

INTEGRASI TEKNOLOGI KOMUNIKASI DIGITAL DAN PANEL SURYA DALAM REKAYASA PENCAHAYAAN ADAPTIF PADA SINTESIS MIKROALGA

I Gede Suputra Widharma¹⁾, I Gde Nyoman Sangka²⁾, I Made Sajayasa³⁾, I Ketut Darminta⁴⁾, I Nengah Sunaya⁵⁾, I Gde Ketut Sri Budarsa⁶⁾, dan A.A.M. Dewi Anggreni⁷⁾

¹²³⁴⁵⁶Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bali

⁷Jurusan Teknologi Industri Pertanian, Universitas Udayana

E-mail: suputra@pnb.ac.id

Abstract

This research develops an adaptive lighting system for microalgae synthesis by integrating solar panels as a renewable power source and Internet of Things (IoT)-based digital communication technology. The system is designed using an ESP32 microcontroller connected to light (LDR), temperature (DS18B20), and pH (pH-4502C) sensors to regulate LED grow lights in real time. The adaptive control algorithm automatically adjusts light intensity—reducing brightness when natural light is sufficient or water temperature increases, and increasing brightness when natural light is low or pH decreases.

Experimental results show that the adaptive system successfully maintained culture stability, with water temperature controlled at 27–28 °C and average microalgae biomass reaching 2.98 mg/L. In terms of energy performance, the adaptive lighting system consumed only 70–75 Wh/day compared to 120 Wh/day for a static lighting system, resulting in approximately 38% energy savings.

This study demonstrates the potential of combining IoT-based adaptive control with renewable energy to support efficient and sustainable microalgae cultivation. The proposed system can serve as a model for green technology applications in ecological-based industries and green tourism development.

Keywords: digital communication, solar panel, adaptive lighting, microalgae synthesis, green

PENDAHULUAN

Mikroalga memiliki potensi besar dalam berbagai aplikasi, termasuk produksi biofuel, suplemen nutrisi, serta pengolahan limbah dan karbon dioksida. Salah satu faktor utama yang menentukan efisiensi pertumbuhan mikroalga adalah intensitas dan spektrum cahaya yang diterimanya selama proses fotosintesis. Namun, tantangan utama dalam budidaya mikroalga adalah optimasi sistem pencahayaan yang hemat energi dan ramah lingkungan, terutama dalam konteks green technology dan green tourism. Energi listrik dari sumber fosil masih banyak digunakan untuk sistem pencahayaan dalam kultur mikroalga, yang meningkatkan jejak karbon dan biaya operasional. Latar belakang penelitian ini bermula dari kesadaran akan pentingnya kualitas mikrosampel mikroalga dalam konteks aplikasi industri, pangan, dan biofarmasi. Kebutuhan kualitas mikroalga yang baik sebagai bahan industri pangan dan biofarmasi. Beberapa lembaga penelitian universitas di Indonesia aktif membuat penelitian tentang mikroalga. Tanaman mikroalga yang berwarna hijau-kebiruan yang hidup di air laut dan air tawar. Menjadi bahan makanan yang sering disebut sebagai makanan bergizi karena

memiliki nutrisi yang lengkap dan kandungan protein yang cukup tinggi. Disamping kandungan mikroalga itu bermanfaat pada pangan juga untuk kecantikan dan kesehatan. Kebutuhan akan mikroalga ini membuat proses pembuatannya dilakukan juga secara indoor pada industri ataupun laboratorium melalui sintesa mikroalga. Penelitian Suputra et al. (2024) tentang sintesis mikrosampel mikroalga dengan menggunakan cahaya lampu bersumber pada solar panel dan terintegrasi IoT, telah berhasil menunjukkan bahwa mikroalga dapat tumbuh dengan baik menggunakan cahaya dari lampu yang bersumber dari panel surya, sistem berbasis IoT mampu memonitoring suhu dan nilai pH, konsumsi energi dapat ditekan dengan pemanfaatan panel surya, tetapi belum memakai rekayasa pencahayaan adaptif untuk meningkatkan efisiensi pertumbuhan mikroalga. Zou et al. (2022) yang meneliti pengaruh spektrum cahaya yang berbeda terhadap pertumbuhan mikroalga dan menemukan bahwa kombinasi cahaya merah dan biru mampu meningkatkan efisiensi fotosintesis. Li et al. (2023) yang mengembangkan sistem pencahayaan berbasis LED dengan kontrol spektrum dinamis, tetapi masih menggunakan listrik dari jaringan PLN, bukan energi terbarukan. Kim et al. (2023) yang menganalisis penggunaan IoT untuk monitoring kondisi kultur mikroalga, tetapi tidak terintegrasi dengan kontrol pencahayaan adaptif. Hal ini membutuhkan sumber energi untuk pencahayaan dan pertumbuhan hingga pemantauan perkembangannya.

Penelitian ini mengusulkan bagaimana mengembangkan sistem pencahayaan adaptif berbasis panel surya dan terintegrasi teknologi komunikasi digital untuk meningkatkan efisiensi sintesis mikrosampel mikroalga, dengan fitur utama yaitu pemanfaatan energi terbarukan dengan menggunakan panel surya sebagai sumber daya utama untuk pencahayaan, pengendalian adaptif berbasis IoT yang dapat menyesuaikan intensitas dan spektrum cahaya pada sintesis mikroalga. tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut adalah dapat merancang sistem pencahayaan adaptif berbasis panel surya dan terintegrasi internet of things untuk meningkatkan efisiensi sintesis mikrosampel mikroalga

METODE PENELITIAN

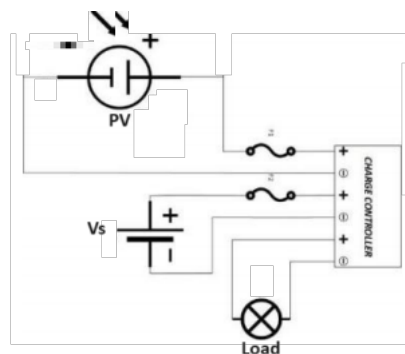
Metode yang digunakan adalah survey, literatur review, observasi dan eksperimental di laboratorium. Diagram alir penelitian ditunjukan pada gambar 1 diawali survey dan mengumpulkan air laut untuk sintesis mikroalga, persiapan bahan dan peralatan, perancangan solar panel, monitoring dan pencahayaan adaptif. Setelah semua siap, barulah proses pembuatan mikrosampel mikroalga pada air laut. Integrasi teknologi komunikasi digital dan

pemanfaatan solar panel penelitian sebagai sumber energi untuk mendukung proses sintesis mikroalga.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Perancangan PLTS dibuat dengan blok diagram terlebih dulu untuk acuan dalam pembuatan modulnya, seperti pada Gambar 5.5. Perhitungan beban menggunakan lampu TL 10 W sebagai penerangan dan aerator 10 W untuk sirkulasi udara. Dengan menggunakan persamaan (1) diperoleh besarnya 200 Wh per hari. Sementara perhitungan total kapasitas baterai yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan beban memakai persamaan (2) sehingga diperoleh 20 Ah, sehingga total energy yang disimpan dalam baterai adalah 240 Wh.



Gambar 2. Skema PLTS

Pencahayaan adaptif (adaptive lighting) dirancang untuk mampu menyesuaikan intensitas, spektrum, atau arah cahaya secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan, kebutuhan sintesis, atau waktu. Tujuannya adalah untuk meningkatkan efisiensi energi, kenyamanan visual, dan proses sintesis. Komponen utama sistem pencahayaan adaptif, yaitu:

- Sensor cahaya (LDR) untuk mendeteksi intensitas cahaya sekitar media.

- b. Aktuator / Driver Lampu untuk mengontrol dimming (peredupan) dan on/off lampu berdasarkan input dari sensor dengan menggunakan 0-10V dimming dalam lampu LED.
- c. Lampu LED untuk Mikroalga menggunakan LED Grow Light dengan panjang gelombang biru (≈ 450 nm) dan merah (≈ 660 nm) yang paling efisien untuk fotosintesis.
- d. Dimmable LED untuk mendukung sistem adaptif.
- e. ESP32 yang terhubung ke sistem IoT untuk kontrol dan pemantauan jarak jauh.

Sistem ini membaca intensitas cahaya lingkungan melalui sensor kemudian mengolah data pada controller yang mengatur output pencahayaan (misalnya menurunkan intensitas lampu ketika siang hari atau saat ruangan kosong) seperti ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1 Rekayasa Pencahayaan Adaptif

Waktu / Kondisi	Intensitas Pencahayaan	Logika Adaptif
Pagi-Siang (energi surya)	100%	Pemanfaatan maksimal energi surya
Sore / Energi terbatas	50-70%	Adaptif sesuai kapasitas baterai
Malam / Darurat	20-30%	Minimal untuk survival mode
Intensitas CO ₂ rendah	Naikkan pencahayaan	Stimulasi fotosintesis
Suhu tinggi	Redupkan lampu	Hindari overheating

Selain logika adaptif pada Tabel 1, mekanisme kontrol pencahayaan ini dijalankan melalui algoritma berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor LDR, sensor suhu DS18B20, dan sensor pH-4502C. Alur logika algoritmanya adalah sebagai berikut:

a?? Input sensor:

- ✓ LDR membaca intensitas cahaya alami.
- ✓ DS18B20 memantau suhu media (target 27–28 °C).
- ✓ Sensor pH-4502C memantau kondisi pH media (target 7–8).

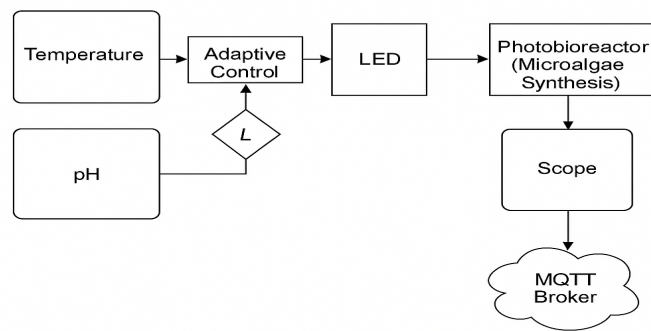
b?? Proses kontrol pada ESP32:

- ✓ Jika cahaya alami > 1000 lux \rightarrow LED diredupkan (hingga 20–30%) atau dimatikan.
- ✓ Jika cahaya alami < 200 lux \rightarrow LED dinaikkan ke 80–100%.
- ✓ Jika suhu media > 29 °C \rightarrow LED diredupkan otomatis 20% untuk mengurangi panas.
- ✓ Jika pH turun < 6.5 \rightarrow LED dinaikkan 10–20% untuk merangsang fotosintesis.

c?? Output sistem:

- ✓ Driver LED menyesuaikan tingkat PWM sesuai keputusan algoritma.
- ✓ Data (cahaya, suhu, pH, intensitas LED) dikirim ke dashboard IoT untuk pemantauan jarak jauh.

Dengan mekanisme ini, pencahayaan adaptif tidak hanya merespons kondisi cahaya alami, tetapi juga mempertimbangkan suhu dan pH untuk menjaga kestabilan media mikroalga. Pada sintesis ini dirancang ada 2 sisi eksperimen berdasarkan posisinya terhadap matahari, yaitu sisi luar yang mendapat sinar matahari terdiri atas 4 media dan sisi dalam yang hanya mengandalkan pencahayaan lampu terdiri atas 4 media. Masing-masing media mendapat perlakuan beda yaitu tanpa lampu dan aerator, dengan aerator saja, dengan lampu saja dan media yang lengkap dengan aerator dan lampu.



Gambar 3. Rancangan rangkaian pencahayaan adaptif

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ada 3 hal yang dilakukan tim peneliti, yaitu perancangan panel surya sebagai sumber energi, pencahayaan adaptif dengan terintegrasi komunikasi digital, dan sintesis mikrosampel mikroalga tersebut. Sistem panel surya menggunakan komponen yaitu panel surya 100 WP, baterai 12V 20Ah, SCC MPPX, MCB 6A, lampu LED 10W dan Aerator 10W dengan perhitungan kebutuhan beban sebesar 480 Wh/hari. Pencahayaan adaptif menggunakan komponen yaitu perangkat smart lamp dengan mikrokontroler, sensor LDR, driver LED, dan LED. Sistem ini menyesuaikan tingkat kecerahan lampu LED berdasarkan kondisi lingkungan, seperti cahaya alami dan kehadiran orang. Untuk menguji kemampuan sensor, juga dengan memanfaatkan simulasi dengan simulasi proteus dan simulasi simulink matlab terhadap terang redupnya cahaya ruangan. Sensor cahaya (LDR) mengukur intensitas cahaya alami, jika cahaya alami cukup terang, lampu akan diredupkan atau dimatikan. Jika cahaya redup, lampu akan dinyalakan atau ditingkatkan kecerahannya.

Berdasarkan hasil simulasi sistem pencahayaan ruang lab aktivitas sisi luar media dan sisi dalam media (di sisi dinding gelap lab), rata-rata tingkat pencahayaan ruang lab aktivitas sisi luar media lebih tinggi dibandingkan sisi dalam media. Perbedaan tersebut disebabkan karena sisi luar terletak di luar ruangan sehingga cahaya matahari langsung menuju media sedangkan di sisi dalam media hanya menempel dengan dinding lab bagian dalam. Rata-rata tingkat pencahayaan tertinggi pada ruang lab terjadi pada siang hari tepatnya jam 13:00 saat pengukuran sintesis dilaksanakan dan pada musim kemarau. Pada pukul 19.00 kedua lajur memiliki tingkat pencahayaan yang konstan dengan rata-rata kurang lebih 40-50 lux karena matahari sudah terbenam dan lampu luar ruangan menyala. Hal ini membuktikan kedua lajur sepenuhnya memanfaatkan pencahayaan buatan karena tidak ada cahaya matahari langsung seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengukuran Tingkat Pencahayaan Matahari

Sisi Media	Tingkat pencahayaan ruangan (lux) pada waktu tertentu				
	7:00	10:00	13:00	16:00	19:00
luar	150	520	1100	640	50
dalam	58	96	124	90	40

Untuk mengukur kontribusi efisiensi energi, konsumsi listrik sistem pencahayaan adaptif dibandingkan dengan sistem pencahayaan statis (lampu LED menyala 100% sepanjang hari).

a?? Sistem statis: LED 10 W menyala penuh selama 12 jam/hari dengan konsumsi sebesar 120 Wh/hari.

b?? Sistem adaptif: Berdasarkan hasil pengukuran, rata-rata LED hanya bekerja pada 55–60% kapasitas selama 12 jam/hari, ditambah mode redup 20–30% saat malam dengan konsumsi sebesar 70–75 Wh/hari.

Dari perbandingan ini diperoleh efisiensi energi sebesar $\pm 38\%$ dibandingkan sistem statis. Selain itu, integrasi panel surya membuat sistem ini hampir sepenuhnya mandiri energi sehingga mendukung konsep green technology.

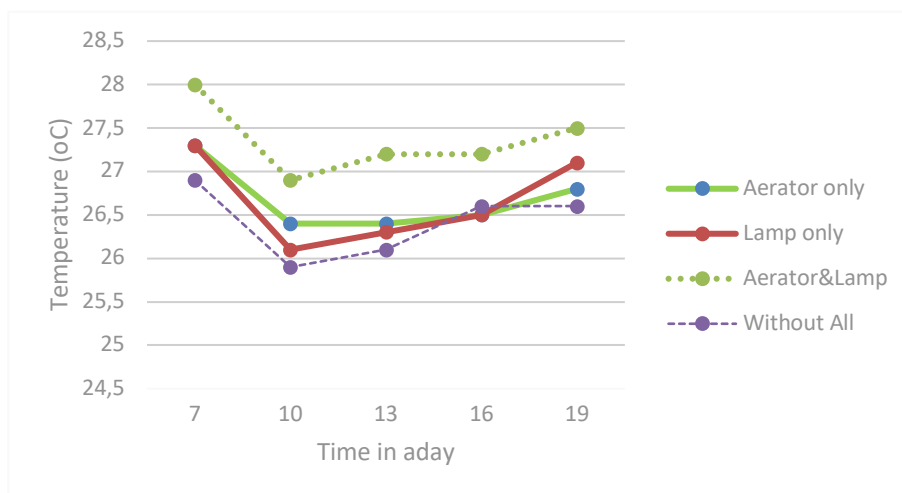
Dalam penelitian ini, sintesis mikroalga menggunakan media air laut yang diambil dari laut lepas pantai Yeh Kali Seraya pada awal bulan April. Ada terkumpul 4 jiregen air laut

untuk dipindahkan dalam wadah ember sebagai tempat dan media sintesis mikrosampel mikroalga. Sintesis dilakukan dengan mencampurkan nutrisi ke air laut pada ember tersebut dengan perbandingan 1:10. Kemudian pada media tersebut juga di pasang aerator, sensor suhu DS 18B20, sensor pH-4502C dan diberikan cahaya lampu. Setiap akhir pekan dilakukan penyaringan pada media air untuk mengetahui banyaknya mikroalga yang dihasilkan.



Gambar 4. Proses Sintesis Mikrosampel Mikroalga

Pencahayaan adaptif yang diberikan terhadap ke 4 media eksperimen dengan perbedaan perlakuan mendapatkan hasil yang menunjukkan pada media dengan lengkap perlakuan baik itu aerator dan pencahayaan adaptif diperoleh suhu air laut media sintesis relatif stabil pada suhu yang diharapkan yaitu 27-28 °C seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Pada setiap waktu pengambilan data dalam 5 periode waktu jam 07:00, 10:00, 13:00, 16:00, dan 19:00 ditunjukkan suhu pada media yang lengkap perlakuannya memiliki suhu media air laut relatif lebih tinggi daripada yang lain.



Gambar 5 Perbandingan suhu media dengan empat perlakuan

Kestabilan suhu air laut media sintesis mikroalga dengan perlakuan lengkap baik aerator dan pencahayaan adaptif tersebut menunjukkan bahwa rekayasa pencahayaan adaptif mendukung proses fotosintesis yang terjadi pada sintesis mikroalga dengan menghasilkan gas CO₂ dan biomassa mikroalga. Dari hasil pengukuran media sintesis tersebut diperoleh data seperti pada tabel 4 berikut.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Biomassa Mikroalga

Waktu Pengukuran	Volume air (cc)	Biomass (mg/l)	Keterangan
Minggu pertama	37.680	2,9	berhasil
Minggu kedua	37.670	2,9	berhasil
Minggu ketiga	37.660	3,0	berhasil
Minggu keempat	37.650	3,1	berhasil

Berdasarkan hasil pengukuran volume air laut pada media dan kandungan biomassa mikroalga diperoleh data rata-rata volume air laut pada media setelah seminggu proses rekayasa pencahayaan adaptif diterapkan berkurang dari 39.250 cc menjadi 37.665 cc, dengan rata-rata biomassa mikroalga yang diperoleh adalah 2,98 mg/l.

SIMPULAN

Penelitian ini meliputi perancangan panel surya sebagai sumber energi, pencahayaan adaptif yang terintegrasi dengan teknologi komunikasi digital berbasis IoT, serta sintesis mikrosampel mikroalga. Sistem panel surya menggunakan panel 100 WP, baterai 12V 20Ah, SCC MPPX, MCB 6A, lampu LED 10W dan Aerator 10W, dengan kebutuhan beban harian sebesar 480 Wh. Sementara, sintesis dilakukan dengan mencampurkan nutrisi ke air laut pada ember tersebut dengan perbandingan 1:10. Pencahayaan adaptif dikendalikan melalui mikrokontroler ESP32 yang memproses data dari sensor LDR, DS18B20, dan pH-4502C. Sistem ini mampu menyesuaikan intensitas LED secara otomatis: meredupkan cahaya ketika intensitas alami tinggi atau suhu media naik, serta meningkatkan intensitas ketika cahaya alami rendah atau pH turun. Mekanisme kontrol adaptif ini berhasil menjaga suhu media stabil pada kisaran 27–28 °C dan mendukung fotosintesis yang optimal.

Dari hasil pengukuran, volume air media setelah empat minggu berkurang dari 39.250 cc menjadi 37.665 cc, dengan rata-rata biomassa mikroalga yang diperoleh sebesar 2,98 mg/l.

Selain itu, analisis energi menunjukkan bahwa sistem pencahayaan adaptif hanya membutuhkan 70–75 Wh/hari dibandingkan 120 Wh/hari pada sistem statis, sehingga menghasilkan efisiensi energi sekitar 38%. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya mampu meningkatkan stabilitas kondisi lingkungan untuk pertumbuhan mikroalga, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap efisiensi energi dan penerapan green technology yang mendukung pariwisata dan industri berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Nurjaman, HB. & Purnama, T. (2022). Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai Solusi Energi Terbarukan Rumah Tangga. *Jurnal Edukasi Elektro*, 06, 02.
- Pranata, IDGD., Widharma, IGS. & Parti., IK. (2023). Monitoring Automatic Transfer Switch Pada Sistem Hybrid PLTS Dengan Listrik PLN Sebagai Sumber Energi Pompa Kolam Ikan Berbasis Internet of Things (IoT). *Repository Politeknik Negeri Bali*
- Bialevich, V.; Zachleder, V. & Bišová, K. (2022). The Effect of Variable Light Source and Light Intensity on the Growth of Three Algal Species. *Cells*, 11, 1293.
- Widharma, IGS, Sunaya, IN; Sajayasa, IM; Sangka, IGN., Darminta, IK. & Anggreni, AAMD. (2021). Effect of Heating Light on Lamps to the Behaviour of Tilapia Seedlings Sourced from Solar Panels. *Proceedings iCAST-ES 2021*, pages 1305-1311.
- Anggreni, AAMD., Arnata, IW. & Gunam, IBW. (2021). Microalgae Isolation found in Kedonganan beach, Badung Bali, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 913, 012067.
- Arthadi, IP., Permana, MP., Gian, FS., Dimas, DN, & Widharma, IGS. (2017), Paket Program Aplikasi: Analysis and Mapping. *Repository Politeknik Negeri Bali*.
- Jatmiko, Hasyim Asy'ari & Mahir, Purnama. (2021). Pemanfaatan Sel Surya dan Lampu LED untuk Perumahan. *Seminar Nasional Teknologi Informasi & Komunikasi Terapan*
- Widharma, IGS., Sumadi, IK. & Anggreni, AAMD. (2024). Study on the Implementation Internet of Things in the sustainable agriculture revolution from upstream to downstream. *Journal DTCS*, 2, 2, 113-120.
- Rochadiani, TH., William, W., Santoso, H., Natasya, Y., Ariqoh, UDN., & Rahayu, RAS. (2022). Penerapan IoT Untuk Pemantauan Kualitas Air Kolam Peternak Ikan Di Kampung Kalipaten. *Prosiding PKM-CSR*, 5.
- Wakhid, AR., Alifah, S. & Marwanto, A. (2022). Pengembangan Sistem Monitoring dan Kendali Pertumbuhan Tanaman Semangka dengan TCS230 Berbasis IOT. *Jurnal Cyclotron*, 5, 02.

Arta, IKCA., Febriyanto, A., Adi Nugraha, IBMH., Widharma, IGS. & Purnama, IBI. (2022).
Animal Tracking Berbasis Internet of Things. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 21, 1.

Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Politeknik Negeri Bali (P3M). Buku
Rencana Strategis Penelitian (RENSTRA) 2021-2025.