai yang paling rendah (0,165 ± 0,058 µg/L). Rendahnya konsentrasi klorofil-a pada intensitas 1029 lux diduga berkaitan dengan kondisi transisi adaptasi fisiologis sel terhadap perubahan intensitas cahaya, sehingga proses sintesis pigmen belum berlangsung secara optimal. Pada fase ini, energi cahaya yang diterima belum sepenuhnya dimanfaatkan secara efisien untuk fotosintesis. Sebaliknya, pada intensitas 2000 lux, *Spirulina platensis* telah menunjukkan kemampuan fotoaklimatisasi yang lebih baik, sehingga mampu mengoptimalkan penyerapan energi cahaya dan meningkatkan produksi klorofil-a. Hal ini diperkuat oleh Efendi (2018) yang menyatakan bahwa kelebihan energi cahaya dapat memicu eksitasi berlebih pada pigmen fotosintetik, yang berpotensi menyebabkan stres cahaya. Namun,



Gambar 2. Kandungan klorofil-a *Spirulina platensis* pada berbagai intensitas cahaya. Huruf yang berbeda di atas batang menunjukkan perbedaan nyata antar perlakuan berdasarkan uji ANOVA dan uji lanjut Tukey pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$).



Gambar 3. Hubungan antara kandungan klorofil-a (μg/L) dengan laju pertumbuhan spesifik (μ/hari).

mikroalga yang telah beradaptasi dengan intensitas tinggi mampu mengaktifkan mekanisme perlindungan dan penyesuaian fisiologis, sehingga tetap mempertahankan fungsi kloroplas dan aktivitas fotosintesis.

Peningkatan klorofil-a dikaitkan dengan optimalisasi fungsi fotosistem dan peningkatan efisiensi penyerapan cahaya. Namun, pada intensitas cahaya di atas ambang optimal, terjadi penurunan pigmen akibat stres cahaya dan fotoinhibisi (Hotos&Antoniadis, 2022). Perbedaan intensitas cahaya optimal antar spesies, seperti *Nannochloropsis* sp. (4500 lux) dan *Chlorella vulgaris* (359 lux), menunjukkan bahwa respons klorofil-a terhadap cahaya bersifat spesifik spesies dan berkaitan erat dengan mekanisme fotoaklimatisasi serta kapasitas fotoproteksi sel. Temuan ini memperkuat hasil penelitian ini, di mana *Spirulina platensis* menunjukkan kandungan klorofil-a optimal pada intensitas sebesar 2000 lux (Fakhri *et al.*, 2017).

Chlorella vulgaris mencapai kandungan klorofil-a tertinggi sebesar $1,12 \pm 0,06 \text{ mg L}^{-1}$ pada intensitas cahaya rendah (350 lux), yang mencerminkan strategi adaptasi untuk memaksimalkan penyerapan energi pada kondisi cahaya terbatas (Putri *et al.*, 2022). Pada *Dunaliella salina*, klorofil-a maksimum tercapai pada intensitas menengah–tinggi (8000 lux) dengan nilai $0,67 \pm 0,03 \text{ mg L}^{-1}$, sebelum mengalami penurunan pada intensitas cahaya yang lebih tinggi akibat stres cahaya dan peningkatan pembentukan *reactive oxygen species* (Singh *et al.*,

2024). Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian ini, di mana *Spirulina platensis* menunjukkan kandungan klorofil-a tertinggi sebesar $0,333 \pm 0,0085 \text{ mg m}^{-3}$ pada intensitas cahaya menengah (2000 lux), yang mengindikasikan bahwa kondisi tersebut berada pada rentang cahaya optimal untuk sintesis pigmen dan aktivitas fotosintesis. Hal ini menunjukkan bahwa regulasi klorofil-a sangat bergantung pada strategi fotoaklimatisasi dan toleransi cahaya masing-masing mikroalga.

Hasil uji ANOVA ($\alpha = 0,05$) menunjukkan bahwa intensitas cahaya berpengaruh signifikan terhadap kandungan klorofil-a. Perlakuan 2000 lux menghasilkan nilai tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan 500 lux dan 1029 lux, sedangkan kedua perlakuan tersebut tidak berbeda signifikan satu sama lain (Gambar 2). Pola ini menunjukkan adanya mekanisme fotoaklimatisasi, di mana *Spirulina platensis* menyesuaikan sistem fotosintetiknya terhadap kondisi cahaya. Pada intensitas cahaya tinggi, sel meningkatkan sintesis klorofil-a untuk mengoptimalkan penyerapan energi cahaya dan efisiensi fotosintesis, sedangkan pada intensitas rendah hingga menengah, mikroalga cenderung mengoptimalkan peran pigmen aksesoris seperti fikobiliprotein sebagai bentuk adaptasi terhadap keterbatasan cahaya.

Gambar 3 menunjukkan adanya hubungan positif yang kuat antara kandungan klorofil-a dan laju pertumbuhan spesifik (μ) pada *Spirulina platensis* (Gambar 3). Peningkatan kandungan klorofil-a diikuti oleh peningkatan laju

pertumbuhan, yang menunjukkan bahwa klorofil-a berperan penting dalam mendukung aktivitas fotosintesis dan akumulasi biomassa. Nilai koefisien determinasi ($R^2 = 0,7991$) mengindikasikan bahwa hubungan antara kedua variabel tergolong kuat, di mana sekitar 79,91% variasi laju pertumbuhan dapat dijelaskan oleh perubahan kandungan klorofil-a. Hal ini menunjukkan bahwa klorofil-a merupakan faktor fisiologis utama yang memengaruhi pertumbuhan sel. Hubungan yang kuat ini mencerminkan kemampuan sel dalam memanfaatkan energi cahaya secara efektif melalui peningkatan pigmen fotosintetik, sehingga mendukung proses pembelahan sel dan produktivitas biomassa. Dengan demikian, kandungan klorofil-a dapat digunakan sebagai indikator penting dalam mengevaluasi performa pertumbuhan *Spirulina platensis* pada berbagai kondisi kultivasi.

KESIMPULAN

Pertumbuhan, laju pertumbuhan spesifik, dan kandungan klorofil-a *Spirulina platensis* tertinggi diperoleh pada intensitas cahaya 2000 lux, dengan kepadatan sel $29.232,5 \pm 8.907$ sel/mL, laju pertumbuhan spesifik $0,234 \pm 0,005$ hari⁻¹, dan klorofil-a $0,333 \pm 0,085$ µg/L. Hasil uji ANOVA ($\alpha = 0,05$) menunjukkan bahwa intensitas cahaya berpengaruh signifikan terhadap laju pertumbuhan dan kandungan klorofil-a, di mana perlakuan 2000 lux berbeda nyata dibandingkan 500 lux dan 1029 lux. Analisis korelasi dan regresi menunjukkan hubungan positif yang kuat antara klorofil-a dan laju pertumbuhan spesifik, yang menandakan peran penting fotosintesis dalam meningkatkan pertumbuhan sel. Penelitian selanjutnya disarankan mengkaji kombinasi intensitas cahaya dengan variasi *photoperiod*, serta menganalisis pigmen tambahan seperti fikosianin dan karotenoid. Selain itu, pengaruh faktor lingkungan seperti suhu, pH, dan CO₂ perlu dievaluasi untuk mengoptimalkan kultivasi secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abou-sreya, A.I.B., Roby, M.H.H., Mahdy, H.A.A., Abdou, N.M., El-tahan, A.M., El-saadony, M.T., El-tarabily, K.A., & El-saadony, F.M.A. 2022. Biochemical parameters of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) grown under different salinity levels using potassium silicate and Aloe saponaria extract. *Plants*, 11(4): 1–20. doi: 10.3390/plants11040497
- Ali, H.E.A., El-fayoumy, E.A., Rasmy, W.E., Soliman, R.M., & Abdullah, M.A. 2021. Two-stage cultivation of *Chlorella vulgaris* using light and salt stress conditions for simultaneous production of lipid, carotenoids, and antioxidants. *Journal of Applied Phycology*, 33(1): 227–239. doi: 10.1007/s10811-020-02308-9
- Balai Besar Pengembangan Budidaya Laut. 2007. Budidaya fitoplankton & zooplankton. Balai Besar Pengembangan Budidaya Laut, Lampung.
- Battistuzzi, M., Cocola, L., Liistro, E., Claudi, R., Poletto, L., & Rocca, N.La. 2023. Growth and photosynthetic efficiency of microalgae and plants with different levels of complexity exposed to a simulated M-dwarf starlight. *Life*, 13(8): 1641. doi: 10.3390/life13081641
- Chriswardana, M., Hadiyanto, H., & Pratiwi, W.Z. 2022. Optimization of light intensity and color temperature in the cultivation of *Chlorella vulgaris* culture using the surface response method. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 1(2): 33–41. doi: 10.14710/jbes.2022.14410
- Chunzhuk, E.A., Grigorenko, A.V., Chernova, N.I., Kiseleva, S.V., Ryndin, K.G., Popel, O.S., Malaniy, S.Y., Slavkina, O.V., de Farias Neves, F., Leng, L., Kumar, V., & Vlaskin, M.S. 2023. Direct study of CO₂ capture efficiency during Microalgae *Arthrospira platensis* cultivation at high CO₂ concentrations. *Energies*, 16(2): 1–15. doi: 10.3390/en16020822
- Dewi, R. 2023. Eksplorasi konsentrasi klorofil (a, b) dan karotenoid mikroalga *Tetraselmis chuii* pada intensitas cahaya yang berbeda. *Prosiding Seminar Nasional LPPM Unsoed*, 12: 6–12.
- Dianursanti, & Hafidzah, M.A. 2021. The enhancement of phycocyanin yield and purity from *Spirulina platensis* using freeze-thawing method on various solvents. *AIP Conference Proceedings*, 2344(1): 020015. doi: 10.1063/5.0047581
- Efendi, N. 2018. Pengaruh pemberian berbagai jenis kompos dan dosis NPK mutiara 16:16:16 terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kacang panjang (*Vigna sinensis* L.). Disertasi. Universitas Islam Riau.

- Habibie, S.A., Kadim, M.K., & Sahami, F.M. 2025. Pollution level of the downstream area of Paguyaman River, Gorontalo, Indonesia: A study based on the microalgae distribution and saprobic index. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 24(2): 200–209. doi: 10.14710/jkli.68083
- Masitoh, E.H.M., Widigdo, B., & Pratiwi, N.T.M. 2022. Growth of *Chlorella* sp. and *Dunaliella* sp. at different light intensities. *Habitus Aquatica*, 3(1): 35–45. doi: 10.29244/haj.3.1.35
- Esteves, A.F., Gonçalves, A.L., Vilar, V.J., & Pires, J.C. 2024. Comparative assessment of microalgal growth kinetic models based on light intensity and biomass concentration. *Bioresource Technology*, 394: 130167. doi: 10.1016/j.biortech.2023.130167
- Fakhri, M., Arifin, N.B., Hariati, A.M., & Yuniarti, A. 2017. Growth, biomass, and chlorophyll-a and carotenoid content of *Nannochloropsis* sp. strain BJ17 under different light intensities. *Indonesian Journal of Aquaculture*, 16(1): 15–21. doi: 10.19027/jai.16.1.15-21
- Fithria, R.F., Aryono, B., & Zainuddin, M. 2022. Pengaruh intensitas pencahayaan yang berbeda pada kultur *Spirulina platensis* terhadap kandungan protein, kadar pigmen dan aktivitas antioksidan. *Journal of Marine Research*, 11(4): 818–828. doi: 10.14710/jmr.v11i4.36432
- Hasim, H., Akram, M., & Koniyo, Y. 2022. Kinerja kepadatan *Spirulina* sp. yang diberi salinitas berbeda pada media kultur Walne. *Jurnal Sumberdaya Akuatik Indopasifik*, 6(2): 141–152. doi: 10.46252/jsai-fpik-unipa.2022.Vol.6.No.2.234
- Hotos, G.N., & Antoniadis, T.I. 2022. The effect of colored and white light on growth and phycobiliproteins, chlorophyll and carotenoids content of marine cyanobacteria *Phormidium* sp. and *Cyanothece* sp. in batch cultures. *Life*, 12(6): 837. doi: 10.3390/life12060837
- Indrastuti, C., Sulardiono, B., & Muskananfolo, M.R. 2014. Kajian intensitas cahaya yang berbeda terhadap konsentrasi klorofil-a pada pertumbuhan mikroalga *Spirulina platensis* dalam skala laboratorium. *Management of Aquatic Resources Journal*, 3(4): 169–174. doi: 10.14710/marj.v3i4.7095
- Isnansetyo, A., & Kurniastuty. 1995. Teknik kultur phytoplankton dan zooplankton. Kanisius, Yogyakarta.
- Iwasaki, K., Evenhuis, C., Tamburic, B., Kuzhiumparambil, U., O'Connor, W., Ralph, P., & Szabó, M. 2021. Improving light and CO₂ availability to enhance the growth rate of the diatom *Chaetoceros muelleri*. *Algal Research*, 55: 102234. doi: 10.1016/j.algal.2021.102234
- Kandasamy, L.C., Neves, M.A., Demura, M., & Nakajima, M. 2021. The effects of total dissolved carbon dioxide on the growth rate, biochemical composition, and biomass productivity of nonaxenic microalgal polyculture. *Sustainability*, 13(4): 2267. doi: 10.3390/su13042267
- KMNLH. 2004. Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004 tentang baku mutu air laut. Menteri Negara Lingkungan Hidup, Jakarta.
- Lao, I.K.M., & Edullantes, B. 2025. Growth, productivity, and size structure of *Spirulina* strain under different salinity levels: implications for cultivation optimization. *Phycology*, 5(3): 1–16. doi: 10.3390/phycology5030031
- Maltsev, Y., Maltseva, K., Kulikovskiy, M., & Maltseva, S. 2021. Influence of light conditions on microalgae growth and content of lipids, carotenoids, and fatty acid composition. *Biology*, 10(10): 1060. doi: 10.3390/biology10101060
- Masuda, Y., Yamanaka, Y., Smith, S.L., Hirata, T., Nakano, H., Oka, A., & Sumata, H. 2021. Distribution of global subsurface chlorophyll maxima in the ocean. *Communications Earth & Environment*, 2: 1–8. doi: 10.1038/s43247-021-00201-y
- Melis, A., Alberto, D., Martinez, H., & Betterle, N. 2024. Perspectives of cyanobacterial cell factories. *Photosynthesis Research*, 162(2): 459–471. doi: 10.1007/s11120-023-01056-4
- Michael, G., Glemser, M., Haack, M., Lorenzen, J., Mehlmer, N., Fuchs, T., Schenk, G., Garbe, D., Weuster-botz, D., & Llewellyn, C.A. 2022. Efficient green light acclimation of the green algae *Picochlorum* sp. triggering geranylgeranylated chlorophylls. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10: 885977. doi: 10.3389/fbioe.2022.885977
- Mohanty, S.S., & Mohanty, K. 2025. Insights into azithromycin biodegradation by freshwater microalgae *Chlorella thermophila*: assessing removal kinetics and co-metabolic activity. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 100769. doi: 10.1016/j.hazadv.2025.100769

- Novoveská, L., Nielsen, S.L., Eroldoğan, O.T., Haznedaroglu, B.Z., Rinkevich, B., Fazi, S., Robbins, J., Vasquez, M., & Einarsson, H. 2023. Overview and challenges of large-scale cultivation of photosynthetic microalgae and cyanobacteria. *Marine Drugs*, 21(8): 445. doi: 10.3390/md21080445
- Niangoran, N.G.U.F., Buso, D., Zissis, G., & Prudhomme, T. 2021. Influence of light intensity and photoperiod on energy efficiency of biomass and pigment production of *Spirulina* (*Arthrospira platensis*). *OCL Oilseeds and Fats Crops and Lipids*, 28: 37. doi: 10.1051/ocl/2021025
- Palikrousis, T.L., Manolis, C., Kalamaras, S.D., & Samaras, P. 2024. Effect of light intensity on the growth and nutrient uptake of the microalga *Chlorella sorokiniana* cultivated in biogas plant digestate. *Water*, 16(19): 2782. doi: 10.3390/w16192782
- Palupi, B., Maharani, R.G.P., Wardani, S.B.K., Rizkiana, M.F., Amini, H.W., Fachri, B.A., Rahmawati, I., Muharja, M., & Indrayani, L. 2024. Pengaruh intensitas cahaya dan nutrisi terhadap laju pertumbuhan *Ulva* sp. *Jurnal Teknologi*, 11(2): 128–141.
- Pniewski, F., & Piasecka-J., I. 2020. Photoacclimation to constant and changing light conditions in a benthic diatom. *Frontiers in Marine Science*, 7(5): 1–12. doi: 10.3389/fmars. 2020.00381
- Pratiwi, C.Z., Mawardi, I., & Nugroho, F.A. 2022. Rancang bangun microbubble generator (MbG) untuk meningkatkan oksigen terlarut (DO) pada budidaya perikanan. *Chanos Chanos*, 20(1): 45–50. doi: 10.15578/chanos.v20i1.11160
- Prasetyo, L.D., Supriyanti, E., & Sedjati, S. 2022. Pertumbuhan mikroalga *Chaetoceros calcitrans* pada kultivasi dengan intensitas cahaya berbeda. *Buletin Oseanografi Marina*, 11(1): 59–70. doi: 10.14710/buloma.v11i1.31698
- Parsons, T.R., Maita, Y., & Lalli, C.M. 1984. A manual of chemical & biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford.
- Putri, R.D., Pradana, Y.S., Koerniawan, M.D., Suwanti, L.T., Siregar, U.J., Budiman, A., & Suyono, E.A. 2022. Effect of distinct nitrate concentrations on pigment content of mixed culture of *Chlorella vulgaris* and *Dunaliella* sp. *Asia-Pacific Journal of Molecular Biology and Biotechnology*, 30: 15–23.
- Rahman, M., Asaeda, T., Abeynayaka, H.D.L., & Fukahori, K. 2023. Assessment of the effects of light intensities and temperature changes on cyanobacteria's oxidative stress via hydrogen peroxide as an indicator. *Water*, 15(13): 2429. doi: 10.3390/w15132429
- Ritchie, R.J., & Sma-Air, S. 2023. Microalgae grown under different light sources. *Journal of Applied Phycology*, 35(2): 551–566. doi: 10.1007/s10811-023-02917-0
- Rizzi, V., Gubitosa, J., Fini, P., Fraix, A., Sortino, S., Agostiano, A., & Cosma, P. 2021. Development of *Spirulina* sea-weed raw extract/polyamidoamine hydrogel system as novel platform in photodynamic therapy: photostability and photoactivity of chlorophyll-a. *Materials Science and Engineering C*, 119: 111593. doi: 10.1016/j.msec.2020.111593
- Samudra, S. R., Fitriadi, R., Baedowi, M., & Sari, L. K. (2022). Pollution Level of Banjaran River, Banyumas District, Indonesia: A Study Based on the Saprobic Index of Periphytic Microalgae. *Biodiversitas*, 23(3), 1527–1534. doi: 10.13057/biodiv/d230342.
- Sepriyaningsih, S., & Harmoko, H. 2022. Keanekaragaman mikroalga Charophyta di Sungai Mesat Kecamatan Lubuklinggau Timur I Kota Lubuklinggau. *Nusantara Hasana Journal*, 2(2): 215–224.
- Shekina, P.N., Ramadhani, N.I., Putri, N.D., Kurniati, S.A., & Agustin, C.E. 2024. Pengaruh kualitas air terhadap keanekaragaman plankton di Bozem: analisis parameter fisik, kimia, dan biologi ekosistem perairan. *Algoritma: Jurnal Matematika, Ilmu Pengetahuan Alam, Kebumihan dan Angkasa*, 2(6): 1–9. doi: 10.62383/ algoritma.v2i6.256
- Simkin, A.J., Kapoor, L., Priya, C.G., Tanja, D., & Tracy, A.H. 2022. The role of photosynthesis-related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. *Photosynthesis Research*, 152(1): 23–42. doi: 10.1007/s11120-021-00892-6
- Singh, R.P., Yadav, P., Sharma, H., Kumar, A., Hashem, A., Abd_Allah, E.F., & Gupta, R.K. 2024. Unlocking the adaptation mechanisms of the oleaginous microalga *Scenedesmus* sp. BHU1 under elevated salt stress. *Frontiers in Microbiology*, 15: 1–27. doi: 10.3389/fmicb.2024.1475410
- Silviani, O., Karyadi, B., Sipriyadi, S., Jumiarni, D., & Singkam, A.R. 2022. Studi

- keanekaragaman mikroalga di sungai dan danau Bengkulu sebagai bioindikator perairan. *Jurnal Biosilampari*, 4(2): 127–138. doi: 10.31540/biosilampari.v4i2.1614
- Sohani, E., Pajoum Shariati, F., & Pajoum Shariati, S.R. 2023. Assessment of various colored lights on the growth pattern and secondary metabolites synthesis in *Spirulina platensis*. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 53(4): 412–423. doi: 10.1080/10826068.2022.2098320
- Utomo, W.L.P., Santoso, G.W., & Ridlo, A. 2024. Pengaruh penambahan mikroalga (*Spirulina platensis*) pada edible coating kitosan untuk meningkatkan daya simpan udang (*Penaeus vannamei*). *Journal of Marine Research*, 13(3): 407–418. doi: 10.14710/jmr.v13i3.41758
- Widawati, D., Santosa, G.W., & Yudiati, E. 2022. Pengaruh pertumbuhan *Spirulina platensis* terhadap kandungan pigmen beda salinitas. *Journal of Marine Research*, 11(1): 61–70. doi: 10.14710/jmr.v11i1.30096
- Walne, P.R. 1970. Studies on the food value of nineteen genera of algae to juvenile bivalves. The Whitefriars Press Ltd., London & Tonbridge.
- Zuorro, A., Lavecchia, R., Moncada-Jacome, K.A., García-Martínez, J.B., & Barajas-Solano, A.F. 2025. Light-driven optimization of exopolysaccharide and indole-3-acetic acid production in thermotolerant cyanobacteria. *Sci*, 7(3): 108. doi: 10.3390/sci7030108