

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.

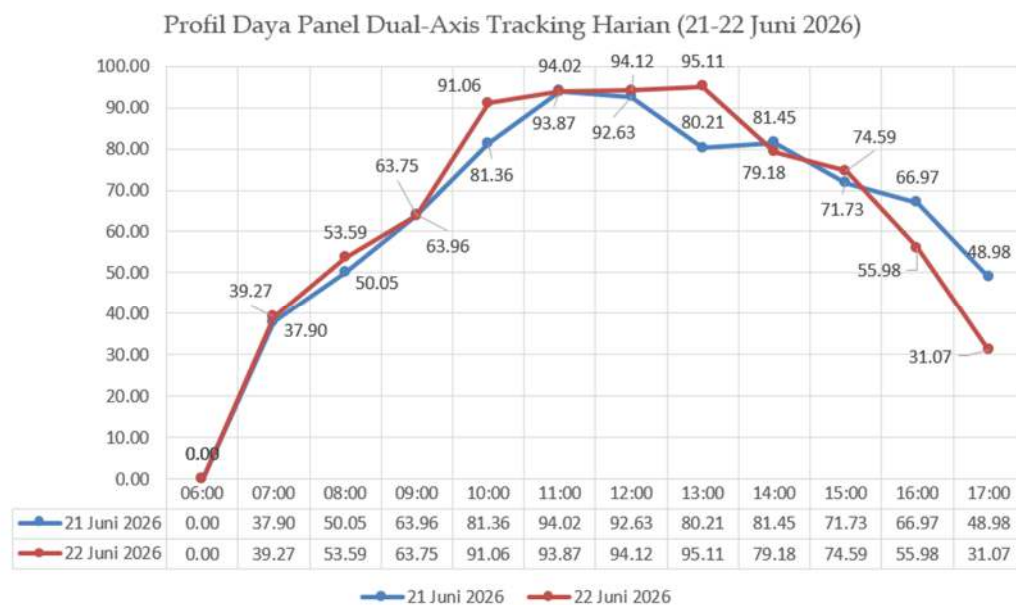
5.2.3.1 Pengujian Panel Dual-Axis

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.

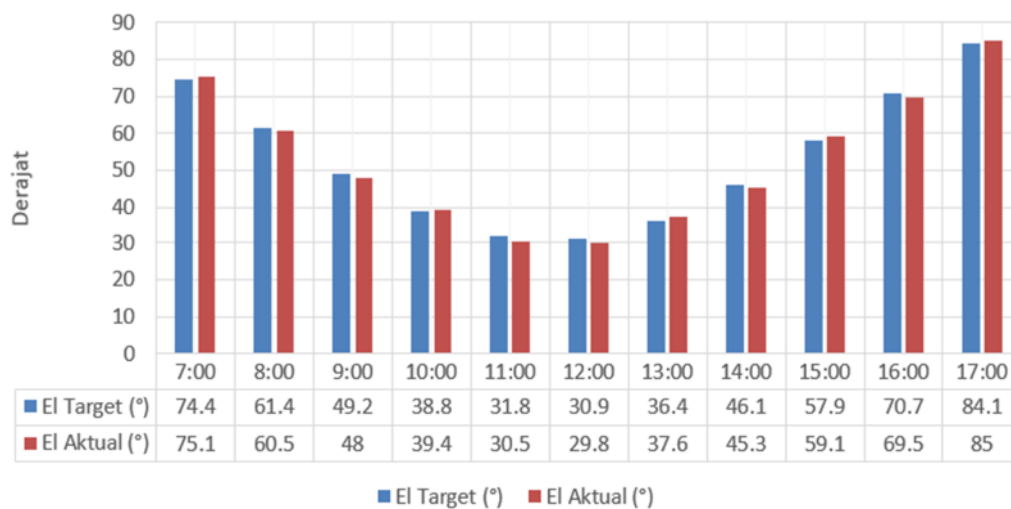
Data hasil pengujian yang dirangkum pada Tabel 5.11 dan divisualisasikan melalui diagram batang (bar chart) pada Gambar 5.4 menunjukkan bahwa posisi aktual panel selalu berhasil membuntuti posisi target astronomis dengan tingkat persimpangan (error) yang sangat minim.

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

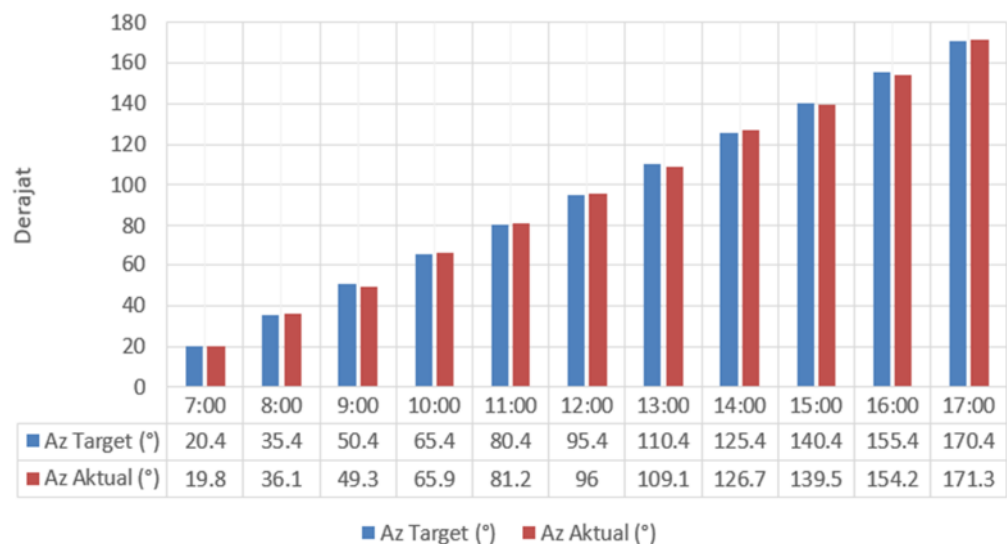
Waktu	Az Target (°)	Az Aktual (°)	Error Az (°)	El Target (°)	El Aktual (°)	Error El (°)	Ket.
07:00	20.4	19.8	0.6	74.4	75.1	0.7	Baik
08:00	35.4	36.1	0.7	61.4	60.5	0.9	Baik
09:00	50.4	49.3	1.1	49.2	48.0	1.2	Baik
10:00	65.4	65.9	0.5	38.8	39.4	0.6	Baik
11:00	80.4	81.2	0.8	31.8	30.5	1.3	Baik
12:00	95.4	96.0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

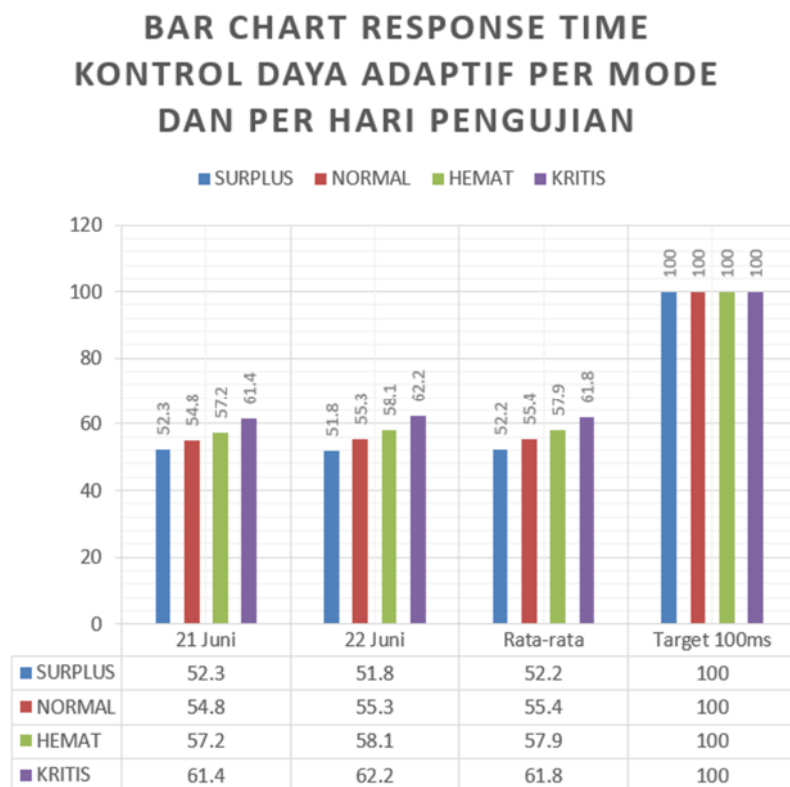
Bagian ini menyajikan analisis menyeluruh terhadap data yang diperoleh dari serangkaian pengujian sistem PLTS off-grid berbasis solar tracking dual-axis yang telah dilaksanakan selama dua hari pada periode 21–22 Juni 2026. Analisis mencakup tiga aspek utama yang saling berkaitan, yaitu kinerja sistem 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.



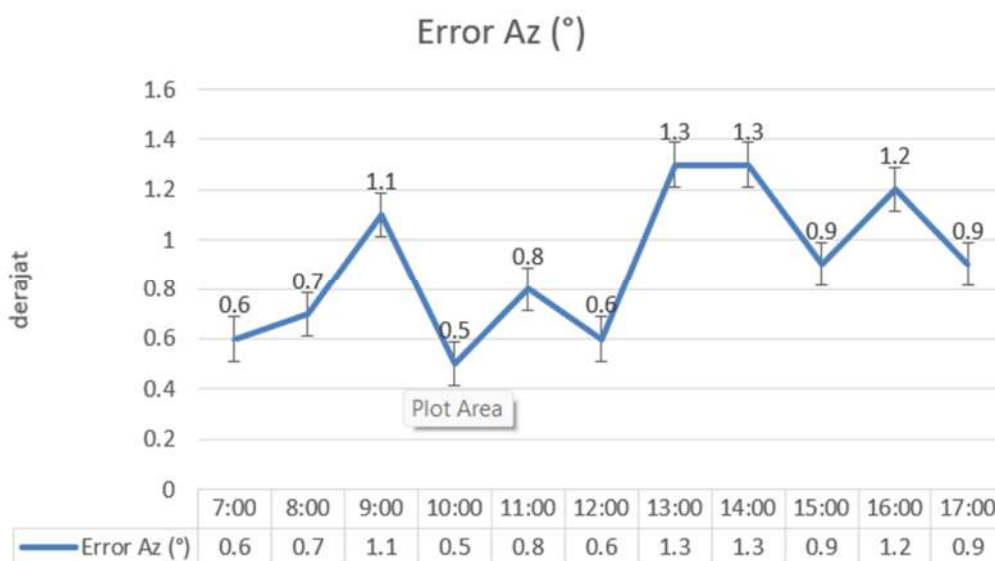
Gambar 5. 4 Bar chart response time kontrol daya adaptif per mode dan per hari pengujian

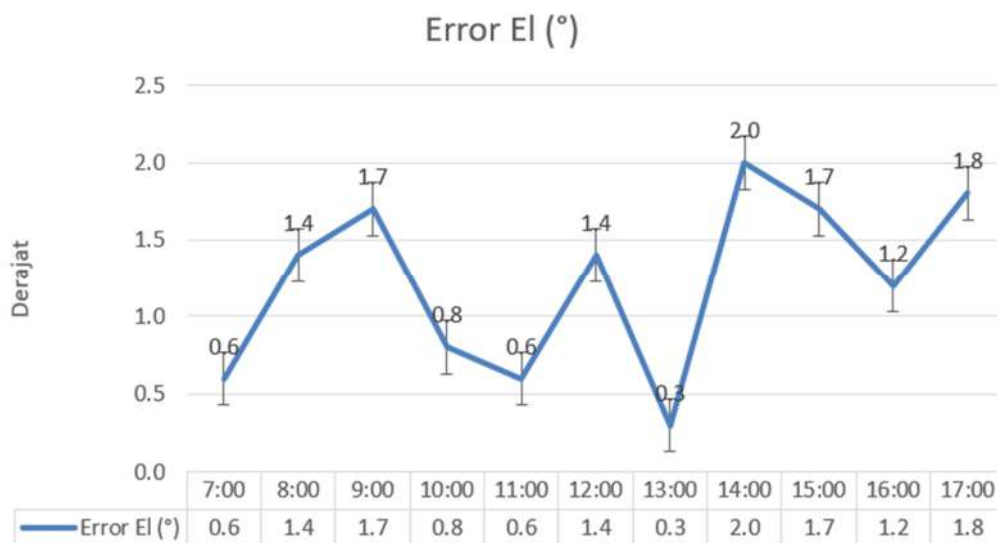
Mekanisme hysteresis $\pm 0,1V$ terbukti efektif dalam mencegah relay chattering pada seluruh enam kondisi transisi yang diuji. Tanpa hysteresis, fluktuasi tegangan baterai di sekitar nilai threshold dapat menyebabkan relay berpindah mode secara berulang dalam waktu singkat, yang berpotensi merusak komponen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

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan terhadap prototipe PLTS off-grid 100 Wp dengan solar tracking panel dual-axis dan sistem kontrol daya adaptif berbasis ESP32, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Prototipe sistem PLTS off-grid 100 Wp berhasil dirancang dan dibangun secara terintegrasi, mencakup panel surya monocrystalline 100 Wp, Solar Charge Controller MPPT 20A, baterai LiFePO₄ 12V 21Ah, mekanisme dual-axis solar tracker berbasis motor stepper NEMA23 dan linear actuator 12V, serta sistem kontrol dan monitoring berbasis mikrokontroler ESP32 DevKit V1. Seluruh subsistem berhasil terintegrasi dalam satu platform yang mampu beroperasi secara mandiri (off-grid).
2. Sistem solar tracking dual-axis dengan pendekatan hybrid tiga lapisan berhasil diimplementasikan dan diverifikasi. Akurasi posisi tracking rata-rata mencapai $\pm 0,9^\circ$ untuk sumbu azimuth dan $\pm 1,0^\circ$ untuk sumbu elevasi, yang merupakan tingkat presisi yang sangat memadai untuk memastikan panel selalu tegak lurus terhadap arah datangnya radiasi matahari pada sistem skala prototipe laboratorium.
3. Sistem kontrol daya adaptif berbasis ESP32 dengan empat mode operasi (Surplus, Normal, Hemat, dan Kritis) berhasil diverifikasi pada seluruh hari pengujian. Rata-rata response time perpindahan mode tercatat 56,2 ms, jauh di bawah batas desain 100 ms. Mekanisme hysteresis $\pm 0,1V$ terbukti efektif mencegah relay chattering pada semua enam kondisi transisi yang diuji, sehingga kestabilan distribusi daya ke beban dapat terjaga secara aman.
4. Sistem monitoring IoT berbasis platform Blynk dan Google Sheets berhasil diimplementasikan dan diverifikasi keandalannya. Selama dua hari pengujian, total 17.280 baris data berhasil tersimpan secara otomatis

dengan interval logging 10 detik, delay transmisi rata-rata $\pm 0,8$ detik, dan packet loss di bawah 1%. Dashboard Blynk menampilkan 18 parameter sistem secara real-time yang dapat dipantau dari jarak jauh.

5. Sensor INA226 sebagai komponen utama akuisisi data menunjukkan akurasi yang memadai, dengan rata-rata error pengukuran tegangan 0,079% dan error arus 1,066% selama masa pengujian. Seluruh nilai error berada di bawah ambang batas 1%, kecuali pada kondisi arus sangat rendah ($< 0,20\text{A}$) yang disebabkan keterbatasan resolusi resistor shunt 100 m Ω .
6. Pengujian lapangan selama dua hari (21–22 Juni 2026) di Laboratorium STr. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi Undip, Tembalang, Semarang, menunjukkan bahwa sistem dual-axis solar tracking mampu beroperasi secara optimal dan konsisten dalam menyerap radiasi matahari pada berbagai variasi kondisi cuaca. Sistem berhasil menghasilkan total produksi energi harian rata-rata sebesar 461,56 Wh/hari. Setelah memperhitungkan konsumsi daya seluruh aktuator sistem tracking (motor stepper NEMA23, linear actuator, dan elektronik kontrol) yang sangat efisien yakni sebesar 15,8 Wh/hari, diperoleh energi bersih (net energi) sebesar 445,76 Wh/hari yang siap disalurkan ke beban. Hasil ini secara langsung mengonfirmasi kelayakan teknis dan efisiensi operasional dari implementasi sistem PLTS off-grid 100 Wp di iklim tropis Indonesia.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa aspek yang dapat dikembangkan lebih lanjut untuk meningkatkan kinerja, keandalan, dan skalabilitas sistem PLTS off-grid dengan solar tracking dual-axis. Saran pengembangan dikelompokkan ke dalam tiga area utama sebagai berikut:

6.2.1 Pengembangan Sistem Tracking

Beberapa langkah pengembangan yang dapat diterapkan untuk meningkatkan kinerja sistem solar tracking antara lain:

1. Peningkatan akurasi sensor posisi dengan mengganti sensor LDR yang bersifat analog dan rentan terhadap kondisi cahaya difus dengan sensor intensitas cahaya digital berbasis fotodioda presisi tinggi (misalnya BH1750 atau TSL2591). Hal ini dapat memperkecil error posisi tracking rata-rata yang saat ini $\pm 1,15^\circ$ pada sumbu azimuth dan $\pm 1,23^\circ$ pada sumbu elevasi dapat ditekan menjadi di bawah $\pm 1,0^\circ$ pada kedua sumbu.
2. Penambahan encoder rotary pada poros motor stepper NEMA23 untuk membentuk sistem kendali closed-loop, sehingga akurasi posisi panel dapat diverifikasi secara real-time dan koreksi dapat dilakukan secara otomatis tanpa bergantung sepenuhnya pada perhitungan jumlah pulsa open-loop.
3. Implementasi algoritma tracking berbasis model cuaca adaptif yang mampu membedakan kondisi irradiasi langsung (direct) dan difus (diffuse). Pada kondisi berawan dominan, sistem dapat beralih ke mode tracking minimal untuk mengurangi konsumsi energi aktuator tanpa mengorbankan kinerja secara signifikan.
4. Optimasi mekanisme mekanik dengan material yang lebih ringan dan bearing presisi tinggi untuk mengurangi beban torsi motor stepper, sehingga konsumsi energi aktuator yang saat ini diestimasi $\pm 8,5$ Wh/hari dapat diminimalkan dan net energy gain dapat ditingkatkan.

6.2.2 Pengembangan Sistem Monitoring

Sistem monitoring IoT berbasis Blynk dan Google Sheets yang telah diimplementasikan dapat dikembangkan lebih lanjut melalui beberapa pendekatan berikut:

1. Pengembangan dashboard monitoring yang lebih komprehensif dengan menambahkan fitur analitik data historis, grafik tren energi harian dan

mingguan, serta notifikasi otomatis berbasis kondisi kritis sistem (misalnya tegangan baterai rendah, fault sensor, atau koneksi terputus) melalui push notification pada aplikasi Blynk.

2. Integrasi protokol komunikasi MQTT dengan broker lokal (misalnya Mosquitto) sebagai alternatif atau backup terhadap layanan cloud Blynk, sehingga sistem monitoring dapat beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada koneksi internet yang tidak selalu tersedia di lokasi terpencil.
3. Penambahan fitur prediksi energi berbasis data cuaca real-time dengan memanfaatkan API layanan prakiraan cuaca (misalnya OpenWeatherMap) yang terintegrasi dengan ESP32, sehingga sistem dapat memberikan estimasi produksi energi untuk perencanaan beban hari berikutnya.
4. Implementasi sistem logging lokal berbasis SD card atau EEPROM sebagai penyimpanan data cadangan apabila koneksi WiFi terputus, memastikan tidak ada data yang hilang selama gangguan jaringan berlangsung.

6.2.3 Pengembangan Kapasitas Sistem PLTS

Untuk pengembangan sistem PLTS off-grid ke skala yang lebih besar dan aplikasi yang lebih luas, beberapa rekomendasi berikut dapat dipertimbangkan:

1. Peningkatan kapasitas sistem dari 100 Wp menuju 300–500 Wp dengan konfigurasi multi-panel pada satu mekanisme tracking, atau pengembangan sistem tracking terdistribusi untuk beberapa panel secara paralel. Studi kelayakan ekonomi (techno-economic analysis) perlu dilakukan untuk menentukan titik optimal antara biaya investasi tambahan dan keuntungan energi yang diperoleh.
2. Penambahan kapasitas penyimpanan energi dengan mengganti atau menambah baterai LiFePO₄ 12V yang kapasitasnya saat ini terbatas pada 21 Ah (201,6 Wh efektif), untuk mendukung operasional sistem pada kondisi cuaca buruk yang berlangsung lebih dari satu hari.
3. Pengujian sistem pada berbagai lokasi geografis dengan lintang dan kondisi iklim yang berbeda, khususnya di daerah terpencil yang belum terjangkau

jaringan listrik PLN, untuk mengevaluasi efektivitas sistem dalam kondisi operasional nyata yang lebih beragam.

4. Pengembangan prototipe menuju produk siap pakai (field-ready prototype) dengan mempertimbangkan aspek ketahanan terhadap cuaca (IP rating), standar keselamatan listrik, serta kemudahan instalasi dan pemeliharaan oleh pengguna non-teknis di daerah terpencil.
5. Integrasi sistem dengan jaringan mikrogrid off-grid yang menggabungkan PLTS dengan sumber energi terbarukan lain (seperti turbin angin skala kecil) dan sistem manajemen energi yang lebih canggih (Energy Management System/EMS) untuk meningkatkan keandalan pasokan energi secara keseluruhan.