

**OPTIMALISASI KONSENTRASI FOSFOR DAN KALIUM UNTUK
MENINGKATKAN PRODUKTIVITAS *Chaetoceros amami* SEBAGAI
PAKAN ALAMI KERANG MUTIARA (*Pinctada maxima*)**

**OPTIMIZATION OF PHOSPHORUS AND POTASSIUM
CONCENTRATIONS TO ENHANCE *Chaetoceros amami*
PRODUCTIVITY AS LIVE FEED FOR PEARL OYSTER
(*Pinctada maxima*)**

Intan¹, Alis Mukhlis^{1*}, Septiana Dwiyantri¹.

¹Program Studi Budidaya Perairan, Jurusan Perikanan Ilmu Kelautan, Fakultas
Pertanian, Universitas Mataram, Alamat Jln. Pendidikan 37 Mataram, Nusa
Tenggara Barat, 83 125, Indonesia

*Korespondensi email : alismukhlis@unram.ac.id

ABSTRAK

Chaetoceros amami merupakan fitoplankton bernutrisi tinggi yang berperan penting sebagai pakan alami kerang mutiara (*Pinctada maxima*), dengan produktivitas yang dipengaruhi oleh ketersediaan fosfor (P) dan kalium (K). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh konsentrasi fosfor dan kalium terhadap produktivitas *C. amami* menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial dua faktor, yaitu fosfor (0, 1, 2, 3 part per million/ppm) dan kalium (0, 3, 6 ppm), dengan 3 ulangan sehingga diperoleh 36 unit percobaan. Kode perlakuan dinyatakan sebagai kombinasi PxKy, dengan x dan y menunjukkan konsentrasi fosfor dan kalium (ppm); P0K0 merupakan kontrol. Nitrogen dijaga konstan 7,5 ppm. Parameter yang diamati meliputi kepadatan puncak populasi sel, pertumbuhan relatif, waktu penggandaan diri, dan kualitas air, diukur setiap 12 jam selama 72 jam. Hasil menunjukkan perlakuan dan interaksi fosfor-kalium berpengaruh nyata terhadap kepadatan puncak dan pertumbuhan relatif ($p < 0,05$), namun tidak terhadap waktu penggandaan diri ($p > 0,05$). Perlakuan P1K3 menghasilkan performa terbaik (kepadatan 2.592.000 sel/ml; pertumbuhan relatif 101,3%; waktu penggandaan diri 48,9 jam), meningkat 19,3–47,5% dibanding kontrol, sedangkan P3K0 menunjukkan performa terendah akibat ketidakseimbangan nutrisi dan toksisitas fosfor. Penelitian ini merekomendasikan kombinasi fosfor 1 ppm dan kalium 3 ppm sebagai formulasi optimal untuk produksi massal *C. amami* yang efisien dan ekonomis guna mendukung budidaya kerang mutiara *P. maxima*.

Kata kunci: *Chaetoceros amami*; fosfor; kalium; *Pinctada maxima*; produktivitas fitoplankton

ABSTRACT

Chaetoceros amami is a highly nutritious phytoplankton that plays an important role as natural feed for pearl oysters (*Pinctada maxima*), with its productivity influenced by the availability of phosphorus (P) and potassium (K). This study aimed to analyze the effect of phosphorus and potassium concentrations on the productivity of *C. amami* using a factorial Completely Randomized Design (CRD) with two factors, namely phosphorus (0, 1, 2, 3 parts per million/ppm) and potassium (0, 3, 6 ppm), with 3 replications, resulting in 36 experimental units. Treatment codes were expressed as combinations of PxKy, where x and y indicate the concentrations of phosphorus and potassium (ppm), respectively; P0K0 served as the control. Nitrogen was kept constant at 7.5 ppm. The parameters observed included peak cell density, relative growth, doubling time, and water quality, measured every 12 hours for 72 hours. The results showed that the treatments and the phosphorus-potassium interaction significantly affected peak cell density and relative growth ($p < 0.05$), but had no significant effect on doubling time ($p > 0.05$). The P1K3 treatment exhibited the best performance (density of 2,592,000 cells/ml; relative growth of 101.3%; doubling time of 48.9 hours), representing an increase of 19.3–47.5% compared to the control, while the P3K0 treatment showed the lowest performance due to nutrient imbalance and phosphorus toxicity. This study recommends the combination of 1 ppm phosphorus and 3 ppm potassium as the optimal formulation for efficient and economical mass production of *C. amami*, supporting the cultivation of pearl oysters (*P. maxima*).

Keywords: *Chaetoceros amami*; phosphorus; potassium; *Pinctada maxima*; phytoplankton productivity

PENDAHULUAN

Fitoplankton *Chaetoceros amami* merupakan diatom laut yang memiliki potensi besar sebagai pakan alami dalam budidaya kerang mutiara (*Pinctada maxima*). Mikroalga ini kaya akan protein (20-40%), asam lemak esensial EPA dan DHA, serta memiliki ukuran sel (3-10 μm) yang ideal untuk dikonsumsi larva kerang (Lante & Herlinah, 2015; Yusoff & Wong, 2023). Pemberian *Chaetoceros* sp. dengan kualitas optimal terbukti meningkatkan kelangsungan hidup larva kerang mutiara hingga 75-85% dibandingkan hanya 40-50% pada pakan alami lainnya (Huki *et al.*, 2023). Namun, produksi massal *Chaetoceros* yang konsisten dan ekonomis masih menjadi kendala utama dalam operasional pembenihan kerang mutiara.

Produktivitas mikroalga sangat ditentukan oleh ketersediaan nutrisi makro, terutama nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Fosfor berperan dalam pembentukan ATP, DNA/RNA, dan membran sel, sedangkan kalium berfungsi dalam regulasi osmotik, aktivasi enzim, dan pembelahan sel (Xing *et al.*, 2023; Bossa *et al.*, 2024). Optimasi konsentrasi fosfor dan kalium sangat penting untuk memaksimalkan produksi biomassa dengan efisiensi tinggi dan biaya rendah. Penelitian terkini menunjukkan bahwa konsentrasi dan sumber fosfor berpengaruh signifikan terhadap produktivitas diatom *Chaetoceros*. Zhang *et al.* (2025) melaporkan bahwa konsentrasi fosfor optimal untuk pertumbuhan dan akumulasi lipid pada *Chaetoceros lorenzianus* adalah 1,00 mg/L, sedangkan konsentrasi optimal untuk produksi PUFA, EPA, dan DHA adalah pada 2,00 mg/L.

Sumber fosfor juga mempengaruhi kualitas biomassa, dimana $\text{CaP}_2\text{H}_4\text{O}_8$ menghasilkan laju pertumbuhan, klorofil-a, dan MUFA yang lebih tinggi dibanding K_2HPO_4 dan KH_2PO_4 . Lovio-Fragoso *et al.* (2019) menemukan bahwa *Chaetoceros muelleri* mencapai kepadatan sel tertinggi pada konsentrasi fosfor 72 μM (setara 2,2 ppm), namun akumulasi lipid tertinggi (4,42%) justru diperoleh pada konsentrasi rendah 7 μM akibat stres nutrisi. Hasby *et al.* (2023) melaporkan bahwa defisiensi fosfor (rasio N:P = 12:0,5) pada *Chaetoceros calcitrans* memicu akumulasi lipid hingga 15,46% dari berat kering pada intensitas cahaya 4.000 lux. Kajian ekologi yang dilaporkan oleh Yano *et al.* (2023) menunjukkan bahwa *Chaetoceros lorenzianus* memiliki toleransi lebih baik terhadap keterbatasan fosfor dan stres cahaya tinggi dibanding *Skeletonema costatum*. Pada kondisi fosfor terbatas, *C. lorenzianus* menunjukkan pemulihan fotosintesis yang lebih cepat, menjelaskan dominasi *Chaetoceros* di perairan oligotrofik. Hal ini mengindikasikan bahwa genus *Chaetoceros* memiliki mekanisme adaptasi fosfor yang efisien, namun konsentrasi optimal bervariasi antar spesies.

Penelitian tentang kalium pada kultur *Chaetoceros* masih sangat terbatas. Prafanda *et al.* (2020) mengkaji pengaruh konsentrasi KNO_3 (75, 100, 125, 150 g/L) pada *Chaetoceros calcitrans*, namun menemukan bahwa perlakuan yang diuji tidak berpengaruh nyata terhadap laju pertumbuhan dan biomassa kering ($p>0,05$). Menariknya, kandungan protein menurun drastis dari 9,75% (75 g/L KNO_3) menjadi 3,78% (150 g/L KNO_3), mengindikasikan bahwa konsentrasi kalium berlebih dapat mengganggu metabolisme nitrogen dan sintesis protein. Li *et al.* (2023) mengidentifikasi empat sistem transportasi kalium pada algae yang berperan dalam mempertahankan homeostasis ion dan toleransi stres salinitas, namun konsentrasi optimal untuk pertumbuhan maksimal belum dikaji secara sistematis.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, permasalahan yang dihadapi adalah: (1) Konsentrasi fosfor optimal bervariasi antar spesies *Chaetoceros* (0,5-3,0 ppm), sementara informasi spesifik untuk *C. amami* belum tersedia; (2) Fosfor tinggi meningkatkan biomassa tetapi menurunkan lipid, sementara fosfor rendah meningkatkan lipid namun mengurangi produktivitas; (3) Penelitian-penelitian sebelumnya hanya fokus pada faktor tunggal (fosfor atau kalium saja), padahal kedua nutrisi saling mempengaruhi dalam metabolisme sel; (4) Peran kalium dalam pertumbuhan *Chaetoceros* belum dikaji secara komprehensif, khususnya interaksinya dengan fosfor.

Penelitian ini merupakan kajian sistematis pertama yang menganalisis interaksi fosfor-kalium pada *Chaetoceros amami* dengan pendekatan faktorial 4×3 (12 kombinasi perlakuan). Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan media sintetik (f/2 Guillard), penelitian ini menggunakan air laut alami steril yang mencerminkan kondisi operasional pembenihan. Evaluasi parameter lengkap (kepadatan puncak, pertumbuhan relatif, waktu penggandaan diri) memberikan informasi holistik tentang pertumbuhan untuk optimasi produksi pakan alami, bukan untuk ekstraksi lipid seperti mayoritas studi sebelumnya. Penelitian dilakukan di unit pembenihan komersial PT. Mutiara Surya Indonesia sehingga hasil dapat langsung diaplikasikan dalam skala produksi.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh konsentrasi fosfor (0, 1, 2, 3 ppm) dan kalium (0, 3, 6 ppm) serta interaksinya terhadap produktivitas *Chaetoceros amami*. Hasil penelitian diharapkan memberikan rekomendasi formulasi nutrisi optimal untuk produksi massal *Chaetoceros amami* yang efisien, konsisten, dan ekonomis dalam mendukung keberhasilan budidaya kerang mutiara *Pinctada maxima*.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Juli-Agustus 2025 di Laboratorium Pembenihan Kerang Mutiara PT. Mutiara Surya Indonesia, Desa Sugian, Kecamatan Sambelia, Kabupaten Lombok Timur, Provinsi Nusa Tenggara Barat.

Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) pola faktorial 4×3 dengan dua faktor perlakuan, yaitu konsentrasi fosfor (P) dengan empat taraf (0, 1, 2, dan 3 ppm) dan konsentrasi kalium (K) dengan tiga taraf (0, 3, dan 6 ppm). Setiap kombinasi perlakuan diulang sebanyak tiga kali sehingga diperoleh 36 unit percobaan. Konsentrasi nitrogen dijaga konstan pada 7,5 ppm untuk semua perlakuan.

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan meliputi toples kultur volume 5 L, haemocytometer (Improved Neubauer), mikroskop binokuler, hand counter digital, pH meter, termometer digital, refraktometer (Atago), luxmeter digital (Lux-1108), aerator, pipet ukur (1 mL dan 10 mL), gelas ukur, timbangan digital, panci sterilisasi, lampu LED, kamera, dan alat tulis.

Bahan yang digunakan meliputi bibit *Chaetoceros amami* yang diperoleh dari Laboratorium Pakan Alami PT. Mutiara Surya Indonesia, air laut dengan salinitas 29 ppt yang telah disterilkan, pupuk Nitrafos Mono Amonium Phospate (MAP) (12% N : 26,7% P) dengan merek dagang MerokeMAP (12-61-0) sebagai sumber nitrogen dan fosfor, pupuk KNO₃ (13% N : 38,2% K) dengan merek dagang KNO₃ (13-0-46) sebagai sumber nitrogen dan kalium, Urea (46% N) sebagai sumber nitrogen tunggal, Na₂SiO₃·9H₂O (teknis grade) dengan kandungan 21,1% silikat (SiO₂), vitamin B₁ dan B₁₂, alkohol 70%, dan tisu.

Prosedur Penelitian

Persiapan Wadah dan Media Kultur

Toples kultur bervolume 5 L sebanyak 36 buah disterilkan dengan cara direndam dalam air mendidih (100°C) selama 5 menit, kemudian dikeringkan. Air laut dengan salinitas 29 ppt disterilkan dengan metode pemanasan hingga mencapai suhu 100°C, kemudian didinginkan hingga mencapai suhu ruang (28-30°C) sebelum digunakan sebagai media kultur.

Pembuatan Larutan Stok Nutrien

Konsentrasi fosfor dan kalium pada masing-masing perlakuan ditentukan berdasarkan perhitungan stoikiometri menggunakan berat atom (BA) unsur hara dan berat molekul (BM) pupuk sumber. Larutan stok nutrien dibuat dengan melarutkan pupuk dalam air laut steril. Sebanyak 1.501 mg MerokeMAP dilarutkan dalam 200 mL air laut steril (2.000 ppm P; 899 ppm N), 3.143 mg KNO₃ dilarutkan dalam 200 mL air laut steril (6.000 ppm K; 2.042 ppm N), dan 9.783 mg Urea dalam 300 mL air laut steril (15.000 ppm N). Larutan stok silikat (Na₂SiO₃·9H₂O) dibuat dengan konsentrasi 30.000 ppm dengan melarutkan 28,4 gram silikat dalam 200 mL air laut steril. Selain itu, vitamin B₁ (15 mg) dan vitamin B₁₂ (75 µg) dilarutkan dalam 50 mL air laut steril menghasilkan konsentrasi stok vit. B₁ (tiamin) 300 µg/mL dan vit. B₁ (sianokobalamin) 1,5 µg/mL. Semua larutan stok disimpan dalam botol kaca steril tertutup rapat pada suhu ruang.

Pengkayaan Media Kultur

Media kultur diperkaya dengan menambahkan larutan stok nutrisi sesuai konsentrasi perlakuan menggunakan pipet ukur. Nitrogen ditambahkan pada semua perlakuan dengan konsentrasi 7,5 ppm, silikat ditambahkan sebanyak 0,5 mL/L sebagai nutrisi dasar dengan konsentrasi kerja 15 ppm SiO_2 , sedangkan campuran vitamin B₁ dan B₁₂ ditambahkan sebanyak 0,5 mL/L untuk mendapatkan konsentrasi kerja 150 µg/mL vit. B₁ dan 0,75 µg/mL vit. B₁₂. Fosfor dan kalium ditambahkan sesuai kombinasi perlakuan. Penambahan dilakukan secara aseptis di dekat api bunsen untuk menghindari kontaminasi. Setelah penambahan nutrisi, media diaduk hingga homogen.

Inokulasi dan Pemeliharaan

Bibit *Chaetoceros amami* diinokulasi ke dalam masing-masing wadah kultur dengan kepadatan awal 1.287.000 sel/mL. Volume kultur yang digunakan adalah 4 L per wadah. Pemeliharaan dilakukan selama 96 jam (4 hari) dengan pemberian aerasi kontinyu menggunakan aerator dan selang aerasi steril. Intensitas cahaya diatur pada kisaran 4.500-5.000 lux menggunakan lampu LED yang dipasang di samping wadah kultur dengan fotoperiode 24 jam terang. Suhu kultur dijaga pada kisaran 28-30°C dengan menempatkan wadah kultur pada ruangan terkontrol.

Parameter Pengamatan

Kepadatan Sel

Kepadatan sel *Chaetoceros amami* dihitung setiap 24 jam selama 96 jam menggunakan haemocytometer dengan metode perhitungan langsung. Sebanyak 1 mL sampel diambil dari masing-masing wadah kultur menggunakan pipet steril, kemudian diteteskan pada haemocytometer dan ditutup dengan cover glass. Perhitungan sel dilakukan menggunakan mikroskop dengan perbesaran 100× (objektif 10× dan okuler 10×) pada lima bidang berukuran 0,2 mm x 0,2 mm hemocytometer yang dipilih secara acak. Kepadatan sel dihitung menggunakan rumus :

Kepadatan sel (sel/mL) = $(n / \text{jumlah bidang yang diamati}) \times 25 \times 10^4$

Keterangan:

n = jumlah sel mikroalga yang terhitung

25 = jumlah bidang kotak berukuran 0,2 mm x 0,2 mm dalam haemocytometer

10^4 = faktor konversi volume (0,1 mm³ ke mL)

Pertumbuhan Relatif

Pertumbuhan relatif dihitung menggunakan data kepadatan sel pada awal dan kepada tertinggi (puncak) selama periode pertumbuhan. Perhitungan menggunakan rumus yang dikemukakan oleh Mukhlis *et al.* (2017):

$$\text{RGR} = [(C_t - C_0) / C_0] \times 100\%$$

Keterangan:

RGR = Relative Growth Rate (%)

C_0 = kepadatan populasi sel pada awal percobaan (sel/mL)

C_t = kepadatan populasi sel tertinggi selama periode pertumbuhan (sel/mL)

Waktu Penggandaan Diri

Waktu penggandaan diri (*doubling time*) merupakan waktu yang diperlukan oleh populasi sel untuk meningkat dua kali lipat. Perhitungan dilakukan menggunakan rumus yang dikemukakan oleh Mukhlis *et al.* (2017):

$$\text{DT} = [\log 2 \times \Delta t] / (\log C_t - \log C_0)$$

Keterangan:

DT = *Doubling Time* (jam)

C_0 = kepadatan populasi sel pada awal percobaan (sel/mL)

C_t = kepadatan populasi sel tertinggi selama periode pertumbuhan (sel/mL)

Δt = lama waktu dalam satu periode pengamatan (jam)

Kualitas Air

Parameter kualitas air yang diamati meliputi suhu, salinitas, intensitas cahaya, dan pH. Pengukuran dilakukan setiap hari pada pukul 08.00 WITA selama masa kultur. Suhu diukur menggunakan termometer batang, salinitas diukur menggunakan refraktometer dengan ketelitian 1 ppt, intensitas cahaya diukur menggunakan luxmeter digital dengan ketelitian 1 lux yang ditempatkan pada jarak lampu dengan wadah kultur, dan pH diukur menggunakan pH meter digital yang telah dikalibrasi dengan larutan buffer standar pH 4, 7, dan 10.

Analisis Data

Data kepadatan puncak populasi sel, pertumbuhan relatif, dan waktu penggandaan diri dianalisis menggunakan Analisis Variansi (ANOVA) dua arah dengan taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$) untuk mengetahui pengaruh konsentrasi fosfor (P), kalium (K), dan interaksinya (P×K) terhadap pertumbuhan *Chaetoceros amami*. Apabila hasil ANOVA menunjukkan perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$), analisis dilanjutkan dengan Uji Beda Nyata Terkecil (BNT) pada taraf 5% untuk mengetahui perbedaan antar perlakuan. Analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak microsoft excel. Data kualitas air dianalisis secara deskriptif dan dibandingkan dengan kisaran optimal yang tersedia pada literatur.

HASIL

Pola Pertumbuhan *Chaetoceros amami*

Pada fase lag (H0-H1), semua perlakuan menunjukkan peningkatan kepadatan sel yang relatif lambat dari kepadatan awal 1.287.500 sel/mL. Fase ini merupakan periode adaptasi sel terhadap media kultur baru. Kepadatan sel pada H1 berkisar antara 1.103.571 sel/mL (P3K6) hingga 2.253.125 sel/mL (P0K3), menunjukkan respon adaptasi yang bervariasi tergantung konsentrasi fosfor dan kalium.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pertumbuhan *Chaetoceros amami* mengikuti pola pertumbuhan mikroalga klasik dengan empat fase berbeda, yaitu fase lag (adaptasi), fase eksponensial (pertumbuhan cepat), fase penurunan laju pertumbuhan, dan fase kematian. Pola pertumbuhan ini diamati pada semua perlakuan kombinasi fosfor dan kalium selama 96 jam (4 hari) masa kultur (Gambar 1).

Pada fase lag (H0-H1), semua perlakuan menunjukkan peningkatan kepadatan sel yang bervariasi dari kepadatan awal seragam 1.287,5 ribu sel/mL. Fase ini merupakan periode adaptasi sel terhadap media kultur baru. Kepadatan sel pada H1 berkisar antara $1.331,3 \times 10^3$ sel/mL (P1K0) hingga $1.911,5 \times 10^3$ sel/mL (P0K0), menunjukkan respon adaptasi yang berbeda tergantung konsentrasi fosfor dan kalium. Perlakuan dengan fosfor tinggi (P2 dan P3) menunjukkan fase lag yang lebih panjang dengan peningkatan kepadatan yang lebih lambat dibandingkan perlakuan lainnya.

Fase eksponensial atau pertumbuhan cepat terjadi antara H1 hingga H2-H3, dimana terjadi peningkatan kepadatan sel yang signifikan. Perlakuan P1K3

menunjukkan pertumbuhan eksponensial terbaik, mencapai kepadatan puncak rata-rata 2.592,0 ribu sel/mL pada H2. Perlakuan kontrol (P0K0) juga menunjukkan pertumbuhan eksponensial yang baik, mencapai kepadatan puncak 2.172,0 ribu sel/mL pada H2, kemudian mengalami penurunan menjadi 1.398,6 ribu sel/mL pada H3. Perlakuan P0K6 mencapai puncak pada H2 dengan kepadatan 1.991,9 ribu sel/mL, sedangkan P2K3 mencapai puncak pada H3 dengan kepadatan 1.781,9 ribu sel/mL.

Fase penurunan laju pertumbuhan dan fase kematian dimulai pada waktu yang berbeda tergantung perlakuan. Perlakuan dengan fosfor tinggi (P2 dan P3) menunjukkan fase kematian yang terjadi lebih awal dibandingkan perlakuan lainnya. Perlakuan P3K0 menunjukkan pola pertumbuhan yang sangat terhambat, mencapai kepadatan puncak hanya 1.422,9 ribu sel/mL pada H2, kemudian menurun drastis menjadi 610,5 ribu sel/mL pada H3 dan 57,7 ribu sel/mL pada H4. Demikian pula perlakuan P3K3 dan P3K6 menunjukkan penurunan kepadatan yang cepat setelah mencapai puncak, dengan kepadatan pada H4 masing-masing hanya 117,3 ribu sel/mL dan 106,9 ribu sel/mL. Hal ini mengindikasikan bahwa konsentrasi fosfor 3 ppm menyebabkan pertumbuhan terhambat dan fase kematian terjadi lebih awal, kemungkinan akibat efek toksisitas fosfor.

Sebaliknya, perlakuan dengan kombinasi fosfor dan kalium optimal (P1K3) menunjukkan fase stasioner yang lebih panjang, dengan kepadatan tetap tinggi pada H3 (1.582,8 ribu sel/mL) sebelum mengalami penurunan pada H4 (852,5 ribu sel/mL). Perlakuan P0K0 dan P0K3 juga menunjukkan pola serupa dengan fase stasioner yang relatif stabil pada H2 sebelum memasuki fase penurunan.

Perbandingan antar perlakuan menunjukkan bahwa:

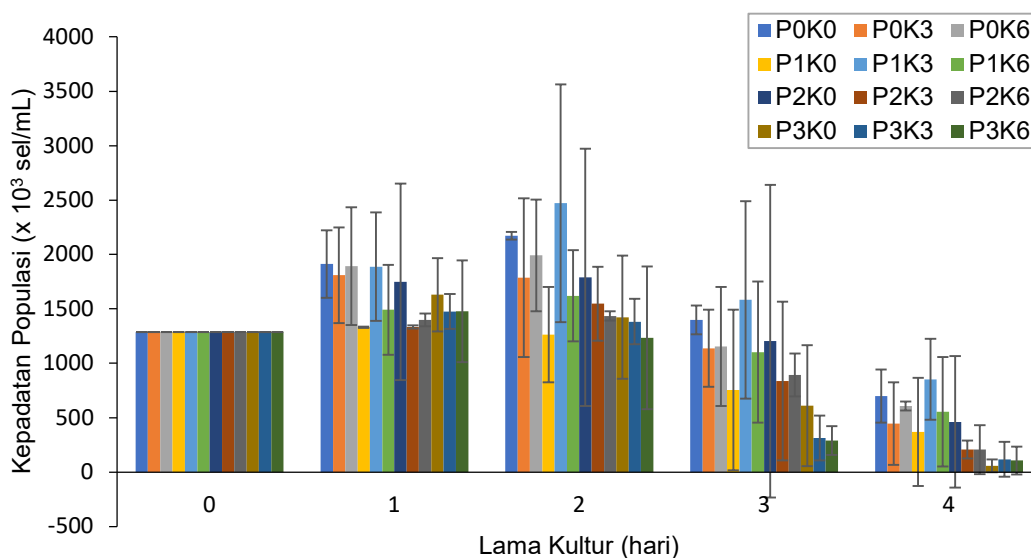
- Perlakuan P1K3 menghasilkan kepadatan tertinggi sepanjang periode kultur dengan puncak 2.592,0 ribu sel/mL
- Perlakuan kontrol (P0K0) menunjukkan performa yang baik dengan puncak 2.172,0 ribu sel/mL
- Perlakuan dengan fosfor tinggi tanpa kalium (P3K0) menunjukkan performa terburuk dengan puncak hanya 1.422,9 ribu sel/mL dan penurunan drastis pada hari berikutnya
- Penambahan kalium pada fosfor tinggi (P3K3, P3K6) sedikit memperbaiki pertumbuhan dibanding P3K0, namun tetap jauh lebih rendah dari perlakuan optimal

Pola ini menegaskan bahwa keseimbangan fosfor dan kalium sangat penting untuk mempertahankan pertumbuhan optimal *Chaetoceros amami*, dimana konsentrasi fosfor berlebih (≥ 2 ppm) bersifat menghambat pertumbuhan bahkan dengan suplementasi kalium yang memadai.

Fase eksponensial atau pertumbuhan cepat terjadi antara H1 hingga H2, dimana terjadi peningkatan kepadatan sel yang sangat signifikan. Pada fase ini, sebagian besar perlakuan mencapai kepadatan puncak populasi. Perlakuan P1K3 menunjukkan pertumbuhan eksponensial terbaik dengan mencapai kepadatan puncak 2.971.375 sel/mL pada H2 (ulangan 3), yang kemudian stabil pada H3. Perlakuan kontrol (K0P0) juga menunjukkan pertumbuhan eksponensial yang baik, mencapai kepadatan puncak antara 2.131.034 - 2.196.324 sel/mL pada H2, yang kemudian menurun pada H3.

Pola pertumbuhan berbeda terlihat pada perlakuan dengan fosfor tinggi. Perlakuan K0P3 menunjukkan kepadatan puncak yang rendah pada H1 (1.560.450 sel/mL) yang kemudian menurun drastis pada H2-H3. Demikian pula perlakuan K6P3 mencapai puncak pada H1 (2.002.778 sel/mL) kemudian menurun cepat. Hal ini

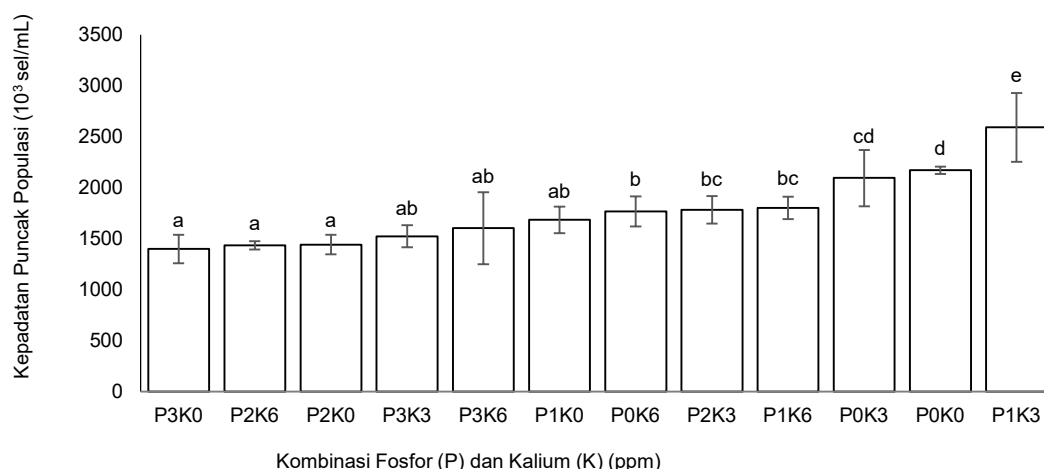
mengindikasikan bahwa konsentrasi fosfor 3 ppm menyebabkan pertumbuhan terhambat dan fase kematian terjadi lebih awal.



Gambar 1. Kepadatan populasi sel *Chaetoceros amami* (sel/mL) pada berbagai kombinasi fosfor (0, 1, 2, 3 ppm) dan kalium (0, 3, 6 ppm) selama periode kultur 96 jam. Bar error menunjukkan standar deviasi dari tiga ulangan. P = fosfor (ppm); K = kalium (ppm).

Kepadatan Puncak Populasi Sel

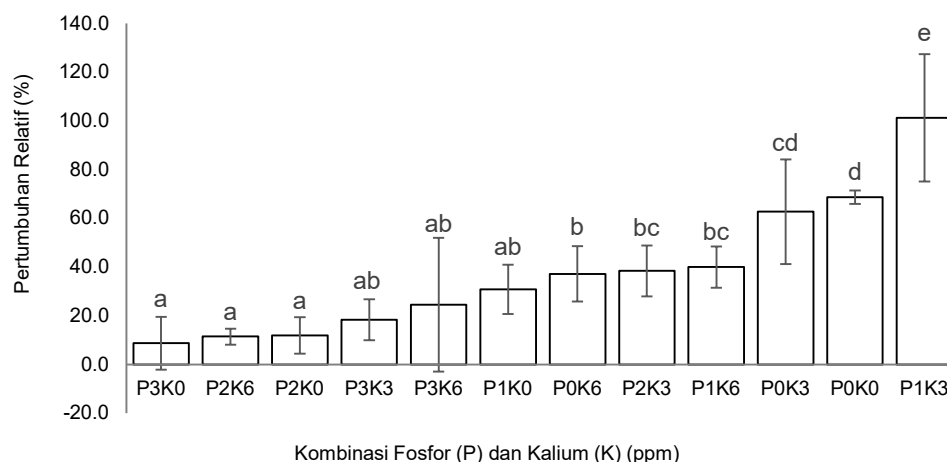
Kepadatan puncak populasi sel merupakan indikator utama produktivitas kultur mikroalga yang mencerminkan kemampuan sel untuk tumbuh dan berkembang dalam kondisi media tertentu. Parameter ini menjadi acuan penting dalam optimasi produksi massal mikroalga untuk aplikasi akuakultur. Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa konsentrasi fosfor, kalium, dan interaksinya memberikan pengaruh yang nyata terhadap kepadatan puncak populasi sel *Chaetoceros amami* ($p < 0,05$). Kepadatan puncak populasi tertinggi dicapai oleh perlakuan P1K3 (Gambar 1) dengan nilai rata-rata $2.592.000 \pm 337.000$ sel/mL, berbeda nyata dengan perlakuan lainnya ($p < 0,05$) berdasarkan uji BNT 5%. Perlakuan ini menunjukkan konsistensi tinggi dengan kepadatan puncak pada ketiga ulangan sebesar 2.476.400, 2.328.200, dan 2.971.400 sel/mL.



Gambar 2. Kepadatan puncak populasi sel *Chaetoceros amami* (sel/mL) pada berbagai kombinasi konsentrasi fosfor (0, 1, 2, 3 ppm) dan kalium (0, 3, 6 ppm) selama periode kultur 96 jam. Huruf yang berbeda pada batang diagram menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0,05$) berdasarkan uji BNT 5%. Bar error menunjukkan standar deviasi dari tiga ulangan. P = fosfor (ppm); K = kalium (ppm).

Pertumbuhan Relatif

Pertumbuhan relatif menggambarkan persentase peningkatan biomassa sel selama periode kultur yang mencerminkan efisiensi pemanfaatan nutrisi oleh mikroalga. Parameter ini penting untuk mengevaluasi kualitas formulasi media kultur dalam mendukung pertumbuhan sel. Analisis ragam menunjukkan bahwa fosfor, kalium, dan interaksinya berpengaruh nyata terhadap pertumbuhan relatif *Chaetoceros amami* ($p < 0,05$). Pertumbuhan relatif tertinggi dicapai oleh perlakuan P1K3 (Gambar 2) sebesar $101,3 \pm 26,2\%$, yang berbeda sangat nyata dengan semua perlakuan lainnya berdasarkan uji BNT 5% ($24,7\%$) ($p < 0,05$). Nilai ini menunjukkan bahwa sel *Chaetoceros amami* mampu meningkatkan populasinya lebih dari satu kali lipat dari kepadatan awal selama periode kultur.



Gambar 3. Pertumbuhan relatif *Chaetoceros amami* (%) pada berbagai kombinasi konsentrasi fosfor (0, 1, 2, 3 ppm) dan kalium (0, 3, 6 ppm) selama periode kultur 96 jam. Huruf yang berbeda pada batang diagram menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji BNT 5% ($p < 0,05$). Bar error menunjukkan standar deviasi dari tiga ulangan. P = fosfor (ppm); K = kalium (ppm).

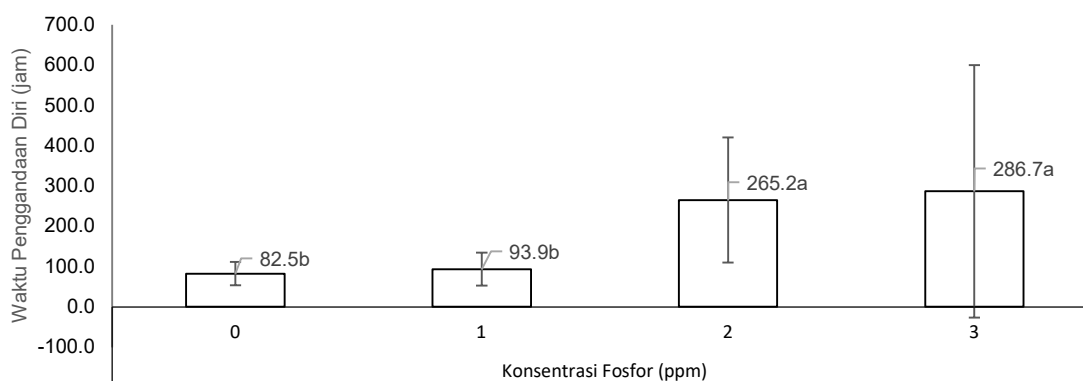
Perlakuan kontrol (P0K0) menghasilkan pertumbuhan relatif $68,7 \pm 2,8\%$, tidak berbeda nyata dengan P0K3 ($62,7 \pm 21,5\%$) ($p > 0,05$). Perlakuan dengan fosfor 1 ppm menunjukkan variasi pertumbuhan relatif yang lebar tergantung konsentrasi kalium: P1K0 ($30,8 \pm 10,1\%$), P1K3 ($101,3 \pm 26,2\%$), dan P1K6 ($40,0 \pm 8,5\%$). Peningkatan konsentrasi fosfor di atas 1 ppm menyebabkan penurunan drastis pertumbuhan relatif. Pada fosfor 2 ppm, pertumbuhan relatif berkisar 11,5 - 38,4%, sedangkan pada fosfor 3 ppm hanya 8,7 - 24,5%. Perlakuan P3K0 menunjukkan pertumbuhan relatif terendah ($8,7 \pm 10,8\%$), yang tidak berbeda nyata dengan P2K6 ($11,5 \pm 3,3\%$) dan K0P2 ($11,9 \pm 7,4\%$) ($p > 0,05$). Standar deviasi yang tinggi pada beberapa perlakuan, terutama P1K3 (26,2%) dan P3K6 (27,5%), mengindikasikan adanya variabilitas respons antar ulangan yang kemungkinan disebabkan oleh faktor lingkungan mikro atau kondisi fisiologis inokulum awal.

Waktu Penggandaan Diri

Waktu penggandaan diri merupakan parameter kinetika pertumbuhan yang menunjukkan kecepatan reproduksi sel dan efisiensi proses pembelahan sel dalam merespon ketersediaan nutrisi. Parameter ini berbanding terbalik dengan pertumbuhan relatif, dimana waktu penggandaan diri yang lebih singkat mengindikasikan laju pertumbuhan yang lebih cepat. Analisis ragam menunjukkan bahwa fosfor dan kalium secara terpisah berpengaruh nyata terhadap waktu penggandaan diri ($p < 0,05$). Namun demikian, interaksi antara keduanya tidak menunjukkan adanya pengaruh yang nyata ($p > 0,05$).

Pengaruh Konsentrasi Fosfor

Fosfor sebagai nutrisi esensial memiliki peran krusial dalam metabolisme sel, namun konsentrasinya perlu diatur secara tepat untuk menghindari efek toksisitas. Berdasarkan pengelompokan konsentrasi fosfor, waktu penggandaan diri terendah (tercepat) dicapai pada fosfor 0 ppm ($82,5 \pm 29,0$ jam) dan tidak berbeda nyata dengan fosfor 1 ppm ($93,9 \pm 41,0$ jam) ($p > 0,05$) berdasarkan uji BNT 5% (153,45 jam) (Gambar 3). Peningkatan konsentrasi fosfor menjadi 2 ppm dan 3 ppm menyebabkan perpanjangan waktu penggandaan diri secara signifikan menjadi $265,2 \pm 154,9$ jam dan $286,7 \pm 313,3$ jam.



Gambar 4. Waktu penggandaan diri atau *doubling time* (jam) *Chaetoceros amami* pada berbagai konsentrasi fosfor (0, 1, 2, 3 ppm). Huruf yang berbeda pada batang diagram menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji BNT 5% ($p < 0,05$). Bar error menunjukkan standar deviasi dari sembilan ulangan (tiga konsentrasi kalium $\times$ tiga ulangan).

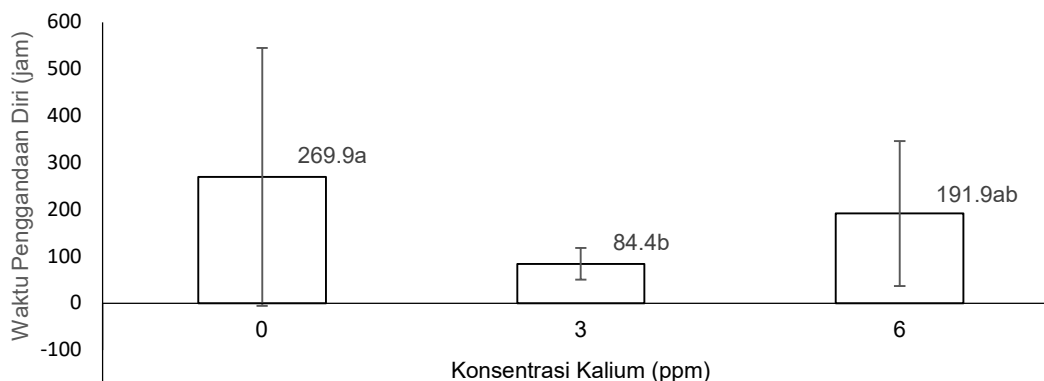
Pola ini mengindikasikan bahwa fosfor pada konsentrasi rendah hingga sedang (0-1 ppm) sudah mencukupi kebutuhan metabolisme sel untuk proses pembelahan. Media kultur yang diperkaya nitrogen 7,5 ppm dan silikat 15 ppm tampaknya telah menyediakan kondisi dasar yang memadai, sehingga penambahan fosfor hingga 1 ppm tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap kecepatan pembelahan sel. Namun, peningkatan konsentrasi fosfor di atas 1 ppm justru menghambat proses reproduksi sel secara drastis, dengan waktu penggandaan diri meningkat hingga 3,2 kali lipat pada fosfor 3 ppm dibandingkan kontrol.

Variabilitas data yang tinggi pada fosfor 3 ppm ($SD = 313,3$ jam) menunjukkan respons pertumbuhan yang sangat tidak konsisten, berkisar dari 37,7 jam (P3K6 ulangan 3) hingga 953,5 jam (P3K0 ulangan 1). Rentang variasi yang sangat lebar ini mengindikasikan ketidakstabilan fisiologis sel pada kondisi fosfor berlebih, dimana sel mengalami stres metabolik yang bervariasi tergantung kondisi mikrolingkungan dan status fisiologis awal. Pada perlakuan P3K0 ulangan 1, waktu penggandaan diri mencapai 953,5 jam atau setara dengan 39,7 hari, yang jauh melampaui periode kultur normal dan mengindikasikan terjadinya fase kematian prematur akibat toksisitas fosfor yang diperberat oleh defisiensi kalium.

Pengaruh Konsentrasi Kalium

Kalium berperan penting dalam regulasi osmotik dan aktivasi enzim yang mendukung proses pembelahan sel. Konsentrasi kalium 3 ppm menghasilkan waktu penggandaan diri tercepat ($84,5 \pm 33,6$ jam), dan berbeda nyata dengan kalium 0 ppm ($269,9 \pm 275,4$ jam) ($p < 0,05$) berdasarkan uji BNT 5% (132,89 jam) (Gambar 4). Konsentrasi kalium 6 ppm menghasilkan waktu penggandaan diri intermediate ($191,9 \pm 154,6$ jam) dan tidak berbeda nyata dengan kedua perlakuan lainnya ($p > 0,05$). Hasil ini menunjukkan bahwa kalium memiliki konsentrasi optimal yang jelas pada 3 ppm untuk memaksimalkan kecepatan pembelahan sel. Pada konsentrasi ini, kalium dapat menjalankan fungsinya secara efektif dalam mengatur tekanan osmotik sel, mengaktivasi enzim-enzim yang terlibat dalam sintesis protein dan fotosintesis, serta memfasilitasi transportasi ion melalui membran sel. Standar deviasi yang relatif rendah (33,6 jam atau 39,8% dari rerata) pada perlakuan ini mengindikasikan konsistensi respons sel yang baik terhadap kondisi nutrisi optimal.

Defisiensi kalium (0 ppm) menyebabkan perpanjangan waktu penggandaan diri hingga lebih dari tiga kali lipat dibandingkan konsentrasi optimal (3 ppm), dengan variabilitas yang sangat tinggi (SD = 275,4 jam atau 102,0% dari rerata), berkisar dari 62,3 jam hingga 953,5 jam. Variabilitas ekstrem ini menunjukkan bahwa tanpa suplementasi kalium, pertumbuhan sel menjadi sangat tidak stabil dan bergantung pada cadangan kalium internal serta kemampuan sel untuk memobilisasi kalium dari medium dasar. Beberapa ulangan masih menunjukkan waktu penggandaan diri yang relatif cepat (62,3-86,5 jam), mengindikasikan bahwa sebagian sel masih mampu memanfaatkan kalium yang tersedia dalam jumlah terbatas atau memiliki mekanisme adaptasi yang lebih baik.



Gambar 5. Waktu penggandaan diri atau *doubling time* (jam) *Chaetoceros amami* pada berbagai konsentrasi kalium (0, 3, 6 ppm). Huruf yang berbeda pada batang diagram menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0,05$). Bar error menunjukkan standar deviasi dari dua belas ulangan (empat konsentrasi fosfor $\times$ tiga ulangan).

Konsentrasi kalium yang terlalu tinggi (6 ppm) menyebabkan peningkatan waktu penggandaan diri menjadi 191,9 jam, meskipun masih lebih baik dibandingkan kondisi defisiensi. Fenomena ini mengindikasikan adanya efek penghambatan pertumbuhan pada konsentrasi kalium berlebih, kemungkinan disebabkan oleh stres osmotik akibat akumulasi ion kalium yang berlebihan di dalam sel. Standar deviasi

yang tinggi (154,6 jam) pada perlakuan ini menunjukkan respons yang bervariasi, dengan waktu penggandaan diri berkisar dari 37,7 jam (P3K6 ulangan 3) hingga 524,0 jam (P3K6 ulangan 2), mengindikasikan bahwa efek inhibisi kalium tinggi dapat diperberat atau dikurangi oleh interaksi dengan konsentrasi fosfor.

Pola Interaksi Fosfor-Kalium

Meskipun analisis statistik tidak menunjukkan pengaruh interaksi yang signifikan, pola data mengindikasikan adanya keterkaitan antara kedua nutrisi dalam mempengaruhi kecepatan pembelahan sel. Kombinasi P1K3 memberikan waktu penggandaan diri terpendek (48,9 jam rerata dari tiga ulangan: 50,9, 56,2, dan 39,8 jam). Sebaliknya, kombinasi P3K0 menghasilkan waktu penggandaan diri terlama (522,7 jam), menunjukkan efek sinergis negatif antara kelebihan fosfor dan defisiensi kalium.

Data menunjukkan pola yang menarik dimana kombinasi optimal kedua nutrisi (P1K3) mampu mempercepat pembelahan sel hingga 23,2% dibandingkan kontrol (P0K0 dengan waktu penggandaan diri 63,7 jam). Konsistensi data pada kombinasi P1K3 sangat baik dengan rentang hanya 11,1 jam antar ulangan (39,8-56,2 jam), mengindikasikan bahwa kondisi nutrisi ini memberikan lingkungan yang stabil dan optimal untuk reproduksi sel.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa pada konsentrasi fosfor rendah (0-1 ppm), penambahan kalium cenderung mempercepat pembelahan sel. Pada fosfor 1 ppm, waktu penggandaan diri menurun dari 131,0 jam (P1K0) menjadi 48,9 jam (P1K3), kemudian sedikit meningkat menjadi 101,7 jam (P1K6). Pola ini mengonfirmasi bahwa kalium 3 ppm merupakan konsentrasi optimal yang dapat memaksimalkan efisiensi pemanfaatan fosfor dalam proses metabolisme sel.

Sebaliknya, pada konsentrasi fosfor tinggi (2-3 ppm), efek kalium menjadi tidak konsisten. Pada fosfor 3 ppm, penambahan kalium tidak mampu mengatasi efek toksisitas fosfor secara konsisten. Waktu penggandaan diri pada P3K0 (522,7 jam), P3K3 (110,2 jam), dan P3K6 (227,3 jam) menunjukkan variasi yang lebar. Meskipun P3K3 menunjukkan waktu penggandaan diri yang relatif lebih baik, standar deviasi yang tinggi mengindikasikan ketidakstabilan sistem. Data pada fosfor 3 ppm menunjukkan bahwa tiga ulangan dapat memiliki waktu penggandaan diri yang sangat berbeda, seperti pada P3K6 dengan rentang 37,7-524,0 jam, mengindikasikan bahwa pada kondisi fosfor berlebih, faktor lain seperti kondisi fisiologis awal sel dan variabilitas mikrolingkungan menjadi sangat berpengaruh.

Tidak signifikannya interaksi secara statistik ($p > 0,05$) diduga disebabkan oleh variabilitas data yang tinggi pada perlakuan fosfor tinggi, yang meningkatkan nilai galat percobaan. Namun, pola biologis yang terlihat tetap memberikan informasi penting bahwa keseimbangan fosfor dan kalium sangat krusial untuk mempertahankan laju pembelahan sel yang optimal dan konsisten.

Kualitas Air

Kualitas air merupakan faktor pendukung yang mempengaruhi keberhasilan kultur mikroalga dan perlu dipantau secara berkala untuk memastikan kondisi kultur tetap optimal. Monitoring parameter fisika-kimia air dilakukan untuk mengonfirmasi bahwa variasi pertumbuhan yang terjadi benar-benar disebabkan oleh perlakuan nutrisi, bukan oleh faktor lingkungan lainnya. Parameter kualitas air yang diukur selama periode kultur menunjukkan kondisi yang stabil dan berada dalam kisaran optimal untuk pertumbuhan *Chaetoceros amami* (Tabel 1). Suhu berkisar 28-30°C (kisaran optimal: 20-30°C), salinitas 29 ppt (kisaran optimal: 25-35 ppt), intensitas

cahaya 4.500-5.000 lux (kisaran optimal: 2.000-8.000 lux), dan pH 9 (kisaran optimal: 7-9). Stabilitas parameter kualitas air ini memastikan bahwa perbedaan pertumbuhan antar perlakuan benar-benar disebabkan oleh variasi konsentrasi fosfor dan kalium, bukan oleh faktor lingkungan lainnya.

Tabel 1. Parameter kualitas air selama periode kultur *Chaetoceros amami*

No	Parameter	Nilai Terukur	Kisaran Optimal	Referensi
1	Suhu (°C)	29±1	20-30	Sas <i>et al.</i> (2023)
2	Salinitas (ppt)	29	25-35	Gammanpila <i>et al.</i> (2015)
3	pH	9	7-9	Leng <i>et al.</i> (2025)
4	Intensitas cahaya (lux)	4.500-5.000	2.000-8.000	Tokushima <i>et al.</i> (2016)

Keterangan: Data merupakan rata-rata dari pengukuran harian selama periode kultur ± standar deviasi.

PEMBAHASAN

Pola Pertumbuhan dan Kepadatan Puncak Populasi Sel

Kepadatan sel *Chaetoceros amami* mencerminkan dinamika pertumbuhan populasi yang dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi dan kondisi lingkungan kultur. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pertumbuhan *Chaetoceros amami* mengikuti pola pertumbuhan mikroalga klasik dengan empat fase berbeda: fase lag (adaptasi), fase eksponensial (pertumbuhan cepat), fase penurunan laju pertumbuhan, dan fase kematian. Semua perlakuan menunjukkan peningkatan pertumbuhan yang pesat setelah hari ke-1 dan terus berlangsung hingga hari ke-3 kultur, mengindikasikan bahwa periode ini merupakan fase eksponensial dimana semua nutrisi dan energi yang dibutuhkan untuk fotosintesis tersedia dalam jumlah yang cukup.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian pupuk anorganik dengan konsentrasi fosfor dan kalium yang berbeda memberikan pengaruh yang nyata terhadap kepadatan populasi sel *Chaetoceros amami* ($p < 0,05$). Kepadatan tertinggi mencapai 2.592.000 sel/mL pada hari ke-2 hingga ke-3, dengan perlakuan P1K3 menghasilkan kepadatan populasi tertinggi yang berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya ($p < 0,05$). Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi konsentrasi kalium 3 ppm dan fosfor 1 ppm memberikan kontribusi maksimal terhadap pertumbuhan sel. Perlakuan P3K0 menghasilkan kepadatan populasi yang paling rendah (1.399.800 sel/mL), mengindikasikan bahwa konsentrasi fosfor yang terlalu tinggi tanpa suplementasi kalium yang memadai menyebabkan ketidakseimbangan nutrisi dan efek toksisitas.

Fosfor berperan krusial dalam pembentukan ATP, asam nukleat (DNA dan RNA), serta fosfolipid penyusun membran sel. Penelitian Shih *et al.* (2015) pada diatom *Chaetoceros affinis* menunjukkan bahwa defisiensi fosfor menginduksi ekspresi gen yang terkait dengan akuisisi nutrisi, termasuk alkaline phosphatase dan Na⁺/Pi cotransporter tipe II. Namun, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan fosfor di atas 1 ppm justru menurunkan kepadatan puncak secara konsisten. Pada konsentrasi fosfor 2 ppm, kepadatan berkisar 1.435.000-1.781.900 sel/mL, sedangkan pada fosfor 3 ppm hanya 1.399.800-1.603.400 sel/mL. Fenomena ini mengindikasikan terjadinya *fosfor-induced toxicity*, dimana akumulasi fosfor berlebih dalam sel dapat mengganggu homeostasis seluler dan menghambat proses metabolisme.

Tantanasarit *et al.* (2013) melaporkan bahwa *Chaetoceros calcitrans* memiliki konstanta setengah jenuh (K_s) untuk fosfat sebesar $133 \mu\text{M}$ dengan laju penyerapan maksimum $0,0088 \text{ pmol/sel/jam}$. Diatom memiliki kemampuan *luxury phosphate uptake* dimana sel dapat menyerap dan menyimpan fosfor melebihi kebutuhan metabolik segera dalam bentuk polifosfat intraseluler. Namun, akumulasi polifosfat yang berlebihan dapat menyebabkan perubahan pH intraseluler dan gangguan pada regulasi ion, yang pada akhirnya menghambat pembelahan sel dan menurunkan viabilitas kultur.

Kalium berperan penting dalam regulasi osmotik sel, aktivasi enzim, dan transportasi ion melalui membran sel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kalium pada konsentrasi fosfor rendah (0-1 ppm) cenderung meningkatkan kepadatan puncak. Pada fosfor 1 ppm, penambahan kalium 3 ppm menghasilkan peningkatan kepadatan puncak sebesar 53,9% dibanding tanpa kalium (dari 1.684.400 menjadi 2.592.000 sel/mL). Li *et al.* (2023) mengidentifikasi bahwa diatom *Phaeodactylum tricornutum* memiliki sistem transportasi kalium yang efisien, termasuk high affinity potassium transporter (HAK), Na^+/K^+ -ATPase, dan H^+ -ATPase, yang berperan penting dalam mempertahankan rasio K^+/Na^+ tinggi dalam kondisi stres salinitas.

Interaksi sinergis antara fosfor dan kalium pada perlakuan P1K3 diduga terkait dengan peran komplementer kedua nutrisi dalam metabolisme energi dan sintesis membran. Helliwell *et al.* (2021) menemukan bahwa diatom menggunakan jalur sinyal Ca^{2+} yang bergantung pada fosfor untuk mengkoordinasikan metabolisme nitrogen, mengindikasikan adanya mekanisme *cross-talk* antar nutrisi. Dalam konteks penelitian ini, kalium optimal (3 ppm) kemungkinan memfasilitasi aktivasi enzim-enzim yang terlibat dalam pemanfaatan fosfor untuk sintesis ATP dan asam nukleat, sehingga meningkatkan efisiensi konversi nutrisi menjadi biomassa sel.

Keberhasilan perlakuan kontrol (P0K0) dalam menghasilkan kepadatan 2.172.000 sel/mL mengindikasikan bahwa media dasar yang diperkaya nitrogen (7,5 ppm) dan silikat (15 ppm) sudah memadai untuk mendukung pertumbuhan basal *Chaetoceros amami*. Lovio-Fragoso *et al.* (2019) melaporkan bahwa *Chaetoceros muelleri* mencapai kepadatan tertinggi pada konsentrasi fosfor $72 \mu\text{M}$ (setara 2,2 ppm P), yang lebih tinggi dari konsentrasi optimal dalam penelitian ini. Perbedaan ini mengindikasikan adanya variasi spesies-spesifik dalam kebutuhan fosfor optimal, yang kemungkinan terkait dengan perbedaan ukuran sel, laju metabolisme, dan mekanisme penyimpanan fosfor intraseluler.

Pertumbuhan Relatif sebagai Indikator Efisiensi Pemanfaatan Nutrien

Pertumbuhan relatif menggambarkan kemampuan sel untuk meningkatkan biomassa selama periode kultur, yang mencerminkan efisiensi pemanfaatan nutrisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi konsentrasi kalium dan fosfor memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pertumbuhan relatif *Chaetoceros amami* ($p < 0,05$). Perlakuan P1K3 menghasilkan pertumbuhan relatif tertinggi sebesar $101,3 \pm 26,2\%$, mengindikasikan bahwa sel mampu meningkatkan populasinya lebih dari dua kali lipat dari kepadatan awal. Nilai ini jauh melebihi perlakuan kontrol ($68,7 \pm 2,8\%$) dan perlakuan lainnya, menunjukkan superioritas kombinasi fosfor 1 ppm dan kalium 3 ppm dalam mengoptimalkan proses metabolisme sel.

Kalium berperan sebagai kofaktor dalam aktivasi lebih dari 50 jenis enzim yang terlibat dalam sintesis protein, fotosintesis, dan respirasi seluler. Ion K^+ berfungsi dalam regulasi tekanan osmotik sel, mempertahankan potensial membran, dan homeostasis osmotik (Li *et al.*, 2023). Dalam konteks metabolisme karbon, kalium

diperlukan untuk aktivasi enzim RuBisCO (Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) yang merupakan enzim kunci dalam fiksasi CO₂ selama fotosintesis. Defisiensi kalium dapat mengganggu efisiensi fotosintesis dan menurunkan kapasitas sintesis biomassa.

Fosfor memainkan peran penting dalam produksi lipid, hasil asam lemak, dan proses metabolik seperti transfer energi, transduksi sinyal, dan fotosintesis. Penelitian Hongo *et al.* (2023) pada diatom *Chaetoceros tenuissimus* menunjukkan bahwa defisiensi fosfor menginduksi ekspresi gen yang terkait dengan degradasi fosfolipid dan sintesis nonphospholipid untuk mengkonservasi fosfor. Dalam penelitian ini, penambahan fosfor 1 ppm kemungkinan memenuhi kebutuhan fosfor untuk sintesis fosfolipid membran tanpa menyebabkan akumulasi berlebih yang dapat mengganggu homeostasis sel.

Pertumbuhan relatif yang rendah pada perlakuan fosfor tinggi (P2 dan P3) mengindikasikan terjadinya ketidakseimbangan nutrisi. Perlakuan P3K0 menunjukkan pertumbuhan relatif terendah ($8,7 \pm 10,8\%$), yang hanya 8,6% dari pertumbuhan pada perlakuan P1K3. Assobhi *et al.* (2024) menyatakan bahwa ketidakseimbangan rasio nutrisi dalam kultivasi mikroalga menginduksi stres fisiologis seluler yang menurunkan efisiensi fotosintesis dan berdampak negatif terhadap laju pertumbuhan serta kualitas biomassa. Dalam konteks penelitian ini, kelebihan fosfor tanpa kalium yang memadai kemungkinan menyebabkan akumulasi polifosfat intraseluler yang mengganggu pH sitoplasma dan fungsi organel sel.

Pertumbuhan relatif yang cukup tinggi pada perlakuan P0K0 (68,7%) dan P0K3 (62,7%) mengindikasikan bahwa *Chaetoceros amami* masih mampu memanfaatkan cadangan nutrisi internal atau nutrisi yang tersedia dalam medium dasar. Penelitian Yoshimura *et al.* (2014) pada diatom di Pasifik Subarktik menunjukkan bahwa produksi *dissolved organic phosphorus* (DOP) selama bloom diatom mencapai 4,5-5,5% dari akumulasi fosfor organik total, mengindikasikan adanya mekanisme internal *recycling* fosfor. Kemampuan adaptasi ini memiliki keterbatasan dan tidak dapat mempertahankan laju pertumbuhan optimal dalam jangka panjang, sehingga suplementasi nutrisi yang seimbang tetap diperlukan.

Standar deviasi yang tinggi pada perlakuan P1K3 (26,2%) mengindikasikan adanya variabilitas respons antar ulangan. Variabilitas ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan kondisi fisiologis inokulum awal atau variasi mikrolingkungan dalam wadah kultur. Namun, nilai rerata yang secara konsisten tinggi (101,3%) menunjukkan bahwa kombinasi P1K3 tetap merupakan perlakuan terbaik untuk memaksimalkan pertumbuhan relatif.

Waktu Penggandaan Diri dan Kinetika Pertumbuhan

Waktu penggandaan diri (WPD) merupakan parameter kinetika pertumbuhan yang menunjukkan kecepatan reproduksi sel dan berbanding terbalik dengan laju pertumbuhan spesifik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fosfor dan kalium secara terpisah berpengaruh nyata terhadap waktu penggandaan diri ($p < 0,05$), namun interaksi antara fosfor dan kalium tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$). Pola ini berbeda dengan parameter kepadatan puncak dan pertumbuhan relatif dimana interaksi fosfor-kalium menunjukkan efek sinergis yang signifikan.

Mekanisme Efek Fosfor terhadap Waktu Penggandaan Diri

Konsentrasi fosfor memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap waktu penggandaan diri *Chaetoceros amami* ($p < 0,05$). Perlakuan tanpa penambahan fosfor (0 ppm) dan konsentrasi fosfor 1 ppm menghasilkan waktu penggandaan diri yang

lebih singkat ($82,5 \pm 29,0$ jam dan $93,9 \pm 41,0$ jam) dibandingkan dengan konsentrasi fosfor 2 ppm dan 3 ppm ($265,2 \pm 154,9$ jam dan $286,7 \pm 313,3$ jam). Fenomena ini mengindikasikan adanya efek inhibisi atau toksisitas pada konsentrasi fosfor yang terlalu tinggi.

Fosfor merupakan komponen esensial dalam pembentukan ATP, asam nukleat, dan fosfolipid membran sel. Chiriboga & Rorrer (2019) pada diatom *Cyclotella* sp. menemukan bahwa kebutuhan minimum fosfor untuk pembelahan sel adalah $9,4 \pm 0,7 \mu\text{mol P}/10^9$ sel. Dalam penelitian ini, media dasar yaitu air laut alami yang diperkaya nitrogen (7,5 ppm) dan silikat (15 ppm) kemungkinan sudah menyediakan fosfor dalam jumlah cukup untuk mendukung pembelahan sel normal, sehingga penambahan fosfor hingga 1 ppm tidak memberikan perbedaan signifikan dengan kontrol.

Peningkatan konsentrasi fosfor menjadi 2 ppm dan 3 ppm menyebabkan perpanjangan waktu penggandaan diri secara drastis, dengan waktu penggandaan diri meningkat hingga 3,2 kali lipat pada fosfor 3 ppm dibandingkan kontrol ($82,5$ vs $286,7$ jam). Ma *et al.* (2022) melaporkan bahwa konsentrasi fosfor yang tinggi dapat mengubah pH medium kultur dan memicu presipitasi dengan ion-ion logam, sehingga mengurangi ketersediaan nutrisi lain yang diperlukan untuk pertumbuhan. Dalam konteks penelitian ini, akumulasi fosfor berlebih kemungkinan menyebabkan ketidakseimbangan rasio N:P yang menghambat sintesis protein dan pembelahan sel. Variabilitas data yang tinggi pada fosfor 3 ppm (SD = 313,3 jam atau 109,2% dari rerata) menunjukkan respons pertumbuhan yang sangat tidak konsisten, berkisar dari 37,7 jam (P3K6 ulangan 3) hingga 953,5 jam (P3K0 ulangan 1). Hongo *et al.* (2023) melaporkan bahwa *Chaetoceros tenuissimus* di bawah defisiensi fosfor mengalami penurunan regulasi gen yang terkait dengan siklus Calvin dan glikolisis/glukoneogenesis, yang menyebabkan penurunan aktivitas fotosintesis dan laju pertumbuhan. Dalam penelitian ini, meskipun fosfor tersedia berlebih pada perlakuan P3, ketidakseimbangan dengan nutrisi lain (khususnya kalium pada P3K0) kemungkinan menginduksi stres fisiologis yang serupa, menyebabkan variabilitas tinggi dalam respons sel.

Peran Kalium dalam Regulasi Waktu Penggandaan Diri

Konsentrasi kalium menunjukkan pola yang lebih jelas dalam mempengaruhi waktu penggandaan diri. Konsentrasi kalium 3 ppm menghasilkan waktu penggandaan diri tercepat ($84,5 \pm 33,6$ jam), yang berbeda nyata dengan kalium 0 ppm ($269,9 \pm 275,4$ jam) ($p < 0,05$) berdasarkan uji BNT 5% (132,89 jam). Konsentrasi kalium 6 ppm menghasilkan waktu penggandaan diri intermediate ($191,9 \pm 154,6$ jam) dan tidak berbeda nyata dengan kedua perlakuan lainnya ($p > 0,05$), mengindikasikan bahwa terdapat konsentrasi optimal yang jelas pada 3 ppm.

Kalium berperan sebagai kofaktor dalam aktivasi enzim-enzim yang terlibat dalam sintesis protein, fotosintesis, dan respirasi seluler. Li *et al.* (2023) mengidentifikasi bahwa algae memiliki empat sistem utama transportasi kalium: high affinity potassium transporter (HAK), Na^+/K^+ -ATPase (NaK), H^+ -ATPase (AHA), dan sistem K^+/H^+ high affinity transport. Pada konsentrasi kalium 3 ppm, sistem-sistem ini kemungkinan bekerja optimal dalam mempertahankan konsentrasi K^+ intraseluler yang tinggi dan rasio K^+/Na^+ yang sesuai untuk fungsi metabolisme normal.

Defisiensi kalium (0 ppm) menyebabkan perpanjangan waktu penggandaan diri hingga lebih dari tiga kali lipat dibandingkan konsentrasi optimal (3 ppm), dengan variabilitas yang sangat tinggi (SD = 275,4 jam atau 102,0% dari rerata). Helliwell *et al.* (2021) menunjukkan bahwa diatom menggunakan jalur sinyal Ca^{2+} yang

bergantung pada fosfor untuk mengoordinasikan asimilasi nitrogen, dan proses ini kemungkinan juga melibatkan transportasi kalium. Defisiensi kalium dapat mengganggu gradien elektrokimia membran sel dan regulasi tekanan turgor, yang keduanya penting untuk pembelahan sel normal.

Beberapa ulangan pada perlakuan K0 masih menunjukkan waktu penggandaan diri yang relatif cepat (62,3-86,5 jam), mengindikasikan bahwa sebagian sel masih mampu memanfaatkan kalium yang tersedia dalam jumlah terbatas atau memiliki mekanisme adaptasi yang lebih baik. Air laut steril yang digunakan sebagai media kultur mengandung kalium dalam konsentrasi rendah (sekitar 400 mg/L atau 10 mM), yang kemungkinan masih dapat dimanfaatkan oleh sel dengan sistem transportasi high affinity. Namun, ketersediaan kalium yang terbatas ini tidak dapat mendukung pertumbuhan optimal dalam jangka panjang.

Konsentrasi kalium yang terlalu tinggi (6 ppm) menyebabkan peningkatan waktu penggandaan diri menjadi 191,9 jam, meskipun masih lebih baik dibandingkan kondisi defisiensi. Fenomena ini mengindikasikan adanya efek penghambatan pertumbuhan pada konsentrasi kalium berlebih, kemungkinan disebabkan oleh stres osmotik akibat akumulasi ion kalium yang berlebihan di dalam sel. Standar deviasi yang tinggi (154,6 jam) pada perlakuan ini menunjukkan respons yang bervariasi, dengan waktu penggandaan diri berkisar dari 37,7 jam hingga 524,0 jam, mengindikasikan bahwa efek inhibisi kalium tinggi dapat diperberat atau dikurangi oleh interaksi dengan konsentrasi fosfor.

Interaksi Fosfor-Kalium dalam Konteks Waktu Penggandaan Diri

Meskipun analisis statistik tidak menunjukkan pengaruh interaksi yang signifikan ($p > 0,05$), pola data mengindikasikan adanya keterkaitan biologis antara kedua nutrisi dalam mempengaruhi kecepatan pembelahan sel. Kombinasi P1K3 memberikan waktu penggandaan diri terpendek (48,9 jam rerata dari tiga ulangan: 50,9, 56,2, dan 39,8 jam), menunjukkan peningkatan 23,2% dibandingkan kontrol (P0K0 dengan waktu penggandaan diri 63,7 jam). Konsistensi data pada kombinasi P1K3 sangat baik dengan rentang hanya 11,1 jam antar ulangan (39,8-56,2 jam), mengindikasikan bahwa kondisi nutrisi ini memberikan lingkungan yang stabil dan optimal untuk reproduksi sel.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa pada konsentrasi fosfor rendah (0-1 ppm), penambahan kalium cenderung mempercepat pembelahan sel. Pada fosfor 1 ppm, waktu penggandaan diri menurun dari 131,0 jam (P1K0) menjadi 48,9 jam (P1K3), kemudian sedikit meningkat menjadi 101,7 jam (P1K6). Pola ini mengonfirmasi bahwa kalium 3 ppm merupakan konsentrasi optimal yang dapat memaksimalkan efisiensi pemanfaatan fosfor dalam proses metabolisme sel. Sebaliknya, pada konsentrasi fosfor tinggi (2-3 ppm), efek kalium menjadi tidak konsisten. Pada fosfor 3 ppm, penambahan kalium tidak mampu mengatasi efek toksisitas fosfor secara konsisten. Waktu penggandaan diri pada P3K0 (522,7 jam), P3K3 (110,2 jam), dan P3K6 (227,3 jam) menunjukkan variasi yang lebar. Meskipun P3K3 menunjukkan waktu penggandaan diri yang relatif lebih baik, standar deviasi yang tinggi mengindikasikan ketidakstabilan sistem.

Tidak signifikannya interaksi secara statistik ($p > 0,05$) kemungkinan disebabkan oleh variabilitas data yang tinggi pada perlakuan fosfor tinggi, yang meningkatkan nilai galat percobaan (mean square error = 24.873,7). Zhao *et al.* (2025) melaporkan bahwa defisiensi fosfor dan silikon secara bersamaan pada diatom *Nitzschia closterium* f. *minutissima* menyebabkan akumulasi asam lemak jenuh yang lebih tinggi dan menurunkan asam lemak tak jenuh ganda, yang mengindikasikan stres membran

sel. Dalam konteks penelitian ini, ketidakseimbangan fosfor-kalium pada perlakuan seperti P3K0 kemungkinan menginduksi stres membran yang serupa, menyebabkan variabilitas tinggi dalam respons sel antar ulangan.

Namun, pola biologis yang terlihat tetap memberikan informasi penting bahwa keseimbangan fosfor dan kalium sangat krusial untuk mempertahankan laju pembelahan sel yang optimal dan konsisten. Penelitian Jiao *et al.* (2023) menunjukkan bahwa spesies fosfor (inorganik vs organik) dan stres logam berat secara sinergis mempengaruhi pertumbuhan dan fisiologi diatom *Thalassiosira weissflogii*, mengindikasikan pentingnya mempertimbangkan interaksi multipel nutrisi dalam optimasi kultur mikroalga.

Mekanisme Fisiologis dan Biokimia

Diatom memiliki sistem transportasi nutrisi yang kompleks dan spesies-spesifik. Shih *et al.* (2015) mengidentifikasi bahwa *Chaetoceros affinis* memiliki "classical" alkaline phosphatase dan dua tipe II Na⁺/Pi cotransporter yang berbeda dari model diatom lain seperti *Thalassiosira pseudonana* dan *Phaeodactylum tricornutum*. Dalam penelitian ini, kemampuan *Chaetoceros amami* untuk merespons berbagai konsentrasi fosfor dan kalium kemungkinan dimediasi oleh sistem transportasi yang serupa.

Tantanasarit *et al.* (2013) melaporkan bahwa *Chaetoceros calcitrans* menunjukkan kinetika penyerapan nutrisi mengikuti model Michaelis-Menten dengan K_s untuk fosfat sebesar 133 µM dan laju penyerapan maksimum 0,0088 pmol/sel/jam. Dalam penelitian ini, konsentrasi fosfor 1 ppm (setara 32,3 µM P) berada di bawah nilai K_s, mengindikasikan bahwa laju penyerapan fosfor masih dalam kisaran linier terhadap konsentrasi substrat. Peningkatan konsentrasi fosfor menjadi 2-3 ppm (64,5-96,8 µM P) kemungkinan sudah mendekati atau melampaui kapasitas penyerapan maksimum, menyebabkan akumulasi fosfor ekstraseluler dan perubahan pH medium yang menghambat pertumbuhan.

Li *et al.* (2023) menunjukkan bahwa sistem transportasi kalium pada algae melibatkan empat protein utama dengan motif dan struktur sekunder yang sangat berbeda antar kelompok taksonomi. Ekspresi HAK (*high affinity potassium transporter*) dan NaK1 (Na⁺/K⁺-ATPase) secara signifikan diinduksi oleh kondisi kalium rendah, namun menurun pada kondisi stres salinitas atau salinitas-alkalinitas. Dalam konteks penelitian ini, konsentrasi kalium 3 ppm kemungkinan optimal untuk mengaktifkan sistem transportasi tanpa menginduksi stres osmotik yang berlebihan.

Mekanisme Adaptasi terhadap Ketidakseimbangan Nutrien

Ketidakseimbangan nutrisi menginduksi serangkaian respons adaptif pada tingkat molekuler dan seluler. Hongo *et al.* (2023) melaporkan bahwa defisiensi fosfor pada *Chaetoceros tenuissimus* menyebabkan peningkatan regulasi secara drastis gen alkaline phosphatase, phosphodiesterase, phytase, phosphate transporter, dan transcription factor. Gen yang terkait dengan degradasi fosfolipid dan sintesis nonphospholipid juga up-regulated, mengindikasikan bahwa sel berusaha mengkonservasi fosfor dengan mengubah komposisi membran dari fosfolipid menjadi nonphospholipid seperti betaine lipid dan sulfolipid.

Dalam penelitian ini, pertumbuhan relatif yang masih cukup tinggi pada perlakuan P0K0 (68,7%) dan P0K3 (62,7%) mengindikasikan bahwa *Chaetoceros amami* mampu memanfaatkan mekanisme adaptasi serupa. Namun, penurunan drastis pertumbuhan relatif pada perlakuan fosfor tinggi (P3K0: 8,7%) menunjukkan

bahwa kelebihan fosfor tanpa kalium yang memadai menyebabkan stres yang melampaui kapasitas adaptasi sel.

Wu *et al.* (2023) melaporkan bahwa polyunsaturated aldehydes (PUAs) yang diproduksi oleh diatom selama fase post-bloom berperan penting dalam *recycling* fosfor organik melalui modulasi aktivitas alkaline phosphatase (APase) pada bakteri yang menempel pada partikel. Dalam penelitian ini, fase kematian yang terjadi lebih awal pada perlakuan fosfor tinggi (dimulai pada H2-H3) kemungkinan terkait dengan produksi PUAs yang menginduksi lisis sel dan pelepasan fosfor organik.

Implikasi terhadap Metabolisme Energi dan Fotosintesis

Fosfor dan kalium memiliki peran komplementer dalam metabolisme energi dan fotosintesis. Zhou *et al.* (2016) menunjukkan bahwa aluminum meningkatkan pertumbuhan diatom *Thalassiosira weissflogii* pada kondisi limitasi fosfor dengan meningkatkan proporsi cellular alkaline phosphatase activity (APA) dan efisiensi pemanfaatan dissolved organic phosphorus (DOP). Dalam penelitian ini, kombinasi optimal fosfor-kalium pada perlakuan P1K3 kemungkinan meningkatkan efisiensi pemanfaatan fosfor melalui mekanisme yang serupa.

Kalium berperan penting dalam aktivasi enzim RuBisCO dan regulasi stomata (dalam konteks diatom: regulasi osmotik). Ma *et al.* (2022) melaporkan bahwa ketersediaan nitrogen dan fosfor mempengaruhi toleransi diatom *Phaeodactylum tricornutum* terhadap cadmium dengan meningkatkan ion-binding sites pada permukaan sel dan menurunkan depolarisasi dinding sel. Dalam penelitian ini, konsentrasi kalium optimal (3 ppm) kemungkinan memfasilitasi pembentukan ion-binding sites yang sesuai untuk penyerapan fosfor dan nutrisi lain secara efisien.

Penelitian Hernanz-Torrijos *et al.* (2025) menunjukkan bahwa ketersediaan fosfat dan kualitas cahaya berinteraksi dalam modulasi produksi polyunsaturated fatty acids (PUFA) dan polyunsaturated aldehydes (PUA) pada diatom pantai. Konsentrasi fosfat tinggi dan cahaya cool white menurunkan produksi PUA pada *Skeletonema pseudocostatum*, sedangkan *Cyclotella cryptica* menunjukkan produksi PUA yang stabil dengan peningkatan ketersediaan PUFA pada kondisi fosfat rendah dan cahaya cool. Dalam konteks penelitian ini, parameter kualitas air yang stabil (suhu 28-30°C, intensitas cahaya 4.500-5.000 lux) kemungkinan meminimalkan variabilitas yang terkait dengan interaksi cahaya-nutrien.

Implikasi Ekologis dan Aplikasi Praktis

Konsentrasi optimal fosfor 1 ppm dan kalium 3 ppm yang ditemukan dalam penelitian ini memiliki relevansi ekologis terhadap kondisi perairan alami. Chai *et al.* (2021) melaporkan bahwa bloom diatom dan dinoflagellata di Selat Johor (Malaysia) terkait dengan ketidakseimbangan nutrisi yang didorong oleh cycling nitrogen dan fosfor di sedimen anaerobik. Pelepasan fosfor yang terikat besi dari sedimen dan simultan removal nitrogen melalui denitrifikasi dan anammox menyebabkan penurunan rasio N:P yang memicu dominasi diatom penyebab HAB seperti *Skeletonema* dan *Chaetoceros*.

Dalam konteks budidaya kerang mutiara, konsentrasi fosfor yang terlalu tinggi dapat menyebabkan eutrofikasi lokal yang memicu bloom fitoplankton yang tidak diinginkan. Egge (1998) melaporkan bahwa diatom tidak mampu mendominasi ketika fosfat defisien, meskipun silikat dan nitrat tersedia berlebih. Dominasi diatom menurun dari 72-74% pada kondisi semua nutrisi tersedia menjadi 45-55% ketika fosfat tidak disuplai. Dalam penelitian ini, media yang diperkaya nitrogen dan silikat dengan

penambahan fosfor terbatas (1 ppm) terbukti optimal untuk produksi *Chaetoceros amami*, mengindikasikan pentingnya menjaga rasio N:P:Si yang seimbang.

Aplikasi untuk Produksi Massal Pakan Alami

Hasil penelitian ini memiliki implikasi praktis yang signifikan untuk produksi massal *Chaetoceros amami* sebagai pakan alami dalam budidaya kerang mutiara *Pinctada maxima*. Kombinasi optimal fosfor 1 ppm dan kalium 3 ppm pada penelitian ini menghasilkan peningkatan kepadatan puncak hingga 19,3%, pertumbuhan relatif 47,5%, dan percepatan waktu penggandaan diri 23,2% dibandingkan kontrol. Efisiensi ini sangat penting untuk operasional hatchery yang memerlukan produksi fitoplankton dalam jumlah besar secara konsisten.

Yang *et al.* (2014) melaporkan bahwa konsentrasi optimal nutrisi untuk lima spesies diatom bentuk bervariasi dalam kisaran 12,36-74,16 mg/L untuk nitrogen, 1,70-3,98 mg/L untuk fosfor, 2,00-4,00 mg/L untuk besi, dan 23,01-69,03 mg/L untuk silikon. Dalam konteks penelitian ini, kombinasi nitrogen 7,5 ppm, fosfor 1 ppm, kalium 3 ppm, dan silikat 15 ppm berada dalam kisaran yang sesuai untuk produksi diatom yang efisien.

Konsistensi data pada perlakuan P1K3 (standar deviasi rendah untuk kepadatan puncak dan waktu penggandaan diri) mengindikasikan bahwa formulasi ini memberikan hasil yang reproducible, yang merupakan kriteria penting untuk aplikasi skala industri. Khoi *et al.* (2006) melaporkan bahwa untuk pertumbuhan *Chaetoceros calcitrans* dalam ekstrak sedimen tambak *Artemia*, konsentrasi DRP di atas 0,06 mg P/L dengan rasio DIN:DRP di bawah 150 sesuai untuk pertumbuhan optimal. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan tersebut, dimana fosfor 1 ppm (setara 1 mg P/L) dengan nitrogen 7,5 ppm memberikan rasio N:P sebesar 7,5:1 (molar ratio sekitar 16:1 N:P), yang mendekati rasio Redfield optimal untuk pertumbuhan fitoplankton.

Efisiensi Ekonomi dan Keberlanjutan

Dari perspektif ekonomi, penggunaan konsentrasi fosfor yang lebih rendah (1 ppm vs 2-3 ppm) dengan suplementasi kalium yang moderat (3 ppm) dapat mengurangi biaya produksi secara signifikan. Fosfor merupakan salah satu nutrisi yang relatif mahal dan ketersediaannya terbatas secara global. Optimasi penggunaan fosfor tidak hanya mengurangi biaya operasional tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan dengan meminimalkan potensi eutrofikasi pada perairan penerima limbah kultur.

Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi: (1) kualitas biokimia *Chaetoceros amami* yang diproduksi pada berbagai kombinasi fosfor-kalium, khususnya kandungan PUFA (EPA dan DHA) yang krusial untuk nutrisi larva kerang; (2) respons larva kerang mutiara terhadap pemberian *Chaetoceros amami* dari berbagai perlakuan nutrisi; (3) skalabilitas formulasi optimal ke sistem kultur volume besar; dan (4) stabilitas kultur dalam jangka panjang dengan sistem semi-continuous atau continuous culture.

KESIMPULAN

Konsentrasi fosfor dan kalium, baik secara mandiri maupun melalui interaksinya, berpengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap kepadatan puncak populasi sel dan pertumbuhan relatif *Chaetoceros amami*, namun interaksi keduanya tidak berpengaruh nyata ($p > 0,05$) terhadap waktu penggandaan diri. Kombinasi fosfor 1 ppm dan kalium 3 ppm (P1K3) merupakan formulasi optimal yang menghasilkan performa terbaik, dengan kepadatan puncak 2.592.000 sel/ml, pertumbuhan relatif

101,3%, dan waktu penggandaan diri 48,9 jam, atau meningkat 19,3–47,5% dibandingkan kontrol. Sebaliknya, peningkatan konsentrasi fosfor di atas 1 ppm tanpa diimbangi kalium yang memadai menimbulkan efek toksisitas yang menghambat produktivitas sel, sebagaimana ditunjukkan oleh performa terendah pada perlakuan P3K0. Temuan ini menegaskan pentingnya keseimbangan nutrisi fosfor dan kalium, bukan hanya peningkatan konsentrasi secara individual, dalam menentukan produktivitas optimal *C. amami*.

Hasil penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi penyusunan protokol kultur massal *C. amami* yang efisien dan ekonomis sebagai pakan alami untuk mendukung budidaya kerang mutiara *Pinctada maxima*, khususnya pada skala pemeliharaan laboratorium. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji kandungan biokimia (terutama profil asam lemak tak jenuh ganda/PUFA) pada formulasi optimal ini, serta menguji skalabilitas dan stabilitas formulasi tersebut pada sistem kultur volume besar dan jangka waktu pemeliharaan yang lebih panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis menyampaikan terimakasih yang tulus kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Penelitian ini merupakan bagian dari pengembangan materi untuk program pengabdian pada masyarakat skema kemitraan Universitas Mataram yang didanai melalui DIPA BLU (PNBP) dengan nomor kontrak 4124/UN18.L1/PP/2025. Ucapan terimakasih khusus disampaikan kepada kepala Laboratorium Pakan Alami dan Pimpinan PT. Mutiara Surya Indonesia, Sambelia, Nusa Tenggara Barat serta kepada semua kolase peneliti yang telah membantu diberbagai tahap penelitian. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada kemajuan pengetahuan ilmiah dan aplikasi praktis di bidang budidaya mikroalga.

DAFTAR PUSTAKA

- Abinandan, S., & Shanthakumar, S. (2015). Challenges and opportunities in application of microalgae (Chlorophyta) for wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.086>
- Agus, M., & Rahardjo, B. (2013). Pengaruh Perbedaan Dosis Pupuk Phospat Terhadap Pertumbuhan Phytoplankton. *Pena: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 25(1), 85-89. <https://doi.org/10.31941/jurnalpena.v25i1.95>
- Assobhi, B., Ennasry, H., Latique, S., Kara, M., Alaoui Mhamdi, M., & Bahhou, J. (2024). Influence of salinity, nitrogen and phosphorus concentrations on the physiological and biochemical characteristics of two Chlorophyceae isolated from Fez freshwater, Morocco. *Scientific Reports*, 14(1), 8259. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58864-4>
- Auliyah, A., Mukhlis, A., & Asri, Y. (2024). Pertumbuhan dan tingkat kelangsungan hidup spat kerang mutiara (*Pinctada maxima*) dengan kombinasi fitoplankton *Chaetoceros amami* dan *Nitzschia* sp. *Journal of Fish Nutrition*, 3(1), 29-38. <https://doi.org/10.29303/jfn.v3i1.5254>
- Bossa, R., Colandrea, M. D., Salbitani, G., & Carfagna, S. (2024). Phosphorous Utilization in Microalgae: Physiological Aspects and Applied Implications. *Plants*, 13. <https://doi.org/10.3390/plants13152127>

- Chai, X., Li, X., Hii, K. S., Zhang, Q., Deng, Q., Wan, L., Zheng, L., Lim, P. T., Tan, S. N., Mohd-Din, M., Song, C., Song, L., Zhou, Y., & Cao, X. (2021). Blooms of diatom and dinoflagellate associated with nutrient imbalance driven by cycling of nitrogen and phosphorus in anaerobic sediments in Johor Strait (Malaysia). *Marine Environmental Research*, 169, 105398. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105398>
- Chiriboga, O., & Rorrer, G. L. (2019). Phosphate addition strategies for enhancing the co-production of lipid and chitin nanofibers during fed-batch cultivation of the diatom *Cyclotella* sp. *Algal Research*, 38, 101403. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.101403>
- Dewi, D. K., Santoso, P., & Dahoklory, N. (2023). Karakteristik pertumbuhan *Chaetoceros* sp. berdasarkan intensitas cahaya yang berbeda. *JVIP*, 3(2), 96-100. <http://dx.doi.org/10.35726/jvip.v3i2.6896>
- Egge, J. K. (1998). Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations? *Journal of Marine Systems*, 16(3-4), 191-198. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(97\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(97)00113-9)
- Febrinawati, N., Putri, B., & Hudaidah, S. (2020). Pemanfaatan limbah budidaya udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) sebagai media kultur *Chaetoceros amami*. *Jurnal Perikanan Unram*, 10(1), 20-28. <https://doi.org/10.29303/jp.v10i1.199>
- Gammanpila, A. M., Rupasinghe, C. P., & Subasinghe, S. (2015). Cultivation of microalgae; *Chaetoceros calcitrans* for biodiesel production as affected by different nitrate concentrations and salinity levels. *2nd International Conference of Multidisciplinary Approaches*, 212.
- Hasby, R. M., & Suantika, G. (2016). Limitasi Nitrat Untuk Pertumbuhan Dan Akumulasi Lipid *Chaetoceros calcitrans*. *Biotika Jurnal Ilmiah Biologi*, 14(1), 66-71. <https://doi.org/10.24198/bjib.v14i1.14416>
- Helliwell, K. E., Harrison, E. L., Christie-Oleza, J. A., Rees, A. P., Kleiner, F. H., Gaikwad, T., Downe, J., Aguilo-Ferretjans, M. M., Al-Moosawi, L., Brownlee, C., & Wheeler, G. L. (2021). A novel Ca²⁺ signaling pathway coordinates environmental phosphorus sensing and nitrogen metabolism in marine diatoms. *Current Biology*, 31(5), 978-989.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.11.073>
- Hernanz-Torrijos, M., Bartual, A., & Ortega, M. J. (2025). Modulation of PUFA and PUA production in coastal diatoms by varying light and phosphate availability. *Algal Research*, 92, 104365. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104365>
- Hongo, Y., Hano, T., Yamaguchi, H., & Tomaru, Y. (2023). Transcriptional responses of the marine diatom *Chaetoceros tenuissimus* to phosphate deficiency. *Gene*, 884, 147695. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2023.147695>
- Huki, T., Santoso, P., & Tjendanawangi, A. (2023). Pertumbuhan dan kelangsungan hidup larva kerang mutiara yang diberi pakan *Chaetoceros* sp. dengan dosis yang berbeda. *Jurnal Vokasi Ilmu-Ilmu Perikanan (JVIP)*, 4(1), 112-117. <http://dx.doi.org/10.35726/jvip.v4i1.7128>
- Jiao, K., Yang, H., Huang, X., Liu, F., & Li, S. (2023). Effects of phosphorus species and zinc stress on growth and physiology of the marine diatom *Thalassiosira weissflogii*. *Chemosphere*, 337, 139308. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139308>
- Khoi, C. M., Guong, V. T., & Merckx, R. (2006). Growth of the diatom *Chaetoceros calcitrans* in sediment extracts from *Artemia franciscana* ponds at different concentrations of nitrogen and phosphorus. *Aquaculture*, 259(1-4), 354-364. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.05.050>

- Krishnaswami, V., Kumar, N., Nakkella, L. K., Chinta, S., & Gummadi, S. N. (2025). Optimization of culture medium for enhanced biomass and hydrocarbon production by the benthic diatom *Psammodyctyon panduriforme*. *Bioresource Technology*, 418, 131818. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131818>
- Lante, S., & Herlinah, H. (2015). Pengaruh pakan alami *Chaetoceros* spp. terhadap perkembangan dan sintasan larva udang windu, *Penaeus monodon*. *Jurnal Riset Akuakultur*, 10(3), 389-396. <http://dx.doi.org/10.15578/jra.10.3.2015.389-396>
- Leng, Y., Li, Y., Meng, F., & Sun, W. (2025). Diatom *Chaetoceros calcitrans* MZB-1 for degrading propylbenzenes in seawater: Cultivation conditions, degradation kinetics, and influencing factors. *Marine Environmental Research*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.107154>
- Li, W., Zhang, Y., Ren, H., Wang, Z., OuYang, Y., Wang, S., Hussain, J., Zeb, I., Kong, Y., Liu, S., & Qi, G. (2023). Identification of potassium transport proteins in algae and determination of their role under salt and saline-alkaline stress. *Algal Research*, 69, 102923. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102923>
- Lovio-Fragoso, J. P., López-Elías, J. A., Voltolina, D., Peña-Rodríguez, A., Castro-Ochoa, F. Y., Arambul-Muñoz, E., Martínez-Córdova, L. R., & Serrano-Pinto, V. (2019). Effect of different phosphorus concentrations on growth and biochemical composition of *Chaetoceros muelleri*. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 47(2), 361-366. <http://dx.doi.org/10.3856/vol47-issue2-fulltext-17>
- Ma, J., Chen, F., Zhou, B., Zhang, Z., & Pan, K. (2022). Effects of nitrogen and phosphorus availability on cadmium tolerance in the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Science of The Total Environment*, 838, 156615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156615>
- Miranti, S., Mukhlis, A., & Syukur, A. (2025). The effect of natural feed density variation during immersion on the growth of pearl oyster (*Pinctada maxima*) spat in laboratory conditions. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(3), 4197-4206. <https://doi.org/10.29303/jbt.v25i3.9853>
- Moreira, J. B., Fernandes, B. D., Dragone, G., Teixeira, J. A., & Rocha, C. M. R. (2025). Diatoms as a source of high-value compounds: Cultivation strategies and biorefinery approaches. *Bioresource Technology*, 418, 131906. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131906>
- Mufidah, A., Agustono, S., & Nindarwi, D. D. (2017). Teknik Kultur Chlorella sp. Skala Laboratorium dan Intermediet Di Balai Perikanan Budidaya Air Payau (BPBAP) Situbondo Jawa Timur. *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 7(2), 50-56. <https://www.researchgate.net/publication/333874572>
- Mukhlis, A., Abidin, Z., & Rahman, I. (2017). Pengaruh konsentrasi pupuk ammonium sulfat terhadap pertumbuhan populasi sel *Nannochloropsis* sp. *Bio Wallacea Jurnal Ilmiah Ilmu Biologi*, 3(3), 149-155.
- Mukti, C. A. (2018). *Pengaruh salinitas yang berbeda terhadap pertumbuhan produksi biomassa, klorofil-a dan protein Chaetoceros muelleri* [Skripsi]. Universitas Brawijaya.
- Nagappan, S., Devendran, S., Tsai, P. C., Jayaraman, V., Alagarsamy, V., Pugazhendhi, A., & Kumar, G. (2021). Metabolomics integrated with transcriptomics and proteomics: Evaluation of systems reaction to nitrogen deficiency stress in microalgae. *Process Biochemistry*, 104, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.02.016>

- Rashid, N., Rehman, M. S. U., & Han, J. I. (2013). Recycling and reuse of spent growth medium for improved algal biomass production. *Biochemical Engineering Journal*, 73, 75-80. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2013.04.001>
- Retnowati, Y., Bialangi, N., & Posangi, N. W. (2011). Pertumbuhan Bakteri *Staphylococcus aureus* Pada Media Yang Diekspos Dengan Infus Daun Sambiloto (*Andrographis paniculata*). *Jurnalq Sainstek*, 6(2). <https://ejurnal.unq.ac.id/index.php/ST/article/view/405>
- Sas, A. A. A., Arshad, A., Das, S. K., Pau, S. S. N., & Cob, Z. C. (2023). Optimum Temperature and Salinity Conditions for Growth, Lipid Contents, and Fatty Acids Composition of Centric Diatoms *Chaetoceros Calcitrans* and *Thalassiosira Weissflogii*. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 31(2), 689–707. <https://doi.org/10.47836/pjst.31.2.04>
- Shelford, V. E. (2020). The law of toleration. In *Animal communities in temperate America* (pp. 156-178). University of Chicago Press.
- Shih, C. Y., Kang, L. K., & Chang, J. (2015). Transcriptional responses to phosphorus stress in the marine diatom, *Chaetoceros affinis*, reveal characteristic genes and expression patterns in phosphorus uptake and intracellular recycling. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 470, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2015.05.001>
- Tantanasarit, C., Englande, A. J., & Babel, S. (2013). Nitrogen, phosphorus and silicon uptake kinetics by marine diatom *Chaetoceros calcitrans* under high nutrient concentrations. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 446, 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.05.004>
- Tokushima, H., Inoue-Kashino, N., Nakazato, Y., Masuda, A., Ifuku, K., & Kashino, Y. (2016). Advantageous characteristics of the diatom *Chaetoceros gracilis* as a sustainable biofuel producer. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0649-0>
- Widiyanto, A., B. Susilo dan R. Yulianingsih. (2014). Studi kultur semi-massal mikroalga *Chlorella* sp. pada area tambak dengan media air payau (di Desa Rayunggumuk, Kec. Glagah, Kab. Lamongan). *Jurnal Bioproses Komoditas Tropis*. 2 (1) : 1 – 7. <https://jbkt.ub.ac.id/index.php/jbkt/article/view/127>
- Wijanarka, W & Yusuf, H., (2024). Isolation and Characterization Of Inulinase Enzyme-Producing Microbes From Banana Fruit (*Musa paradisiaca*). *Agric*, 36(1), 39-52. <https://doi.org/10.24246/agric.2024.v36.i1.p39-52>
- Wu, Z., Li, Q. P., Rivkin, R. B., & Lin, S. (2023). Role of diatom-derived oxylipins in organic phosphorus recycling during coastal diatom blooms in the northern South China Sea. *Science of The Total Environment*, 903, 166518. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166518>
- Xing, D., Li, X., Wang, Y., Deng, S., Jin, C., Zhao, Y., & Guo, L. (2023). The comprehensive impact of phosphorus sources on microalgae biochemical metabolism and phosphorus transformation. *Journal of Water Process Engineering*, 51, 103477–103477. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103477>
- Yaakob, M. A., Mohamed, R. M. S. R., Al-Gheethi, A., Aswathnarayana Gokare, R., & Ambati, R. R. (2021). Influence of nitrogen and phosphorus on microalgal growth, biomass, lipid, and fatty acid production: An overview. *Cells*, 10(2), 393. <https://doi.org/10.3390/cells10020393>
- Yang, M., Zhao, W., & Xie, X. (2014). Effects of nitrogen, phosphorus, iron and silicon on growth of five species of marine benthic diatoms. *Acta Ecologica Sinica*, 34(6), 311-319. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2014.10.003>

- Yoshimura, T., Nishioka, J., Ogawa, H., Kuma, K., Saito, H., & Tsuda, A. (2014). Dissolved organic phosphorus production and decomposition during open ocean diatom blooms in the subarctic Pacific. *Marine Chemistry*, 165, 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.08.003>
- Yusoff, F. M., & Wong, C. Y. (2023). Microalgae as live feed in aquaculture hatcheries. In *Handbook of microalgae-based processes and products* (pp. 615-644). Academic Press.
- Zainuri, M., Indriyawati, N., Syarifah, W., & Fitriyah, A. (2023). Korelasi intensitas cahaya dan suhu terhadap kelimpahan fitoplankton di Perairan Estuari Ujung Piring Bangkalan. *Buletin Oseanografi Marina*, 12(1), 20-26. <https://doi.org/10.14710/buloma.v12i1.44763>
- Zhang, C., Vadivambal, R., & Panigrahi, S. (2024). Optimization of nutrient concentrations for enhanced diatom biomass production: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113989. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113989>
- Zhao, J., Kong, N., Sun, S., Hao, W., Wang, B., Wang, L., & Song, L. (2025). Phosphorus and silicon starvation disrupts fatty acid balance in the diatom *Nitzschia closterium* f. *minutissima* and induces inflammatory responses in oyster larvae. *Water Biology and Security*, 100515. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100515>
- Zhou, L., Tan, Y., Huang, L., & Wang, W. X. (2016). Enhanced utilization of organic phosphorus in a marine diatom *Thalassiosira weissflogii*: A possible mechanism for aluminum effect under P limitation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 478, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.02.009>