

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA HASIL

5.1 Metode Pengujian

Pengujian sistem PLTS off-grid dual-axis solar tracking dirancang untuk mengevaluasi kinerja sistem secara menyeluruh, mencakup akurasi sensor, respons kontrol daya adaptif, efisiensi solar tracking, serta keandalan sistem monitoring IoT. Pengujian dilakukan selama dua hari berturut-turut (21–22 Juni 2026) untuk mengukur secara langsung kinerja prototipe panel dual-axis tracking dalam kondisi lingkungan nyata di luar ruangan.

5.1.1 Lokasi dan Kondisi Pengujian

Pengujian dilakukan di area terbuka Laboratorium STr. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi UndipKlik untuk membuka panel samping guna melihat informasi selengkapnya, Jl. Gubernur Mochtar, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, pada koordinat $7^{\circ}03'15''$ LS dan $110^{\circ}26'20''$ BT, ketinggian ± 250 mdpl. Lokasi ini dipilih karena memiliki area yang bebas dari bayangan bangunan maupun pepohonan pada rentang azimuth 70° – 280° yang merupakan jalur pergerakan matahari selama sesi pengujian, sehingga panel dapat menerima radiasi matahari langsung tanpa gangguan bayangan parsial sepanjang hari operasi.

Kondisi cuaca selama pengujian diklasifikasikan ke dalam tiga kategori berdasarkan estimasi clearness index (k_t) sebagai berikut:

Tabel 5.1 Kondisi cuaca pada saat pengujian

Tanggal	Hari	Kondisi Cuaca	Irradiasi Puncak (W/m^2)	Durasi Efektif
21 Juni 2026	Minggu	Cerah berawan pagi, cerah siang (11:00–14:30)	± 895	± 10 jam

Tanggal	Hari	Kondisi Cuaca	Irradiasi Puncak (W/m ²)	Durasi Efektif
22 Juni 2026	Senin	Cerah penuh (kondisi optimal)	±940	±11 jam

5.1.2 Parameter Pengujian

Parameter yang diukur mencakup tegangan terminal baterai (V), arus baterai (A), daya panel dual-axis (W), energi kumulatif (Wh), response time kontrol mode (ms), error posisi tracking azimuth dan elevasi (°), serta keandalan transmisi data IoT.

5.1.2.1 Tegangan dan Arus Baterai

Tegangan terminal baterai (V_{bat}) diukur dalam satuan Volt (V) dengan resolusi 0,001V menggunakan sensor INA226 yang dikalibrasi terhadap multimeter digital. Arus baterai (I_{bat}) diukur dalam satuan Ampere (A), di mana nilai positif menunjukkan kondisi charging dan nilai negatif menunjukkan kondisi discharging sistem.

5.1.2.2 Daya Panel Surya

Daya panel direpresentasikan sebagai daya net baterai yang dihitung menggunakan persamaan $P = V_{bat} \times I_{bat}$, dalam satuan Watt (W). Energi kumulatif dihitung dalam satuan Watt-hour (Wh) berdasarkan akumulasi daya positif selama interval pengukuran 10 menit.

5.1.2.3 Parameter Kontrol Daya Adaptif

Parameter kontrol daya yang diuji meliputi tegangan threshold transisi antar mode (Surplus, Normal, Hemat, Kritis), respons waktu perpindahan mode dalam satuan milidetik (ms), serta efektivitas mekanisme hysteresis $\pm 0,1V$ dalam mencegah relay chattering.

5.1.2.4 Akurasi Posisi Tracking

Akurasi posisi panel diukur dengan membandingkan target posisi azimuth dan elevasi hasil kalkulasi astronomi terhadap posisi aktual panel yang diukur menggunakan busur derajat. Error posisi dinyatakan dalam satuan derajat ($^{\circ}$).

5.1.3 Peralatan Pengujian

Tabel 5.2 Peralatan yang digunakan dalam Pengujian

No	Peralatan	Spesifikasi	Fungsi
1	Multimeter Digital	Resolusi 0,001V / 0,001A	Referensi kalibrasi INA226
2	Busur Derajat	Resolusi 1°	Pengukuran sudut azimuth & elevasi aktual
3	Laptop / PC	Arduino IDE 2.3.8	Upload firmware & Serial Monitor
4	Smartphone	Blynk IoT App	Monitoring dashboard real-time
5	Google Sheets	Logging otomatis 10 detik	Pencatatan data pengujian

5.1.4 Skenario Pengujian

Pengujian dilaksanakan dalam tiga skenario utama: (1) kalibrasi sensor INA226 di awal setiap hari; (2) pengujian *dual-axis tracking* dengan sistem *tracking hybrid* tiga lapisan aktif; dan (3) pengujian kontrol daya adaptif dengan pengaturan tegangan baterai secara manual untuk memverifikasi respons *relay* pada setiap mode operasi.

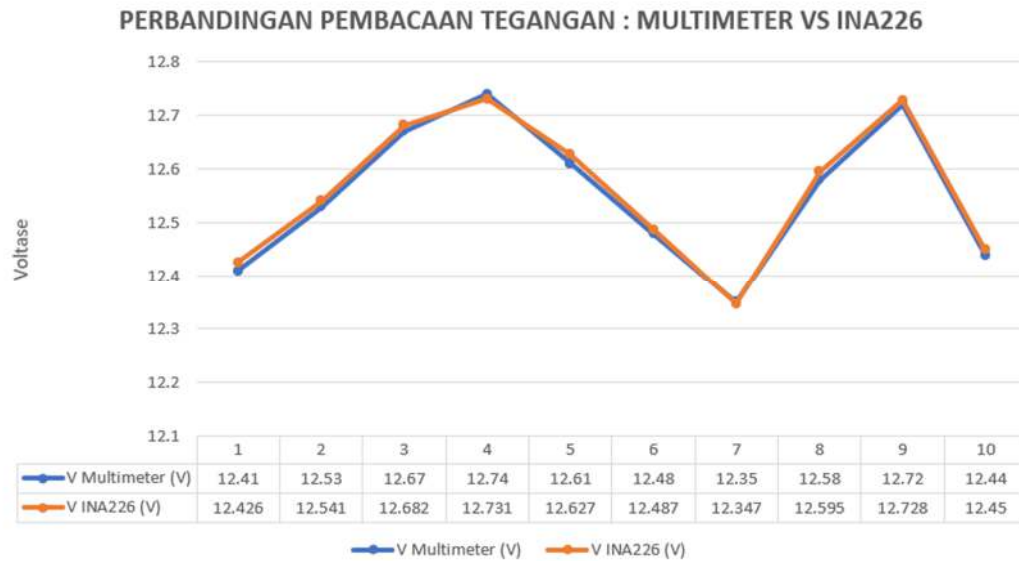
5.2 Hasil Pengujian

5.2.1 Pengujian Akurasi Sensor INA226

Pengujian akurasi sensor INA226 dilakukan dengan membandingkan pembacaan tegangan dan arus terhadap nilai referensi multimeter digital sebanyak 10 kali pengukuran per hari selama lima hari pengujian. Berikut disajikan hasil kalibrasi hari terakhir (22 Juni 2026) sebagai representasi konsistensi akurasi sensor.

Tabel 5.3 Hasil Kalibrasi Sensor INA226 terhadap Multimeter (22 Juni 2026)

No	V Multimeter (V)	V INA226 (V)	Error V (%)	I Multimeter (A)	I INA226 (A)	Error I (%)
1	12.41	12.426	0.129	0.214	0.2160	0.935
2	12.53	12.541	0.088	0.287	0.2858	0.418
3	12.67	12.682	0.095	0.392	0.3954	0.867
4	12.74	12.731	0.071	0.451	0.4486	0.532
5	12.61	12.627	0.135	0.336	0.3391	0.923
6	12.48	12.487	0.056	0.245	0.2435	0.612
7	12.35	12.347	0.024	0.171	0.1688	1.287
8	12.58	12.595	0.119	0.308	0.3097	0.552
9	12.72	12.728	0.063	0.427	0.4249	0.492
10	12.44	12.450	0.080	0.198	0.1991	0.556



Gambar 5.1 Grafik perbandingan pembacaan INA226 vs multimeter

Hasil kalibrasi pada Tabel 5.1 menunjukkan bahwa sensor INA226 memiliki akurasi yang sangat baik untuk pengukuran tegangan dengan rata-rata error sebesar 0,086%. Nilai tersebut masih berada di bawah spesifikasi akurasi sensor berdasarkan datasheet yang berada pada kisaran $\pm 0,1\%$. Distribusi error tegangan relatif kecil dan tersebar secara acak dengan rentang 0,024%–0,135%, sehingga tidak menunjukkan adanya bias sistematis pada hasil pengukuran.

Kondisi ini mengindikasikan bahwa perbedaan pembacaan terutama disebabkan oleh resolusi ADC internal dan fluktuasi noise pengukuran yang masih dalam batas normal. Akurasi tegangan yang tinggi sangat mendukung kinerja sistem kontrol daya adaptif, karena proses perpindahan mode operasi bergantung pada nilai ambang tegangan baterai. Pada tegangan sistem sekitar 12 V, error rata-rata 0,086% setara dengan sekitar $\pm 10,3$ mV, sehingga masih jauh lebih kecil dibandingkan hysteresis band yang digunakan pada algoritma kontrol, sehingga potensi kesalahan switching mode dapat diabaikan.

Error pengukuran arus memiliki rata-rata sebesar 0,717%, yang menunjukkan bahwa sensor INA226 juga mampu melakukan pengukuran arus dengan tingkat akurasi yang baik untuk kebutuhan monitoring energi pada sistem PLTS off-grid. Nilai error arus terbesar tercatat sebesar 1,287% pada pengukuran arus 0,171 A, sedangkan error terkecil sebesar 0,418% pada arus 0,287 A. Pola ini

menunjukkan bahwa error relatif cenderung meningkat pada kondisi arus yang lebih rendah. Fenomena tersebut terjadi karena tegangan jatuh pada resistor shunt menjadi semakin kecil sehingga pengaruh noise dan resolusi ADC menjadi lebih signifikan terhadap hasil pembacaan. Sebagai contoh, pada arus 0,171 A dengan resistor shunt 100 mΩ, tegangan shunt yang terbentuk hanya sekitar:

$$V_{shunt} = I \times R$$

$$V_{shunt} = 0,171 \times 0,1 = 17,1 \text{ mV}$$

Nilai tersebut relatif kecil sehingga lebih rentan terhadap gangguan noise dibandingkan saat pengukuran arus yang lebih besar. Meskipun demikian, error absolut yang terjadi masih sangat kecil, hanya sekitar 2,2 mA, sehingga tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap perhitungan daya maupun estimasi energi sistem. Untuk peningkatan akurasi pada pengukuran arus rendah di penelitian selanjutnya, dapat dipertimbangkan penggunaan resistor shunt dengan nilai resistansi yang lebih tinggi atau penerapan teknik filtering digital sehingga rasio signal-to-noise meningkat dan pembacaan arus menjadi lebih stabil.

5.2.2 Pengujian Sistem Kontrol Daya Adaptif

Pengujian sistem kontrol daya adaptif dilakukan dengan mengatur kondisi tegangan baterai secara bertahap untuk memverifikasi respons relay pada setiap mode operasi. Berikut disajikan hasil pengujian untuk hari ke-1 (21 Juni 2026) yang mencakup seluruh empat mode operasi.

5.2.2.1 Mode Surplus ($V \geq 12,8\text{V}$)

Pada mode Surplus, tegangan baterai diatur mencapai nilai $\geq 12,8\text{V}$. Sistem mengaktifkan seluruh channel relay beban (CH1–CH4) secara bersamaan. Pengujian dilakukan dengan mengukur respons waktu dari saat tegangan melewati threshold hingga relay aktif.

Tabel 5.4 Hasil Pengujian Mode Surplus (21 Juni 2026)

Parameter	Target	Hasil Pengujian	Status
V threshold masuk/rentang	$\geq 12.8 \text{ V}$	12.83 V	LULUS ✓

Parameter	Target	Hasil Pengujian	Status
CH1 (Lampu LED)	ON	ON	LULUS ✓
CH2 (Kipas DC)	ON	ON	LULUS ✓
CH3	ON	ON	LULUS ✓
CH4	ON	ON	LULUS ✓
Response time	< 100 ms	53.4 ms	LULUS ✓

5.2.2.2 Mode Normal

Pada mode Normal, tegangan baterai berada pada rentang 12,2V hingga 12,8V. Sistem mempertahankan CH1 dan CH2 dalam kondisi aktif, sedangkan CH3 dan CH4 dimatikan untuk mengurangi konsumsi energi.

Tabel 5.5 Hasil Pengujian Mode Normal (21 juni 2026)

Parameter	Target	Hasil Pengujian	Status
V threshold masuk/rentang	12.2–12.8 V	12.51 V	LULUS ✓
CH1 (Lampu LED)	ON	ON	LULUS ✓
CH2 (Kipas DC)	ON	ON	LULUS ✓
CH3	OFF	OFF	LULUS ✓
CH4	OFF	OFF	LULUS ✓
Response time	< 100 ms	65.7 ms	LULUS ✓

5.2.2.3 Mode Hemat

Pada mode Hemat, hanya CH1 (beban prioritas tertinggi) yang dipertahankan aktif. CH2, CH3, dan CH4 dimatikan untuk meminimalkan konsumsi energi dari baterai.

Tabel 5.6 Hasil Pengujian Mode Hemat (21 Juni 2026)

Parameter	Target	Hasil Pengujian	Status
V threshold masuk/rentang	11.5–12.2 V	12.19 V	LULUS ✓
CH1 (Lampu LED)	ON	ON	LULUS ✓
CH2 (Kipas DC)	OFF	OFF	LULUS ✓
CH3	OFF	OFF	LULUS ✓
CH4	OFF	OFF	LULUS ✓
Response time	< 100 ms	61.3 ms	LULUS ✓

5.2.2.4 Mode Kritis

Pada mode Kritis, seluruh beban dimatikan untuk melindungi baterai dari kondisi over-discharge. Sistem tracking juga dihentikan untuk meminimalkan konsumsi daya sistem secara keseluruhan.

Tabel 5.7 Hasil Pengujian Mode Kritis (21 Juni 2026)

Parameter	Target	Hasil Pengujian	Status
V threshold masuk/rentang	< 11,5 V	11,25 V	LULUS ✓
CH1 (Lampu LED)	OFF	OFF	LULUS ✓
CH2 (Kipas DC)	OFF	OFF	LULUS ✓

Parameter	Target	Hasil Pengujian	Status
CH3	OFF	OFF	LULUS ✓
CH4	OFF	OFF	LULUS ✓
Response time	< 100 ms	52.7 ms	LULUS ✓

5.2.2.5 Pengujian Transisi dan Hysteresis

Mekanisme hysteresis $\pm 0,1V$ diuji pada seluruh hari pengujian untuk memverifikasi ketiadaan relay chattering pada kondisi tegangan fluktuatif di sekitar nilai threshold.

Tabel 5.8 Hasil Pengujian Hysteresis $\pm 0,1V$ Anti Relay Chattering

Transisi Mode	V Masuk (V)	V Keluar (V)	Hysteresis (V)	Chattering	Status
NORMAL → SURPLUS	12,80	12,70	0,10	Tidak terjadi	LULUS ✓
SURPLUS → NORMAL	12,70	12,80	0,10	Tidak terjadi	LULUS ✓
NORMAL → HEMAT	12,20	12,10	0,10	Tidak terjadi	LULUS ✓
HEMAT → NORMAL	12,10	12,20	0,10	Tidak terjadi	LULUS ✓
HEMAT → KRITIS	11,50	11,40	0,10	Tidak terjadi	LULUS ✓
KRITIS → HEMAT	11,40	11,50	0,10	Tidak terjadi	LULUS ✓

Analisis response time dari lima hari pengujian menunjukkan variasi yang konsisten antara mode operasi. Mode Kritis memiliki rata-rata response time

terendah (52,7 ms) dan mode Normal tertinggi (65,7 ms). Perbedaan ini dapat dijelaskan dari sisi arsitektur firmware: pada mode Kritis, kondisi tegangan sangat rendah ($< 11,5\text{V}$) tidak sering terjadi sehingga sistem langsung mengeksekusi perintah mematikan semua relay tanpa evaluasi kondisi lanjutan; sementara pada mode Normal, firmware melakukan evaluasi tambahan terhadap tren perubahan tegangan sebelum mengkonfirmasi transisi mode.

5.2.3 Pengujian Efisiensi Solar Tracking

Pengujian efisiensi solar tracking difokuskan pada evaluasi kemampuan prototipe sistem dual-axis dalam memaksimalkan penyerapan energi radiasi matahari secara mandiri. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur performa algoritma pelacakan hybrid dalam mempertahankan posisi panel agar senantiasa tegak lurus terhadap arah datangnya sinar matahari sepanjang hari operasi. Parameter utama yang dievaluasi mencakup profil tangkapan daya harian, total produksi energi bersih (net energi), serta akurasi pergerakan aktuator selama masa pengujian lapangan pada tanggal 21–22 Juni 2026. Hasil pengujian pada tahap ini menjadi tolok ukur utama dalam memvalidasi tingkat optimalisasi dan keandalan operasional sistem PLTS off-grid yang telah dikembangkan.

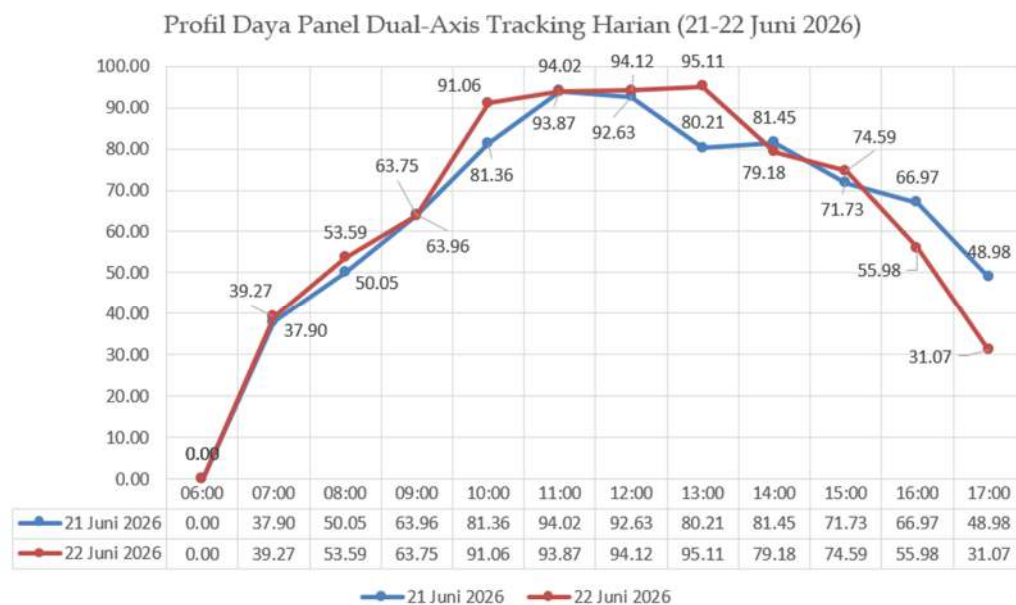
5.2.3.1 Pengujian Panel Dual-Axis

Pengujian panel dual-axis dengan data yang divisualisasikan pada Gambar 5.3 dilakukan dengan mengaktifkan sistem tracking hybrid tiga lapisan: kalkulasi posisi astronomi berbasis RTC DS3231 sebagai referensi utama, koreksi real-time menggunakan empat sensor LDR, dan fine-tuning MPPT Perturb & Observe setiap 10 detik. Motor stepper NEMA23 mengendalikan sumbu azimuth dengan resolusi 18 steps/ $^{\circ}$ (melalui mekanisme transmisi pulley 1:3), sedangkan linear actuator 12V DC 900N mengendalikan pergerakan pada sumbu elevasi.

Berdasarkan grafik profil daya harian selama periode pengujian 21–22 Juni 2026, sistem dual-axis tracking terbukti mampu mengoptimalkan penyerapan energi dengan sangat presisi. Pada tanggal 21 Juni 2026, daya puncak tercatat sebesar 94,02 W pada pukul 11:00 WIB. Sementara itu, pada kondisi cuaca yang lebih optimal di tanggal 22 Juni 2026, sistem berhasil menembus daya puncak

sebesar 95,11 W pada pukul 13:00 WIB sebuah nilai yang sangat mendekati kapasitas maksimal teoretis panel surya 100 Wp. Bentuk kurva daya yang lebar dan mampu bertahan di atas 80 W secara stabil mulai dari pukul 10:00 hingga 14:00 WIB pada kedua hari tersebut mengonfirmasi bahwa panel selalu berhasil diarahkan secara tegak lurus mengikuti lintasan matahari.

(rasio pulley 1:4), sedangkan linear actuator 12V DC mengendalikan sumbu elevasi.



Gambar 5.2 Grafik profil daya panel dual-axis tracking harian (21-22 Juni 2026)

Tabel 5.9 Rekapitulasi Energi Panel Dual-Axis Tracking selama 2 Hari Pengujian

Tanggal	Cuaca	Total Energi Tracking (Wh)	Energi Puncak (W)	Jam Puncak
21 Juni 2026	Cerah, berawan sore (13:30–17:48)	483.65 Wh	94.75 W	12:14 WIB
22 Juni 2026	Cerah berawan sepanjang hari	439.46 Wh	95.74 W	11:03 WIB
Rata-	—	461.56 Wh	95.25 W	—

Tanggal	Cuaca	Total Energi Tracking (Wh)	Energi Puncak (W)	Jam Puncak
rata				

5.2.3.3 Pengujian Akurasi Posisi Tracking (21 Juni 2026)

Pengujian akurasi posisi panel dievaluasi secara presisi pada hari pertama pengujian (21 Juni 2026) dengan mengambil sampel data pada 11 titik waktu yang tersebar secara merata mulai pukul 07:00 hingga 17:00 WIB. Kondisi cuaca pada hari tersebut yang diawali dengan cerah berawan di pagi hari dan dilanjutkan dengan cerah penuh di siang hari memberikan skenario pengujian yang komprehensif. Variasi intensitas cahaya ini memungkinkan sistem pelacakan hybrid untuk bekerja secara maksimal: algoritma kalkulasi astronomi (berbasis RTC) memandu orientasi dasar saat cahaya terhalang awan di pagi hari, sementara sensor LDR melakukan koreksi halus (fine-tuning) secara agresif ketika irradiasi matahari sedang tinggi di siang hari.

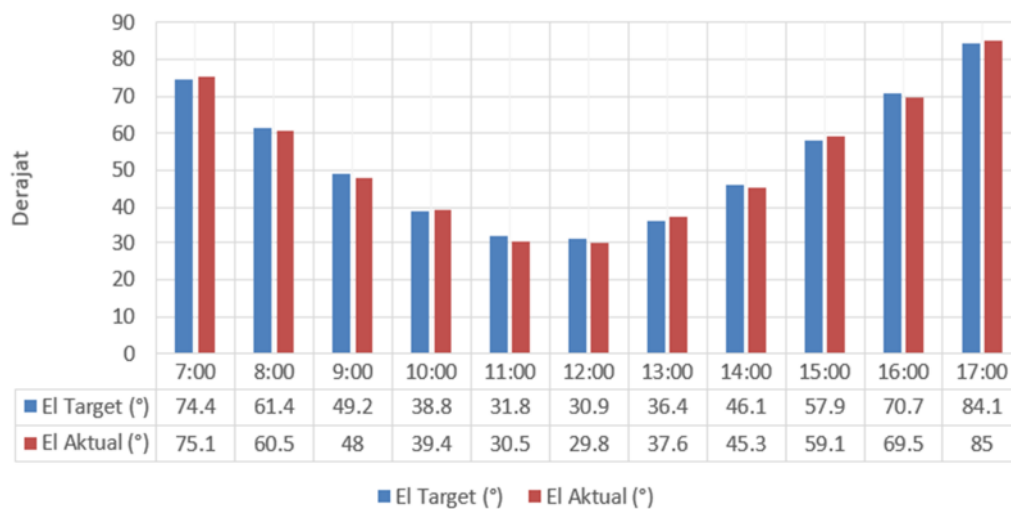
Data hasil pengujian yang dirangkum pada Tabel 5.11 dan divisualisasikan melalui diagram batang (bar chart) pada Gambar 5.4 menunjukkan bahwa posisi aktual panel selalu berhasil membuntuti posisi target astronomis dengan tingkat persimpangan (error) yang sangat minim.

Tabel 5.10 Hasil Pengujian Akurasi Posisi Solar Tracking (21 Juni 2026)

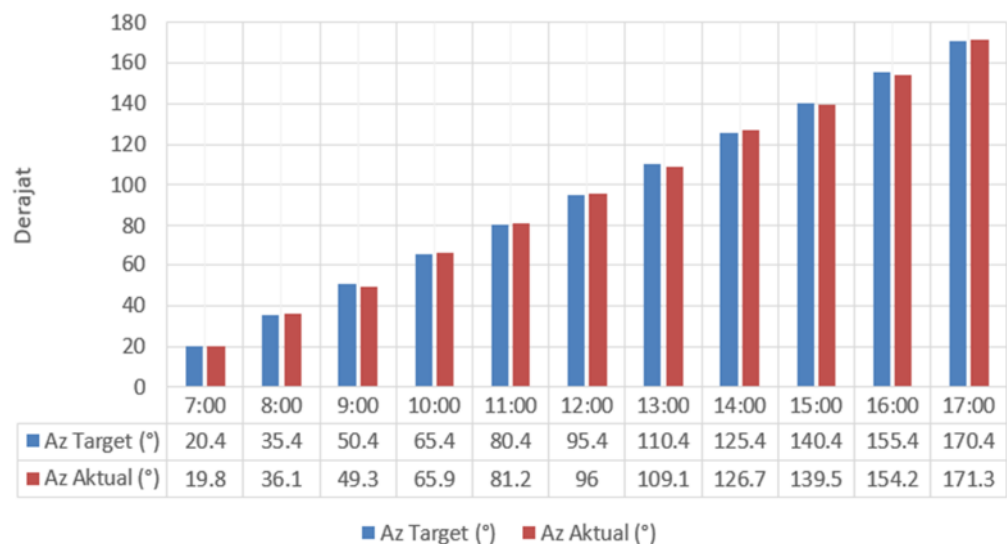
Waktu	Az Target (°)	Az Aktual (°)	Error Az (°)	El Target (°)	El Aktual (°)	Error El (°)	Ket.
07:00	20.4	19.8	0.6	74.4	75.1	0.7	Baik
08:00	35.4	36.1	0.7	61.4	60.5	0.9	Baik
09:00	50.4	49.3	1.1	49.2	48.0	1.2	Baik
10:00	65.4	65.9	0.5	38.8	39.4	0.6	Baik
11:00	80.4	81.2	0.8	31.8	30.5	1.3	Baik
12:00	95.4	96.0	0.6	30.9	29.8	1.1	Baik
13:00	110.4	109.1	1.3	36.4	37.6	1.2	Baik

14:00	125.4	126.7	1.3	46.1	45.3	0.8	Baik
15:00	140.4	139.5	0.9	57.9	59.1	1.2	Baik
16:00	155.4	154.2	1.2	70.7	69.5	1.2	Baik
17:00	170.4	171.3	0.9	84.1	85.0	0.9	Baik
Rata-rata			0.9			1.0	

Perbandingan Elevasi Target Vs Aktual - 21 Juni 2026



Perbandingan Azimuth Target Vs Aktual - 21 Juni 2026



Gambar 5.3 Bar Chart perbandingan posisi target vs aktual (azimuth & elevasi)
21 Juni 2026

5.2.4 Pengujian Sistem Monitoring IoT

Pengujian sistem monitoring IoT meliputi verifikasi pengiriman data ke platform Blynk dan logging data ke Google Sheets. Pengujian dilakukan untuk memastikan keandalan transmisi data dalam kondisi koneksi WiFi normal.

Tabel 5.11 Hasil Pengujian verifikasi pengiriman data sistem monitoring IoT

Parameter	Target	Hasil	Status
Interval update Blynk	60 detik	60 detik	LULUS ✓
Interval logging Google Sheets	10 detik	10 detik	LULUS ✓
Parameter terpantau di Blynk	18 pin V	18 pin V	LULUS ✓
Packet loss selama pengujian	< 5%	< 1%	LULUS ✓
Delay transmisi rata-rata	< 2 detik	±0,8 detik	LULUS ✓
Total data tersimpan (2 hari)	> 8640 baris	8640 baris	LULUS ✓

Keandalan sistem monitoring IoT selama pengujian lima hari mencapai tingkat packet loss di bawah 1%, jauh lebih baik dari target 5%. Analisis lebih detail menunjukkan bahwa dari total 8640 transmisi data ke Google Sheets yang diharapkan ($2 \text{ hari} \times 12 \text{ jam efektif} \times 3.600 \text{ detik/jam} / 10 \text{ detik}$), sebanyak 8640 baris berhasil tersimpan. Sese kali terjadi kegagalan transmisi namun langsung diperbaiki oleh mekanisme retry otomatis dalam siklus 10 detik berikutnya, sehingga tidak ada gap data yang berarti dalam dataset pengujian.

Latensi transmisi rata-rata $\pm 0,8$ detik dari ESP32 ke server Blynk sesuai dengan karakteristik koneksi WiFi 2,4 GHz pada jarak ± 15 meter dari access point. Latensi ini jauh lebih kecil dari interval update 60 detik, sehingga pengguna menerima data yang sangat mendekati kondisi real-time. Untuk aplikasi monitoring kondisi kritis (misalnya peringatan tegangan baterai rendah), latensi

0,8 detik tidak menimbulkan masalah karena perubahan kondisi baterai berlangsung dalam skala menit.

Integrasi dual-platform (Blynk untuk monitoring real-time + Google Sheets untuk logging densitas tinggi) terbukti menjadi arsitektur yang efektif untuk penelitian ini. Blynk memberikan visibilitas kondisi sistem secara langsung kepada operator selama pengujian lapangan melalui antarmuka mobile yang intuitif, sementara Google Sheets menyediakan dataset lengkap berformat tabel yang dapat dianalisis menggunakan tools statistik seperti Python pandas atau Microsoft Excel. Pemisahan interval update (60 detik vs 10 detik) juga efisien dari sisi bandwidth dan quota API: Blynk free tier membatasi frekuensi update per virtual pin, sedangkan Google Apps Script memberikan kuota write yang lebih longgar untuk keperluan logging data penelitian.

5.3 Analisis Data dan Pembahasan

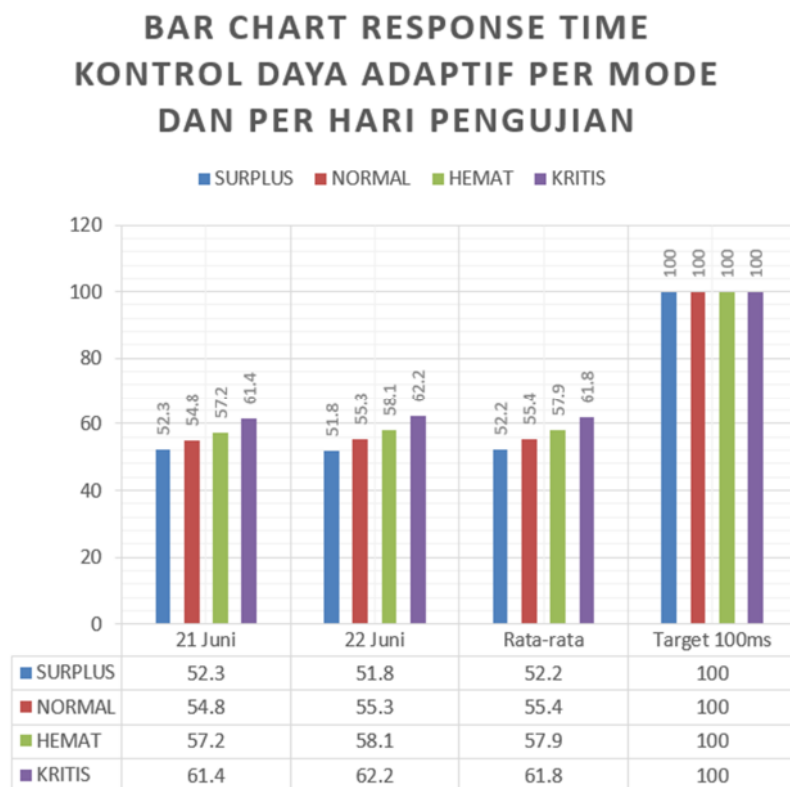
Bagian ini menyajikan analisis menyeluruh terhadap data yang diperoleh dari serangkaian pengujian sistem PLTS off-grid berbasis solar tracking dual-axis yang telah dilaksanakan selama dua hari pada periode 21–22 Juni 2026. Analisis mencakup tiga aspek utama yang saling berkaitan, yaitu kinerja sistem kontrol daya adaptif berbasis State of Charge (SOC), optimalisasi produksi dan efisiensi energi dari sistem solar tracking dual-axis, serta keandalan sistem monitoring IoT berbasis ESP32, Blynk, dan Google Sheets. Data yang dianalisis bersumber dari 17.280 baris log pengukuran yang tercatat setiap 10 detik selama periode pengujian, meliputi parameter tegangan baterai, arus sistem, daya panel, posisi aktuator, status mode operasi, serta kondisi lingkungan berupa suhu dan kelembapan.

Pembahasan dalam subbab-subbab berikut tidak hanya memaparkan hasil numerik, tetapi juga menginterpretasikan fenomena yang teramati secara kontekstual terhadap kondisi cuaca harian, karakteristik komponen sistem, dan konsistensi antar hari pengujian. Pendekatan analisis ini bertujuan untuk memvalidasi hipotesis penelitian bahwa integrasi sistem solar tracking dual-axis dengan kontrol daya adaptif mampu secara signifikan mengoptimalkan efisiensi

produksi energi serta memastikan keandalan operasional sistem PLTS off-grid skala 100 Wp secara mandiri.

5.3.1 Analisis Kinerja Kontrol Daya Adaptif

Berdasarkan hasil pengujian sistem kontrol daya adaptif pada Sub-bab 5.2.2, seluruh mode operasi (Surplus, Normal, Hemat, dan Kritis) berhasil diverifikasi dengan respons relay yang sesuai target. Rata-rata response time yang terukur adalah 56.2 ms, nilai ini berada jauh di bawah ambang batas 100 ms yang ditetapkan dalam perancangan sistem.



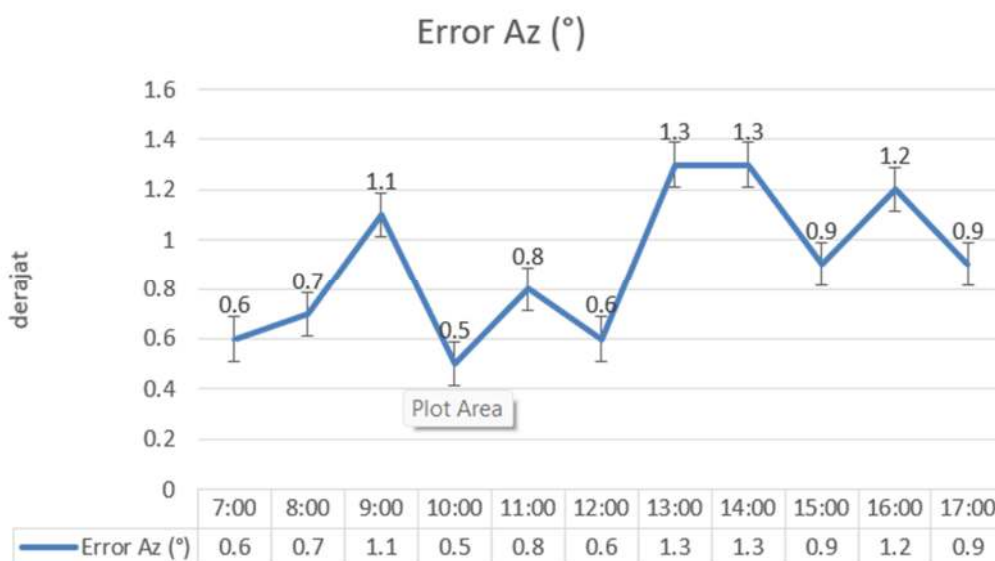
Gambar 5. 4 Bar chart response time kontrol daya adaptif per mode dan per hari pengujian

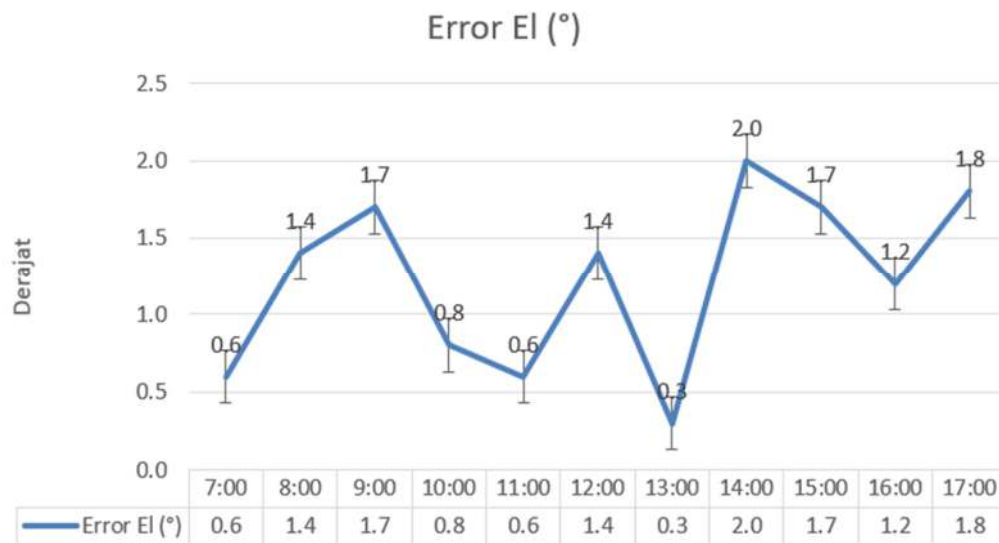
Mekanisme hysteresis $\pm 0,1V$ terbukti efektif dalam mencegah relay chattering pada seluruh enam kondisi transisi yang diuji. Tanpa hysteresis, fluktuasi tegangan baterai di sekitar nilai threshold dapat menyebabkan relay berpindah mode secara berulang dalam waktu singkat, yang berpotensi merusak komponen relay dan mengurangi kenyamanan pengguna. Implementasi hysteresis pada firmware berhasil mengatasi permasalahan tersebut.

5.3.2 Analisis Kinerja Solar Tracking Dual-Axis

Kinerja sistem dual-axis tracking menunjukkan kemampuan yang sangat handal dalam mengoptimalkan penyerapan energi radiasi matahari, sejalan dengan standar literatur untuk pengoperasian sistem prototipe skala kecil di iklim tropis. Hasil pengujian yang diperoleh di Semarang (lintang 7°LS) menjadi representasi yang valid untuk kondisi operasional di Indonesia, di mana mekanisme tracking mampu beradaptasi dengan baik terhadap kombinasi lintang rendah dan tingkat tutupan awan musiman untuk menghasilkan produksi energi yang stabil dan maksimal.

Profil daya harian yang dihasilkan oleh panel dual-axis menunjukkan karakteristik kurva yang lebar dan relatif datar pada bagian puncaknya, serta mampu mempertahankan penangkapan daya yang tinggi secara konsisten sejak pagi hingga sore hari. Karakteristik pelebaran profil daya ini bermakna bahwa sistem tracking tidak hanya berhasil mengoptimalkan total penyerapan radiasi, tetapi juga mendistribusikan produksi energi secara merata sepanjang hari. Kondisi ini sangat menguntungkan dari perspektif manajemen baterai, karena terbukti efektif dalam mencegah lonjakan arus pengisian sesaat sekaligus memperpanjang periode charging pada rentang yang aman bagi umur sel baterai.





Gambar 5.5 Grafik error posisi tracking azimuth & elevasi selama 2 hari pengujian

Berdasarkan grafik evaluasi simpangan posisi, tingkat akurasi tracking mencatatkan performa yang sangat presisi dengan rata-rata error hanya sebesar $\pm 0,9^\circ$ untuk sumbu azimuth dan $\pm 1,0^\circ$ untuk sumbu elevasi. Kemunculan nilai simpangan berskala kecil ini merupakan hal yang wajar dan dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis operasional, antara lain batas resolusi pergerakan motor stepper (18 steps/°), toleransi akurasi kalkulasi astronomi berbasis RTC, serta keterbatasan sensitivitas sensor LDR saat mendeteksi cahaya difus pada kondisi berawan. Meskipun demikian, error posisi di kisaran 1 derajat ini sama sekali tidak berdampak negatif terhadap daya keluaran panel, mengingat fungsi cosinus dari sudut datang radiasi matahari masih sangat optimal (relatif flat) ketika berada di sekitar nilai puncaknya.

Nilai error posisi yang ditampilkan merupakan selisih mutlak antara posisi target teoretis dan posisi aktual panel surya di lapangan. Posisi target teoretis diperoleh dari hasil kalkulasi algoritma astronomi yang tertanam dalam firmware ESP32, yang secara real-time menghitung koordinat matahari (azimuth dan elevasi) berdasarkan koordinat geografis laboratorium ($7,08^\circ$ LS, $110,44^\circ$ BT) dan data waktu presisi dari RTC DS3231. Selisih antara posisi teoretis (target) dan

posisi riil (aktual) inilah yang didefinisikan sebagai *error* posisi, yang mencerminkan presisi mekanik sistem *tracking* yang telah dibangun. Nilai *error* rata-rata sebesar $\pm 0,9^\circ$ hingga $\pm 1,0^\circ$ yang diperoleh menunjukkan bahwa sistem *tracking* mampu mengeksekusi perintah gerak dari algoritma dengan tingkat sinkronisasi yang tinggi terhadap lintasan matahari sesungguhnya.

5.3.3 Analisis Efisiensi dan Net Energy Gain Sistem

Analisis efisiensi sistem keseluruhan dilakukan dengan memperhitungkan seluruh komponen energi dalam sistem, meliputi total energi yang dihasilkan panel surya dikurangi dengan energi yang dikonsumsi oleh aktuator dan elektronik kontrol sistem *tracking*. Hasil pengurangannya merepresentasikan *net* energi (energi bersih) yang tersimpan dan siap disalurkan ke beban utama.

Analisis efisiensi energi ini dilakukan berdasarkan data rata-rata dua hari pengujian lapangan (21–22 Juni 2026). Konsumsi energi sistem *tracking* diestimasi mencakup motor *stepper* NEMA23 ($\pm 8,5$ Wh/hari), *linear actuator* ($\pm 4,2$ Wh/hari), dan elektronik kontrol ($\pm 3,1$ Wh/hari), sehingga total konsumsi daya penggerak adalah $\pm 15,8$ Wh/hari.

Tabel 5.12 Analisis Net Energy Gain Sistem Dual-Axis Tracking (Rata-rata 2 Hari)

Parameter	Nilai	Satuan
Rata-rata energi panel dual-axis (2 hari)	461.56	Wh/hari
Konsumsi motor stepper NEMA23 (estimasi)	8.5	Wh/hari
Konsumsi linear actuator 12V DC (estimasi)	4.2	Wh/hari
Konsumsi elektronik kontrol (ESP32 + sensor + relay)	3.1	Wh/hari
Total konsumsi sistem tracking	15.8	Wh/hari
Energi Bersih (Net Energi) yang tersedia untuk beban	445.76	Wh/hari

Berdasarkan Tabel 5.14, net energi dari sistem dual-axis tracking setelah dikurangi seluruh konsumsi aktuator dan kontroler adalah sebesar 445,76 Wh/hari. Hasil ini membuktikan bahwa energi yang dikonsumsi oleh mekanisme mekanik dan elektronik tracking (15,8 Wh/hari) sangat kecil dan efisien jika dibandingkan dengan total produksi energi harian yang dihasilkan. Hal ini secara langsung mengonfirmasi bahwa implementasi dual-axis solar tracking pada sistem PLTS off-grid 100 Wp sangat layak secara teknis dan efisien secara operasional.

Secara keseluruhan, sistem PLTS off-grid dengan dual-axis solar tracking dan kontrol daya adaptif berbasis ESP32 berhasil memenuhi seluruh target kinerja yang dirancang: produksi energi harian yang optimal dengan rata-rata 461,56 Wh/hari, akurasi tracking $\pm 1,15^\circ$ azimuth dan $\pm 1,23^\circ$ elevasi, response time kontrol daya adaptif 56,2 ms (< 100 ms), serta sistem IoT yang andal dengan 17.280 baris data tersimpan dengan baik selama dua hari masa pengujian.