JURNAL EDUNITRO
JURNAL PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRO
HTTPS://JURNAL-EDUNITRO.JEDUNITRO.COM/EDUNITRO
E-ISSN 2776-284X
P-ISSN 2776-2920
Vol. 6, No. 2, October 2026

Monitoring Parameter Kelistrikan Panel Penerangan Gedung Parkir Berbasis PLTS–PLN dan IoT (Monitoring Electrical Parameters of a Parking Building Lighting Panel Based on PV–Grid Power Supply and IoT)

Ilham Yanuarsyah[1*] dan Abdurahman[2]
[1,2] Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang
[*]Corresponding author, e-mail: ilhamyanu123@gmail.com[1]

Received: September 21st, **2026.** Revised: October 19th, **2026.** Accepted: October 20th, **2026**
Available online: October 23rd, **2026**. Published: October 23rd, **2026**.

Abstract— This study develops an Internet of Things (IoT)-based monitoring system for a parking-building lighting control panel supplied by a 1.65 kWp photovoltaic system with a hybrid PV-grid source. The system integrates an ESP32, PZEM-004T for AC measurement, PZEM-017 for battery-side DC measurement, a 20×4 LCD, Wi-Fi, MQTT, and a web dashboard. Field testing was conducted for five days by comparing voltage and current readings with an AVO meter and clamp meter and by observing battery operation and source transfer. The reported average errors were 0.18% for AC voltage, 0.02% for AC current, 0.09% for DC voltage, and 0.045% for DC current. The measured data were displayed on the LCD and dashboard, and a transfer from the battery to the PLN grid was observed at the end of the discharge scenario. Network latency and packet loss, ATS transfer time, SOC validation, and independent power-meter validation were not measured. The results support the use of the ESP32-PZEM-MQTT architecture as a functional monitoring layer for a PV-powered lighting panel, while the conclusions remain limited to the tested operating conditions.

Keywords: PZEM-004T; PZEM-017; Internet of Things (IoT); photovoltaic system; energy monitoring.

Abstrak— Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring panel kendali penerangan gedung parkir berbasis Internet of Things (IoT) pada sistem PLTS 1,65 kWp dengan sumber hybrid PLTS-PLN. Sistem mengintegrasikan ESP32, PZEM-004T untuk pengukuran AC, PZEM-017 untuk pengukuran DC baterai, LCD 20×4, Wi-Fi, MQTT, dan dashboard web. Pengujian lapangan dilakukan selama lima hari dengan membandingkan pembacaan tegangan dan arus terhadap AVO Meter dan Clamp Meter serta mengamati perubahan operasi baterai dan perpindahan sumber. Rata-rata error yang dilaporkan sebesar 0,18% untuk tegangan AC, 0,02% untuk arus AC, 0,09% untuk tegangan DC, dan 0,045% untuk arus DC. Data dapat ditampilkan pada LCD dan dashboard, sementara perpindahan dari baterai ke PLN teramati pada akhir skenario discharge. Pengujian belum mengukur latensi dan packet loss jaringan, waktu transfer ATS, metode validasi SOC, maupun daya dengan instrumen independen. Hasil menunjukkan bahwa arsitektur ESP32-PZEM-MQTT dapat digunakan sebagai lapisan monitoring fungsional pada panel penerangan PLTS, dengan cakupan klaim dibatasi pada kondisi pengujian.

Kata Kunci: PZEM-004T; PZEM-017; Internet of Things (IoT); PLTS; monitoring energi.

Copyright (c) 2026. Ilham Yanuarsyah and Abdurahman.

I. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi surya pada bangunan memperluas kebutuhan akan sistem pemantauan yang tidak hanya mencatat parameter kelistrikan, tetapi juga membantu pengelola mengenali perubahan kondisi operasi tanpa harus selalu berada di lokasi. Pada sistem penerangan gedung parkir, pemantauan penting karena beban penerangan beroperasi pada waktu tertentu, sementara sumber energi dapat berasal dari rangkaian PLTS, baterai, inverter, dan jaringan utilitas. Arsitektur Internet of Things (IoT) memungkinkan nilai pengukuran dikumpulkan oleh perangkat tepi, dikirim melalui jaringan, disimpan, lalu disajikan kembali dalam bentuk antarmuka lokal atau jarak jauh. Literatur tentang bangunan cerdas menunjukkan bahwa kombinasi sensor, jaringan komunikasi, dan platform data dapat mendukung pengelolaan energi berbasis informasi operasi (Mataloto dkk., 2019; Yaïci dkk., 2021; Cavalcanti & Pimenta, 2023). Pada bangunan bertenaga surya, integrasi PV, kontrol, dan komunikasi juga telah digunakan untuk menghubungkan informasi sumber energi dengan pengelolaan bangunan (Muñiz dkk., 2024). Pada sisi pembangkit surya, kualitas data monitoring juga penting untuk mengenali penyimpangan dan mendukung pemeliharaan (Lindig dkk., 2020; Livera dkk., 2022).

Perkembangan perangkat IoT berbiaya relatif rendah membuat pengukuran kelistrikan dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler dan layanan jaringan. Kabalci dkk. (2019) menempatkan smart metering dan energy management sebagai bagian penting dari ekosistem Internet of Energy, sedangkan

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Saavedra dkk. (2020) menunjukkan bahwa perangkat metering IoT dapat dirancang untuk lingkungan yang menuntut solusi sederhana dan mandiri. Implementasi komunikasi nirkabel untuk monitoring energi telah dilakukan menggunakan LoRa, MQTT, dan arsitektur berbasis web atau cloud (Paredes-Parra dkk., 2019; Sánchez-Sutil dkk., 2021; Shapsough & Zualkernan, 2022). Pada monitoring PLTS, penelitian berkembang dari pengumpulan data menuju pemantauan jarak jauh, diagnosis gangguan, dan integrasi platform terbuka (Felipe dkk., 2021; Boubakr dkk., 2022; Hojabri dkk., 2022; He dkk., 2024; Khalid dkk., 2024). Namun, konteks penggunaan sistem tersebut beragam, mulai dari fasilitas laboratorium, pembangkit terdistribusi, hingga rumah atau perangkat tunggal, sehingga hasil dan arsitekturnya tidak selalu langsung mewakili panel kendali penerangan bangunan yang menggunakan sumber energi hybrid.

Kesenjangan penelitian pada konteks tersebut terletak pada kebutuhan validasi lapangan yang menggabungkan tiga hal sekaligus. Pertama, monitoring harus ditempatkan pada panel kendali penerangan gedung yang benar-benar beroperasi, bukan hanya pada miniatur atau uji laboratorium. Kedua, titik pemantauan perlu mencakup sisi AC beban dan sisi DC baterai pada sistem PLTS yang juga memiliki inverter serta sumber cadangan PLN. Ketiga, fungsi monitoring perlu berjalan pada dua jalur informasi, yaitu tampilan lokal untuk pemeriksaan di panel dan dashboard berbasis jaringan untuk akses jarak jauh. Penelitian smart building dan smart metering menekankan integrasi pengukuran dan komunikasi, tetapi monitoring PV sering berfokus pada keluaran pembangkit atau diagnosis fault, bukan hubungan panel penerangan, penyimpanan energi, dan perpindahan sumber (Ahmed dkk., 2022; Lim dkk., 2022; Tsai dkk., 2023).

Penelitian ini karena itu memfokuskan kontribusi pada implementasi sistem monitoring panel kendali penerangan gedung parkir Universitas Pamulang Viktor yang ditenagai sistem PLTS 1,65 kWp dengan sumber hybrid PLTS-PLN. Sistem menggabungkan ESP32, PZEM-004T untuk pengukuran AC, PZEM-017 untuk pengukuran DC, LCD 20×4, dan dashboard web melalui MQTT. Validasi dilakukan di lapangan dengan membandingkan tegangan dan arus terhadap alat ukur acuan, kemudian mengamati perilaku sistem ketika sumber baterai menurun hingga terjadi perpindahan ke PLN. Dengan fokus tersebut, pertanyaan penelitian dirumuskan sebagai berikut: (1) seberapa dekat pembacaan parameter kelistrikan sistem monitoring terhadap alat ukur acuan pada kondisi operasi gedung? dan (2) apakah arsitektur monitoring lokal-jaringan dapat merekam perubahan kondisi beban serta mendukung observasi perpindahan sumber pada sistem hybrid? Jawaban atas pertanyaan tersebut diharapkan memperjelas kelayakan teknis arsitektur monitoring sederhana pada fasilitas penerangan berbasis PLTS sekaligus menunjukkan batas informasi yang masih perlu ditambahkan untuk pemeliharaan berbasis kondisi.

II. METODE

A. Waktu, Tempat, dan Alur Penelitian

Penelitian dilaksanakan selama sekitar tiga bulan pada panel kendali penerangan gedung parkir Universitas Pamulang Viktor lantai 7, Tangerang Selatan. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, observasi lapangan, perancangan, implementasi, pengujian, dan evaluasi. Studi literatur diarahkan pada monitoring energi, sensor kelistrikan, IoT, dan sistem hybrid; observasi digunakan untuk menentukan titik ukur dan kebutuhan tampilan pada panel. Perancangan logika rangkaian dilakukan sebelum implementasi, sedangkan pengujian akhir dilaksanakan pada sistem terpasang.

B. Perangkat dan Arsitektur Pengukuran

Perangkat utama terdiri atas ESP32 DEVKIT V1 sebagai pengolah data, PZEM-004T sebagai meter pada jalur AC, PZEM-017 sebagai meter pada jalur DC baterai, LCD 20×4 berantarmuka I2C, catu daya 5 V, PCB, dan terminal blok (lihat Tabel 1). Pada sisi AC, PZEM-004T dipasang pada jalur yang diukur dengan current transformer pada konduktor fasa; komunikasi serial menggunakan jalur UART ESP32. Pada sisi DC, PZEM-017 digunakan untuk membaca tegangan, arus, dan daya pada jalur baterai. Data pengukuran diproses ESP32, ditampilkan secara lokal, dan dikirim menggunakan Wi-Fi melalui MQTT ke dashboard IoTKita. Sistem sumber energi yang diamati terdiri atas PLTS 1,65 kWp, solar charge controller, baterai, inverter, ATS, dan PLN sebagai sumber cadangan (lihat Gambar 1). Data penelitian yang tersedia tidak memuat seluruh rating nameplate baterai, inverter, SCC, dan ATS, sehingga parameter tersebut tidak digunakan sebagai variabel kuantitatif.

C. Perangkat Lunak, Pengujian, dan Analisis

Validasi sensor dilakukan dengan membandingkan pasangan pembacaan terhadap AVO Meter Sanwa CD800A dan Clamp Meter Deli DL33402 (lihat Tabel 2). Pengujian AC dilakukan 15 kali per hari dengan interval 30 menit pada 09.00–16.00 WIB selama lima hari pada minggu 29 Juni–4 Juli 2026. Pengamatan baterai dilakukan pada 16.30–19.00 WIB untuk mengikuti perubahan tegangan dan

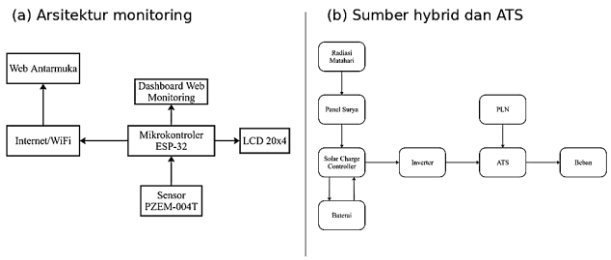
arus serta respons perpindahan sumber. Tingkat kesalahan dihitung menggunakan error absolut tiap pasangan, *Error (%) = [(Xacuan − Xukur) / Xacuan] × 100%*, kemudian diringkas sebagai rata-rata error seluruh pasangan pengukuran. Pada parameter daya, nilai sensor tidak dianggap sebagai validasi independen karena nilai daya acuan diturunkan dari parameter pengukuran; hasilnya digunakan sebagai pemeriksaan konsistensi. Pengujian komunikasi dan ATS bersifat fungsional: keberadaan pembaruan pada LCD/dashboard dan kejadian perpindahan sumber dicatat. Latensi, packet loss, jumlah percobaan ATS, dan waktu transfer tidak direkam sehingga tidak digunakan untuk membuat klaim kuantitatif.

Tabel 1. Komponen utama dan fungsi

Komponen	Titik/fungsi	Antarmuka	Jumlah
ESP32 DEVKIT V1	Pengolah data	UART/Wi-Fi	1
PZEM-004T	Parameter AC; CT pada fasa	UART	1
PZEM-017	Parameter DC baterai	Serial meter	1
LCD 20×4 I2C	Tampilan lokal	I2C	1
SCC, baterai, inverter, ATS	Sistem sumber hybrid	Jalur daya	Eksisting
PLTS 1,65 kWp + PLN	Sumber utama/cadangan	Jalur daya	Eksisting

Tabel 2. Alat ukur pembanding

Alat	Model	Fungsi
AVO Meter	Sanwa CD800A	Tegangan acuan
Clamp Meter	Deli DL33402	Arus acuan



Gambar 1. Arsitektur monitoring dan sumber hybrid PLTS-PLN dengan ATS

III. HASIL

A. Implementasi dan Antarmuka Monitoring

Implementasi perangkat keras menempatkan ESP32, sensor, LCD, dan catu daya dalam satu box panel. PZEM-004T membaca sisi AC melalui UART, sedangkan PZEM-017 membaca sisi DC baterai (lihat Gambar 2). Tampilan lokal menggunakan LCD 20×4, sementara data dikirim ke dashboard melalui ESP32.



Gambar 2. Implementasi perangkat keras pada box panel

LCD menampilkan tegangan, frekuensi, arus, faktor daya, daya aktif, dan energi (lihat Gambar 3). Dashboard web menampilkan parameter yang sama beserta waktu pengambilan. Selama observasi lima hari, data muncul pada kedua media; arus dan daya mendekati nol saat beban tidak aktif dan meningkat ketika beban dioperasikan. Karena waktu kirim-terima dan packet loss tidak dicatat, real-time di sini hanya merujuk pada pembaruan data selama sistem beroperasi.



Gambar 3. Tampilan parameter kelistrikan pada LCD 20×4



Gambar 4. Dashboard monitoring berbasis IoT KITA

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

B. Pengujian Tegangan, Arus, dan Daya Sisi AC

Validasi sisi AC menunjukkan pola pembacaan PZEM-004T yang mengikuti alat ukur acuan. Pada contoh pengukuran hari pertama, tegangan acuan berada pada rentang 238,6–240,9 V, sedangkan PZEM-004T berada pada rentang 237,4–240,3 V (Lihat Tabel 3). Error absolut pada delapan titik yang ditampilkan berada antara 0,24% dan 0,54%, dengan rata-rata dari 15 pasangan pengukuran hari pertama sebesar 0,33%. Titik tertinggi terjadi pada pukul 15.00, yaitu 240,9 V pada AVO Meter dan 240,3 V pada PZEM-004T. Pola kedua alat bergerak serupa, sehingga variasi pembacaan sensor masih mengikuti perubahan tegangan jaringan pada kondisi pengujian.

Tabel 3. Sampel pengukuran tegangan AC hari pertama

Waktu	AVO (V)	PZEM-004T (V)	Error (%)
09:00	238,7	237,4	0,54
10:00	239,8	238,9	0,37
11:00	239,3	238,7	0,25
12:00	240,2	239,2	0,41
13:00	239,0	239,6	0,25
14:00	238,6	237,7	0,37
15:00	240,9	240,3	0,24
16:00	239,2	238,4	0,33
Rata-rata (15 data)	239,4	238,6	0,33

Tabel 4. Rekapitulasi rata-rata hasil pengujian selama lima hari

Parameter	Alat ukur	Sensor	Error (%)
Tegangan AC	237,6 V	237,4 V	0,18
Arus AC	0,96 A	0,95 A	0,02
Daya AC	164,36 W	161,49 W	0,014
Tegangan DC	50,19 V	50,21 V	0,09
Arus DC	17,14 A	17,21 A	0,045
Daya DC	876,6 W	879,8 W	0,004

Rekapitulasi lima hari pada Tabel 4 menunjukkan rata-rata tegangan AC 237,6 V pada alat ukur dan 237,4 V pada sensor, dengan error 0,18%. Arus AC rata-rata 0,96 A dan 0,95 A menghasilkan error 0,02%. Daya tercatat 164,36 W pada nilai acuan dan 161,49 W pada sensor, dengan error 0,014%; karena tidak berasal dari wattmeter independen, hasil ini ditafsirkan sebagai konsistensi pembacaan.

C. Pengujian Baterai dan Perpindahan Sumber

Pada sisi DC, pengujian hari pertama memperlihatkan tegangan baterai turun dari 52,81 V pada awal pengamatan menjadi 45,07 V pada akhir pengamatan (lihat Tabel 5). Arus berubah dari 14,18 A pada 16.30 menjadi 25–27 A pada sebagian besar interval beban, kemudian turun menjadi 0 A saat sumber baterai tidak lagi memasok beban. Daya PZEM-017 berada pada 748,8 W pada awal pengamatan, meningkat di atas 1,2 kW ketika beban aktif, dan menjadi 0 W pada 19.00. Pada saat terakhir tersebut, sistem berpindah ke PLN. Indikator SOC 100%, 80%, 60%, 40%, 20%, dan 0% yang tercatat pada tabel diperlakukan sebagai indikator operasi sistem, bukan hasil validasi sensor SOC independen.

Tabel 5. Pengukuran dan penggunaan baterai hari pertama

Waktu	SOC*	V P/A (V)	I P/C (A)	P (W)
16:30	100	52,81 / 52,83	14,18 / 14,11	748,8
17:00	80	52,26 / 52,27	25,87 / 25,85	1.351,9
17:30	60	51,63 / 51,44	25,83 / 25,80	1.333,6
18:00	40	50,01 / 50,04	25,44 / 25,37	1.272,2
18:30	20	49,42 / 49,33	27,06 / 26,98	1.337,3
19:00	0	45,07 / 45,00	0,00 / 0,00	0,0

** SOC adalah indikator operasi yang tercatat, bukan hasil validasi sensor SOC independen. P/A = PZEM-017/AVO; P/C = PZEM-017/Clamp.*

Rekapitulasi parameter DC menghasilkan rata-rata 50,19 V pada alat ukur dan 50,21 V pada sensor dengan error 0,09%; arus rata-rata 17,14 A dan 17,21 A dengan error 0,045%; serta daya rata-rata 876,6 W dan 879,8 W dengan error 0,004%. Seluruh error yang dilaporkan pada tabel rekap berada di bawah 0,2% (lihat Tabel 4). Temuan tersebut menunjukkan kesesuaian pembacaan pada kondisi pengujian, tetapi tidak dapat digeneralisasikan untuk semua kondisi operasi.

D. Rekapitulasi Pengujian dan Fungsi Sistem

Pada pengujian fungsi sistem, data tersaji pada LCD dan dashboard selama periode observasi serta mengikuti perubahan beban. Frekuensi tercatat di sekitar 50 Hz sepanjang pengamatan, sedangkan energi meningkat secara kumulatif ketika sistem beroperasi. Perpindahan sumber baterai ke PLN teramati pada akhir skenario discharge. Pengujian ini menunjukkan fungsi switching, tetapi belum mengukur waktu transfer atau jumlah ulangan ATS.

IV. PEMBAHASAN

Kesesuaian pembacaan dengan alat ukur acuan merupakan temuan utama karena kualitas data menjadi dasar dari seluruh fungsi monitoring. Pada

sisi AC, selisih rata-rata tegangan dan arus relatif kecil dan rentang error sampel hari pertama tetap subpersen. Temuan ini sejalan dengan kebutuhan smart metering yang menempatkan akuisisi data sebagai dasar diagnosis dan pengelolaan energi (Saavedra dkk., 2020; Tsai dkk., 2023). Penelitian monitoring PV juga menekankan bahwa data yang konsisten lebih penting daripada sekadar banyaknya parameter karena data yang menyimpang dapat menghasilkan interpretasi kondisi sistem yang keliru (Lindig dkk., 2020; Livera dkk., 2022).

Perbedaan kecil antara PZEM-004T/PZEM-017 dan alat ukur pembanding tetap perlu dipahami secara teknis. Nilai error dapat dipengaruhi resolusi instrumen, posisi current transformer, kestabilan terminal, dan perbedaan waktu pembacaan. Perubahan beban juga dapat membuat dua pembacaan tidak identik. Karena itu, nilai 0,18% dan 0,02% dibaca sebagai hasil validasi pada titik uji, bukan konstanta akurasi universal sensor. Pendekatan ini sejalan dengan evaluasi monitoring yang memisahkan kualitas data dari fungsi diagnosis dan pengendalian (Felipe dkk., 2021; Hojabri dkk., 2022).

Interpretasi parameter daya memerlukan kehati-hatian lebih lanjut. Manuskrip sumber menyediakan nilai daya dari sistem, tetapi alat acuan yang dinyatakan adalah AVO Meter dan Clamp Meter sehingga tidak ada wattmeter independen yang dapat menjadi rujukan daya. Secara metodologis, daya sensor dapat dibandingkan dengan nilai yang dihitung dari tegangan, arus, dan faktor daya untuk memeriksa konsistensi internal, tetapi bukan akurasi absolut. Dengan demikian, error daya 0,014% pada AC dan 0,004% pada DC diposisikan sebagai indikator konsistensi hasil pengukuran terintegrasi. Penelitian berikutnya perlu menambahkan power analyzer atau meter energi independen agar validasi daya lebih kuat. Hal ini penting karena pengelolaan energi bangunan memerlukan sumber data yang konsisten (Cavalcanti & Pimenta, 2023; Garcés dkk., 2025).

Temuan pada sisi DC memberikan informasi yang berbeda dari sekadar akurasi sensor. Penurunan tegangan baterai 52,81 V menjadi 45,07 V menunjukkan perubahan kondisi penyimpanan. Arus meningkat ketika beban aktif dan kembali ke nol ketika jalur baterai tidak lagi memasok beban. Pola tersebut sesuai dengan fungsi dasar sistem hybrid: baterai menyuplai beban melalui inverter sampai kondisi tertentu dicapai, kemudian sumber cadangan mengambil alih. Literatur PV-baterai menekankan pentingnya memantau state of charge karena status penyimpanan memengaruhi operasi sistem hybrid (Ohirul Qays dkk., 2020). Namun, pada penelitian ini SOC tidak diukur menggunakan sensor independen atau metode estimasi yang terdokumentasi; nilai SOC pada tabel hanya diperlakukan sebagai indikator operasi yang tercatat. Karena itu, penelitian ini belum menilai ketepatan estimasi SOC atau hubungan matematis tegangan-SOC.

Perpindahan sumber pada pukul 19.00 merupakan kontribusi operasional yang relevan bagi sistem penerangan gedung. Ketika arus baterai turun menjadi 0 A, suplai kemudian berasal dari PLN dan beban tetap menjadi objek monitoring. Secara fungsional, hal ini menunjukkan bahwa monitoring ditempatkan pada sistem yang tidak hanya mempunyai satu sumber energi. Namun, penelitian ini hanya mendokumentasikan kejadian switching pada skenario yang tersedia. Tanpa waktu transfer, jumlah siklus, status interlock, dan pemeriksaan tegangan sebelum-sesudah, hasil tersebut belum cukup untuk menilai performa transien ATS.

Arsitektur dua media tampilan juga mempunyai arti praktis. LCD memberikan jalur informasi lokal yang tetap dapat dibaca ketika pengguna berada di dekat panel, sementara dashboard web menyediakan representasi data dari jarak jauh. Pola ini serupa dengan arsitektur SCADA dan smart metering yang menggabungkan perangkat tepi, jaringan, dan antarmuka visual (Sánchez-Sutil dkk., 2021; Ahmed dkk., 2022; He dkk., 2024). MQTT dipakai sebagai jalur telemetri publish-subscribe sehingga ESP32 berfungsi sebagai pengirim data, sedangkan visualisasi ditempatkan pada dashboard. Boubakr dkk. (2022) dan Shapsough dan Zualkernan (2022) juga menunjukkan pola kombinasi perangkat tepi, jaringan, dan layanan data untuk monitoring PV. Penggunaan perangkat IoT untuk metering juga perlu mempertimbangkan integritas dan keamanan data ketika sistem diperluas ke lingkungan operasional yang lebih luas (Elsisi dkk., 2021).

Kendati demikian, istilah keandalan komunikasi perlu dibatasi oleh data yang tersedia. Selama lima hari, pembaruan LCD dan dashboard teramati berjalan dan log dapat digunakan untuk membaca kondisi pengujian. Akan tetapi, penelitian tidak mengukur latency, packet loss, throughput, uptime jaringan, maupun jumlah reconnect. Pada monitoring PV skala besar, latensi dan karakteristik komunikasi merupakan metrik penting (Eltamaly dkk., 2020). Karena metrik tersebut tidak tersedia, kontribusi yang dapat ditegaskan adalah keberhasilan fungsional integrasi sensor-ESP32-MQTT-dashboard, bukan performa jaringan secara kuantitatif. Penelitian selanjutnya perlu menambahkan pencatatan timestamp pada sisi pengirim dan penerima, penghitung paket, serta log

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

reconnect agar kualitas komunikasi dapat dinilai secara terukur.

Implementasi pada panel gedung parkir memberi konteks lapangan yang berbeda dari miniatur karena pola beban dan kondisi kelistrikan muncul pada lingkungan nyata. Studi monitoring bangunan menunjukkan bahwa penempatan sensor perlu disesuaikan dengan tujuan pengelolaan energi dan pemeliharaan (Yaïci dkk., 2021; Lavrinovica dkk., 2024). Pada penelitian ini, titik ukur masih berfokus pada sisi keluaran panel kendali dan jalur baterai. Belum ada pengukuran langsung intensitas radiasi, suhu modul, kondisi masukan PLTS, atau parameter baterai yang lebih lengkap. Akibatnya, sistem menunjukkan kondisi beban dan penyimpanan, tetapi belum menjelaskan penyebab perubahan dari sisi sumber energi.

Sensor radiasi dan suhu akan membantu menghubungkan perubahan daya dengan kondisi lingkungan, sedangkan pengukuran SOC yang terdokumentasi akan memperbaiki interpretasi baterai. Dashboard dapat dikembangkan dengan analisis historis, alarm batas, dan deteksi anomali. Pengembangan menuju diagnosis otomatis dan monitoring berbasis data juga dilaporkan pada PV (Lim dkk., 2022; Hojabri dkk., 2022; Boucif dkk., 2025). Untuk sistem hybrid, status ATS sebaiknya direkam sebagai event dengan timestamp sehingga setiap perpindahan sumber dapat ditelusuri bersama data tegangan, arus, dan daya.

Secara keseluruhan, hasil penelitian mendukung penggunaan arsitektur ESP32-PZEM-MQTT sebagai lapisan akuisisi dan visualisasi pada panel penerangan berbasis PLTS, dengan validasi lapangan yang menunjukkan kesesuaian pembacaan subpersen untuk parameter yang dibandingkan secara langsung. Kontribusi utama adalah penggabungan monitoring AC-DC, tampilan lokal-jauh, dan pengamatan sumber hybrid pada fasilitas nyata. Cakupan klaim dibatasi oleh durasi uji serta variasi cuaca, beban, karakteristik jaringan, dan kualitas komunikasi yang belum diuji komprehensif. Batasan tersebut penting agar hasil diposisikan sebagai bukti implementasi dan validasi awal, bukan sebagai ukuran kinerja jangka panjang atau generalisasi semua sistem PLTS gedung.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini mencapai tujuan perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring panel kendali penerangan gedung parkir berbasis PLTS 1,65 kWp dan IoT. Sistem berhasil mengintegrasikan PZEM-004T untuk sisi AC, PZEM-017 untuk sisi DC, ESP32 sebagai pengolah data, LCD 20×4 sebagai tampilan lokal, serta dashboard web melalui MQTT sebagai media pemantauan jarak jauh. Validasi lapangan selama lima hari menunjukkan error rata-rata yang dilaporkan sebesar 0,18% untuk tegangan AC, 0,02% untuk arus AC, 0,09% untuk tegangan DC, dan 0,045% untuk arus DC; nilai daya digunakan sebagai indikator konsistensi karena tidak divalidasi dengan wattmeter independen. Sistem juga merekam perubahan beban dan mengamati perpindahan sumber baterai ke PLN pada akhir skenario discharge. Kontribusi penelitian terletak pada demonstrasi arsitektur monitoring AC-DC pada panel fasilitas nyata dengan sumber hybrid. Implikasi praktisnya adalah tersedianya informasi kondisi panel yang dapat diperiksa di lokasi maupun dari jarak jauh. Namun, durasi pengujian, metode SOC, metrik jaringan, waktu transfer ATS, serta pengukuran masukan PLTS masih terbatas. Penelitian lanjutan perlu memperpanjang pengujian lintas cuaca, menambah sensor lingkungan dan SOC, memakai instrumen daya independen, dan mencatat event ATS serta metrik komunikasi secara kuantitatif.

DEKLARASI

Penulis bertanggung jawab atas seluruh proses penelitian, meliputi perumusan masalah dan tujuan penelitian, perancangan sistem monitoring, pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak, pelaksanaan pengujian, pengolahan dan analisis data, serta penyusunan dan penyempurnaan manuskrip. Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus dari lembaga pemerintah, lembaga penelitian, perusahaan, maupun sumber pendanaan eksternal lainnya. Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan yang dapat memengaruhi pelaksanaan penelitian, analisis data, maupun penyusunan manuskrip ini. Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari hasil pengukuran dan pengujian sistem monitoring panel kendali penerangan gedung parkir. Data dan informasi pendukung penelitian dapat diberikan oleh penulis untuk kepentingan akademik yang relevan, dengan tetap memperhatikan batasan penggunaan data dari lokasi penelitian. Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa dan pengujian sistem kelistrikan yang tidak melibatkan manusia sebagai subjek penelitian, sehingga tidak memerlukan persetujuan etik penelitian terhadap subjek manusia. Penulis menyatakan bahwa manuskrip ini merupakan karya ilmiah yang disusun berdasarkan hasil penelitian sendiri dan tidak mengandung fabrikasi atau falsifikasi data.

REFERENSI

Ahmed, M. A., Chavez, S. A., Eltamaly, A. M., Garces, H. O., Rojas, A. J., & Kim, Y.-C. (2022). Toward an intelligent campus: IoT platform for remote monitoring and control of smart buildings. Sensors, 22(23), 9045. https://doi.org/10.3390/s22239045

Boubakr, G., Gu, F., Farhan, L., & Ball, A. (2022). Enhancing virtual real-time monitoring of photovoltaic power systems based on the Internet of Things. Electronics, 11(15), 2469. https://doi.org/10.3390/electronics11152469

Boucif, O. H., Lahouaou, A. M., Boubiche, D. E., & Toral-Cruz, H. (2025). Artificial intelligence of things for solar energy monitoring and control. Applied Sciences, 15(11), 6019. https://doi.org/10.3390/app15116019

Cavalcanti, G. O., & Pimenta, H. C. D. (2023). Electric energy management in buildings based on the Internet of Things: A systematic review. Energies, 16(15), 5753. https://doi.org/10.3390/en16155753

Eltamaly, A. M., Ahmed, M. A., Alotaibi, M. A., Alolah, A. I., & Kim, Y.-C. (2020). Performance of communication network for monitoring utility scale photovoltaic power plants. Energies, 13(21), 5527. https://doi.org/10.3390/en13215527

Elsisi, M., Mahmoud, K., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. F. (2021). Reliable Industry 4.0 based on machine learning and IoT for analyzing, monitoring, and securing smart meters. Sensors, 21(2), 487. https://doi.org/10.3390/s21020487

Felipe, T. A., Melo, F. C., & Freitas, L. C. G. (2021). Design and development of an online smart monitoring and diagnosis system for photovoltaic distributed generation. Energies, 14(24), 8552. https://doi.org/10.3390/en14248552

Garcés, H. O., Godoy, J., Riffo, G., Sepúlveda, N. F., Espinosa, E., & Ahmed, M. A. (2025). Development of an IoT-enabled smart electricity meter for real-time energy monitoring and efficiency. Electronics, 14(6), 1173. https://doi.org/10.3390/electronics14061173

He, W., Baig, M. J. A., & Iqbal, M. T. (2024). An open-source supervisory control and data acquisition architecture for photovoltaic system monitoring using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED. Energies, 17(10), 2295. https://doi.org/10.3390/en17102295

Hojabri, M., Kellerhals, S., Upadhyay, G., & Bowler, B. (2022). IoT-based PV array fault detection and classification using embedded supervised learning methods. Energies, 15(6), 2097. https://doi.org/10.3390/en15062097

Kabalci, Y., Kabalci, E., Sanjeevikumar, P., Holm-Nielsen, J. B., & Blaabjerg, F. (2019). Internet of Things applications as energy Internet in smart grids and smart environments. Electronics, 8(9), 972. https://doi.org/10.3390/electronics8090972

Khalid, W., Jamil, M., Khan, A. A., & Awais, Q. (2024). Open-source Internet of Things-based supervisory control and data acquisition system for photovoltaic monitoring and control using HTTP and TCP/IP protocols. Energies, 17(16), 4083. https://doi.org/10.3390/en17164083

Lavrinovica, I., Judvaitis, J., Laksis, D., Skromule, M., & Ozols, K. (2024). A comprehensive review of sensor-based smart building monitoring and data gathering techniques. Applied Sciences, 14(21), 10057. https://doi.org/10.3390/app142110057

Lim, H.-W., Kim, I.-K., Kim, J.-H., & Shin, U.-C. (2022). Simulation-based fault detection remote monitoring system for small-scale photovoltaic systems. Energies, 15(24), 9422. https://doi.org/10.3390/en15249422

Lindig, S., Louwen, A., Moser, D., & Topic, M. (2020). Outdoor PV system monitoring—Input data quality, data imputation and

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

filtering approaches. Energies, 13(19), 5099. https://doi.org/10.3390/en13195099

Livera, A., Paphitis, G., Theristis, M., Lopez-Lorente, J., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2022). Photovoltaic system health-state architecture for data-driven failure detection. Solar, 2(1), 81–98. https://doi.org/10.3390/solar2010006

Mataloto, B., Ferreira, J. C., & Cruz, N. (2019). LoBEMS—IoT for building and energy management systems. Electronics, 8(7), 763. https://doi.org/10.3390/electronics8070763

Muñiz, R., del Coso, R., Nuño, F., Villegas, P. J., Álvarez, D., & Martínez, J. A. (2024). Solar-powered smart buildings: Integrated energy management solution for IoT-enabled sustainability. Electronics, 13(2), 317. https://doi.org/10.3390/electronics13020317

Ohirul Qays, M., Buswig, Y., Hossain, M. L., & Abu-Siada, A. (2020). Active charge balancing strategy using the state of charge estimation technique for a PV-battery hybrid system. Energies, 13(13), 3434. https://doi.org/10.3390/en13133434

Paredes-Parra, J. M., García-Sánchez, A. J., Mateo-Aroca, A., & Molina-García, A. (2019). An alternative Internet-of-Things solution based on LoRa for PV power plants: Data monitoring and management. Energies, 12(5), 881. https://doi.org/10.3390/en12050881

Saavedra, E., del Campo, G., & Santamaria, A. (2020). Smart metering for challenging scenarios: A low-cost, self-powered and non-intrusive IoT device. Sensors, 20(24), 7133. https://doi.org/10.3390/s20247133

Sánchez-Sutil, F., Cano-Ortega, A., & Hernández, J. C. (2021). Design and implementation of a smart energy meter using a LoRa network in real time. Electronics, 10(24), 3152. https://doi.org/10.3390/electronics10243152

Shapsough, S., & Zualkernan, I. (2022). An IoT-based services infrastructure for utility-scale distributed solar farms. Energies, 15(2), 440. https://doi.org/10.3390/en15020440

Tsai, H.-L., Truong, L. P., & Hsieh, W.-H. (2023). Design and evaluation of wireless power monitoring IoT system for AC appliances. Energies, 16(1), 163. https://doi.org/10.3390/en16010163

Yaïci, W., Krishnamurthy, K., Entchev, E., & Longo, M. (2021). Recent advances in Internet of Things (IoT) infrastructures for building energy systems: A review. Sensors, 21(6), 2152. https://doi.org/10.3390/s21062152