

PENINGKATAN BIOMASSA *Nannochloropsis oculata* MELALUI OPTIMASI KULTUR PADA SKALA LABORATORIUM

BIOMASS ENHANCEMENT OF *Nannochloropsis oculata* THROUGH CULTURE OPTIMIZATION AT LABORATORY SCALE

Maestro Munru^{1*}, Yola Wulandari¹, Herni Iman Sari¹, Novita nanda syafitri², Alfiqu Maulana³, Trifajriyah Lutea Ayu⁴

¹Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University Bogor.

²Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia.

³Dinas Perikanan Kabupaten Kaur, Bengkulu, Indonesia.

⁴ Magister Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

*email penulis korespondensi: maestromunru@gmail.com

Abstrak

Nannochloropsis oculata merupakan mikroalga serbaguna, memiliki potensi sangat besar di bidang akuakultur. Namun potensi ini menimbulkan tantangan baru dalam meningkatkan biomassa secara efektif. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui teknik kultur *Nannochloropsis Oculata* skala laboratorium serta melihat fase pertumbuhan dan perkembangannya. Kultur dimulai dari 200 ml, 1 L, 15 L, hingga 40 L, dengan masing-masing tiga kali ulangan, diamati dan didokumentasikan dengan cermat. Pengamatan harian dilakukan sejak hari pertama kultur sampai dengan hari ke-40, dengan menggunakan *haemocytometer* pada mikroskop binokuler dengan perbesaran 400. Kultur volume 200 ml dan 1 L, *Nannochloropsis oculata* menunjukkan fase *lag* singkat (1-2 hari) diikuti peningkatan biomassa yang signifikan hingga 11 juta sel/ml pada fase eksponensial (hari ke-3 hingga ke-5). Kondisi terkontrol dan stabil pada volume kecil mendukung adaptasi sel dan replikasi optimal. Sebaliknya, kultur volume 15 L menunjukkan fase *lag* yang lebih lama, mengindikasikan sensitivitas terhadap perubahan lingkungan. Anomali paling signifikan terjadi pada kultur 40 L, di mana penurunan biomassa drastis terjadi setelah hari kedua hingga hari ketiga, menandakan kegagalan kultur. Analisis mikroskopis mengkonfirmasi kontaminasi protozoa sebagai agen etiologi, yang diasumsikan berasal dari lingkungan sekitar karena paparan media kultur. Laju pertumbuhan *Nannochloropsis* hanya terdapat fase adaptasi, fase eksponensial, dan fase kematian. Kultur *Nannochloropsis oculata* memiliki dinamika pertumbuhan yang berbeda pada setiap volumenya, yang dipengaruhi oleh intensitas cahaya, ketersediaan nutrisi makro dan mikro yang seimbang, kualitas bibit, kepadatan awal tebar, dan media kultur yang bebas dari kontaminasi.

Kata Kunci: Biomassa, Kultur, Nannochloropsis oculata.

Abstract

Nannochloropsis oculata is a versatile microalga with enormous potential in aquaculture. However, this potential poses new challenges in effectively increasing biomass. This study aims to determine laboratory-scale culture techniques for *Nannochloropsis oculata* and observe its growth and development phases. Culture started from 200 ml, 1 L, 15 L, to 40 L, and three replicates were carefully observed and documented. Daily observations were conducted from the first day of culture to the 40th day, using a haemocytometer on a binocular microscope with 400x magnification. In the 200 ml and 1 L cultures, *Nannochloropsis oculata* showed a short lag phase (1-2 days) followed by a significant increase in biomass to 11 million cells/ml in the exponential phase (days 3 to 5). Controlled and stable conditions in small volumes supported cell adaptation and optimal replication. In contrast, the 15 L culture showed a more extended lag phase, indicating sensitivity to environmental changes. The most significant anomaly occurred in the 40 L culture, where a drastic decrease in biomass occurred after the second to third day, indicating culture failure. Microscopic analysis confirmed protozoan contamination as the etiological agent, which was assumed to originate from the surrounding environment due to exposure to the culture medium. The growth rate of *Nannochloropsis* only had an adaptation phase, an exponential phase, and a death phase. *Nannochloropsis oculata* cultures exhibit different growth dynamics at each volume, influenced by light intensity, balanced availability of macro and micronutrients, seed quality, initial stocking density, and culture media free from contamination.

Keywords: Biomass, Culture, Nannochloropsis oculata.

PENDAHULUAN

Nannochloropsis Oculata adalah salah satu jenis fitoplankton yang biasa dimanfaatkan sebagai pakan alami untuk kegiatan akuakultur, karena memiliki kandungan nutrisi yang baik (Sinaga *et al.*, 2021). Fitoplankton ini dapat tumbuh dengan kepadatan sel yang tinggi hingga menghasilkan konten lipid mencapai 56% dengan kandungan protein sebesar 52%, karbohidrat 16%, dan lemak 27% (Kang *et al.*, 2016; Zanella & Vianello, 2020; Safia *et al.*, 2023).

Nannochloropsis oculata tidak hanya bermanfaat sebagai sumber pakan alami yang berkualitas, tetapi memiliki potensi sebagai bahan baku untuk bioproduk kelautan lain seperti biofertilizer, biofuels, bahan kosmetik, biofarmaka, hingga bioenergi, yang menjadikannya salah satu komoditas mikroalga multifungsi dalam bioteknologi kelautan modern (Liu *et al.*, 2024; Ezenweani & Kadiri, 2024).

Perbandingan kultur skala laboratorium dan skala menengah penting dilakukan untuk mengevaluasi konsistensi pola pertumbuhan dan produktivitas mikroalga saat ditingkatkan dari kondisi terkontrol ke kondisi yang lebih mendekati aplikasi industri. Skala laboratorium memungkinkan pengendalian yang presisi terhadap faktor lingkungan. Di sisi lain, skala menengah menghadirkan tantangan nyata seperti fluktuasi suhu, cahaya, dan pH, risiko kontaminasi yang lebih tinggi, kesulitan dalam menjaga homogenitas nutrisi, serta biaya operasional dan pemeliharaan yang lebih tinggi. Kompleksitas ini seringkali mengurangi efisiensi produksi dan menimbulkan ketidakpastian dalam hasil, sehingga penelitian ini sangat penting untuk mengidentifikasi parameter kunci, mengoptimalkan teknik manajemen, dan memastikan bahwa metode yang terbukti efektif di laboratorium tetap dapat diterapkan secara berkelanjutan pada skala produksi yang lebih besar.

Potensi yang besar dari *Nannochloropsis oculata* ini mendorong inovasi dalam menghasilkan strategi yang paling efektif untuk optimasi peningkatan biomasanya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui teknik kultur fitoplankton *N. oculata* skala laboratorium serta untuk mengetahui fase-fase pertumbuhan dan perkembangannya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu berbagai keperluan pendidikan dan inovasi dalam memaksimalkan potensi *N. oculata*.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus sampai Oktober 2019 di Laboratorium Perikanan, Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu.

Penelitian ini menggunakan metode *Batch culture*, dengan menumbuhkan inokulum sampai mencapai fase stasioner pada setiap volume kulturnya, kemudian inokulum tersebut dilanjutkan ke volume kultur berikutnya.

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari berbagai alat laboratorium dan lapangan yang menunjang proses kultur *Nannochloropsis oculata*. Pengamatan dan penghitungan sel dilakukan menggunakan *haemocytometer* yang dilengkapi kaca penutup preparat, pipet tetes untuk pengambilan sampel, mikroskop, dan *hand counter* sebagai alat bantu hitung. Proses sterilisasi alat dilakukan menggunakan autoklaf dan kompor gas, dengan bantuan wadah perebusan dan penjepit tabung reaksi.

Penimbangan bahan dilakukan menggunakan timbangan analitik, sedangkan pengukuran volume menggunakan gelas ukur. Kultur dilakukan di dalam erlenmeyer, akuarium, dan gentong yang digunakan sebagai wadah utama air laut yang telah disaring. Sistem aerasi didukung oleh aerator, selang penghubung, dan meja sebagai tempat alat aerator. Pencahayaan untuk mendukung fotosintesis disediakan oleh lampu. Selain itu, digunakan juga corong untuk menuang larutan, spatula untuk mengambil sampel padat, kulkas untuk penyimpanan sementara bibit, derigen untuk pengambilan air laut, serta alat tulis kantor (ATK) untuk pencatatan data.

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam kultur ini meliputi bibit *Nannochloropsis oculata* sebagai inokulum awal, air laut sebagai media kultur, dan pupuk Conway untuk mendukung pertumbuhan mikroalga. Untuk menjaga sterilisasi dan kebersihan, digunakan larutan Prostek sebagai perendam alat sebelum sterilisasi, alkohol 70% untuk desinfeksi alat setelah digunakan, serta air tawar untuk pembilasan guna menurunkan kadar garam. Aluminium foil digunakan untuk membungkus alat sebelum proses autoklaf, sedangkan tisu berfungsi untuk membersihkan *haemocytometer* sebelum dan sesudah digunakan.

Sterilisasi Alat penelitian

Sterilisasi peralatan kultur dilakukan untuk mencegah kontaminasi dari virus, bakteri, dan mikroorganisme lain yang dapat mengganggu pertumbuhan *Nannochloropsis oculata*. Peralatan berbahan kaca, seperti erlenmeyer, terlebih dahulu direndam dalam larutan Prostek selama 24 jam, kemudian dicuci dan disikat menggunakan detergen, dibilas dengan air tawar, dan dikeringkan. Peralatan yang sudah kering kemudian ditutup rapat

menggunakan aluminium foil sebelum disusun dalam autoklaf.

Proses sterilisasi dilakukan pada suhu 121 °C dan tekanan 1 atm selama 15 menit, sebelumnya direbus selama 15 menit di air mendidih. Peralatan seperti akuarium dicuci dan disikat menggunakan detergen, dibilas dengan air tawar, dan selanjutnya disemprotkan dengan alkohol 70%. Sterilisasi yang tepat dilakukan untuk menjamin validitas data yang dihasilkan, serta memastikan pemberian pupuk dalam kultur semi-massal sesuai dengan takaran yang dianjurkan.

Prosedur Kerja

Prosedur kultur *Nannochloropsis oculata* dalam penelitian ini dilakukan secara bertahap dengan skala volume berbeda. Kultur awal dilakukan pada volume 200 mL menggunakan air laut sebagai media dan inokulum *N. oculata* sebanyak 10 mL, kemudian ditambahkan pupuk Conway sebanyak 0,2 mL. Kultur dilanjutkan pada volume 1 L dengan 800 mL media air laut dan inokulum hasil dari kultur 200 mL dengan kepadatan awal 4.100.000 sel/mL, serta penambahan pupuk Conway 1 mL sesuai rasio 1:1000 (v/v). Kultur skala 15 L dilakukan dengan mencampurkan 3 L bibit hasil dari kultur 1 L dengan 12 L air laut, lalu ditambahkan 15 mL pupuk Conway. Kultur akhir pada skala 40 L menggunakan 25 L air laut dan inokulum hasil dari kultur 15 L dengan kepadatan awal 10.062.500 sel/mL, serta ditambahkan 15 mL pupuk Conway.

Seluruh tahap kultur dilakukan dengan mengacu pada standar penggunaan pupuk Conway sebagai sumber nutrien, dengan rasio 1 mL pupuk per 1 L media. Penghitungan kepadatan sel dilakukan sebanyak tiga kali ulangan untuk meminimalkan kesalahan pengamatan. Pada penelitian ini dilakukan kontrol terhadap beberapa parameter lingkungan seperti suhu, pH, dan cahaya.

Pengenceran *N. oculata*

Pengenceran dilakukan untuk mengetahui berapa kepadatan bibit *N. oculata* dengan Kepadatan awal tebar dihitung dengan rumus (Arfah, 2019):

$$V1 \times N1 = V2 \times N2 \text{ maka, } V1 = V2 \times N2 / N1$$

Keterangan:

V1: Volume bibit untuk penebaran awal (mL)

N1: Kepadatan bibit/stok *Nannochloropsis* (sel/mL)

V2: Volume media kultur *Nannochloropsis* yang dikehendaki (mL)

N2: Kepadatan bibit *Nannochloropsis* yang dikehendaki (sel/mL).

Perhitungan Kepadatan

Penghitungan kepadatan *N. Oculata* dilakukan setiap hari sejak awal hingga akhir penelitian. Penghitungan dilakukan dengan menggunakan *haemocytometer* dengan alat bantu hitung *hand counter*. Pengambilan sampel dilakukan dengan metode volumetrik, sebanyak 25 ml/unit percobaan dengan pengulangan pengujian sebanyak 3 kali. Sampel *N. Oculata* diteteskan dengan menggunakan pipet tetes pada *haemocytometer* dan diamati di bawah mikroskop dengan perbesaran 400 kali. Rumus penghitungan *N. Oculata* yang digunakan adalah metode *Small Block* (Arfah *et al.*, 2019):

$$\text{Kepadatan (sel/ml)} = \frac{nA + nB + nC + nD + nE \times 25 \times 10^4}{25 \times 10^4}$$

Keterangan :

nA, nB, nC, nD, nE : jumlah sel *N. Oculata* pada kotak A, B, C, D dan E

5 : jumlah kotak yang di hitung

25 : jumlah seluruh kotak

Analisis Data

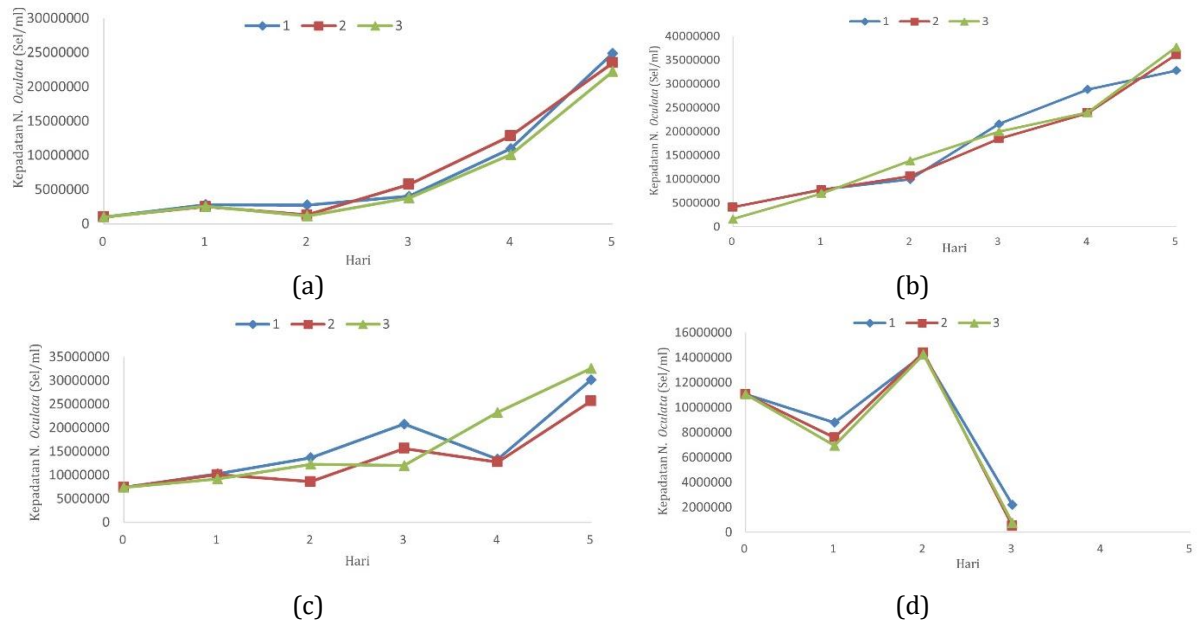
Hasil penelitian akan ditampilkan dalam bentuk grafik pertumbuhan, berdasarkan jumlah kepadatan sel per-volume kultur.

HASIL

Hasil penelitian *Nannochloropsis* pada berbagai volume ditampilkan dalam bentuk grafik pertumbuhan (Gambar 1a, 1b, 1c, dan 1d). Pola pertumbuhan *Nannochloropsis* hasil pengamatan menunjukkan dinamika yang bervariasi antara hari pertama sampai dengan hari kelima pada setiap volume kulturnya. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa ada fluktuasi pada setiap fase pertumbuhan dalam periode penelitian.

PEMBAHASAN

Penelitian kultur *Nannochloropsis oculata* dengan volume 200 ml diperoleh hasil bahwa pada hari pertama hingga kedua pertumbuhan dari *Nannochloropsis Oculata* tidak mengalami pertumbuhan yang signifikan. Awal pengamatan umumnya *Nannochloropsis* berada pada fase *lag* atau penyesuaian. Fase ini fitoplankton akan beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang baru (Wang *et al.*, 2025). Disamping itu, apabila kondisi media inokulum kekurangan nutrisi, maka fase adaptasi memerlukan waktu yang lebih lama, karena sel harus menghasilkan enzim yang sesuai dengan jenis nutrisi yang ada (Fernández-González *et al.*, 2022).



Gambar 1. Kepadatan *Nannochloropsis Oculata* pada volume (a) 200 ml, (b) 1 L, (c) 15L, (d) 40

Pertumbuhan *Nannochloropsis* terdiri dari beberapa fase utama sama seperti fitoplankton pada umumnya. Fase *lag* merupakan tahap adaptasi (Khadim *et al.*, 2024), fase eksponensial ditandai biomassa meningkat signifikan (Anggraini *et al.*, 2022). fase penurunan ketika pertumbuhan stagnan akibat menurunnya nutrisi (Cahyonugroho *et al.*, 2025). Fase stasioner terjadi saat jumlah sel hidup seimbang dengan yang mati karena kondisi lingkungan yang memburuk (Malakootian *et al.*, 2015). Terakhir, fase kematian ditandai dengan dominasi sel mati yang mengalami lisis dan terlarut dalam medium kultur (Choi *et al.*, 2017).

Pada kultur volume 200 ml terjadi peningkatan biomassa secara eksponensial pada hari ke tiga hingga kelima, mencapai 11 juta sel/ml. Pertumbuhan yang pesat ini sesuai dengan fase eksponensial atau logaritmik dimana ketersediaan cahaya, nutrisi, hingga parameter fisikokimia seperti suhu dan pH mendukung proses fotosintesis dan pembelahan secara optimal (Edwards *et al.*, 2016; Bandyopadhyay & Biswas, 2021; Kim *et al.*, 2022). Hasil ini menggambarkan bahwa volume yang lebih kecil dengan kondisi terkontrol sangat stabil dan cocok sebagai media inokulum pertama sebelum ditingkatkan.

Kultur mikroalga pada volume kecil ($\leq 1L$) dinilai lebih stabil karena berbagai parameter lingkungan seperti suhu, pH, pencahayaan, aerasi, dan salinitas dapat dikontrol dengan lebih mudah dan konsisten. Stabilitas ini menjadikan kultur kecil sangat ideal sebagai *tahap inokulum awal* sebelum ditingkatkan ke volume yang lebih besar (*scale-up*). Penggunaan volume kecil memungkinkan pertumbuhan sel berada dalam kondisi optimal dengan minimnya fluktuasi

lingkungan, yang mencegah stres fisiologis pada mikroalga. Kultur kecil juga memiliki risiko kontaminasi yang lebih rendah serta dapat dipantau lebih intensif, sehingga menjamin kualitas dan viabilitas inokulum yang akan digunakan untuk tahapan lanjutan (Molina-Grima *et al.*, 2022).

Setelah sel mencapai fase eksponensial yang stabil di volume kecil, kultur dapat ditingkatkan bertahap ke volume yang lebih besar (5L, 10L, 40L, dan seterusnya.) untuk produksi massal. Tahapan ini penting untuk memastikan bahwa sel memiliki ketahanan fisiologis yang cukup dalam menghadapi kondisi lingkungan yang lebih kompleks dan dinamis pada skala besar.

Kultur pada volume 1 liter terlihat pada hari pertama dan kedua juga berada pada fase *lag* dimana peningkatan pertumbuhannya juga tidak terlalu signifikan, namun memang lebih meningkat dari pada saat kultur dengan volume 200 ml. Menurut Villamaña *et al.* (2019), volume yang lebih besar memungkinkan pencampuran terjadi lebih efisien, sehingga distribusi nutrisi, cahaya, dan mineral lainnya bisa lebih optimal untuk mendukung proses fotosintesis. Fase eksponensial terlihat jelas pada pengamatan hari ketiga hingga kelima dimana grafik pertumbuhan meningkat secara drastis, yang berarti biomassa meningkat secara signifikan dengan kecepatan konstan. Selama fase eksponensial inokulum meningkat dengan laju tetap akan tetapi bersifat katalitik, dengan kepadatan mencapai 21,6 juta sel/L, massa bertambah secara eksponensial yang dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi dalam media. Menurut Prasetyo *et al.* (2022) fase eksponensial terjadi ketika nutrisi, pH, dan

intensitas cahaya berada pada batas toleransi fisiologis mikroalga, sehingga memungkinkan reproduksi dan akumulasi biomassa yang konsisten.

Berbeda dengan kultur di volume 200 ml dan 1 L, pada volume 15 L pola yang terjadi sedikit berbeda ditandai dengan fase *lag* dengan durasi yang lebih lama hingga empat hari. Pada empat hari awal jelas terlihat masih ada perubahan terhadap pertumbuhannya akibat dari sensitivitas terhadap nutrisi, temperatur, salinitas, oksigen terlarut, dan intensitas cahaya. Wahyuni *et al.* (2018) menyatakan kultur skala besar membutuhkan waktu adaptasi yang lebih panjang agar sesuai untuk kehidupan inokulum. Hasil yang diperoleh cukup variatif antara beberapa pengulangan, namun fase eksponensial baru terlihat jelas pada hari ke-5. Durasi antara satu fase dengan fase berikutnya sangat dipengaruhi oleh sensitivitas tiap organisme terhadap lingkungannya, sehingga perubahan lingkungan dapat mempercepat, memperlambat atau bahkan mengubah durasi dari setiap fasenya (Tang *et al.*, 2023).

Anomali yang paling signifikan terjadi pada kultur volume 40 L, meskipun kepadatan awal sebanding dengan kultur volume sebelumnya, namun penurunan biomassa secara drastis terjadi setelah hari kedua. Sebelum mencapai fase eksponensial *Nannochloropsis Oculata* mengalami penurunan biomassa secara drastis yang terlihat secara jelas akibat dari kematian sel. Hari ketiga merupakan puncak penurunan drastis biomassa *Nannochloropsis Oculata* hingga mencapai 4×10^6 sel/ml yang menandakan kegagalan kultur pada volume ini.

Menurut Sung *et al.* (2018), hari ketiga kultur *batch Nannochloropsis oculata* biasanya berada dalam fase eksponensial, ditandai dengan peningkatan cepat jumlah sel diikuti oleh peralihan ke fase stasioner dan kematian sel. Saat faktor pembatas seperti nutrisi, cahaya, atau pH yang tidak mencukupi, menjadi penyebab terjadi kematian sel masif dan turunnya biomassa (*cell crash*). Penurunan mendadak biomassa adalah indikator kuat agar kultur dihentikan, dibersihkan, dan dimulai ulang dengan kondisi optimal.

Pemeriksaan mikroskopis memastikan bahwa kegagalan yang terjadi pada kultur 40 L ini terjadi akibat kontaminasi dari protozoa, yang diasumsikan berasal dari akuarium yang bedekatan melalui tetesan air yang terbawa oleh udara, yang mengakibatkan mikroorganisme lain tumbuh di media kultur. Protozoa merupakan salah satu konsumen mikroalga yang dapat dengan cepat tumbuh dan berkembang (Wang *et al.*, 2019). Ada banyak mikroorganisme penyebab kontaminasi selain protozoa seperti bakteri,

fungi, protozoa, serangga, virus dan lain-lain (Widihastuti *et al.*, 2022). Kontaminasi merupakan salah satu faktor kegagalan utama dalam proses kultur mikroalga. Menurut Makut & Samantara (2021) Kontaminasi dapat menyebabkan penurunan pertumbuhan, kualitas, bahkan kehancuran total kultur, sehingga menghambat keberhasilan produksi biomassa dan produk turunannya.

Kultur *Nannochloropsis oculata* pada volume 40 liter lebih rentan mengalami kegagalan karena efisiensi penetrasi cahaya yang menurun akibat efek *self-shading*, distribusi CO₂ dan nutrisi yang tidak homogen akibat sirkulasi yang kurang optimal, akumulasi metabolit toksik serta fluktuasi pH yang menghambat proses fotosintesis, tingginya risiko kontaminasi oleh mikroorganisme kompetitor atau predator (Molina-Grima *et al.*, 2021), serta penggunaan inokulum yang belum mencapai fase eksponensial atau dalam proporsi yang terlalu kecil untuk menopang pertumbuhan populasi pada skala besar. Insiden ini menekankan pentingnya langkah-langkah yang tepat dan ketat untuk meminimalisir risiko kontaminasi.

Ada beberapa faktor utama yang berperan penting bagi keberhasilan kultur yaitu intensitas cahaya sebagai sumber energi utama dalam proses fotosintesis selain CO₂, intensitas cahaya sangat mempengaruhi proses penyesuaian fitoplankton hingga berpengaruh terhadap biomasanya (Marzetz *et al.*, 2020; Neun *et al.*, 2022;). Sumber nutrisi yang sesuai juga merupakan faktor yang sangat penting, nutrisi yang dibutuhkan tersebut meliputi unsur hara makro, unsur hara mikro, dan vitamin. Ketersediaan nutrisi yang seimbang akan menunjang pertumbuhan biomassa yang optimal (Joglar *et al.* 2020; Fernández-González *et al.*, 2022). Faktor lainnya yang dapat mempengaruhi tingkat keberhasilan pertumbuhan biomassa yakni media kultur yang bebas kontaminasi, waktu pelaksanaan, kualitas bibit dan perhitungan kepadatan awal tebar bibit.

KESIMPULAN

Laju pertumbuhan *Nannochloropsis* hanya terdapat fase adaptasi, fase eksponensial, dan fase kematian. Kultur *Nannochloropsis oculata* memiliki dinamika pertumbuhan yang berbeda pada setiap volumenya, termasuk pada fase lag, eksponensial, hingga fase penurunan dan atau kematian. Keberhasilan transisi antar fase sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya, ketersediaan nutrisi makro dan mikro yang seimbang, kualitas bibit, kepadatan awal tebar, dan media kultur yang bebas dari kontaminasi. Disarankan untuk melakukan penelitian yang berfokus pada pengaruh perbandingan konsentrasi nutrisi

terhadap laju produktivitas fitoplankton dan analisis potensi kandungan senyawa bioaktif yang dihasilkan fitoplankton selama periode kultur.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggraeni, A., Utami, E., & Mahardika, R. G. (2022). Pengaruh salinitas terhadap kepadatan populasi dan konsentrasi klorofil-a *Spirulina* pada media kultur modifikasi walne dan air limbah budidaya ikan. *EKOTONIA: Jurnal Penelitian Biologi, Botani, Zoologi dan Mikrobiologi*, 7(2), 112-120.
- Arfah, Y., Cokrowati, N., & Mukhlis, A. 2019. Pengaruh Konsentrasi Pupuk Urea Terhadap Pertumbuhan Populasi Sel *Nannochloropsis* sp. *Jurnal Kelautan*, 12(1), 45-51.
- Bandyopadhyay, D., & Biswas, H. (2021). Impacts of variable nutrient stoichiometry (N, Si and P) on a coastal phytoplankton community from the SW Bay of Bengal, India. *European Journal of Phycology*, 56(3), 273-288.
- Cahyonugroho, O. H., Fifin, C., Hidayah, E. N., Rosariawari, F., & Novembrianto, R. 2025. The ability of microalgae *Nannochloropsis oculata* to remove lead (Pb) from artificial wastewater. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1454, 012019. IOP Publishing.
- Choi Ye, Y., Liu, M., Yu, L., Sun, H., & Liu, J. (2024). *Nannochloropsis* as an emerging algal chassis for light-driven synthesis of lipids and high-value products. *Marine Drugs*, 22(2), 54.
- Edwards, K. F., Thomas, M. K., Klausmeier, C. A., & Litchman, E. (2016). Phytoplankton growth and the interaction of light and temperature: A synthesis at the species and community level. *Limnology and Oceanography*, 61(4), 1232-1244.
- Eka putri. 2019. kualitas pasta *nannochloropsis* sp. isolat lampung mangrove center berdasarkan uji kandungan karbohidrat pada kultur skala intermediet. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Ezenweani, R. S., & Kadiri, M. O. (2024). Evaluating the productivity and bioremediation potential of two tropical marine algae in petroleum hydrocarbon polluted tropical marine water. *International Journal of Phytoremediation*, 26(7), 1099-1116.
- Fernández-González, C., Tarran, G. A., Schuback, N., Woodward, E. M. S., Arístegui, J., & Marañón, E. (2022). Phytoplankton responses to changing temperature and nutrient availability are consistent across the tropical and subtropical Atlantic. *Communications Biology*, 5(1), 1035.
- Joglar, V., Prieto, A., Barber-Lluch, E., Hernández-Ruiz, M., Fernández, E., & Teira, E. (2020). Spatial and temporal variability in the response of phytoplankton and prokaryotes to B-vitamin amendments in an upwelling system. *Biogeosciences*, 17(10), 2807-2823.
- Khadim, H. J., Abdelkareem, H. N., Hussein, H. A. M., & Mohamed, A. I. (2024). Growth Kinetic and Biodiesel Lipid Extraction of *Nannochloropsis oculata* Microalgae in a Photobioreactor under Varying Salinity Conditions. *Journal of Ecological Engineering*, 25(11), 46-54.
- Khoeyi, Z.A., Seyfabadi, J., & Ramezanpour, Z. (2012). Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the microalgae *Nannochloropsis oculata*. *Journal of Applied Phycology*, 24(3), 313-320.
- Kim, J., Armin, G., & Inomura, K. (2022). Saturating relationship between phytoplankton growth rate and nutrient concentration explained by macromolecular allocation. *Current Research in Microbial Sciences*, 3, 100167.
- Liu, M., Yu, L., Zheng, J., Shao, S., Pan, Y., Hu, H., ... & Liu, J. (2024). Turning the industrially relevant marine alga *Nannochloropsis* red: one move for multifaceted benefits. *New Phytologist*, 244(4), 1467-1481.
- Malakootian, M., Hatami, B., Dowlatshahi, S., & Rajabizadeh, A. (2015). Optimization of culture media for lipid production by *Nannochloropsis oculata* for Biodiesel production, *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 2(3), 141-147.
- Marzetz, V., Spijkerman, E., Striebel, M., & Wacker, A. (2020). Phytoplankton community responses to interactions between light intensity, light variations, and phosphorus supply. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 539733.
- Molina-Grima, E., García-Camacho, F., Ación-Fernández, F. G., Sánchez-Mirón, A., Plouviez, M., Shene, C., & Chisti, Y. (2022). Pathogens and predators impacting commercial production of microalgae and cyanobacteria. *Biotechnology advances*, 55, 107884.
- Neun, S., Hintz, N. H., Schröder, M., & Striebel, M. (2022). Phytoplankton response to different light colors and fluctuation frequencies. *Frontiers in Marine Science*, 9, 824624.

- Prasetyo, L. D., Supriyantini, E., & Sedjati, S. (2022). Pertumbuhan mikroalga *Chaetoceros calcitrans* pada kultivasi dengan intensitas cahaya berbeda. *Buletin Oseanografi Marina*, 11(1), 59-70.
- Ra, C. H., Kang, C. H., Jung, J. H., Jeong, G. T., & Kim, S. K. (2016). Effects of light-emitting diodes (LEDs) on the accumulation of lipid content using a two-phase culture process with three microalgae. *Bioresource technology*, 212, 254-261.
- Safia, W. O., Budiyanti, B., Sumitro, S., Yulisnawati, Y., & Sukendar, W. (2023). Pengaruh Interval Waktu Pencahayaan Yang Berbeda Pada Kultur *Nannochloropsis* Sp Di Laboratorium. *Jurnal Akuakultura Universitas Teuku Umar*, 7(2), 38-41.
- Sinaga, L., Putriningtias, A., & Komariyah, S. (2021). Pengaruh Intensitas Cahaya Terhadap Pertumbuhan *Nannochloropsis* Sp. *Jurnal Akuakultura Universitas Teuku Umar*, 4(2), 31-37.
- Sung, M.G., Han, J.I., Lee, B. (2018). Wavelength shift strategy to enhance lipid productivity of *Nannochloropsis gaditana*. *Biotechnol Biofuels*, 11(70), 1-12.
- Tang, Y., Zhou, W., & Du, Y. (2023). Effects of temperature, precipitation, and CO₂ on plant phenology in China: a circular regression approach. *Forests*, 14(9), 1844.
- Villamaña, M., Marañón, E., Cermeño, P., Estrada, M., Fernández-Castro, B., Figueiras, F. G., & Mouriño-Carballido, B. (2019). The role of mixing in controlling resource availability and phytoplankton community composition. *Progress in Oceanography*, 178, 102181.
- Wahyuni N, Masithah ED, Soemarjati W, Suciyono, Ulkhaq MF. 2018. Pola Pertumbuhan Mikroalga *Spirulina* sp. Skala Laboratorium yang dikultur Menggunakan Wadah yang Berbeda. *Majalah Ilmiah Bahari Jogja*, 16(2): 89-97.
- Wang, G., He, Y., Chen, Z., Liu, H., Wang, Q., Peng, C., & Zhang, J. (2025). Corrigendum: A lag bloom pattern of phytoplankton after freshwater input events revealed by daily samples during summer in Qinhuangdao coastal water, China. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1601738.
- Wang, Q., Lyu, Z., Omar, S., Cornell, S., Yang, Z., & Montagnes, D. J. (2019). Predicting temperature impacts on aquatic productivity: Questioning the metabolic theory of ecology's "canonical" activation energies. *Limnology and Oceanography*, 64(3), 1172-1185.
- Widiastuti, A., Satria, B., Yulianti, R., & Tjajaningsih, W. 2022. Growth Rate of *Microalgae Nannochloropsis oculata* at Different Culture Scales. *Journal of Aquaculture Science*, Vol 7(2): 74-82.
- Zanella, L., & Vianello, F. (2020). Microalgae of the genus *Nannochloropsis*: Chemical composition and functional implications for human nutrition. *Journal of Functional Foods*, 68, 103919.