

RANCANG BANGUN PROTOTYPE SISTEM PENERANGAN JALAN DESA BERBASIS PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) DENGAN MONITORING ENERGI MENGGUNAKAN *INTERNET OF THINGS* (IoT)

Deka Rois Mutaqin, Agus Ulinuha

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Minimnya fasilitas penerangan di kawasan perdesaan yang disebabkan oleh mahal biaya pemasangan dan operasional sistem kelistrikan konvensional mendorong kebutuhan akan sumber energi alternatif yang berkelanjutan dan berwawasan lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe sistem lampu jalan perdesaan yang memanfaatkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan dilengkapi fitur pemantauan energi berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem menggunakan panel surya 50 WP sebagai sumber energi utama, baterai 12V/25Ah sebagai media penyimpanan energi, *Solar Charge Controller* (SCC), dan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali sekaligus pengirim data ke platform *Blynk* melalui jaringan Wifi. Besaran listrik meliputi tegangan, arus, dan daya diawasi secara *real-time* menggunakan sensor ACS712, sementara sensor BH1750 berfungsi mengendalikan nyala-mati lampu LED DC secara mandiri berdasarkan kondisi kecerahan lingkungan sekitar. Proses kalibrasi menghasilkan rata-rata deviasi sensor tegangan sebesar 1,67%, sensor arus PV sebesar 2,99%, dan sensor arus lampu sebesar 2,37%, ketiganya tidak melampaui batas toleransi 5%. Evaluasi kinerja sistem memperlihatkan akumulasi daya panel surya pada rentang siang hari (08.00–18.00 WIB) mencapai 212,06 W, sedangkan konsumsi daya lampu sepanjang malam (18.00–06.00 WIB) tercatat 199,23 W, dengan kelebihan energi 12,69 W dan efisiensi pemenuhan kebutuhan beban sebesar 94,02%. Platform pemantauan IoT berbasis *Blynk* dan ESP32 mampu menampilkan informasi parameter kelistrikan secara *real-time* serta menjalankan kontrol lampu secara otomatis sesuai tingkat pencahayaan di sekitarnya. Temuan penelitian ini mengonfirmasi bahwa sistem PLTS yang telah dirancang sanggup mencukupi kebutuhan energi lampu jalan perdesaan secara swadaya dalam satu siklus penuh siang hingga malam, dan berpotensi menjadi solusi penerangan jalan yang efisien, ramah lingkungan, serta dapat dipantau dari jarak jauh.

Kata Kunci: plts, panel surya, iot, *blynk*, esp32, monitoring energi, penerangan jalan desa, acs712, bh1750

Abstract

The limited street lighting in rural areas due to high installation and operational costs of conventional electricity has driven the need for an independent and environmentally friendly alternative energy solution. This study aims to design and build a prototype of a village street lighting system based on a Solar Power Plant (PLTS) equipped with an Internet of Things (IoT)-based energy monitoring system. The system utilizes a 50 WP solar panel as the primary energy source, a 12V/25Ah battery as energy storage, a Solar Charge Controller (SCC), and an ESP32 microcontroller as the central controller and data transmitter to the Blynk platform via Wifi. Electrical parameters such as voltage, current, and power are monitored in real-time using ACS712 sensors, while a BH1750 sensor is used to automatically control the DC LED lamp based on ambient light intensity. Calibration results show an average error of 0.40% for the voltage sensor; 2.99% for the PV current sensor; and 2.37% for the lamp current sensor, all within the 5% tolerance limit. System performance testing shows that the solar panel generated a total power of 212.06 W during the daytime period (08:00–18:00 WIB), while the lamp consumed a total

of 199.37 W during nighttime operation (18:00–06:00 WIB), resulting in an energy surplus of 12.69 W with a load fulfillment efficiency of 94.02%. The IoT monitoring system based on Blynk and ESP32 successfully displayed real-time electrical parameter data and automatically controlled the lamp according to ambient lighting conditions. The results demonstrate that the designed PLTS system is capable of independently meeting the energy needs of village street lamps over a complete day-night cycle and can serve as an energy-efficient, sustainable, and remotely monitorable street lighting solution.

Keywords: solar power plant, solar panel, iot, blynk, esp32, energy monitoring, village street lighting, acs712, bh1750

1. PENDAHULUAN

Lampu penerangan di jalan-jalan pedesaan merupakan infrastruktur publik yang memegang peran krusial dalam menjamin keselamatan, kenyamanan warga, serta keberlangsungan aktivitas pada malam hari. Sayangnya, sebagian kawasan desa masih menghadapi kendala minimnya fasilitas penerangan akibat tingginya biaya konstruksi dan pemeliharaan sistem listrik konvensional. Di sisi lain, ketergantungan pada energi berbasis fosil menghasilkan dampak buruk bagi kelestarian lingkungan, sehingga dibutuhkan pendekatan alternatif yang lebih hemat dan bersih. Salah satu pilihan yang dinilai tepat adalah pengaplikasian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai *catu daya* bagi sistem pencahayaan jalan. Letak geografis Indonesia di kawasan tropis memberikan potensi sinar matahari yang melimpah, menjadikan teknologi energi surya sangat layak dikembangkan di wilayah pedesaan. Pemanfaatan PLTS untuk pencahayaan jalan umum diyakini dapat menurunkan konsumsi listrik dari jaringan PLN dan sekaligus mendorong transisi menuju energi terbarukan yang berkelanjutan (Oktavia and Amperawan 2024).

Kemajuan di bidang teknologi telah membuka peluang bagi terwujudnya sistem pencahayaan jalan yang lebih canggih dan efisien dengan memanfaatkan *Internet of Things* (IoT). Teknologi IoT memberi kemampuan pemantauan dan pengendalian sistem secara *real-time* melalui koneksi internet. Berkat sistem pemantauan berbasis IoT, pengguna dapat mengakses informasi tegangan panel surya, arus pengisian baterai, kapasitas baterai, dan kondisi lampu dari jarak jauh menggunakan *smartphone* (Hidayati et al. 2023). Kendala dalam pengelolaan dan pengawasan kondisi sistem PLTS masih kerap muncul akibat belum tersedianya sarana pemantauan yang dapat diakses secara *real-time*, akibatnya proses perawatan instalasi kelistrikan berjalan kurang efektif dan kerusakan berpotensi terjadi karena penanganan yang terlambat (Kamil, Umam, and Makruf 2024).

Studi-studi terdahulu mengungkapkan bahwa kombinasi mikrokontroler ESP32 dengan aplikasi *Blynk* terbukti efektif sebagai platform pemantauan sistem pencahayaan jalan berbasis IoT karena mampu menyajikan data pemantauan secara *real-time* serta memudahkan pengguna dalam mengawasi performa sistem (Reziqna and Yuwono 2025). Lebih lanjut, kajian mengenai prototipe sistem pencahayaan jalan bertenaga surya memperlihatkan bahwa panel surya mampu menekan

ketergantungan terhadap sumber listrik konvensional sekaligus berdampak lebih baik bagi lingkungan (Rohman et al. 2023). Penggunaan sensor seperti ACS712 pada sistem pemantauan PLTS berbasis IoT turut memungkinkan pengukuran besaran listrik—tegangan, arus, daya, dan energi—secara presisi maupun *real-time*, sehingga operasional sistem lampu jalan menjadi lebih efisien dan lebih mudah diawasi (Kamil et al. 2024). Penelitian lainnya yang mengkaji sistem kendali otomatis PJU berbasis IoT dengan ESP32 turut membuktikan bahwa pemilihan sensor dan algoritma kontrol yang sesuai dapat meningkatkan efisiensi konsumsi energi karena lampu mampu beroperasi secara mandiri mengikuti perubahan kondisi sekitar (Saputra and Surapati 2024).

Bertolak dari permasalahan di atas, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan realisasi prototipe sistem penerangan jalan perdesaan berbasis PLTS yang terintegrasi dengan teknologi IoT guna pemantauan energi jarak jauh. Komponen utama sistem mencakup panel surya 50 WP sebagai sumber daya primer, baterai 12V/25Ah sebagai penyimpan energi, dan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali pusat sekaligus pengelola komunikasi data. Pemantauan energi memanfaatkan sensor ACS712 untuk membaca parameter kelistrikan dan sensor BH1750 untuk mengatur intensitas cahaya lampu secara otomatis. Data hasil pemantauan dikirimkan ke platform *Blynk* via koneksi internet sehingga dapat diakses secara *real-time* menggunakan *smartphone*. Serangkaian uji coba dilaksanakan di Desa Singopuran dan Sma Trensains Sragen guna mengevaluasi efisiensi pengisian daya PLTS, keandalan sistem pemantauan, dan kapabilitas sistem dalam menjalankan lampu penerangan secara otomatis. Luaran penelitian ini diharapkan mampu menjadi referensi solusi penerangan jalan perdesaan yang efisien energi, otonom, mudah dipantau, dan mendukung kemajuan teknologi *smart lighting* berbasis IoT di Indonesia.

2. METODE

2.1 Tahapan Penelitian

Prosedur penelitian disusun secara terstruktur agar sistem yang dibangun dapat beroperasi dengan optimal. Rangkaian prosedur tersebut mencakup kajian pustaka, perancangan sistem, perakitan komponen perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, penyatuan seluruh subsistem, serta pengujian dan penilaian kinerja perangkat secara menyeluruh.

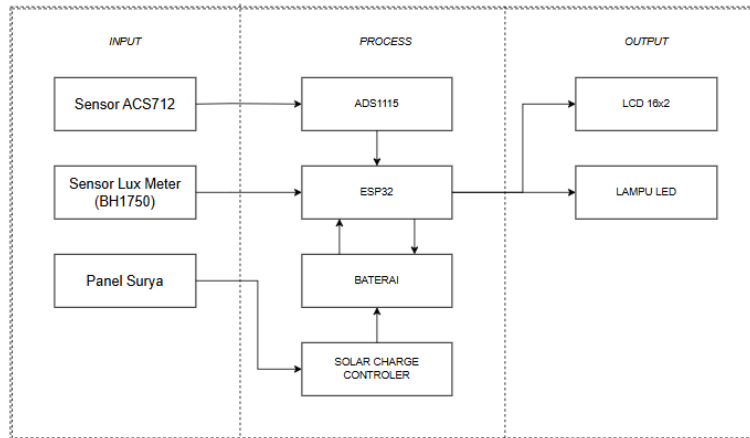


Gambar 1. *Flowchart* tahapan penelitian

Gambar 1. *Flowchart* tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah dan studi literatur untuk menentukan kebutuhan sistem yang akan dibuat. Selanjutnya dilakukan perancangan sistem, persiapan alat dan komponen, serta perakitan dan pemrograman esp32. Setelah itu dilakukan integrasi sensor BH1750 dan ACS712, kemudian sistem diuji dan dilakukan pengambilan data. Data hasil pengujian dianalisis untuk memperoleh kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.

2.2 Perancangan Sistem.

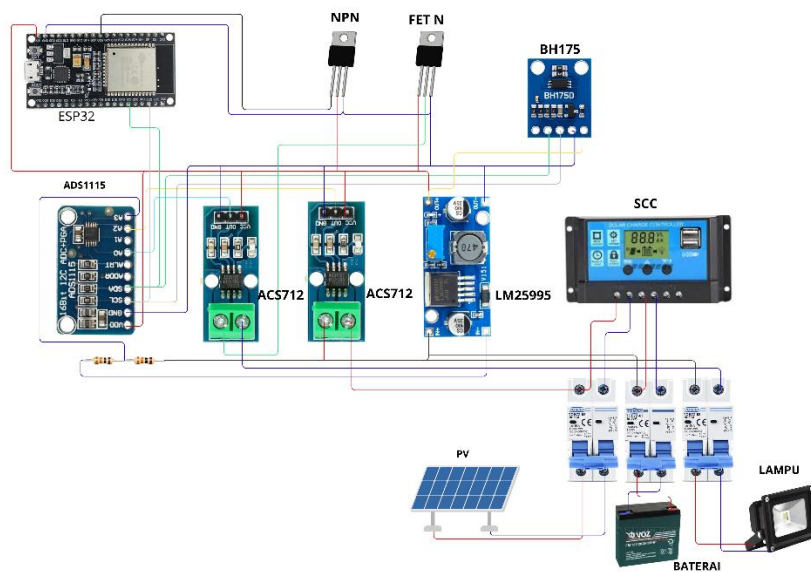
Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode rancang bangun dan pengujian. Pelaksanaannya dilakukan dengan membangun prototipe sistem lampu jalan perdesaan yang bersumber dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) disertai fitur pemantauan daya menggunakan *Internet of Things* (IoT). Sistem dibangun dengan menempatkan panel surya sebagai sumber energi primer, baterai sebagai tempat penyimpanan daya, dan mikrokontroler esp32 sebagai inti pengendalian sistem. Pemantauan energi menggunakan sensor ACS712 untuk mengukur besaran arus, tegangan, daya, dan energi. Selain itu, ditambahkan sensor cahaya BH1750 *Light Intensity Sensor Module* guna mengindera kuat cahaya lingkungan sehingga nyala-mati lampu dapat dikendalikan secara otomatis. Seluruh data pemantauan diteruskan ke platform *Blynk* melalui jaringan internet agar dapat dipantau secara *real-time* menggunakan *smartphone*.



Gambar 2. Diagram Blok Alat

2.3 Perancangan Hardware

Desain perangkat keras pada sistem *Smart Light Controller* berbasis PLTS ini diarahkan pada keterpaduan antara komponen pembangkit energi, sensor, dan unit pemantauan yang dapat bekerja bersama-sama dalam mengelola aliran energi sekaligus mengawasi kondisi sistem secara *real-time*, rincian interkoneksi antar komponen dan susunan jalur kabel diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema pengkabelan alat

Tabel 1. Spesifikasi Alat

No	Komponen	Jumlah	Spesifikasi
1	ESP32	1	5V DC
2	Sensor ACS712	2	5.5V DC
3	ADS1115	1	5V DC
4	Lampu LED DC	1	20 W

5	Panel Surya	1	50 WP
6	SCC	1	30 A
7	Baterai	1	12V/25Ah
8	Step Down LM2595	1	4V-40V DC
9	Transistor NPN	1	0,6-0,7 V
10	Mosfet N Channel	1	-
11	Resistor	2	R1(100000) R2(33000)
12	MCB	3	6A
13	Sensor BH1750	1	-

Inti pengendalian sistem memanfaatkan mikrokontroler esp32 yang dipilih berdasarkan kemampuan komputasinya yang andal dan ketersediaan modul komunikasi *Wifi* bawaan yang menunjang pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) (Wenno et al. 2025). Esp32 berperan sebagai pusat pemrosesan data sensor, pengatur operasional lampu, sekaligus pengirim data ke platform pemantauan *Blynk*.

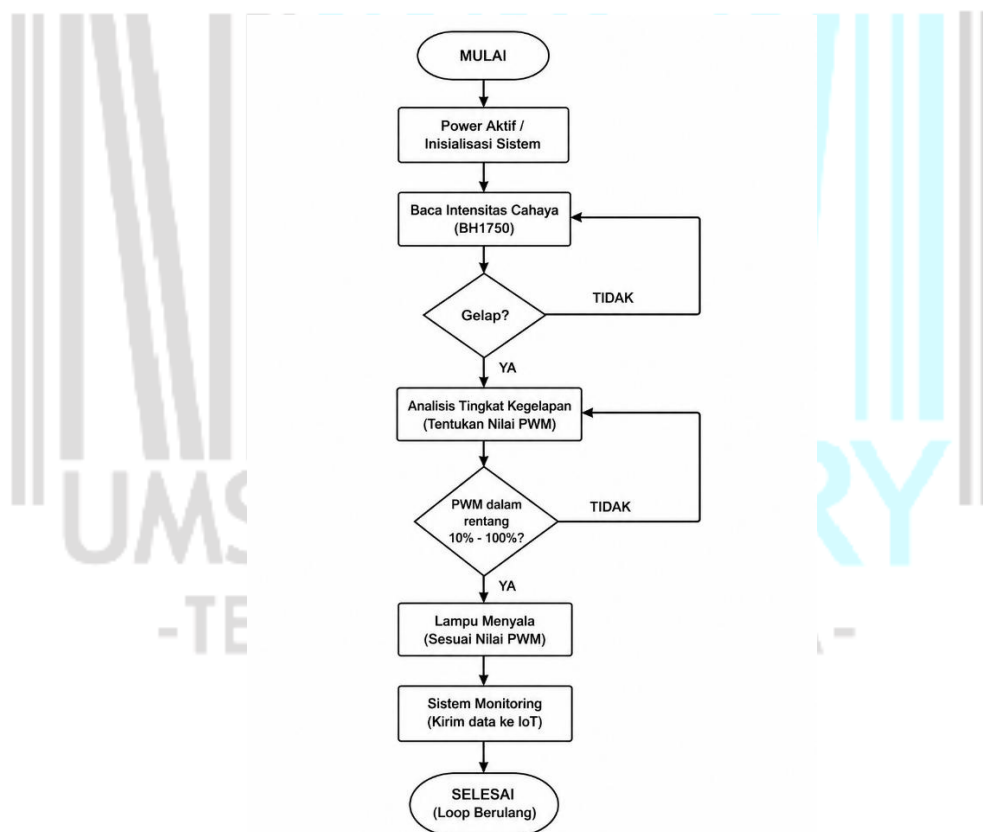
Pada sisi pengumpulan data, sistem dilengkapi sensor lux meter guna mengukur tingkat pencahayaan lingkungan dalam satuan lux sebagai acuan kendali otomatis lampu jalan, mengingat sensor ini telah terbukti memiliki akurasi tinggi dalam berbagai penerapan kendali pencahayaan berbasis ESP32 (Rahma et al. 2025). Selain itu, sejumlah sensor ACS712 yang dipasang pada jalur pengisian panel surya, baterai, dan beban lampu untuk memantau arus pengisian maupun arus konsumsi beban secara *real-time*, sebagaimana pemakaiannya juga telah divalidasi keakuratannya terhadap alat ukur standar pada penelitian terdahulu (Satya et al. 2020). Pasokan energi primer bersumber dari panel surya yang mengonversi radiasi matahari menjadi listrik DC. Energi yang diproduksi kemudian diregulasi oleh *Solar Charge Controller* (SCC) dalam mengatur proses pengisian baterai sekaligus menjaga baterai agar terhindar dari kondisi *overcharge* maupun *over-discharge*. Cadangan energi yang tersimpan di dalam baterai 12V kemudian disalurkan untuk mengoperasikan lampu LED DC pada malam hari atau saat tingkat kecerahan lingkungan berada di bawah nilai ambang yang ditetapkan.

Guna mencukupi kebutuhan tegangan operasional sistem kontrol, dimanfaatkan modul DC-DC *Step Down* yang bertugas menurunkan dan menstabilkan tegangan baterai ke level kerja yang sesuai bagi ESP32 dan sensor. Keseluruhan rangkaian mengadopsi skema *common ground* demi memperoleh pembacaan sensor yang lebih konsisten dan menekan gangguan yang disebabkan perbedaan potensial antarperangkat. Melalui koneksi *Wifi*, ESP32 mentransmisikan hasil pengukuran

berupa nilai intensitas cahaya, arus pengisian, arus baterai, arus lampu, dan tegangan baterai ke *platform Blynk* secara *real-time*. Data tersebut selanjutnya dapat diakses pengguna melalui *smartphone*, sehingga status sistem penerangan jalan berbasis PLTS dapat dipantau dari jarak jauh dengan lebih praktis dan efisien.

2.4 Perancangan Software

Perancangan software menjelaskan alur kerja sistem penerangan jalan berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang dilengkapi dengan pengaturan tingkat kecerahan lampu secara otomatis dan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Proses diawali pada tahap Mulai, yang menandakan sistem mulai dijalankan. Selanjutnya sistem memasuki tahap Power Aktif, yaitu kondisi ketika seluruh perangkat keras seperti ESP32, sensor intensitas cahaya BH1750, sensor ACS712, serta rangkaian lampu LED memperoleh suplai daya sehingga siap beroperasi.



Gambar 4. Flowchart sistem kerja alat

Flowchart pada Gambar 3. Menjelaskan alur kerja sistem penerangan jalan berbasis PLTS dengan pengaturan tingkat kecerahan lampu secara otomatis. Proses diawali dengan Power Aktif, kemudian sistem membaca intensitas cahaya lingkungan menggunakan sensor BH1750. Nilai yang diperoleh digunakan untuk menentukan apakah kondisi lingkungan sudah gelap atau masih terang. Jika masih terang, sistem akan terus melakukan pembacaan sensor. Sebaliknya, jika kondisi gelap terdeteksi, sistem menganalisis tingkat kegelapan untuk menentukan nilai PWM dalam rentang 10%–

100% sebagai pengatur kecerahan lampu. Setelah nilai PWM sesuai, lampu LED menyala dengan tingkat pencahayaan yang menyesuaikan kondisi lingkungan. Selanjutnya, ESP32 mengirimkan data monitoring, seperti intensitas cahaya, tegangan, arus, daya, dan status lampu ke platform IoT sehingga sistem dapat dipantau secara *real-time*. Proses ini berlangsung secara berulang selama sistem beroperasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Hardware

Pemasangan perangkat keras dilaksanakan langsung di area terbuka yang mendapatkan paparan sinar matahari yang memadai. Pada fase ini, sistem hasil rancangan sebelumnya dipasang dan diverifikasi secara lapangan guna menilai performa nyata perangkat. Pengujian bertujuan mengamati kemampuan sistem PLTS dalam mengisi baterai lewat panel surya, memverifikasi bahwa *Solar Charge Controller* (SCC) mampu mengelola proses pengisian dengan tepat, dan memastikan lampu LED DC bekerja secara mandiri berdasarkan data sensor BH1750. Di samping itu, dilakukan juga verifikasi terhadap sistem pemantauan IoT menggunakan ESP32 dan platform *Blynk* guna memastikan data parameter kelistrikan berhasil dikirimkan dan ditampilkan secara langsung melalui *smartphone*.



Gambar 5a. Implementasi Sistem *Hardware* Rangkaian Elektrikal



Gambar 5b. Implementasi Sistem *Hardware* Tampak Keseluruhan



Gambar 5c. Implementasi di kawasan lingkungan SMA Trensains Sragen

Gambar 5a menyajikan detail susunan elektrik di dalam panel box yang mencakup Solar Charge Controller (SCC) sebagai pengatur pengisian baterai, tiga MCB (*Miniature Circuit Breaker*) sebagai proteksi arus lebih pada jalur PV, baterai, dan beban lampu, serta bus bar terminal sebagai titik distribusi daya. Sisi kanan panel box dilengkapi PCB yang memuat ESP32 selaku mikrokontroler utama, modul sensor ACS712 untuk akuisisi data arus, modul *step-down* DC-DC guna menyediakan tegangan operasional, serta LCD 16x2 yang menampilkan informasi tegangan baterai dan arus secara lokal. LCD memperlihatkan kondisi awal tegangan baterai 13,1V dengan arus 0,00A sebelum sistem beroperasi secara penuh.

Gambar 5b menampilkan kondisi menyeluruh prototipe sistem penerangan jalan desa berbasis PLTS setelah terpasang di area pengujian. Panel surya 50 WP dipasang pada rangka baja dengan sudut inklinasi yang disesuaikan guna mengoptimalkan penyerapan radiasi matahari. Di bagian bawah panel surya dipasang lampu LED DC *flood light* yang diposisikan menghadap area yang memerlukan pencahayaan. Baterai 12V/25Ah diletakkan di bagian bawah tiang, berdekatan dengan *panel box* yang memuat keseluruhan rangkaian elektrik. Konstruksi demikian memudahkan proses instalasi, pemeliharaan, dan pengujian sistem secara keseluruhan.

Gambar 5c menunjukkan hasil implementasi sistem penerangan jalan desa berbasis PLTS yang telah dipasang dan diuji pada malam hari di lingkungan SMA Trensains Sragen. Lampu LED DC *flood light* yang memperoleh suplai energi dari baterai mampu memberikan pencahayaan yang optimal pada area sekitar papan informasi sekolah sehingga tulisan dan objek di sekitarnya dapat terlihat dengan jelas pada kondisi minim pencahayaan. Pemasangan sistem di lokasi tersebut bertujuan untuk mengevaluasi kinerja prototipe pada kondisi operasional sebenarnya, meliputi kemampuan sistem dalam menyuplai energi listrik dari baterai ke beban lampu selama malam hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem PLTS mampu bekerja secara stabil dan memberikan

pencahayaannya yang memadai, sehingga berpotensi menjadi solusi penerangan luar ruang yang mandiri, hemat energi, dan ramah lingkungan untuk diterapkan pada fasilitas umum maupun lingkungan pendidikan seperti SMA Trensains Sragen.

3.2 Hasil Akurasi Sensor

Sebelum sistem dijalankan untuk keperluan pengambilan data, seluruh sensor terlebih dahulu menjalani hasil pengujian sensor. Hasil pengujian sensor dilakukan dengan membandingkan nilai pembacaan sensor terhadap alat ukur standar berupa multimeter digital dan clamp meter. Tujuan utama kalibrasi adalah untuk mengetahui tingkat akurasi sensor serta besarnya error yang terjadi agar data yang diperoleh dapat diandalkan. Menggunakan regresi linear (metode kuadrat terkecil / *least squares*), metode paling tepat untuk kalibrasi sensor terhadap alat ukur standar, karena setiap parameter punya pasangan data sensor vs. alat referensi yang jumlahnya cukup untuk mencari hubungan linear $Y = a \cdot X + b$. Nilai persentase error dihitung menggunakan Persamaan (1), yaitu dengan membandingkan hasil pembacaan sensor ACS712 terhadap clamp meter sebagai alat ukur pembanding.

$$\%Error = \left(\frac{A_{ACS712} - A_{Clamp\ Meter}}{A_{Clamp\ Meter}} \right) \times 100 \% \quad (1)$$

Keterangan :

- A_{ACS712} : Arus yang terbaca oleh sensor ACS712 (A)
- $A_{Clamp\ Meter}$: Arus yang terbaca oleh clamp meter (A)

Tabel 2. Hasil Akurasi Tegangan Baterai Sebelum Kalibrasi

No	Sensor (V)	Multimeter (V)	Selisih (V)	Error (%)	Kalibrasi(A)	Error Kalibrasi(%)
1	13,1	12,87	0,26	1,76	12,88	0,11
2	13,13	12,9	0,23	1,75	12,91	0,10
3	13,2	13	0,2	1,52	12,98	0,15
4	12,9	12,7	0,2	1,55	12,69	0,06
Rata-Rata	13,14	12,92	0,23	1,67	12,87	0,11

Mengacu pada Tabel 2, kalibrasi sensor tegangan baterai menghasilkan rata-rata penyimpangan 0,23 V dibandingkan multimeter digital, dengan rata-rata persentase error sebesar 1,67%. Nilai penyimpangan yang sangat rendah tersebut membuktikan bahwa sensor tegangan yang dipakai memiliki akurasi yang baik dan memenuhi syarat untuk digunakan dalam pengukuran tegangan baterai pada sistem PLTS.

Tabel 3. Hasil Akurasi Sensor Arus PV (ACS712) Sebelum Kalibrasi

No	Sensor (A)	Clamp Meter (A)	Selisih (A)	Error (%)	Kalibrasi (A)	Error Kalibrasi (%)
1	0,63	0,61	0,02	3,28	0,61	0,20
2	1,06	1,03	0,03	2,91	1,03	0,06
3	1,47	1,43	0,04	2,80	1,43	0,13
4	2,08	2,02	0,06	2,97	2,02	0,06
Rata-Rata	1,31	1,27	0,038	2,99	1,27	0,11

Tabel 3 menyajikan hasil kalibrasi sensor arus PV (ACS712) yang diverifikasi menggunakan clamp meter. Rata-rata penyimpangan arus terukur sebesar 0,038 A dengan persentase deviasi rata-rata 2,99%. Meskipun deviasi sensor arus PV lebih besar dibandingkan sensor tegangan, nilainya masih dalam batas yang dapat diterima untuk keperluan sistem pemantauan energi berbasis IoT. Penyebab utama selisih ini adalah keterbatasan resolusi ADC internal ACS712 serta pengaruh *noise* pada jalur sinyal analog.

Tabel 4. Hasil Akurasi Sensor Arus Lampu (ACS712) Sebelum Kalibrasi

No	Sensor (A)	Clamp Meter (A)	Selisih (A)	Error (%)	Kalibrasi (A)	Error Kalibrasi (%)
1	1,31	1,28	0,03	2,34	1,28	0,06
2	1,30	1,27	0,03	2,36	1,27	0,06
3	1,29	1,26	0,03	2,38	1,26	0,06
Rata-Rata	1,30	1,27	0,030	2,37	1,27	0,06

Kalibrasi sensor arus lampu pada Tabel 4 memperlihatkan pola yang seragam dengan penyimpangan tetap sebesar 0,03 A pada tiap titik ukur dan rata-rata deviasi sebesar 2,37%. Keseragaman penyimpangan ini menandakan adanya offset sistematis pada sensor yang dapat dikoreksi melalui faktor kalibrasi dalam perangkat lunak. Secara keseluruhan, ketiga sensor yang digunakan menunjukkan tingkat deviasi di bawah 3%, sehingga dinyatakan memenuhi syarat untuk proses pengambilan data penelitian.

Tabel 5. Hasil Akurasi Sensor Lux (BH1750) Sebelum Kalibrasi

Waktu	Lux sensor	Lux meter	Selisih (lux)	Error (%)
08.00	33876	33871	5	0,01
10.00	40187	40181	6	0,01
14.00	15722	15719	3	0,02
18.00	5	3	2	0,6

21.00	3	1	2	0,2
-------	---	---	---	-----

Berdasarkan Tabel 5. Hasil Kalibrasi Sensor Lux (BH1750), dapat disimpulkan bahwa sensor BH1750 memiliki tingkat akurasi yang sangat baik pada kondisi intensitas cahaya sedang hingga tinggi. Pada pengukuran pukul 08.00, 10.00, dan 14.00, selisih antara hasil pembacaan sensor dan lux meter hanya berkisar 3–6 lux dengan nilai error sebesar 0,01–0,02%, sehingga hasil pengukuran sensor hampir identik dengan alat ukur acuan.

Setelah dilakukan proses kalibrasi, nilai pembacaan sensor pada kondisi tersebut berhasil disesuaikan sehingga error kalibrasi menjadi 0,00%, menunjukkan bahwa metode kalibrasi yang diterapkan mampu menghilangkan selisih pengukuran pada intensitas cahaya tinggi.

Namun, pada kondisi cahaya sangat rendah, yaitu pukul 18.00 dan 21.00, tingkat kesalahan relatif meningkat. Meskipun selisih absolut hanya 2 lux, nilai error kalibrasi mencapai 30,66% dan 92,01%. Hal ini terjadi karena nilai intensitas cahaya yang diukur sangat kecil (1–5 lux), sehingga perbedaan beberapa satuan lux saja menghasilkan persentase error yang besar. Kondisi ini merupakan karakteristik umum pada pengukuran dengan intensitas cahaya yang sangat rendah. Persamaan Metode Regresi Linear / *Least Squares* menggunakan :

$$a = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{\sum Y - a \sum X}{n} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4)$$

Keterangan :

- a = gradien (slope)
- n = jumlah data
- $\sum XY$ = jumlah hasil perkalian setiap pasangan data X dan Y
- $\sum x^2$ = jumlah kuadrat nilai X
- B = intersep (konstanta)
- $\bar{X}$ = rata-rata nilai sensor
- $\bar{Y}$ = rata-rata nilai alat ukur konvensional
- R^2 = Koefisien determinasi
- Y_i = nilai referensi
- $\hat{Y}_i$ = hasil prediksi regresi

- $\bar{Y}_l$ = rata-rata data referensi

Tabel 6. Ringkasan Kalibrasi (Metode Regresi Linear / *Least Squares*)

Parameter	Persamaan Kalibrasi ($Y = a \cdot X + b$)	R ²
Tegangan baterai (V)	$Y = 0,9607 \cdot X + 0,2986$	0,9824
Arus PV (A)	$Y = 0,9725 \cdot X - 0,0014$	1,0000
Arus lampu (A)	$Y = 1 \cdot X - 0,03$	1,0000
Nilai lux	$Y = 0,9999 \cdot X - 1,0795$	1,0000

Berdasarkan Tabel 6. Ringkasan Kalibrasi (Metode Regresi Linear / *Least Squares*), dapat disimpulkan bahwa metode regresi linear yang diterapkan mampu meningkatkan akurasi seluruh sensor yang digunakan pada sistem monitoring PLTS. Hal ini ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R²) yang sangat tinggi, yaitu 0,9824 untuk sensor tegangan baterai dan 1,0000 untuk sensor arus PV, arus lampu, serta sensor intensitas cahaya (BH1750). Nilai tersebut menunjukkan adanya hubungan linier yang sangat kuat antara hasil pembacaan sensor dengan alat ukur acuan, sehingga persamaan kalibrasi yang diperoleh memiliki tingkat keandalan yang sangat baik.

Selain itu, proses kalibrasi berhasil menurunkan rata-rata kesalahan pengukuran secara signifikan pada seluruh parameter. Error rata-rata tegangan baterai berkurang dari 1,67% menjadi 0,11%, arus PV dari 2,99% menjadi 0,11%, arus lampu dari 2,37% menjadi 0,11%, dan nilai lux dari 0,02% menjadi 0,00%. Penurunan error tersebut menunjukkan bahwa persamaan kalibrasi yang diperoleh efektif dalam mengoreksi penyimpangan hasil pembacaan sensor.

Secara keseluruhan, hasil kalibrasi membuktikan bahwa metode Least Squares sangat efektif untuk meningkatkan akurasi sistem monitoring PLTS berbasis IoT. Dengan nilai R² yang mendekati 1 serta error rata-rata setelah kalibrasi yang sangat kecil (0,00–0,11%), sistem mampu menghasilkan data pengukuran yang lebih akurat dan mendekati nilai sebenarnya, sehingga layak digunakan sebagai dasar pemantauan dan analisis kinerja sistem PLTS.

3.3 Pengukuran Daya Panel Surya (PV)

Pengukuran output daya panel surya dilaksanakan sepanjang rentang siang hari dari pukul 08.00 hingga 18.00 WIB menggunakan sensor ACS712 yang dibandingkan dengan clamp meter sebagai alat ukur acuan. Variabel yang dicatat mencakup tegangan PV, arus PV, dan daya PV per jamnya. Kegiatan pengukuran ini berlangsung di Desa Singopuran dan Sma Trensains Sragen bertujuan memetakan profil produksi energi panel surya selama satu hari penuh.

Daya keluaran panel surya dihitung menggunakan :

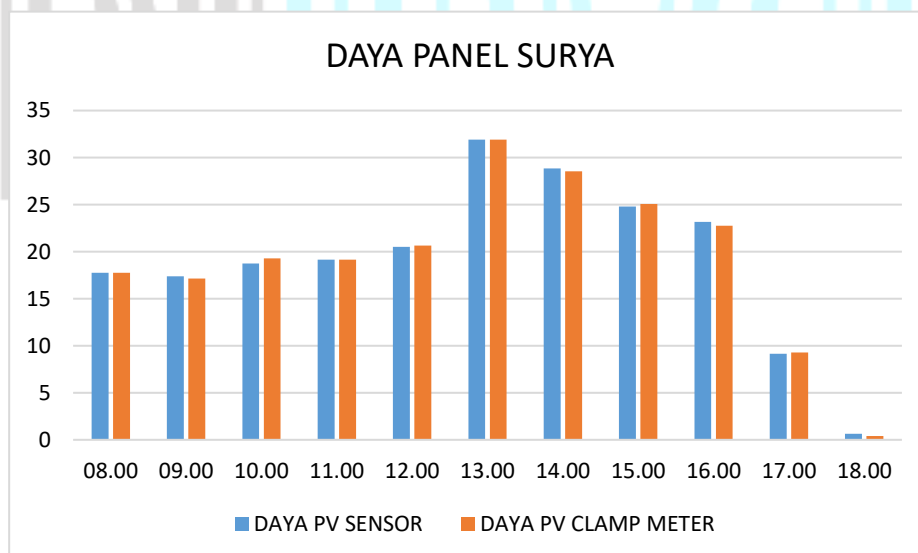
$$P = V \times I \quad (5)$$

Keterangan:

- P : Daya panel surya (W)
- V :Tegangan panel surya (V)
- I : Arus panel surya (A)

Tabel 7. Hasil Pengukuran Daya Panel Surya (PV)

Waktu	Intensitas		Sensor ACS712			Clamp Meter		
	Lux	Kecerahan Lampu (%)	V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)
08.00	33876	0	13,65	1,30	17,75	13,65	1,30	17,75
09.00	35943	0	13,38	1,30	17,39	13,38	1,28	17,13
10.00	40187	0	13,67	1,37	18,73	13,68	1,41	19,29
11.00	46745	0	13,68	1,40	19,15	13,67	1,40	19,14
12.00	54374	0	13,96	1,47	20,52	13,96	1,48	20,66
13.00	24221	0	14,18	2,25	31,91	14,18	2,25	31,91
14.00	15722	0	13,86	2,08	28,83	13,86	2,06	28,55
15.00	13525	0	13,78	1,80	24,80	13,78	1,82	25,08
16.00	9691	0	13,80	1,68	23,18	13,80	1,65	22,77
17.00	120	0	13,45	0,68	9,15	13,45	0,69	9,28
18.00	20	40	13,08	0,05	0,65	13,08	0,03	0,39
Total daya					212,06 W	Total daya		211,94 W



Gambar 5. Grafik perbandingan daya pv

Berdasarkan Tabel 7, puncak produksi daya panel surya tercapai pada pukul 13.00 WIB sebesar 31,91 W baik menurut sensor maupun clamp meter, Produksi daya terus menanjak sejak pukul 08.00

dan mulai menurun saat memasuki sore hari. Pada pukul 18.00 WIB, keluaran daya tersisa hanya 0,65 W karena intensitas matahari yang sudah sangat lemah sehingga panel tidak dapat memberikan pengisian yang berarti pada baterai.

Akumulasi daya yang terukur oleh sensor ACS712 mencapai 212,06 W, sementara clamp meter mencatat 211,94 W, dengan selisih hanya 0,12 W (0,057%). Kesesuaian antara kedua alat ukur tersebut memperkuat keyakinan bahwa sensor yang digunakan memiliki akurasi yang memadai untuk monitoring energi PLTS. Panel surya 50 WP yang digunakan mampu berproduksi maksimal pada kondisi iradiasi optimal, yaitu ketika sudut dari sinar matahari tegak lurus terhadap permukaan panel.

3.3.1 Perhitungan Peak Sun Hours (PSH)

Berdasarkan data yang ditampilkan di tabel 5. Hasil Pengukuran Daya Panel Surya (PV), nilai Peak Sun Hours (PSH) dapat diperkirakan dari Equivalent Full Sun Hours menggunakan energi yang dihasilkan panel.

Diketahui:

- Panel surya = 50 WP
- Total energi hasil pengukuran (ACS712) = 212,06 Wh

$$PSH = \frac{\text{Total Iradiasi Matahari Harian (Wh/m}^2\text{/hari)}}{\text{Daya Puncak Panel (WP)}} \quad (6)$$

$$PSH = \frac{212,06}{50} = 4,24 \text{ Jam}$$

Berdasarkan hasil pengukuran daya panel surya pada Tabel 6, keluaran daya panel meningkat seiring bertambahnya intensitas cahaya matahari. Daya maksimum tercatat pada pukul 13.00, yaitu 31,91 W, ketika panel menghasilkan arus sebesar 2,25 A dengan tegangan 14,18 V. Setelah waktu tersebut, daya keluaran mulai menurun mengikuti penurunan intensitas cahaya hingga mencapai 0,65 W pada pukul 18.00, saat kondisi lingkungan sudah mendekati gelap dan lampu mulai menyala (100%).

Perbandingan hasil pengukuran menggunakan sensor ACS712 dan Clamp Meter menunjukkan nilai yang sangat berdekatan. Total energi yang diperoleh selama periode pengukuran adalah 212,06 Wh (ACS712) dan 211,94 Wh (Clamp Meter), dengan selisih hanya 0,12 Wh atau sekitar 0,06%. Hal ini menunjukkan bahwa sensor ACS712 yang telah dikalibrasi memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dan mampu menghasilkan data yang hampir sama dengan alat ukur standar.

Berdasarkan total energi harian sebesar sekitar 212 Wh dari panel 50 WP, diperoleh Peak Sun Hours (PSH) sebesar 4,24 jam. Nilai ini menunjukkan bahwa selama satu pengujian, panel surya menerima energi matahari yang setara dengan 4,24 jam penyinaran penuh (1000 W/m²) dari jam 10.00 – 13.00 WIB. Nilai tersebut juga sesuai dengan karakteristik potensi energi surya di Indonesia, sehingga kinerja sistem PLTS yang dirancang dapat dikatakan berjalan dengan baik dan menghasilkan energi sesuai kondisi penyinaran yang tersedia.

3.4 Pengukuran Daya Beban Lampu

Pengukuran konsumsi daya lampu LED DC dilaksanakan selama periode malam hari mulai pukul 18.00 hingga 06.00 WIB. Lampu diaktifkan secara otomatis oleh sistem kendali berbasis sensor BH1750 ketika tingkat kecerahan lingkungan turun di bawah nilai ambang yang telah ditentukan. Data dikumpulkan setiap satu jam menggunakan sensor ACS712 dan diverifikasi dengan clamp meter.

Daya keluaran beban (Lampu LED) dihitung menggunakan :

$$P = V \times I \quad (7)$$

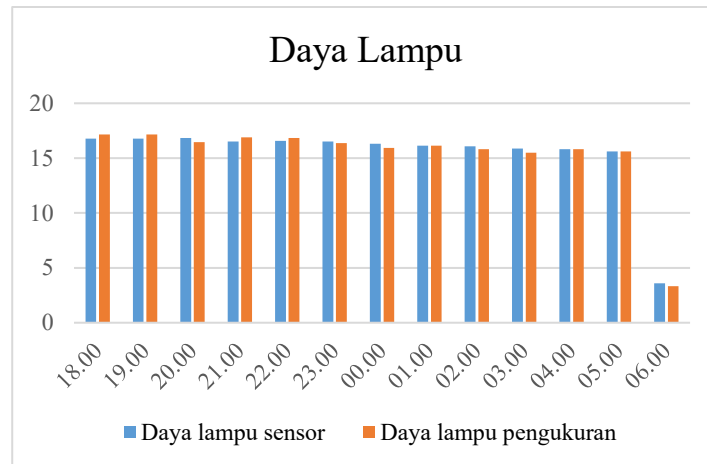
Keterangan:

- P : Daya beban (Lampu LED) (W)
- V : Tegangan beban (Lampu LED) (V)
- I : Arus beban (Lampu LED) (A)

Tabel 7. Hasil Pengukuran Daya Beban Lampu

Waktu	Lux	Intensitas Kecerahan Lampu (%)	Sensor ACS712			Clamp Meter		
			V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)
18.00	5	100	12,90	1,30	16,77	12,90	1,33	17,16
19.00	5	100	12,80	1,30	16,64	12,90	1,33	17,16
20.00	4	100	12,85	1,31	16,83	12,85	1,28	16,45
21.00	3	100	12,80	1,29	16,51	12,80	1,32	16,90
22.00	2	100	12,75	1,30	16,57	12,75	1,32	16,83
23.00	1	100	12,70	1,30	16,51	12,70	1,29	16,38
00.00	1	100	12,65	1,29	16,32	12,65	1,26	15,94
01.00	1	100	12,60	1,28	16,13	12,60	1,28	16,13
02.00	1	100	12,55	1,28	16,06	12,55	1,26	15,81
03.00	1	100	12,50	1,27	15,88	12,50	1,24	15,50
04.00	10	80	12,45	1,27	15,81	12,45	1,27	15,81

Waktu	Intensitas		Sensor ACS712			Clamp Meter		
	Lux	Kecerahan Lampu (%)	V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)
05.00	80	20	12,40	1,26	15,62	12,40	1,26	15,62
06.00	150	0	12,35	0,29	3,58	12,35	0,27	3,33
Total Daya					199,23 W	Total Daya		199,02 W



Gambar 6. Grafik perbandingan daya lampu

Tabel 7 mengungkapkan bahwa pemakaian daya lampu berlangsung relatif stabil sepanjang malam dalam kisaran 15,62 W hingga 16,93 W. Pengecualian terjadi pada pukul 06.00 saat daya turun ke 3,58 W karena sistem secara otomatis mematikan lampu ketika intensitas cahaya matahari mulai meningkat. Total konsumsi daya lampu dalam satu malam penuh tercatat 199,23 W berdasarkan sensor dan 199,02 W berdasarkan clamp meter, dengan selisih 0,35 W atau sekitar 0,18%.

Penurunan tegangan baterai secara bertahap dari 12,90 V pada pukul 18.00 hingga 12,35 V pada pukul 06.00 WIB mencerminkan proses *discharge* yang berlangsung normal dan terkendali. Kondisi ini menandakan bahwa *Solar Charge Controller* (SCC) beroperasi dengan baik dalam menjaga baterai dari kondisi *over-discharge* dengan menjaga tegangan baterai tetap di atas ambang minimum yang aman.

3.5 Pengukuran Daya Baterai

Pemantauan daya baterai dilaksanakan selama 24 jam penuh untuk memetakan profil tegangan dan arus baterai sepanjang siklus pengisian (*charge*) dan pengosongan daya (*discharge*). Data sensor ACS712 dikomparasikan dengan hasil pengukuran multimeter sebagai instrumen referensi.

Daya keluaran baterai dihitung menggunakan :

$$P = V \times I \quad (8)$$

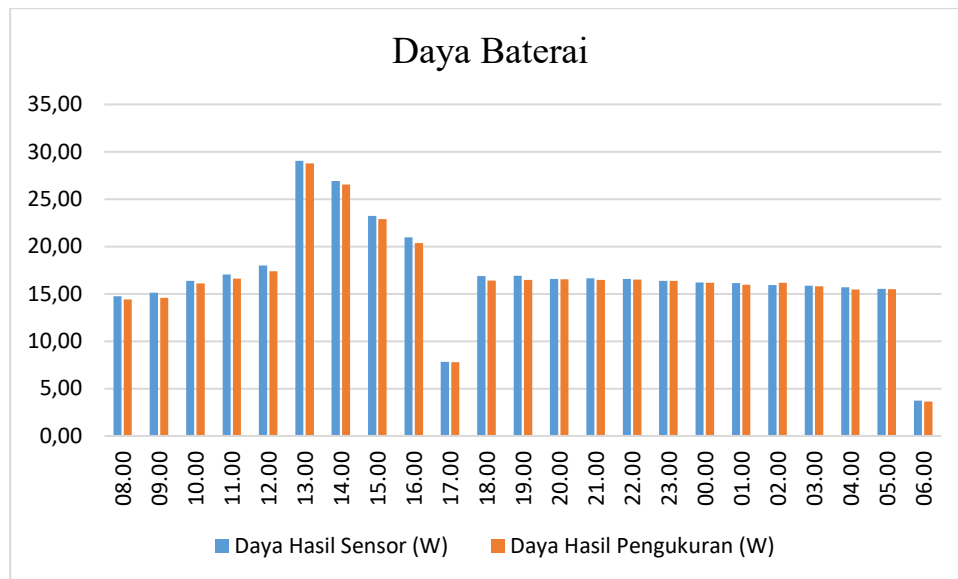
Keterangan:

- P : Daya baterai (W)

- V :Tegangan baterai (V)
- I : Arus baterai (A)

Tabel 8. Hasil Pengukuran Daya Baterai

Waktu	Lux	Intensitas Kecerahan Lampu (%)	Sensor ACS712			Clamp Meter		
			V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)
08.00	33876	0	12,10	1,22	14,76	11,90	1,21	14,40
09.00	35943	0	12,59	1,20	15,11	12,37	1,18	14,60
10.00	40187	0	12,90	1,27	16,38	12,69	1,27	16,12
11.00	46745	0	13,10	1,30	17,03	12,87	1,29	16,60
12.00	54374	0	13,13	1,37	17,99	12,88	1,35	17,39
13.00	24221	0	13,20	2,20	29,04	12,90	2,23	28,77
14.00	15722	0	13,13	2,05	26,92	12,94	2,05	26,53
15.00	13525	0	13,20	1,76	23,23	13,00	1,76	22,88
16.00	9691	0	13,11	1,60	20,98	12,88	1,58	20,35
17.00	100	10	13,05	0,60	7,83	12,78	0,61	7,80
18.00	5	100	12,98	1,30	16,87	12,72	1,29	16,41
19.00	5	100	12,92	1,31	16,93	12,68	1,30	16,48
20.00	4	100	12,86	1,29	16,59	12,63	1,31	16,55
21.00	3	100	12,80	1,30	16,64	12,58	1,31	16,48
22.00	2	100	12,75	1,30	16,58	12,51	1,32	16,51
23.00	1	100	12,70	1,29	16,38	12,49	1,31	16,36
00.00	1	100	12,65	1,28	16,19	12,44	1,30	16,17
01.00	1	100	12,60	1,28	16,13	12,38	1,29	15,97
02.00	1	100	12,55	1,27	15,94	12,43	1,30	16,16
03.00	1	100	12,50	1,27	15,88	12,33	1,28	15,78
04.00	10	80	12,45	1,26	15,69	12,26	1,26	15,45
05.00	80	20	12,42	1,25	15,53	12,19	1,27	15,48
06.00	150	0	12,40	0,30	3,72	12,15	0,30	3,65
			Total daya			388,32 W	Total daya	382,87



Gambar 7. Grafik perbandingan baterai

Tabel 8 memaparkan profil daya baterai sepanjang 24 jam. Pada interval siang (08.00–17.00 WIB), baterai menyerap energi dari panel surya dalam proses pengisian dengan rata-rata daya 19,28 W. Arus pengisian tertinggi tercatat pukul 13.00 WIB sebesar 2,20 A (sensor), yang selaras dengan puncak produksi panel surya. Mulai pukul 18.00 WIB, baterai beralih ke mode *discharge* guna menyuplai daya ke lampu, dengan rata-rata daya pengosongan sebesar 15,34 W.

Total daya baterai yang terakumulasi dalam 24 jam mencapai 388,32 W (sensor) dan 382,87 W (multimeter), dengan perbedaan 5,44 W atau sekitar 1,4%. Kecilnya perbedaan ini mengukuhkan ketelitian sistem sensor yang diterapkan.

3.6 Analisis Neraca Energi (*Charge vs Discharge*)

Keseimbangan energi sistem PLTS dievaluasi berdasarkan perbandingan antara total energi yang diproduksi panel surya (*charge*) dengan total energi yang diserap oleh beban lampu (*discharge*). Analisis ini dimaksudkan untuk menilai sejauh mana sistem mampu mencukupi kebutuhan energi lampu selama satu malam penuh.

Tabel 9. Perbandingan Energi *Charge* dan *Discharge*

Parameter	Nilai (Sensor ACS712)	Nilai (Alat Referensi)
Total Daya Charge (PV)	212,06 Wh	211,94 Wh
Total Daya Discharge (Lampu)	199,23 Wh	199,02 Wh
Rugi rugi daya	12,83 Wh	12,92 Wh
Efisiensi Pemenuhan Beban	94,0%	93,90%

Tabel 9 menunjukkan bahwa akumulasi energi panel surya selama siang hari (08.00–18.00 WIB) mencapai 212,06 W, sementara total konsumsi lampu pada malam hari (18.00–06.00 WIB) sebesar 199,23 W. Kelebihan energi atau bisa juga disebut rugi rugi daya dari komponen yang digunakan

sebesar 12,83 W (6,0% dari total pengisian) tersimpan di dalam baterai sebagai cadangan. Fakta ini menegaskan bahwa sistem PLTS yang dirancang mampu memenuhi kebutuhan energi lampu jalan perdesaan secara mandiri dalam satu siklus penuh siang-malam.

Tingkat efisiensi pemenuhan beban yang mencapai 94,02% memperlihatkan kinerja sistem yang sangat efektif. Surplus energi yang terkumpul dapat berfungsi sebagai *buffer* ketika terjadi kondisi mendung atau produksi panel surya di bawah nilai rata-rata. Rata-rata daya pengisian 19,28 yang melebihi rata-rata daya *discharge* sebesar 15,34 W memungkinkan sistem menjaga keseimbangan energi dengan baik bahkan dalam kondisi cuaca yang bervariasi secara normal.

3.7 Pengujian Sistem Monitoring IoT (*Blynk*)

Sistem pemantauan berbasis IoT memanfaatkan platform *Blynk* dengan mikrokontroler ESP32 sebagai perangkat pengirim data. Pengujian dilaksanakan untuk memverifikasi keandalan pengiriman data secara *real-time* dari sensor menuju *smartphone* via koneksi internet. Besaran yang divisualisasikan pada dasbor *Blynk* mencakup tegangan baterai, arus pengisian PV, arus beban lampu, serta kontrol manual ON/OFF berbasis *slider*, untuk Sistem ini bekerja melalui rangkaian proses dari sensor hingga *smartphone*. Mikrokontroler seperti ESP32 dipilih karena sudah memiliki modul *wifi* bawaan, sehingga bisa langsung terhubung ke internet tanpa perangkat tambahan. Untuk pembacaan tegangan baterai, karena nilainya (misalnya 12V) melebihi batas ADC mikrokontroler, digunakan rangkaian pembagi tegangan untuk menurunkannya ke level aman, lalu dikonversi kembali secara matematis ke nilai aslinya. Sementara arus pengisian PV dan arus beban lampu diukur menggunakan sensor arus seperti ACS712, yang dipasang terpisah pada masing-masing jalur karena titik pengukurannya berbeda.

Data dari sensor-sensor ini dikirim ke server *Blynk* secara berkala, biasanya tiap satu hingga dua detik, melalui virtual pin yang menjadi jalur komunikasi antara *firmware* dan *widget dashboard*. Sifatnya bukan *real-time* murni, melainkan pengiriman berinterval sangat singkat yang terlihat instan karena koneksinya menggunakan TCP/*websocket* persisten, sehingga data mengalir terus tanpa perlu membuka koneksi baru tiap kali kirim.

Untuk kontrol ON/OFF dan slider kecerahan, alurnya berbalik dari *smartphone* ke mikrokontroler. Perubahan nilai *slider* ditangkap lewat fungsi *callback*, diubah menjadi sinyal PWM, lalu diteruskan ke driver MOSFET untuk mengatur daya lampu, karena pin mikrokontroler tidak mampu menahan arus lampu secara langsung.

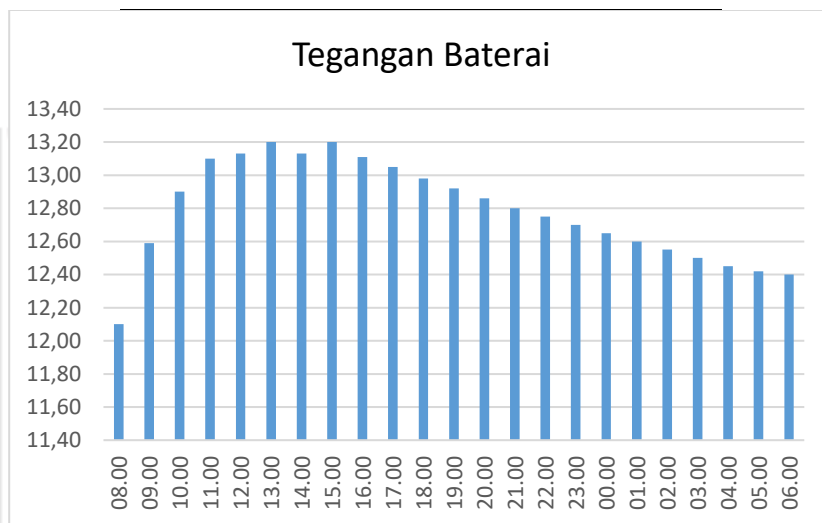
Hasil evaluasi memperlihatkan bahwa data berhasil dikirimkan secara *real-time* dengan latensi yang masih dalam batas wajar. Sistem kontrol otomatis lampu berbasis sensor BH1750 berfungsi sesuai rancangan: lampu menyala saat tingkat pencahayaan lingkungan berada di bawah ambang yang dikonfigurasi dan mati secara mandiri ketika cahaya matahari mulai muncul. Fitur pemantauan jarak

jauh melalui *smartphone* berjalan dengan baik, memungkinkan pengguna mengawasi kondisi sistem PLTS kapan saja dan dari mana saja tanpa harus hadir di lokasi secara fisik.

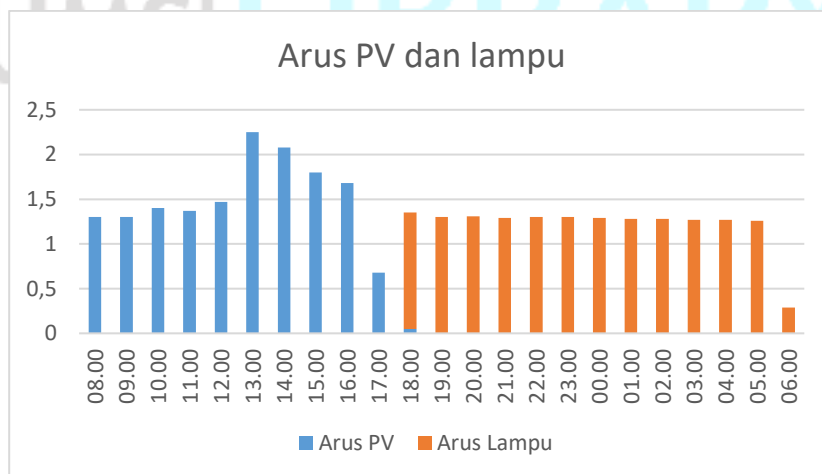
10. Tabel Pengujian Sistem Monitoring *Blynk*

Waktu	Monitoring Pengukuran		
	Tegangan Baterai	Arus PV	Arus Lampu
08.00	12,10	1,3	
09.00	12,59	1,3	
10.00	12,90	1,4	
11.00	13,10	1,37	
12.00	13,13	1,47	
13.00	13,20	2,25	
14.00	13,13	2,08	
15.00	13,20	1,8	
16.00	13,11	1,68	
17.00	13,05	0,68	
18.00	12,98	0,05	1,3
19.00	12,92		1,3
20.00	12,86		1,31
21.00	12,80		1,29
22.00	12,75		1,29
23.00	12,70		1,3
00.00	12,65		1,29
01.00	12,60		1,28
02.00	12,55		1,28

Monitoring Pengukuran			
Waktu	Tegangan Baterai	Arus PV	Arus Lampu
03.00	12,50		1,27
04.00	12,45		1,27
05.00	12,42		1,26
06.00	12,40		0,29



Gambar 8. Grafik monitoring tegangan di *blynk*



Gambar 9. Gambar monitoring arus di *blynk*

Berdasarkan hasil monitoring sistem melalui platform *Blynk* selama 22 jam (08.00–06.00) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8, 9 dan Tabel di atas, tegangan baterai menunjukkan pola pengisian dan pengosongan (*charge-discharge*) yang khas, yaitu meningkat dari 12,1 V pada pukul 08.00 hingga mencapai puncak 13,2 V pada pukul 13.00–15.00 seiring dengan proses pengisian oleh

panel PV yang arusnya juga memuncak pada 2,25 A pada pukul 13.00 akibat intensitas radiasi matahari maksimum, kemudian menurun secara bertahap dan konsisten hingga 12,4 V pada pukul 06.00 karena baterai tidak lagi menerima suplai dari PV (arus PV mendekati nol sejak pukul 18.00) sementara harus terus memasok energi untuk beban lampu yang menyala stabil pada kisaran 1,26–1,31 A sepanjang malam hingga akhirnya turun tajam menjadi 0,29 A pada pukul 06.00, kemungkinan akibat proses *dimming* otomatis atau proteksi tegangan rendah menjelang pagi; korelasi yang jelas antara kenaikan arus PV dengan peningkatan tegangan baterai di siang hari, serta antara pemakaian arus lampu dengan penurunan tegangan baterai di malam hari, mengonfirmasi bahwa sistem PLTS yang diuji bekerja sesuai prinsipnya dan mampu menjaga kestabilan suplai daya secara efisien selama siklus 24 jam.



Gambar 10. Sistem *blynk* di *smartphone*

3.8 Ringkasan Hasil Pengujian

Menyimpulkan seluruh hasil pengujian, dapat dikemukakan bahwa: (1) kalibrasi sensor menunjukkan rata-rata error di bawah 3% untuk semua sensor yang digunakan; (2) panel surya 50 WP menghasilkan akumulasi daya 212,06 W selama siang hari dengan puncak produksi pada pukul 13.00 WIB; (3) beban lampu LED DC menyerap total daya 199,23 W selama satu malam operasional; (4) terdapat kelebihan energi 12,69 W (6,0%) yang membuktikan kemandirian energi sistem; dan (5) platform pemantauan IoT berbasis *Blynk* dan ESP32 beroperasi secara andal dalam menyajikan data parameter kelistrikan secara *real-time*.

Totalitas hasil pengujian mengonfirmasi bahwa prototipe sistem penerangan jalan desa berbasis PLTS dengan pemantauan IoT yang dikembangkan dalam penelitian ini berhasil memenuhi seluruh target kinerja yang telah ditetapkan, dan berpotensi menjadi solusi pencahayaan jalan yang efisien, mandiri, dan mudah diawasi bagi kawasan perdesaan.

4. PENUTUP

Berdasarkan keseluruhan proses perancangan, realisasi, dan evaluasi yang telah dilaksanakan, prototipe sistem penerangan jalan perdesaan berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang dilengkapi pemantauan energi via Internet of Things (IoT) terbukti beroperasi sesuai dengan fungsi yang direncanakan. Proses kalibrasi memperlihatkan bahwa seluruh sensor yang digunakan—sensor tegangan baterai, sensor arus PV, dan sensor arus lampu—memiliki rata-rata deviasi di bawah 3%, sehingga dinyatakan layak untuk keperluan pengambilan data penelitian.

Evaluasi performa sistem memperlihatkan bahwa panel surya 50 WP sanggup menghasilkan akumulasi daya 212,06 W selama siang hari (08.00–18.00 WIB) dengan puncak produksi pada pukul 13.00 WIB, sedangkan beban lampu LED DC menyerap total daya 199,23 W sepanjang malam (18.00–06.00 WIB). Selisih antara energi yang diproduksi dan dikonsumsi menghasilkan kelebihan energi 12,69 W dengan efisiensi pemenuhan beban 94,02%, yang membuktikan bahwa sistem PLTS ini mampu mencukupi kebutuhan energi lampu jalan perdesaan secara mandiri dalam satu siklus penuh siang–malam. Sistem pemantauan berbasis *Blynk* dan ESP32 pun berhasil memvisualisasikan data parameter kelistrikan secara *real-time* serta mengendalikan lampu secara mandiri berdasarkan pembacaan sensor BH1750 dengan tingkat keandalan yang tinggi.

Kajian ini membuktikan bahwa sinergi antara PLTS dan sistem pemantauan berbasis IoT mampu menjadi solusi penerangan jalan perdesaan yang hemat energi, otonom, dan mudah diawasi. Untuk pengembangan ke depannya, sistem dapat ditingkatkan melalui penambahan kapasitas panel surya dan baterai agar dapat melayani lebih banyak titik lampu, penerapan algoritma prediksi kondisi cuaca untuk mengoptimalkan proses pengisian baterai, penambahan proteksi otomatis terhadap risiko pengisian berlebih maupun pengosongan berlebih, serta integrasi data pemantauan ke platform cloud sehingga dapat diakses dan dianalisis secara lebih luas oleh pengelola sistem penerangan jalan desa.

PERSANTUNAN

Segala puji syukur penulis haturkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia kesehatan, dan waktu yang diberikan sehingga penelitian dan penyusunan naskah publikasi ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis berharap karya ini dapat memberi kontribusi nyata dan menjadi amal yang bermanfaat. Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan selama proses penelitian berlangsung, di antaranya:

1. Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian serta penyusunan naskah publikasi ini.
2. Kedua orang tua tercinta yang selalu memberikan doa, dukungan moral, dan material tanpa henti, serta menjadi motivasi utama penulis dalam menyelesaikan studi.

3. Bapak Dr. Agus Ulinuha, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan masukan yang sangat berarti selama proses penelitian dan penyusunan tugas akhir.
4. Keluarga dan saudara yang senantiasa memberikan semangat dan dukungan selama penulis menempuh perkuliahan.
5. Teman-teman Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta angkatan 2022 yang telah kebersamai dan membantu penulis selama proses perkuliahan hingga penyelesaian tugas akhir.
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung selama proses penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Hidayati, Q., Jamal, N., Yanti, N., & Tri Prasetyo, Y. (2023). Sistem monitoring dan kontrol penerangan jalan umum tenaga surya berbasis Internet of Things. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, 3(1), 19–26. <https://doi.org/10.35313/jitel.v3.i1.2023.19-26>
- Kamil, M. I., Umam, B. A., & Makruf, M. (2024). Rancang bangun sistem monitoring pemakaian arus dengan aplikasi Blynk (Studi kasus: Pengguna jalan umum). *Jurnal SISKOM-KB (Sistem Komputer dan Kecerdasan Buatan)*, 8(1), 28–33. <https://doi.org/10.47970/siskom-kb.v8i1.660>
- Oktavia, B., & Amperawan. (2024). Perancangan sistem kerja penerangan jalan umum menggunakan tenaga solar cell berbasis Internet of Things. *Jurnal Teliska*, 17(3), 50–57.
- Rahma, D. M., Hidayah, P. N., Yoanda, A. P., Ayu, J., Margareta, R., Shaleh, K., Assaidah, & Arsyad, F. S. (2025). Aplikasi sensor cahaya (BH1750) pada tanaman anggrek menggunakan ESP32 berbasis IoT. *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, 13(1), 10–18. <https://doi.org/10.34010/telekontran.v13i1.14476>
- Reziqna, A. R., & Yuwono, T. (2025). Perancangan sistem penerangan jalan umum tenaga surya menggunakan timer RTC berbasis ESP32 di Jalan Kampung Sarirejo. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 9(3), 31875–31882. <https://doi.org/10.31004/jptam.v9i3.32495>
- Rohman, M. F., Pambudi, W. S., Wati, T., & Prabowo, Y. A. (2023). Prototipe dan monitoring penerangan jalan umum (PJU) menggunakan tenaga surya. *BEES: Bulletin of Electrical and Electronics Engineering*, 4(2), 72–82. <https://doi.org/10.47065/bees.v4i2.4284>

- Saputra, T., & Surapati, U. (2024). Analisis efektivitas sistem kendali otomatis PJU berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan metode regresi linier. *Jurnal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi*, 5(3), 2582–2595.
- Satya, T. P., Puspasari, F., Prisyanti, H., & Meilani Saragih, E. R. (2020). Perancangan dan analisis sistem alat ukur arus listrik menggunakan sensor ACS712 berbasis Arduino Uno dengan standard clampmeter. *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer*, 11(1), 39–44. <https://doi.org/10.24176/simet.v11i1.3548>
- Wenno, L. A., Waworuntu, B. J., Rumokoy, S. N., Kaunang, H. G., & Dodie, S. B. (2025). Konsep pemanfaatan teknologi IoT berbasis ESP32 untuk sakelar cerdas pada sistem PLTS rakit rumah apung. *Jurnal Elektrik*, 4(2), 1–9. <https://doi.org/10.65485/elektrik.v4i2.1171>

