

Sistem Monitoring dan Kontrol Beban Rumah Pintar Berbasis PLTS 100 Wp

Lean Teguh Harianto¹, Mahendra Widyartono², Reza Rahmadian³, Ayusta Lukita Wardani⁴

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

Article Info

Article history:

Diterima 16 Juli 2026
Direvisi 20 Juli 2026
Diterbitkan 21 Juli 2026

Keywords:

PLTS
Raspberry Pi 4
Node-RED
PZEM-017T
PZEM-004T

ABSTRAK

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat mendorong pemanfaatan energi terbarukan melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Penelitian ini bertujuan merancang sistem PLTS 100 Wp dengan pemantauan *real-time*, penyimpanan data historis, dan kontrol beban rumah pintar menggunakan Raspberry Pi 4, sensor PZEM-017T dan PZEM-004T, serta Node-RED. Metode penelitian yang digunakan adalah *Research and Development* (R&D). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki nilai *error* tegangan sebesar 0,31%, sedangkan sensor PZEM-017T memiliki nilai *error* tegangan dan arus di bawah 1%, keduanya masih dalam batas toleransi akurasi sensor sebesar $\pm 1\%$. Sistem mampu melakukan pemantauan *real-time* dengan interval pembacaan setiap 5 detik, menyimpan data historis harian hingga bulanan, serta mengendalikan beban secara otomatis menyesuaikan pola aktivitas penghuni rumah maupun secara manual melalui *smartphone*. Selama bulan Juni 2026, energi yang dihasilkan panel surya tercatat sebesar 9,554 kWh, sedangkan energi yang dikonsumsi beban sebesar 7,808 kWh, sehingga sistem PLTS 100 Wp terbukti mampu memenuhi seluruh kebutuhan beban domestik dengan surplus energi sebesar 1,746 kWh.

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



Corresponding Author:

Lean Teguh Harianto
Program Studi Sarjana Terapan Teknik Listrik, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia
Email: lean.22091387054@mhs.unesa.ac.id

1. PENDAHULUAN

Peningkatan permintaan energi listrik secara global dalam dekade terakhir menjadi tantangan signifikan, dengan sektor rumah tangga sebagai salah satu kontributor utama konsumsi pascapandemi. Berdasarkan laporan dari International Energy Agency (IEA) [1], penggunaan listrik secara global meningkat lebih dari 4% setelah pandemi COVID-19, di mana sektor domestik menjadi salah satu pemicu utama [2]. Di Indonesia, permintaan listrik terus meningkat, sedangkan pasokan energi masih sangat bergantung pada sumber energi fosil seperti gas alam dan batu bara [3]. Ketergantungan pada energi fosil ini menyebabkan emisi CO₂ yang tinggi dan mengancam keberlanjutan lingkungan [3]. Oleh karena itu, percepatan pemanfaatan energi terbarukan menjadi prioritas mendesak. Sebagai negara tropis, Indonesia memiliki potensi iradiasi matahari harian yang mencapai rata-rata sekitar 4,8 kWh/m²/hari, sehingga sangat cocok untuk pengembangan sistem fotovoltaik skala rumah tangga [4].

Meskipun potensi energi matahari melimpah, penerapan PLTS dalam sektor domestik masih menghadapi kendala teknis berupa rendahnya efisiensi konversi modul akibat variasi intensitas cahaya matahari, ketidaksesuaian kapasitas komponen, serta ketiadaan sistem pemantauan kinerja yang berkelanjutan [5]. Pengalihan energi dari panel surya ke perangkat elektronik rumah tangga yang tidak diatur dengan baik turut memicu pemborosan daya dan memperpendek usia pakai komponen kritis, terutama baterai dan inverter [6]. Salah satu solusi untuk mengatasi

masalah tersebut adalah penerapan teknologi pemantauan parameter kelistrikan secara real-time berbasis single-board computer Raspberry Pi 4 dan otomatisasi beban cerdas untuk menekan konsumsi energi harian lingkungan domestik.

Beberapa studi terdahulu telah merancang sistem pemantauan daya PLTS berbasis Internet of Things (IoT). Gunoto dkk. [7] merancang sistem monitoring daya panel surya berbasis IoT untuk memantau tegangan, arus, dan daya secara langsung melalui jaringan internet namun penelitian tersebut belum dilengkapi dengan kendali beban rumah pintar maupun penyimpanan data historis jangka panjang. Sementara itu, penelitian otomatisasi oleh Kiswantonno dkk. [8] membuktikan bahwa implementasi IoT pada sistem rumah tangga dapat menurunkan konsumsi energi sekaligus meningkatkan efektivitas pengelolaan beban, tetapi belum menghubungkannya dengan sumber energi terbarukan. Integrasi PLTS dengan sistem fotovoltaik dan penyimpanan energi terbukti mampu menekan biaya operasional prosumer hingga 14,88% sekaligus mengurangi emisi [9]. Deyi dkk. [10] hanya berfokus pada pemantauan parameter sesaat tanpa menyediakan penyimpanan data historis, sedangkan Njoka dkk. [11] meneliti pemantauan jarak jauh tanpa fitur dashboard analisis performa terpadu. Berdasarkan kajian tersebut, terdapat gap penelitian berupa belum adanya sistem yang mengintegrasikan monitoring real-time PLTS, penyimpanan data historis jangka panjang, dan kontrol beban rumah pintar dalam satu platform otomasi lokal.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan PLTS yang mampu menampilkan daya panel surya (DC) dan keluaran inverter (AC) secara real-time, sekaligus mengendalikan beban rumah pintar menggunakan otomatisasi lokal (Local Automation System) berbasis Raspberry Pi 4 dan Node-RED, dilengkapi penyimpanan riwayat performa harian hingga bulanan [7, 8, 10, 11]. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi sistem monitoring berbasis InfluxDB dan Grafana dengan kontrol beban rumah pintar dalam satu platform otomasi lokal tanpa ketergantungan pada layanan cloud, sehingga sistem dapat beroperasi secara mandiri meskipun tidak terhubung dengan internet.

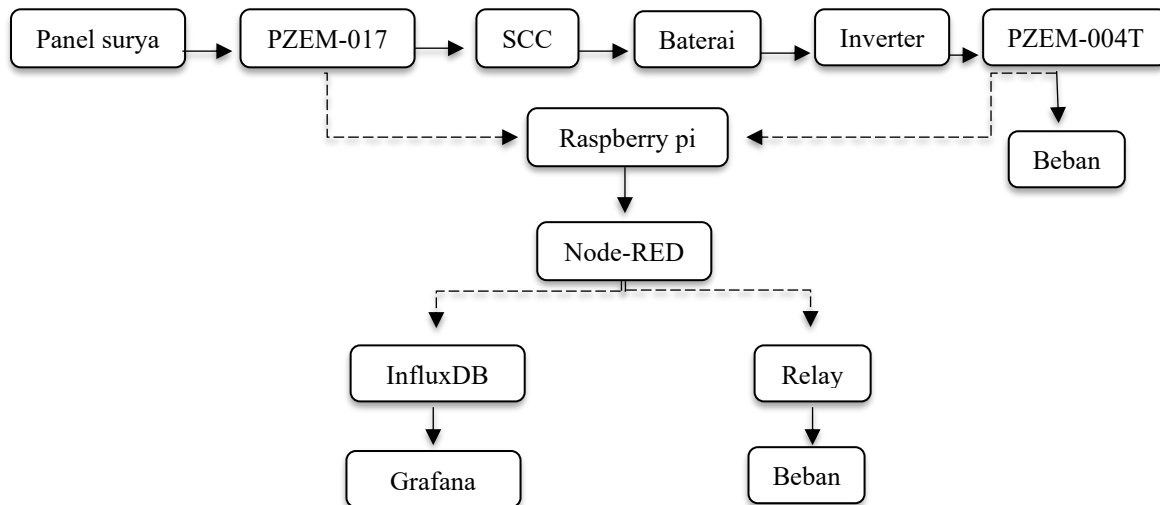
2. METODE

Penelitian ini menerapkan metode *Research and Development* (R&D) yang mengacu pada model pengembangan Sugiyono [12] dengan tahapan meliputi identifikasi masalah, pengumpulan data, perancangan sistem, implementasi, uji coba, serta analisis data produk. Pengambilan data dilaksanakan di Desa Panglungan, Kecamatan Wonosalam, Kabupaten Jombang. Kebutuhan kapasitas komponen PLTS dihitung secara presisi berdasarkan beban domestik berupa 2 lampu LED masing-masing berdaya 13 W dengan waktu operasi harian terencana selama 12 jam, sehingga menghasilkan total konsumsi daya harian sebesar 312 Wh/hari.

Kapasitas daya pemakaian dan penentuan ukuran modul panel surya *monocrystalline* dihitung menggunakan formula Setiawan dkk. [13] dan prinsip konversi energi surya Rahma dkk. [14]. Menggunakan nilai parameter matahari puncak (*peak sun hours* / PSH) selama 5 jam dan faktor efisiensi panel 80% [14], kapasitas panel dihitung dengan membagi kebutuhan daya harian (312 Wh) dengan hasil perkalian PSH dan efisiensi panel, sehingga diperoleh nilai teoritis sebesar 78 Wp. Kapasitas ini dibulatkan sesuai ketersediaan komponen di pasaran menjadi modul panel surya 100 Wp [15]. Kebutuhan media penyimpanan baterai berbasis litium-ion tipe LiFePO₄ ditentukan berdasarkan konsumsi energi harian, tegangan sistem 12 V, nilai pengurasan maksimum (*depth of discharge* / DoD) sebesar 80%, dan jumlah hari otonomi 1,5 hari melalui pendekatan rumus Arief dkk. [16], yang menghasilkan nilai pembulatan kapasitas baterai sebesar 52 Ah 12 V dengan pengamanan sistem *Battery Management System* (BMS) [17, 18]. Perhitungan kapasitas *Solar Charge Controller* (SCC) menghasilkan nilai 7,26 A dari perkalian arus hubung singkat (I_{sc}) panel sebesar 5,81 A dengan faktor keamanan 125%, sehingga diaplikasikan SCC berating 10 A [19]. Konversi daya searah menjadi daya bolak-balik menggunakan inverter tipe *pure sine wave* berdaya nominal 300 W untuk menjamin suplai aman beban AC [20, 21].

Sistem pemantauan runtun waktu (*time-series*) kelistrikan dan kontrol beban dibangun dengan mengintegrasikan minikomputer Raspberry Pi 4 [22] dengan dua perangkat sensor parameter listrik: sensor PZEM-017 dengan *shunt* eksternal 50 A untuk mengukur parameter DC sisi panel surya [23], dan sensor PZEM-004T untuk mengukur parameter AC keluaran beban inverter [24]. Kedua sensor tersebut berkomunikasi dengan Raspberry Pi 4 via protokol Modbus-RTU menggunakan media fisik komunikasi serial RS485 [23]. Alur pemrosesan data kelistrikan dan kendali otomasi diatur secara visual melalui platform Node-RED dengan menetapkan interval sampling otomatis setiap 5 detik [25]. Data pengukuran kemudian direkam ke dalam database lokal berbasis runtun waktu InfluxDB [26], lalu divisualisasikan secara interaktif dalam bentuk grafik performa harian, mingguan, hingga bulanan menggunakan platform Grafana [26].

FLOWCHART SISTEM YANG DIRANCANG



3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengujian Sistem Kontrol Beban Otomatis (Timer)

Tabel 3.1 Uji Penjadwalan Otomatis

No	Jadwal	Waktu aktual	Kondisi relay/lampu	status
1	ON 17.30 WIB	ON 17.30 WIB	Lampu menyala	Berhasil
2	OFF 05.30 WIB	OFF 05.30 WIB	Lampu mati	Berhasil
3	ON 17.30 WIB (hari ke-2)	ON 17.30 WIB	Lampu menyala	Berhasil
4	OFF 05.30 WIB (hari ke-2)	OFF 05.30 WIB	Lampu mati	berhasil

Pengujian pertama berfokus pada keandalan fitur penjadwalan otomatis menggunakan fungsi *timer* yang dikonfigurasi pada platform Node-RED [24]. Berdasarkan hasil pengujian otomatisasi lokal yang ditunjukkan pada Tabel 3.1, mikrokontroler Raspberry Pi 4 berhasil mengeksekusi logika waktu untuk mengendalikan modul relay 5 V, Lampu rumah pintar berhasil menyala (*ON*) secara otomatis tepat pada pukul 17.30 WIB dan mati (*OFF*) secara otomatis tepat pada pukul 05.30 WIB pada hari ke-1 maupun hari ke-2 pengujian. Karakteristik kendali manual melalui ponsel pintar menggunakan *dashboard* Node-RED juga menunjukkan tingkat respons yang instan melalui jaringan *local host*, sehingga sistem otomasi lokal dinyatakan berfungsi dengan sangat baik sesuai perencanaan desain awal [8, 22].

3.2. Pengujian Akurasi dan Validasi Sensor AC (PZEM-004T)

Validasi tingkat keandalan sensor PZEM-004T dilakukan pada sisi keluaran (*output*) AC inverter dengan membandingkannya terhadap multimeter digital dan ampermeter standar sebagai alat ukur referensi. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi beban domestik yang berbeda, yaitu:

1) Kondisi 1 (1 Lampu)

Arus yang terbaca pada ampermeter dan sensor PZEM-004T menunjukkan nilai yang sama yaitu 0,10 A.

Tegangan pada multimeter terukur 224,5 V sedangkan pada sensor terbaca 225,2 V (selisih 0,7 V).

2) Kondisi 2 (1 Lampu + 1 Stop Kontak)

Arus meningkat secara konsisten menjadi 0,20 A pada kedua alat ukur. Tegangan pada multimeter terukur 225,2 V sedangkan pada sensor terbaca 225,9 V (selisih 0,7 V).

3) Kondisi 3 (Tanpa Beban)

Arus jatuh ke nilai 0 A. Tegangan pada multimeter berada pada nilai 223,6 V sedangkan pada sensor terbaca 224,3 V (selisih 0,7 V).

Berdasarkan analisis perhitungan persentase kesalahan (*error*), ketiga kondisi pengujian tersebut menghasilkan nilai *error* tegangan sebesar 0,31%. Yang perlu diperhatikan adalah nilai selisih tegangan sebesar 0,7 V yang muncul secara konsisten pada ketiga kondisi pengujian, baik pada kondisi tanpa beban, satu beban, maupun dua beban. Hal ini menunjukkan bahwa penyimpangan pembacaan sensor bukan disebabkan oleh perubahan beban, melainkan merupakan penyimpangan tetap yang berasal dari karakteristik internal sensor itu sendiri.

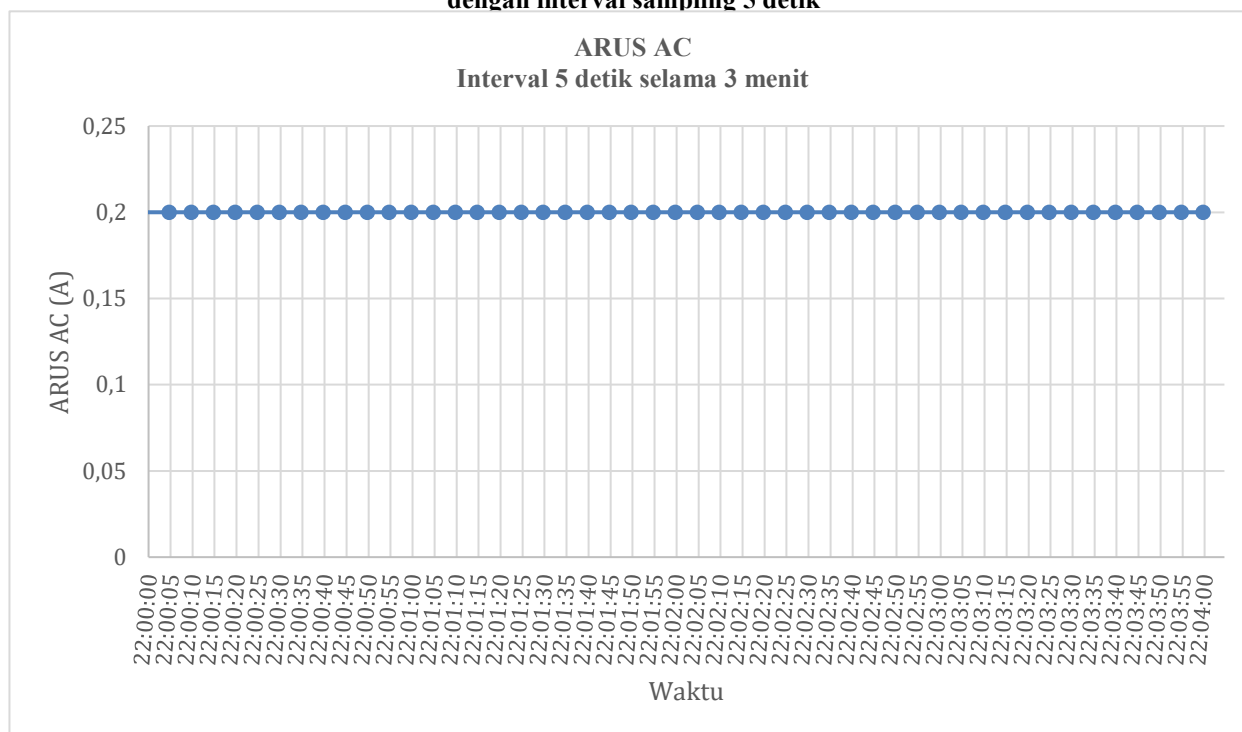
Penyimpangan tetap seperti ini wajar terjadi pada sensor pengukur tegangan karena dipengaruhi oleh toleransi komponen elektronik di dalam sensor yang tidak selalu identik antara satu unit dengan unit lainnya akibat proses produksi [24]. Yang lebih penting untuk dianalisis adalah fakta bahwa nilai selisih tetap sama di semua kondisi beban, yang membuktikan bahwa sensor bekerja secara linier dan stabil di seluruh rentang pengukuran. Linearitas ini merupakan indikator kualitas sensor yang penting karena menunjukkan bahwa hubungan antara nilai yang diukur sensor dengan nilai sebenarnya bersifat proporsional dan konsisten, tidak terpengaruh oleh besar kecilnya beban yang

terpasang. Dengan kata lain, meskipun beban berubah dari kondisi tanpa beban hingga dua beban sekaligus, sensor tetap memberikan pembacaan dengan tingkat penyimpangan yang sama, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki karakteristik pengukuran yang deterministik dan tidak dipengaruhi oleh kondisi beban.

Karakteristik ini sangat penting dalam konteks sistem monitoring PLTS yang bebannya dapat berubah sewaktu-waktu sesuai kebutuhan pengguna. Sensor yang memiliki penyimpangan berubah-ubah seiring perubahan beban akan menghasilkan data yang tidak dapat diandalkan untuk analisis performa sistem jangka panjang. Sebaliknya, sensor dengan penyimpangan tetap seperti PZEM-004T menghasilkan data yang konsisten dan dapat diandalkan untuk merekam tren konsumsi energi beban secara akurat selama periode pengujian.

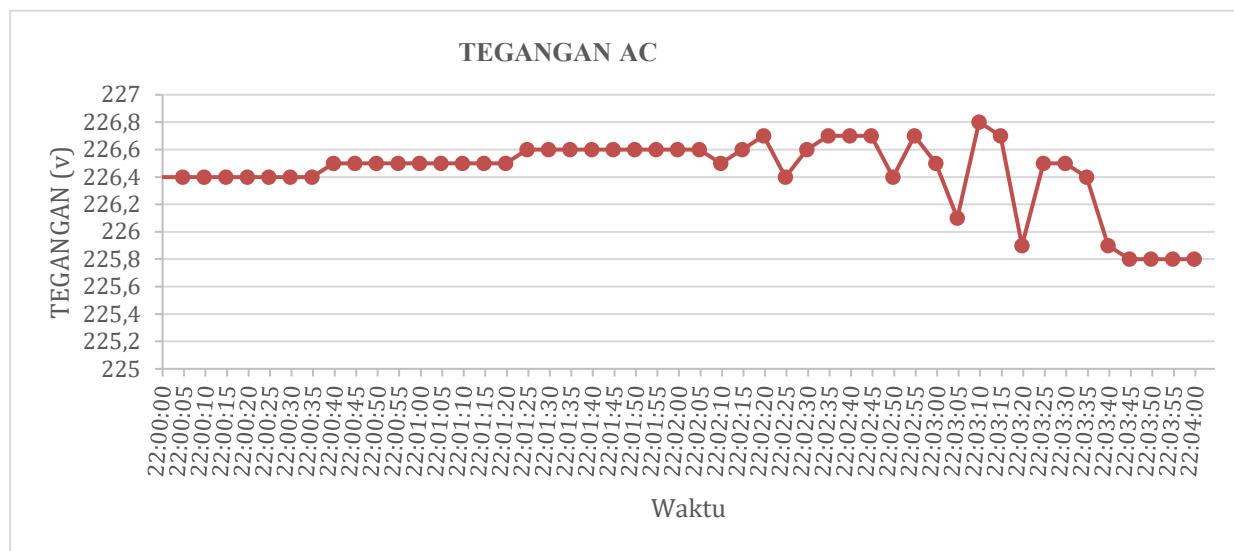
Nilai error 0,31% ini berada jauh di bawah batas akurasi standar sensor sebesar $\pm 1\%$ sesuai datasheet, yang membuktikan bahwa sensor PZEM-004T memiliki karakteristik pengukuran yang stabil dan andal untuk digunakan dalam sistem monitoring parameter listrik AC pada penelitian ini [24]. Data mentah (raw data) perekaman runtun waktu dengan interval sampling 5 detik mengonfirmasi stabilitas pembacaan tersebut. Selain itu, Grafik 3.2.1 dan Grafik 3.2.2 memvisualisasikan konsumsi arus AC yang sangat konstan pada nilai 0,20 A serta fluktuasi tegangan inverter yang sangat aman pada rentang normal 225,8 V hingga 226,7 V selama periode pengoperasian beban.

Grafik 3.2.1 Grafik hasil pembacaan arus menggunakan sensor PZEM-004T dengan interval sampling 5 detik



Berdasarkan Grafik 3.2.1, arus AC hasil pembacaan sensor PZEM-004T menunjukkan nilai yang konstan pada 0,20 A selama periode pengamatan dengan interval sampling 5 detik. Kestabilan arus ini bukan hanya menunjukkan bahwa beban tidak berubah selama pengamatan, tetapi juga membuktikan bahwa inverter mampu mempertahankan kualitas keluaran AC secara konsisten meskipun sumber energinya berasal dari baterai yang kapasitasnya terus berubah selama operasi. Kondisi ini penting karena pada sistem berbasis baterai, tegangan DC masukan inverter dapat berfluktuasi seiring perubahan kapasitas baterai, namun fakta bahwa arus AC tetap stabil di 0,20 A menunjukkan bahwa inverter berhasil mengkompensasi perubahan tersebut dan tetap memberikan keluaran yang stabil ke beban. Tidak ditemukannya lonjakan maupun penurunan arus selama pengamatan juga mengindikasikan tidak terjadi gangguan pada sistem kelistrikan seperti hubung singkat atau perubahan impedansi beban secara tiba-tiba, sehingga sistem dapat dinyatakan beroperasi dalam kondisi normal dan aman selama periode pengujian.

**Grafik 3.2.2 hasil pembacaan tegangan
menggunakan sensor PZEM-004T dengan interval sampling 5 detik**



Berdasarkan Grafik 3.2.2, tegangan AC keluaran inverter menunjukkan fluktuasi pada rentang 225,8–226,7 V selama periode pengamatan. Berbeda dengan arus yang konstan, tegangan justru mengalami perubahan kecil yang terlihat pada grafik. Fluktuasi tegangan ini tidak disebabkan oleh perubahan beban karena arus terbukti konstan, melainkan merupakan karakteristik alami keluaran inverter yang merespons perubahan tegangan DC baterai secara dinamis. Ketika kapasitas baterai sedikit berubah akibat proses discharge, tegangan DC masukan inverter ikut bergeser sedikit sehingga tegangan AC keluaran juga mengalami penyesuaian. Meskipun demikian, seluruh nilai tegangan yang tercatat masih berada dalam rentang tegangan nominal sistem listrik rumah tangga yaitu 220–240 V, sehingga fluktuasi tersebut tidak berdampak pada operasional beban. Kondisi ini membuktikan bahwa inverter yang digunakan mampu menjaga tegangan keluaran dalam batas aman meskipun terjadi perubahan kondisi pada sisi DC, dan sistem monitoring berhasil merekam dinamika tegangan tersebut secara akurat dengan interval sampling 5 detik.

3.3. Pengujian Akurasi dan Validasi Sensor DC (PZEM-017T)

Tabel 3.3.1 perbandingan pengukuran tegangan & arus panel surya pzem 017T dan multimeter

No	Iradiansi	Waktu	Arus amperemeter (A) DC	Tegangan multimeter (DC)	Arus PZEM- 017T (DC)	Tegangan PZEM (DC)	Selisih	Error (%)
1	336 W/m ² Cerah	8 juni 07:15	2.06 A	13.5 V	2.06 A	13.5 V	0	0%
2	797 W/m ² cerah	8 juni 09:10	5.25 A	14.2 V	5.25 A	14.2 V	0	0%
3	123 W/m ² Mendung	8 juni 12:20	1.21 A	13.6 V	1.22 A	13.6 V	0.01A	0.83%
4	77 W/m ² Sore hari	8 juni 16:19	0.74 A	13.5 V	0.74 A	13.5 V	0	0%
5	324 W/m ² Cerah	9 juni 07:16	1.90 A	13.5 V	1.90 A	13.5 V	0	0%
6	715 W/m ² cerah	9 juni 09:10	4.24 A	14.1 V	4.25 A	14.2 V	0.01A; 0.1V	0.24%; 0.71%
7	207 W/m ² Mendung	9 juni 12:20	2.07 A	13.8 V	2.09 A	13.8 V	0.02 A	0.97 %
8	55 W/m ² Sore hari	9 juni 16:19	0.48 A	13.4 V	0.48 A	13.4 V	0	0%

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.6, sensor PZEM-017T menunjukkan hasil pengukuran yang sangat mendekati multimeter sebagai alat referensi pada berbagai kondisi iradiansi, mulai dari 55 W/m² hingga 797 W/m². Rentang iradiansi tersebut menggambarkan variasi kondisi penyinaran yang cukup luas, dari penyinaran rendah hingga tinggi, sehingga dapat digunakan untuk menilai kestabilan sensor dalam merekam karakteristik keluaran panel

surya pada kondisi operasi yang berbeda. Pada iradiansi tinggi sebesar 797 W/m^2 , panel surya menghasilkan arus yang lebih besar karena intensitas cahaya yang diterima meningkat, sehingga proses konversi energi fotovoltaik berlangsung lebih optimal. Sebaliknya, pada iradiansi rendah seperti 207 W/m^2 dan 55 W/m^2 , arus keluaran panel menurun seiring berkurangnya energi cahaya yang diterima permukaan sel surya. Sementara itu, perubahan tegangan relatif lebih kecil dibandingkan perubahan arus karena tegangan panel surya secara umum lebih stabil terhadap variasi iradiansi dan lebih dipengaruhi oleh karakteristik material semikonduktor serta temperatur sel.

Sebagian besar hasil pengukuran sensor memiliki nilai yang sama dengan alat referensi pada resolusi pengukuran yang digunakan. Perbedaan hanya ditemukan pada beberapa titik pengujian, yaitu pada iradiansi 715 W/m^2 dengan selisih arus $0,01 \text{ A}$ dan tegangan $0,1 \text{ V}$ sehingga menghasilkan error sebesar $0,24\%$ dan $0,71\%$, serta pada iradiansi 207 W/m^2 dengan selisih arus $0,02 \text{ A}$ dan error $0,97\%$. Meskipun selisih arus pada titik 207 W/m^2 hanya bertambah $0,01 \text{ A}$ dibandingkan titik sebelumnya, persentase error menjadi lebih besar karena nilai acuan arus yang digunakan lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa besar kecilnya persentase error tidak hanya dipengaruhi oleh selisih absolut pengukuran, tetapi juga oleh besarnya nilai referensi yang dijadikan pembanding. Dengan demikian, error yang relatif lebih tinggi pada kondisi arus rendah masih tergolong wajar dan tidak menunjukkan penurunan kinerja sensor.

Secara keseluruhan, nilai error yang diperoleh berada pada rentang 0% – $0,97\%$ dan masih berada di bawah batas akurasi sensor PZEM-017T sebesar $\pm 1\%$ sesuai datasheet. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor mampu mempertahankan akurasi pengukuran pada berbagai kondisi iradiansi. Selain itu, hasil pengujian juga memperlihatkan bahwa perubahan iradiansi lebih dominan memengaruhi arus dibandingkan tegangan, sesuai dengan karakteristik dasar panel surya. Oleh karena itu, sensor PZEM-017T mampu mengikuti perubahan keluaran panel surya dengan baik dan menghasilkan data yang representatif untuk proses monitoring sistem PLTS.

Tabel 3.3.2. Raw data pengukuran tegangan dan arus PLTS tanggal 8 juni dengan interval sampling 5 detik

Waktu	Tegangan DC (v)	Arus DC (A)
07:15:00	13.5 V	2.05 A
07:15:05	13.5 V	2.06 A
07:15:10	13.5 V	2.06 A
07:15:15	13.5 V	2.06 A
07:15:20	13.5 V	2.06 A
09:10:00	14.2 V	5.25 A
09:10:05	14.2 V	5.27 A
09:10:10	14.2 V	5.28 A
09:10:15	14.2 V	5.32 A
09:10:20	14.2 V	5.32 A
12:20:00	13.6 V	1.21 A
12:20:05	13.6 V	1.22 A
12:20:10	13.6 V	1.22 A
12:20:15	13.6 V	1.21 A
12:20:20	13.7 V	1.21 A
16:19:00	13.5 V	0.74 A
16:19:10	13.5 V	0.74 A
16:19:15	13.5 V	0.74 A
16:19:20	13.5 V	0.74 A
16:19:25	13.6 V	0.74 A

Berdasarkan tabel 3.3.2, menampilkan data mentah hasil pembacaan sensor PZEM-017T pada empat kondisi pengujian: pagi hari, cuaca cerah, cuaca mendung, dan sore hari, dengan interval pengambilan data setiap 5 detik. Hasil pengukuran menunjukkan tegangan DC relatif stabil, hanya berkisar $13,5\text{--}14,2 \text{ V}$ (berubah sekitar $0,7 \text{ V}$), sementara arus DC berubah jauh lebih besar, dari $0,74 \text{ A}$ sampai $5,32 \text{ A}$. Perbedaan tingkat perubahan ini bukan kebetulan, melainkan berkaitan langsung dengan cara kerja sel surya menghasilkan listrik. Setiap foton (partikel cahaya) yang mengenai permukaan sel surya akan melepaskan satu elektron, dan elektron-elektron inilah yang mengalir menjadi arus listrik. Karena itu, jumlah arus yang dihasilkan berbanding lurus dengan jumlah foton yang diterima semakin banyak cahaya, semakin banyak elektron yang dilepas, semakin besar arus.

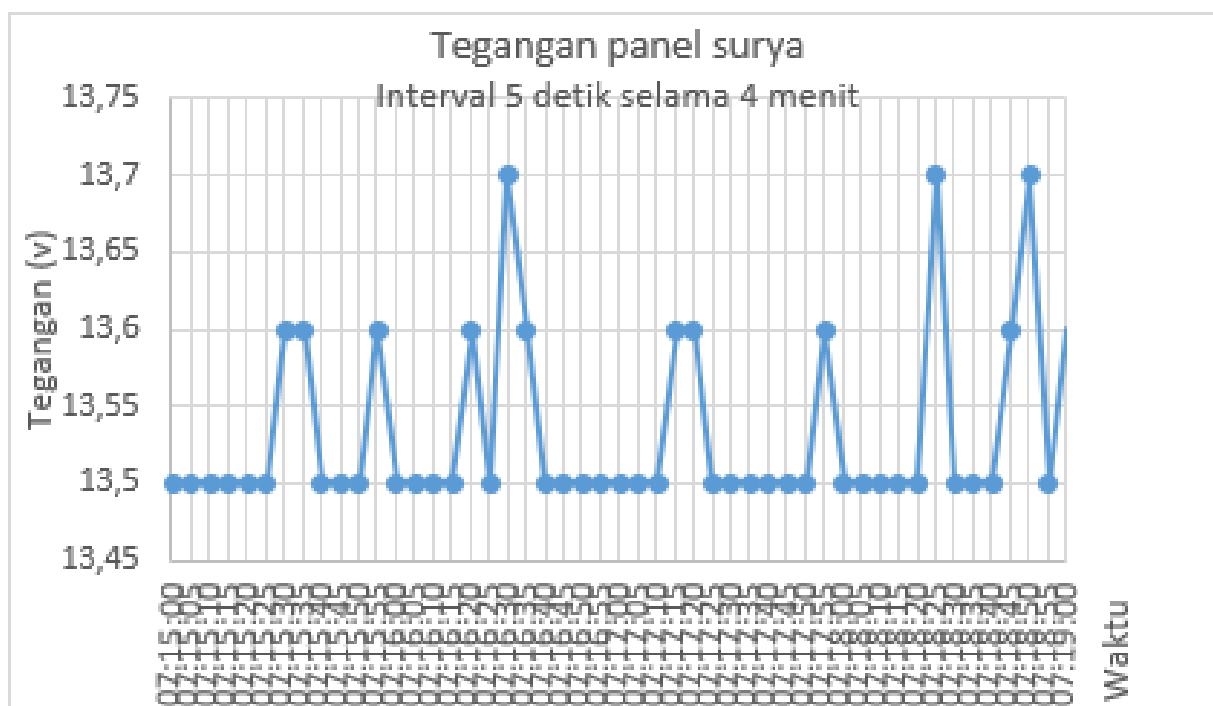
Tegangan bekerja dengan cara berbeda. Tegangan sel surya ditentukan oleh seberapa besar "dorongan" yang terbentuk dari penumpukan elektron di dalam sel, dan sifat penumpukan ini tidak bertambah secara sebanding dengan cahaya, melainkan melambat setelah mencapai titik tertentu (hubungannya logaritmik, bukan linear). Artinya, begitu cahaya sudah cukup terang untuk membuat sel bekerja, tambahan cahaya berikutnya hanya menaikkan tegangan sedikit, meskipun arusnya bisa naik berkali-kali lipat. Inilah sebab tegangan pada Tabel 4.7 nyaris tidak berubah (13,5–14,2 V) walau arus berubah lebih dari 7 kali lipat (0,74–5,32 A).

Perbedaan antara pukul 09.10 dan 12.20 memperkuat pola ini. Meski kedua waktu tersebut sama-sama siang hari, arus pada pukul 12.20 (1,21 A) jauh lebih kecil daripada pukul 09.10 (5,32 A). Ini terjadi karena awan yang menghalangi panel tidak sekadar "mengurangi cahaya", tetapi mengubah jenis cahaya yang diterima: cahaya matahari langsung (direct irradiance) yang kaya foton berenergi tinggi digantikan oleh cahaya baur (diffuse irradiance) yang jumlah fotonnya jauh lebih sedikit karena sebagian besar sudah terserap dan tersebar oleh partikel awan. Akibatnya jumlah elektron yang terlepas ikut turun drastis, sehingga arus anjlok, sementara tegangan hanya turun sedikit karena sel surya masih menerima cukup cahaya untuk mempertahankan "dorongan" elektronnya.

Pola serupa terlihat menjelang sore (16.19), di mana arus turun menjadi 0,74 A. Selain intensitas cahaya yang melemah, sudut datang matahari yang semakin miring membuat cahaya yang mengenai permukaan panel per satuan luas ikut berkurang (efek sudut datang/angle of incidence), sehingga jumlah foton yang bisa diserap panel semakin sedikit meski hari belum gelap sepenuhnya. Tegangan tetap berada di 13,5–13,6 V karena selama masih ada cahaya yang mengenai sel, mekanisme pembentukan tegangan tersebut tetap berjalan.

Selain itu, variasi angka yang kecil antar-pembacaan tiap 5 detik pada tabel menunjukkan bahwa dalam rentang waktu sesingkat itu, jumlah cahaya yang diterima panel relatif konstan, sehingga sensor PZEM-017T mampu menangkap kondisi nyata di lapangan tanpa lonjakan pembacaan yang tidak wajar (noise). Ini menjadi indikasi bahwa sistem monitoring cukup andal untuk memantau kondisi kelistrikan PLTS secara berkelanjutan.

Grafik 3.3.3 hasil pembacaan tegangan panel surya menggunakan sensor PZEM-017T dengan interval sampling 5 detik

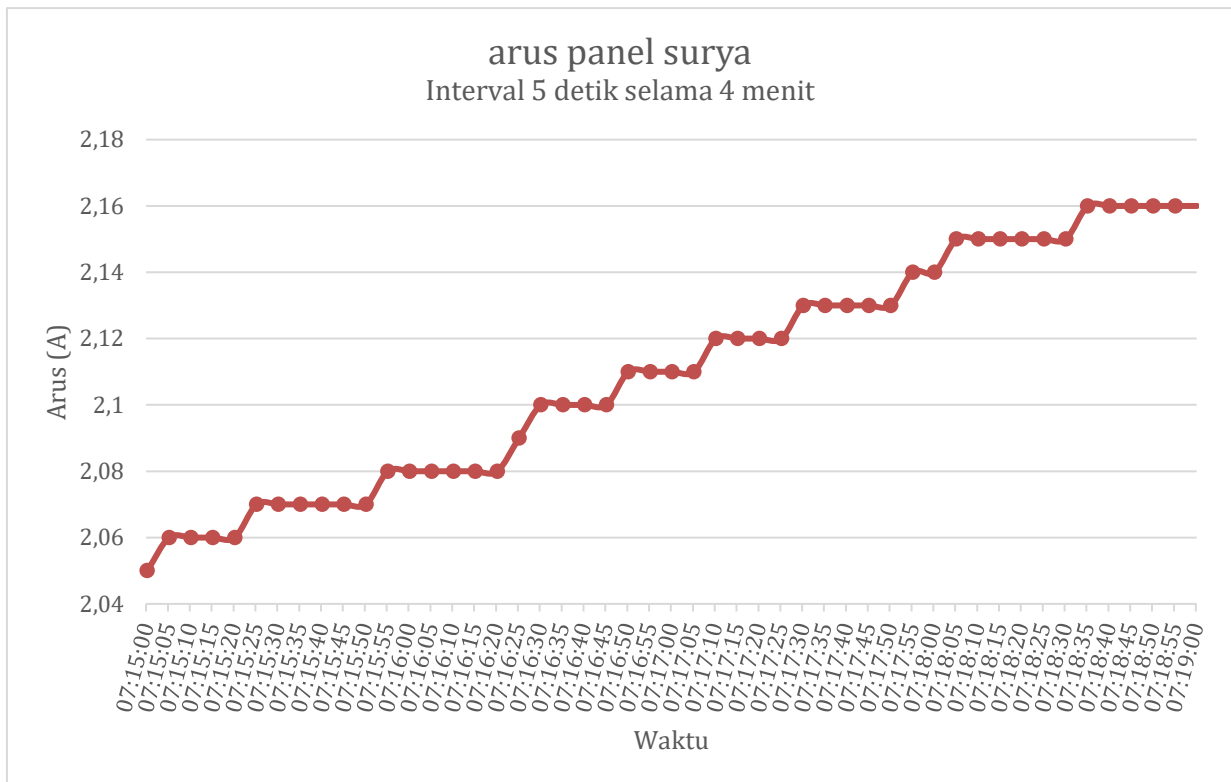


Grafik 3.3.3 menunjukkan tegangan keluaran panel surya berada pada kisaran 13,5–13,7 V selama periode pengamatan dengan interval sampling 5 detik, dengan rentang perubahan hanya sekitar 0,2 V. Kestabilan ini disebabkan oleh penggunaan Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM, yang menghubungkan panel surya langsung ke baterai melalui mekanisme switching. Pada konfigurasi ini, tegangan keluaran panel selama proses pengisian daya mengikuti tegangan baterai, sehingga variasi tegangan akibat perubahan radiasi matahari menjadi terbatas.

Kondisi tersebut berbeda dengan arus, yang tetap responsif terhadap perubahan intensitas radiasi karena arus ditentukan oleh laju pembangkitan elektron pada sel surya, bukan oleh tegangan sistem. Dengan demikian, pada sistem bertipe SCC PWM, perubahan kondisi penyinaran matahari lebih jelas tercermin pada fluktuasi arus, sementara tegangan dipertahankan mendekati tegangan baterai.

Pola perubahan tegangan yang bertahap tanpa lonjakan turut mengindikasikan bahwa proses pengisian daya berlangsung stabil, dan sensor PZEM-017T mampu merekam perubahan tegangan secara konsisten sepanjang pengujian.

Grafik 3.3.4 hasil pembacaan Arus panel surya menggunakan sensor PZEM-017T dengan interval sampling 5 detik



Grafik 3.3.4 menunjukkan arus keluaran panel surya naik sedikit demi sedikit, dari sekitar 2,05 A menjadi 2,16 A, selama pengamatan dengan interval pengambilan data setiap 5 detik. Pada sistem ini, panel surya terhubung langsung ke baterai melalui Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM, yang bekerja dengan cara menyambung-putus arus secara cepat (disebut switching). Karena itu, besar arus yang mengalir ke baterai tidak hanya ditentukan oleh seberapa terang cahaya matahari yang diterima panel, tetapi juga oleh seberapa besar "bukaan" switching yang diatur SCC sesuai kondisi baterai saat itu.

Selama baterai belum penuh (disebut tahap bulk), SCC akan membuka switching-nya secara maksimum, sehingga arus yang tercatat oleh sensor kurang lebih menggambarkan kemampuan panel menghasilkan listrik sesuai cahaya yang diterimanya. Kenaikan arus yang terjadi sedikit demi sedikit (bukan melonjak tiba-tiba) menunjukkan bahwa cahaya matahari yang diterima panel juga bertambah secara bertahap. Ini kemungkinan terjadi karena posisi matahari yang perlahan bergeser, membuat sudut sinar matahari semakin tegak lurus mengenai permukaan panel.

Perubahan arus pada grafik ini (2,05–2,16 A) tergolong kecil jika dibandingkan dengan perubahan arus pada kondisi cuaca yang berubah drastis, seperti pada Tabel 4.7 (0,74–5,32 A). Ini menunjukkan bahwa saat data ini diambil, kondisi langit sedang cerah dan stabil, tanpa gangguan awan. Sensor PZEM-017T terbukti mampu mencatat perubahan arus dengan baik meski perubahannya kecil (sekitar 0,11 A), yang menunjukkan sensor ini cukup teliti dan stabil dalam membaca data.

3.4. Analisis Data Historis Harian dan Mingguan Performa PLTS

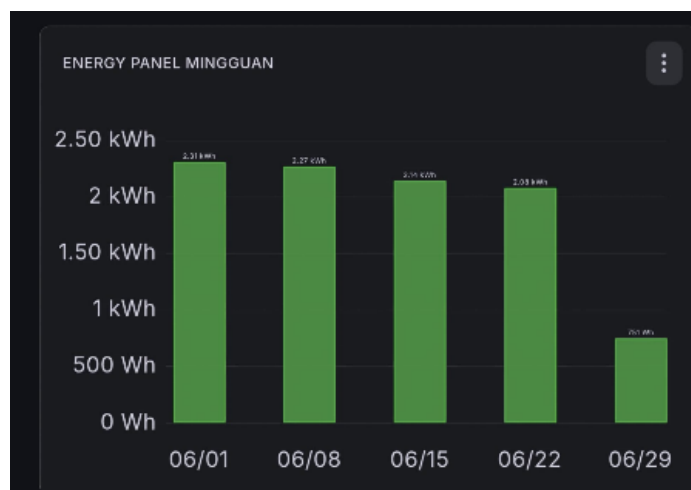
Tabel 3.4. Analisa data historis rata-rata Mingguan

minggu	PZEM-017 (DC) Voltage (Vdc)	Arus (A) (DC)	Daya (W) (DC)	Energy yang dihasilkan panel (kWh)	PZEM-004T (AC) Voltage (V)	Arus (A) (AC)	Daya (W) (AC)	Energy yang dipakai (Kwh)
1-7 juni	14.4 v	2.08 A	28.9 w	2.31 kwh	226.2 v	0.20 A	23.9 w	1.78 kwh
8-14 juni	14.2 v	2.10 A	29.1 w	2.27 kwh	226.3 v	0.20 A	23.9 w	1.82 kwh
15-21 juni	13.8 v	2.03 A	27.5 w	2.14 kwh	226.3 v	0.20 A	23.9 w	1.84 kwh
22-28 juni	13.8 v	1.96 A	25.3 w	2.08 kwh	226.2 v	0.20 A	23.9 w	1.84 kwh
29-30 juni	13.9 v	2.09 A	24.2 w	751 wh	226.2 v	0.20 A	23.9 W	528 wh

Melalui integrasi database InfluxDB dan platform Grafana, riwayat kinerja harian dan mingguan sistem selama Juni 2026 dapat dianalisis secara mendalam [26]. Berdasarkan ringkasan mingguan (Tabel 3.4), sisi DC menghasilkan energi mingguan yang menurun secara bertahap dari 2,31 kWh (Minggu 1) menjadi 2,08 kWh (Minggu 4), sedangkan sisi AC mengonsumsi energi relatif stabil pada kisaran 1,78–1,84 kWh per minggu.

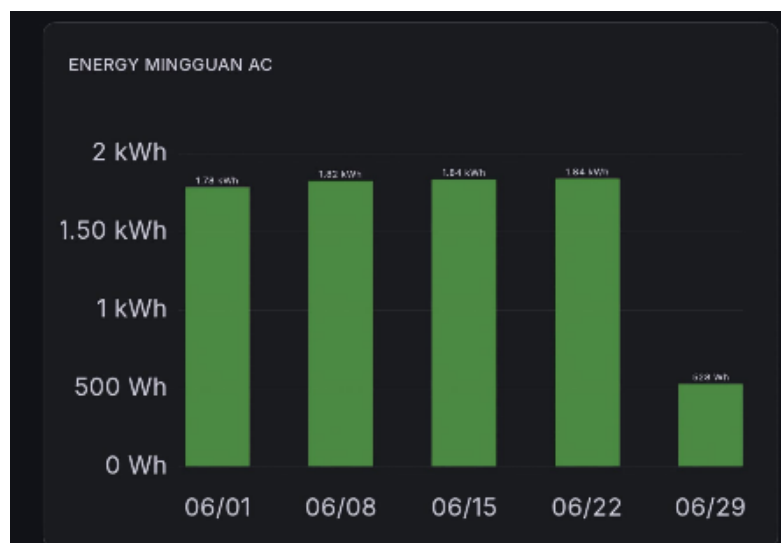
Penurunan produksi energi panel dikonfirmasi oleh data pendukung NASA POWER, yang mencatat iradiasi harian sebesar 5,05 kWh/m²/hari pada 2 Juni (hari produksi tertinggi Minggu 1, 387 Wh) dan 4,12 kWh/m²/hari pada 6 Juni (hari produksi terendah, 216 Wh). Kesesuaian antara pola iradiasi dan pola energi panel ini memperkuat bahwa variasi produksi PLTS pada penelitian ini dominan dipengaruhi oleh perubahan intensitas penyinaran harian, bukan oleh faktor internal sistem. Meskipun demikian, data NASA POWER hanya digunakan sebagai data pendukung, sehingga pengukuran langsung menggunakan alat ukur iradiasi tetap disarankan untuk memperoleh data yang lebih akurat pada penelitian selanjutnya.

Jika dicermati lebih lanjut, penurunan produksi panel yang konsisten sementara konsumsi beban relatif tetap menyebabkan selisih antara energi yang dihasilkan dan energi yang dibutuhkan semakin menyempit dari minggu ke minggu dari 0,53 kWh pada Minggu 1 menjadi hanya 0,24 kWh pada Minggu 4. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun sistem masih mampu memenuhi kebutuhan beban selama periode pengamatan, cadangan energi di atas kebutuhan beban semakin terbatas, sehingga ketahanan sistem pada periode berikutnya akan semakin bergantung pada kapasitas baterai apabila tren penurunan produksi berlanjut.



Gambar 3.4.1. Grafik Energi Panel Mingguan panel

Gambar 3.4.1, merupakan visualisasi dari data energi panel mingguan yang telah disajikan pada Tabel 3.4. Energi panel menunjukkan tren penurunan yang konsisten dari minggu pertama hingga minggu keempat, yaitu dari 2,31 kWh menjadi 2,08 kWh. Pola penurunan yang bertahap ini mengindikasikan bahwa faktor cuaca yang memengaruhi produksi panel berubah secara perlahan (seperti frekuensi awan yang meningkat bertahap), bukan disebabkan oleh gangguan mendadak pada sistem atau sensor. Bar terakhir (29–30 Juni) tampak jauh lebih rendah dibandingkan minggu-minggu sebelumnya; nilai ini bukan indikasi penurunan performa panel yang drastis, melainkan konsekuensi dari periode pengamatan yang hanya berlangsung 2 hari. Jika dikonversi ke rata-rata harian ($751 \text{ Wh} \div 2 \text{ hari} = 375,5 \text{ Wh/hari}$), nilainya justru lebih tinggi dari rata-rata harian pada minggu keempat, menunjukkan bahwa dua hari tersebut merupakan hari yang cukup produktif bagi panel.



Gambar 3.4.2. Grafik Energi Panel Mingguan AC

Gambar 3.4.2 merupakan visualisasi dari data energi beban AC mingguan yang telah disajikan pada Tabel 3.4. Energi yang digunakan beban AC menunjukkan kestabilan yang konsisten selama periode pengamatan, berkisar antara 1,78–1,84 kWh per minggu, kontras dengan pola energi panel pada Gambar 5 yang terus menurun. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa konsumsi beban rumah pintar bersifat relatif konstan dan tidak bergantung pada kondisi cuaca, berbeda dengan produksi panel surya yang sangat dipengaruhi oleh intensitas penyinaran matahari. Bar terakhir (29–30 Juni) tampak lebih rendah karena periode pengamatan hanya berlangsung 2 hari. Jika dikonversi ke rata-rata harian ($528 \text{ Wh} \div 2 \text{ hari} = 264 \text{ Wh/hari}$), nilainya tetap konsisten dengan rentang konsumsi harian pada minggu-minggu sebelumnya (0,252–0,268 kWh/hari), memperkuat bahwa pola konsumsi beban AC memang stabil sepanjang periode pengamatan.

3.5. Analisis Performa Sistem Bulanan Komprehensif

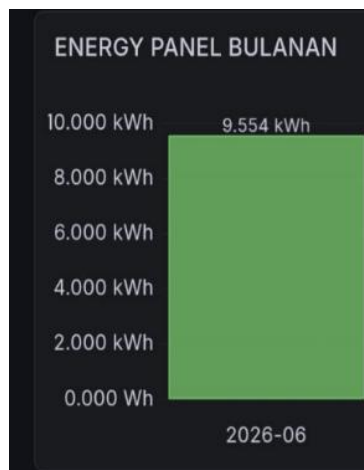
Tabel 3.5 Analisa data histori 1 bulanan

No	Bulan	PZEM-017 (DC) Voltage (Vdc)	Arus (A) (DC)	Daya (W) (DC)	Energi yang dihasilkan panel (kWh)	PZEM-004T (AC) Voltage (V)	Arus (A) (AC)	Daya (W) (AC)	Energy yang dipakai (Kwh)
1	Bulan juni	13.9 V	1.67 A	23.3 w	9.554 kwh	226.5 v	0.20 A	23.8w	7.808 kwh

Evaluasi makro terhadap total pencatatan data historis runtun waktu selama satu bulan penuh (Juni 2026) disajikan pada Tabel 3.5. Parameter kumulatif dari performa keseluruhan sistem PLTS 100 Wp dijabarkan sebagai berikut:

1) Sisi Arus Searah (Pembangkitan DC)

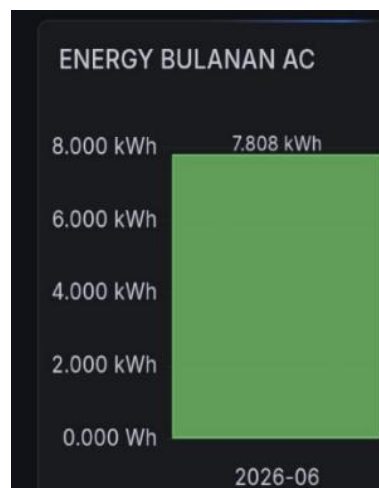
Sepanjang bulan Juni, panel surya menghasilkan tegangan rata-rata sebesar 13,9 V, arus rata-rata sebesar 1,67 A, dan daya rata-rata sebesar 23,3 W. Akumulasi data historis selama satu bulan menunjukkan bahwa total energi listrik yang dihasilkan panel surya mencapai 9,554 kWh (divisualisasikan pada Grafik 3.5.1).



Gambar 3.5.1 Grafik monitoring Energi Panel surya 1 Bulan

2) Sisi Arus Bolak-Balik (Konsumsi AC)

Pada sisi AC, inverter menghasilkan tegangan rata-rata sebesar 226,5 V dengan arus rata-rata sebesar 0,20 A dan daya rata-rata sebesar 23,8 W. Total energi listrik yang digunakan oleh beban rumah pintar selama bulan Juni tercatat sebesar 7,808 kWh (divisualisasikan pada Grafik 3.5.2).



Gambar 3.5.2 Grafik monitoring Energi AC 1 Bulan

Nilai arus rata-rata bulanan sebesar 1,67 A yang lebih rendah dibandingkan arus pada minggu-minggu awal pengujian menunjukkan bahwa selama bulan Juni cukup banyak hari dengan produksi energi rendah, sehingga menarik nilai rata-rata bulanan ke bawah, meskipun pada hari-hari terbaik panel mampu menghasilkan arus hingga 2,56 A. Hal ini membuktikan bahwa nilai rata-rata bulanan hanya menggambarkan kinerja sistem secara umum dan tidak sepenuhnya mencerminkan potensi maksimal panel pada kondisi penyinaran yang optimal.

Jika dibandingkan antara energi yang dihasilkan panel DC sebesar 9,554 kWh dengan energi yang dikonsumsi beban AC sebesar 7,808 kWh, terdapat selisih sebesar 1,746 kWh atau sekitar 18,3% dari total energi yang dihasilkan panel. Selisih ini bukan energi yang terbuang sia-sia, melainkan diduga merupakan gabungan dari energi yang tersimpan di baterai serta energi yang hilang (losses) pada proses konversi di SCC dan inverter selama satu bulan pengujian [6, 9, 21]. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem PLTS yang dirancang mampu memenuhi kebutuhan energi beban secara penuh selama satu bulan, sekaligus menghasilkan surplus energi yang tersimpan di baterai sebagai cadangan untuk mengantisipasi hari-hari dengan produksi panel rendah, seperti yang terjadi pada 27 Juni dengan energi hanya 193 Wh.

Fakta bahwa total energi DC sebesar 9,554 kWh mampu menyuplai kebutuhan beban AC sebesar 7,808 kWh selama satu bulan penuh tanpa gangguan menunjukkan bahwa pemilihan panel surya 100 Wp sudah sesuai dan mencukupi untuk kebutuhan beban dalam penelitian ini. Hal ini juga mengindikasikan bahwa sistem PLTS skala kecil 100 Wp berpotensi dikembangkan lebih lanjut, misalnya dengan penambahan beban atau kapasitas penyimpanan energi, untuk memenuhi kebutuhan energi rumah tangga yang lebih besar.

Pada sisi AC, tegangan keluaran inverter tercatat rata-rata sebesar 226,5 V dengan arus tetap 0,20 A dan daya rata-rata 23,8 W. Konsistensi parameter AC selama satu bulan penuh ini menunjukkan bahwa inverter mampu menjaga kualitas dan stabilitas tegangan keluaran meskipun produksi energi panel berfluktuasi setiap harinya, yang juga mengindikasikan bahwa baterai berhasil menjalankan fungsinya sebagai penyangga energi dengan baik.

Secara keseluruhan, hasil analisis data bulanan menunjukkan bahwa sistem PLTS 100 Wp mampu beroperasi dengan baik selama satu bulan penuh, di mana panel surya menghasilkan energi yang melebihi kebutuhan beban dan inverter mampu menjaga kestabilan tegangan AC. Namun, temuan pada analisis mingguan (Tabel 3.4) menunjukkan bahwa selisih antara energi yang dihasilkan dan energi yang dikonsumsi ini cenderung menyempit dari minggu ke minggu, sehingga keandalan sistem dalam jangka panjang tetap perlu memperhitungkan tren penurunan produksi panel, terutama apabila terjadi penambahan beban atau periode cuaca mendung yang berkepanjangan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mencapai tujuan yang ditetapkan, yaitu mengimplementasikan sistem PLTS 100 Wp yang terintegrasi dengan kontrol beban rumah pintar dan sistem pemantauan lokal berbasis Raspberry Pi 4 dan Node-RED. Pengujian kalibrasi menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki nilai error tegangan sebesar 0,31%, sedangkan sensor PZEM-017T memiliki nilai error tegangan dan arus di bawah 1%, sehingga masih berada dalam batas akurasi sensor sebesar $\pm 1\%$. Analisis data historis menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan suplai daya AC ke beban rumah pintar dengan daya rata-rata sebesar 23,9 W meskipun keluaran arus DC panel surya mengalami fluktuasi. Berdasarkan data historis bulan Juni 2026, energi yang dihasilkan panel surya mencapai 9,554 kWh, sedangkan energi yang digunakan beban sebesar 7,808 kWh, dengan surplus energi sebesar 1,746 kWh yang tersimpan di baterai dan losses konversi, sehingga panel 100 Wp terbukti mencukupi untuk menyuplai kebutuhan beban yang digunakan.

Secara implementasi, sistem yang dikembangkan berpotensi diterapkan pada hunian domestik yang membutuhkan solusi pemantauan dan pengelolaan energi surya secara mandiri tanpa ketergantungan pada layanan cloud, sehingga dapat beroperasi meskipun koneksi internet tidak tersedia. Sistem ini juga dapat menjadi referensi bagi pengembangan sistem manajemen energi berbasis PLTS skala rumah tangga yang lebih terjangkau dibandingkan solusi komersial yang ada.

Namun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, pengukuran iradiasi matahari tidak dilakukan secara kontinu selama pengamatan harian, sehingga analisis hubungan antara iradiasi dan kinerja panel hanya dapat dilakukan pada saat pengujian akurasi sensor saja dan tidak mencakup seluruh periode pengamatan. Kedua, tidak tersedianya monitoring kapasitas baterai (State of Charge/SoC) secara real-time menyebabkan kondisi baterai tidak dapat dipantau secara langsung. Ketiga, pengujian hanya dilakukan selama satu bulan sehingga belum dapat merepresentasikan variasi kinerja sistem secara musiman.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan sistem dengan platform cloud IoT seperti AWS IoT atau Google Cloud agar data dapat diakses secara remote dari mana saja. Selain itu, penggantian Solar Charge Controller tipe PWM dengan tipe MPPT (Maximum Power Point Tracking) dapat meningkatkan efisiensi pengisian baterai secara signifikan. Pengembangan lebih lanjut juga dapat mempertimbangkan integrasi prediksi energi berbasis kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) untuk memperkirakan produksi energi harian berdasarkan data cuaca, serta penerapan sistem monitoring multi-node untuk memantau lebih dari satu panel surya sekaligus dalam satu dashboard terpadu. Selain itu, penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengembangkan sistem dalam bentuk aplikasi berbasis Android atau iOS, sehingga proses monitoring dan kontrol perangkat dapat dilakukan secara langsung melalui aplikasi tanpa perlu mengakses dashboard Grafana maupun Node-RED.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Mahendra Widyartono, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan ilmu yang sangat berharga selama proses penyusunan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada Fakultas Vokasi Universitas Negeri Surabaya, khususnya Program Studi Sarjana Terapan Teknik Listrik, atas fasilitas dan dukungan akademis yang diberikan. Secara khusus, penulis berterima kasih kepada orang tua dan keluarga tercinta atas doa yang tiada henti, kasih sayang, serta dukungan moril maupun materil yang menjadi kekuatan terbesar bagi penulis. Tidak lupa, terima kasih disampaikan kepada rekan-rekan mahasiswa Teknik Listrik Universitas negeri surabaya atas diskusi, saran, dan kebersamaan yang saling menguatkan dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Semoga seluruh kebaikan dan bantuan yang telah diberikan oleh berbagai pihak mendapatkan balasan yang berlimpah.

REFERENSI

- [1] International Energy Agency, *Electricity Market Report 2023: Executive Summary*. Paris, France: IEA, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023>
- [2] G. Cerrato and N. Fumo, "Performance of photocatalytic oxidizing air cleaners in different experimental setups – a review," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 1412–1419, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.009>
- [3] E. Erdiwansyah, M. Mahidin, and H. Husin, "Investigation of availability, demand, targets, and development of renewable energy in 2017 – 2050: a case study in Indonesia," *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 483–499, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00391-4>
- [4] D. F. Silalahi, A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, C. Cheng, and L. Hayes, "Indonesia's Vast Solar Energy Potential," *Energies*, vol. 14, no. 17, Art. no. 5424, 2021, doi:10.3390/en14175424.
- [5] Kelvin, E. Setyaningsih, and H. S. Utama, "Design of a Monitoring System for Solar-Powered Public Street Lighting," *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 26, no. 2, pp. 186–196, 2025, doi:10.24912/tesla.v26i2.32951.
- [6] S. Meliala, S. Muhammad Jalil, W. Fuadi, and A. Asran, "Application of Off-Grid Solar Panels System for Household Electricity Consumptions in Facing Electric Energy Crisis," *International Journal of Engineering, Science and Information Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 30–37, 2021, doi:10.52088/ijesty.v2i1.199.
- [7] L. Wibowo, R. Wahyusari, T. Yuwono, and A. Shofia, "IoT-based High-Accuracy Monitoring System for On-Grid Photovoltaic Power System Using NodeMCU ESP8266 and PZEM004T," *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 230–241, 2024, doi:10.55981/j.mev.2024.823.
- [8] A. Kiswantono, "Transformasi Energi Rumah Tangga: Otomatisasi Beban Listrik dengan IoT," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 1, 2025, doi:10.23960/jitet.v13i1.5554.
- [9] A. Ali, A. Aftab, M. N. Akram, S. Awan, H. A. Muqet, and Z. A. Arfeen, "Residential Prosumer Energy Management System with Renewable Integration Considering Multi-Energy Storage and Demand Response," *Sustainability*, vol. 16, no. 5, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16052156>
- [10] B. E. Demir, "A New Low-Cost Internet of Things-Based Monitoring System Design for Stand-Alone Solar Photovoltaic Plant and Power Estimation," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 24, Art. no. 13072, 2023, doi:10.3390/app132413072.
- [11] F. Njoka, L. Thimo, and A. Agarwal, "Evaluation of IoT-based remote monitoring systems for stand-alone solar PV installations in Kenya," *Journal of Reliable Intelligent Environments*, vol. 9, no. 3, pp. 319–331, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40860-022-00190-5>
- [12] Sugiyono, *Metodologi Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R & D*, Bandung: Alfabeta, 2020.
- [13] R. Prasetyo, H. Hartono, and A. Nugraha, "Analisis Efisiensi Daya Pada Panel Monocrystalline Single Axis Tracking System," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9, no. 2, 2025, doi:10.31000/jte.v9i2.15150.
- [14] S. F. Rahma, D. Y. E. Pratama, F. P. Rohwidiyanto, and M. B. Sanjaya, "Photovoltaic Efficiency and Technology Innovation in Renewable Energy: A Systematic Literature Review," *Semesta Teknika*, vol. 28, no. 1, pp. 62–76, 2025. doi:10.18196/st.v28i1.25189.
- [15] I. Raziah, A. Novandri, and Y. Away, "Real-Time Monitoring of Photovoltaic Panel Using Node-RED," *Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika*, vol. 8, no. 3, 2024, doi:10.33395/sinkron.v8i3.13929.
- [16] M. B. Arief, M. Widyartono, W. Aribowo, and A. L. Wardani, "Desain Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-Grid dan Monitoring Berbasis Node-Red," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 11, no. 1, pp. 45–50, 2024, <https://doi.org/10.52088/ijesty.v2i1.199>
- [17] F. V. Affandi, I. D. Ahmad, M. R. Abadi, R. R. W. A. Desideria, W. W. Aji, and T. E. Putri, "Box Design of Series Parallel Plug-in and Monitoring of LiFePO4 Battery Performance as Solar Panel Power Storage," *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*, vol. 7, no. 1, 2026, doi:10.22146/juliet.v7i1.109557.
- [18] Budhi Anto, Dahliyusmanto, F. Firdaus, and J. Jahrizal, "Sistem Sumber Tenaga Listrik Berbasis Baterai Untuk Usaha Jajanan Kuliner Bergerak," *Prosiding Seminar Hasil Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 7, no. 1, pp. 306–316, 2024. doi:10.47767/sehati_abdimas.v7i1.936
- [19] T. M. Putri and U. T. Kartini, "Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-Grid untuk Skala Rumah Tangga," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 14, no. 1, pp. 16–22, 2025, doi:10.26740/jte.v14n1.p16-22.
- [20] M. Karjadi, "Optimalisasi Efisiensi Panel Surya dalam Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Skala Rumah Tangga," *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 7, no. 4, pp. 3002–3010, 2025, doi:10.38035/rj.v7i4.1579.
- [21] Zulkhakim, "Analisis Perbandingan Efisiensi Panel Surya Polikristalin dan Monokristalin dalam Kondisi Iklim Tropis," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3S1, 2025, doi:10.23960/jitet.v13i3S1.7668.
- [22] K.U. Ariawan, "Penerapan IoT untuk Sistem Kendali Jarak Jauh Peralatan Listrik Rumah Tangga Berbasis Raspberry Pi," *Jurnal Nasional Pendidikan Teknik Informatika (JANAPATI)*, vol. 9, no. 3, p. 292, 2020. <https://doi.org/10.23887/janapati.v9i3.23264>

- [23] T. S. Madjowa, J. Ilham, I. Hidayat, S. Tansa, and I. Z. Nasibu, "Solar Power Plant (PLTS) Power Monitoring System Based on the Internet of Things (IoT) Using the Blynk and Telegram Platforms," *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 26, no. 1, pp. 8–15, 2026, doi:10.23917/emitor.v26i1.14225.
- [24] A. Munawar, T. Muchtar, and Z. Akbar, "A Design and Development of an Energy Monitoring System for Solar Power Plants and Inverter Output as an Energy Source in Smart Homes," *Journal of Electrical and Automation Technology (JEAT)*, vol. 4, no. 1, 2025, doi:10.61844/jeat.v4i1.1159.
- [25] D. Atmodjo, R. Harianja, J. Firizqi, and R. Kurniawan, "Governance of Iot Devices Using Node-Red Orchestrator and Web-Based Dashboard," *Jurnal Teknik Informatika (Jutif)*, vol. 4, no. 5, pp. 1179–1190, 2023. <https://doi.org/10.52436/1.jutif.2023.4.5.1336>
- [26] Noprianto, V. N. Wijayaningrum, and R. Wakhidah, "Monitoring Development Board pada Platform InfluxDB dan Grafana," *Telematika: Jurnal Informatika dan Teknologi Informasi*, vol. 20, no. 1, pp. 81–90, 2023, doi:10.31515/telematika.v20i1.7643.