

EVALUASI PENGGUNAAN LIMBAH PENDEDERAN IKAN KERAPU BEBEK
(*Cromileptes altivelis*) DENGAN KONSENTRASI BERBEDA SEBAGAI MEDIA KULTUR
Spirulina sp. SKALA MENENGAH

Ellen Larasati^{1*}, Ris Restu Pertiwi², Siti Hudaidah², Berta Putri², Fatimah Alhafizoh³, Wuni
Alfionita¹, dan Asmaul Husna¹

¹Budidaya Perairan, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia

²Budidaya Perairan, Jurusan Perikanan dan Kelautan, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

³Perikanan Tangkap, Jurusan Perikanan dan Kelautan, Politeknik Negeri Lampung, Bandar Lampung,
Indonesia

(Naskah diterima: 21 Agustus 2025; Revisi final: 07 Oktober 2025; Disetujui publikasi: 07 Oktober 2025)

ABSTRAK

Limbah pendederan ikan kerapu bebek (*Cromileptes altivelis*), kaya akan nitrogen (N) dan fosfor (P), berpotensi mencemari lingkungan apabila dibuang tanpa pengolahan. Penelitian ini bertujuan menentukan konsentrasi optimal limbah pendederan tersebut sebagai media kultur *Spirulina* sp. skala menengah. Limbah disaring (*filter* 25 μ m) dan disterilkan menggunakan autoklaf (121°C, 15 menit, 1 atm) pada konsentrasi 10%, 15%, 20% dan 25%. Kultur dilakukan selama 9 hari dalam wadah *fiberglass* volume 15 L, diinokulasi dengan kepadatan awal 1 x 10⁶ sel mL⁻¹, diaerasi secara terus-menerus, dan diberikan pencahayaan. Rancangan percobaan yang digunakan adalah rancangan acak lengkap (RAL) dengan tiga ulangan untuk mengevaluasi laju pertumbuhan *Spirulina* sp., penurunan konsentrasi nitrat dan fosfat, serta parameter kualitas air (suhu, salinitas, pH, dan intensitas cahaya). Hasil menunjukkan bahwa perlakuan limbah 20% menghasilkan kepadatan tertinggi (6,43 x 10⁶ sel mL⁻¹) dan efisiensi penurunan konsentrasi nitrat sebesar 96,0% (dari 5,99 ± 0,13 mg L⁻¹ menjadi 0,24 ± 0,05 mg L⁻¹) dan penurunan fosfat sebesar 67,7% (dari 6,66 ± 0,34 mg L⁻¹ menjadi 2,15 ± 0,32 mg L⁻¹). Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah pendederan *C. altivelis* yang disterilisasi efektif digunakan sebagai media kultur *Spirulina* sp. skala menengah, dengan konsentrasi 20% memberikan hasil pertumbuhan, efisiensi penyerapan nutrisi, dan kestabilan kualitas air terbaik, sehingga berpotensi diterapkan sebagai strategi bioremediasi berkelanjutan dalam konsep akuakultur sirkular.

KATA KUNCI: akuakultur berkelanjutan; bioremediasi; fosfat; limbah budidaya; nitrat; *Spirulina* sp.

ABSTRACT: *Evaluating Different Concentrations of Humpback Grouper (Cromileptes altivelis) Nursery Effluent as a Culture Medium for Intermediate-Scale Cultivation of Spirulina sp.*

Effluent from humpback grouper (Cromileptes altivelis) nursery operations is rich in nitrogen (N) and phosphorus (P), posing a risk of environmental pollution if discharged untreated. This

*Korespondensi: Budidaya Perairan, Fakultas Kelautan dan Perikanan,
Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia
Email: ellenlarasati@usk.ac.id

study aimed to determine the optimal concentration of humpback grouper nursery effluent as a rearing medium for *Spirulina* sp. cultured at an intermediate scale. The effluent was filtered (25 μm) and sterilized using an autoclave (121°C, 15 minutes, 1 atm) at concentrations of 10%, 15%, 20%, and 25%. *Spirulina* sp. was cultured at an initial density of 1×10^6 cells mL^{-1} in 15-L fiberglass tanks that were continuously aerated and illuminated for 9 days. A completely randomized design (CRD) with three replications was used to evaluate the growth rate of *Spirulina* sp., the reduction of nitrate and phosphate concentrations, and water quality parameters (temperature, salinity, pH, and light intensity). Results showed that the 20% wastewater produced the highest cell density (6.43×10^6 cells mL^{-1}) and achieved a nitrate concentration reduction efficiency of 96.0% (from 5.99 ± 0.13 mg L^{-1} to 0.24 ± 0.05 mg L^{-1}) and a phosphate reduction of 67.7% (from 6.66 ± 0.34 mg L^{-1} to 2.15 ± 0.32 mg L^{-1}). This study demonstrated that sterilized effluent from humpback grouper nursery can be used as the rearing medium for *Spirulina* sp. cultured at an intermediate scale, with a 20% concentration providing optimal growth, nutrient removal efficiency, and stable water quality, thereby supporting its potential use as a sustainable bioremediation and circular aquaculture strategy.

KEYWORDS: *aquaculture wastewater; bioremediation; nitrate; phosphate; Spirulina sp.; sustainable aquaculture*

PENDAHULUAN

Akuakultur saat ini menyumbang sekitar 54% dari total produksi perikanan dunia, menjadikannya sektor strategis bagi ketahanan pangan global (FAO, 2022). Namun, budidaya intensif, seperti budidaya ikan kerapu bebek (*Cromileptes altivelis*), menghasilkan limbah yang kaya akan nitrogen (N) dan fosfor (P) yang berasal dari sisa pakan dan ekskresi ikan (Zhang *et al.*, 2021). Konsentrasi nutrisi dalam limbah tersebut dapat mencapai 48,50 mg L^{-1} total nitrogen (TN) dan 15,94 mg L^{-1} total phosphor (TP) (Pratama, 2017), melebihi baku mutu lingkungan (Kepmen LH No. 51/2004: TN ≤ 10 mg L^{-1} , TP ≤ 2 mg L^{-1}). Akumulasi nutrisi memicu toksisitas amonia, eutrofikasi, dan degradasi ekosistem perairan (Nie *et al.*, 2020).

Salah satu solusi inovatif untuk mengurangi dampak limbah akuakultur adalah pemanfaatannya sebagai media kultur mikroalga, khususnya *Spirulina* sp. Pendekatan ini tidak hanya menurunkan beban pencemar air, tetapi juga menghasilkan biomassa bernilai tinggi sebagai sumber protein, nutrisi, dan senyawa bioaktif seperti fikosianin, sehingga sejalan

dengan konsep ekonomi sirkular (*circular bioeconomy*) (Chia *et al.*, 2021; Dahlin *et al.*, 2015). Bioremediasi berbasis mikroalga menawarkan alternatif berkelanjutan karena *Spirulina* sp. mampu mengasimilasi nitrogen dalam bentuk amonium (NH_4^+) dan fosfor sebagai ortofosfat (PO_4^{3-}) melalui fotosintesis (Markou *et al.*, 2014). Efisiensinya bahkan dilaporkan 30-50% lebih tinggi daripada bakteri nitrifikasi dalam mereduksi NH_3 (Liu *et al.*, 2019) serta 20% lebih unggul dari makroalga *Ulva* sp. dalam penyerapan fosfor (Ansari *et al.*, 2017). Pada aplikasi limbah *C. altivelis*, *Spirulina* sp. terbukti mampu menghasilkan biomassa hingga 4,2 g L^{-1} pada skala laboratorium (Hudaidah *et al.*, 2022), sekaligus menjaga kualitas air dalam batas toleransi budidaya (Sari *et al.*, 2020).

Meskipun demikian, pemanfaatan limbah *C. altivelis* menghadapi tantangan karena karakteristik uniknya, yaitu salinitas tinggi (30-35 ppt) dan rasio N:P rendah (3:1), jauh di bawah rasio Redfield (16:1) yang ideal bagi mikroalga autotrof (Markou *et al.*, 2014; Redfield 1958). Ketidakseimbangan nutrisi ini dapat menghambat sintesis protein *Spirulina* sp. (Li *et al.*, 2021) serta memicu

kompetisi dengan alga maupun bakteri lain akibat kelebihan fosfor (Wang *et al.*, 2022). Namun, *Spirulina* sp. memiliki kemampuan adaptasi melalui akumulasi polifosfat (Ahmad *et al.*, 2022), yang membuka peluang optimasi dengan penentuan konsentrasi limbah yang tepat. Sayangnya, studi yang mengeksplorasi skala menengah masih terbatas, padahal skala ini penting sebagai jembatan antara penelitian laboratorium dan aplikasi industri (Wang *et al.*, 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi optimal penggunaan limbah pendederan *C. altivelis* dengan konsentrasi berbeda sebagai media kultur semi-massal *Spirulina* sp. serta pengaruhnya terhadap pertumbuhan dan dinamika nutrisi (nitrat dan fosfat). Hasil penelitian diharapkan dapat mendukung penerapan konsep ekonomi sirkular, mengintegrasikan remediasi limbah dengan produksi biomassa bernilai tambah serta mendorong pengembangan sistem akuakultur terintegrasi yang berkelanjutan.

BAHAN DAN METODE

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Januari-Maret 2019 di Laboratorium Budidaya Perairan, Jurusan Perikanan dan Kelautan, Universitas Lampung.

Bahan dan Organisme Uji

Bahan utama yang digunakan adalah bibit murni *Spirulina* sp. yang diperoleh dari koleksi kultur Laboratorium Budidaya Perairan, Universitas Lampung serta limbah cair dari Balai Besar Perikanan Budidaya Laut (BBPBL) Lampung. Limbah cair disaring menggunakan *plankton net* berukuran 25 μm untuk memisahkan padatan tersuspensi. Filtrat (air hasil saringan) yang mengandung nutrisi terlarut diambil sebagai bahan baku media kultur, sedangkan padatan dibuang.

Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) dengan empat perlakuan dan tiga ulangan. Perlakuan berupa variasi proporsi limbah dan air laut terhadap total volume media kultur 15 L per wadah, dengan komposisi sebagai berikut:

- Perlakuan A: 25% limbah steril + 75% air laut
- Perlakuan B: 20% limbah steril + 80% air laut
- Perlakuan C: 15% limbah steril + 85% air laut
- Perlakuan D: 10% limbah steril + 90% air laut

Persiapan Media Kultur

Air laut terlebih dahulu difiltrasi menggunakan membran 0,45 μm , kemudian disterilisasi menggunakan autoklaf pada suhu 121°C dan tekanan 1 atm selama 15 menit sesuai standar APHA (2017). Limbah cair hasil penyaringan (filtrat) juga disterilisasi secara terpisah dengan prosedur yang sama. Setelah keduanya didinginkan hingga mencapai suhu ruang, limbah steril dan air laut steril dicampur secara aseptik sesuai proporsi perlakuan (10%, 15%, 20%, dan 25% limbah) untuk mendapatkan media kultur dengan volume total 15 L pada setiap wadah *fiberglass*. Prosedur pencampuran dilakukan di ruang bersih untuk mencegah kontaminasi. Media yang telah disiapkan kemudian segera digunakan untuk inokulasi *Spirulina* sp.

Pemeliharaan Kultur

Setiap wadah (15 L) diinokulasi dengan kultur *starter Spirulina* sp. hingga mencapai kepadatan awal 1×10^6 sel mL^{-1} . Kultur dipelihara selama 9 hari dengan aerasi kontinu. Suhu dijaga pada kisaran 26-28°C dengan mengatur pendingin ruangan (AC) laboratorium. Salinitas dipertahankan pada 35–40 ppt melalui penambahan akuades steril untuk menurunkan salinitas atau air laut steril untuk meningkatkan salinitas. Nilai pH dijaga pada kisaran 8–9 dengan penambahan larutan NaOH 0,1 N (untuk menaikkan) atau HCl 0,1

N (untuk menurunkan). Intensitas cahaya diatur sekitar 3.000 lux menggunakan lampu LED putih yang dinyalakan terus-menerus. Seluruh parameter kualitas air diukur setiap hari, dan apabila terjadi penyimpangan dari kisaran optimum dilakukan penyesuaian sesuai prosedur agar kondisi tetap stabil dan mendukung pertumbuhan *Spirulina* sp.

Pengambilan Sampel Media Kultur

Analisis konsentrasi nitrat (NO_3^-) dan ortofosfat (PO_4^{3-}) dilakukan terhadap media kultur *Spirulina* sp., yaitu campuran air laut steril dan limbah pendederan *C. altivelis* yang telah disterilasi, sesuai proporsi perlakuan (10%, 15%, 20%, dan 25%). Sampel diambil dari bagian tengah kolom air setiap wadah perlakuan untuk memperoleh sampel yang representatif. Pengambilan dilakukan pada hari ke-0 (awal kultur), hari ke-3, hari ke-6 (fase puncak pertumbuhan), dan hari ke-9 (akhir kultur) dengan volume masing-masing 10 mL. Tujuan pengukuran ini adalah untuk mengetahui perubahan konsentrasi nutrisi dalam media selama proses kultur, yang mencerminkan tingkat penyerapan nitrogen dan fosfor oleh *Spirulina* sp.

Parameter Penelitian

Pengamatan dilakukan terhadap parameter utama yang meliputi kepadatan sel *Spirulina* sp., konsentrasi nitrat (NO_3^-), dan ortofosfat (PO_4^{3-}) selama periode kultur. Pengamatan kepadatan sel dilakukan setiap 24 jam, sedangkan konsentrasi nitrat dan ortofosfat diukur pada hari ke-0, ke-3, ke-6, dan ke-9 dari setiap wadah perlakuan. Sampel diambil secara aseptik menggunakan pipet steril sebanyak 10 mL dari bagian tengah kolom air pada masing-masing wadah kultur untuk menghindari bias akibat sedimentasi atau gradien cahaya. Sampel kemudian dihomogenkan dan dibagi menjadi dua bagian, yaitu 5 mL untuk pengamatan kepadatan sel dan 5 mL untuk analisis kimia (nitrat dan ortofosfat).

Kepadatan sel *Spirulina* sp. diamati menggunakan *Sedgwick Rafter Counting Chamber* di bawah mikroskop cahaya dengan pembesaran 100x. Konsentrasi nitrat (NO_3^-) dianalisis menggunakan metode Brucin, sedangkan ortofosfat (PO_4^{3-}) menggunakan metode asam askorbat sesuai standar SNI 06-2480-1991. Pengukuran dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

Parameter kualitas air yang diamati selama penelitian meliputi suhu, pH, salinitas, dan intensitas cahaya. Suhu diukur menggunakan termometer digital, sedangkan pH diukur menggunakan pH meter portabel (Hanna Instruments pHep) yang dikalibrasi sebelum digunakan. Salinitas diukur menggunakan refraktometer manual (Atago), dan intensitas cahaya diukur menggunakan lux meter digital (LX-1010B) pada permukaan media kultur. Seluruh parameter kualitas air diamati setiap hari selama pemeliharaan, dan apabila terjadi penyimpangan dari kisaran optimum dilakukan penyesuaian sesuai prosedur yang telah ditetapkan.

Analisis Data

Data hasil pengamatan kepadatan sel, konsentrasi nitrat, dan ortofosfat dianalisis menggunakan ANOVA pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ untuk menentukan pengaruh perlakuan. Apabila terdapat perbedaan nyata, dilanjutkan uji beda nyata terkecil (BNT) untuk mengetahui perlakuan terbaik. Hubungan antara konsentrasi nitrat, ortofosfat, dan kepadatan sel *Spirulina* sp. dianalisis menggunakan analisis regresi linier dengan bantuan perangkat lunak SPSS versi 21.

HASIL DAN BAHASAN

Pertumbuhan *Spirulina* sp.

Pola pertumbuhan *Spirulina* sp. selama 9 hari kultur pada seluruh perlakuan mengikuti empat fase utama: fase lag, eksponensial, stasioner, dan deklinasi (Gambar 1). Pada fase lag (hari ke-0 dan 1), semua perlakuan

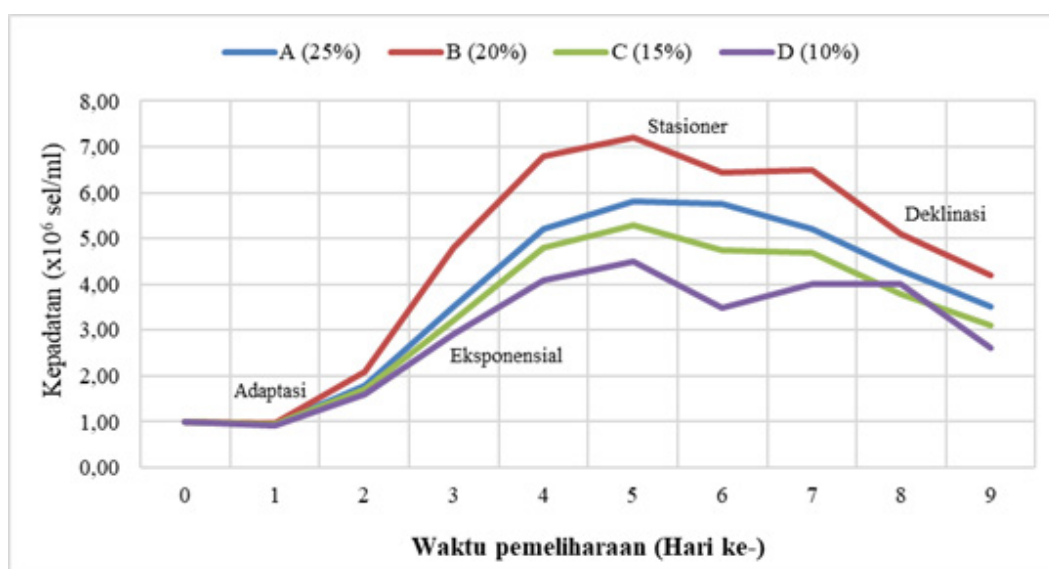
menunjukkan pola yang hampir sama, ditandai dengan penurunan kepadatan sel sekitar 5-10% dari inokulum awal (1×10^6 sel mL^{-1}). Penurunan ini disebabkan oleh proses adaptasi fisiologis sel terhadap media limbah dan pengaruh pengenceran saat persiapan media. Media kultur pada semua perlakuan yang memiliki rasio N:P awal yang relatif serupa (sekitar 1:1) menyebabkan tidak terlihatnya perbedaan signifikan antarperlakuan pada fase ini. Sel memerlukan waktu untuk menyesuaikan metabolisme terhadap media baru sehingga pertumbuhan belum terlihat signifikan. Adaptasi ini melibatkan aktivitas enzim, sintesis protein baru, dan penyesuaian sistem fotosintesis agar sesuai dengan kondisi media, sebelum sel dapat memasuki fase pembelahan aktif (Richmond & Hu, 2013).

Kultur kemudian memasuki fase eksponensial (hari ke-2 hingga 4), ditandai dengan peningkatan kepadatan sel hingga $\pm 50\%$ dari inokulum awal pada semua perlakuan (Gambar 1). Perlakuan B (20% limbah) menunjukkan laju pertumbuhan dan kepadatan sel yang secara konsisten lebih tinggi dibanding perlakuan lainnya sejak

hari ke-2, hingga mencapai puncak kepadatan ($6,43 \times 10^6$ sel mL^{-1}) pada hari ke-5 hingga 6 (Gambar 2). Kondisi ini mengindikasikan ketersediaan nutrisi yang optimal, terutama nitrat sebagai sumber nitrogen untuk sintesis protein, klorofil, dan asam nukleat, serta fosfat yang berperan dalam pembentukan ATP, membran sel, dan nukleotida (Yoo *et al.*, 2020).

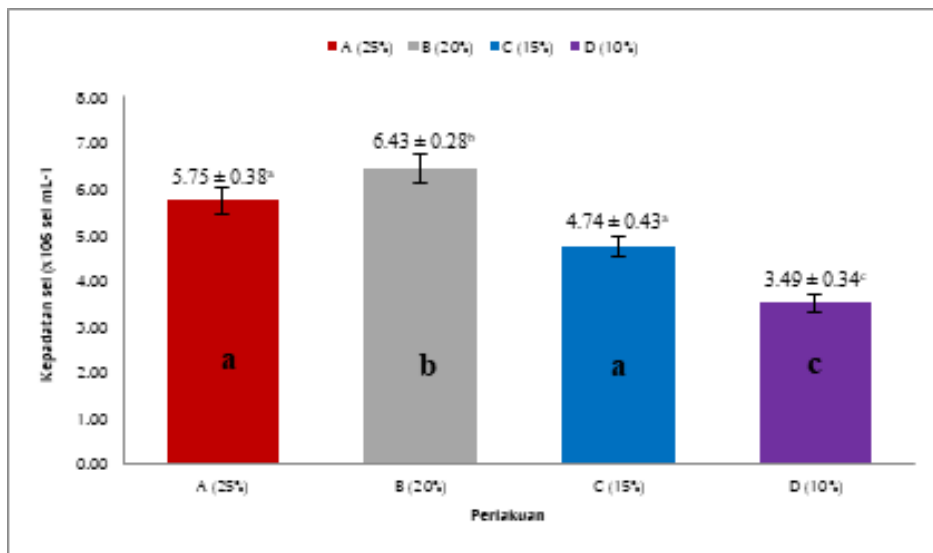
Sebaliknya, pada perlakuan A (25% limbah), meskipun konsentrasi nutrisi lebih tinggi, kurva pertumbuhan sejak awal fase eksponensial tidak pernah melampaui perlakuan B. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kekeruhan media yang lebih besar, sehingga menurunkan penetrasi cahaya dan mengurangi efisiensi fotosintesis. Kekeruhan terutama berasal dari partikel organik terlarut dan padatan tersuspensi yang tetap ada meskipun limbah disterilisasi, karena proses sterilisasi hanya mematikan mikroorganisme tetapi tidak menghilangkan padatan (Chia *et al.*, 2021).

Sementara itu, perlakuan C (15% limbah) dan D (10% limbah) menunjukkan laju pertumbuhan lebih rendah akibat terbatasnya ketersediaan nitrogen, sehingga sintesis biomassa menjadi



Gambar 1. Pertumbuhan *Spirulina* sp. yang dikultur dengan media dari limbah pendederan *C. altivelis* dengan konsentrasi berbeda selama 9 hari

Figure 1. Growth pattern of *Spirulina* sp. cultured using medium from *C. altivelis* nursery wastewater at different concentrations for 9 days



Gambar 2. Kepadatan puncak *Spirulina* sp. pada kultur dengan berbagai konsentrasi media dari limbah pendederan *C. altivelis*

Figure 2. Peak density of *Spirulina* sp. in the culture system with various medium concentrations from *C. altivelis* nursery wastewater

terhambat. Hal ini sejalan dengan temuan Wang *et al.* (2022) yang melaporkan bahwa konsentrasi nitrogen yang terlalu rendah akan menurunkan laju pembelahan sel pada mikroalga. Temuan ini konsisten dengan pola yang ditunjukkan pada Gambar 1, di mana kurva pertumbuhan perlakuan B berada di atas perlakuan lainnya sejak awal fase eksponensial.

Memasuki fase deklinasi (hari ke-7 hingga 9), kepadatan sel menurun hingga $\pm 34\%$, dengan penurunan paling nyata pada perlakuan D (10%) yang memiliki ketersediaan nutrisi paling sedikit sehingga sel lebih cepat mengalami kematian. Penurunan ini dipicu oleh habisnya nitrogen total (N-total $< 1,5 \text{ mg L}^{-1}$), meningkatnya kekeruhan media yang menghambat penetrasi cahaya serta pelepasan senyawa alelopati dari sel yang lisis. Perlakuan A (25% limbah) juga menunjukkan penurunan kepadatan yang cukup tajam, diduga akibat kombinasi kekeruhan tinggi dan akumulasi metabolit toksik. Temuan ini konsisten dengan laporan Misra *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa akumulasi metabolit toksik dapat mempercepat kematian sel pada kultur mikroalga tanpa suplai nutrisi tambahan.

Penurunan Konsentrasi Nitrat dan Ortofosfat

Konsentrasi nitrat (NO_3^-) dan ortofosfat (PO_4^{3-}) pada awal, puncak, dan akhir kultur disajikan pada Tabel 1. Persentase penyerapan dihitung berdasarkan selisih antara konsentrasi awal dan akhir terhadap konsentrasi awal ($[(\text{Awal} - \text{Akhir})/\text{Awal}] \times 100$). Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa penyerapan nitrat dan ortofosfat tertinggi terjadi pada perlakuan B (20% limbah), dengan efisiensi penyerapan masing-masing sebesar 96,0% untuk NO_3^- dan 67,7% untuk PO_4^{3-} .

Tabel 1 juga memperlihatkan bahwa konsentrasi NO_3^- menurun tajam sejak fase eksponensial hingga mendekati nol pada hari ke-9, sedangkan PO_4^{3-} menurun lebih lambat. Meskipun konsentrasi awal NO_3^- pada perlakuan D (10% limbah) lebih rendah, efisiensi penyerapan justru lebih kecil (71,6%), sehingga secara absolut jumlah N yang diasimilasi lebih sedikit dibanding perlakuan B. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi N dan P yang lebih seimbang pada media 20% mendukung laju pertumbuhan *Spirulina* sp. yang lebih tinggi dan pemanfaatan nutrisi yang lebih

Tabel 1. Konsentrasi nitrat dan ortofosfat pada media kultur dari limbah pendederan *C. altivelis* dengan konsentrasi yang berbeda pada fase awal, puncak, dan akhir serta efisiensi penyerapan oleh *Spirulina* sp.

Table 1. Nitrate and orthophosphate concentrations in the culture medium obtained from nursery wastewater of *C. altivelis* with different concentrations at the initial, peak, and final phases, and their removal efficiency by *Spirulina* sp.

Perlakuan Treatments	Nitrat (NO_3^-) Nitrate (NO_3^-)				Ortofosfat (PO_4^{3-}) Orthophosphate (PO_4^{3-})			
	Awal Initial (mg L^{-1})	Puncak Peak (mg L^{-1})	Akhir Final (mg L^{-1})	Penyerapan Absorption (%)	Awal Initial (mg L^{-1})	Puncak Peak (mg L^{-1})	Akhir Final (mg L^{-1})	Penyerapan Absorption (%)
A (25%)	$6,56 \pm 0,20^a$	$1,46 \pm 0,33$	$1,21 \pm 0,24^b$	81,6	$7,28 \pm 0,20^a$	$4,50 \pm 0,21$	$3,53 \pm 0,39^b$	51,5
B (20%)	$5,99 \pm 0,13^a$	$0,82 \pm 0,25$	$0,24 \pm 0,05^c$	96,0	$6,66 \pm 0,34^a$	$2,70 \pm 0,22$	$2,15 \pm 0,32^c$	67,7
C (15%)	$5,10 \pm 0,20^b$	$1,15 \pm 0,25$	$1,00 \pm 0,15^b$	80,4	$6,00 \pm 0,20^b$	$3,80 \pm 0,14$	$3,17 \pm 0,32^b$	47,2
D (10%)	$4,61 \pm 0,20^c$	$2,50 \pm 0,12$	$1,31 \pm 0,15^b$	71,6	$5,20 \pm 0,28^c$	$3,50 \pm 0,20$	$3,23 \pm 0,24^b$	37,9

Huruf superskrip yang berbeda pada kolom yang sama mengindikasikan perbedaan nyata ($p < 0.05$).

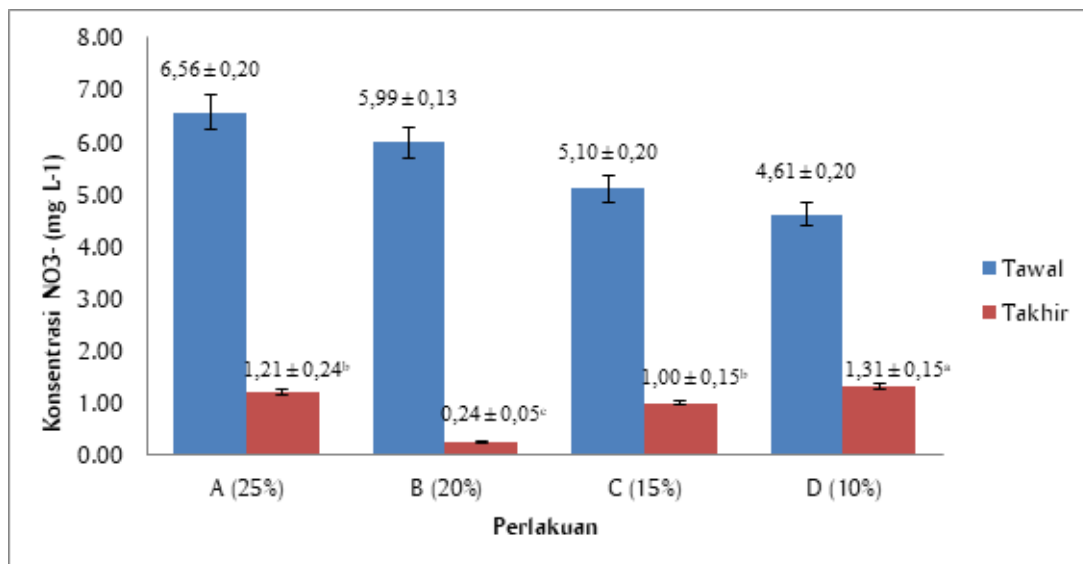
efisien. Hasil ini mengindikasikan bahwa media dengan konsentrasi limbah 20% menyediakan proporsi nutrisi yang paling mendukung pertumbuhan sel, sehingga pemanfaatan NO_3^- dan PO_4^{3-} berlangsung lebih optimal. Pada perlakuan D, meskipun konsentrasi awal nutrisi lebih rendah, kemampuan penyerapan relatif menurun karena keterbatasan nitrogen menyebabkan *Spirulina* sp. memasuki fase stasioner lebih cepat.

Nitrat dimanfaatkan *Spirulina* sp. dengan cara diubah terlebih dahulu menjadi amonium (NH_4^+) menggunakan enzim nitrat reduktase. Amonium diasimilasi menjadi asam amino melalui siklus GS-GOGAT (*glutamine synthetase-glutamate synthase*) untuk sintesis protein yang mendukung pembelahan sel dan peningkatan biomassa (Markou *et al.*, 2020). Sementara itu, fosfat (PO_4^{3-}) masuk ke dalam sel melalui proses penyerapan aktif dan disimpan dalam bentuk polifosfat sebagai cadangan energi serta substrat untuk sintesis ATP dan senyawa lain, sehingga fosfor memiliki peran penting dalam transfer energi seluler (Ahmad *et al.*, 2022; Kukkar & Soneja, 2023).

Data pada Gambar 4 menunjukkan bahwa ortofosfat mengalami penurunan tertinggi pada perlakuan B, yaitu sebesar 67,7% (dari $6,66 \text{ mg L}^{-1} \pm 0,21 \text{ mg L}^{-1}$ menjadi $2,15 \text{ mg L}^{-1}$

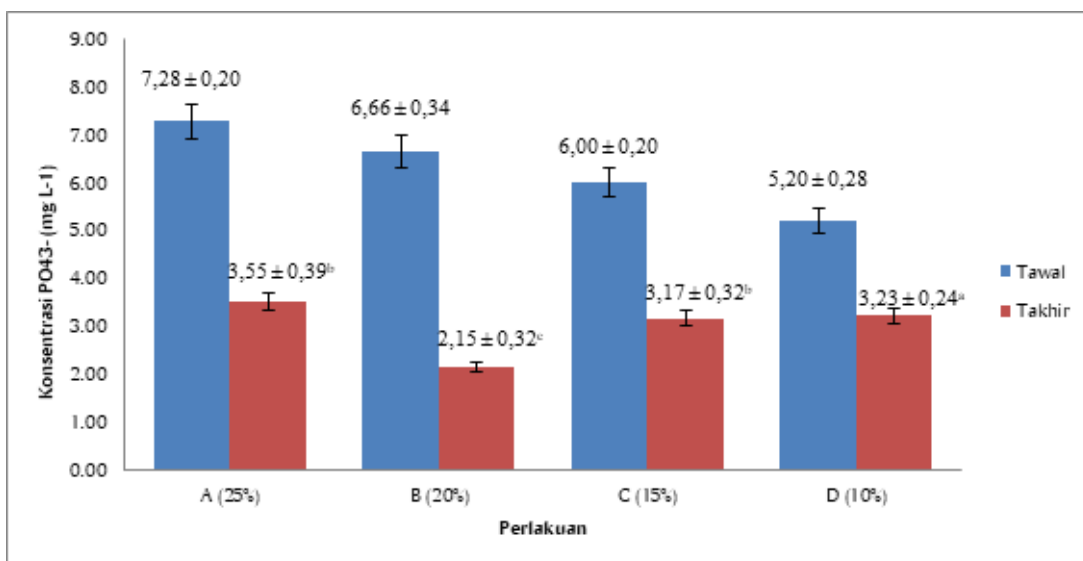
$\pm 0,10 \text{ mg L}^{-1}$), sedangkan pada perlakuan D hanya menurun 38%. Pemanfaatan limbah *C. altivelis* terbukti efektif sebagai media alternatif untuk kultur *Spirulina* sp. dengan beberapa keunggulan utama. Pertama, kemampuan penyerapan simultan NO_3^- dan PO_4^{3-} yang tinggi, diikuti oleh perubahan rasio N:P dari 1:1,1 menjadi 1:9,0 yang menunjukkan preferensi asimilasi nitrat lebih cepat. Kedua, produktivitas biomassa yang mencapai $6,43 \times 10^6$ sel mL^{-1} atau setara dengan 90% produktivitas media Zarrouk. Temuan ini konsisten dengan penelitian Maharana *et al.* (2021) dan Tan *et al.* (2022) yang menegaskan peran nitrogen dan fosfor sebagai makronutrien esensial bagi mikroalga autotrof.

Analisis ANOVA menunjukkan bahwa variasi konsentrasi limbah berpengaruh signifikan terhadap penurunan nitrat dan ortofosfat. Uji lanjut BNT ($\alpha = 0,05$) menunjukkan bahwa perlakuan B (20% limbah) merupakan kondisi optimal dengan efisiensi penyerapan tertinggi yaitu 96,0% untuk NO_3^- dan 67,7% untuk PO_4^{3-} . Dengan demikian, pemanfaatan limbah budidaya tidak hanya mampu mengurangi ketergantungan terhadap nutrisi sintetis, tetapi juga menawarkan solusi bioremediasi yang berkelanjutan melalui pendekatan ekonomi sirkular.



Gambar 3. Penurunan konsentrasi NO_3^- pada kultur *Spirulina* sp. dengan menggunakan media dari limbah pendederan *C. altivelis* dengan konsentrasi yang berbeda

Figure 3. Decrease in NO_3^- concentration in *Spirulina* sp. cultures using medium from *C. altivelis* nursery wastewater with different concentrations



Gambar 4. Penurunan konsentrasi PO_4^{3-} pada kultur *Spirulina* sp. dengan menggunakan media dari limbah pendederan *C. altivelis* dengan konsentrasi yang berbeda

Figure 4. Decrease in PO_4^{3-} concentration in *Spirulina* sp. cultures using medium from *C. altivelis* nursery wastewater with different concentrations

Rasio N/P

Rasio N/P awal pada semua perlakuan relatif homogen, yaitu sekitar 1:1,1 hingga 1:1,2 (Tabel 2). Rasio ini mengalami perubahan signifikan pascakultur, di mana penurunan konsentrasi nitrat lebih tajam dibandingkan ortofosfat.

Perlakuan B (20% limbah) menunjukkan hasil yang paling menonjol dengan rasio N/P akhir sebesar 1:9,0. Nilai ini merupakan nilai yang tertinggi dan mengindikasikan asimilasi nitrat yang lebih preferensial oleh *Spirulina* sp. Meskipun nilai yang diperoleh berbeda dengan rasio Redfield klasik (16:1), hal ini justru menunjukkan adaptasi spesifik *Spirulina* sp.

Tabel 2. Rasio N/P awal dan akhir pada kultur *Spirulina* sp. dengan penggunaan konsentrasi yang berbeda pada media dari limbah pendederan *C. altivelis*

Table 2. Initial and final N/P ratio in *Spirulina* sp. culture using different medium concentrations from *C. altivelis* nursery wastewater

Perlakuan Treatments	Nitrat Nitrate (mg L ⁻¹)		Ortofosfat Orthophosphate (mg L ⁻¹)		N:P	
	Awal Initial	Akhir Final	Awal Initial	Akhir Final	Awal Initial	Akhir Final
A (25%)	6,56	1,21	7,28	3,53	1:1,1	1:2,9
B (20%)	5,99	0,24	6,66	2,15	1:1,1	1:9,0
C (15%)	5,10	1,00	6,00	3,17	1:1,2	1:3,2
D (10%)	4,61	1,31	5,20	3,23	1:1,1	1:2,5

terhadap komposisi nutrisi dalam media limbah, sebagaimana dikemukakan oleh Ahmad *et al.* (2021), yang menegaskan bahwa *Spirulina* sp. mampu tumbuh dalam rentang rasio N/P yang cukup luas, dan dapat beradaptasi meskipun terjadi defisiensi salah satu nutrisi. Dengan demikian, variasi rasio N/P yang diperoleh pada penelitian ini mencerminkan dinamika penyerapan dan pemanfaatan nutrisi yang kompleks oleh *Spirulina* sp. Optimalisasi konsentrasi limbah, khususnya pada konsentrasi limbah 20%, berpotensi meningkatkan produktivitas kultur sekaligus memperbaiki efisiensi penyerapan nutrisi.

Hubungan Nitrat dan Ortofosfat terhadap Kepadatan *Spirulina* sp.

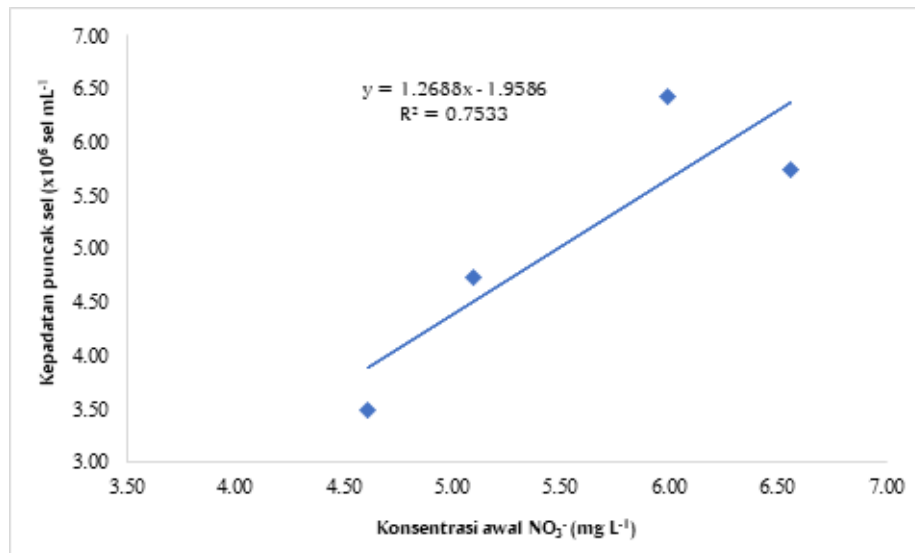
Analisis hubungan antara konsentrasi awal nutrisi dengan kepadatan *Spirulina* sp. dilakukan dengan memplotkan konsentrasi awal nitrat dan ortofosfat dari masing-masing perlakuan terhadap kepadatan sel pada fase puncak (hari ke-6).

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara konsentrasi awal nitrat (NO₃) dengan kepadatan sel puncak *Spirulina* sp. Hasil regresi linear menunjukkan persamaan $y = 1,2688x - 1,9586$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,7533$. Nilai ini mengindikasikan bahwa 75,3% variasi kepadatan puncak *Spirulina* sp. dapat

dijelaskan oleh perbedaan konsentrasi awal nitrat pada media kultur. Hubungan positif yang kuat ini menegaskan bahwa semakin tinggi konsentrasi awal nitrat, semakin besar pula biomassa *Spirulina* sp. yang dihasilkan. Hal ini konsisten dengan peran nitrat sebagai sumber utama nitrogen yang diperlukan dalam sintesis protein, pigmen fotosintetik, dan metabolisme seluler.

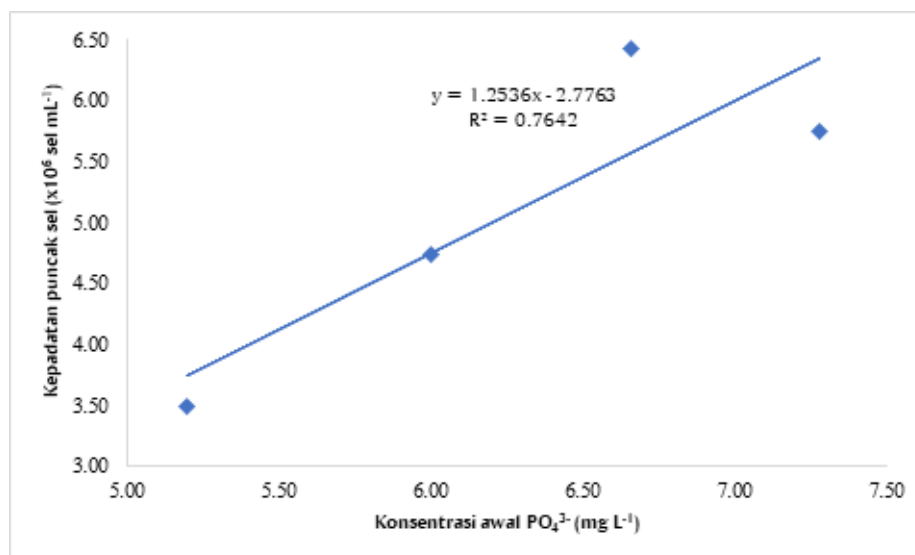
Demikian pula, hubungan antara konsentrasi awal ortofosfat (PO₄³⁻) dengan kepadatan puncak *Spirulina* sp. yang ditunjukkan pada Gambar 6. Persamaan regresi $Y = 1,2536x - 2,7763$ dengan $R^2 = 0,7642$ memperlihatkan hubungan positif yang signifikan, di mana 76,4% variasi kepadatan puncak *Spirulina* sp. dapat dijelaskan oleh ketersediaan awal ortofosfat. *Slope* yang positif menegaskan bahwa ortofosfat berperan sebagai sumber fosfor esensial dalam pembentukan nukleotida, fosfolipid, dan energi (ATP), sehingga mendukung pertumbuhan biomassa *Spirulina* sp.

Hasil penelitian ini juga memperlihatkan bahwa kepadatan puncak *Spirulina* sp. pada perlakuan B (20% limbah) justru lebih tinggi dibanding perlakuan A (25% limbah), meskipun konsentrasi awal nitrat dan ortofosfat pada perlakuan A lebih besar. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui beberapa kemungkinan. Pada konsentrasi limbah yang lebih tinggi,



Gambar 5. Hubungan antara konsentrasi nitrat pada media kultur dari limbah pendederan *C. altivelis* dan kepadatan *Spirulina* sp.

Figure 5. Correlation between nitrate concentration in culture medium from *C. altivelis* nursery wastewater and the density of *Spirulina* sp.



Gambar 6. Hubungan antara konsentrasi ortofosfat pada media kultur dari limbah pendederan *C. altivelis* dan kepadatan *Spirulina* sp.

Figure 6. Correlation between orthophosphate concentration in culture medium from *C. altivelis* nursery wastewater and the density of *Spirulina* sp.

kandungan nitrogen dan fosfor memang tinggi, namun dapat menimbulkan efek kejenuhan nutrisi, misalnya akibat akumulasi amonia bebas yang bersifat toksik bagi *Spirulina* sp. Selain itu, keseimbangan rasio nitrogen terhadap fosfor (N:P) diduga lebih mendekati kondisi optimum pada perlakuan 20%, sedangkan pada perlakuan 25% terjadi

ketidakseimbangan yang membatasi pertumbuhan. Dengan demikian, kondisi media pada 20% limbah kemungkinan lebih sesuai dengan kebutuhan fisiologis *Spirulina* sp., sehingga menghasilkan kepadatan puncak yang lebih optimal dibanding konsentrasi 25%. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan nutrisi tidak selalu berbanding lurus dengan

peningkatan biomassa, melainkan terdapat titik optimum yang perlu diperhatikan dalam pemanfaatan limbah sebagai media kultur. Hal ini sejalan dengan pernyataan Borowitzka (2013), bahwa jika konsentrasi terlalu tinggi, akan terjadi inefisiensi metabolisme atau efek penghambatan.

Kualitas Air

Parameter kualitas air yang diamati selama penelitian meliputi suhu, pH, salinitas dan intensitas cahaya (Tabel 3). Secara umum, seluruh parameter berada dalam kisaran optimum untuk mendukung pertumbuhan *Spirulina* sp., sehingga kondisi fisik-kimia perairan dapat dikatakan stabil dan mendukung proses metabolisme maupun fotosintesis.

Suhu media kultur pada semua perlakuan relatif stabil, yaitu 26-28°C. Nilai ini sesuai dengan kisaran optimum 20-30°C untuk pertumbuhan *Spirulina* sp. (Hariyati, 2008). Suhu tersebut mendukung aktivitas enzimatik dan proses metabolisme seluler mikroalga. Fluktuasi suhu yang rendah juga mengurangi risiko stres termal sehingga pertumbuhan dapat berlangsung konsisten.

pH berkisar antara 8,4-8,9 di seluruh perlakuan. Rentang ini masih berada dalam

kondisi optimal (7-9) bagi pertumbuhan *Spirulina* sp. (Isnansetyo & Kurniastuty, 1995). Relatif tingginya pH diduga berkaitan dengan konsumsi CO₂ selama proses fotosintesis, yang menggeser keseimbangan karbonat dan meningkatkan alkalinitas (Khan *et al.*, 2020). Hal ini menunjukkan bahwa proses fotosintesis berlangsung aktif dan mendukung peningkatan biomassa.

Salinitas tercatat berada pada kisaran 35–38 ppt, yang masih kondusif untuk pertumbuhan *Spirulina* sp. meskipun rentangnya lebih tinggi dibanding kondisi perairan tawar. Sebagai mikroalga halofilik, *Spirulina* sp. dilaporkan mampu tumbuh pada salinitas yang luas, yaitu 20–70 ppt (Habib & Parvin, 2008). Salinitas yang relatif tinggi ini justru dapat menjadi faktor selektif yang mengurangi kompetisi dari mikroorganisme lain yang kurang toleran terhadap kondisi hipersalin.

Intensitas cahaya berkisar 2010–2890 lux. Kisaran ini mendukung proses fotosintesis secara optimal tanpa menyebabkan fotoinhibisi (Chen *et al.*, 1996). Ketersediaan cahaya yang cukup menjadi faktor kunci dalam proses produksi energi fotosintetik yang berimplikasi langsung pada pertumbuhan *Spirulina* sp.

Dengan kondisi parameter kualitas air

Tabel 3. Kisaran parameter kualitas air pada kultur *Spirulina* sp. dengan penggunaan media dari limbah pendederan *C. altivelis* pada konsentrasi yang berbeda
Table 3. Range of water quality parameters in *Spirulina* sp. culture using medium from *C. altivelis* nursery wastewater at different concentrations

Parameter Parameters	Perlakuan Treatments				Optimum
	A	B	C	D	
Suhu (°C) Temperature (°C)	26 – 28	26 – 28	26 – 28	26 - 28	20 - 30 ⁽¹⁾
pH	8,5 - 8,7	8,5 - 8,8	8,5 - 8,9	8,4 - 8,7	7 - 9 ⁽²⁾
Salinitas (ppt) Salinity (ppt)	35 – 37	35 – 38	35 – 37	35 - 36	20 - 70 ⁽³⁾
Intensitas cahaya (lux) Light intensity (lux)	2040 - 2780	2010 - 2820	2020 – 2810	2100 - 2890	1500 - 3000 ⁽⁴⁾

Sumber: (1) Hariyati (2008); (2) Isnansetyo & Kurniastuty (1995); (3) Habib & Parvin (2008); (4) Chen *et al.* (1996)
References: (1) Hariyati (2008); (2) Isnansetyo & Kurniastuty (1995); (3) Habib & Parvin (2008); (4) Chen *et al.* (1996)

yang stabil dan berada pada kisaran optimum, dapat dipastikan bahwa pertumbuhan *Spirulina* sp. dalam penelitian ini tidak dibatasi oleh faktor lingkungan fisik-kimia, melainkan lebih dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi, terutama nitrogen dan fosfor, yang berasal dari media limbah. Hal ini sesuai dengan pendapat Risamasu & Prayitno (2011) bahwa dalam kondisi lingkungan yang optimal, nutrisi menjadi faktor pembatas utama pertumbuhan fitoplankton dan mikroalga autotrof.

KESIMPULAN

Limbah pendederan *C. altivelis* yang disterilisasi terbukti efektif sebagai media kultur *Spirulina* sp. pada skala kultur semi menengah. Konsentrasi terbaik pada 20% media limbah, yang menghasilkan kepadatan sel tertinggi ($6,43 \times 10^6$ sel mL⁻¹) dan efisiensi penyerapan nutrisi tertinggi (nitrat 96,0% dan fosfat 67,7%). Penelitian ini mempunyai peluang tinggi dalam prinsip ekonomi sirkular yaitu limbah akuakultur dapat dikonversi menjadi sumber daya produktif, sehingga dapat menjadi prospek strategi bioremediasi yang berkelanjutan untuk mengurangi beban pencemaran nutrisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Budidaya Perairan, Universitas Lampung, yang telah memberikan fasilitas penelitian, serta kepada Balai Besar Perikanan Budidaya Laut Lampung atas dukungan teknis dan penyediaan limbah budidaya *C. altivelis*. Penulis juga mengapresiasi semua pihak yang telah membantu selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan artikel.

PEMBIAYAAN PENELITIAN

Penelitian ini adalah penelitian mandiri, tidak menerima pendanaan khusus dari lembaga pendanaan di sektor publik, komersial, atau nirlaba.

KONTRIBUSI PENULIS

EL: konseptualisasi, metodologi, analisis data, dan penulisan – draf asli. RRP: konseptualisasi, metodologi, analisis data, dan penulisan – draf asli. SH: supervisi dan administrasi proyek. BP: supervisi dan administrasi proyek. FA: validasi, visualisasi serta penulisan – tinjauan dan penyuntingan. WA: investigasi, pengumpulan data, dan sumberdaya. AH: investigasi, pengumpulan data, dan sumberdaya. Semua penulis telah membaca dan menyetujui naskah akhir.

PERNYATAAN KONFLIK KEPENTINGAN DAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Para penulis menyatakan tidak memiliki Konflik kepentingan yang dapat memengaruhi hasil atau interpretasi dari penelitian ini. Kecerdasan buatan digunakan secara terbatas hanya untuk penyuntingan bahasa dan perbaikan tata tulis, tanpa memengaruhi substansi ilmiah, interpretasi data, atau kesimpulan penelitian. Semua keputusan analitis dan penulisan ilmiah tetap dilakukan oleh para penulis.

DAFTAR ACUAN

- Ahmad, A., Hassan, W. S., & Banat, F. (2022). An overview of microalgae biomass as a sustainable aquaculture feed ingredient: Food security and circular economy. *Bioengineered*, 13(4), 9521–9547. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2061148>
- Ahmad, S., Singh, B. P., & Ansari, F. A. (2021). Optimization of nitrogen and phosphorus for enhanced *Spirulina platensis* biomass production and nutrient removal from wastewater. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100787. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100787>
- Ansari, F. A., Singh, P., Guldhe, A., & Bux, F. (2017). Microalgal cultivation using aquaculture wastewater: Integrated biomass generation and nutrient remediation. *Algal Research*, 21, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.015>

- APHA. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Borowitzka, M. A. (2013). High-value products from microalgae—their development and commercialisation. *Journal of Applied Phycology*, 25, 743–756. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-9983-9>
- Chen, F., Zhang, Y., & Guo, S. (1996). Growth and phycocyanin formation of *Spirulina platensis* in photoheterotrophic culture. *Biotechnology Letters*, 18(5), 603–608. <https://doi.org/10.1007/BF00140211>
- Chia, M. A., Lombardi, A. T., & Melao, M. G. G. (2021). Circular bioeconomy and the role of microalgae in sustainable aquaculture. *Aquaculture Reports*, 21, 100908. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100908>
- Dahlin, J., Nygren, Y., & Royne, F. (2015). *Microalgae: Future biofactory of high-value chemicals*. Uppsala University, Department of Chemistry – Ångström Laboratory.
- FAO. (2022). *The state of world fisheries and aquaculture: Towards blue transformation*. FAO of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Habib, M. A. B., & Parvin, M. (2008). *A review on culture, production and use of Spirulina as food for humans and feeds for domestic animals and fish* (FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1034). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i0424e/i0424e.pdf>
- Hariyati, R. (2008). *Kajian pertumbuhan Spirulina sp. pada media tambak dengan penambahan NaHCO₃ yang berbeda* [Skripsi, Institut Pertanian Bogor]. Institut Pertanian Bogor.
- Hudaidah, S., Supono, S., Putri, B., Larasati, E., Muhammad, B., & Santanumurti. (2022). First report of *Spirulina sp.* performance in wastewater of *Cromileptes altivelis* aquaculture in Indonesia. *AACL Bioflux*, 15(2), 988–1002.
- Isnansetyo, A., & Kurniastuty. (1995). *Teknik kultur phytoplankton dan zooplankton*. Penerbit Kanisius.
- Khan, A. K., Shah, F. U., Khan, J., Iqbal, M. J., Ali, I., & Sohail, M. (2020). Optimization of growth and biomass production of *Spirulina platensis* in different culture media. *Journal of Applied Phycology*, 32(3), 1735–1744. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02156-5>
- Kukkar,D.,&Soneja,A.(2023).Recentadvancements in microalgae-based wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 326, 116743. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.116743>
- Li, X., Wang, J., Liu, B., & Hu, Q. (2021). Efficient nutrient removal from aquaculture wastewater by *Spirulina platensis* coupled with biomass production. *Bioresource Technology*, 339, 125615. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125615>
- Liu, Y., Ngo, H. H., Guo, W., Peng, L., Wang, D., & Ni, B. (2019). The roles of free ammonia (FA) in biological wastewater treatment processes: A review. *Environment International*, 123, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.039>
- Maharana, R., Sarma, H., Sahu, A. K., & Das, S. (2021). Microalgae for nutrient removal from wastewater: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 786, 147426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147426>
- Markou, G., Vandamme, D., & Muylaert, K. (2014). Microalgal and cyanobacterial cultivation: The supply of nutrients. *Water Research*, 65, 186–202. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.07.025>
- Markou, G., Wang, L., Ye, J., & Unc, A. (2020). Using nutrient stress for algal biomass and biodiesel production: A review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40(5), 1–15. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1781445>
- Misra, N., Singh, R., & Singh, J. (2022). Influence of nutrient depletion on growth and biochemical composition of microalgae: A review. *Algal Research*, 68, 102877. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102877>

- Nie, X., Mubashar, M., Zhang, S., Qin, Y., & Zhang, X. (2020). Current progress, challenges, and perspectives in microalgae-based nutrient removal for aquaculture waste: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124209>
- Pratama, D. A. (2017). *Karakteristik limbah cair budidaya ikan kerapu bebek (Cromileptes altivelis) pada sistem resirkulasi* [Skripsi, Universitas Diponegoro]. Universitas Diponegoro.
- Redfield, A. C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46(3), 221–230.
- Richmond, A., & Hu, Q. (2013). *Handbook of microalgal culture: Applied phycology and biotechnology* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118567166>
- Risamasu, R., & Prayitno, S. B. (2011). Pertumbuhan populasi *Nannochloropsis oculata* pada media yang diperkaya dengan pupuk anorganik dan organik. *Jurnal Ilmu Kelautan*, 16(4), 203–209.
- Sari, L. A., Putra, A. P., & Hudaidah, S. (2020). Potensi pemanfaatan limbah budidaya kerapu sebagai media kultur *Spirulina sp.* *Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan*, 10(2), 45–52.
- Tan, C. W., Lee, H. P., Lim, S. Y., Ling, T. C., & Lee, M. H. (2022). Recent advances in microalgae-based bioremediation of aquaculture wastewater: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(47), 70685–70702. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21153-7>
- Wang, Y., Li, S., Zhang, J., & Guo, X. (2022). Impact of excessive nutrients on aquatic ecosystem health: A review. *Environmental Pollution*, 292, 118456. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118456>
- Yoo, E. H., Kim, M. K., Min, K. H., & Kim, Y. S. (2020). Optimization of *Chlorella vulgaris* cultivation for enhanced biomass production and nutrient removal from swine wastewater. *Journal of Environmental Management*, 270, 110903. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110903>
- Zhang, J., Chen, H., Sun, J., Zhang, Z., Yuan, Y., & Gao, B. (2021). A review on nutrient discharge from aquaculture wastewater and its treatment technologies. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(20), 25487–25501. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13429-2>