

Design and Development of an Energy Monitoring System for Solar Power Plants and Inverter Output as an Energy Source in Smart Homes

Almunawar*¹, Taufik Muchtar², Zainal Akbar³

^{1,2,3}Politeknik ATI Makassar

220osp620@atim.ac.id¹, taufik@atim.ac.id², zainal@atim.ac.id³

Abstract

The increasing demand for sustainable energy has encouraged the use of solar power systems (PLTS) in households; however, the lack of adequate monitoring systems hinders direct assessment of performance. This study designs a real-time monitoring system based on electrical parameters to evaluate the performance of solar panels using the Research and Development (R&D) method, including system design, device assembly, and testing. The ESP32 microcontroller is used as the main control unit, with the PZEM-017 sensor for measuring DC power and the PZEM-004T sensor for AC power. Data is displayed through a web application developed with PHP and MySQL. The results show that the system can accurately display voltage, current, power, and energy, with an average error rate of 2.3% for the DC sensor and 0.3% for the AC sensor, and overall accuracy above 95%. Data transmission runs smoothly. The system is proven effective for energy monitoring in smart homes and has the potential to be enhanced with features such as automatic notifications and AI-based data analysis.

Keyword: PLTS; IoT; smart home; ESP32; PZEM-004T; PZEM-017

Abstrak

Tingginya kebutuhan energi berkelanjutan mendorong pemanfaatan PLTS di rumah tangga, namun keterbatasan sistem pemantauan menjadi hambatan dalam menilai performa secara langsung. Penelitian ini merancang sistem monitoring real-time berbasis parameter listrik untuk memantau kinerja panel surya menggunakan metode Research and Development (R&D), meliputi desain, perakitan, dan pengujian sistem. Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai unit kendali utama, dengan sensor PZEM-017 untuk pengukuran daya DC dan PZEM-004T untuk daya AC. Data ditampilkan melalui aplikasi web berbasis PHP dan MySQL. Hasil menunjukkan sistem mampu menampilkan tegangan, arus, daya, dan energi dengan akurasi tinggi, dengan error rata-rata 2,3% untuk sensor DC dan 0,3% untuk sensor AC, serta akurasi keseluruhan di atas 95%. Proses transmisi data berjalan lancar. Sistem ini terbukti efektif untuk pemantauan energi di smart home dan berpotensi dikembangkan dengan fitur seperti notifikasi otomatis dan analisis data berbasis AI.

Kata kunci: PLTS; IoT; smart home; ESP32; PZEM-004T; PZEM-017

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi energi terbarukan, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), semakin meningkat seiring dengan kebutuhan energi ramah lingkungan di sektor perumahan. Sistem *smart home* yang mengandalkan sumber energi mandiri membutuhkan pemantauan energi yang akurat agar konsumsi dan efisiensi daya dapat dikendalikan secara optimal. Sistem monitoring menjadi komponen penting dalam mengamati performa panel surya secara *real-time* serta mendeteksi potensi kerusakan atau penurunan efisiensi sejak dini. Penggunaan panel surya tanpa sistem monitoring menyebabkan kurangnya informasi aktual mengenai produksi energi, yang dapat menimbulkan pemborosan atau kehilangan energi (Inayah et al., 2023).

Salah satu tantangan utama dalam implementasi energi terbarukan di sektor perumahan adalah integrasi antara sistem monitoring dan beban listrik rumah tangga. Sistem

monitoring energi yang terhubung ke *smart home* harus mampu mencatat parameter penting seperti tegangan, arus, daya, dan energi secara otomatis serta menyajikan data dalam *platform* digital. Dengan pemantauan yang tepat, pengguna dapat mengatur beban secara efisien dan mencegah pemborosan energi dari *inverter* maupun panel surya. Sistem monitoring yang baik juga mendukung manajemen energi berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk memastikan kenyamanan sekaligus efisiensi biaya listrik (Deyi et al., 2024).

Pemantauan keluaran *inverter* sangat penting karena *inverter* merupakan komponen utama dalam konversi daya dari arus searah (DC) ke arus bolak-balik (AC) untuk digunakan dalam perangkat rumah tangga. Tanpa adanya sistem pemantauan, *inverter* bisa beroperasi di luar batas efisiensi tanpa disadari pengguna. Selain itu, pemantauan parameter keluaran *inverter* seperti tegangan, arus, dan daya dapat membantu pengguna dalam memastikan kualitas listrik yang stabil untuk *smart home*. Penggunaan sistem berbasis mikrokontroler dan antarmuka web memudahkan integrasi dengan sistem pintar yang sudah ada di dalam rumah (Abdurahman et al., 2024).

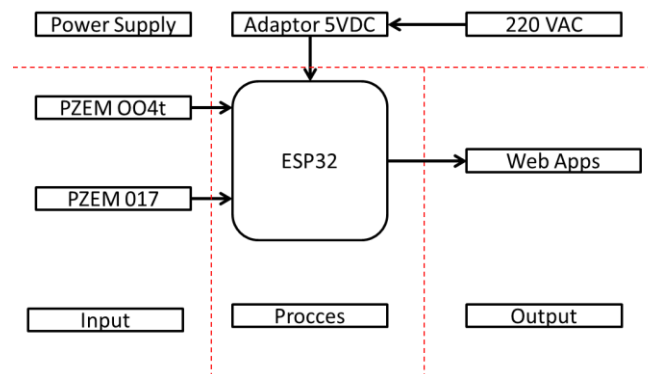
Berdasarkan berbagai permasalahan yang ada, dibutuhkan perancangan sistem monitoring energi yang dapat memantau serta menampilkan parameter dari panel surya dan *inverter* secara langsung. Sistem ini diharapkan dapat menyajikan informasi lengkap mengenai kinerja sistem tenaga surya dalam memenuhi kebutuhan listrik pada *smart home*. Selain itu, keberadaan sistem monitoring ini juga dapat membantu pengguna memahami pola penggunaan energi mereka dan mendorong efisiensi dalam pemanfaatan energi terbarukan secara optimal.

pengembangan ini merupakan tugas akhir yang berjudul : Rancang Bangun Sistem Monitoring Energi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Panel Sebagai Sumber Energi Pada *Smart Home*

2. Metode Penelitian

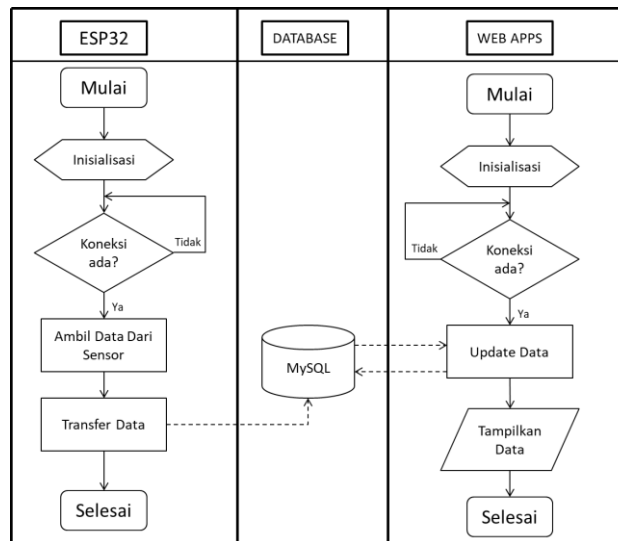
Penelitian dan perancangan tugas akhir ini dilaksanakan pada bulan Mei 2025 hingga bulan Juni 2025 di lab Teknik Tenaga Listrik Politeknik Ati Makassar. Penelitian ini mengikuti metode penelitian dan pembuatan dengan melakukan perancangan, dan pengujian sistem yang dibuat.

Dalam proses membuat alat Rancang Bangun Sistem Monitoring Energi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Panel Sebagai Sumber Energi Pada *Smart Home*. Dibuat blok diagram dan *Flowchart* untuk melihat secara keseluruhan sistem yang dibangun dan hubungan antar sistem tersebut.



Gambar 1 blok diagram

Pada Gambar 1 diatas merupakan blok diagram membuat sistem monitoring energi pembangkit listrik tenaga surya dan keluaran inverter sebagai sumber energi pada *smart Home* sistem kerja dari alat ini berpusat pada ESP32 yang berfungsi sebagai pengendali utama, dengan *input* dan *output* yang terhubung. Kinerja panel surya dipantau oleh sensor yang mengirimkan data hasil pengukuran ke ESP32. Data ini kemudian dikirimkan ke Web Apps, yang berfungsi sebagai antarmuka pada perangkat Android.



Gambar 2 Flowchart

Langkah awal dimulai dari perangkat ESP32, yang melakukan inisialisasi terhadap sistem dan sensor terlebih dahulu. Setelah itu, ESP32 akan mengecek ketersediaan koneksi internet. Bila koneksi belum tersedia, perangkat akan kembali ke tahap inisialisasi dan mengulangi proses tersebut hingga koneksi berhasil diperoleh. Jika koneksi tersedia, ESP32 akan mengambil data dari sensor, lalu mengirimkan data tersebut ke MySQL, sebuah layanan penyimpanan data. Setelah proses pengiriman selesai, maka tugas ESP32 pun selesai.

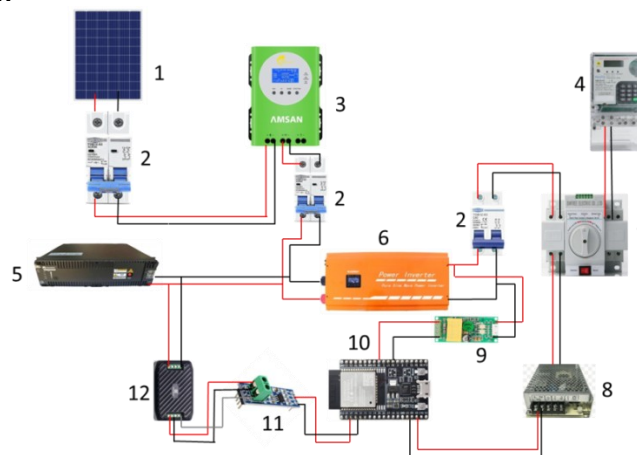
Pada bagian *DataBase*, data yang diterima dari ESP32 akan disimpan di dalam MySQL secara *real-time*, yang memungkinkan data tersebut dapat segera diakses oleh perangkat lain, seperti aplikasi pada Android.

Sementara itu, di sisi Android, proses dimulai dengan inisialisasi aplikasi. Selanjutnya, sistem Android akan memverifikasi koneksi internet. Jika tidak ada koneksi, sistem akan kembali ke tahap awal. Namun jika koneksi tersedia, aplikasi akan mengakses dan memperbarui data dari MySQL, lalu menampilkan informasi tersebut kepada pengguna melalui aplikasi antarmuka. Setelah data berhasil ditampilkan, maka proses pada aplikasi Android dianggap selesai.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini menguraikan proses perancangan alat, pengujian sensor arus searah dan bolak-balik, tampilan antarmuka web, serta analisis kinerja sistem monitoring energi pada *smart home*.

3.1. Hasil Penelitian



Gambar 3 Wiring diagram

Gambar 3 merupakan sebuah sistem pengkabelan pada alat monitoring panel surya menggunakan mikrokontroler ESP32 yang memiliki dua sensor sebagai *input* yaitu Pzem 004t untuk AC dan Pzem 017 untuk DC. Di bagian kiri atas terdapat panel surya yang menghasilkan listrik arus searah (DC), lalu dialirkan melalui pemutus sirkuit (MCB) sebagai perlindungan awal, sebelum menuju MPPT, Perangkat ini mengatur pengisian daya ke baterai agar aman dari kelebihan atau kekurangan pengisian. Energi yang telah diatur selanjutnya disimpan ke dalam baterai, kemudian diteruskan ke inverter yang berfungsi mengubah arus DC menjadi arus AC untuk digunakan oleh peralatan rumah tangga. Rangkaian ini juga menggunakan sistem saklar otomatis (ATS) yang mengatur perpindahan daya dari PLTS ke jaringan listrik PLN, serta tambahan MCB sebagai perlindungan lebih lanjut. Terintegrasi pula dengan modul mikrokontroler ESP32 yang mengontrol dan memantau sistem secara otomatis menggunakan sensor arus AC DC. Modul ini memungkinkan pemantauan dan kendali sistem dari jarak jauh melalui koneksi internet.

3.2. Pembahasan

Pengujian pembacaan ketiga sensor yakni sensor PZEM 004T dan sensor PZEM 017 dilakukan untuk mengetahui akurasi dalam mengukur tegangan, arus, daya, dan energi.

Tabel 1 Perbandingan sensor PZEM 017(DC) dengan alat ukur per jam

Jam	Sensor DC			Alat Ukur		
	V(volt)	I (amper)	P(kw)	V(volt)	I (amper)	P(kw)
8:24	48.5	14.5	703.25	47.5	14.8	70 3
9:00	49.1	21.6	1060.56	45.8	21.3	975.54
10:00	50	27.8	1390	45	27.5	1237.5
11:04	50.4	31.6	1592.64	51.4	31.2	1603.68
12:10	50.8	23.8	1209.04	50.5	23.2	1171.6
13:23	54.4	11.9	647.36	55.6	11.5	639.4
14:05	54.4	13.2	718.08	54.5	13.8	752.1
15:10	53.2	4.5	239.4	53.1	4.5	238.95
16:06	53.2	6.1	324.52	53.1	6.8	361.08
17:16	49.5	2.2	108.9	48.9	2.5	122.25
18:10	49.5	0.4	19.8	49.5	0.4	19.8
19:00	49.3	0	0	49.1	0	0
Rata-rata	51.0	13.1	667.8	50.3	13.1	652.1

Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian sensor PZEM-017 dibandingkan dengan alat ukur. Tegangan rata-rata sensor tercatat 51,0 volt, sedikit lebih tinggi dari alat ukur sebesar 50,3 volt. Arus rata-rata kedua alat sama, yakni 13,1 amper. Sementara itu, daya rata-rata sensor sebesar 667,8 kW, lebih tinggi 15,7 kW dari alat ukur. Selisih ini kemungkinan disebabkan oleh pembacaan tegangan dan arus sensor yang sedikit lebih besar. Secara umum, hasil pengukuran dari kedua alat cukup konsisten dan akurat. Sensor lebih sensitif terhadap perubahan, sedangkan alat ukur lebih stabil dan presisi.

Tabel 2 Pengujian sensor PZEM 004T (AC) dengan alat ukur per jam

No.	Jam	Sensor			Alata Ukur		
		V(volt)	I (amper)	P(kw)	V(volt)	I (amper)	P(kw)
1	8:00	221	1.17	260	220	1.18	265
2	9:00	221	0.95	210	221	0.93	205
3	10:00	220	1.85	410	221	1.8	425
4	11:00	221	1.04	250	220	1.05	240
5	12:00	221	1.22	270	221	1.25	275
6	13:00	220	1.31	290	220	1.32	285
7	14:00	221	0.85	190	220	0.83	195
8	15:00	220	2.04	450	221	2.06	456
9	16:00	221	1.04	230	220	1.07	240
10	17:00	220	1.04	230	220	1.01	228
11	18:00	220	1.36	300	221	1.33	310
12	19:00	220	1.77	390	220	1.77	394
Rata-rata		220.50	1.30	290.00	220.42	1.30	293.17

Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian sensor PZEM-004T dibandingkan alat ukur dalam mengukur tegangan, arus, dan daya. Tegangan rata-rata sensor sebesar 220,50 volt dan alat ukur 220,42 volt, dengan selisih hanya 0,08 volt. Arus rata-rata keduanya sama, yaitu 1,30 ampere. Daya rata-rata sensor 290,00 kW, sedangkan alat ukur 293,17 kW, selisih 3,17 kW masih dalam batas wajar. Perbedaan kecil ini disebabkan oleh variasi tegangan dan arus. Secara keseluruhan, kedua alat menunjukkan hasil yang sejalan dan presisi, serta dapat diandalkan untuk pemantauan daya listrik harian.

Tabel 3 Hasil data pengukuran sensor Pzem 017 (DC)

No.	Jam	DC			
		V(volt)	I(amper)	P(kw)	E(kWh)
1	8:24	48.5	14.5	0.7	0.34
2	9:00	49.1	21.6	1.1	0.89
3	10:00	50	27.8	1.4	2.12
4	11:04	50.4	31.6	1.6	3.96
5	12:10	50.8	23.8	1.2	6.17
6	13:23	54.4	11.9	0.6	7.32
7	14:05	54.4	13.2	0.7	7.63
8	15:10	53.2	4.5	0.2	8.64
9	16:06	53.2	6.1	0.3	8.85
10	17:16	49.5	2.2	0.1	9.21
11	18:10	49.5	0.4	0.0	9.22
12	19:00	49.3	0	0.0	0.00
Rata-rata		51.025	13.133	0.7	5.36

Tabel 3 menunjukkan hasil pengukuran arus searah dari panel surya menggunakan sensor PZEM-017 dengan parameter tegangan, arus, daya, dan energi. Tegangan rata-rata tercatat stabil di 51 volt, dengan puncak 54,4 volt pada pukul 13:23. Arus meningkat dari 14,5 A di pagi hari hingga puncaknya 31,6 A pukul 11:04, lalu menurun hingga nol pada malam hari. Daya mengikuti pola arus dengan puncak 1,6 kW, dan energi harian tercatat mencapai 9,21 kWh, dengan rata-rata 5,36 kWh. Panel bekerja paling optimal antara pukul 10.00 hingga 16.00 saat intensitas cahaya maksimal.

Tabel 4 Hasil data pengukuran sensor Pzem 004t (AC)

Jam	AC			
	V (volt)	I (amper)	P (kw)	E (kWh)
8:24	221	1.17	260	0.26
9:00	221	0.95	210	0.21
10:00	220	1.85	410	0.41
11:04	221	1.04	250	0.25
12:10	221	1.22	270	0.27
13:23	220	1.31	290	0.29
14:05	221	0.85	190	0.19
15:10	220	2.04	450	0.45
16:06	221	1.04	230	0.23
17:16	220	1.04	230	0.23
18:10	220	1.36	300	0.30
19:00	220	1.77	390	0.39
Rata-rata	220.5	1.303	290	0.29

Tabel 4 menunjukkan hasil pengukuran arus AC dari inverter ke rumah menggunakan sensor PZEM-004T, dengan parameter tegangan, arus, daya, dan energi. Tegangan stabil di kisaran 220–221 volt, menandakan output inverter konsisten. Arus berfluktuasi sesuai beban, dari 0,85 hingga 2,04 ampere, dengan rata-rata 1,3 ampere. Daya tertinggi tercatat 450 watt pada pukul 15:10, dengan rata-rata 290 watt. Energi tertinggi mencapai 0,45 kWh per jam dan rata-rata 0,29 kWh. Data menunjukkan sistem inverter bekerja stabil dan responsif terhadap kebutuhan rumah, khususnya saat siang hari saat beban meningkat.

Tabel 5 Data hasil pengukuran sensor Pzem 017 dan sensor Pzem 004t

TANGGAL	ENERGI Output DC (kWh)	ENERGI Output AC (kWh)
16 juni 2025	6.455	5.96
17 juni 2025	6.495	4.93
18 juni 2025	9.222	6.4
19 juni 2025	7.156	5.98
20 juni 2025	5.148	5.48

Tabel 5 menunjukkan hasil pengukuran energi DC dan AC selama lima hari. Energi DC tertinggi tercatat pada 18 Juni 2025 sebesar 9,222 kWh dan terendah pada 20 Juni 2025 sebesar 5,148 kWh, dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari. Rata-rata energi DC harian adalah 6,895 kWh. Energi AC juga menunjukkan pola serupa, dengan nilai tertinggi 6,4 kWh dan terendah 4,93 kWh. Fluktuasi ini mencerminkan pengaruh kondisi cuaca terhadap produksi energi. Data ini membantu pengguna mengevaluasi performa sistem dan mengoptimalkan pemanfaatan energi surya sesuai kondisi lingkungan.

Tabel 6 Hasil perbandingan data serial DC dengan Web App

Jam	Data Serial DC				Web App			
	V(volt)	I(amper)	P(kw)	E(kWh)	V(volt)	I(amper)	P(kw)	E(kWh)
8:24	48.5	14.5	0.7	0.34	48.5	14.5	0.7	0.34
9:00	49.1	21.6	1.1	0.89	49.1	21.6	1.1	0.89
10:00	50	27.8	1.4	2.12	50	27.8	1.4	2.12
11:04	50.4	31.6	1.6	3.96	50.4	31.6	1.6	3.96
12:10	50.8	23.8	1.2	6.17	50.8	23.8	1.2	6.17
13:23	54.4	11.9	0.6	7.32	54.4	11.9	0.6	7.32

Jam	Data Serial DC				Web App			
	V(volt)	I(amper)	P(kw)	E(kWh)	V(volt)	I(amper)	P(kw)	E(kWh)
14:05	54.4	13.2	0.7	7.63	54.4	13.2	0.7	7.63
15:10	53.2	4.5	0.2	8.64	53.2	4.5	0.2	8.64
16:06	53.2	6.1	0.3	8.85	53.2	6.1	0.3	8.85
17:16	49.5	2.2	0.1	9.21	49.5	2.2	0.1	9.21
18:10	49.5	0.4	0.0	9.22	49.5	0.4	0.0	9.22
19:00	49.3	0	0.0	0.00	49.3	0	0.0	0.00
Rata-rata	51.0	13.1	0.67	5.36	51.0	13.1	0.67	5.36

Tabel 6 pembacaan data antara serial DC dan Web App untuk tegangan, arus, daya, dan energi menunjukkan kesamaan yang konsisten di setiap pengukuran. Contohnya, pada pengukuran pertama tercatat 51,0 volt, 13,1 ampere, 0,67 kW, dan 5,36 kWh untuk masing-masing parameter, baik di data sensor maupun Web App. Hal ini membuktikan bahwa Web App mampu menampilkan data secara akurat dan real-time. Sistem monitoring ini efektif digunakan dalam pemantauan jarak jauh berbasis IoT dengan mikrokontroler ESP32, sehingga

Jam	Data Serial AC				Web App			
	V(volt)	I(amper)	P(kw)	E(kWh)	V(volt)	I(amper)	P(kw)	E(kWh)
8:24	221	1.17	260	0.26	221	1.17	260	0.26
9:00	221	0.95	210	0.21	221	0.95	210	0.21
10:00	220	1.85	410	0.41	220	1.85	410	0.41
11:04	221	1.04	230	0.25	221	1.04	230	0.25
12:10	221	1.22	270	0.27	221	1.22	270	0.27
13:23	220	1.31	290	0.29	220	1.31	290	0.29
14:05	221	0.85	190	0.19	221	0.85	190	0.19
15:10	220	2.04	450	0.45	220	2.04	450	0.45
16:06	221	1.04	230	0.23	221	1.04	230	0.23
17:16	220	1.04	230	0.23	220	1.04	230	0.23
18:10	220	1.36	300	0.30	220	1.36	300	0.30
19:00	220	1.77	390	0.39	220	1.77	390	0.39
Rata-rata	220.5	1.3	288.3	0.3	220.5	1.3	288.3	0.3

memudahkan pengguna memantau kinerja panel surya dari berbagai perangkat.

Tabel 7 Hasil perbandingan data serial AC dengan Web App

Berdasarkan Tabel 4.16, pembacaan data antara serial AC dan Web App untuk tegangan, arus, daya, dan energi menunjukkan kesamaan yang konsisten pada setiap pengukuran. Sebagai contoh, pengukuran pertama mencatat 220,5 volt, 1,3 ampere, 288,3 watt, dan 0,3 kWh, baik pada data sensor maupun Web App. Kesamaan ini membuktikan bahwa Web App dapat menampilkan data secara akurat dan real-time. Sistem monitoring berbasis mikrokontroler ESP32 ini terbukti efektif untuk pemantauan jarak jauh, sehingga pengguna dapat mengakses informasi kelistrikan dengan mudah dan andal melalui platform berbasis *Internet of Things* (IoT).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem monitoring ini menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama, dengan sensor PZEM-017 untuk membaca energi DC dari panel surya dan PZEM-004T untuk energi AC dari *inverter*. Hasil pengujian menunjukkan akurasi tinggi, dengan *error* rata-rata di sisi DC di bawah 3,5% dan akurasi di atas 97%, serta *error* AC sebesar 2,4% dengan akurasi 97,6%. Data yang ditampilkan Web App konsisten dengan alat ukur Clamp Meter. Secara keseluruhan, sistem ini berhasil mencapai tujuan penelitian sebagai

sistem pemantauan energi yang andal, akurat, dan mendukung implementasi *smart home* berbasis energi ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdurahman, A.-, Rosiana, E.-, Kusnadi, H.-, & Raharjo, T.-. (2024). Sistem Monitoring Panel Surya Berbasis Web. *Jurnal Sistem Dan Teknologi Informasi (JustIN)*, 12(3), 543. <https://doi.org/10.26418/justin.v12i3.79793>
- [2] Alfa Z Fikri, M., Sakhalish Zayyan, M., Edo Mikrado, J., B Sulistiawati, I., Soetedjo, A., Somawirata, I. K., & Sotyohadi, S. (2022). Sistem SCADA pada miniatur Smart Home Bertenaga Surya. *Jurnal FORTECH*, 3(2), 93–100. <https://doi.org/10.56795/fortech.v3i2.106>
- [3] Ansari, S., Ayob, A., Lipu, M. S. H., Saad, M. H. M., & Hussain, A. (2021). A Review of Monitoring Technologies for Solar PV Systems Using Data Processing Modules and Transmission Protocols: Progress, Challenges and Prospects. *Sustainability*, 13(15), 8120. <https://doi.org/10.3390/su13158120>
- [4] Anwar, S., Artono, T., & Teknik Elektro Politeknik Negeri Padang, J. (2019). Pengukuran Energi Listrik Berbasis PZEM-004T. *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 3(1), 1–5.
- [5] Deyi, D., Satriyo, S., Syamsudin, M., Rianda, R., & Ilyas Hadikusuma, M. (2024). Monitoring Tegangan, Arus, dan Daya Pada PLTS 20WP Berbasis Internet of Things (IoT). *Electrical Network Systems and Sources*, 3(2), 116–120. <https://doi.org/10.58466/entries.v3i2.1644>
- [6] Gani, A. (2021). Fossil fuel energy and environmental performance in an extended STIRPAT model. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126526>
- [7] Imran, A., & Rasul, M. (2020). Pengembangan Tempat Sampah Pintar Menggunakan Esp32. *Jurnal Media Elektrik*, 17(2), 2721–9100. <https://doi.org/10.59562/metrik.v17i2.5398>
- [8] Inayah, I., Hayati, N., Nurcholis, A., Dimiyati, A., & Prasetya, M. G. (2023). Realtime Monitoring System of Solar Panel Performance Based on Internet of Things Using Blynk Application. *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, 7(2), 135–143. <https://doi.org/10.21831/elinvo.v7i2.53365>
- [9] Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894–900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>
- [10] Katagiri, N. (2022). Two explanations for the paucity of cyber-military, cross-domain operations. *Journal of Cybersecurity*, 8(1). <https://doi.org/10.1093/cybsec/tyac002>
- [11] Krishnaraj, N., Elhoseny, M., Lydia, E. L., Shankar, K., & ALDabbas, O. (2021). An efficient radix trie-based semantic visual indexing model for large-scale image retrieval in cloud environment. *Software - Practice and Experience*, 51(3), 489–502. <https://doi.org/10.1002/spe.2834>
- [12] Lim, C. H., Lim, S., How, B. S., Ng, W. P. Q., Ngan, S. L., Leong, W. D., & Lam, H. L. (2021). A review of industry 4.0 revolution potential in a sustainable and renewable palm oil industry: HAZOP approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110223. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110223>
- [13] Mhd Firza Ryzaaldy, Muhammad Fikry, & Said Fadlan Anshari. (2024). IoT-Integrated Home Energy Management System with Real-Time Monitoring and Solar Panel Optimization. *Proceedings of Malikussaleh International Conference on Multidisciplinary Studies (MICoMS)*, 4, 00031. <https://doi.org/10.29103/micoms.v4i.949>
- [14] Mubarak 'aafi, A., Jamaaluddin, J., & Anshory, I. (2022). Implementasi Sensor Pzem-017 Untuk Monitoring Arus, Tegangan dan Daya Pada Instalasi Panel Surya dengan Sistem Data Logger Menggunakan Google Spreadsheet dan Smartphone. *SNESTIK Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, Dan Teknik Informatika*, 191. <https://ejournal.itats.ac.id/snestikdanhttps://snestik.itats.ac.id>

- [15] Pimpalkar, R., Sahu, A., & Roy, A. (2025). A smart solar PV monitoring system using internet of things (IoT). *Concurrent Engineering*.
<https://doi.org/10.1177/1063293X251325155>
- [16] Putra, D. R. R. P., & Joko, J. (2024). Perancangan Alat Monitoring Kinerja PLTS Off Grid Berbasis IoT Menggunakan NodeMCU ESP 32 dan Telegram. *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 13(3), 248–255. <https://doi.org/10.26740/jte.v13n3.p248-255>