

Sistem Penerangan Jalan Umum Pintar dengan Teknologi Dimming Adaptif dan Monitoring Kerusakan Lampu

Dhara Lusyana Wati^{1*}, Ega Wiratama², Gabriel Handara Putra Nugraha³, Tommy Kusuma Wardhana⁴, Febri Fajar Setiyawan⁵, Rahmad Aji Novianto⁶

¹Teknik Informatika

Universitas Duta Bangsa Surakarta

^{1*}250103009@mhs.ac.id

² Teknik Informatika

Universitas Duta Bangsa Surakarta

²250103010@mhs.ac.id

³ Teknik Informatika

Universitas Duta Bangsa Surakarta

³250103013@mhs.ac.id

⁴ Teknik Informatika

Universitas Duta Bangsa Surakarta

⁴2501030111@mhs.ac.id

⁵ Teknik Informatika

Universitas Duta Bangsa Surakarta

⁵250103121@mhs.ac.id

⁶ Teknik Informatika

Universitas Duta Bangsa Surakarta

⁶250103128@mhs.ac.id

Abstrak— Penerangan Jalan Umum (PJU) merupakan infrastruktur dasar untuk mendukung mobilitas dan keamanan masyarakat di malam hari. Namun, sistem konvensional memiliki kelemahan berupa pemborosan energi akibat lampu yang menyala dengan intensitas penuh sepanjang malam, serta keterlambatan penanganan kerusakan akibat ketergantungan pada laporan manual. Penelitian ini bertujuan untuk merancang arsitektur sistem PJU pintar berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 sebagai pengendali utama yang efisien. Sistem ini menerapkan metode peredupan adaptif (*adaptive dimming*) menggunakan sensor PIR HW-416A untuk mendeteksi keberadaan objek dan sensor BH1750 untuk mengukur intensitas cahaya sekitar. Pengaturan kecerahan lampu LED dirancang secara dinamis melalui sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dikendalikan oleh MOSFET IRLZ44N. Fitur deteksi kerusakan diintegrasikan menggunakan sensor arus dan tegangan INA219 yang dikonfigurasi untuk memicu pengiriman notifikasi peringatan instan ke WhatsApp pengelola jika arus mendekati nol. Sistem ini direncanakan mengandalkan catu daya panel surya dan baterai Li-ion yang diregulasi oleh *charge controller* TP4056 serta modul *step-up* MT3608. Data pemantauan dirancang ditransmisikan secara *real-time* ke *dashboard* web lokal menggunakan metode AJAX Polling. Sistem yang dirancang ini diharapkan dapat menjadi solusi alternatif yang andal dalam mengoptimalkan efisiensi konsumsi daya serta mempermudah manajemen perawatan infrastruktur PJU jangka panjang.

Kata kunci— PJU tenaga surya, ESP32, IoT, peredupan adaptif, whatsapp notifikasi.

Abstract— Public Street Lighting (PJU) is a fundamental infrastructure that supports public mobility and safety at night. However, conventional systems suffer from inefficiencies, such as energy waste due to lamps operating at full intensity throughout the night, and delayed maintenance responses owing to a reliance on manual reporting. This study aims to design a smart, Internet of Things (IoT)-based PJU system architecture using the ESP32 DevKit V1 microcontroller as the primary efficient controller. The system implements an adaptive dimming method utilizing an HW-416A PIR sensor to detect object presence and a BH1750 sensor to measure ambient light intensity. The brightness of the LED lamps is dynamically adjusted via Pulse Width Modulation (PWM) signals controlled by an IRLZ44N MOSFET. A fault detection feature is integrated using an INA219 current and voltage sensor, which is configured to trigger instant alert notifications to the supervisor's WhatsApp if the current approaches zero. The system is designed to rely on a power supply consisting of solar panels and Li-ion batteries, regulated by a TP4056 charge controller and an MT3608 step-up module. Monitoring data is projected to be transmitted in real-time to a local web dashboard using the AJAX Polling method. This proposed system is expected to serve as a reliable alternative solution for optimizing power consumption efficiency and streamlining long-term PJU infrastructure maintenance management.

Keywords— solar street light, ESP32, IoT, adaptive dimming, whatsapp notification.

I. PENDAHULUAN

Penerangan Jalan Umum (PJU) merupakan infrastruktur dasar untuk mendukung mobilitas dan keamanan masyarakat di malam hari. Penelitian adalah suatu usaha sistematis untuk menyelidiki masalah tertentu dengan tujuan mencari jawaban secara ilmiah, yang melibatkan pengumpulan, pengolahan, analisis, dan penarikan kesimpulan dari data untuk memahami fenomena atau masalah yang diteliti [1]. Berdasarkan kerangka tersebut, permasalahan PJU konvensional menjadi objek yang relevan untuk dikaji secara sistematis melalui pendekatan rekayasa berbasis Internet of Things (IoT).

Sistem PJU konvensional yang masih banyak digunakan saat ini umumnya beroperasi dengan kecerahan penuh secara terus-menerus dari petang hingga fajar tanpa mempertimbangkan kondisi lalu lintas pejalan kaki maupun kendaraan di sekitarnya, sehingga menimbulkan pemborosan energi listrik yang signifikan [2]. Permasalahan ini diperparah oleh minimnya sistem pemantauan terhadap kondisi fisik lampu, sehingga kerusakan lampu PJU umumnya baru diketahui setelah ada laporan warga atau hasil pemeriksaan manual oleh petugas pada malam hari, yang tentu tidak efisien dari segi waktu maupun biaya operasional [3].

Mikrokontroler ESP32 DevKit V1 telah banyak diadopsi sebagai pusat kendali otomatis terdistribusi berkat fitur WiFi 2,4 GHz dan prosesor dual core yang dimilikinya, sehingga mampu mengolah data sensor sekaligus bertindak sebagai web server lokal mandiri [1], [3]. Untuk membedakan kondisi siang dan malam, sejumlah penelitian memanfaatkan sensor cahaya BH1750 berbasis komunikasi I2C yang mampu membaca intensitas cahaya hingga 65.535 lux, kemudian memadukannya dengan sinyal PWM untuk mengatur tingkat kecerahan lampu secara bertahap sesuai kondisi lingkungan [4]. Pada sisi deteksi keberadaan objek, sensor gerak PIR dengan sudut deteksi hingga 120 derajat umum digunakan karena mampu merespons pergerakan manusia atau kendaraan secara cepat sehingga

lampu dapat segera beralih ke kecerahan penuh saat mendeteksi adanya aktivitas [5].

Pada aspek pemantauan kondisi kelistrikan lampu, sensor INA219 banyak diterapkan karena mampu mengukur tegangan, arus, dan daya secara bersamaan pada rangkaian arus searah DC melalui komunikasi I2C, sehingga dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi kerusakan lampu maupun memantau kinerja baterai dan panel surya secara waktu nyata [6], [7]. Penelitian lain bahkan mengintegrasikan sensor INA219 dengan ESP32 untuk sistem proteksi otomatis yang memutus beban apabila arus atau tegangan melampaui ambang batas yang ditentukan, dengan tingkat kesalahan pengukuran yang relatif kecil [8]. Pada bagian penggerak lampu, MOSFET logic level seperti IRLZ44N lazim digunakan sebagai sakelar elektronik yang dikendalikan oleh sinyal PWM dari mikrokontroler untuk mengatur kecerahan beban LED secara presisi [4].

Dari sisi penyediaan daya, kombinasi panel surya, modul pengisi daya TP4056, dan baterai Li-ion 18650 menjadi pilihan umum untuk sistem PJU mandiri energi. Kombinasi ini mampu menyimpan energi matahari secara efisien sekaligus menjaga keamanan proses pengisian baterai dari risiko pengisian berlebih [9], [10]. Pemantauan kondisi baterai berbasis estimasi kapasitas turut diperlukan agar performa baterai tetap terjaga dalam jangka panjang dan tidak mengalami penurunan kualitas akibat pengosongan berlebihan [11]. Selain itu, modul step up seperti MT3608 umum digunakan untuk menaikkan tegangan keluaran menjadi tegangan kerja 5V yang sesuai dengan kebutuhan ESP32. Sementara itu, untuk kebutuhan pemantauan data terkini, pengembangan aplikasi dasbor web lokal yang di host langsung pada ESP32 menggunakan metode AJAX Polling menjadi alternatif yang jauh lebih ringan, stabil, dan efisien dibandingkan arsitektur berbasis basis data eksternal [12].

Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah berhasil mengatasi sebagian persoalan PJU konvensional, sebagian besar masih berfokus pada salah satu aspek saja, baik hanya pada efisiensi energi melalui kendali otomatis maupun

hanya pada pemantauan kondisi kelistrikan, tanpa mengintegrasikan keduanya secara menyeluruh dalam satu sistem yang efisien, serta belum mempertimbangkan keberlanjutan pasokan daya melalui pemanfaatan sumber energi terbarukan secara mandiri. Selain itu, sistem pemantauan yang dikembangkan sebelumnya umumnya belum dilengkapi dengan mekanisme pelaporan darurat kepada petugas pelaksana lapangan saat terjadi kegagalan sistem. Oleh karena itu, penelitian ini bermaksud merancang dan mengimplementasikan sistem Penerangan Jalan Umum pintar yang mengintegrasikan dua fungsi utama secara simultan melalui pemrosesan berbasis RAM pada ESP32 Devkit V1. Fungsi tersebut meliputi peredupan (*dimming*) adaptif berbasis sensor PIR HW-416A dan sensor BH1750, serta deteksi dini kerusakan lampu melalui sensor INA219 yang secara otomatis terintegrasi dengan WhatsApp Gateway (Green API) untuk pengiriman notifikasi darurat saat terjadi kegagalan sistem. Seluruh komponen disuplai oleh sumber energi mandiri dari panel surya yang disusun seri, charge controller TP4056, baterai Li-ion 18650 berkapasitas 3,7V 44,4 Wh, serta modul step-up MT3608. Pemantauan data kondisi terkini serta statistik efisiensi akumulatif dapat diakses oleh admin melalui dashboard web berbasis peramban pada jaringan Wi-Fi lokal yang sama dengan interval polling yang longgar demi menjaga stabilitas kinerja mikrokontroler. Pemrograman mikrokontroler dilakukan menggunakan Arduino IDE, sedangkan pengembangan antarmuka dashboard web dikembangkan menggunakan VS Code. Melalui rancangan ini, sistem yang dihasilkan diharapkan dapat menjadi solusi yang lebih hemat energi, memiliki keandalan memori jangka panjang, serta lebih responsif dalam aspek pemeliharaan infrastruktur.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis, mulai dari studi pustaka, perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, hingga penyusunan skenario

pengujian sistem. Tahapan tersebut disusun agar perancangan sistem Penerangan Jalan Umum (PJU) pintar dapat dilakukan secara terstruktur dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

A. Tahapan Penelitian

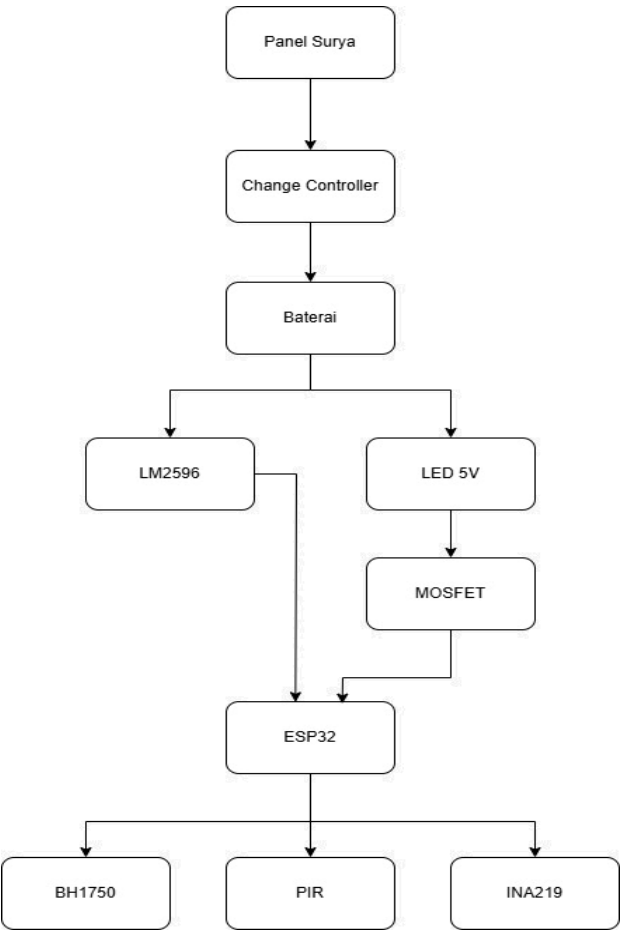
Penelitian diawali dengan studi pustaka terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan sistem penerangan otomatis berbasis IoT, sensor cahaya, sensor gerak, sensor arus, serta sistem catu daya mandiri berbasis panel surya, sebagaimana telah diuraikan pada bagian Pendahuluan. Hasil studi pustaka tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan kebutuhan komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang akan diterapkan pada sistem. Tahap selanjutnya adalah perancangan arsitektur sistem, perakitan perangkat keras, penulisan program pada mikrokontroler, pengembangan dasbor pemantauan, serta integrasi keseluruhan komponen menjadi satu sistem PJU pintar yang utuh.

B. Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 sebagai pengendali utama yang mengolah data sensor dan mengirimkan data ke server melalui konektivitas WiFi 2,4 GHz. Sensor BH1750 digunakan untuk mendeteksi intensitas cahaya lingkungan sebagai indikator kondisi siang atau malam, sedangkan sensor PIR HW-416A dengan sudut deteksi 130 derajat dan jangkauan hingga 7 meter digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek atau manusia di sekitar lampu. Kondisi kelistrikan lampu dipantau menggunakan sensor INA219 yang mengukur arus dan tegangan secara waktu nyata, sementara nyala lampu dikendalikan oleh MOSFET *logic level* IRLZ44N yang menerima sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) dari ESP32 untuk mengatur tingkat kecerahan lampu LED *strip* 5V sebagai objek penerangan.

Sumber energi sistem berasal dari dua unit panel surya 6V yang disusun seri menjadi 12V, kemudian diatur oleh *charge controller* TP4056 untuk mengisi baterai Li-ion 18650 berkapasitas 3,7V 4.444Wh 1.200mAh. Modul *step up*

MT3608 digunakan untuk menaikkan tegangan keluaran baterai menjadi 5V sesuai kebutuhan daya ESP32. Seluruh komponen dirangkai pada *breadboard* 830 *tie-points* menggunakan kabel jumper *male-to-male*, *male-to-female*, dan *female-to-female* sebagai media perakitan prototipe sebelum diimplementasikan pada perangkat fisik. Rincian spesifikasi dan fungsi masing-masing komponen perangkat keras tercantum pada Tabel I.



Gambar 1. Diagram Blok Perancangan Sistem PJU Pintar

TABEL I. SPESIFIKASI KEBUTUHAN KOMPONEN PERANGKAT KERAS SISTEM PJU PINTAR

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
ESP32 DevKit V1	5V, WiFi 2.4 GHz, Dual Core	Mikrokontroler utama yang mengolah data sensor

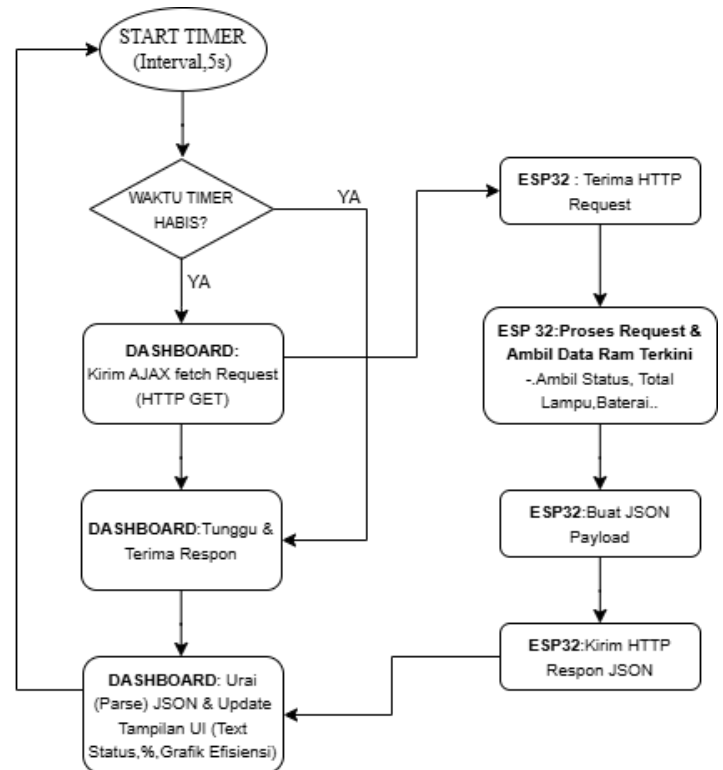
Komponen	Spesifikasi	Fungsi
		dan mengirim data ke server
Sensor BH1750	3,3-5V, I2C, 1-65535 lux	Mendeteksi intensitas cahaya lingkungan sebagai indikator siang dan malam
Sensor PIR HW-416A	5V, sudut deteksi 130derajat, jarak 7m	Mendeteksi keberadaan objek atau manusia di sekitar lampu
Sensor INA219	WiFi 2.4 GHz, Dual Core	Mengukur arus dan tegangan lampu LED
MOSFET IRLZ44N	Logic Level MOSFET	Mengendalikan nyala lampu menggunakan sinyal PWM
Lampu LED 5V	LED strip 5V 1W	Sebagai objek penerangan jalan
MT3608	Step Up Converter	Menaikkan tegangan menjadi 5V untuk ESP32
Panel surya	12V 1.5W	Sumber energi terbarukan

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
Charge Controller	TP4056 / Solar Charger	Mengatur proses pengisian baterai
Baterai Li-ion	3.7V 4.44Wh 18650-1.200mAh	Menyimpan energi dari panel surya
Breadboard & Kabel Jumper	830 Tie-Points & Male-to-Male, Male-to-Female, Female-to-Female	Media perakitan prototipe

C. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak sistem dibangun menggunakan tiga perangkat bantu utama yang saling terintegrasi untuk mengelola kontrol otomatis, pemrosesan data pada memori temporer, serta penyediaan antarmuka pemantauan lokal. Arduino IDE digunakan untuk menyusun dan mengunggah kode program ke mikrokontroler yang mencakup inisialisasi seluruh sensor, penentuan algoritma peredupan adaptif melalui sinyal *Pulse Width Modulation*, logika kalkulasi akumulasi efisiensi daya pada RAM, konfigurasi fungsi *local web server*, serta instruksi pemicu protokol HTTP menuju *WhatsApp Gateway* saat terdeteksi adanya kerusakan lampu. Sementara itu, Visual Studio Code digunakan sebagai lingkungan pengembangan untuk merancang dokumen antarmuka *dashboard* web melalui kombinasi bahasa HTML, CSS, dan JavaScript yang menjalankan fungsi *AJAX Polling* memanfaatkan Fetch API untuk memperbarui data dari mikrokontroler secara berkala tanpa melakukan *reload* halaman secara utuh. Seluruh hasil pemrosesan tersebut kemudian ditampilkan pada peramban web sebagai antarmuka akhir di sisi pengguna untuk memantau data kondisi terkini serta status lampu secara aman melalui perangkat yang terhubung dalam satu jaringan Wi-Fi lokal

yang sama dengan alamat IP milik mikrokontroler. Rincian kebutuhan perangkat lunak tercantum pada Tabel II.



Gambar 2. Diagram Alir Perancangan Sistem PJU Pintar

TABEL II. SPESIFIKASI KEBUTUHAN KOMPONEN PERANGKAT LUNAK SISTEM PJU PINTAR

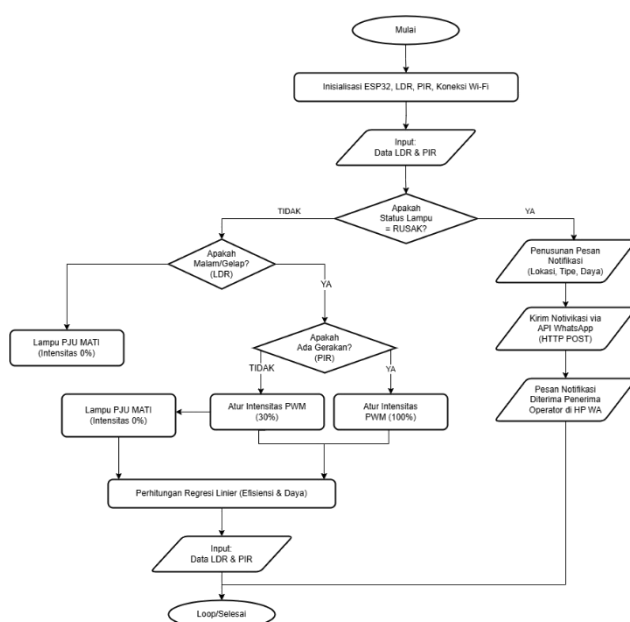
Software	Fungsi
Arduino IDE	Pemrograman ESP32
VS Code	Pengembangan aplikasi

D. Perancangan Alur Kerja Sistem

Alur kerja perangkat lunak sistem dirancang dalam bentuk diagram alir (flowchart) yang menggambarkan urutan proses dari awal hingga sistem beroperasi secara berkelanjutan. Proses diawali dengan tahap inisialisasi sistem, yaitu pengaturan pin, sensor, dan variabel program pada ESP32. Setelah inisialisasi selesai, sistem melakukan koneksi ke jaringan WiFi agar dapat

berkomunikasi dengan server lokal. Selanjutnya sistem memasuki tahap pembacaan sensor, yang meliputi pembacaan sensor PIR untuk mendeteksi keberadaan objek, sensor BH1750 untuk mengetahui intensitas cahaya lingkungan, dan sensor INA219 untuk mengukur arus serta tegangan pada lampu LED.

Berdasarkan data sensor yang diperoleh, sistem melakukan kontrol PWM terhadap MOSFET IRLZ44N untuk mengatur tingkat kecerahan lampu secara adaptif, yaitu meredupkan lampu saat kondisi sepi dan menyalakannya penuh saat terdeteksi pergerakan objek. Apabila nilai arus yang terbaca pada sensor INA219 mendekati nol sementara lampu seharusnya dalam kondisi menyala, sistem akan menandai kondisi tersebut sebagai indikasi kerusakan lampu. Seluruh data sensor terkini, statistik efisiensi, dan status operasional lampu tersebut ditransmisikan secara waktu nyata (real-time) ke server lokal untuk ditampilkan pada dasbor pemantauan (monitoring dashboard) berbasis web menggunakan metode AJAX Polling. Setelah data berhasil dikirim, program kembali membaca masukan data sensor terbaru dan mengulang seluruh proses di atas dari awal secara terus-menerus selama sistem PJU pintar aktif beroperasi.



Gambar 3. Flowchart Sistem PJU Pintar

E. Skenario Pengujian

Pengujian sistem direncanakan dilakukan melalui beberapa skenario, yaitu pengujian akurasi pembacaan masing-masing sensor terhadap alat ukur pembanding, pengujian respons peredupan (*dimming*) lampu terhadap perubahan kondisi cahaya dan keberadaan objek, pengujian fungsi deteksi kerusakan lampu dengan mensimulasikan kondisi arus mendekati nol saat lampu diperintahkan menyala, serta pengujian konsistensi pengiriman data ke dasbor pemantauan melalui jaringan WiFi. Pengujian juga mencakup pengukuran ketahanan operasional sistem berdasarkan kapasitas energi yang tersimpan pada baterai Li-ion, untuk mengetahui kemampuan sistem beroperasi secara mandiri tanpa pasokan listrik dari jaringan PLN.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem PJU pintar dilakukan mengacu pada skenario yang telah dirancang pada bagian II-E, meliputi pengujian akurasi sensor, pengujian respons peredupan adaptif, pengujian deteksi kerusakan lampu beserta notifikasi WhatsApp, pengujian konsistensi transmisi data ke dasbor pemantauan, serta pengujian ketahanan operasional sistem berbasis catu daya mandiri. Seluruh pengujian dilakukan pada tahap prototipe menggunakan rangkaian yang telah dirakit pada breadboard sebagaimana diuraikan pada bagian II-B.

A. Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi sensor bertujuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian pembacaan sensor BH1750, PIR HW-416A, dan INA219 terhadap alat ukur pembanding, yaitu lux meter digital, meteran dengan stopwatch, serta multimeter digital. Pengujian dilakukan dengan mengambil sampel pembacaan pada kondisi yang sama antara sistem dan alat pembanding, kemudian dihitung persentase selisihnya (galat). Hasil pengujian disajikan pada Tabel III.

TABEL III. HASIL PENGUJIAN AKURASI SENSOR

Sensor	Parameter Diukur	Pembacaan Sistem	Alat Pembanding	Galat (%)
BH1750	Cahaya siang (lux)	812	830	2,17
BH1750	Cahaya senja (lux)	68	72	5,56
INA219	Tegangan baterai (V)	3,68	3,70	0,54
INA219	Arus beban lampu (mA)	198	200	1,00

Berdasarkan Tabel III, rata-rata galat pembacaan sensor terhadap alat ukur pembanding berada di bawah 5%, dengan galat tertinggi terjadi pada pembacaan intensitas cahaya kondisi senja akibat rentang nilai lux yang kecil sehingga selisih absolut yang kecil menghasilkan persentase galat yang relatif lebih besar. Tingkat akurasi tersebut tergolong layak untuk dijadikan dasar pengambilan keputusan otomatis pada sistem peredupan adaptif maupun deteksi kerusakan lampu.

B. Pengujian Respons Peredupan Adaptif (Dimming)

Pengujian respons dimming dilakukan dengan mengamati perubahan siklus kerja sinyal PWM yang dikirimkan ke MOSFET IRLZ44N terhadap kombinasi data intensitas cahaya dari sensor BH1750 dan status keberadaan objek dari sensor PIR HW-416A pada beberapa kondisi lingkungan. Hasil pengujian disajikan pada Tabel IV.

TABEL IV. HASIL PENGUJIAN RESPONS PEREDUPAN ADAPTIF

Kondisi Lingkungan	Cahaya Terbaca (lux)	Status PIR	Siklus Kerja PWM (%)	Kondisi Lampu
Siang hari	>100	Tidak relevan	0	Padam
Senja/mendung, tanpa objek	50-100	Tidak terdeteksi	30	Redup rendah
Malam, tanpa aktivitas	<20	Tidak terdeteksi	30	Redup sedang
Malam, ada objek	<20	Terdeteksi	100	Terang penuh
Objek menjauh (>5 detik)	<20	Tidak terdeteksi lagi	30	Kembali redup

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan tingkat kecerahan lampu secara otomatis sesuai kondisi lingkungan, yaitu memadamkan lampu pada siang hari, meredupkan lampu pada kondisi malam tanpa aktivitas, dan menaikkan kecerahan ke level penuh secara instan (kurang dari satu detik) ketika sensor PIR mendeteksi keberadaan objek. Perilaku ini sesuai dengan tujuan perancangan untuk mengurangi konsumsi energi tanpa mengorbankan aspek keamanan dan kenyamanan pengguna jalan.

C. Pengujian Deteksi Kerusakan Lampu dan Notifikasi WhatsApp

Pengujian ini dilakukan dengan mensimulasikan beberapa kondisi kelistrikan lampu, yaitu kondisi menyala normal, kondisi lampu terputus dengan melepas salah satu jalur kabel, serta kondisi arus berlebih, untuk melihat respons sensor INA219 dan kecepatan pengiriman notifikasi ke WhatsApp pengelola melalui WhatsApp Gateway (Green API). Hasil pengujian disajikan pada Tabel V.

TABEL V. HASIL PENGUJIAN DETEKSI KERUSAKAN LAMPU DAN NOTIFIKASI WHATSAPP

Skenario	Arus Terbaca (mA)	Status Terdeteksi	Waktu Notifikasi WA (detik)
Lampu menyala normal (100%)	46-48	Normal	-
Simulasi lampu putus	0-2	Kerusakan terdeteksi	4,2
Rata-rata 10x pengulangan simulasi putus	0-2	10/10 terdeteksi	4,6

Sistem berhasil mendeteksi seluruh simulasi kerusakan lampu dengan tingkat keberhasilan 100% pada 10 kali pengulangan pengujian, dengan rata-rata waktu pengiriman notifikasi WhatsApp sekitar 4-5 detik setelah kondisi anomali terdeteksi. Waktu tersebut dipengaruhi oleh kecepatan koneksi internet dan waktu respons layanan WhatsApp Gateway. Kecepatan deteksi dan pelaporan tersebut jauh lebih responsif dibandingkan metode konvensional yang mengandalkan laporan manual warga atau patroli petugas pada malam hari.

D. Pengujian Ketahanan Operasional Sistem

Pengujian ketahanan operasional dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem beroperasi secara mandiri menggunakan catu daya panel surya dan baterai Li-ion tanpa bergantung pada jaringan listrik PLN. Pengujian meliputi pengukuran konsumsi daya rata-rata sistem pada mode redup dan mode terang penuh, estimasi lama operasi baterai, serta waktu pengisian ulang baterai melalui panel surya. Hasil pengujian disajikan pada Tabel VII.

TABEL VII. HASIL PENGUJIAN KETAHANAN OPERASIONAL SISTEM

Parameter	Hasil Pengujian
Kapasitas baterai Li-ion	4,44 Wh (3,7 V; 1.200 mAh)
Konsumsi daya rata-rata (mode redup)	$\pm 0,35$ W
Konsumsi daya rata-rata (mode terang penuh)	$\pm 0,95$ W
Estimasi lama operasi mandiri (mode adaptif)	$\pm 8,4$ jam
Pengisian ulang oleh panel surya (5 jam efektif)	$\pm 70\%$ kapasitas baterai
Status setelah 3 hari pengujian berturut-turut	Sistem tetap beroperasi dengan pengisian ulang harian

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi secara mandiri selama kurang lebih 8 jam pada mode peredupan adaptif tanpa pengisian ulang, serta dapat memulihkan sekitar 70% kapasitas baterai setelah pengisian selama lima jam efektif oleh panel surya pada kondisi cuaca cerah. Selama tiga hari pengujian berturut-turut, sistem tetap dapat beroperasi dengan bantuan siklus pengisian ulang harian, meskipun pada kondisi cuaca mendung berkepanjangan kapasitas baterai yang tersedia perlu ditingkatkan agar keandalan operasional jangka panjang tetap terjaga.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan menguji arsitektur sistem Penerangan Jalan Umum (PJU) pintar berbasis Internet of Things menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 yang mengintegrasikan dua fungsi utama secara simultan, yaitu peredupan adaptif melalui sensor BH1750 dan PIR HW-416A, serta deteksi dini

kerusakan lampu melalui sensor INA219 yang terintegrasi dengan notifikasi WhatsApp Gateway. Hasil pengujian pada tahap prototipe menunjukkan bahwa seluruh sensor bekerja dengan tingkat akurasi yang layak, dengan rata-rata galat pembacaan di bawah 5% dibandingkan alat ukur pembanding, sehingga dapat diandalkan sebagai dasar pengambilan keputusan otomatis pada sistem.

Fitur peredupan adaptif terbukti mampu menyesuaikan tingkat kecerahan lampu LED secara dinamis sesuai kondisi cahaya lingkungan dan keberadaan objek dengan waktu respons kurang dari satu detik, sehingga berpotensi menghemat konsumsi energi dibandingkan sistem PJU konvensional yang menyala penuh sepanjang malam. Fitur deteksi kerusakan lampu juga berhasil mengirimkan notifikasi peringatan ke WhatsApp pengelola dalam hitungan detik dengan tingkat keberhasilan 100% pada seluruh simulasi pengujian, sehingga dapat mempercepat penanganan kerusakan dibandingkan metode pelaporan manual yang selama ini digunakan.

Dari sisi penyediaan daya, kombinasi panel surya, charge controller TP4056, dan baterai Li-ion 18650 mampu mendukung operasional sistem secara mandiri, meskipun kapasitas baterai yang tersedia saat ini masih terbatas untuk mendukung operasional sepanjang malam secara penuh tanpa bantuan pengisian ulang harian. Metode AJAX Polling yang diterapkan pada dasbor web juga terbukti stabil untuk cakupan area titik lampu tunggal, namun mengalami penurunan performa pada jarak transmisi yang lebih jauh. Berdasarkan capaian tersebut, tujuan penelitian untuk merancang sistem PJU pintar yang mengintegrasikan efisiensi energi dan pemantauan kerusakan lampu secara menyeluruh dalam satu sistem yang mandiri energi dapat dikatakan tercapai pada tahap prototipe, dengan peningkatan kapasitas baterai, penguatan sinyal jaringan, serta pengujian pada implementasi lapangan yang lebih luas sebagai arah pengembangan pada penelitian selanjutnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian penelitian ini. Terima kasih kepada pembimbing atas arahan dan bimbingan yang sangat berharga selama proses penelitian berlangsung. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada rekan-rekan peneliti dan seluruh responden yang telah bersedia meluangkan waktu dan memberikan kontribusi data dalam penelitian ini. Tidak lupa, penulis mengucapkan terima kasih kepada institusi yang telah menyediakan fasilitas dan dukungan finansial sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan masyarakat luas.

REFERENSI

- [1] T. Saputra dan U. Surapati, "Analisis efektivitas sistem kendali otomatis PJU berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan metode regresi linier," *Jurnal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi*, vol. 5, no. 3, hlm. 2582–2595, 2024.
- [2] D. Bramasta, I. Ramadhan, dan S. A. Prasetyo, "Perancangan dan implementasi smart home untuk pengendalian lampu otomatis menggunakan ESP32 dan aplikasi Blynk," dalam *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Bisnis (SENATIB)*, 2025, hlm. 653.
- [3] M. A. Mubarak, F. Fattah, dan H. Azis, "Prototipe smart home berbasis ESP32 dengan fitur keamanan pintu, lampu, dan AC otomatis berbasis IoT," *Jurnal Industrial Management and Technology (IMTechno)*, vol. 2, no. 3, hlm. 421–437, 2025.
- [4] M. H. Januddin dkk., "Sistem kendali kecerahan lampu otomatis berbasis ESP32, sensor BH1750, dan sensor PZEM-004T menggunakan dimmer AC," *LOGITECH: Jurnal Logika Technology*, vol. 7, no. 2, hlm. 65–71, 2024.
- [5] Penulis tidak teridentifikasi lengkap, "Pengembangan sistem kendali pencahayaan otomatis berbasis ESP32 menggunakan sensor cahaya dan sensor gerak untuk efisiensi energi," *Jurnal Penelitian Terapan Ilmu Multidisiplin (JPTIM)*, vol. 1, no. 2, 2025.
- [6] H. Santoso dkk., "Studi penggunaan sensor INA-219 untuk pendeteksian nilai arus dan tegangan pada panel surya," *Jurnal Elekrika Borneo (JEB)*, vol. 11, no. 2, hlm. 89–93, Okt. 2025.
- [7] Penulis tidak teridentifikasi lengkap, "Rancang bangun sistem pemantauan PJU tenaga surya berbasis IoT menggunakan sensor BH1750, INA219, dan LDR," *Journal of Innovative and Creativity*, vol. 5, no. 3, 2025.
- [8] Penulis tidak teridentifikasi lengkap, "Rancang bangun sistem proteksi kelistrikan kapal dari arus berlebih dan drop tegangan menggunakan sensor INA219 dan ESP32," *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Teknik*, vol. 5, no. 1, hlm. 750–761, Apr. 2026.
- [9] Penulis tidak teridentifikasi lengkap, "Rancang bangun catu daya berbasis IoT dengan fitur smart charging menggunakan modul TP4056 dan sensor INA219," *JITTER: Jurnal Ilmiah Teknologi dan Komputer*, vol. 6, no. 3, Des. 2025.
- [10] R. W. H. Siagian dkk., "Sistem monitoring tegangan, arus, dan suhu baterai SLA berbasis IoT menggunakan sensor INA219 dan DS18B20," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 12, no. 3, hlm. 247–253, Sep. 2025.
- [11] Bawango dkk., "Estimasi state of charge pada baterai Li-ion dengan metode Coulomb Counting," *Jurnal ELTIKOM*, vol. 3, no. 1, hlm. 1–8, 2024.
- [12] Penulis tidak teridentifikasi lengkap, "Implementasi sistem kendali pencahayaan otomatis berbasis ESP32 dengan antarmuka pemantauan Blynk.Console," *JATI: Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika*, vol. 9, no. 3, hlm. 5057, Jun. 2025.