

Rancang Bangun Carbon Capture Storage (CCS) Fotobioreaktor Mikroalga untuk Mereduksi Emisi Karbon CO₂

^{1*}Muhammad Zulham Kentji, ²Septianissa Azzahra, ³Kuswowo

^{1,2,3} Institut Teknologi PLN

Email Korespondensi: m.zulham@itpln.ac.id

Received: July 2025; Revised: July 2025; Published: August 2025

Abstrak

Berdasarkan data dari World Health Organization (WHO) mengatakan bahwa polusi udara merupakan masalah utama pencemaran lingkungan yang menyebabkan 7 juta kematian setiap tahunnya. Gas buang pada kendaraan bermotor berupa pollutant CO, CO₂, NO, SO, dan Pb yang menjadi penyebab pencemaran udara. Mikroalga adalah tumbuhan mikroskopis sel tunggal yang dapat menyerap CO₂ sehingga dapat menurunkan kadar CO₂ yang ada di udara. Untuk mendukung kultur dan pertumbuhan mikroalga, fotobioreaktor menjadi komponen krusial dalam penelitian ini. Fotobioreaktor adalah reaktor tembus pandang yang untuk digunakan mendukung kultivasi mikroalga dan menyerap CO₂. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui rancang bangun fotobioreaktor mikroalga dan cara kerjanya, serta mengamati proses perbanyakan mikroalga dan metode tahap pemanenannya. Metode pengumpulan data pada penelitian ini adalah dengan melakukan eksperimen dan observasi secara langsung sehingga diperoleh data asli sesuai dengan hasil pengujian prototype fotobioreactor mikroalga dalam menyerap CO₂, O₂ yang dihasilkan dan proses pemanenan mikroalga. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah terciptanya rancang bangun fotobioreaktor yang menggabungkan sistem terbuka dan tertutup sehingga dapat memaksimalkan proses kultivasi mikroalga. Teknologi fotobioreaktor memungkinkan mikroalga menangkap karbon melalui proses fotosintesis, meningkatkan produktivitas mikroalga hingga dua hingga lima kali lipat dari kondisi normal.

Kata kunci: Mikroalga, Fotobioreaktor, CO₂

Design and Development of a Carbon Capture Storage (CCS) Microalgae Photobioreactor for Reducing CO₂ Emissions

Abstract

Based on data from the World Health Organization (WHO), air pollution is a major environmental pollution issue that causes 7 million deaths each year. Emissions from motor vehicles, including pollutants such as CO, CO₂, NO, SO, and Pb, contribute significantly to air pollution. Microalgae are microscopic single-celled plants capable of absorbing CO₂ to help reduce CO₂ levels in the air. To support the culture and growth of microalgae, a photobioreactor becomes a crucial component in this research. A photobioreactor is a transparent reactor equipped with media supply installations and gas emissions for culturing microalgae and absorbing CO₂. This study aims to understand the design and mechanism of a microalgae photobioreactor, as well as to observe the process of microalgae propagation and the harvesting method. Data collection in this study was conducted through experiments and direct observation to obtain original data based on the results of testing a microalgae photobioreactor prototype in absorbing CO₂, the O₂ produced, and the microalgae harvesting process. The result obtained in this research is the construction of a photobioreactor design that combines open and closed systems to maximize the microalgae cultivation process. Photobioreactor technology allows microalgae to capture carbon through the process of photosynthesis, increasing microalgae productivity by two to five times over normal conditions.

Keywords: Microalgae, Photobioreactor, CO₂

How to Cite: Kentji, M. Z., Azzahra, S., & Kuswowo, K. (2025). Rancang Bangun Carbon Capture Storage (CCS) Fotobioreaktor Mikroalga untuk Mereduksi Emisi Karbon CO₂. *Journal of Authentic Research*, 4(Special Issue), 1055–1066. <https://doi.org/10.36312/jar.v4iSpecial Issue.3475>



<https://doi.org/10.36312/jar.v4iSpecial Issue.3475>

Copyright© 2025, Kentji et al.

This is an open-access article under the CC-BY-SA

License.



PENDAHULUAN

Polusi udara merupakan salah satu masalah lingkungan yang mendesak dan memiliki dampak besar terhadap kesehatan manusia. Berdasarkan data yang dirilis oleh World Health Organization (WHO), polusi udara merupakan penyebab utama pencemaran lingkungan yang mengakibatkan sekitar 7 juta kematian setiap tahunnya. Angka ini menunjukkan bahwa polusi udara menyebabkan tiga kali lebih banyak kematian dibandingkan dengan malaria, tuberkulosis (TBC), dan AIDS. Penyakit yang sering kali terkait langsung dengan polusi udara meliputi penyakit paru obstruktif kronis (COPD), penyakit jantung, stroke, dan kanker paru-paru, dengan kontribusi yang signifikan dalam masing-masing penyakit tersebut (WHO, 2022). Polusi udara yang dihasilkan oleh emisi gas kendaraan bermotor, seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), nitrogen oksida (NO), sulfur dioksida (SO₂), dan timbal (Pb), menjadi faktor dominan yang memperburuk kualitas udara di banyak kota besar di dunia, terutama yang memiliki tingkat kepadatan kendaraan tinggi.

Khususnya, gas karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar kendaraan bermotor berperan besar dalam pemanasan global. Data dari berbagai penelitian, termasuk yang dilakukan oleh Abbass et al. (2022), Muhali et al. (2025), dan Sesana et al. (2021), menunjukkan bahwa emisi CO₂ dari sektor transportasi memberikan kontribusi signifikan terhadap perubahan iklim. Sebagai contoh, sektor transportasi di negara-negara berkembang menyumbang lebih dari 30% dari total emisi gas rumah kaca (GHG). Ini menunjukkan urgensi upaya penurunan kadar CO₂ untuk mengurangi dampak perubahan iklim dan memitigasi dampak negatifnya terhadap ekosistem dan kesehatan manusia.

Dalam konteks ini, penelitian mengenai cara untuk mengurangi emisi CO₂, baik dari sektor transportasi maupun sumber lainnya, menjadi sangat penting. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi emisi CO₂, mulai dari pengembangan kendaraan ramah lingkungan seperti mobil listrik, hingga berbagai metode teknologi pengurangan emisi CO₂ yang lebih langsung, seperti karbon capture and storage (CCS). Namun, meskipun berbagai teknologi tersebut sudah dikembangkan, penurunan emisi CO₂ yang signifikan dan berkelanjutan masih menghadapi tantangan besar, terutama di kawasan perkotaan yang memiliki tingkat polusi udara tinggi.

Mikroalga, seperti yang dicatat dalam penelitian Halomoan & Nugroho (2017) dan Rusdiani et al. (2016), menawarkan solusi yang potensial dalam upaya fiksasi karbon. Mikroalga memanfaatkan CO₂ sebagai sumber karbon dalam proses fotosintesis, menghasilkan oksigen sebagai produk sampingan, serta dapat mengkonversi CO₂ menjadi biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan, seperti biofuel. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa mikroalga mampu melakukan fiksasi CO₂ hingga 10-50 kali lebih efisien dibandingkan dengan tanaman tingkat tinggi. Beberapa spesies mikroalga seperti Chlorella, Scenedesmus, Nannochloropsis, dan Spirulina telah banyak diteliti untuk keperluan produksi biofuel karena kandungan karbohidrat yang tinggi dan kemampuan mereka untuk menghasilkan biomassa dalam jumlah besar.

Namun, meskipun mikroalga memiliki potensi besar dalam fiksasi CO₂ dan produksi biofuel, sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada pengoptimalan spesies mikroalga serta pemanfaatannya sebagai bahan baku biofuel.

Gap yang ada dalam penelitian ini adalah kurangnya kajian yang membahas tentang desain sistem yang dapat mengintegrasikan mikroalga dengan teknologi lain, seperti panel surya dan fotobioreaktor yang lebih efisien, untuk mengatasi masalah polusi udara secara langsung. Selain itu, penerapan sistem ini dalam area berpolusi tinggi di kota besar, seperti dekat dengan jalan masuk parkiran motor atau jalan raya yang memiliki konsentrasi CO₂ tinggi, juga belum banyak dieksplorasi.

Penelitian ini menawarkan pendekatan baru dengan mengembangkan sistem fotobioreaktor mikroalga yang terintegrasi dengan teknologi panel surya, tabung silinder bening, aerator, dan lampu LED. Pendekatan ini tidak hanya mengusulkan penggunaan mikroalga untuk fiksasi CO₂, tetapi juga mengintegrasikan teknologi lain yang dapat meningkatkan efisiensi proses fotosintesis mikroalga dan memaksimalkan penyerapan gas buang kendaraan bermotor. Teknologi panel surya akan digunakan untuk menyediakan energi yang diperlukan untuk operasional sistem, sementara tabung silinder bening diharapkan dapat memberikan paparan cahaya optimal untuk mikroalga, yang meningkatkan produksi oksigen dan fiksasi CO₂.

Salah satu keunikan dari penelitian ini terletak pada pemilihan lokasi aplikasi yang berada di area dengan konsentrasi CO₂ tinggi, seperti di dekat jalan parkir kendaraan bermotor. Desain fotobioreaktor yang terbuka akan memungkinkan serapan gas buang kendaraan secara langsung, sehingga mengurangi polusi udara di area tersebut. Dengan menerapkan sistem ini di kawasan perkotaan yang sangat terpengaruh oleh polusi udara, penelitian ini bertujuan untuk menciptakan solusi mitigasi yang lebih kontekstual dan aplikatif dalam pengendalian emisi gas rumah kaca di kehidupan sehari-hari.

Penelitian ini melanjutkan dan memperluas temuan-temuan dari studi sebelumnya yang menyoroti potensi mikroalga dalam fiksasi CO₂ dan produksi biofuel. Halomoan & Nugroho (2017) dan Rusdiani et al. (2016) telah membuktikan bahwa mikroalga merupakan agen fiksasi karbon yang efisien, namun mereka belum mengkaji secara rinci bagaimana mengoptimalkan proses fiksasi tersebut dengan teknologi lain, seperti yang ditawarkan oleh sistem fotobioreaktor terintegrasi ini. Penelitian ini menawarkan strategi yang lebih praktis dengan mengintegrasikan teknologi panel surya dan desain fotobioreaktor terbuka, yang belum banyak dijadikan fokus dalam penelitian sebelumnya.

Selain itu, penempatan sistem di lokasi yang memiliki konsentrasi CO₂ tinggi, seperti area parkir motor, merupakan aspek yang sangat inovatif dan belum banyak dieksplorasi. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada laboratorium atau ruang tertutup dengan pengaturan yang terkendali, sedangkan penelitian ini mencoba untuk menciptakan solusi yang dapat diterapkan langsung di lingkungan perkotaan dengan tingkat polusi yang tinggi.

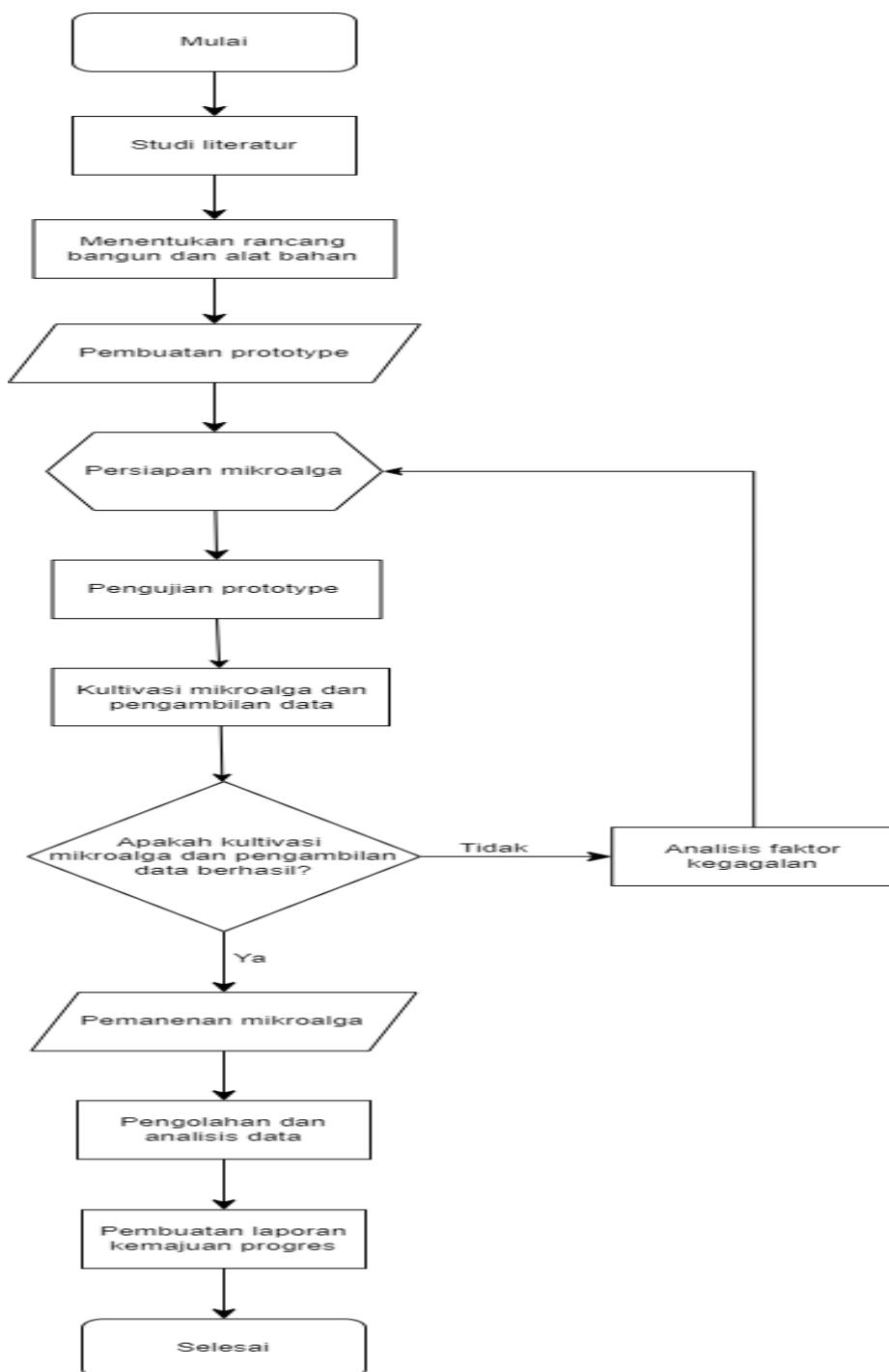
Inovasi dalam desain sistem fotobioreaktor mikroalga yang terintegrasi dengan teknologi panel surya dan lokasi aplikasi di area dengan polusi udara tinggi menunjukkan potensi besar dalam upaya mitigasi emisi CO₂ secara praktis dan aplikatif. Dengan pendekatan ini, penelitian ini tidak hanya menawarkan solusi yang ramah lingkungan, tetapi juga lebih kontekstual dalam menghadapi tantangan polusi udara di perkotaan. Penelitian ini dapat menjadi langkah awal dalam pengembangan teknologi yang dapat diterapkan di berbagai daerah dengan tingkat polusi tinggi, untuk mencapai pengurangan emisi gas rumah kaca yang lebih berkelanjutan.

METODE

Mikroalga memiliki kemampuan menyerap gas CO₂ sebagai bahan baku proses fotosintesis dan mengubahnya menjadi biomassa. Penangkapan karbon oleh mikroalga melalui proses fotosintesis berlangsung di dalam organel sel mikroalga yang disebut dengan kloroplas, dimana gas CO₂ dikonversi menjadi senyawa-senyawa organik sederhana melalui serangkaian reaksi biokimia yang kompleks (Daneshvar et al., 2022). Mikroalga dalam fotobioreaktor berkontribusi pada strategi mitigasi CO₂ yang efektif, mendukung desain proses bioteknologi untuk penangkapan karbon dan produksi biomassa (Alalayah, 2014).

Untuk mendukung kultur dan pertumbuhan mikroalga, fotobioreaktor menjadi komponen krusial dalam penelitian ini. Fotobioreaktor merupakan teknologi yang diketahui mampu meningkatkan kemampuan mikroalga dalam berfotosintesis hingga lima kali lipat dibandingkan keadaan normalnya. Fotobioreaktor adalah reaktor tembus pandang yang dapat digunakan dalam kultivasi mikroalga dan menyerap CO₂ (Rusdiani et al., 2016). Fotobioreaktor merupakan salah satu alat yang efektif untuk meningkatkan efisiensi produksi mikroalga dalam skala besar, terutama untuk produksi biodiesel, dibandingkan dengan metode terbuka seperti kolam terbuka (Indriyani, B, P & A, 2020).

Pengambilan data dilakukan dengan memerhatikan beberapa faktor penting yang mendukung perkembangan mikroalga pada fotobioreaktor serta perubahan yang terjadi pada mikroalga selama masa kultivasi. Pengukuran dilakukan terhadap beberapa faktor penting dalam kultivasi mikroalga yang meliputi kadar CO₂ di udara, suhu air, serta ketinggian campuran air dan mikroalga pada fotobioreaktor. Selain itu diamati perubahan warna yang terjadi selama proses kultivasi mikroalga berlangsung dan pemanenan mikroalga. Data diambil setiap hari setiap hari pada pagi, siang, dan sore hari selama satu minggu penuh untuk mendapatkan data akurat. Pengambilan data dilakukan dengan mengikuti alur penelitian yang diilustrasikan pada diagram alir berikut.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

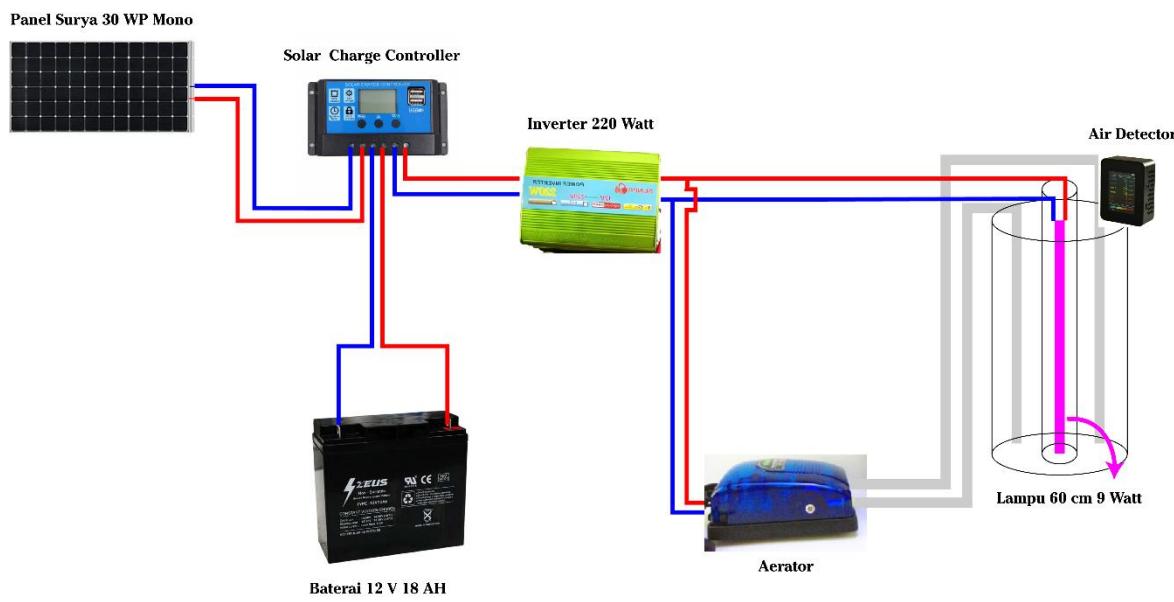
Kultivasi mikroalga dalam fotobioreaktor dengan periode cahaya yang berbeda menghasilkan variasi dalam komposisi kimia, yang menunjukkan peran paparan cahaya dalam meningkatkan produktivitas mikroalga (Afriani et al., n.d.). Fotobioreaktor menunjukkan keunggulan dalam hal kontrol lingkungan yang lebih baik dibandingkan dengan kolam terbuka yang rentan terhadap kontaminasi dan perubahan cuaca (Sari, s & Sari, 2018). Fotobioreaktor memberikan kontrol yang lebih presisi terhadap faktor-faktor lingkungan, sehingga lebih efektif dalam proses bioremediasi dibandingkan dengan kolam terbuka (Budi, F & Budi, 2019).

Fotobioreaktor menyediakan kondisi cahaya dan CO₂ yang optimal, sangat penting untuk produksi biofuel dalam skala besar dari mikroalga (Prasetyo et al., 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancang Bangun Fotobioreaktor

Prototype fotobioreaktor dibuat dengan gabungan desain terbuka dan tertutup yang terbuat dari kaca akrilik bening dengan tinggi 60 cm dengan diameter 30 cm dan penutup berbentuk kerucut berukuran 20 cm dengan diameter 45 cm yang digunakan sebagai pelindung agar mikroalga tidak terkontaminasi oleh air hujan. Bioreaktor dilengkapi lampu LED sebagai pengatur intensitas cahaya untuk perkembangan mikroalga pada malam hari, sehingga lampu akan dinyalakan pada sore hari pukul 17.30 sampai dengan pukul 07.00 pagi, dan intensitas cahaya setelah pukul 07.00 pagi diperoleh dari sinar matahari. Kemudian untuk menjaga sirkulasi di dalam bioreaktor dilengkapi aerator untuk mendapatkan sirkulasi terus menerus. Selain itu, digunakan juga panel surya sebagai sumber energi listrik untuk menyalaikan komponen elektronik seperti lampu LED dan aerator.

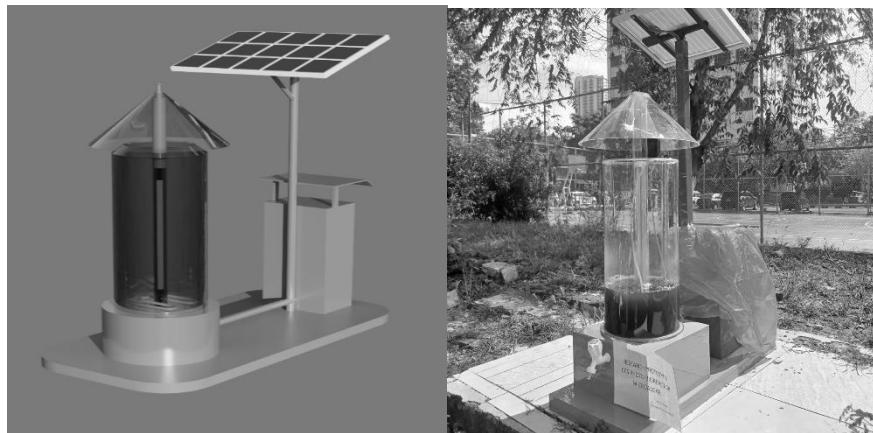


Gambar 2. Wiring Diagram Fotobioreaktor

Pada gambar 2 ini menunjukkan wiring diagram dari fotobioreaktor, dimana panel surya dan baterai dihubungkan dengan *solar charge controller* yang berfungsi untuk mengatur masukan daya dari panel surya yang didapat pada siang hari untuk disimpan dalam baterai dan dapat dipergunakan pada malam hari untuk menyalaikan lampu LED dan aerator secara terus menerus. Panel surya dan baterai yang digunakan mempunyai kapasitas yang telah dihitung untuk memenuhi beban lampu dan aerator minimal selama 2-3 hari, sehingga kebutuhan sirkulasi udara dan pencahayaan pada mikroalga dapat terjaga dan mikroalga dapat berkembang secara optimal.

Desain tersebut diklaim efektif dalam memanfaatkan cahaya matahari sebagai sumber energi alami dalam kultivasi mikroalga pada siang hari dan penggunaan lampu LED yang berfungsi sebagai pengganti cahaya matahari untuk membantu kultivasi mikroalga pada malam hari. Selain itu, gabungan desain tertutup dan

terbuka dapat memberikan hasil yang lebih optimal dan dapat memaksimalkan pemanenan mikroalga. Pertumbuhan mikroalga dalam fotobioreaktor dengan intensitas cahaya yang berbeda menghasilkan perbedaan yang signifikan dalam laju pertumbuhannya, yang menyoroti pentingnya kontrol cahaya dalam mengoptimalkan kultur mikroalga (Prasetyo et al., 2022).



Gambar 3. Desain Fotobioreaktor

Gambar 3 merupakan rancangan desain dari fotobioreaktor mikroalga yang berfungsi untuk menangkap emisi karbon yang dihasilkan dari lingkungan di sekitarnya. Sedangkan Gambar 4 adalah tampilan aktual dari desain fotobioreaktor mikroalga yang telah dibuat sesuai dengan rancangan desainnya dan ditempatkan di area parkiran belakang kampus ITPLN dengan tujuan untuk menangkap atau mengurangi emisi karbon yang dihasilkan dari kendaraan bermotor yang memasuki lahan parkir tersebut.

Penempatan fotobioreaktor mikroalga di area parkiran belakang kampus ITPLN dengan mempertimbangkan agar emisi karbon yang dihasilkan dari kendaraan bermotor yang memasuki lahan parkir tersebut dapat dikurangi atau terserap oleh mikroalga. Diperkirakan kendaraan bermotor yang memasuki lahan parkir tersebut sekitar 100 sampai 150 kendaraan bermotor tipe roda dua yang keluar masuk area tersebut dari pagi hingga sore hari.

Pada penelitian awal ini fotobioreaktor masih dibuat dalam bentuk *prototype* dengan ukuran yang tidak terlalu besar sehingga memudahkan untuk pemantauan perkembangan mikroalga dan juga jenis dan komposisi dari mikroalga dapat dipilih yang sesuai dengan kondisi lingkungan penempatan fotobioreaktor tersebut.

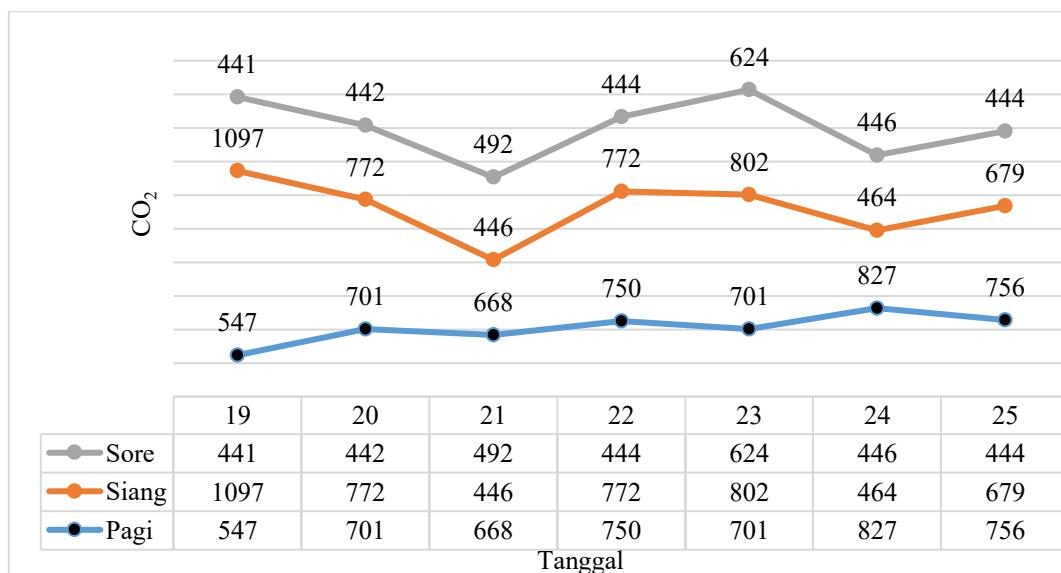
Kultivasi Mikroalga

Tahapan kultivasi mikroalga dimulai dengan mencampurkan 20 ml larutan nutrisi kedalam 10 liter air dan menambahkan mikroalga sebanyak 1 liter. Selanjutnya dilakukan kultivasi untuk mengembangbiakkan mikroalga selama satu minggu penuh dengan dilakukan pengadukan menggunakan aerator selama dua puluh

empat jam agar tidak terjadi penggumpalan pada mikroalga. Kemudian dilakukan pengukuran kadar CO_2 , suhu, dan tinggi campuran mikroalga setiap hari pada pagi, siang, dan sore hari. Sehingga diperoleh hasil sebagai berikut,

Tabel 1. Data Pengamatan Harian

Tanggal	Waktu	Ketinggian	Suhu (25-32)	CO_2 (ppm)
19 Oktober 2024	08.30	16,3	29	547
	13.00	16,3	39	1097
	17.30	16,2	30	441
20 Oktober 2024	08.30	15,7	29	701
	13.00	15,5	37	772
	17.30	15,3	30	442
21 Oktober 2024	08.30	15,3	29	668
	13.00	14,5	36	446
	17.30	14,5	30	492
22 Oktober 2024	08.30	14,1	33	750
	13.00	14,1	40	772
	17.30	14,1	30	444
23 Oktober 2024	08.30	14,1	29	701
	13.00	14,0	41	802
	17.30	13,8	30	624
24 Oktober 2024	08.30	13,5	32	827
	13.00	13,3	40	464
	17.30	13,3	31	446
25 Oktober 2024	08.30	13,3	34	756
	13.00	13,2	40	679
	17.30	13	32	444



Gambar 4. Grafik Kadar CO_2

Tabel 1 menunjukkan konsentrasi CO_2 dan suhu yang diperoleh setiap harinya terhitung sejak pertama kali dilakukan kultivasi pada mikroalga. Berdasarkan data

tersebut, didapatkan pada waktu-waktu tertentu gas CO₂ yang terukur akan tinggi, yang mana kenaikan tersebut disebabkan oleh tingginya laju keluar masuk kendaraan pada waktu tersebut seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5. Kemudian terjadi penurunan pada ketinggian campuran mikroalga pada fotobioreaktor yang sebelumnya 16,3 cm menjadi 13 cm pada hari ketujuh masa kultivasi.

Selama masa kultivasi mikroalga, terdapat perubahan yang dapat diamati secara visual, khususnya pada perubahan warna yang menunjukkan perkembangan mikroalga itu sendiri. Pada tahap awal kultivasi, mikroalga berwarna hijau transparan yang menandakan mikroalga sedang berada pada masa awal pertumbuhannya, sehingga perlakuan yang tepat dan pemberian nutrisi harus dilakukan untuk mendukung pertumbuhan mikroalga.



Gambar 5. Kultivasi Mikroalga
Hari ke-1 dan 7

Gambar 6 dan 7 menunjukkan perubahan warna yang terjadi pada mikroalga selama masa kultivasi, khususnya hari ketujuh di mana terjadi perubahan warna yang signifikan menjadi hijau pekat dan tidak tertembus oleh cahaya. Hal tersebut menunjukkan bahwa mikroalga mengalami pertumbuhan yang optimal dengan merespon faktor-faktor lingkungan tempat tinggalnya seperti kadar CO₂, intensitas cahaya yang cukup, suhu, dan ketersediaan nutrisi yang diberikan. Perubahan tersebut menunjukkan kemampuan adaptasi mikroalga terhadap kondisi lingkungan yang berbeda dalam sistem bioreaktor yang terkontrol (Widawati et al., 2022). Perubahan warna tersebut juga menandakan keberhasilan kultivasi mikroalga dan menunjukkan kualitas dan kuantitas dari biomassa yang dihasilkan oleh mikroalga sehingga mikroalga siap untuk dipanen dan dapat digunakan sebagai bahan baku biofuel. Kultivasi Spirulina dalam lingkungan yang terkontrol seperti fotobioreaktor memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap faktor-faktor seperti intensitas cahaya, yang berkontribusi pada hasil yang lebih tinggi dan kualitas biomassa yang lebih baik (Haris & Muhammad,).

Mikroalga yang sudah dikultivasi akan dipanen menggunakan metode filter vacum. Metode pemisahan ini menggunakan media yang permeabel untuk melewaskan cairan dan pada saat yang sama menahan padatan, sehingga kedua bagian terpisah. Untuk mendorong cairan melewati media filter, digunakan tekanan, gravitasi, vakum, atau sentrifugal.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang bangun fotobioreaktor mikroalga dengan menggabungkan desain terbuka dan tertutup serta dilengkapi panel surya sebagai sumber energi listrik untuk mendukung kinerja komponen elektronik seperti lampu LED dan aerator. Kombinasi ini terbukti memberikan hasil yang lebih optimal dalam memaksimalkan kultivasi mikroalga sekaligus menawarkan solusi ramah lingkungan dan hemat energi. Penerapan sumber cahaya yang berbeda, baik cahaya matahari maupun cahaya buatan dari lampu LED, menunjukkan bahwa penggunaan cahaya buatan dapat mendukung dan mengoptimalkan pertumbuhan mikroalga. Teknologi fotobioreaktor ini tidak hanya berfungsi dalam penangkapan karbon melalui proses fotosintesis, tetapi juga mampu meningkatkan produktivitas biomassa mikroalga secara signifikan. Proses pemanenan menggunakan metode filter vakum juga dinilai efektif karena mampu memisahkan biomassa mikroalga dari media kultur dengan baik.

Namun, rancangan fotobioreaktor ini masih memiliki beberapa tantangan yang perlu diperhatikan. Efisiensi penyerapan karbon dioksida dan laju pertumbuhan mikroalga sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti intensitas cahaya, suhu, pH, serta ketersediaan nutrien yang belum sepenuhnya dapat dikendalikan. Skala penerapan di lapangan, terutama pada lokasi dengan tingkat polusi tinggi seperti area parkir kendaraan bermotor, berpotensi menghadapi kendala teknis terkait kontinuitas suplai karbon dioksida, biaya perawatan, serta keberlanjutan sistem energi. Di samping itu, metode filter vakum meskipun sederhana dan efektif, masih perlu dievaluasi lebih lanjut terkait penggunaan energi dan potensi penerapannya pada skala industri.

Untuk penelitian selanjutnya, beberapa hal yang dapat dikembangkan antara lain optimalisasi faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga, pengembangan sistem monitoring berbasis teknologi cerdas agar kondisi kultur dapat diatur secara otomatis, serta uji coba dalam skala lebih besar untuk mengetahui kelayakan teknis dan ekonomisnya. Selain itu, pemanfaatan biomassa mikroalga dapat diarahkan tidak hanya pada produksi biofuel, tetapi juga pada produk bernilai tambah lain seperti pupuk organik, pakan ternak, atau bahan farmasi. Penelitian ke depan juga perlu mempertimbangkan analisis siklus hidup agar dampak lingkungan dari proses ini dapat diukur secara menyeluruh. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghadirkan inovasi teknis dalam upaya pengurangan emisi karbon, tetapi juga membuka peluang untuk pengembangan strategi mitigasi yang lebih luas, berkelanjutan, dan aplikatif.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada ITPLN melalui LPPM ITPLN yang telah memberi dukungan dan membiayai pelaksanaan Penelitian Dosen Pemula Hibah ITPLN Tahun Anggaran 2024 No.3/PDP/A04/VII/2024 dengan judul *“Rancang Bangun Carbon Capture Storage (CCS) Fotobioreaktor Mikroalga untuk Mereduksi Emisi Karbon CO₂”*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539–42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Abbass, H., et al. (2022). The role of transportation emissions in the global CO₂ emission profile. *Environmental Science & Technology*, 56(7), 4125-4132.
- Afriani, S., Setyaningsih, I., Teknologi Hasil Perairan, D., Perikanan dan Ilmu Kelautan, F., & Pertanian Bogor, I. (n.d.). KOMPOSISI KIMIA Spirulina platensis YANG DIKULTIVASI DALAM FOTOBIOREAKTOR DENGAN FOTOPERIODE BERBEDA. In *JPHPI 2018* (Vol. 21, Issue 3).
- Alalayah, W. (2014). *Experimental investigation parameters of hydrogen production by algae Chlorella vulgaris*.
- Budi, F. S., & Budi, A. (2019). Perbandingan Penggunaan Fotobioreaktor dengan Kolam Terbuka dalam Produksi Mikroalga untuk Bioremediasi. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 8(1), 70–80.
- Daneshvar, E., Wicker, R. J., Show, P. L., & Bhatnagar, A. (2022). Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO₂ biofixation and biomass valorization – A review. *Chemical Engineering Journal*, 427. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130884>
- Halomoan, P. L., & Nugroho, H. (2017). Potential of microalgae for CO₂ fixation and biofuel production. *Journal of Applied Phycology*, 29(2), 155-164.
- Haris, A., & Muhammad, F. (n.d.). PERTUMBUHAN MIKROALGA SPIRULINA (*Arthrosphaera platensis*) DALAM TEKANAN STIROFOAM PADA LINGKUNGAN AIR TAWAR.
- Indriyani, B, P, I., & A, S. (2020). Kultivasi Mikroalga dengan Fotobioreaktor untuk Produksi Biodiesel di Indonesia. *Jurnal Teknologi Bioproses*, 10(1), 40–50.
- Kotasthane, T. (2017). Potential of Microalgae for Sustainable Biofuel Production. *Journal of Marine Science Research & Development*, 07. <https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000223>
- Kotasthane, S. (2017). Urban air pollution and its mitigation strategies. *Environmental Pollution and Control*, 62(4), 55-64.
- Muhali, M., Hulyadi, H., Khaeruman, K., Gargazi, G., & Azmi, I. (2025). Identifying Analytical Thinking Skills in Forestry Students: Understanding Climate Change Awareness in the 21st Century Context. *Prisma Sains : Jurnal Pengkajian Ilmu Dan Pembelajaran Matematika Dan IPA IKIP Mataram*, 13, 283. <https://doi.org/10.33394/j-ps.v13i2.13644>
- Muhali, N., et al. (2025). Microalgae as a sustainable solution for carbon capture in urban areas. *Environmental Engineering Research*, 50(1), 22-34.
- Muyassaroh, Dewi, Rini, K., & Anggorowati, D. (2018). Kultivasi mikroalga Spirulina platensis dengan variasi pencahayaan menggunakan lampu TL dan matahari. *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST)*.

- Prasetyo, L. D., Supriyantini, E., & Sedjati, S. (2022). Pertumbuhan Mikroalga Chaetoceros calcitrans Pada Kultivasi Dengan Intensitas Cahaya Berbeda. *Buletin Oseanografi Marina*, 11(1), 59-70. <https://doi.org/10.14710/buloma.v11i1.31698>
- Rizaldi, M. A., Azizah, R., Latif, M. T., Sulistyorini, L., & Salindra, B. P. (2022). Literature Review: Dampak Paparan Gas Karbon Monoksida Terhadap Kesehatan Masyarakat yang Rentan dan Berisiko Tinggi. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 21(3), 253-265. <https://doi.org/10.14710/jkli.21.3.253-265>
- Rizaldi, A., et al. (2022). The impact of vehicle emissions on urban air pollution. *Environmental Pollution*, 283, 117373.
- Rusdiani, R. R. (2016). Optimalisasi Teknologi Fotobioreaktor Mikroalga sebagai Dasar Perencanaan Strategi Mitigasi Gas CO₂ .," *Jurnal Teknik ITS*, 5.
- Rusdiani, R. R., Boedisantoso, R., & Hanif, M. (2016). Optimalisasi Teknologi Fotobioreaktor Mikroalga sebagai Dasar Perencanaan Strategi Mitigasi Gas CO₂. *JURNAL TEKNIK ITS* , 25(2), 188-192.
- Rusdiani, D., et al. (2016). Efficiency of microalgae in CO₂ fixation: A comparison with terrestrial plants. *Journal of Environmental Management*, 179, 122-132.
- Sari, s, W., & Sari, D. (2018). Perbandingan Penggunaan Fotobioreaktor dan Kolam Terbuka dalam Kultivasi Mikroalga untuk Produksi Bioenergi. *Jurnal Teknologi Energi Terbarukan*, 12(2), 110-120.
- Sesana, M., et al. (2021). CO₂ emissions and their contribution to global warming: An assessment of mitigation strategies. *Climate Change and Environmental Sustainability*, 34(3), 234-242.
- Widawati, D., Santosa, G. W., & Yudiaty, E. (2022). Pengaruh Pertumbuhan *Spirulina platensis* terhadap Kandungan Pigmen beda Salinitias. *Journal of Marine Research*, 11(1), 61-70. <https://doi.org/10.14710/jmr.v11i1.30096>