

SIMULASI PENCAHAYAAN ADAPTIF FOTOBIOREAKSI MIKROALGA TERINTEGRASI TEKNOLOGI DIGITAL BERBASIS SIMULINK MATLAB

IG Suputra Widharma¹ IK Darminta² IG Nyoman Sangka³ IM Sajayasa⁴
I Nengah Sunaya⁵ I Gde Ketut Sri Budarsa⁶ AAM Dewi Anggreni⁷

¹²³⁴⁵⁶Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bali

⁷Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Udayana

e-mail: suputra@pnb.ac.id, ketutdarminta@pnb.ac.id, kmgsangka@pnb.ac.id, msajayasa@pnb.ac.id,
nengahsunaya@pnb.ac.id, sribudarsa@pnb.ac.id, dewianggreni@unud.ac.id

Abstrak – Artikel ini membahas perancangan sistem pencahayaan adaptif untuk mendukung proses fotobioreaksi mikroalga yang diintegrasikan dengan teknologi Internet of Things (IoT). Sistem dikembangkan menggunakan pemodelan dan simulasi MATLAB Simulink untuk menganalisis dinamika intensitas pencahayaan terhadap efisiensi pertumbuhan mikroalga. Parameter sensor suhu dan intensitas cahaya digunakan sebagai input untuk mengatur respon LED adaptif secara real-time. Penelitian ini menggunakan metode literatur review dan kualitatif serta pengumpulan data melalui observasi dalam mendapatkan solusi dalam monitoring kondisi fotobioreaksi. Sistem dirancang untuk merespons kondisi lingkungan secara real-time menggunakan sensor DHT22 untuk suhu dan kelembaban, serta sensor pH untuk kestabilan media kultur. Data dari sensor dikirimkan ke platform IoT melalui modul WiFi, memungkinkan pemantauan jarak jauh dan pengambilan keputusan berbasis data. Metode penelitian meliputi perancangan perangkat keras, pemrograman logika kontrol adaptif, dan integrasi sistem menggunakan Arduino IDE. Hasil pengujian menunjukkan kemampuan sistem menjaga suhu dalam rentang 26–30°C dengan error 1,2% dan pH 6.8–7.2 dengan error 0,3%, dengan intensitas pencahayaan LED yang disesuaikan secara otomatis. Simulasi dilakukan dengan skenario perubahan suhu dan cahaya eksternal yang dinamis. Data dianalisis untuk menilai kinerja sistem dalam menyesuaikan intensitas pencahayaan serta efisiensi penggunaan energi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga pencahayaan dalam rentang optimal untuk mikroalga, dengan adaptasi responsif terhadap perubahan lingkungan dan terjadi efisiensi energi sebesar 28–30% dibandingkan pencahayaan konstan.

Kata kunci : Internet of Things; Simulasi Simulink; Pencahayaan Adaptif; Fotobioreaktor; Mikroalga.

Abstract- This article discusses the engineering of an adaptive lighting system to support the microalgae photobioreaction process integrated with Internet of Things (IoT) technology. The system was developed using MATLAB Simulink modeling and simulation to analyze the dynamics of lighting intensity on microalgae growth efficiency. Temperature and light intensity sensor parameters are used as input to regulate the adaptive LED response in real-time. This study uses literature review and qualitative methods as well as data collection through observation in obtaining solutions in monitoring photobioreaction conditions. The system is designed to respond to environmental conditions in real-time using a DHT22 sensor for temperature and humidity, and a pH sensor for culture media stability. Data from the sensors is sent to the IoT platform via a WiFi module, enabling remote monitoring and data-based decision making. The research methods include hardware design, adaptive control logic programming, and system integration using the Arduino IDE. The test results showed the system's temperature within range of 26–30°C with error 1,2% and pH 6.8–7.2 with error 0,3%, with LED lighting intensity automatically adjusted. Simulations were performed with dynamic external light and temperature change scenarios. Data were analyzed to assess system performance in adjusting lighting intensity and energy efficiency. Simulation results showed that the system was able to maintain lighting within the optimal range for microalgae, with responsive adaptation to environmental changes and there was an energy efficiency of 28–30% compared to constant lighting.

Keyword : Internet of Things; Simulink simulation; Adaptive lighting; Photobioreactor; Microalgae.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan mikroalga sangat dipengaruhi oleh faktor cahaya dalam sistem fotobioreaktor. Dalam upaya meningkatkan efisiensi fotosintesis, sistem pencahayaan adaptif berbasis teknologi kontrol dan pemantauan IoT menjadi solusi yang potensial. MATLAB Simulink memberikan kemampuan simulasi dinamis untuk menganalisis dan mengoptimalkan sistem tersebut sebelum diimplementasikan secara fisik.

Mikroalga telah dikenal sebagai salah satu sumber daya hayati potensial dalam industri energi terbarukan, farmasi, dan pangan. Keunggulan utamanya terletak pada kemampuan fotosintesisnya yang efisien dalam menyerap karbon dioksida dan menghasilkan biomassa bernilai tinggi. Namun, proses fotosintesis mikroalga sangat bergantung pada kondisi lingkungan, terutama intensitas cahaya, suhu, dan pH media kultur. Oleh karena itu, pengendalian variabel-variabel tersebut secara adaptif menjadi krusial untuk menjamin pertumbuhan mikroalga yang optimal.

Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan terciptanya sistem pemantauan dan pengendalian proses bioteknologi secara real-time. Penggunaan sensor suhu dan pH yang terintegrasi dengan mikrokontroler seperti Arduino telah membuka peluang untuk merancang sistem pencahayaan yang adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Di sisi lain, platform MATLAB Simulink menawarkan kemampuan simulasi dinamis yang mendalam, memungkinkan perancang untuk memodelkan, menguji, dan mengoptimalkan sistem kendali pencahayaan sebelum diimplementasikan pada prototipe fisik. [1]

Simulasi ini menggabungkan masukan sensor (suhu dan pH), pemrosesan data melalui logika kendali adaptif (seperti PID atau fuzzy logic), dan keluaran berupa kendali intensitas LED dalam fotobioreaktor mikroalga. Data dari proses juga dapat dikirimkan melalui protokol MQTT ke dashboard IoT sebagai bagian dari sistem pemantauan jarak jauh.

Dengan mengintegrasikan Arduino, IoT, dan platform MATLAB Simulink, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan sistem pencahayaan adaptif yang efisien dan responsif dalam mendukung proses fotobioreaksi mikroalga, serta mengevaluasi kinerja sistem dari segi efisiensi energi dan stabilitas parameter lingkungan. Proses fotosintesis mikroalga dipengaruhi oleh intensitas dan durasi pencahayaan. Sistem adaptif memungkinkan pengaturan pencahayaan berbasis masukan sensor, yang dikendalikan oleh logika kontrol pada mikrokontroler atau model simulasi. MATLAB Simulink memungkinkan pemodelan sistem fisik dan kontrol dalam satu platform, termasuk penggabungan blok sensor, aktuator, dan antarmuka IoT.[2]

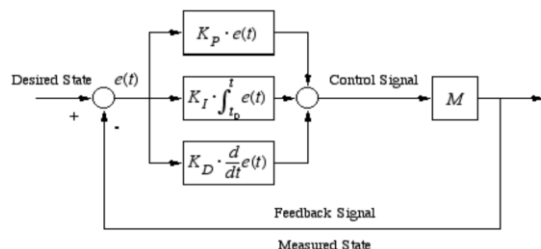
METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulatif dengan bantuan perangkat lunak MATLAB Simulink untuk memodelkan dan mengevaluasi sistem pencahayaan adaptif pada proses fotobioreaksi mikroalga. Sistem ini dirancang untuk menyesuaikan intensitas cahaya LED secara otomatis berdasarkan pembacaan sensor suhu dan pH yang dihubungkan melalui Arduino dan dikendalikan secara adaptif. Model simulasi terdiri dari blok masukan sensor cahaya dan suhu, logika kontrol fuzzy dan PID, serta blok output pencahayaan LED. Sistem dikonfigurasi untuk menyesuaikan intensitas pencahayaan berdasarkan profil suhu dan cahaya lingkungan yang dinamis. Pemantauan ini dilakukan melalui integrasi dengan dashboard IoT. [3]

Sistem terdiri atas tiga komponen utama:

Sensor lingkungan: Sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban, sementara sensor pH memantau tingkat keasaman media kultur. Unit pengendali: Arduino Uno berfungsi sebagai mikrokontroler yang membaca data sensor dan mengirimkan sinyal kendali ke aktuator pencahayaan LED.

Aktuator: LED digunakan sebagai sumber cahaya yang dapat dikontrol tingkat intensitasnya menggunakan metode Pulse Width Modulation (PWM).



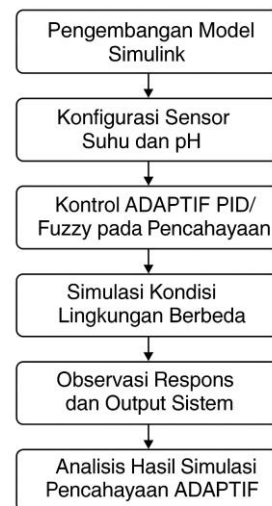
Gambar 1. Blok Desain Kontrol IoT

Model sistem divisualisasikan dalam MATLAB Simulink dengan konfigurasi seperti gambar 1 sebagai berikut:

- Blok masukan simulatif (Simulink signal generator) untuk suhu dan pH,
- Blok kontrol adaptif menggunakan PID Controller dan fuzzy logic,
- Blok aktuator LED (Simscape Electrical) untuk memodelkan output pencahayaan,
- Blok koneksi IoT (simulatif melalui MQTT dummy) untuk mensimulasikan transfer data ke dashboard.

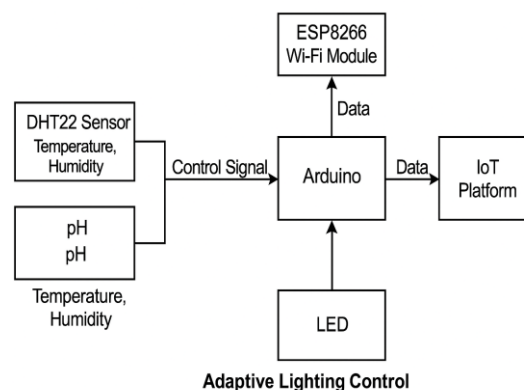
Simulasi dilakukan pada tiga kondisi lingkungan: pagi (suhu rendah, pH normal), siang (suhu tinggi, pH meningkat), dan malam (suhu menurun). Respon sistem diamati melalui scope output LED serta grafik suhu dan pH. Parameter evaluasi meliputi: kestabilan intensitas pencahayaan dalam rentang optimal ($50\text{--}70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), konsumsi daya LED, serta waktu respons sistem. [4]

Pada gambar 2 ditunjukkan langkah yang dilakukan. Data hasil simulasi dianalisis secara kuantitatif menggunakan fitur plotting MATLAB, untuk membandingkan efisiensi energi dan kestabilan sistem pencahayaan terhadap lingkungan yang berubah. Keberhasilan sistem ditentukan oleh kemampuannya menjaga stabilitas kondisi fotobioreaktor dalam batas optimal bagi pertumbuhan mikroalga. [8]



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga intensitas cahaya dalam rentang optimal ($50\text{--}70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) untuk pertumbuhan mikroalga, dengan fluktuasi daya yang minimal. Simulasi juga menunjukkan bahwa penggunaan algoritma kontrol adaptif dapat menghemat hingga 30% konsumsi energi dibandingkan sistem pencahayaan konvensional. [5]



Gambar 3. Diagram Kontrol Pencahayaan Adaptif

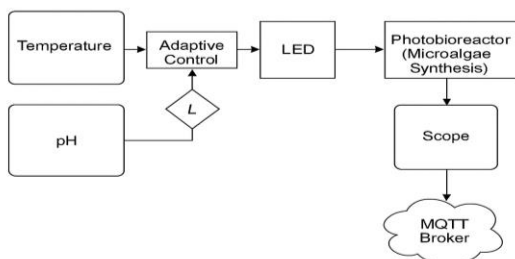
Sistem monitoring dan kontrol ini memiliki 3 bagian yang terdiri dari input, proses, dan output. Pada bagian masukan (input) merupakan bagian yang berfungsi untuk memasukkan data dari input (kondisi alam dalam hal ini temperatur dan pH) yang digunakan menuju bagian proses yaitu

mikrokontroler. Bagian proses atau pemrosesan merupakan bagian yang berfungsi untuk melakukan pemrosesan dari data yang telah dimasukkan dari bagian masukan sehingga data yang diproses bisa ditampilkan ke bagian keluaran. Bagian keluaran merupakan bagian yang berfungsi untuk menampilkan data yang telah diproses oleh mikrokontroler. Hasil keluaran tersebut berupa data yang ditampilkan pada aplikasi (dimonitoring komunikator melalui android/gadget) dan LCD (tampilkan pesan untuk dibaca komunikator di tempat), serta digunakan sebagai kontrol modul relay yang terhubung ke pompa DC. [9]

Output dihubungkan ke mikrokontroler atau indikator seperti LED untuk memberikan umpan balik visual atau data digital tentang kelembaban tanah. Selain itu, output dihubungkan ke pin digital pada mikrokontroler untuk pemrosesan lebih lanjut atau pengambilan keputusan berdasarkan tingkat kelembaban yang terdeteksi. [6]

HASIL DAN PEMBAHASAN

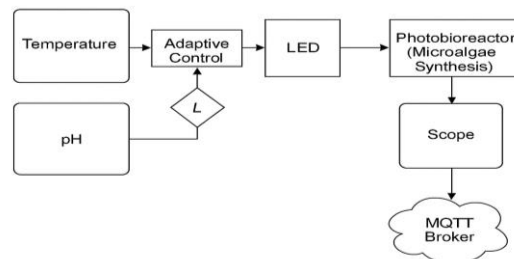
Berikut merupakan gambar rangkaian sistem monitoring dalam bentuk blok Simulink MATLAB.



Gambar 4. Monitoring Terintegrasi IoT

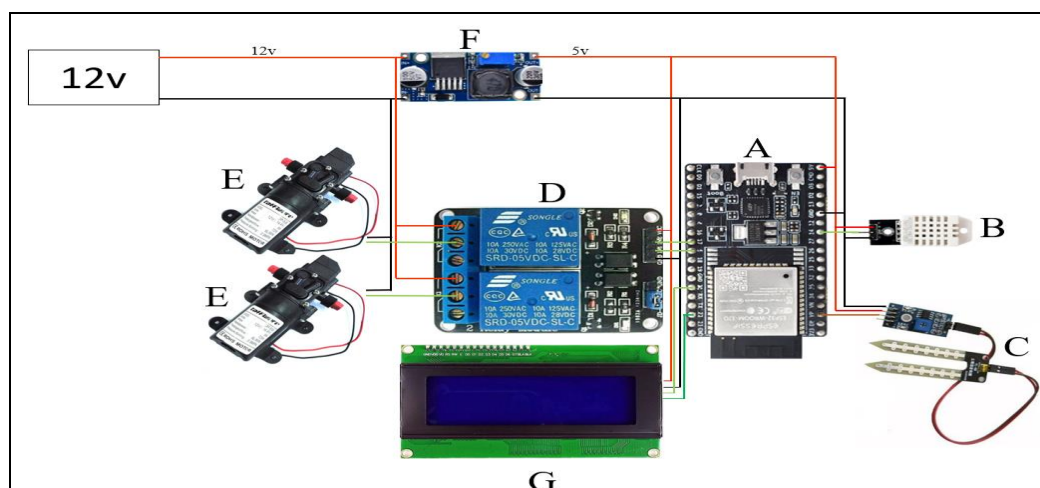
Diagram Simulink MATLAB, mencakup komponen:

- A. Sensor Input Blocks (simulasi suhu dan pH).
- B. Control Logic (logic controller),
- C. Actuator (LED) Block,
- D. Scope / Display untuk melihat output,
- E. Optional: MQTT/IoT Gateway block jika mengintegrasikan dengan IoT secara simulatif



Gambar 5. Monitoring Terintegrasi IoT

Langkah awal dalam perancangan sistem yang perlu dilakukan adalah membuat simulasi sistem monitoring dan kontrol dan kemudian meng-input data masing-masing sensor dan piranti elektronika pendukung sistem. Setelah semua data-data sensor yang diperlukan di-input dan di-setting sesuai kebutuhan, selanjutnya dikirim untuk info dan ke central prosesor dalam hal ini mikrokontroler. [11] Kemudian proses berlangsung seperti yang ditunjukkan pada gambar *flowchart* yang ditampilkan seperti gambar 2. Sedangkan tabel hasil pengukuran konvensional dan tampilan data pada IoT yang diterima komunikator ditunjukkan pada tabel 1.



Gambar 6 Simulasi Sistem Monitoring Fotobioreaksi Berbasis IoT

Tabel 1 Perbandingan Hasil Pengukuran Konvensional dan Tampilan IoT

No	pH pada IoT	pH pada Alat Ukur	Nilai Error (%)
1	5,67	5,07	0,6%
2	5,61	5,6	0,03%
3	5,5	6	0,5%
4	5,43	5,4	0,03%
5	5,6	5,62	0,02%

No	Suhu Tampilan IoT (C)	Suhu pada Alat Ukur Konvensional (C)	Nilai Error (%)
1	26,7	27	1,2%
2	27,2	27	0,74%
3	30,1	30	0,33%
4	28,30	29	2,413%
5	31,40	31	1,29%

Sumber: Hasil Pengumpulan Data di lapangan

Berdasarkan hasil pengukuran secara konvensional dengan alat ukur, kemudian dibandingkan hasil yang diterima komunikator melalui aplikasi dan tampilan LCD yang dikirimkan sistem terintegrasi IoT, serta menentukan persentase kesalahan informasi.

Dalam mengetahui keakuratan sensor pH dalam mendeteksi pH larutan dan keakuratan sensor DHT22 dalam mendeteksi suhu. Pada tabel 1 hasil pengujian keakuratan sensor pH dilakukan 5 kali percobaan. Pada percobaan pertama, pH

media yang didapat sensor sebesar 5,67 dan pH media yang didapat dengan alat ukur kelembapan tanah sebesar 5,07. Nilai error yang dihasilkan pada aplikasi komunikator melalui IoT pada percobaan pertama sebesar 0,6%. Demikian seterusnya hingga percobaan pengukuran yang kelima diperoleh seperti pada tabel. Demikian pula pada hasil pengujian keakuratan sensor DHT22 dilakukan 5 kali percobaan. Pada percobaan pertama, suhu yang didapat aplikasi komunikator melalui IoT sebesar 26,7 derajat dan suhu yang didapat

dengan thermogun sebesar 27 derajat. Nilai error yang dihasilkan sensor pada percobaan pertama sebesar 1,2 %. Demikian seterusnya hingga pengukuran yang kelima diperoleh sesuai tabel tersebut. Adapun rata-rata nilai error pada lima kali percobaan menggunakan rumus berikut:

$$\text{Rata - rata} = \frac{(0,67 + 0,203 + 0,083 + 0,075 + 0,12)}{5} = \frac{1,151}{5} = 0,2302\%$$

Akurasi sensor pH dalam membaca kelembapan tanah mencapai 99,77%, dimana nilai akurasi yang didapat mendekati nilai 100%.

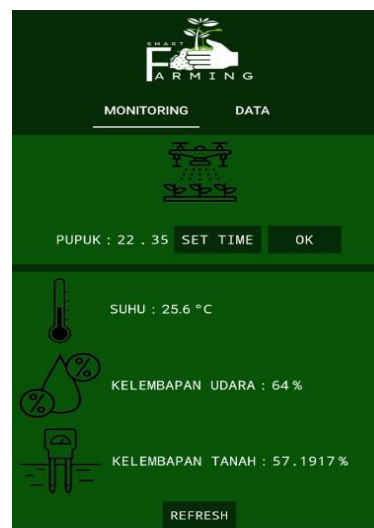
Adapun rata-rata nilai error sensor pada lima kali percobaan menggunakan rumus berikut:

$$\text{Rata - rata} = \frac{(1,2 + 0,74 + 0,33 + 2,413 + 1,29)}{5} = \frac{5,973}{5} = 1,195\%$$

Akurasi sensor DHT22 dalam membaca suhu mencapai 98,805%, dimana nilai akurasi yang didapat mendekati nilai 100%.

Pengujian sistem monitoring pada implementasi software akan berisi tentang software yang akan digunakan dalam pembuatan otomatis berdasarkan rancangan yang telah dibuat. Adapun software yang diperlukan adalah: Arduino IDE, database dan aplikasi. Implementasi software pada penelitian ini terdiri dari 4 penelitian, yaitu coding program dengan menggunakan Arduino IDE, selanjutnya database menggunakan firebase dan spreadsheet, lalu monitoring sistem realtime yang didapat menggunakan aplikasi. Adapun hasil implementasi software yang dibuat dapat dilihat sebagai berikut.

Tampilan berikut untuk membaca data dari sensor DHT22 yang terhubung ke mikrokontroler. Sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu. Selain itu, terdapat pin digunakan untuk mengukur pH media yang kemudian diubah menjadi persentase.



Gambar 7. Tampilan Sistem pada Aplikasi

Disamping pelaporan data temperatur dan kelembaban diterima komunikator melalui androidnya seperti ditunjukkan pada gambar 8,



Gambar 8. Tampilan pada Web di Komputer

Model dikembangkan dalam lingkungan MATLAB Simulink menggunakan Simscape Electrical dan blok kendali. Sensor virtual digunakan untuk mensimulasikan data lapangan, dan LED model dikendalikan berdasarkan output pengendali. Model diuji dengan berbagai skenario lingkungan (siang, malam, mendung) untuk mengamati respon adaptif sistem.[10]

SIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil merancang dan memodelkan sistem pencahayaan adaptif berbasis IoT yang terintegrasi dengan sensor suhu dan pH untuk mendukung proses fotobioreaksi mikroalga. Dengan menggunakan simulasi MATLAB Simulink, sistem dapat secara efektif menyesuaikan intensitas pencahayaan

LED sesuai dengan perubahan kondisi lingkungan secara real-time. Pemanfaatan kontrol PID dan logika fuzzy menunjukkan respons pencahayaan yang stabil dalam kisaran optimal untuk pertumbuhan mikroalga ($50\text{--}70\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$), sekaligus mampu mengurangi konsumsi daya hingga 30% dibandingkan metode pencahayaan statis.

Model juga menunjukkan kemampuan dalam mensimulasikan integrasi perangkat keras seperti Arduino dan sensor lingkungan melalui pendekatan virtual yang fleksibel, memungkinkan evaluasi performa tanpa perlu uji coba fisik awal. Hasil ini memberikan dasar kuat bagi pengembangan sistem pencahayaan pintar berbasis energi terbarukan dan IoT dalam teknologi bioproses.

Simulasi MATLAB Simulink berhasil memodelkan sistem pencahayaan adaptif berbasis IoT untuk proses fotobioreaksi mikroalga. Sistem mampu merespons dinamika lingkungan dan memberikan dasar kuat untuk implementasi nyata. Studi ini membuka peluang untuk penerapan lebih luas dalam teknologi bioproses berbasis kendali cerdas dan energi terbarukan.

Dengan demikian, pendekatan simulatif ini tidak hanya efisien dari sisi waktu dan biaya, tetapi juga membuka peluang untuk optimalisasi lebih lanjut pada sistem fotobioreaktor berbasis kontrol adaptif di skala industri.

Sistem monitoring suhu dan pH media menggunakan sensor telah berhasil diimplementasikan. Sensor DHT22 mampu membaca suhu dengan tingkat error yang rendah. Rata-rata nilai error sensor DHT22 dalam membaca suhu adalah 1,2%. Sensor pH media mampu membaca pH media dengan tingkat error yang rendah. Rata-rata nilai error sensor pH dalam membaca pH adalah 0,3%,

Ucapan Terima Kasih

Dengan terpublikasinya artikel ini, Penulis mengucapkan terima kasih kepada redaktur Jurnal Vastuwidya, yayasan Cita Widya Suhita, Ilmu Komunikasi UHN IGB Sugriwa Denpasar, dan Politeknik Negeri Bali atas bantuannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IGS Widharma, "Perancangan Simulasi Sistem Pendaftaran Kursus Berbasis Web Dengan Metode SDLC", *Matrix: Jurnal Manajemen Teknologi dan Informatika*, 7 (2), 38. 2017
- [2] A. B. Setyawan, M. Hannats, dan G. E. Setyawan, "Sistem Monitoring Kelembaban Tanah, Kelembaban Udara, Dan Suhu Pada Lahan Pertanian Menggunakan Protokol MQTT," *J. Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput. Univ. Brawijaya*, vol. 2, no. 12, hal. 7502–7508, 2018.
- [3] A. N. Rasyid, D. Hamdani, dan I. Setiawan, "Rancang Bangun Smart Greenhouse Berbasis Arduino Uno," *J. Ilmu Pembelajaran Fis.*, vol. 2, no. 2, hal. 125–132, 2023.
- [4] S. Nurrahmi, N. Miseldi, dan S. H. Syamsu, "Rancang Bangun Sistem Penyiraman Otomatis pada Green House Tanaman Anggrek Menggunakan Sensor DHT22," *JPF (Jurnal Pendidik. Fis. Univ. Islam Negeri Alauddin Makassar)*, vol. 11, no. 1, hal. 33–43, 2023, doi: 10.24252/jpf.v11i1.33419.
- [5] M. N. Nizam, Haris Yuana, dan Zunita Wulansari, "Mikrokontroler Esp 32 Sebagai Alat Monitoring Pintu Berbasis Web," *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.)*, vol. 6, no. 2, hal. 767–772, 2022, doi: 10.36040/jati.v6i2.5713.
- [6] IGS Widharma, I Nengah Sunaya. :Aplikasi sistem akuisisi data pada sistem fire alarm berbasis sistem mikrokontroler". *Jurnal Logic* 14(2). 126. 2017
- [7] F. Puspasari, T. P. Satya, U. Y. Oktiawati, I. Fahrurrozi, dan H. Prisyanti, "Analisis Akurasi Sistem sensor DHT22 berbasis Arduino terhadap Thermohygrometer Standar," *J. Fis. dan Apl.*, vol. 16, no. 1, hal. 40, 2020, doi: 10.12962/j24604682.v16i1.5776.
- [8] Y. Efendi, "Internet Of Things (Iot) Sistem Pengendalian Lampu Menggunakan Raspberry Pi Berbasis Mobile," *J. Ilm. Ilmu Komput.*, vol. 4, no. 2, hal. 21–27, 2018, doi: 10.35329/jiik.v4i2.41.
- [9] Maharani, Antares, Baso, Yusnaini, Nurhani, Martdiansyah. "Pemodelan Solar Tracker Dengan Pengendali PI, PD, Dan PID Menggunakan Matlab-Simulink Dengan Beban Baterai. *Jurnal Foristek* 14 (1). 2024

- [10] Midiatmiko, Yanu, Yahya. "PV Solar Tracker Berbasis Matlab/Simulink Untuk Optimasi Daya". JTECS. 2021.
- [11] IGS Widharma, Sajayasa, Sunaya, Sangka. "Perancangan Sistem Informasi Manajemen Laboratorium Otomasi Berbasis Web dengan Metode Prototype". Vastuwidya 5(2). 10. 2022