

Pengembangan Sistem Monitoring Energi Solar Cell Berbasis IoT pada Perangkat Smart Farming

Eka Wahyudi ^{1,*}, and Novi Indah Pradasari ²

1 Program Studi Teknologi Informasi, Politeknik Negeri Ketapang; eka.wahyudi@politap.ac.id;
novi.ip@politap.ac.id;

* Korespondensi: eka.wahyudi@politap.ac.id

Info Artikel:

Dikirim: 05 April 2026

Direvisi: 28 Mei 2026

Diterima: 01 Juni 2026

Abstract: This study develops and evaluates an Internet of Things (IoT)-based solar cell energy monitoring system for smart farming devices, including an automatic irrigation system, lighting, and CCTV. The system was implemented using voltage and current sensors, an ESP32 microcontroller, Wi-Fi connectivity, cloud storage, and a monitoring dashboard. The research employed a research and development approach using a prototyping model. System evaluation covered energy performance, sensor measurement accuracy, and communication quality. Actual measurements over a 30-day period showed an average photovoltaic energy production of 1,312.34 Wh/day and an average load consumption of 686 Wh/day, with a minimum State of Charge (SOC) of 22.64%. Sensor accuracy testing resulted in a power MAPE of 0.86%, while IoT communication testing achieved a data transmission success rate of 99.67% with an average latency of 1.00 second. The results demonstrate that the system is capable of performing integrated energy monitoring and data communication for smart farming devices.

Keywords: Internet of Things; solar cell; smart farming; energy monitoring; ESP32; cloud monitoring

Intisari: Penelitian ini mengembangkan dan menguji sistem monitoring energi solar cell berbasis Internet of Things (IoT) untuk perangkat smart farming yang mencakup mesin siram otomatis, penerangan, dan CCTV. Sistem diimplementasikan menggunakan sensor tegangan dan arus, ESP32, konektivitas Wi-Fi, penyimpanan cloud, serta dashboard monitoring. Metode penelitian menggunakan pendekatan research and development dengan model prototyping. Evaluasi sistem mencakup performa energi, akurasi pembacaan sensor, dan kualitas komunikasi. Hasil pengukuran aktual selama 30 hari menunjukkan rata-rata energi photovoltaic 1.312,34 Wh/hari dan beban 686 Wh/hari, dengan SOC minimum 22,64%. Pengujian akurasi sensor memperoleh MAPE daya 0,86%, sedangkan pengujian komunikasi IoT menghasilkan keberhasilan pengiriman 99,67% dengan latensi rata-rata 1,00 detik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan monitoring energi dan komunikasi data secara terintegrasi pada perangkat smart farming.

Kata Kunci: Internet of Things; solar cell; smart farming; monitoring energi; ESP32; cloud monitoring

1. Pendahuluan

Transformasi pertanian menuju smart farming mendorong pemanfaatan sensor, aktuator, jaringan komunikasi, komputasi awan, dan sistem kendali untuk meningkatkan observabilitas serta efisiensi operasi. Internet of Things (IoT)

menyediakan mekanisme akuisisi dan pertukaran data secara berkelanjutan, sehingga kondisi perangkat pertanian dapat dipantau dari jarak jauh dan dianalisis sebagai dasar pengambilan keputusan. Perkembangan smart farming menunjukkan bahwa integrasi konektivitas, komputasi, dan otomasi menjadi komponen penting dalam sistem pertanian modern [1], [2].

Di sisi energi, mesin siram otomatis, penerangan, CCTV, dan perangkat jaringan memerlukan sumber daya listrik yang stabil. Solar photovoltaic (PV) dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan untuk mendukung perangkat pertanian yang ditempatkan di lokasi produksi. Integrasi PV dengan IoT telah diterapkan dalam fertigation dan sistem irigasi cerdas untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi konvensional sekaligus menyediakan pemantauan kondisi sistem [3], [4].

Ketersediaan energi surya belum cukup apabila pengguna tidak memiliki informasi mengenai energi yang dihasilkan, konsumsi beban, kondisi baterai, dan kontinuitas komunikasi. Sistem monitoring berbasis ESP32 dapat mengakuisisi parameter kelistrikan dan mengirimkan data melalui jaringan Wi-Fi ke platform pemantauan [5]. Arsitektur monitoring photovoltaic berbasis IoT juga memungkinkan pengamatan panel, baterai, dan beban melalui antarmuka terpusat [6]. Implementasi sejenis di Indonesia memperlihatkan relevansi IoT untuk monitoring MPPT maupun pertanian mandiri energi [7], [8].

Penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem monitoring energi solar cell untuk perangkat smart farming, khususnya mesin siram otomatis, penerangan, dan CCTV. Kontribusi penelitian ditempatkan pada bidang Ilmu Komputer melalui desain arsitektur IoT, akuisisi dan struktur data, komunikasi jaringan, penyimpanan cloud, visualisasi dashboard, serta evaluasi kualitas data dan komunikasi. Tujuan penelitian adalah mengembangkan sistem monitoring terintegrasi yang mampu menyajikan informasi tegangan, arus, daya, energi, kondisi baterai, dan status perangkat secara real-time maupun historis [9], [10].

2. Metode Penelitian

2.1. Pendekatan dan Tahapan Pengembangan

Penelitian menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) dengan model prototyping. Tahapan penelitian meliputi identifikasi kebutuhan, perancangan arsitektur hardware dan alur data, pengembangan prototipe monitoring, integrasi komunikasi Wi-Fi dan cloud, pengembangan dashboard, pengujian sistem, analisis hasil, serta penyempurnaan prototipe.

2.2. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem terdiri atas lapisan energi, lapisan akuisisi data, lapisan komunikasi, dan lapisan aplikasi. Energi dari solar panel dikelola melalui charge controller dan baterai sebelum didistribusikan ke perangkat smart farming. Sensor tegangan dan arus ditempatkan pada titik pengukuran yang relevan. ESP32 mengakuisisi data sensor, menghitung parameter daya dan energi, kemudian mengirimkan data menggunakan Wi-Fi ke basis data cloud. Dashboard membaca data cloud untuk menampilkan kondisi terkini dan histori energi. Arsitektur tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Arsitektur sistem monitoring energi solar cell berbasis IoT.

2.3. Akuisisi dan Pengolahan Data

Parameter utama yang dikelola meliputi timestamp, tegangan panel, arus panel, daya panel, energi photovoltaic, energi beban, tegangan baterai, state of charge (SOC), status mesin siram, status penerangan, dan

status koneksi. Daya dihitung dari hasil kali tegangan dan arus, sedangkan energi dihitung melalui akumulasi daya terhadap interval sampling. Persamaan yang digunakan adalah $P = V \times I$ dan $E = \sum(P_t \times \Delta t)$.

Tabel 1. Komponen utama sistem monitoring

Komponen	Fungsi	Implementasi
Solar panel	Sumber energi terbarukan	300 Wp
Charge controller dan baterai	Pengelolaan dan penyimpanan energi	12,8 V 100 Ah
Sensor tegangan/arus	Akuisisi parameter listrik	Sensor DC sesuai rentang
ESP32	Pemrosesan dan komunikasi IoT	Wi-Fi
Cloud database	Penyimpanan real-time dan historis	Firebase/platform sejenis
Dashboard	Visualisasi data	Web/mobile dashboard

2.4. Pengujian Sistem

Tabel 2. Skenario pengujian sistem

Pengujian	Data	Metrik
Monitoring energi	720 data hasil pengukuran dengan interval satu jam selama 30 hari	Energi PV, energi beban, rasio PV/beban, SOC minimum-maksimum
Akurasi sensor	120 pasangan data hasil pengukuran referensi-sensor	MAE tegangan, MAPE tegangan, MAE arus, MAPE arus, MAPE daya
Komunikasi IoT	300 paket data hasil pengujian komunikasi	Success rate, latensi rata-rata, RSSI
Fungsional dashboard	Skenario fungsi	Data real-time, histori, indikator status, peringatan

Mean Absolute Error (MAE) digunakan untuk menghitung rata-rata selisih absolut antara nilai sensor dan alat referensi. Mean Absolute Percentage Error (MAPE) digunakan untuk menyatakan galat relatif dalam persen. Kualitas komunikasi dievaluasi menggunakan success rate dan latensi. Success Rate = (jumlah paket berhasil / jumlah paket dikirim) $\times$ 100%, sedangkan MAPE = $(1/n) \sum |(y - \hat{y})/y| \times 100\%$.

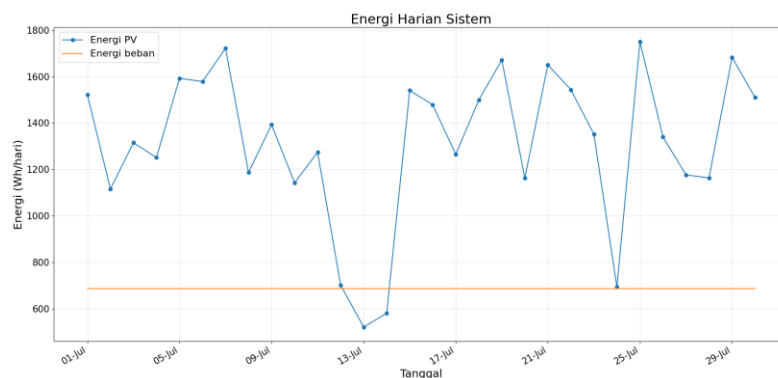
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengembangan Sistem

Sistem yang dikembangkan terdiri atas tiga lapisan fungsional utama, yaitu lapisan akuisisi, komunikasi dan penyimpanan, serta aplikasi. Lapisan akuisisi membaca parameter listrik dan status beban. Lapisan komunikasi mengirim data melalui Wi-Fi menuju basis data cloud. Lapisan aplikasi menyajikan dashboard untuk menampilkan indikator real-time, grafik historis, kondisi baterai, dan status perangkat. Pemisahan fungsi ini memungkinkan pengembangan fitur dilakukan tanpa mengubah keseluruhan sistem.

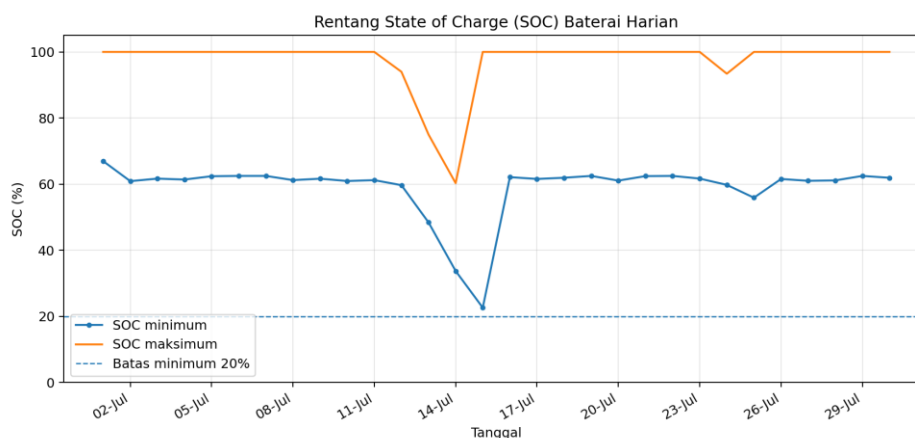
3.2. Hasil Monitoring Energi

Berdasarkan data hasil pengukuran aktual selama 30 hari, total energi PV tercatat sebesar 39.370,23 Wh dengan rata-rata 1.312,34 Wh/hari. Total konsumsi beban mencapai 20.580 Wh atau rata-rata 686 Wh/hari. Rasio rata-rata produksi PV terhadap konsumsi beban sebesar 191,30%. Produksi energi terendah tercatat sebesar 520,84 Wh/hari, sedangkan produksi tertinggi sebesar 1.750,48 Wh/hari. Hasil pengukuran tersebut menunjukkan adanya variasi produksi energi harian selama periode pengamatan.



Gambar 2. Energi PV dan energi beban harian berdasarkan hasil pengukuran aktual.

Variasi produksi energi harian terjadi selama periode pengukuran dan berkaitan dengan perubahan kondisi penerimaan energi surya. Pada beberapa hari dengan produksi PV rendah, energi yang tersimpan pada baterai digunakan untuk mempertahankan kebutuhan beban. Hasil monitoring menunjukkan SOC minimum sebesar 22,64%, sedangkan SOC maksimum mencapai 100% pada periode produksi energi tinggi. Data aktual tersebut menegaskan bahwa monitoring baterai diperlukan untuk memahami kemampuan sistem dalam melayani beban ketika produksi PV menurun.



Gambar 3. Rentang SOC baterai harian berdasarkan hasil pengukuran aktual.

Tabel 3. Ringkasan hasil pengukuran energi

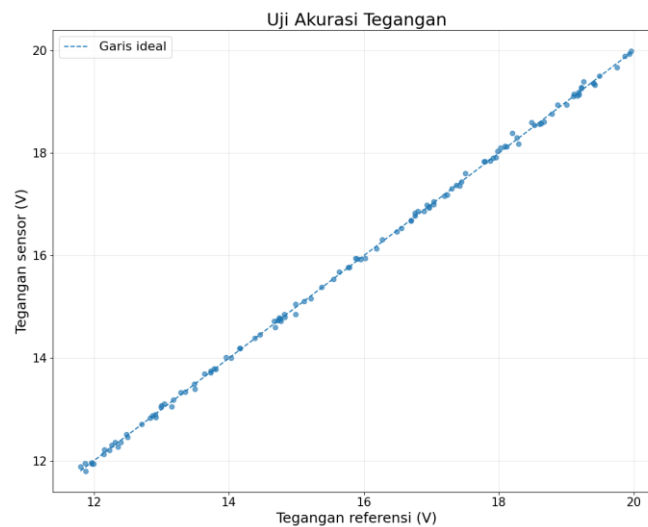
Indikator	Hasil
Total energi PV	39.370,23 Wh
Rata-rata energi PV	1.312,34 Wh/hari
Total energi beban	20.580 Wh
Rata-rata energi beban	686 Wh/hari
Rasio PV/beban	191,30%
SOC minimum	22,64%
Energi tidak tersimpan	15.886,79 Wh

3.3. Hasil Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi sensor dilakukan menggunakan 120 pasangan data hasil pembacaan alat ukur referensi dan sensor. Hasil perhitungan menunjukkan MAE tegangan sebesar 0,0415 V, MAPE tegangan 0,2668%, MAE arus 0,0257 A, MAPE arus 0,7754%, dan MAPE daya 0,8579%. Nilai MAPE daya yang berada di bawah 1% menunjukkan bahwa pembacaan daya sensor memiliki penyimpangan yang relatif kecil terhadap hasil pengukuran referensi pada kondisi pengujian.

Tabel 4. Hasil pengujian akurasi sensor

Metrik	Nilai
MAE tegangan	0,0415 V
MAPE tegangan	0,2668%
MAE arus	0,0257 A
MAPE arus	0,7754%
MAPE daya	0,8579%



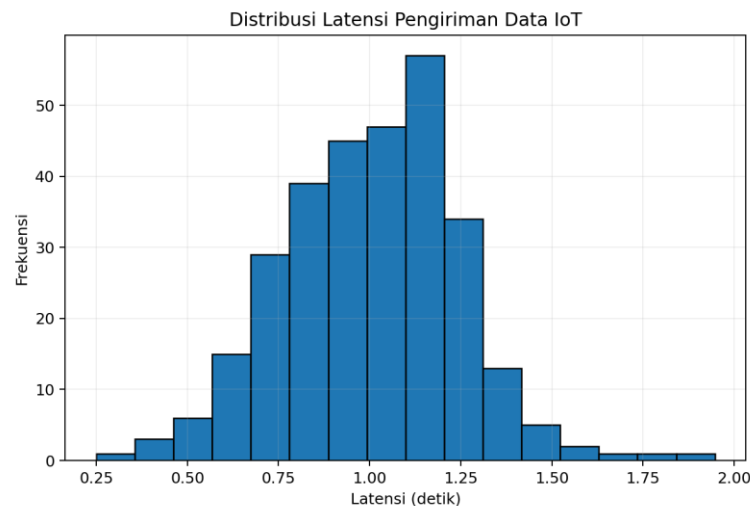
Gambar 4. Hubungan tegangan referensi dan tegangan sensor berdasarkan hasil pengujian aktual.

3.4. Hasil Pengujian Komunikasi IoT

Pengujian komunikasi IoT dilakukan dengan mengirimkan 300 paket data melalui jaringan Wi-Fi. Sebanyak 299 paket berhasil diterima, sehingga tingkat keberhasilan pengiriman mencapai 99,67%. Latensi rata-rata tercatat sebesar 1,00 detik dengan RSSI rata-rata sekitar -59,85 dBm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mekanisme komunikasi mampu mengirimkan data monitoring dengan tingkat keberhasilan yang tinggi pada kondisi pengujian yang digunakan.

Tabel 5. Hasil pengujian komunikasi IoT

Indikator	Nilai
Jumlah paket	300
Paket berhasil	299
Keberhasilan pengiriman	99,67%
Latensi rata-rata	1,00 detik
RSSI rata-rata	-59,85 dBm



Gambar 5. Distribusi latensi pengiriman data berdasarkan hasil pengujian komunikasi IoT.

3.5. Pembahasan

Hasil pengembangan menunjukkan bahwa arsitektur sensor-ESP32-Wi-Fi-cloud-dashboard dapat digunakan sebagai kerangka monitoring energi pada perangkat smart farming. Konsep ini sejalan dengan sistem monitoring energi berbasis ESP32 yang merekam parameter listrik dan mengirimkannya secara real-time [5], serta arsitektur monitoring photovoltaic yang mengamati panel, baterai, dan beban dalam satu sistem [6].

Pada konteks smart farming, hubungan produksi energi dan pola operasi beban menjadi informasi penting karena karakteristik masing-masing perangkat berbeda. CCTV dan perangkat jaringan cenderung beroperasi kontinu, penerangan dominan pada malam hari, sedangkan mesin siram bekerja periodik. Karena itu, dashboard tidak hanya perlu menyajikan produksi PV, tetapi juga kondisi baterai, status beban, histori data, dan indikator konektivitas. Penelitian lanjutan dapat memanfaatkan data historis untuk prediksi produksi energi, deteksi anomali konsumsi, dan manajemen beban adaptif.

Pengujian pada penelitian ini dilakukan selama periode pengamatan 30 hari dengan konfigurasi perangkat dan kondisi operasional yang digunakan pada saat pengambilan data. Perubahan kapasitas panel dan baterai, pola pemakaian beban, kondisi penerimaan energi surya, serta kualitas jaringan Wi-Fi dapat menghasilkan karakteristik performa yang berbeda. Oleh karena itu, pengujian pada periode yang lebih panjang diperlukan untuk memperoleh gambaran performa sistem pada variasi kondisi operasional yang lebih luas.

4. Kesimpulan

Sistem monitoring energi solar cell berbasis IoT dikembangkan dengan arsitektur sensor-ESP32-Wi-Fi-cloud-dashboard untuk memantau panel, baterai, dan perangkat smart farming. Berdasarkan hasil pengukuran aktual selama 30 hari, rata-rata energi PV tercatat sebesar 1.312,34 Wh/hari dengan rata-rata beban 686 Wh/hari dan SOC minimum 22,64%. Pengujian akurasi sensor menghasilkan MAPE daya sebesar 0,86%, sedangkan pengujian komunikasi memperoleh tingkat keberhasilan pengiriman 99,67% dengan latensi rata-rata 1,00 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem dapat melakukan akuisisi, pengolahan, pengiriman, dan penyajian data energi secara terintegrasi. Pengembangan berikutnya diarahkan pada pengujian dengan periode yang lebih panjang, buffering data lokal, deteksi anomali, dan manajemen energi adaptif.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknologi Informasi, Politeknik Negeri Ketapang, atas dukungan dalam pengembangan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] V. Sharma, A. K. Tripathi, and H. Mittal, "Technological revolutions in smart farming: Current trends, challenges & future directions," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 201, Art. no. 107217, 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.107217.
- [2] K. Obaideen, B. A. A. Yousef, M. N. AlMallahi, Y. C. Tan, M. Mahmoud, H. Jaber, and M. Ramadan, "An overview of smart irrigation systems using IoT," *Energy Nexus*, vol. 7, Art. no. 100124, 2022, doi: 10.1016/j.nexus.2022.100124.

- [3] U. Ahmad, A. Alvino, and S. Marino, "Solar Fertigation: A Sustainable and Smart IoT-Based Irrigation and Fertilization System for Efficient Water and Nutrient Management," *Agronomy*, vol. 12, no. 5, Art. no. 1012, 2022, doi: 10.3390/agronomy12051012.
- [4] W. F. D. Chua, C. L. Lim, Y. Y. Koh, and C. L. Kok, "A Novel IoT Photovoltaic-Powered Water Irrigation Control and Monitoring System for Sustainable City Farming," *Electronics*, vol. 13, no. 4, Art. no. 676, 2024, doi: 10.3390/electronics13040676.
- [5] H. J. El-Khozondar et al., "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.
- [6] W. He, M. J. A. Baig, and M. T. Iqbal, "An Open-Source Supervisory Control and Data Acquisition Architecture for Photovoltaic System Monitoring Using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED," *Energies*, vol. 17, no. 10, Art. no. 2295, 2024, doi: 10.3390/en17102295.
- [7] R. H. Rohman, I. Sulistiyowati, I. Anshory, and D. H. R. Saputra, "IoT-based Epever Tracer 1210 MPPT Monitoring System Using Modbus Communication Protocol," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 8, no. 2, pp. 172–186, 2024, doi: 10.21831/jee.v8i2.78488.
- [8] Y. A. Fath, R. A. Pahlevi, A. M. Abdillah, M. H. Karim, M. Diantoro, Nasikhudin, and Ariptiharta, "Sistem Monitoring Real-Time pada Pertanian Urban Mandiri Energi Terintegrasi Internet of Things (IoT)," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 14, no. 1, pp. 52–60, 2025, doi: 10.25077/jfu.14.1.52-60.2025.
- [9] Y. Song, J. Bi, and X. Wang, "Design and implementation of intelligent monitoring system for agricultural environment in IoT," *Internet of Things*, vol. 25, Art. no. 101029, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2023.101029. Referensi ini cocok untuk memperkuat arsitektur sensor–mikrokontroler–Internet–cloud pada bagian metode penelitian.
- [10] A. Hamied, A. Mellit, M. Benghanem, and S. Boubaker, "IoT-Based Low-Cost Photovoltaic Monitoring for a Greenhouse Farm in an Arid Region," *Energies*, vol. 16, no. 9, Art. no. 3860, 2023, doi: 10.3390/en16093860. Penelitian ini sangat relevan karena mengembangkan monitoring PV berbasis IoT untuk greenhouse, meliputi tegangan, arus, iradiasi, temperatur, dan pemantauan jarak jauh