



Sistem Kontrol dan *Monitoring* PLTS Jarak Jauh Berbasis WhatsApp untuk Penerangan Makam Desa Began Lamongan Jawa Timur

Moch. Alif Naofal¹, Ayusta Lukita Wardani², Mahendra Widyartono³,
Reza Rahmadian⁴

^{1,2,3,4} Sarjana Terapan Teknik Listrik, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Article Info

Article history:

Diterima 23 Juli 2026

Direvisi 28 Juli 2026

Diterbitkan 31 Juli 2026

Keywords:

PLTS *Off-Grid*

ESP32

WhatsApp

PZEM-017

ACS712

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* memerlukan sistem *monitoring* dan pengendalian jarak jauh untuk mempermudah pengoperasian dan pemeliharaan. Penelitian ini bertujuan merancang sistem *monitoring* multi-parameter dan pengendali lampu PLTS *Off-Grid* berbasis ESP32 dengan aplikasi WhatsApp sebagai antarmuka pengguna. Sistem menggunakan PZEM-017 untuk mengukur tegangan dan arus panel surya, INA219 untuk mengukur tegangan baterai dan tegangan beban, ACS712 untuk mengukur arus beban, DS18B20 untuk memantau suhu, serta LDR untuk mengendalikan lampu secara otomatis. Data dan perintah kontrol dikomunikasikan melalui MQTT dan *server Node.js* menuju WhatsApp. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali untuk setiap parameter dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap multimeter, kemudian dianalisis menggunakan *Mean Absolute Error (MAE)*, *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)*, dan standar deviasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan panel menggunakan PZEM-017 menghasilkan *MAE* 0,42 V dan *MAPE* 1,50%, sedangkan arus panel menghasilkan *MAE* 1,31 A dan *MAPE* 40,33%. Pengukuran tegangan baterai menggunakan INA219 menghasilkan *MAE* 0,07 V dan *MAPE* 0,47%, sedangkan tegangan beban menghasilkan *MAE* 0,18 V dan *MAPE* 1,28%. Pengukuran arus beban menggunakan ACS712 menghasilkan *MAE* 1,88 A dan *MAPE* 96,70%. Sensor LDR mampu mengendalikan lampu secara otomatis, sedangkan pengujian WhatsApp dari 10 lokasi berjarak 10 m hingga 2,5 km menghasilkan waktu respons 1–5 detik dengan rata-rata 2 detik. Sistem berhasil mengintegrasikan *monitoring* multi-parameter, pengendalian lampu otomatis, kontrol manual, dan notifikasi melalui WhatsApp, tetapi pembacaan arus masih memerlukan kalibrasi lebih lanjut.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Moch. Alif Naofal,

Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: moch.21033@mhs.unesa.ac.id

1. PENDAHULUAN

Transisi menuju energi terbarukan diperlukan untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil sekaligus mendukung penyediaan energi listrik yang lebih berkelanjutan [1]. Energi matahari memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber pembangkitan listrik melalui konversi radiasi matahari menggunakan teknologi fotovoltaik [2]. Panel surya mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik yang dapat digunakan secara langsung maupun disimpan dalam baterai untuk memenuhi kebutuhan beban [3]. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* sesuai digunakan pada lokasi yang tidak terjangkau atau jauh dari jaringan listrik utama karena mampu beroperasi secara mandiri dengan dukungan media penyimpanan energi [4]. Namun, karakteristik keluaran panel surya yang dipengaruhi intensitas penyinaran, suhu, kondisi baterai, dan perubahan beban menyebabkan kinerja sistem perlu dipantau secara berkelanjutan [5].

Perkembangan *Internet of Things* memungkinkan sensor, mikrokontroler, jaringan internet, dan antarmuka pengguna diintegrasikan menjadi sistem *monitoring* dan pengendalian yang dapat diakses dari jarak jauh [6]. Penerapan IoT pada sistem fotovoltaiik memungkinkan data pengukuran dikumpulkan, dikirimkan, dan ditampilkan secara *real-time* sehingga pengguna tidak harus melakukan pemeriksaan langsung di lokasi instalasi [7]. Sistem *monitoring* berbasis ESP32 dapat digunakan untuk membaca dan mengolah parameter kelistrikan dengan biaya implementasi yang relatif rendah serta dukungan konektivitas Wi-Fi yang terintegrasi [8]. Penelitian sebelumnya telah mengembangkan *monitoring* PLTS *Off-Grid* menggunakan ESP32 dan INA219 untuk menampilkan nilai tegangan, arus, dan daya pada sistem yang berada di lokasi terpencil [9]. Sensor PZEM-017 juga telah diterapkan untuk mengukur tegangan, arus, dan daya DC pada instalasi panel surya serta mengirimkan hasil pengukuran menuju media penyimpanan *daring* [10].

Penggunaan IoT tidak hanya mendukung *monitoring*, tetapi juga memungkinkan pengelolaan energi dan pengendalian beban berdasarkan data kondisi pembangkitan dan kebutuhan pengguna [2]. Selain parameter kelistrikan, suhu perlu dipantau karena perubahan temperatur dapat memengaruhi karakteristik dan performa keluaran panel surya [11]. Pemanfaatan aplikasi pesan sebagai antarmuka *monitoring* memberikan kemudahan karena pengguna dapat menerima informasi tanpa membuka aplikasi *dashboard* khusus [12]. Sistem *monitoring* energi berbasis ESP32 telah dikembangkan untuk mengirimkan informasi tegangan, arus, daya, dan konsumsi energi secara langsung kepada pengguna melalui aplikasi WhatsApp [12]. Komunikasi antara perangkat IoT dan *server* dapat didukung oleh protokol MQTT karena menggunakan mekanisme *publish-subscribe* yang ringan untuk pertukaran data melalui jaringan internet [3].

Pada sistem penerangan, pengoperasian lampu yang hanya mengandalkan kontrol manual dapat menyebabkan lampu terlambat dinyalakan atau tetap aktif ketika pencahayaan alami telah mencukupi [13]. Sensor *Light Dependent Resistor* (LDR) dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan intensitas cahaya sebagai dasar penentuan kondisi terang dan gelap [13]. Data LDR dapat diproses oleh mikrokontroler untuk mengaktifkan relay ketika intensitas cahaya berada di bawah nilai ambang dan mematikan lampu ketika intensitas cahaya meningkat [14]. Penelitian penerangan jalan berbasis IoT telah mengintegrasikan panel surya, mikrokontroler, dan sensor cahaya untuk meningkatkan efisiensi pengoperasian lampu secara otomatis [15]. Meskipun kontrol otomatis dapat mengurangi ketergantungan terhadap pengoperasian manual, kontrol jarak jauh tetap diperlukan agar pengguna dapat mengambil alih pengoperasian ketika terdapat kebutuhan khusus atau gangguan pada sistem [16].

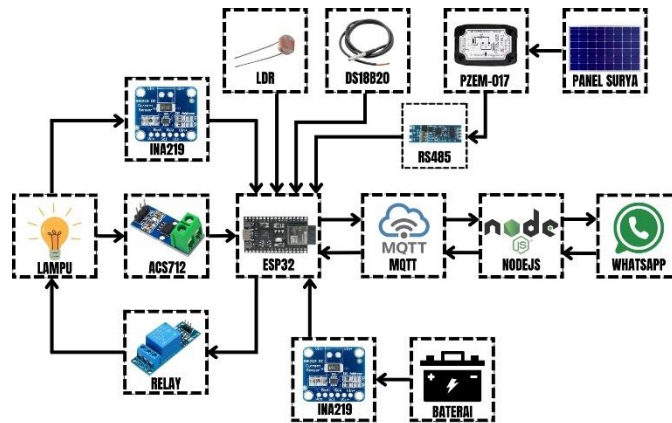
Berbagai penelitian terdahulu telah menerapkan IoT untuk *monitoring* tegangan, arus, daya, energi, dan kondisi lingkungan pada sistem fotovoltaiik [7]. Penelitian lain mengembangkan pengelolaan energi dan kontrol beban pada sistem fotovoltaiik, tetapi antarmuka yang digunakan masih berupa *dashboard* atau *platform monitoring* khusus [2]. Penggunaan WhatsApp pada sistem *monitoring* energi juga telah diterapkan, tetapi penelitian tersebut lebih berfokus pada penyampaian informasi penggunaan energi dan belum mengintegrasikan pengendalian lampu PLTS berdasarkan kondisi lingkungan [12]. Sementara itu, penelitian penerangan berbasis LDR telah menyediakan kontrol lampu otomatis, tetapi belum mengintegrasikan *monitoring* multi-parameter PLTS dan komunikasi melalui WhatsApp dalam satu sistem [13]. Dengan demikian, terdapat *research gap* berupa belum terintegrasinya *monitoring* parameter panel surya, baterai, beban, dan suhu dengan kontrol lampu otomatis, kontrol manual, serta notifikasi WhatsApp dalam satu sistem yang diterapkan pada PLTS *Off-Grid*.

Penelitian ini mengusulkan sistem *monitoring* dan kontrol PLTS *Off-Grid* berbasis ESP32 untuk penerangan makam Desa Began dengan mengintegrasikan PZEM-017, INA219, ACS712, DS18B20, LDR, relay, MQTT, *Node.js*, dan aplikasi WhatsApp. Kontribusi penelitian terletak pada integrasi *monitoring* multi-parameter PLTS, pengendalian lampu otomatis berbasis LDR, kontrol manual, serta penyampaian hasil *monitoring* dan notifikasi melalui WhatsApp dalam satu antarmuka. Kinerja sistem dievaluasi melalui pengujian akurasi sensor dan pengujian waktu respons perintah WhatsApp dari 10 lokasi dengan jarak 10 m hingga 2,5 km.

2. METODA

2.1 Blok Diagram Sistem

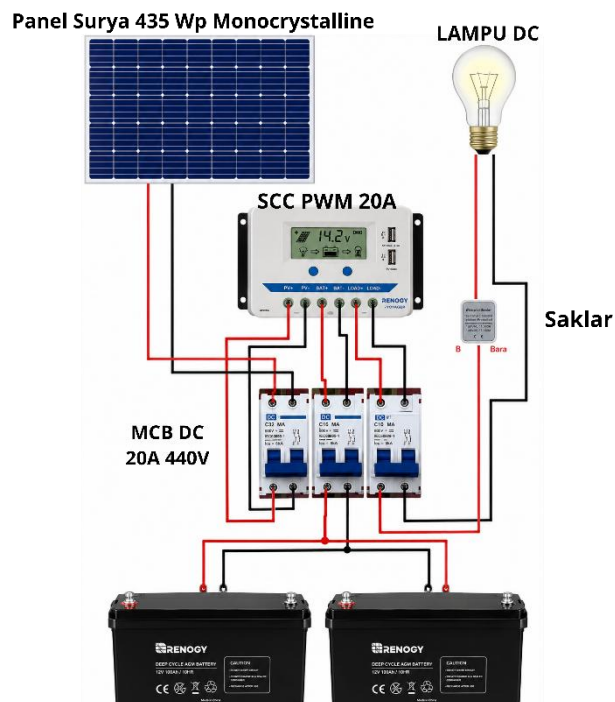
Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem *monitoring* dan kontrol PLTS berbasis ESP32. Sensor PZEM-017 yang terhubung melalui modul RS485 digunakan untuk mengukur tegangan dan arus keluaran panel surya, sedangkan sensor INA219 digunakan untuk mengukur tegangan baterai dan tegangan beban lampu, serta sensor ACS712 digunakan untuk mengukur arus beban lampu. Sensor DS18B20 berfungsi mengukur suhu lingkungan di sekitar instalasi PLTS, sementara sensor LDR mendeteksi intensitas cahaya sebagai dasar pengendalian lampu secara otomatis, yaitu lampu dinyalakan ketika intensitas cahaya kurang dari 1800 *lux* dan dimatikan ketika intensitas cahaya lebih dari 1800 *lux*. Seluruh data sensor diproses oleh ESP32, sedangkan *relay* digunakan sebagai aktuator untuk mengendalikan kondisi ON/OFF lampu. Data hasil *monitoring* dan perintah kontrol dikomunikasikan melalui protokol MQTT menuju *Node.js*, kemudian diteruskan ke WhatsApp sebagai antarmuka pengguna untuk melakukan pemantauan dan pengendalian sistem secara *real-time*.



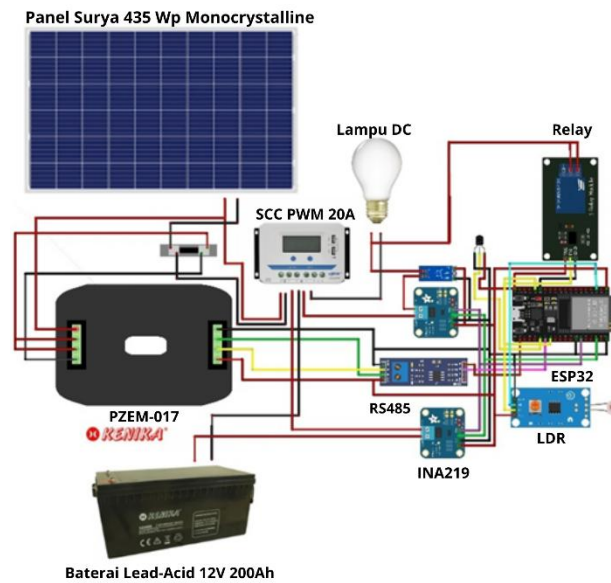
Gambar 1 Blok Diagram Sistem

2.2 Skema Perancangan Sistem

Perancangan sistem pada penelitian ini terdiri atas dua bagian, yaitu *wiring* PLTS dan *wiring* sistem *monitoring* serta pengendalian berbasis ESP32. *Wiring* PLTS dirancang sebagai sistem utama yang berfungsi menghubungkan panel surya, Solar Charge Controller (SCC), baterai, MCB DC, saklar, dan lampu DC. Kemudian, rangkaian ESP32 dan beberapa sensor untuk *monitoring* arus dan tegangan pada beban, baterai, dan panel surya.

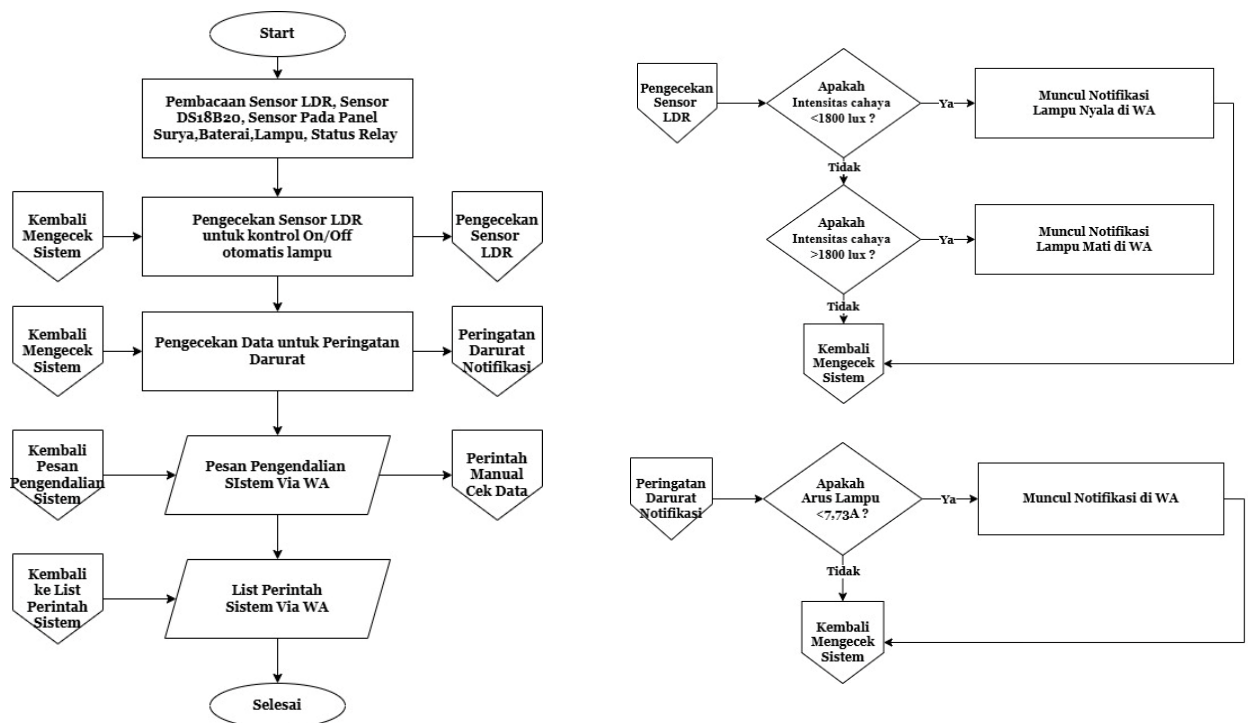


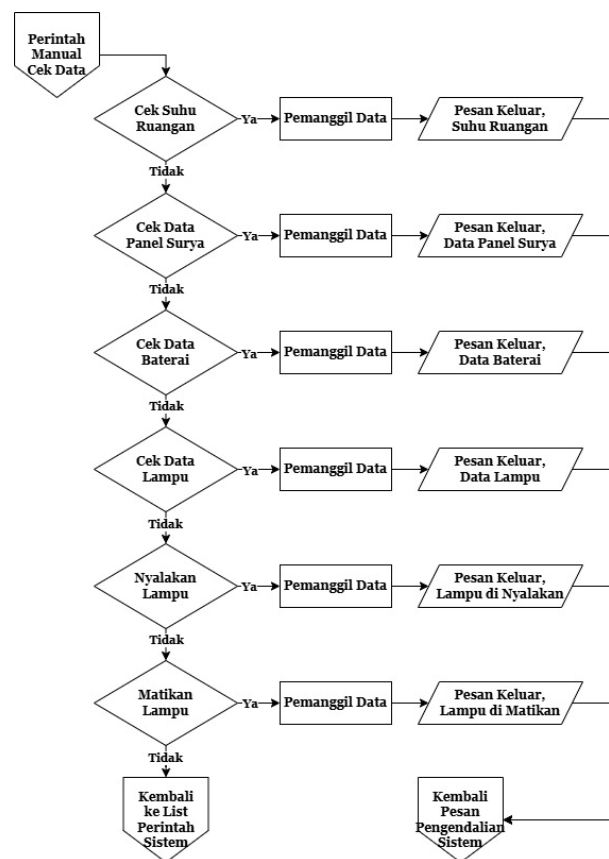
Gambar 2 Wiring Diagram PLTS

Gambar 3 Skema Rangkaian *Monitoring*

2.2 Prosedur Pengoperasian Alat

Prosedur operasional alat pada Gambar 4 merupakan jalannya sistem dari inialisasi ESP32 terhubung dengan internet, kemudian dari perintah pada WhatsApp yang dipilih *user* lalu ESP32 memproses sampai dengan mengontrol *output relay* untuk mengendalikan lampu.





Gambar 4 Flowchart Sistem Alat

2.4 Metode Pengujian dan Pengambilan Data

Metode pengujian dan pengambilan data dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pengendali lampu jarak jauh dan *monitoring* PLTS *Off-Grid* yang telah dirancang. Pengujian meliputi pembacaan tegangan dan arus panel surya menggunakan sensor PZEM-017, pembacaan tegangan baterai dan tegangan beban menggunakan sensor INA219, pembacaan arus beban menggunakan sensor ACS712, serta pengujian nilai intensitas cahaya menggunakan sensor LDR. Selain itu, dilakukan pengujian fungsi pengendalian lampu melalui WhatsApp, status ON/OFF lampu, dan waktu respon komunikasi antara ESP32 dan aplikasi WhatsApp.

1. Pengujian Waktu Respon WhatsApp Berdasarkan Jarak

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui waktu respons sistem terhadap perintah yang dikirimkan melalui aplikasi WhatsApp dari berbagai lokasi dengan jarak yang berbeda terhadap lokasi PLTS. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan mengirimkan perintah melalui aplikasi WhatsApp dari lokasi yang memiliki jarak 10 m hingga 2,5 km dari lokasi PLTS. Waktu respons dihitung berdasarkan selisih antara waktu pengiriman perintah dan waktu sistem memberikan pesan balasan.

2. Pengujian *Monitoring* Panel Surya dengan PZEM-017

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui akurasi sensor PZEM-017 dalam mengukur tegangan dan arus panel surya. Data hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan hasil pengukuran multimeter sebagai nilai acuan. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan interval sekitar 1 jam, kemudian hasilnya dianalisis menggunakan Persamaan (1)–(4).

3. Pengujian *Monitoring* Baterai dengan INA219

Pengujian *monitoring* baterai bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi sensor INA219 dalam mengukur tegangan baterai. Data hasil pembacaan sensor yang ditampilkan melalui aplikasi WhatsApp dibandingkan dengan hasil pengukuran multimeter sebagai nilai acuan. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan interval pengambilan data sekitar satu jam.

4. Pengujian *Monitoring* Beban dengan ACS712 dan INA219

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui akurasi sensor INA219 dalam mengukur tegangan beban dan sensor ACS712 dalam mengukur arus beban. Data hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan hasil pengukuran multimeter sebagai nilai acuan. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan interval sekitar 1 jam, kemudian hasilnya dianalisis menggunakan Persamaan (1)–(4).

5. Pengujian *Monitoring* Kondisi Lampu dengan Sensor LDR

Pengujian sensor LDR dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mendeteksi perubahan intensitas cahaya sebagai dasar pengendalian lampu secara otomatis.

6. Analisa *Error* pada Hasil Pengukuran Sensor

Analisis statistik sederhana dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian hasil pembacaan sensor PZEM-017, INA219, dan ACS712 terhadap hasil pengukuran multimeter. Analisis dilakukan menggunakan data hasil pengujian yang masing-masing diperoleh sebanyak 10 sampel. Nilai selisih, *Mean Absolute Error* (MAE), persentase *Error*, dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dihitung menggunakan Persamaan (1)–(4).

$$\text{Selisih} = |\text{Nilai Pembacaan Sensor} - \text{Nilai Pembacaan Multimeter}| \quad (1)$$

$$\text{MAE} = \frac{\text{Total Nilai Selisih}}{\text{Jumlah Pengujian}} \quad (2)$$

$$\text{Error \%} = \frac{\text{Selisih}}{\text{Nilai Multimeter}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{MAPE} = \frac{\text{Total Error (\%)}}{\text{Jumlah Pengujian}} \quad (4)$$

Keterangan:

Selisih	: Nilai absolut dari selisih hasil pembacaan sensor terhadap hasil pengukuran multimeter.
MAE (<i>Mean Absolute Error</i>)	: Nilai rata-rata <i>Error</i> absolut dari seluruh pengujian
Error %	: Persentase <i>Error</i> pada setiap data pengujian terhadap hasil pengukuran multimeter.
MAPE (<i>Mean Absolute Percentage Error</i>)	: Nilai rata-rata persentase <i>Error</i> dari seluruh data hasil pengujian..

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Sistem

Gambar 4 dan 5, menunjukkan hasil implementasi alat pada *control box* yang meliputi perancangan dan integrasi perangkat keras sistem pengendali lampu jarak jauh serta *monitoring* kinerja PLTS *Off-Grid* berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem terdiri atas panel surya, *Solar Charge Controller* (SCC), baterai, ESP32, sensor PZEM-017, sensor ACS712 untuk *monitoring* arus beban, sensor INA219 untuk *monitoring* tegangan beban dan baterai, sensor DS18B20, modul *relay*, serta komponen pendukung lainnya. ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendali yang mengolah data hasil pembacaan sensor dan mengirimkan informasi parameter sistem ke aplikasi WhatsApp melalui jaringan Wi-Fi. Selain sebagai media *monitoring*, WhatsApp juga digunakan untuk mengirimkan perintah pengendalian lampu dari jarak jauh.

Gambar 5 *Box Kontrol Monitoring*Gambar 6 *Box Kontrol PLTS*

3.2 Hasil Pengujian Waktu Respon WhatsApp Berdasarkan Jarak

Pengujian waktu respon dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam memproses perintah yang dikirim melalui aplikasi WhatsApp dari berbagai lokasi terhadap lokasi PLTS. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali pada jarak yang bervariasi, mulai dari 10 m hingga 2,5 km. Waktu respon dihitung berdasarkan selisih antara waktu pengiriman perintah dan waktu sistem memberikan pesan balasan melalui aplikasi WhatsApp. Untuk memperoleh hasil pengukuran yang akurat, pencatatan waktu dilakukan menggunakan aplikasi *Time Stamp* pada *smartphone* dengan format jam:menit:detik.

Berdasarkan Tabel 1, sistem berhasil memproses seluruh perintah yang dikirimkan dari 10 lokasi dengan jarak berbeda terhadap lokasi PLTS. Waktu respon yang diperoleh berada pada rentang 1-5 detik, dengan rata-rata 2 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respon secara cepat dan konsisten terhadap setiap perintah yang dikirimkan melalui aplikasi WhatsApp. Perbedaan jarak antara pengguna dan lokasi PLTS tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap waktu respon sistem. Hal ini menunjukkan bahwa komunikasi data antara ESP32, broker MQTT, *server Node.js*, dan aplikasi WhatsApp berjalan dengan baik sehingga sistem tetap mampu melakukan proses *monitoring* dan pengendalian secara jarak jauh. Variasi waktu respon yang terjadi lebih dipengaruhi oleh kualitas jaringan internet, kestabilan komunikasi melalui broker MQTT, serta proses pengolahan data pada ESP32 dibandingkan oleh jarak fisik pengguna terhadap lokasi PLTS. Meskipun demikian, seluruh perintah berhasil diproses dengan baik sehingga menunjukkan bahwa sistem memiliki keandalan yang baik dalam mendukung *monitoring* dan pengendalian PLTS secara *real time*.

Tabel 1 Hasil Pengujian Waktu Respon Perintah WhatsApp Berdasarkan Jarak

No	Lokasi Pengguna	Jarak	Waktu Perintah	Waktu Respon	Selisih
1	Area Makam	10 m	09:56:38	09:56:39	00:00:01
2	Jalan Desa Began	110 m	09:58:02	09:58:04	00:00:02
3	Dusun Sepat	350 m	10:00:10	10:00:11	00:00:01
4	Desa Began	500 m	10:10:26	10:10:31	00:00:05
5	Dusun Delik	900 m	10:06:07	10:06:09	00:00:02

No	Lokasi Pengguna	Jarak	Waktu Perintah	Waktu Respon	Selisih
6	Dusun Delok	1,1 km	10:08:36	10:08:37	00:00:01
7	Dusun Nganti	1,4 km	10:11:36	10:11:38	00:00:02
8	Dusun Calungan	1,5 km	10:14:22	10:14:23	00:00:01
9	Dusun Pokak	2,4 km	10:18:17	10:18:19	00:00:02
10	Dusun Pucuk	2,5 km	10:20:11	10:20:11	00:00:02
Rata-rata					00:00:02

3.2 Hasil Pengujian *Monitoring* Panel Surya

Pengambilan data dilakukan pada hari Minggu, 12 Juli 2026 pukul 08.34–17.00 WIB dengan interval pengujian setiap satu jam. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pembacaan sensor PZEM-017 pada sistem *monitoring* dengan hasil pengukuran menggunakan multimeter sebagai alat ukur pembandingan. Nilai selisih pada Tabel 2 dihitung menggunakan Persamaan (1), yaitu nilai absolut dari selisih hasil pembacaan sensor dan hasil pengukuran multimeter. Hasil pengujian pada Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai tegangan panel surya yang ditampilkan melalui aplikasi WhatsApp memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil pengukuran menggunakan multimeter. Nilai tegangan yang ditampilkan pada WhatsApp berkisar antara 13,71–35,14 V, sedangkan hasil pengukuran multimeter berada pada rentang 13,75–35,15 V. Nilai selisih tegangan berkisar antara 0,01–2,98 V dengan rata-rata sebesar 0,42 V. Selisih terbesar terjadi pada pengujian pukul 08.34 WIB, sedangkan pada pengujian berikutnya nilai selisih relatif kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sensor PZEM-017 memiliki tingkat kesesuaian yang baik dalam membaca tegangan panel surya. Perbedaan tegangan yang masih muncul diduga dipengaruhi oleh perubahan intensitas penyinaran matahari selama proses pengambilan data, toleransi pengukuran sensor, serta jeda waktu antara pembacaan sensor dan pengukuran menggunakan multimeter.

Berbeda dengan hasil pengukuran tegangan, hasil pengukuran arus menunjukkan perbedaan yang lebih besar antara data yang ditampilkan melalui aplikasi WhatsApp dengan hasil pengukuran multimeter. Nilai arus yang ditampilkan pada WhatsApp berada pada rentang 1,94–5,86 A, sedangkan hasil pengukuran multimeter berada pada rentang 1,74–5,57 A. Nilai selisih arus berkisar antara 0,04–3,80 A dengan rata-rata sebesar 1,31 A. Selisih terbesar terjadi pada pengujian pukul 16.00 WIB, yaitu saat sistem menampilkan arus sebesar 5,54 A, sedangkan hasil pengukuran multimeter sebesar 1,74 A. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pembacaan arus masih belum stabil. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh proses kalibrasi sensor yang belum optimal, kualitas sambungan rangkaian, komunikasi RS485 antara PZEM-017 dan ESP32, serta proses pengolahan data pada mikrokontroler sehingga pada beberapa kondisi hasil pembacaan arus menyimpang dari hasil pengukuran multimeter. Berdasarkan hasil pengujian, sensor PZEM-017 mampu melakukan *monitoring* tegangan dan arus panel surya secara *real-time* melalui aplikasi WhatsApp. Analisis lebih lanjut mengenai nilai Mean Absolute Error (MAE) dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor disajikan pada Subbab Analisa Error pada Hasil Pengukuran Sensor.

Tabel 2 Hasil *Monitoring* Panel Surya dengan PZEM-017

NO	WAKTU	Data Panel Surya Yang Ditampilkan Oleh WhatsApp		Multimeter		Selisih	
		Arus (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)
1	08:34:00	5.86	31.37	4.02	28.39	1.84	2.98
2	09:04:00	4.54	26.67	4.38	27.56	0.16	0.89
3	10:00:00	4.16	34.11	5.45	34.17	1.29	0.06
4	11:00:00	4.1	34.82	5.57	34.85	1.47	0.03
5	12:00:00	3.98	35.09	5.37	35.15	1.39	0.06
6	13:00:00	3.82	35.14	5.33	35.15	1.51	0.01
7	14:00:00	3.93	34.64	5.44	34.74	1.51	0.10
8	15:00:00	5.16	34.22	5.2	34.2	0.04	0.02
9	16:00:00	5.54	13.71	1.74	13.75	3.80	0.04
10	17:00:00	1.94	13.82	1.89	13.84	0.05	0.02
Rata-rata						1.31	0.42

3.3 Hasil Pengujian *Monitoring* Baterai

Pengambilan data dilakukan pada hari Minggu, 12 Juli 2026 pukul 08.34–17.00 WIB dengan interval pengujian setiap satu jam. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pembacaan tegangan baterai menggunakan sensor INA219 pada sistem *monitoring* dengan hasil pengukuran menggunakan multimeter sebagai alat ukur pembandingan. Nilai selisih pada Tabel 3 dihitung menggunakan Persamaan (1), yaitu nilai absolut dari selisih hasil pembacaan sensor dan hasil pengukuran multimeter.

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 3, nilai tegangan baterai yang ditampilkan melalui aplikasi WhatsApp berada pada rentang 13,50–14,44 V, sedangkan hasil pengukuran menggunakan multimeter berada pada rentang 13,70–14,44 V. Nilai selisih tegangan berkisar antara 0,02–0,20 V dengan rata-rata sebesar 0,07 V. Selisih terbesar terjadi pada pengujian pukul 16.00 WIB, sedangkan pada pengujian lainnya nilai selisih relatif kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sensor INA219 memiliki tingkat kesesuaian yang baik dalam mengukur tegangan baterai. Perbedaan hasil pengukuran yang masih muncul diduga dipengaruhi oleh toleransi sensor, kualitas sambungan rangkaian, serta perubahan kondisi baterai selama proses pengambilan data.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor INA219 dapat digunakan untuk memonitor tegangan baterai pada sistem PLTS melalui aplikasi WhatsApp secara *real-time*. Meskipun masih terdapat perbedaan kecil terhadap hasil pengukuran multimeter, nilai tersebut masih menunjukkan kesesuaian yang baik. Evaluasi kuantitatif terhadap tingkat akurasi sensor menggunakan *Mean Absolute Error (MAE)* dan *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)* dibahas pada Subbab Analisa Error pada Hasil Pengukuran Sensor.

Tabel 3 Hasil *Monitoring* Tegangan Baterai dengan INA219

No	Waktu	Data Baterai yang Ditampilkan oleh WhatsApp	Multimeter	Selisih Tegangan
		Tegangan (V)	Tegangan (V)	
1	08:34:00	14.44	14.39	0.05
2	09:04:00	14.31	14.41	0.10
3	10:00:00	14.36	14.42	0.06
4	11:00:00	14.39	14.43	0.04
5	12:00:00	14.36	14.41	0.05
6	13:00:00	14.36	14.39	0.03
7	14:00:00	14.4	14.44	0.04
8	15:00:00	14.4	14.42	0.02
9	16:00:00	13.5	13.7	0.20
10	17:00:00	13.73	13.81	0.08
Rata-rata				0.07

3.4 Hasil Pengujian *Monitoring* Beban

Pengambilan data dilakukan pada hari Minggu, 12 Juli 2026 pukul 08.34–17.00 WIB dengan interval pengujian setiap satu jam. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pembacaan tegangan beban menggunakan sensor INA219 dan arus beban menggunakan sensor ACS712 pada sistem *monitoring* dengan hasil pengukuran menggunakan multimeter sebagai alat ukur pembandingan. Nilai selisih pada Tabel 4 dihitung menggunakan Persamaan (1), yaitu nilai absolut dari selisih hasil pembacaan sensor dan hasil pengukuran multimeter. Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4, hasil pengukuran tegangan beban menggunakan sensor INA219 menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil pengukuran multimeter. Nilai tegangan yang ditampilkan melalui aplikasi WhatsApp berada pada rentang 13,41–14,86 V, sedangkan hasil pengukuran multimeter berada pada rentang 13,04–14,43 V. Nilai selisih tegangan berkisar antara 0,02–0,67 V dengan rata-rata sebesar 0,17 V. Selisih terbesar terjadi pada pengujian pukul 17.00 WIB, sedangkan pada pengujian lainnya nilai selisih relatif kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sensor INA219 memiliki tingkat kesesuaian yang baik dalam mengukur tegangan beban. Perbedaan hasil pengukuran yang masih muncul diduga dipengaruhi oleh toleransi sensor, kualitas sambungan rangkaian, serta perubahan kondisi beban selama proses pengambilan data.

Berbeda dengan hasil pengukuran tegangan, hasil pengukuran arus menggunakan sensor ACS712 masih menunjukkan perbedaan yang cukup besar dibandingkan hasil pengukuran multimeter. Nilai arus yang ditampilkan melalui aplikasi WhatsApp berada pada rentang 0,01–0,18 A, sedangkan hasil pengukuran multimeter berada pada rentang 1,72–2,10 A. Nilai selisih arus berkisar antara 1,58–2,01 A dengan rata-rata sebesar 1,88 A. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pembacaan arus masih belum stabil, yang diduga

ISSN: xxxx-xxxx

dipengaruhi oleh nilai *offset* sensor yang belum terkalibrasi, gangguan pada sinyal analog, serta proses konversi ADC pada ESP32 sehingga hasil pembacaan arus masih berbeda cukup besar dibandingkan hasil pengukuran multimeter.

Tabel 4 Hasil Pengujian *Monitoring* Arus dan Tegangan Beban

NO	WAKTU	Data Beban Yang Ditampilkan Oleh WhatsApp		Multimeter		Selisih	
		ACS712 Arus (A)	INA219 Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)
1	08:34:00	0.07	14.44	2.07	14.38	2.00	0.06
2	09:04:00	0.18	14.32	2.1	14.4	1.92	0.08
3	10:00:00	0.03	14.86	2.02	14.41	1.99	0.45
4	11:00:00	0.01	14.39	2.02	14.43	2.01	0.04
5	12:00:00	0.01	14.36	1.95	14.43	1.94	0.07
6	13:00:00	0.08	14.36	1.96	14.4	1.88	0.04
7	14:00:00	0.03	14.41	1.85	14.43	1.82	0.02
8	15:00:00	0.06	14.4	1.91	14.42	1.85	0.02
9	16:00:00	0.14	13.41	1.72	13.69	1.58	0.28
10	17:00:00	0.03	13.71	1.87	13.04	1.84	0.67
Rata-rata						1.88	0.17

3.5 Hasil Pengujian *Monitoring* Kondisi Lampu dengan LDR

Pengujian sensor LDR dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mendeteksi perubahan intensitas cahaya sebagai dasar pengendalian lampu secara otomatis. Berdasarkan Tabel 5, sensor LDR mampu membedakan kondisi terang dan gelap sesuai nilai ambang yang telah ditentukan. Pada nilai pembacaan 133-1008, *lux* sistem mempertahankan *relay* dalam kondisi OFF sehingga lampu tidak menyala. Sebaliknya, pada nilai pembacaan 1039-3785 *lux*, *relay* aktif sehingga lampu menyala secara otomatis. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor LDR mampu mengendalikan lampu sesuai perubahan intensitas cahaya serta menampilkan nilai sensor dan status lampu melalui aplikasi WhatsApp secara *real time*. Dengan demikian, fungsi *monitoring* dan kontrol otomatis pada sistem telah berjalan sesuai dengan rancangan.

Tabel 5 Hasil *Monitoring* Pengujian LDR

No	Nilai LDR Yang terbaca pada WhatsApp	Kondisi Lampu
1	880	OFF
2	1008	OFF
3	1039	ON
4	3033	ON
5	3785	ON
6	3216	ON
7	2494	ON
8	528	OFF
9	133	OFF
10	176	OFF

3.6 Hasil Analisa *Error* pada Pengukuran Sensor

Analisis statistik sederhana dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi dan konsistensi hasil pembacaan sensor terhadap hasil pengukuran multimeter sebagai nilai acuan. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan dan arus panel surya menggunakan PZEM-017, tegangan baterai dan tegangan beban menggunakan INA219, serta arus beban menggunakan ACS712. Setiap parameter diuji sebanyak 10 kali. Nilai Mean Absolute *Error* (*MAE*) digunakan untuk menunjukkan rata-rata selisih absolut hasil pembacaan sensor terhadap multimeter, sedangkan Mean Absolute Percentage *Error* (*MAPE*) digunakan untuk menunjukkan

rata-rata *Error* dalam bentuk persentase. Standar deviasi (SD) digunakan untuk mengetahui tingkat penyebaran nilai selisih pada setiap pengujian.

Tabel 6 Hasil Perhitungan *Error* pada Pengukuran Sensor

Hasil Parameter Pembacaan Sensor	MAE	MAPE	Standar Deviasi (SD)
PZEM-017 Tegangan Panel Surya	0,42 V	1,50%	0,94 V
PZEM-017 Arus Panel Surya	1,31 A	40,33 %	1,11 A
INA219 Tegangan Baterai	0,07 V	0,47 %	0,05 V
INA219 Tegangan Beban Lampu	0,17 V	1,28 %	0,22 V
ACS712 Arus Beban Lampu	1,88 A	96,70 %	0,13 A

Berikut merupakan salah satu contoh perhitungan dari hasil parameter pembacaan tegangan keluaran panel surya dengan sensor PZEM-017. Perhitungan dilakukan menggunakan 10 data hasil pembacaan tegangan PZEM-017 dan multimeter pada Tabel 2.

Perhitungan dilakukan pada hasil pengukuran tegangan panel surya menggunakan sensor PZEM-017. Data pengujian pertama pada pukul 08.34 WIB menunjukkan nilai tegangan PZEM-017 sebesar 31,37 V dan hasil pengukuran multimeter sebesar 28,39 V. Berdasarkan Persamaan (1), nilai selisih dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Selisih} &= |\text{Nilai Pembacaan Sensor} - \text{Nilai Pembacaan Multimeter}| \\ \text{Selisih} &= |31,37 - 28,39| = \mathbf{2,98V} \end{aligned}$$

Dengan demikian, selisih hasil pembacaan tegangan pada pengujian pertama adalah 2,98 V.

Nilai *MAE* diperoleh dari jumlah seluruh nilai selisih tegangan pada 10 pengujian. Total nilai selisih tegangan adalah sebagai berikut.:

$$\text{Total Selisih} = 2,98 + 0,89 + 0,06 + 0,03 + 0,06 + 0,01 + 0,10 + 0,02 + 0,04 + 0,02 = \mathbf{4,21V}$$

Selanjutnya, nilai *MAE* dihitung menggunakan Persamaan (2):

$$\text{MAE} = \frac{\text{Total Nilai Selisih}}{\text{Jumlah Pengujian}} = \frac{4,21V}{10} = \mathbf{0,42 V}$$

Persentase *Error* dihitung untuk setiap data pengujian menggunakan Persamaan 3. Pada pengujian pertama, nilai selisih sebesar 2,98 V dan hasil pengukuran multimeter sebesar 28,39V.

$$\text{Error \%} = \frac{\text{Selisih}}{\text{Nilai Multimeter}} \times 100\% = \frac{2,98}{28,39} \times 100\% = \mathbf{10,50 \%}$$

Jadi, persentase *Error* pada percobaan pertama pada Tabel 2, pada keluaran Tegangan panel surya yang dibaca PZEM-017 yaitu 10,50 %. Sehingga, diperoleh total persentase *Error* dari 10 pengujian yaitu 1,497%

$$\text{MAPE} = \frac{\text{Total Error (\%)}}{\text{Jumlah Pengujian}} = \frac{1,497\%}{10} = 1,479\% = \mathbf{1,50\%}$$

Dengan demikian, hasil pengukuran tegangan panel surya menggunakan PZEM-017 menghasilkan nilai *MAE* sebesar 0,42 V dan *MAPE* sebesar 1,50%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa secara umum hasil pembacaan tegangan PZEM-017 memiliki selisih yang relatif kecil terhadap hasil pengukuran multimeter. Kemudian untuk pembacaan Standar Deviasi ini dihitung menggunakan rumus pada *excel* yaitu =STDEV.S(range_data_selisih).

Berdasarkan Tabel 6, pengukuran tegangan baterai menggunakan INA219 menghasilkan nilai *MAPE* paling kecil, yaitu 0,47%, diikuti pengukuran tegangan panel surya menggunakan PZEM-017 sebesar 1,50% dan tegangan beban menggunakan INA219 sebesar 1,28%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembacaan tegangan memiliki tingkat kesesuaian yang lebih baik terhadap hasil pengukuran multimeter. Meskipun standar deviasi tegangan panel surya mencapai 0,94 V, nilai tersebut terutama dipengaruhi oleh selisih sebesar 2,98 V pada pengujian pertama, sedangkan sebagian besar pengujian lainnya menghasilkan selisih yang relatif kecil.

Pengukuran arus panel surya menggunakan PZEM-017 menghasilkan *MAPE* sebesar 40,33% dan standar deviasi sebesar 1,11 A. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pembacaan arus panel masih memiliki *Error* yang cukup besar dan hasilnya lebih bervariasi dibandingkan pembacaan tegangan. Penyimpangan terbesar terjadi pada pengujian pukul 16.00 WIB ketika sensor menampilkan arus 5,54 A, sedangkan multimeter menunjukkan 1,74 A.

Pembacaan arus beban menggunakan ACS712 menghasilkan *MAPE* sebesar 96,70%. Nilai yang tinggi tersebut menunjukkan bahwa hasil pembacaan ACS712 belum mendekati hasil pengukuran multimeter meskipun standar deviasinya hanya sebesar 0,13 A. Standar deviasi yang kecil pada kondisi ini tidak menunjukkan akurasi yang baik, tetapi menunjukkan bahwa *Error* yang besar terjadi secara relatif konsisten pada seluruh pengujian. Oleh karena itu, sensor ACS712 memerlukan penyesuaian nilai *offset*, faktor kalibrasi, serta evaluasi proses konversi ADC pada ESP32.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa sensor INA219 dan bagian pembacaan tegangan PZEM-017 mampu menghasilkan pengukuran yang relatif mendekati multimeter. Sebaliknya, bagian pengukuran arus PZEM-017 dan ACS712 masih memerlukan kalibrasi lebih lanjut. Hasil ini memperkuat pembahasan sebelumnya bahwa fungsi *monitoring* telah berjalan, tetapi tingkat akurasi masing-masing parameter belum sama. Data pada tabel hasil dan statistik tersebut berasal dari sepuluh pengujian yang telah dicantumkan dalam draft.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem *monitoring* dan pengendali lampu PLTS *Off-Grid* berbasis ESP32 berhasil mengintegrasikan pemantauan panel surya, baterai, beban, suhu, pengendalian lampu otomatis berbasis LDR, kontrol manual, serta notifikasi melalui aplikasi WhatsApp. Pengujian statistik menunjukkan bahwa pembacaan tegangan memiliki tingkat kesesuaian yang lebih baik terhadap multimeter, dengan *MAPE* sebesar 1,50% pada tegangan panel PZEM-017, 0,47% pada tegangan baterai INA219, dan 1,28% pada tegangan beban INA219. Sebaliknya, pembacaan arus menghasilkan *MAPE* sebesar 40,33% pada PZEM-017 dan 96,70% pada ACS712 sehingga masih memerlukan penyesuaian nilai *offset*, faktor kalibrasi, dan evaluasi rangkaian pengukuran. Sensor LDR mampu mengendalikan lampu secara otomatis berdasarkan perubahan intensitas cahaya. Pengujian perintah WhatsApp pada 10 lokasi dengan jarak 10 m hingga 2,5 km menunjukkan seluruh perintah berhasil diproses dengan waktu respons 1–5 detik dan rata-rata 2 detik. Keterbatasan sistem terletak pada akurasi pembacaan arus dan ketergantungan komunikasi terhadap kestabilan jaringan internet, broker MQTT, dan *server Node.js*. Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan melalui penerapan algoritma kalibrasi adaptif, penyimpanan data berbasis *cloud*, dan integrasi *dashboard web* untuk mendukung analisis data historis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi D4 Teknik Listrik Universitas Negeri Surabaya atas dukungan fasilitas dan sarana yang diberikan selama pelaksanaan penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, masukan, dan dukungan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] M. S. Al Amin, Emidiana, I. K. Pebrianti, and Y. Irwansi, "Penggunaan panel surya sebagai pembangkit listrik pada alat pengering makanan," *Jurnal Ampere*, vol. 7, no. 1, pp. 15–21, 2022, doi: 10.31851/ampere.v7i1.7703.
- [2] C. K. Rao, S. K. Sahoo, F. F. Yanine, and F. Yanine Misleh, "A literature review on an IoT-based intelligent smart energy management systems for PV power generation," *Hybrid Advances*, vol. 5, Art. no. 100136, 2024, doi: 10.1016/j.hybadv.2023.100136.
- [3] C. K. Rao, S. K. Sahoo, and F. F. Yanine, "An IoT-based intelligent smart energy *monitoring* system for solar PV power generation," *Energy Harvesting and Systems*, vol. 11, no. 1, Art. no. 20230015, 2024, doi: 10.1515/ehs-2023-0015.
- [4] M. O. Qays, M. M. Ahmed, M. A. P. Mahmud, A. Abu-Siada, S. M. Mueen, M. L. Hossain, F. Yasmin, and M. M. Rahman, "Monitoring of renewable energy systems by IoT-aided SCADA system," *Energy Science & Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 1874–1885, 2022, doi: 10.1002/ese3.1130.
- [5] A. Rekeraho, D. T. Cotfas, P. A. Cotfas, E. Tuyishime, T. C. Balan, and R. Acheampong, "Enhancing security for IoT-based smart renewable energy remote *monitoring* systems," *Electronics*, vol. 13, no. 4, Art. no. 756, 2024, doi: 10.3390/electronics13040756.

- [6] V. Rawat, A. H. Athab, S. K. Joshi, S. Jayasree, D. Dhabaliya, and J. Devika, "Optimising solar energy: An evaluation of IoT-based solar panel monitoring systems," *E3S Web of Conferences*, vol. 540, Art. no. 08005, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202454008005.
- [7] A. I. Cholid, P. Megantoro, M. Fadhillah, N. I. Hanifah, M. N. Fuad, M. H. A. Rahmat, W. Abdilah, F. D. Pratama, and D. S. Wibawa, "Design and development of a solar irradiance monitoring system for on-grid solar power plants using the *Internet of Things*," in *Proceedings of the International Conference on Advanced Technology and Multidiscipline*, pp. 158–177, 2024, doi: 10.2991/978-94-6463-566-9_12.
- [8] Z. P. Muqorrobin, A. Nawawi, A. A. Ardani, S. P. Setia, and R. Rahmadian, "Off-Grid solar system monitoring based on ESP-32 and INA219 in Pesanggrahan Gordomulyo," *Vokasi UNESA Bulletin of Engineering, Technology and Applied Science*, vol. 1, no. 2, pp. 26–37, 2024, doi: 10.26740/vubeta.v1i2.34859.
- [9] A. M. 'Aafi, J. Jamaaluddin, and I. Anshory, "Implementasi sensor PZEM-017 untuk monitoring arus, tegangan dan daya pada instalasi panel surya dengan sistem data logger menggunakan Google Spreadsheet dan smartphone," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika*, pp. 191–196, 2022, doi: 10.31284/p.snestik.2022.2718.
- [10] J. I. Bayu, I. B. Sulistiyawati, and N. P. Agustini, "Monitoring pengaruh suhu pada panel surya terhadap performa keluaran pembangkit listrik tenaga surya," *Jurnal FORTECH*, vol. 4, no. 1, pp. 27–32, 2023, doi: 10.56795/fortech.v4i1.4104.
- [11] N. Amsyah, A. Asmar, and R. Kurniawan, "Monitoring system for electrical energy use and charging electricity tokens based on website and WhatsApp application," *Jurnal Ecotipe*, vol. 11, no. 1, pp. 97–106, 2024, doi: 10.33019/jurnalecotipe.v11i1.4494.
- [12] "A smart energy monitoring system using ESP32 microcontroller," *e-Prime—Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 9, Art. no. 100666, 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100666.
- [13] R. S. Carlos and Rumiasih, "IoT based automatic street light control," in *Proceedings of the 7th FIRST 2023 International Conference on Global Innovations*, pp. 525–532, 2024, doi: 10.2991/978-94-6463-386-3_46.
- [14] Q. Hidayati, N. Jamal, N. Yanti, and Y. T. Prasetyo, "Sistem monitoring dan kontrol penerangan jalan umum tenaga surya berbasis *Internet of Things*," *JITEL: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga*, vol. 3, no. 1, pp. 19–26, 2023, doi: 10.35313/jitel.v3.i1.2023.19-26.
- [15] B. G. Nisrina, Hartono, and S. Julaihah, "Design of monitoring solar public street lighting (PJUTS) with LoRa ESP32 network based on *Internet of Things*," *Proceeding of International Conference of Advanced Transportation, Engineering, and Applied Social Science*, vol. 2, no. 1, pp. 210–216, 2023, doi: 10.46491/icateas.v2i1.1652.
- [16] W. A. Jabbar, T. K. Keat, F. A. Dael, L. C. Hong, Y. F. M. Yussof, and A. Nasir, "Optimising urban lighting efficiency with IoT and LoRaWAN integration in smart street lighting systems," *Discover Internet of Things*, vol. 5, Art. no. 64, 2025, doi: 10.1007/s43926-025-00163-z.