

Perancangan Sistem *Monitoring* Enam Parameter pada Fotobioreaktor Mikroalga Berbasis Mikrokontroler dan *Internet of Things*

Shendy Luthfi Kurniawan¹, Sonki Prasetya^{1*}, Atrios Martha²

¹Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

*Corresponding author *E-mail address*: sonki.prasetya@mesin.pnj.ac.id

Abstrak

Fotobioreaktor mikroalga dapat digunakan untuk mendukung pemanfaatan karbon dioksida melalui proses biologis, tetapi pengoperasiannya memerlukan informasi parameter proses yang memadai. Penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring enam parameter yang meliputi suhu, pH, kekeruhan, konduktivitas, intensitas cahaya, dan laju aliran fluida. Arduino Mega 2560 digunakan sebagai pengolah utama, sedangkan ESP8266 NodeMCU digunakan untuk mengirimkan data ke platform Blynk. Data juga ditampilkan secara lokal melalui LCD I2C 20×4. Metode penelitian meliputi identifikasi kondisi alat, penyusunan P&ID, perancangan arsitektur monitoring, perancangan wiring kelistrikan dan instrumentasi, integrasi komponen, serta verifikasi fungsional melalui Serial Monitor dan dashboard Blynk. Hasil perancangan menghasilkan sistem terintegrasi yang memisahkan akuisisi data, komunikasi WiFi, dan distribusi daya 220 VAC, 12 VDC, serta 5 VDC. Verifikasi awal menunjukkan bahwa data sensor dapat diproses dan ditampilkan secara lokal maupun daring. Sistem ini digunakan sebagai pendukung evaluasi kondisi operasi dan tidak menghitung efisiensi fiksasi CO₂ secara langsung.

Kata-kata kunci: fotobioreaktor, mikroalga, sistem monitoring, mikrokontroler, Internet of Things

Abstract

Microalgae photobioreactors can support the biological utilization of carbon dioxide, but their operation requires adequate process-parameter information. This study aims to design a six-parameter monitoring system covering temperature, pH, turbidity, electrical conductivity, light intensity, and fluid flow rate. An Arduino Mega 2560 is used as the main processing unit, while an ESP8266 NodeMCU transmits data to the Blynk platform. The data are also displayed locally on a 20×4 I2C LCD. The research method includes initial-condition identification, P&ID development, monitoring architecture design, electrical and instrumentation wiring design, component integration, and functional verification through the Serial Monitor and Blynk dashboard. The resulting design integrates data acquisition, WiFi communication, and 220 VAC, 12 VDC, and 5 VDC power distribution. Initial functional verification indicates that sensor data can be processed and displayed both locally and online. The system supports operational evaluation and does not directly calculate CO₂ fixation efficiency.

Keywords: photobioreactor, microalgae, monitoring system, microcontroller, Internet of Things

1. PENDAHULUAN

Karbon dioksida (CO_2) merupakan salah satu gas rumah kaca utama yang peningkatan konsentrasinya berkaitan dengan perubahan iklim. Aktivitas energi dan industri menjadi sumber penting emisi tersebut sehingga upaya pengurangan dan pemanfaatan CO_2 perlu dikembangkan secara berkelanjutan [1]. Di Indonesia, arah pengendalian emisi diperkuat melalui Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 110 Tahun 2025 tentang Penyelenggaraan Instrumen Nilai Ekonomi Karbon dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca Nasional [2].

Salah satu pendekatan biologis yang dapat mendukung pemanfaatan CO_2 adalah kultivasi mikroalga. Mikroalga menggunakan cahaya dan CO_2 melalui fotosintesis untuk membentuk biomassa. Fotobioreaktor tertutup, termasuk konfigurasi tubular, memungkinkan proses kultivasi berlangsung pada kondisi yang lebih terarah dibandingkan sistem terbuka serta mendukung pengaturan perpindahan massa, pencahayaan, dan sirkulasi medium [3].

Meskipun fotobioreaktor tertutup memberikan kondisi operasi yang lebih terkendali, kinerja kultivasi tetap dipengaruhi oleh perubahan suhu, pH, intensitas cahaya, kepadatan partikel, kandungan ion terlarut, dan sirkulasi fluida. Oleh karena itu, pengamatan parameter secara berkelanjutan diperlukan agar perubahan kondisi medium dapat diketahui selama pengoperasian. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pemantauan pH, oksigen terlarut, kekeruhan atau kepadatan mikroalga, dan parameter fisik lainnya dapat digunakan untuk mendukung evaluasi proses kultivasi [4]–[6].

Perkembangan mikrokontroler dan *Internet of Things* memungkinkan data proses ditampilkan secara lokal sekaligus dikirimkan melalui jaringan. Sistem berbasis sensor, mikrokontroler, dan Blynk telah diterapkan untuk pemantauan jarak jauh pada fotobioreaktor [7], sedangkan kajian yang lebih luas menunjukkan bahwa integrasi *Internet of Things* dapat mendukung pencatatan data, pemantauan waktu nyata, dan pengembangan kendali otomatis [8]. Berdasarkan identifikasi kondisi alat yang digunakan pada penelitian ini, fotobioreaktor memerlukan satu sistem yang mengintegrasikan enam parameter serta menyediakan tampilan lokal dan daring.

Penelitian ini bertujuan merancang dan memverifikasi fungsi sistem pemantauan enam parameter pada fotobioreaktor mikroalga. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada pembacaan, pengolahan, penampilan, dan pengiriman data suhu, pH, kekeruhan, konduktivitas, intensitas cahaya, serta laju aliran. Pompa, katup solenoid, dan aktuator lain tetap dioperasikan secara manual melalui panel. Sistem tidak digunakan untuk menghitung efisiensi fiksasi CO_2 secara langsung karena konsentrasi CO_2 pada sisi masuk dan keluar belum diukur.

2. METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan perancangan rekayasa dan verifikasi fungsional. Perancangan dilakukan untuk menghasilkan sistem pemantauan enam parameter pada fotobioreaktor mikroalga, sedangkan verifikasi digunakan untuk memastikan bahwa alur akuisisi, pengolahan, penampilan, dan pengiriman data bekerja sesuai rancangan. Tahapan yang diterapkan mencakup identifikasi kebutuhan sistem, perancangan proses dan instrumentasi, perancangan arsitektur pemantauan, perancangan kelistrikan dan pengawatan instrumentasi, integrasi perangkat keras dan perangkat lunak, kalibrasi sensor, serta verifikasi sistem terintegrasi.

Identifikasi Kebutuhan Sistem

Identifikasi dilakukan melalui pemeriksaan kondisi fotobioreaktor, jalur sirkulasi, sumber daya, titik pengukuran, dan kebutuhan operator. Enam parameter dipilih untuk mewakili kondisi termal, kimia, optik, dan hidrodinamika, yaitu suhu, pH, kekeruhan, konduktivitas, intensitas cahaya, dan laju aliran. Pemilihan parameter tersebut juga mempertimbangkan pentingnya pemantauan multiparameter pada kultivasi mikroalga [4], [5]. Sistem ditetapkan sebagai perangkat pemantauan, sehingga aktuator tetap dioperasikan secara manual melalui panel.

Perancangan Proses dan Instrumentasi

Perancangan proses dilakukan dengan menyusun diagram perpipaan dan instrumentasi berdasarkan konfigurasi fotobioreaktor yang terdiri atas bejana awal C-1, rangkaian fotobioreaktor tubular C-2A sampai C-2E, bejana C-3, dua pompa sirkulasi, jalur injeksi CO₂, dan komponen pendukung. Titik sensor ditentukan pada bagian yang mewakili kondisi medium dan aliran. Hubungan sinyal instrumen menuju sistem akuisisi data dibedakan dari jalur proses dan tidak digunakan sebagai perintah kendali otomatis.

Perancangan Arsitektur Pemantauan dan Kelistrikan

Arduino Mega 2560 dipilih sebagai pengolah utama karena menyediakan masukan analog, digital, I2C, 1-Wire, dan pencacahan pulsa yang diperlukan oleh enam sensor [12]. ESP8266 NodeMCU digunakan sebagai perangkat komunikasi UART dan Wi-Fi untuk meneruskan data ke Blynk [13], [14]. Data lokal ditampilkan melalui LCD I2C 20×4. Perancangan kelistrikan memisahkan jalur 220 VAC untuk beban utama, 12 VDC untuk pompa peristaltik, dan 5 VDC untuk mikrokontroler serta sensor. Pemisahan suplai dan penataan kabel dilakukan untuk mengurangi kemungkinan gangguan dari pompa, kontaktor, dan katup solenoid terhadap pembacaan sensor. Perangkat dan antarmuka yang digunakan dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Perangkat dan antarmuka sistem *monitoring*

Parameter/Perangkat	Komponen	Antarmuka	Fungsi
Suhu	DS18B20	1-Wire	Membaca suhu medium
pH	Sensor pH analog	Analog	Membaca tingkat keasaman medium
Kekeruhan	Sensor <i>turbidity</i>	Analog	Membaca perubahan kekeruhan
Konduktivitas	Sensor EC	Analog	Membaca konduktivitas medium
Intensitas cahaya	BH1750	I2C	Membaca intensitas cahaya dalam lux
Laju aliran	YF-S201	Pulsa digital	Membaca laju aliran sirkulasi
Pengolah utama	Arduino Mega 2560	<i>Multi-interface</i>	Mengolah dan mengirim data
Komunikasi	ESP8266 NodeMCU	UART/WiFi	Mengirim data ke Blynk

Verifikasi Fungsional

Verifikasi dilakukan secara bertahap untuk memastikan kesesuaian hubungan antarkomponen dan aliran data. Pemeriksaan meliputi pembacaan masing-masing sensor melalui *Serial Monitor*, tampilan nilai pada LCD I2C, komunikasi UART antara Arduino Mega 2560 dan ESP8266 NodeMCU, koneksi WiFi, serta kemunculan data pada *dashboard* Blynk. Kalibrasi dan validasi sensor dilakukan menggunakan larutan standar atau alat pembanding yang tersedia, sedangkan artikel ini berfokus pada hasil perancangan dan integrasi sistem. Metode verifikasi setiap komponen dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Metode verifikasi komponen sistem

Bagian yang diverifikasi	Metode	Indikator	Keterangan
Sensor	Pembacaan terpisah melalui <i>Serial Monitor</i>	Nilai berubah sesuai kondisi uji	Verifikasi awal
LCD I2C	Menampilkan data hasil olahan Arduino	Enam parameter dapat ditampilkan	Tampilan lokal
UART	Pengiriman data Arduino ke ESP8266	Data diterima tanpa konflik port	Komunikasi perangkat
WiFi	Menghubungkan ESP8266 ke jaringan	Perangkat terhubung ke jaringan	Komunikasi daring
Blynk	Mengirim data ke <i>virtual pin</i>	Parameter tampil pada <i>dashboard</i>	<i>Monitoring</i> daring

Bagian yang diverifikasi	Metode	Indikator	Keterangan
Kelistrikan	Pemeriksaan jalur 220 VAC, 12 VDC, dan 5 VDC	Distribusi sesuai rancangan	Pemeriksaan koneksi

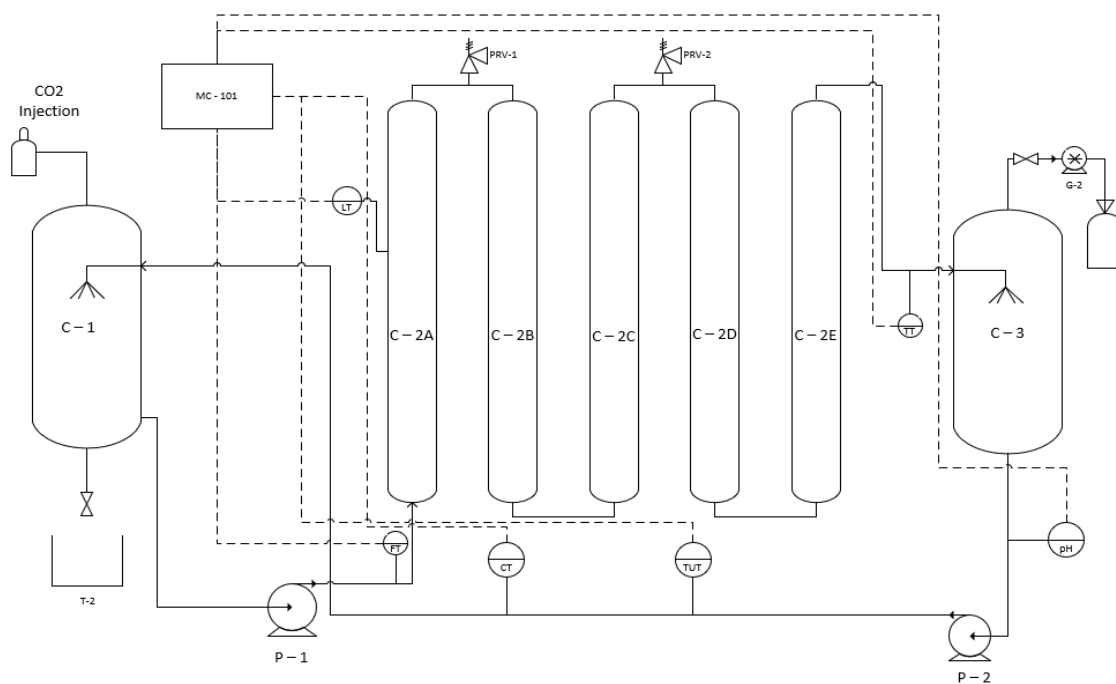
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Identifikasi Kebutuhan Sistem

Hasil identifikasi menunjukkan bahwa fotobioreaktor memerlukan pemantauan terpadu terhadap enam parameter. Suhu dan pH digunakan untuk mengamati kondisi dasar medium, sedangkan intensitas cahaya berkaitan dengan ketersediaan energi bagi fotosintesis. Kekeruhan digunakan sebagai indikator perubahan kepadatan partikel, konduktivitas digunakan untuk mengamati perubahan jumlah ion terlarut secara umum, dan laju aliran digunakan untuk memeriksa keberlangsungan sirkulasi. Pemilihan ini sejalan dengan kebutuhan pemantauan multiparameter pada fotobioreaktor, tetapi nilai kekeruhan belum langsung dinyatakan sebagai konsentrasi biomassa tanpa korelasi empiris untuk kultur yang digunakan [5], [6], [9], [10].

Hasil Perancangan Proses dan Instrumentasi

Hasil perancangan proses ditunjukkan pada Gambar 1. Diagram memperlihatkan hubungan bejana C-1, rangkaian fotobioreaktor tubular C-2A sampai C-2E, bejana C-3, dua pompa sirkulasi, jalur injeksi CO₂, dan titik pengukuran. Garis putus-putus menunjukkan hubungan sinyal instrumen menuju sistem akuisisi data, bukan jalur aliran proses atau aksi kendali. Penempatan sensor pada jalur sirkulasi dan bejana memungkinkan data yang diperoleh digunakan untuk mengevaluasi kondisi operasi pada bagian utama sistem.

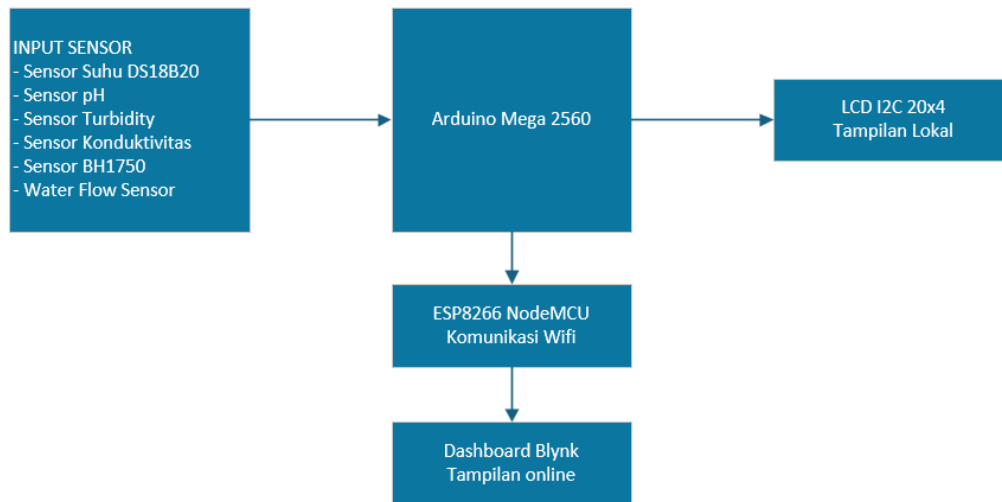


Gambar 1. Diagram perpipaan dan instrumentasi sistem fotobioreaktor dan pemantauan

Hasil Perancangan Arsitektur Pemantauan

Arsitektur pada Gambar 2 memisahkan fungsi akuisisi data dan komunikasi jaringan. Arduino Mega 2560 membaca sinyal analog, digital, I2C, 1-Wire, dan pulsa, kemudian menampilkan hasil pada LCD serta mengirimkan data ke ESP8266 melalui UART. ESP8266 meneruskan data ke Blynk melalui Wi-Fi. Pemisahan fungsi tersebut memudahkan pemeriksaan gangguan karena kesalahan pembacaan sensor dapat dibedakan dari

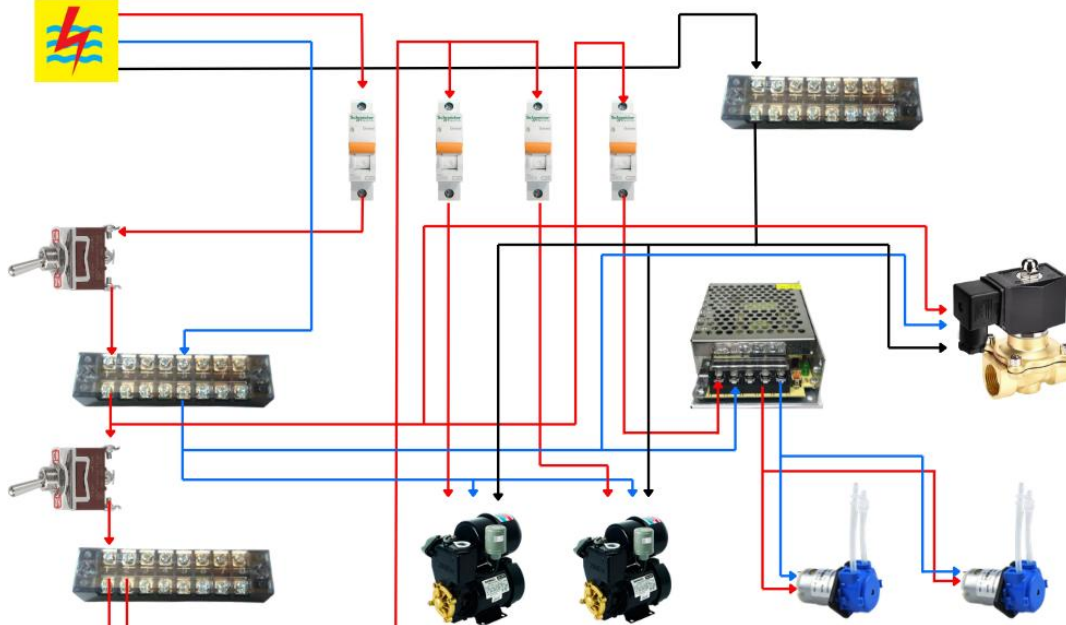
gangguan komunikasi internet. Pendekatan serupa telah digunakan pada fotobioreaktor cerdas dan sistem pemantauan mikroalga berbasis *Internet of Things* [7], [8].



Gambar 2. Blok diagram sistem pemantauan fotobioreaktor

Hasil Perancangan Kelistrikan

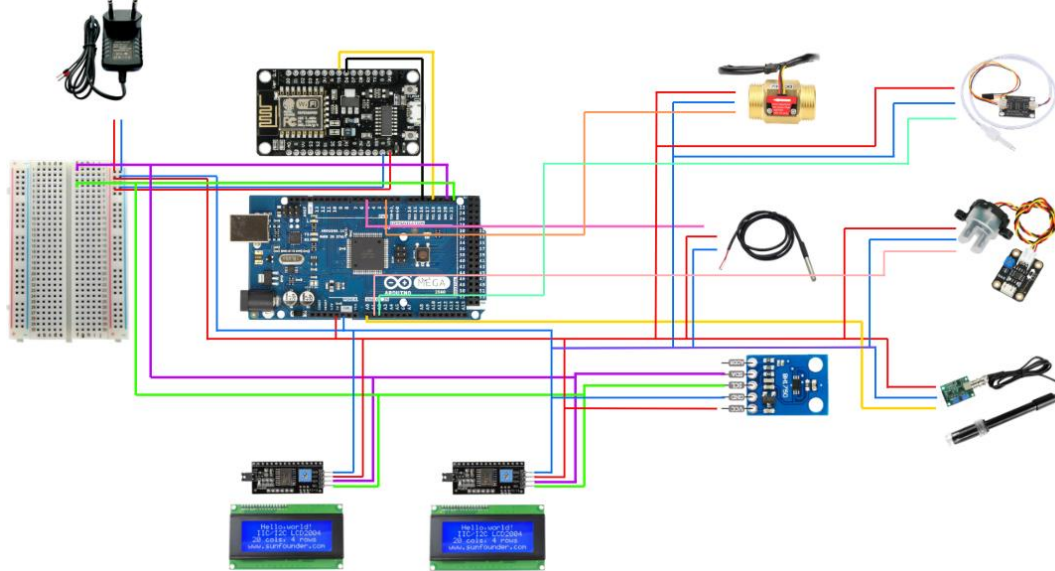
Perancangan kelistrikan memisahkan jalur beban 220 VAC, jalur 12 VDC, dan jalur instrumentasi 5 VDC. Dua pompa air AC memiliki cabang MCB masing-masing dan dihubungkan melalui satu kontaktor, sehingga keduanya dapat beroperasi bersamaan tetapi tetap memiliki pemutusan cabang yang terpisah. *Solenoid valve* dioperasikan menggunakan *toggle switch*, sedangkan *power supply* 12 VDC digunakan untuk pompa peristaltik. Sistem instrumentasi memperoleh suplai 5 VDC dari adaptor tersendiri agar gangguan dari beban motor tidak langsung memengaruhi mikrokontroler dan sensor. Rancangan *wiring* kelistrikan AC dan distribusi bebannya ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Perancangan *wiring* kelistrikan AC dan distribusi beban

Berdasarkan Gambar 3, sumber 220 VAC didistribusikan melalui MCB menuju pompa, *toggle switch*, dan *power supply*. Pengoperasian pompa serta solenoid tetap dilakukan secara manual melalui panel. Arduino Mega dan Blynk tidak digunakan untuk menyalakan atau mematikan aktuator, sehingga fungsi sistem tetap dibatasi sebagai *monitoring*.

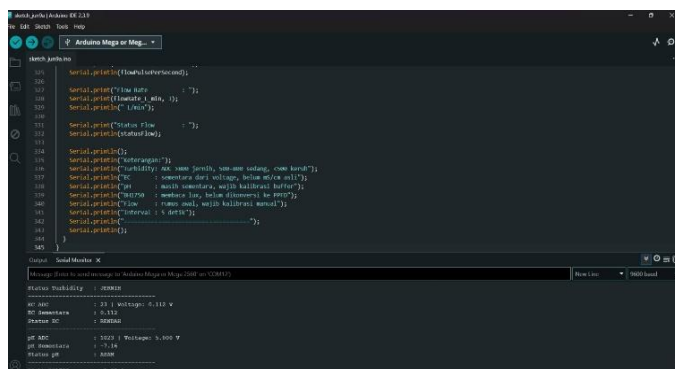
Arduino Mega 2560 mengintegrasikan enam sensor dengan beberapa jenis antarmuka. Sensor pH, kekeruhan, dan konduktivitas menggunakan masukan analog. DS18B20 menggunakan komunikasi 1-Wire, BH1750 dan LCD menggunakan jalur I2C, sedangkan YF-S201 menghasilkan pulsa digital. ESP8266 NodeMCU menerima data melalui UART dan meneruskannya ke Blynk. Jalur transmisi dari Arduino Mega menuju ESP8266 memerlukan penyesuaian tingkat tegangan karena kedua perangkat menggunakan tingkat logika yang berbeda [12], [13].



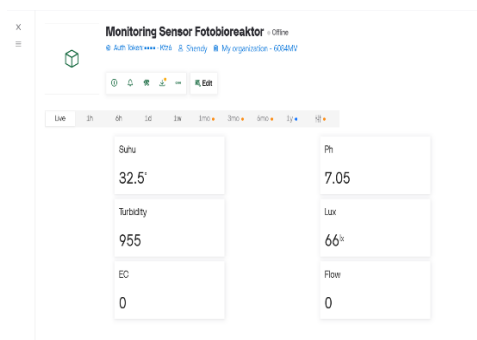
Gambar 4. Perancangan *wiring* 5 VDC, sensor, dan perangkat komunikasi

Integrasi *Monitoring* Lokal dan Daring

Data sensor diproses oleh Arduino Mega dan diperiksa melalui monitor serial sebelum ditampilkan pada LCD dan dikirimkan ke ESP8266. Dasbor Blynk menyediakan tampilan suhu, pH, kekeruhan, konduktivitas, intensitas cahaya, dan laju aliran. Hasil verifikasi pada Gambar 5 menunjukkan bahwa data dapat diamati melalui monitor serial dan dasbor Blynk. Ringkasan hasil setiap bagian disajikan pada Tabel 3.



(a)



(b)

Gambar 5. Verifikasi fungsional: (a) *Serial Monitor* dan (b) *dashboard* Blynk.

Tabel 3. Ringkasan verifikasi fungsional sistem *monitoring*

Bagian sistem	Hasil verifikasi	Pembahasan
Pembacaan sensor	Data dapat diamati melalui <i>Serial Monitor</i>	Menunjukkan alur akuisisi data pada Arduino berjalan.
LCD I2C	Tampilan lokal disediakan pada panel	Operator dapat memantau alat tanpa membuka <i>dashboard</i> daring.
Komunikasi UART	Arduino Mega dan ESP8266 terhubung	Data sensor dapat diteruskan ke perangkat komunikasi.
Koneksi WiFi	ESP8266 dapat terhubung ke jaringan	<i>Monitoring</i> daring bergantung pada ketersediaan jaringan.
<i>Dashboard</i> Blynk	Enam parameter disediakan pada <i>dashboard</i>	Data dapat dipantau melalui aplikasi atau <i>browser</i> .
Aktuator	Pompa dan solenoid tetap manual	Sistem tidak dikategorikan sebagai kontrol otomatis penuh.

Keterbatasan dan Pengembangan Sistem

Kontribusi utama rancangan adalah integrasi enam parameter dalam satu sistem pemantauan lokal dan daring. Konduktivitas dan laju aliran digunakan untuk observasi dan belum dijadikan dasar pemberian nutrisi atau penguncian pompa. Nilai kekeruhan juga belum dikonversi langsung menjadi konsentrasi biomassa karena hubungan keduanya dipengaruhi oleh jenis mikroalga dan karakteristik partikel [6], [9], [10]. Selain itu, sistem belum dapat membuktikan peningkatan efisiensi fiksasi CO₂ karena konsentrasi CO₂ pada sisi masuk dan keluar tidak diukur. Penentuan kinerja biologis masih memerlukan analisis terpisah terhadap CO₂, biomassa, dan kondisi kultur.

Pengembangan berikutnya dapat diarahkan pada penyimpanan data historis, pemberian peringatan ketika parameter melewati batas operasi, korelasi kekeruhan dengan biomassa, serta integrasi sensor CO₂. Sistem pencahayaan dan aktuator juga dapat dikembangkan menuju kendali otomatis setelah batas operasi dan mekanisme keselamatan ditetapkan. Pemantauan cahaya dan integrasi sensor yang lebih lengkap merupakan bagian penting dalam pengembangan fotobioreaktor cerdas [5], [11].

4. KESIMPULAN

Perancangan sistem pemantauan enam parameter pada fotobioreaktor mikroalga telah menghasilkan arsitektur yang mengintegrasikan sensor suhu, pH, kekeruhan, konduktivitas, intensitas cahaya, dan laju aliran menggunakan Arduino Mega 2560. Data dapat ditampilkan secara lokal melalui LCD I2C dan secara daring melalui ESP8266 NodeMCU serta Blynk. Perancangan kelistrikan memisahkan distribusi 220 VAC, 12 VDC, dan 5 VDC, sedangkan pompa dan katup solenoid tetap dioperasikan secara manual. Verifikasi fungsional melalui monitor serial dan dasbor Blynk menunjukkan bahwa alur pembacaan, pengolahan, penampilan, dan pengiriman data dapat diterapkan pada sistem. Sistem menyediakan data pendukung untuk evaluasi kondisi operasi, tetapi belum dapat digunakan untuk menyimpulkan efisiensi fiksasi CO₂ secara langsung. Penelitian berikutnya disarankan menambahkan sensor CO₂ pada sisi masuk dan keluar, penyimpanan data historis, peringatan batas operasi, korelasi kekeruhan dengan konsentrasi biomassa, serta kendali otomatis pencahayaan, pompa, dan injeksi CO₂ dengan mekanisme keselamatan yang sesuai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Badak NGL dan LNG Academy atas dukungan fasilitas serta kesempatan pelaksanaan penelitian. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Jakarta dan seluruh pihak yang telah memberikan masukan selama proses perancangan dan penyusunan artikel.

REFERENSI

- [1] IPCC, Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Accessed: Jul. 13, 2026.
- [2] Republik Indonesia, Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 110 Tahun 2025 tentang Penyelenggaraan Instrumen Nilai Ekonomi Karbon dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca

- Nasional. Jakarta, Indonesia, 2025. [Online]. Available: <https://peraturan.go.id/id/perpres-no-110-tahun-2025>. Accessed: Jul. 13, 2026.
- [3] S. A. Razzak, K. Bahar, K. M. O. Islam, A. K. Haniffa, M. O. Faruque, S. M. Z. Hossain, and M. M. Hossain, "Microalgae cultivation in photobioreactors: Sustainable solutions for a greener future," *Green Chemical Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 418–439, 2024, doi: 10.1016/j.gce.2023.10.004.
 - [4] D. K. Nguyen, H. Q. Nguyen, H. T. T. Dang, V. Q. Nguyen, and L. Nguyen, "A low-cost system for *monitoring* pH, dissolved oxygen and algal density in continuous culture of microalgae," *HardwareX*, vol. 12, e00353, 2022, doi: 10.1016/j.ohx.2022.e00353.
 - [5] M. Dębowski, J. Kazimierowicz, and M. Zieliński, "Multi-Sensing *Monitoring* of the Microalgae Biomass Cultivation Systems for Biofuels and Added Value Products Synthesis—Challenges and Opportunities," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 13, 7324, 2025, doi: 10.3390/app15137324.
 - [6] E. S. J. Thoré, F. Schoeters, J. Spit, and S. Van Miert, "Real-Time *Monitoring* of Microalgal Biomass in Pilot-Scale Photobioreactors Using Nephelometry," *Processes*, vol. 9, no. 9, 1530, 2021, doi: 10.3390/pr9091530.
 - [7] P. E. Tham, Y. J. Ng, N. Vadivelu, H. R. Lim, K. S. Khoo, K. W. Chew, and P. L. Show, "Sustainable smart photobioreactor for continuous cultivation of microalgae embedded with *Internet of Things*," *Bioresource Technology*, vol. 346, 126558, 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126558.
 - [8] K. Wang, K. S. Khoo, H. Y. Leong, D. Nagarajan, K. W. Chew, H. Y. Ting, A. Selvarajoo, J. S. Chang, and P. L. Show, "How does the *Internet of Things* (IoT) help in microalgae biorefinery?," *Biotechnology Advances*, vol. 54, 107819, 2022, doi: 10.1016/j.biotechadv.2021.107819.
 - [9] R. C. Barbosa, J. Soares, and M. A. Martins, "Low-cost and versatile sensor based on multi-wavelengths for real-time estimation of microalgal biomass concentration in open and closed cultivation systems," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 176, 105641, 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105641.
 - [10] B. T. Nguyen and B. E. Rittmann, "Low-cost optical sensor to automatically monitor and control biomass concentration in microalgal cultivation," *Algal Research*, vol. 32, pp. 101–106, 2018, doi: 10.1016/j.algal.2018.03.013.
 - [11] B. Brzychczyk, J. Giełzecki, K. Kijanowski, T. Hebda, and F. Rzepka, "Automation of the Photobioreactor Lighting System to Manage Light Distribution in Microalgae Cultures," *Energies*, vol. 16, no. 20, 7183, 2023, doi: 10.3390/en16207183.
 - [12] Arduino, "Mega 2560 Rev3," Arduino Documentation, 2026. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/>. Accessed: Jul. 13, 2026.
 - [13] Espressif Systems, "ESP8266EX Datasheet, Version 7.0," 2024. [Online]. Available: https://documentation.espressif.com/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf. Accessed: Jul. 13, 2026.
 - [14] Blynk, "Device Profile Documentation," Blynk Documentation, 2026. [Online]. Available: <https://docs.blynk.io/en/blynk.console/devices/device-profile>. Accessed: Jul. 13, 2026.