

Penurunan Nitrat Pada Air Limbah Domestik dengan *Air-Lift Photobioreactor* Berbasis Mikroalga

Acellita Ayu Zevhiana¹, Tuhu Agung Rachmanto^{2*}

^{1,2}Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

*Koresponden email: tuhu.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 18 April 2024

Disetujui: 24 April 2024

Abstract

Domestic wastewater often contains nutrients that can potentially cause environmental problems if released into the environment without proper treatment. One of the nutrients that needs to be managed is nitrate, which can be used as a nutrient source for microalgae in an air-lift photobioreactor (AL-PBR). The aim of this study was to test the efficiency of nitrate removal from domestic wastewater using the microalgae *Chlorella vulgaris* and AL-PBR. The cultivation of microalgae was carried out in a culture medium containing deionised water and F2 Guillard nutrients for 7 days with full lighting and aeration. The acclimatisation phase was carried out for 7 days with a gradual addition of wastewater to prepare the microalgae for real environmental conditions. Analysis showed that pH and temperature during cultivation and acclimatisation were within safe ranges for the microalgae. The highest nitrate removal occurred with 80% wastewater treatment using blue light ($\lambda=440$ nm), achieving a removal percentage of 97.49%, indicating that wastewater concentration affects nitrate removal efficiency. These results provide important insights into the potential use of microalgae and AL-PBR in domestic wastewater treatment to support efforts to maintain the quality of aquatic environments.

Keywords: *domestic wastewater, chlorella vulgaris microalgae, air-lift photobioreactor (al-pbr), wavelength of light, nitrate removal*

Abstrak

Air limbah domestik sering mengandung nutrisi yang berpotensi menyebabkan masalah lingkungan jika dibuang ke alam tanpa perlakuan yang tepat. Salah satu nutrisi yang perlu dikelola adalah nitrat, yang dapat menjadi sumber nutrisi bagi mikroalga di *Air Lift Photobioreactor* (AL-PBR). Penelitian ini bertujuan untuk menguji efisiensi penghilangan nitrat dari air limbah domestik menggunakan mikroalga *Chlorella vulgaris* dan AL-PBR. Kultivasi mikroalga dilakukan dengan media kultur berupa air TDS 0 dan nutrisi F2 Guillard selama 7 hari dengan pencahayaan dan aerasi penuh. Tahap aklimatisasi dilakukan selama 7 hari dengan penambahan air limbah secara bertahap untuk mempersiapkan mikroalga untuk kondisi lingkungan yang sesungguhnya. Hasil analisis menunjukkan bahwa pH dan suhu selama kultivasi dan aklimatisasi berada dalam rentang aman bagi mikroalga. Penyisihan nitrat tertinggi terjadi pada perlakuan air limbah 80% dengan variasi warna lampu biru ($\lambda=440$ nm) dengan persen removal mencapai 97,49%, menunjukkan bahwa konsentrasi air limbah memengaruhi efisiensi penghilangan nitrat. Temuan ini memberikan wawasan penting tentang potensi penggunaan mikroalga dan AL-PBR dalam pengolahan air limbah domestik untuk mendukung upaya menjaga kualitas lingkungan perairan.

Kata Kunci: *air limbah domestik, mikroalga chlorella vulgaris, air-lift photobioreactor (al-pbr), panjang gelombang cahaya, penyisihan nitrat*

1. Pendahuluan

Limbah, sebagai hasil kegiatan manusia, makhluk hidup lain, dan proses alam yang belum dapat dimanfaatkan secara ekonomis, terbagi menjadi limbah cair, padat, dan gas [1]. Limbah cair, seperti air limbah, berasal dari proses produksi atau kegiatan manusia, terdiri dari air dan bahan pencemaran terlarut dan tersuspensi. Air limbah dapat dibagi menjadi domestik dan industri, dimana air limbah domestik berasal dari aktivitas sehari-hari manusia dan terdiri dari grey water dan black water, yang mengandung bahan kimia dan patogen berbahaya [2][3]. Karakteristik air limbah domestik mencakup sifat fisik, kimia, dan biologi, dengan komposisi padatan organik dan anorganik, serta mikroorganisme patogen.

Mikroalga, sebagai organisme unisel yang mengandung klorofil dan memiliki ukuran bervariasi, memerlukan karbondioksida, cahaya, dan nutrisi untuk fotosintesis, yang membuatnya menjadi fokus penelitian sejak 1960-an dalam bidang ekologi dan lingkungan. Potensi mikroalga sebagai sumber biofuel dan teknologi terbarukan untuk pangan dan energi masa depan telah meningkat pesat, termasuk

kemampuannya sebagai bioremediator untuk lingkungan yang tercemar. Dalam klasifikasi mikroalga, kelompok *Cyanobacteria*, *Chlorophyceae*, dan *Ocrophyta* menonjol dalam aspek bioteknologi [4]. Pertumbuhan mikroalga dipengaruhi oleh berbagai faktor termasuk intensitas cahaya, suhu, nutrisi, dan sifat air limbah, dengan model kultur sistem batch menjadi yang paling umum digunakan [5]. Berdasarkan penelitian, mikroalga *Chlorella vulgaris* mengalami fase pertumbuhan yang berbeda-beda, di mana fase eksponensial adalah waktu terbaik untuk pemanenan [6]. Faktor-faktor seperti cahaya, suhu, nutrisi, dan sifat air limbah memengaruhi pertumbuhan mikroalga, namun dalam kondisi modifikasi yang tepat, mikroalga dapat beradaptasi dan memberikan kinerja optimal [7]. *Chlorella vulgaris*, salah satu jenis mikroalga yang paling banyak dibudidayakan dan digunakan dalam berbagai aplikasi bioteknologi, memiliki morfologi, reproduksi, komposisi kimia, dan tipe kultur yang berbeda [8].

Penelitian terdahulu dalam pengolahan air limbah domestik menggunakan *Air Lift Photobioreactor* (AL-PBR) berbasis mikroalga telah memberikan kontribusi yang beragam. Alazaiza et al. (2023) menggunakan *Chlorella vulgaris* untuk pemisahan nutrisi dan produksi biomassa, menunjukkan bahwa efisiensi removal COD, nitrogen amoniak, dan fosfor tertinggi terjadi pada perlakuan air limbah 50%, dengan puncak produksi biomassa pada perlakuan air limbah 80% [9]. Elystia et al. (2022) menemukan bahwa *Chlorella sp.* dapat mengurangi Total Nitrogen dan COD hingga 80% dan 84,93% masing-masing pada hari ke-7 dengan konsentrasi air limbah 50% dan cahaya lampu [10]. Yaqoubnejad et al. (2021) membandingkan teknologi *Traditional Flat Plate* (TFP) dengan *Hexagonal Airlift Flat Plate* (HAFP), menunjukkan peningkatan pertumbuhan mikroalga, efisiensi removal CO₂, dan pengolahan nutrisi oleh HAFP yang lebih tinggi [11]. Elystia et al. (2019) mengeksplorasi produksi lipid dan penurunan nutrisi pada limbah hotel dengan *Chlorella sp.*, menemukan bahwa rasio C:N 100:7 dengan cahaya lampu biru memberikan hasil terbaik [12]. Terakhir, Syach et al. (2018) menunjukkan bahwa *Chlorella vulgaris* dapat mengurangi kadar amonia dan nitrat pada residu hasil biodigester limbah ternak dengan efisiensi penurunan masing-masing hingga 80,26% dan 70,94% [13].

Dengan pertumbuhan populasi yang terus meningkat di Kota Surabaya, produksi air limbah domestik juga meningkat, menjadikannya salah satu sumber pencemar utama sungai-sungai di Indonesia. Air limbah domestik kaya akan nutrisi dan bahan organik yang dapat membahayakan lingkungan perairan. Oleh karena itu, perlunya pengolahan air limbah sebelum dibuang ke badan air menjadi suatu keharusan. Salah satu metode yang menjanjikan dalam pengolahan air limbah domestik adalah penggunaan mikroalga, yang telah terbukti mampu mendegradasi komponen-komponen berbahaya seperti karbon, nitrogen, dan fosfat. Mikroalga menggunakan nutrisi yang terkandung dalam air limbah sebagai sumber pertumbuhan, dan kemudian menguraikan dan mendaur ulang nutrisi tersebut pada tahap pengolahan berikutnya, meningkatkan efisiensi penghilangan nutrisi secara signifikan [7]. Teknologi *Photobioreactor* (PBR) menjadi salah satu solusi dalam pengolahan air limbah, yang menyediakan lingkungan yang optimal untuk pertumbuhan mikroalga dengan menyediakan elemen cahaya, nutrisi, suhu, dan pencampuran yang diperlukan [14].

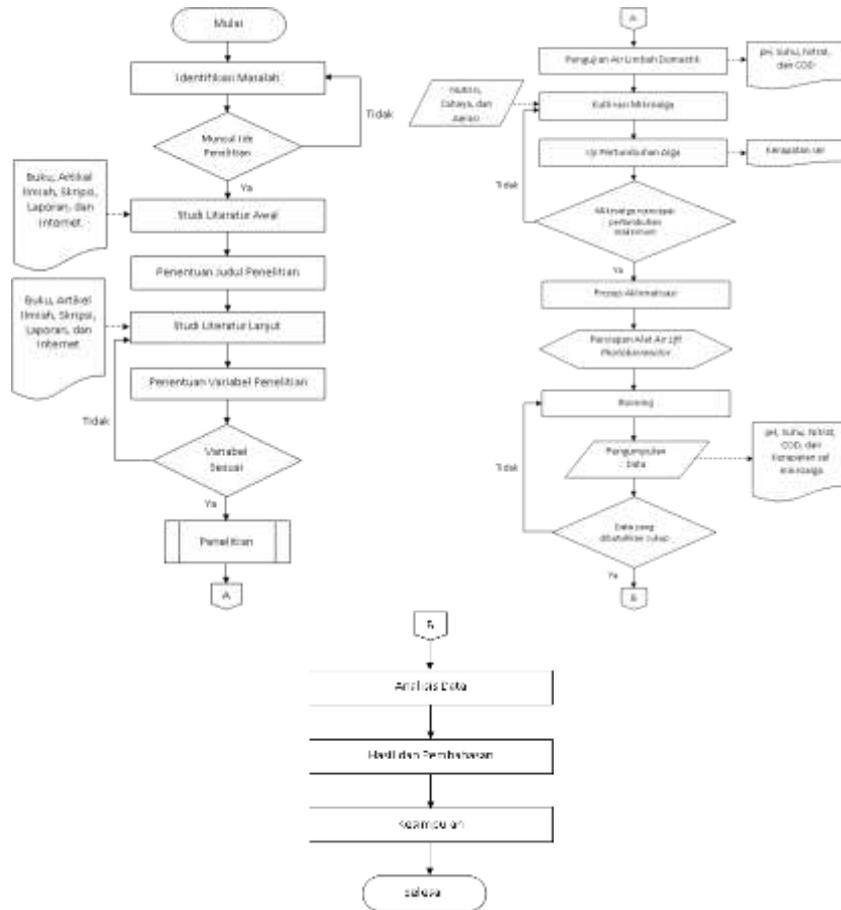
Studi sebelumnya menunjukkan bahwa PBR dapat menyisihkan hingga 80% COD dan 84,93% Total Nitrogen pada pengolahan air limbah Palm Oil [10]. Oleh karena itu, penggunaan teknologi PBR yang dioptimasi dengan sistem air lift menjadi fokus penelitian untuk mengatasi penurunan konsentrasi nitrat pada air limbah domestik. Dengan demikian, penggunaan PBR tidak hanya berkontribusi pada pengolahan limbah yang efektif, tetapi juga mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* 2030 dalam upaya menjaga lingkungan hidup yang berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

Kerangka penelitian memberikan gambaran umum tentang tahapan pelaksanaan yang diperlukan untuk mencapai hasil yang diharapkan bisa dilihat dalam **Gambar 1**. Penelitian ini bertujuan untuk menguji efisiensi penghilangan nutrisi dan bahan organik pada air limbah domestik menggunakan mikroalga *Chlorella vulgaris* dengan bantuan teknologi *Air Lift Photobioreactor* (AL-PBR). Sebelumnya, mikroalga melalui proses seeding dan aklimatisasi. AL-PBR yang digunakan memiliki tipe aliran batch dengan variasi perlakuan, seperti perbedaan volume air limbah, gelombang cahaya lampu LED, dan intensitas cahaya. Parameter yang diukur meliputi Nitrat dan produktivitas mikroalga. Penelitian dilakukan di Laboratorium Riset Teknik Lingkungan UPN "Veteran" Jawa Timur menggunakan air limbah domestik dari Rusunawa Penjaringan Sari 3.

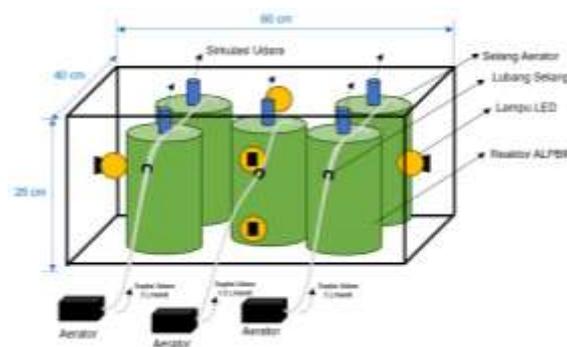
Persiapan penelitian mencakup pengujian awal parameter air limbah, persiapan reaktor AL-PBR, dan pengujian kinerja sparger. Penelitian utama melibatkan pengisian air limbah ke dalam reaktor, penambahan mikroalga, dan pengoperasian lampu LED serta sparger selama 5 hari. Sampel air limbah diambil secara berkala untuk diuji, dan efisiensi removal parameter dihitung. Penelitian juga melibatkan variabel bebas

seperti perbedaan konsentrasi air limbah dan variasi cahaya lampu LED, dengan kontrol terhadap pH dan suhu. Analisis data dilakukan dengan metode uji yang telah ditetapkan sebelumnya, termasuk uji statistik untuk mengevaluasi perbedaan antara perlakuan. Rancangan alat penelitian melibatkan penggunaan AL-PBR dalam chamber dengan lampu LED yang berbeda warna, serta aerator untuk suplai udara.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian menggunakan *Air Lift Photobioreactor* (AL-PBR) berbentuk tabung transparan dengan draft tube di tengahnya dan dilengkapi lampu LED sebagai sumber cahaya. AL-PBR ini memiliki aerator dengan air stone di dasarnya untuk memisahkan zona *riser* dan *downcomer*, serta menciptakan *internal loop* untuk pencampuran gas dan transfer medium non-mekanik. Rancangan AL-PBR diimplementasikan dalam *chamber* dengan lampu LED di dalamnya, memungkinkan berbagai perlakuan berbeda pada 5 reaktor dengan suplai udara yang disediakan oleh aerator di luar *chamber*. Satu aerator dengan kapasitas maksimal output 3 L/menit akan mensuplai dua reaktor, sehingga setiap reaktor kurang lebih akan mendapatkan suplai udara 1,5 L/menit. Contoh sketsa rancangan AL-PBR dalam *chamber* ditunjukkan pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Sketsa Rancangan AL-PBR dalam Chamber

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Air Limbah Domestik

Air limbah domestik yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari aktivitas sehari-hari manusia yang berasal dari kegiatan rusunawa di Rusunawa Penjaringan Sari 3, Surabaya, dengan izin dari Dinas Perumahan Rakyat dan Kawasan Permukiman serta Pertanahan (DPRKPP) Kota Surabaya sebagai dinas yang berwenang. Limbah blackwater dan greywater dipisahkan, kemudian bercampur pada bak penampung awal sebelum melewati proses penyaringan. Air limbah domestik diambil setelah Pre Treatment dan sebelum pengolahan biologis, dari bak pengendap II, yang ditunjukkan pada Gambar 4. Kondisi aktual air limbah adalah keruh agak berbau dan berwarna kehijauan karena pertumbuhan Lemna minor, menandakan kandungan bahan organik yang kaya [15], namun, konsentrasi yang berlebih dapat menyebabkan eutrofikasi yang merugikan. Air limbah diambil 45 Liter dan difiltrasi dua kali sebelum digunakan untuk penelitian.



Gambar 3. Lokasi Pengambilan Air Limbah Domestik



Gambar 4. Kondisi Bak Pengendap II Air Limbah Rusunawa Penjaringan Sari 3

Berdasarkan hasil uji awal air limbah domestik, konsentrasi nitrat (NO_3) dalam air limbah tersebut adalah 36,91 mg/L. Konsentrasi ini menunjukkan adanya tingkat nitrat yang cukup tinggi dalam air limbah domestik tersebut. Tingginya konsentrasi nitrat dalam air limbah domestik bisa menjadi masalah lingkungan jika dibuang langsung ke lingkungan alaminya tanpa perlakuan yang tepat. Nitrat yang berlebih dalam air limbah domestik dapat menyebabkan masalah kesehatan manusia dan lingkungan, seperti meningkatkan pertumbuhan alga beracun, menurunkan kualitas air, dan mengganggu keseimbangan ekosistem perairan. Konsentrasi nitrat yang tinggi dalam air limbah domestik menjadi fokus karena nitrat dapat menjadi sumber nutrisi bagi mikroalga dalam *Air-Lift Photobioreactor (AL-PBR)*. Dengan mengurangi konsentrasi nitrat dalam air limbah, dapat mengurangi potensi pertumbuhan alga berlebih dan meningkatkan efisiensi proses AL-PBR dalam mengolah air limbah. Strategi untuk menurunkan konsentrasi nitrat dalam air limbah domestik melalui AL-PBR bisa mencakup pembiakan mikroalga yang efisien dalam menyerap nitrat, pengaturan kondisi lingkungan dalam bioreaktor seperti pH, suhu, dan cahaya, serta pemantauan secara teratur terhadap kinerja AL-PBR dalam menurunkan konsentrasi nitrat.

3.2 Kultivasi Mikroalga

Kultivasi mikroalga dilakukan dengan memperhatikan kondisi yang optimal untuk pertumbuhan, dengan tujuan memperoleh volume yang memadai dan kualitas sel yang baik. Pengambilan sampel dilakukan setiap hari pada jam tertentu untuk mengukur kerapatan sel mikroalga *Chlorella vulgaris*, sementara kontrol pH dan suhu juga dilakukan selama proses kultivasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa pH dan suhu selama kultivasi berada dalam rentang yang aman bagi mikroalga, yaitu antara 7-9 untuk pH dan 26-36°C untuk suhu, yang dapat mempengaruhi pertumbuhan mikroalga secara spesifik.

Tabel 1. Hasil Analisis pH, Suhu, dan Kerapatan Sel Mikroalga *Chlorella vulgaris* terhadap Waktu detensi pada Tahap Kultivasi

Hari ke-	pH	Suhu (°C)	Kerapatan Sel Mikroalga (10^4 Sel/mL)
0	7,5	29,9	318
1	7,4	29,7	333
2	7,5	29,8	379
3	7,4	30,1	626
4	7,4	29,5	756
5	7,5	30,3	1015
6	7,4	29,8	1214
7	7,4	29,8	1550

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Penelitian dimulai dengan kultur mikroalga *Chlorella vulgaris* yang diperoleh dari Balai Perikanan dan Budidaya Air Payau Kabupaten Situbondo, Jawa Timur, dengan media kultur berupa air TDS 0 dan nutrisi F2 Guillard [16]. Rancangan alat kultivasi dilengkapi dengan lampu LED 9 Watt dan aerator untuk aerasi serta pengadukan non-mekanis bagi mikroalga. Proses kultivasi berlangsung selama 7 hari dengan pencahayaan dan aerasi penuh selama 24 jam, dengan pengamatan perubahan warna air dan kerapatan sel mikroalga. Hasil menunjukkan bahwa warna air dari hijau pada hari ke-1 menjadi hijau pekat pada hari ke-7, menandakan peningkatan kerapatan sel mikroalga.



Gambar 5. Hubungan Waktu Detensi dengan Kerapatan Sel *Chlorella vulgaris* pada Tahap Kultivasi
 Sumber: Hasil Analisis, 2024

Grafik pada **Gambar 5** menunjukkan bahwa kerapatan sel *Chlorella vulgaris* meningkat seiring dengan waktu detensi, mencapai puncaknya pada hari ke-7 dengan 1550×10^4 sel/mL setelah memasuki fase eksponensial pada hari ke-3. Pada fase ini, penyerapan nutrisi meningkat sehingga laju pembentukan mikroalga juga meningkat cepat, dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti nutrisi, volume inokulum, dan kondisi lingkungan.

3.3 Aklimatisasi

Tahap aklimatisasi penting dilakukan untuk memberikan ruang bagi mikroalga untuk beradaptasi dengan air limbah. Aklimatisasi sebaiknya dilakukan saat kultivasi mikroalga mencapai fase eksponensial atau saat kerapatan sel mikroalga mencapai nilai tertinggi. Karena sampai hari ke-7 tahap kultivasi kerapatan sel mikroalga tetap naik dari hari sebelumnya, maka pemanenan mikroalga dilakukan pada hari ke-7. Pengambilan sampel untuk uji kerapatan sel dilakukan 1 x 24 jam setiap hari pada rentang waktu 12.30 – 12.45 WIB. Sampel mikroalga Hasil analisis pH, suhu, dan kerapatan sel *Chlorella vulgaris* terhadap waktu detensi pada tahap aklimatisasi disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2, pada hari ke-0 hingga hari ke-7, kondisi pH pada tahap aklimatisasi berada di rentang 7,30 – 7,75.

Kondisi air dengan pH terendah ada pada hari ke-0 setelah penambahan air limbah domestik, namun masih dalam rentang aman bagi *Chlorella vulgaris*. Sedangkan kondisi air dengan pH tertinggi ada pada hari ke-6 dan ke-7 dengan nilai pH 7,75 dan kerapatan sel *Chlorella vulgaris* berturut-turut adalah 1872 sel/mL dan 1870 sel/mL. Rentang suhu pada tahap aklimatisasi adalah $29,5^{\circ}\text{C}$ - $30,2^{\circ}\text{C}$, yang sudah masuk dalam rentang aman bagi mikroalga [8]. Peningkatan suhu selama tahap aklimatisasi dapat terjadi karena aktivitas enzim oleh mikroalga.

Aklimatisasi mikroalga dilakukan selama 7 hari dengan penambahan air limbah secara bertahap, pH dan suhu tetap dikontrol selama proses ini untuk mengantisipasi perubahan lingkungan mikroalga akibat penambahan air limbah secara berkala. Pengamatan warna air dan kerapatan sel mikroalga dilakukan selama tahap aklimatisasi, dan hasilnya menunjukkan bahwa warna mikroalga tetap hijau pekat tanpa perubahan signifikan, menandakan keberhasilan tahap aklimatisasi dan menghindari fase kematian mikroalga. Pada hari ke-7, mikroalga *Chlorella vulgaris* hasil aklimatisasi dipanen untuk penelitian utama.

Tabel 2. Hasil Analisis pH, Suhu, dan Kerapatan Sel Mikroalga *Chlorella vulgaris* terhadap Waktu detensi pada Tahap Aklimatisasi

Hari ke-	pH	Suhu (°C)	Kerapatan Sel Mikroalga (10 ⁴ Sel/mL)
0	7,30	29,6	1559
1	7,53	29,5	1531
2	7,60	30,1	1571
3	7,51	30,1	1723
4	7,68	30,0	1773
5	7,70	30,2	1844
6	7,75	30,1	1872
7	7,75	30,0	1870

Sumber: Hasil Analisis, 2024



Gambar 6. Hubungan Waktu Detensi dengan Kerapatan Sel *Chlorella vulgaris* pada Tahap Aklimatisasi
 Sumber: Hasil Analisis, 2024

Berdasarkan hasil analisis, terlihat bahwa kerapatan sel mikroalga meningkat secara bertahap hingga mencapai puncaknya pada hari ke-6, menandakan keberhasilan adaptasi mikroalga dengan air limbah dan nutrisinya. Namun, pada hari ke-7, terjadi penurunan kerapatan sel mikroalga, mungkin karena telah mencapai fase stasioner akibat keterbatasan nutrisi dan kondisi lingkungan yang tidak lagi mendukung pertumbuhan mikroalga [17].

3.4. Penyisihan Kadar Nitrat (NO₃) pada Pengolahan Air Limbah Domestik menggunakan ALPBR Berbasis Mikroalga terhadap Berbagai Variabel

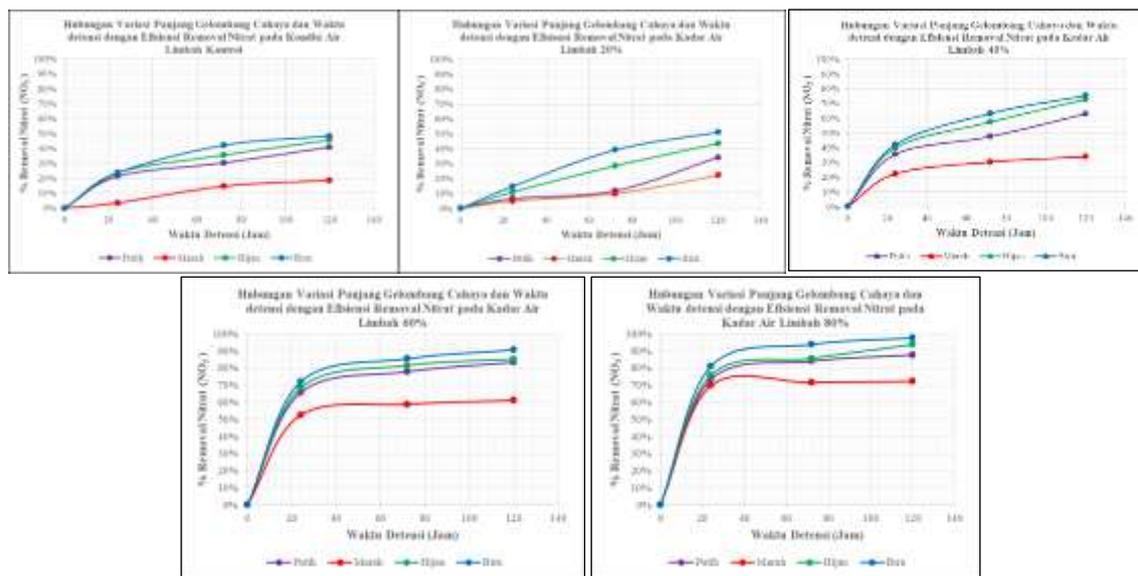
Penyisihan kadar nitrat dihitung berdasarkan persen removal dari setiap hasil uji kadar nitrat yang diambil berdasarkan waktu detensi 0 jam (hari ke-0); 24 jam (1 hari); 72 jam (3 hari); dan 120 jam (3 hari) pada setiap variasi konsentrasi air limbah di berbagai warna lampu dan panjang gelombang cahaya. Hasil persen removal nitrat ditunjukkan pada **Tabel 3**. Dari **Tabel 3**, dapat diketahui bahwa penyisihan Nitrat tertinggi pada berbagai variasi warna lampu dan panjang gelombang cahaya didapatkan pada perlakuan air limbah 80% (2,4 L Air Limbah; 0,6 L Air Pengencer + 500 ml *Chlorella vulgaris*).

Air limbah domestik mengandung nutrisi, terutama nitrat yang diperlukan untuk pertumbuhan mikroalga. Kandungan Nitrogen yang dapat dimanfaatkan langsung oleh mikroalga adalah ammonia bebas (NH₃) dan Nitrat (NO₃) yang memiliki peran dalam pembentukan lemak, asam amino, dan sel-sel vegetatif bagi mikroalga. Nitrat adalah bentuk utama dari Nitrogen pada perairan alami yang merupakan nutrisi utama bagi tanaman dan mikroalga. Alga melalui proses asimilasi nitrogen anorganik terselubung menjadi bentuk organik melalui aktivitas enzim seperti nitrat dan nitrit reduktase. Pengaruh konsentrasi air limbah terhadap penyisihan Nitrat pada berbagai variasi warna dan panjang gelombang cahaya ditunjukkan pada **Gambar 7**.

Tabel 3. Pengaruh Kadar Air Limbah terhadap Penyisihan Kadar Nitrat pada Berbagai Warna Lampu dan Panjang Gelombang Cahaya

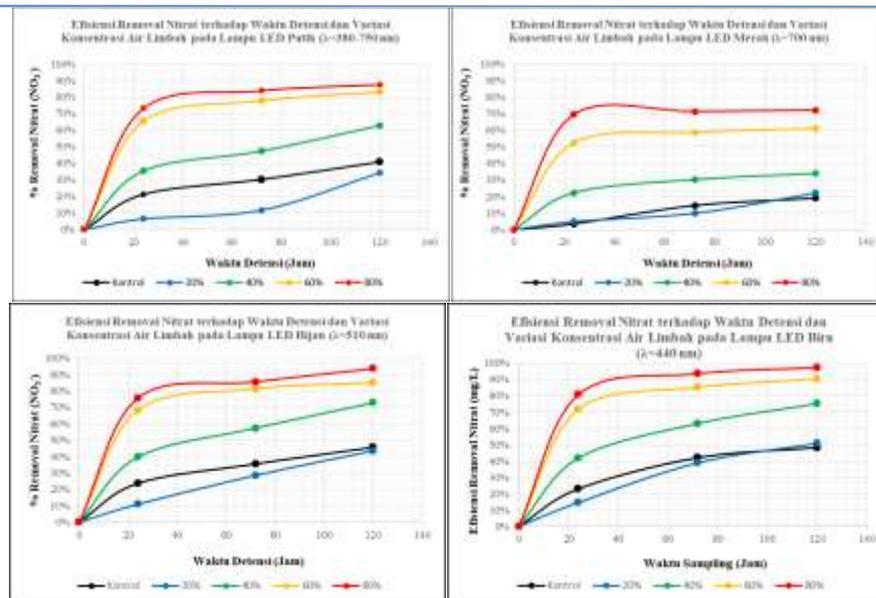
Kadar Air Limbah (%)	Waktu detensi (Jam)	Warna dan Panjang Gelombang Cahaya (λ)							
		Putih λ : 380-750 nm	Efisiensi Removal (%)	Merah λ : 700 nm	Efisiensi Removal (%)	Hijau λ : 510 nm	Efisiensi Removal (%)	Biru λ : 440 nm	Efisiensi Removal (%)
		Konsentrasi Nitrat (mg/L)							
Kontrol	0	36,91	0,00%	36,91	0,00%	36,91	0,00%	36,91	0,00%
	24	29,02	21,38%	35,60	3,55%	28,15	23,73%	28,40	23,06%
	72	25,70	30,37%	31,50	14,66%	23,79	35,55%	21,35	42,16%
	120	21,80	40,94%	29,90	18,99%	20,06	45,65%	19,05	48,39%
20	0	21,45	0,00%	21,45	0,00%	21,45	0,00%	21,45	0,00%
	24	20,05	6,53%	20,40	4,90%	19,10	10,96%	18,30	14,69%
	72	18,92	11,79%	19,32	9,93%	15,33	28,53%	13,08	39,02%
	120	14,10	34,27%	16,70	22,14%	12,11	43,54%	10,51	51,00%
40	0	25,90	0,00%	25,90	0,00%	25,90	0,00%	25,90	0,00%
	24	16,70	35,52%	20,11	22,36%	15,60	39,77%	15,04	41,93%
	72	13,60	47,49%	18,05	30,31%	11,04	57,37%	9,54	63,17%
	120	9,60	62,93%	17,11	33,94%	7,05	72,78%	6,40	75,29%
60	0	31,67	0,00%	31,67	0,00%	31,67	0,00%	31,67	0,00%
	24	10,90	65,58%	15,04	52,51%	10,04	68,30%	8,90	71,90%
	72	7,03	77,80%	13,06	58,76%	5,89	81,40%	4,65	85,32%
	120	5,30	83,26%	12,34	61,04%	4,70	85,16%	3,01	90,50%
80	0	33,03	0,00%	33,03	0,00%	33,03	0,00%	33,03	0,00%
	24	8,85	73,21%	10,01	69,69%	8,01	75,75%	6,30	80,93%
	72	5,31	83,92%	9,43	71,45%	4,76	85,59%	2,07	93,73%
	120	4,11	87,56%	9,20	72,15%	2,10	93,64%	0,83	97,49%

Sumber: Hasil Analisis, 2024



Gambar 7. Hubungan Variasi Panjang Gelombang Cahaya dan Waktu detensi dengan % Removal Nitrat pada Kadar Air Limbah Kontrol, 20%, 40%, 60% dan 80%

Berdasarkan hasil grafik dalam **Gambar 7**, efisiensi removal nitrat dipertimbangkan berdasarkan konsentrasi awal dan akhir nitrat dalam waktu 5 hari. Efisiensi removal tertinggi tercatat pada air limbah 80% dengan cahaya biru (440 nm) mencapai 97,49%, sedangkan kondisi kontrol dengan cahaya merah (700 nm) memiliki efisiensi terendah hanya 18,99%. Pada setiap variasi warna dan panjang gelombang cahaya, efisiensi removal tertinggi terjadi pada konsentrasi air limbah 80%, dengan nilai efisiensi berturut-turut pada warna putih, merah, hijau, dan biru adalah 87,56%, 72,15%, 93,64%, dan 97,49%. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi optimal untuk pengolahan air limbah adalah 80%, sejalan dengan hasil aklimatisasi mikroalga *Chlorella vulgaris*. Selanjutnya, tren efisiensi removal nitrat terhadap variasi panjang gelombang cahaya disajikan pada grafik **Gambar 8**, yang memberikan informasi lebih lanjut mengenai pengaruh konsentrasi air limbah terhadap proses tersebut.



Gambar 8. Hubungan Variasi Kadar Air Limbah dan Waktu detensi dengan % Removal Nitrat pada Panjang Gelombang Cahaya

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi removal nitrat meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi air limbah, terutama pada konsentrasi air limbah 80%, dengan efisiensi tertinggi pada variasi lampu LED biru. Tren tersebut diamati dari grafik Gambar 8., dengan efisiensi removal tertinggi pada sampling 120 jam. Variasi warna dan panjang gelombang cahaya menunjukkan efisiensi removal nitrat dari rendah hingga tinggi adalah merah, putih, hijau, dan biru, sejalan dengan hasil analisis kerapatan sel *Chlorella vulgaris*. Selain itu, *Chlorella vulgaris* juga berperan dalam proses nitrifikasi dan oksidasi amonia menjadi nitrat, mendukung efisiensi penghilangan nitrat dalam air limbah. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *Air-Lift Photobioreactor* (ALPBR) menghasilkan efisiensi removal nitrat yang lebih tinggi daripada metode lain yang diuji sebelumnya [16].

3.5. Kerapatan Sel *Chlorella vulgaris* pada Pengolahan Air Limbah Domestik menggunakan ALPBR Berbasis Mikroalga terhadap Berbagai Variabel

Untuk mengetahui jumlah mikroalga dalam media selama proses pengolahan, digunakan penghitungan jumlah kerapatan sel mikroalga menggunakan metode perhitungan sederhana menggunakan mikroskop dan haemocytometer [17]. Kemudian, dihitung pula laju pertumbuhan spesifik pada setiap waktu detensi selama proses pengolahan. Pengaruh kerapatan sel mikroalga *Chlorella vulgaris* terhadap berbagai variabel disajikan pada **Tabel 4**. Berdasarkan **Tabel 4**, pada kondisi air limbah kontrol tidak ada penambahan mikroalga saat proses pengolahan. Penambahan mikroalga dilakukan pada konsentrasi air limbah 20%; 40%; 60%; dan 80% sebanyak 500 ml pada masing-masing variasi dari total volume 3500 ml atau dengan rasio perbandingan mikroalga : air limbah (1:7).

Pertumbuhan mikroalga dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya adalah konsentrasi air limbah sebagai sumber nutrisi dan variasi panjang gelombang cahaya sebagai sumber cahaya. Dari hasil perhitungan, diketahui bahwa kerapatan sel *Chlorella vulgaris* tertinggi terjadi pada variasi konsentrasi air limbah 80% dengan panjang gelombang cahaya biru di waktu detensi 120 jam (hari ke-5), yaitu sebesar 819×10^4 sel/ml. Sedangkan kerapatan sel *Chlorella vulgaris* terendah terjadi pada variasi konsentrasi air limbah 20% dengan panjang gelombang cahaya merah di waktu detensi 120 jam (hari ke-5), yaitu sebesar 134×10^4 sel/ml. Kemudian, dilihat dari laju pertumbuhan spesifik, seluruh hasil dari variasi konsentrasi air limbah dan panjang gelombang cahaya pada waktu detensi 24 jam (hari ke-1) memiliki laju pertumbuhan tertinggi, kecuali pada variasi panjang gelombang cahaya merah pada konsentrasi air limbah 20%.

Tabel 4. Pengaruh Kerapatan Sel Mikroalga *Chlorella vulgaris* terhadap Variasi Kadar Air Limbah pada Berbagai Warna Lampu dan Panjang Gelombang Cahaya

Kadar Air Limbah (%)	Waktu detensi (Jam)	Warna dan Panjang Gelombang Cahaya (λ)			
		Putih λ : 380-750 nm	Merah λ : 700 nm	Hijau λ : 510 nm	Biru λ : 440 nm
		Kerapatan Sel Mikroalga (10^4 Sel/ml)			
Kontrol	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0
	72	0	0	0	0
	120	0	0	0	0
20	0	134	122	130	140
	24	210	130	310	366
	72	264	151	354	378
	120	288	134	376	412
40	0	144	125	131	120
	24	208	163	378	352
	72	327	184	465	434
	120	367	193	550	587
60	0	125	137	145	149
	24	286	178	351	489
	72	402	197	515	557
	120	440	254	612	625
80	0	138	140	129	137
	24	421	210	411	532
	72	545	250	612	702
	120	672	355	711	819

Sumber: Hasil Analisis, 2024

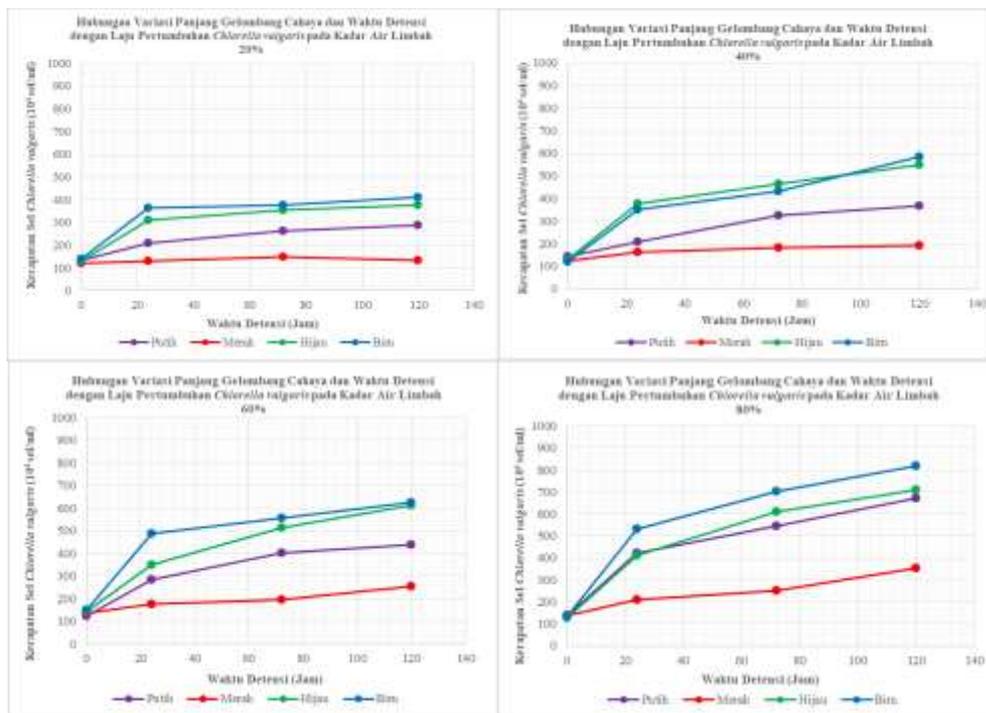
Berdasarkan **Tabel 4**, pada kondisi air limbah kontrol tidak ada penambahan mikroalga saat proses pengolahan. Penambahan mikroalga dilakukan pada konsentrasi air limbah 20%; 40%; 60%; dan 80% sebanyak 500 ml pada masing-masing variasi dari total volume 3500 ml atau dengan rasio perbandingan mikroalga : air limbah (1:7). Pertumbuhan mikroalga dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya adalah konsentrasi air limbah sebagai sumber nutrisi dan variasi panjang gelombang cahaya sebagai sumber cahaya. Dari hasil perhitungan, diketahui bahwa kerapatan sel *Chlorella vulgaris* tertinggi terjadi pada variasi konsentrasi air limbah 80% dengan panjang gelombang cahaya biru di waktu detensi 120 jam (hari ke-5), yaitu sebesar 819×10^4 sel/ml. Sedangkan kerapatan sel *Chlorella vulgaris* terendah terjadi pada variasi konsentrasi air limbah 20% dengan panjang gelombang cahaya merah di waktu detensi 120 jam (hari ke-5), yaitu sebesar 134×10^4 sel/ml. Kemudian, dilihat dari laju pertumbuhan spesifik, seluruh hasil dari variasi konsentrasi air limbah dan panjang gelombang cahaya pada waktu detensi 24 jam (hari ke-1) memiliki laju pertumbuhan tertinggi, kecuali pada variasi panjang gelombang cahaya merah pada konsentrasi air limbah 20%.

3.6. Laju Pertumbuhan Mikroalga *Chlorella vulgaris* Berdasarkan Variasi Konsentrasi Air Limbah dan Panjang Gelombang Cahaya

Mikroalga, terutama *Chlorella vulgaris*, merupakan organisme mikroskopis yang membutuhkan karbondioksida, nutrisi, dan cahaya untuk berkembang biak, sehingga sering digunakan dalam pengolahan air limbah karena kemampuan adaptasinya yang baik. Penelitian ini menggunakan *Chlorella vulgaris* dan memvisualisasikan tren laju pertumbuhannya berdasarkan kerapatan sel terhadap panjang gelombang cahaya pada variasi konsentrasi air limbah.

Berdasarkan analisis **Gambar 9**, *Chlorella vulgaris* menunjukkan kerapatan sel maksimum pada konsentrasi air limbah 80% dengan cahaya biru pada detensi 120 jam. Media dengan konsentrasi air limbah 20% menunjukkan pertumbuhan rendah. Meskipun demikian, mikroalga tetap mengalami fase eksponensial pada detensi 24 jam dan fase stasioner pada detensi 72 jam. Pada cahaya merah, terjadi fase kematian pada detensi 120 jam. Kerapatan sel tertinggi terjadi pada cahaya biru, sementara cahaya merah menunjukkan pertumbuhan paling rendah. Radiasi gelombang pendek, terutama biru, memainkan peran penting dalam sintesis klorofil *Chlorella vulgaris*. Cahaya biru memiliki efek positif pada fotosintesis, tetapi kombinasi cahaya biru dan merah dapat memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap pertumbuhan mikroalga. Cahaya hijau juga memiliki efisiensi serapan yang tinggi. Cahaya merupakan faktor kunci dalam fotosintesis, yang penting untuk pertumbuhan mikroalga dan pengolahan air limbah. Selain itu, proses

fotosintesis *Chlorella vulgaris* menghasilkan glukosa dan oksigen yang berguna dalam pengolahan biologis air limbah.



Gambar 9. Hubungan Variasi Panjang Gelombang Cahaya dan Waktu Detensi dengan Laju Pertumbuhan *Chlorella vulgaris* pada Kadar Air Limbah 20%, 40%, 60%, dan 80%.

4. Kesimpulan

Dalam penelitian ini disimpulkan bahwa efisiensi penghilangan nitrat tertinggi terjadi dengan penggunaan panjang gelombang cahaya biru pada berbagai konsentrasi air limbah, mencapai 97,49% pada hari kelima. Cahaya biru juga menunjukkan efisiensi tertinggi dalam penyisihan nitrat pada konsentrasi air limbah 80%, diikuti oleh cahaya hijau, putih, dan merah. Penggunaan panjang gelombang cahaya yang lebih pendek memberikan penyerapan radiasi yang lebih optimal. Selain itu, variasi panjang gelombang cahaya memengaruhi laju pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris*, dengan pertumbuhan tertinggi terjadi pada cahaya biru diikuti oleh hijau, putih, dan merah. Cahaya biru memiliki panjang gelombang pendek yang dapat mengaktifkan protein fotoreseptor spesifik yang memodulasi proses fotosintesis secara positif.

5. Referensi

- [1] Pemerintah Republik Indonesia, "Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Pedoman Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup," *Pres. REPUBLIK Indones.*, vol. 1, no. 078487A, p. 483, 2021, [Online]. Available: <http://www.jdih.setjen.kemendagri.go.id/>.
- [2] K. Amri and P. Wesen, "Pengolahan Air Limbah Domestik Menggunakan Biofilter Anaerob Bermedia Plastik (Bioball)," *J. Ilm. Tek. Lingkung.*, vol. 7, no. 2, pp. 55–66, 2017.
- [3] B. Koul, D. Yadav, S. Singh, M. Kumar, and M. Song, "Insights into the Domestic Wastewater Treatment (DWWT) Regimes: A Review," *Water (Switzerland)*, vol. 14, pp. 1–29, 2022, doi: 10.3390/w14213542.
- [4] S. F. Siqueira, M. I. Queiroz, S. F. Siqueira, M. I. Queiroz, E. Jacob-Lopes, and L. Q. Zepka, "Introductory Chapter: Microalgae Biotechnology. A Brief Introduction," *Intech*, vol. 11, no. tourism, pp. 1–13, 2018, [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>.
- [5] S. O. Gultom, "Mikroalga: Sumber Energi Terbarukan Masa Depan," *J. Kelaut. Indones. J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 95–103, 2018, doi: 10.21107/jk.v11i1.3802.
- [6] T. Novianti, M. Zainuri, and I. Widowati, "Studi Tentang Pertumbuhan Mikroalga *Chlorella Vulgaris* Yang Dikultivasi Berdasarkan Sumber Cahaya Yang Berbeda," *J. Biol. Pendidik. Biol.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–8, 2017.

- [7] Y. Wan, N. Yan, J. Zhao, H. Zhi, and W. Wang, "Trends and progress in Microalgae-based wastewater treatment technologies: A review," *E3S Web Conf.*, vol. 308, no. 01014, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202130801014.
- [8] J. A. Coronado-Reyes, J. A. Salazar-Torres¹, B. Juárez-Campos, And J. C. González-Hernández, "Chlorella vulgaris, a microalgae important to be used in Biotechnology: a review," *Food Sci. Technol.*, vol. 42, no. 37320, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1590/fst.37320.
- [9] M. Y. D. Alazaiza, S. He, D. Su, S. S. Abu Amr, P. Y. Toh, and M. J. K. Bashir, "Sewage Water Treatment Using Chlorella Vulgaris Microalgae for Simultaneous Nutrient Separation and Biomass Production," *Separations*, vol. 10, no. 4, pp. 1–13, 2023, doi: 10.3390/separations10040229.
- [10] S. Elystia, A. Hasti, and R. Muria, "Pengolahan Limbah Minyak Sawit Menggunakan Chlorella sp. yang Diimobilisasi dalam Flat-Fotobioreaktor," *J. Sains dan Teknol.*, vol. 11, no. 1, pp. 67–76, 2022, [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.23887/jst-undiksha.v11i1>.
- [11] P. Yaqoubnejad, H. A. Rad, and M. Taghavijeloudar, "Development a novel hexagonal airlift flat plate photobioreactor for the improvement of microalgae growth that simultaneously enhance CO₂ bio-fixation and wastewater treatment," *J. Environ. Manage.*, vol. 298, no. 113482, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113482.
- [12] S. Elystia, S. R. Muria, and S. I. P. Pertiwi, "Pemanfaatan Mikroalga Chlorella Sp Untuk Produksi Lipid Dalam Media Limbah Cair Hotel Dengan Variasi Rasio C:N Dan Panjang Gelombang Cahaya," *J. Sains & Teknologi Lingkungan.*, vol. 11, no. 1, pp. 25–43, 2019, doi: 10.20885/jstl.vol11.iss1.art3.
- [13] A. M. Syach, F. Kenisha, A. Putri, G. Ginting, Taufikurrahman, and N. T. Astutiningsih, "Fikoremediasi Nitrogen (N) ADDMW (Anaerobically Digested Manure Waste) Menggunakan Mikroalga Chlorella dengan Sistem Fotobioreaktor," no. May, pp. 1–9, 2018, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/341192719>.
- [14] I. Ahmad, N. Abdullah, I. Koji, A. Yuzir, and S. Eva Muhammad, "Evolution of Photobioreactors: A Review based on Microalgal Perspective," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1142, no. 012004, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1142/1/012004.
- [15] P. Ziegler, K. J. Appenroth, and K. S. Sree, "Survival Strategies of Duckweeds, the World's Smallest Angiosperms," *Plants*, vol. 12, no. 2215, pp. 1–30, 2023, doi: 10.3390/plants12112215.
- [16] N. Candranifia, N. Elok Arohmah, E. Nurul Hidayah, and O. Hendrianto Cahyonugroho, "Kinetic of Microalgae Chlorella sp. in Domestic Waste Treatment Using Oxidation Ditch Algae Reactor (ODAR)," *Iceset*, vol. 2, no. 3, pp. 118–123, 2021, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.11594/nstp.2021.1419>.
- [17] T. Istirokhatun, M. Aulia, and S. Utomo, "Potensi Chlorella Sp. untuk Menyisihkan COD dan Nitrat dalam Limbah Cair Tahu," *J. Presipitasi Media Komun. dan Pengemb. Tek. Lingkung.*, vol. 14, no. 2, pp. 88–96, 2017, doi: 10.14710/presipitasi.v14i2.88-96.