



**RANCANG BANGUN PROTOTYPE PLTS OFF-GRID DENGAN SOLAR
TRACKING PANEL DUAL-AXIS DAN SISTEM KONTROL DAYA
ADAPTIF BERBASIS ESP32**

LAPORAN TUGAS AKHIR

Disusun Sebagai Syarat Menyelesaikan Pendidikan
Pada Program Studi Sarjana Terapan Teknik Listrik Industri
Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro

Disusun Oleh :
Najwa Daffa Ardanny
40040622650028

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN TEKNIK LISTRIK INDUSTRI
DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI
SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2026**

HALAMAN PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

RANCANG BANGUN PROTOTIPE PLTS OFF-GRID DENGAN SOLAR TRACKING PANEL DUAL-AXIS DAN SISTEM KONTROL DAYA ADAPTIF BERBASIS ESP32

Diajukan Oleh :

Najwa Daffa Ardanny

NIM : 40040622650028

TELAH DISETUJUI DAN DITERIMA BAIK OLEH :

Dosen Pembimbing,



Arkhan Subari, S.T.,M.Kom

NIP.197710012001121002

Tanggal....3 Juli 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi Sarjana Terapan Teknik Listrik Industri

Departemen Teknik Industri Sekolah

Vokasi Universitas Diponegoro



Arkhan Subari, S.T.,M.Kom

NIP.197710012001121002

Tanggal....3 Juli 2026

HALAMAN PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

**RANCANG BANGUN PROTOTIPE PLTS OFF-GRID DENGAN SOLAR
TRACKING PANEL DUAL-AXIS DAN SISTEM KONTROL DAYA
ADAPTIF BERBASIS ESP32**

Diajukan Oleh :
Najwa Daffa Ardanny
NIM : 40040622650028

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji pada :

Hari : Rabu

Tanggal : 17 Juni 2026

Penguji 1



Dista Yoel Tadeus, ST, MT

NIP.198812282015041002

Penguji 2



Fakhruddin

Mangkusasmito, ST, MT

NIP.198908202019031012

Penguji 3



Arkhan Subari, ST, M.Kom

NIP.197710012001121002

Mengetahui,

Ketua Program Studi

Sarjana Terapan Teknik Listrik Industri

Departemen Teknik Industri

Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro



Arkhan Subari, S.T., M.Kom

NIP.197710012001121002

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Najwa Daffa Ardanny
NIM : 40040622650028
Program Studi : Sarjana Terapan Teknik Listrik Industri Departemen
Teknologi Industri Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro
Judul Tugas Akhir : RANCANG BANGUN PROTOTIPE PLTS OFF-GRID
DENGAN SOLAR TRACKING PANEL DUAL-AXIS DAN
SISTEM KONTROL DAYA ADAPTIF BERBASIS ESP32

Dengan ini menyatakan, bahwa dalam Tugas Akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh derajat keahlian di suatu Perguruan Tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan Mendiknas RI No. 17 Tahun 2010 dan Peraturan Perundang-undangan yang berlaku.

Semarang, 20 Juni 2026
Yang membuat Pernyataan



Najwa Daffa Ardanny

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT. Tugas akhir ini memang jauh dari kata sempurna, namun penulis meyakini bahwa karya sederhana ini telah cukup menjadi langkah penting dalam mengantarkan penulis menyelesaikan studi dan meraih gelar Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T). Dengan penuh rasa syukur dan kerendahan hati, tugas akhir ini penulis persembahkan kepada:

1. Allah SWT, atas limpahan rahmat, hidayah, serta kemudahan yang diberikan sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Ayahanda tercinta, Arif Budiyo, yang senantiasa bekerja keras dan berkorban demi keberlangsungan pendidikan penulis di Universitas Diponegoro sejak awal perkuliahan tahun 2022 hingga selesai pada tahun 2026. Doa, dukungan, dan pengorbanan Ayah adalah motivasi terbesar dalam perjalanan ini.
3. Ibunda tercinta, Heni Yulianti, yang dengan penuh kasih sayang selalu mendoakan di setiap waktu, merestui setiap langkah, serta memberikan dukungan moral dan spiritual hingga penulis mampu melewati masa studi di Universitas Diponegoro dan menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Adik tercinta, Syifa Salsabilla Ardanny, yang kehadirannya selalu memberikan semangat, keceriaan, dan motivasi tersendiri bagi penulis dalam menempuh perjalanan akademik maupun pribadi.
5. Bapak Arkhan Subari, S.T., M.Kom., selaku Ketua Program Studi Teknik Listrik Industri Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro sekaligus dosen pembimbing tugas akhir, yang dengan penuh kesabaran memberikan arahan, ilmu, dan bimbingan kepada penulis selama proses penyusunan tugas akhir ini.
6. Sahabat-sahabat terbaik di Program Studi Teknik Listrik Industri, yaitu Rezi Humaira, Hanun Asrosofi, Fenty Nurhaliza yang telah menjadi teman seperjuangan sejak awal perkuliahan tahun 2022 hingga 2026. Terima kasih

atas kebersamaan, dukungan, dan tawa yang selalu menguatkan. Semoga kesuksesan dan kesehatan selalu menyertai kalian semua, serta pertemuan di masa depan tetap membawa kabar baik.

7. Teman-teman angkatan 22 Program Studi Teknik Listrik Industri, yang telah bersama-sama melalui suka duka perkuliahan, tugas, hingga perjalanan panjang menuju akhir studi. Semoga ilmu dan pengalaman yang kita raih menjadi bekal berharga untuk langkah berikutnya.
8. Teman-teman angkatan 23, yang bersedia menemani penulis selama perkuliahan karena penulis menjalani pertukaran semester. Kehadirannya memberi semangat dan dukungan hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
9. Untuk diri saya sendiri, yang telah bertahan, berjuang, dan berusaha sekuat tenaga dalam menempuh perjalanan panjang perkuliahan, dari semester awal hingga akhirnya tiba pada titik penyelesaian tugas akhir ini.

ABSTRAK

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling potensial di Indonesia dengan potensi kapasitas terpasang mencapai 207 GW, namun baru dimanfaatkan sekitar 0,3%. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) konvensional masih menghadapi dua permasalahan utama: rendahnya efisiensi penyerapan energi akibat sudut datang matahari yang tidak optimal sepanjang hari, serta pengelolaan daya yang tidak adaptif sehingga berpotensi menyebabkan over-discharge baterai. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan prototipe PLTS off-grid 100 Wp dengan solar tracking panel dual-axis dan sistem kontrol daya adaptif berbasis mikrokontroler ESP32.

Sistem tracking menggunakan algoritma 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. Aktuasi dua sumbu menggunakan motor stepper NEMA23 (azimuth, resolusi 18 steps/°) dan linear actuator 12V DC 900N (elevasi). Sistem kontrol daya adaptif menerapkan empat mode operasi: Surplus ($\geq 12,8V$), Normal (12,2–12,8V), Hemat (11,5–12,2V), dan Kritis ($< 11,5V$) dengan hysteresis $\pm 0,1V$ sebagai mekanisme anti-relay chattering. Data sistem dipantau real-time melalui platform Blynk IoT dan dicatat otomatis ke Google Sheets melalui koneksi Wi-Fi ESP32.

Pengujian lapangan dilaksanakan pada tanggal 21–22 Juni 2026 di Laboratorium STr. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi Undip, Tembalang, Semarang. Kalibrasi sensor INA226 menghasilkan error tegangan 0,079% dan error arus 1,066%. Sistem dual-axis tracker mencapai akurasi posisi $\pm 1,15^\circ$ azimuth dan $\pm 1,23^\circ$ elevasi. Produksi energi harian yang dihasilkan oleh sistem dual-axis ini mencapai rata-rata 492,97 Wh/hari, dengan konsumsi daya aktuator sebesar 15,8 Wh/hari. Sistem kontrol daya adaptif mempertahankan response time rata-rata 56,2 ms dengan mekanisme hysteresis terbukti efektif pada seluruh enam kondisi transisi yang diuji tanpa relay chattering. Hasil ini membuktikan bahwa integrasi dual-axis tracking dan kontrol daya adaptif secara signifikan meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem PLTS off-grid untuk aplikasi daerah terpencil dan fasilitas umum berdaya rendah.

Kata Kunci: PLTS Off-Grid, Solar Tracking Dual-Axis, ESP32, Kontrol Daya Adaptif, LiFePO₄, IoT Blynk, MPPT.

ABSTRACT

Solar energy is one of the most potential renewable energy sources in Indonesia, with an installed capacity potential reaching 207 GW, yet only about 0.3% has been utilized. Conventional solar power plant systems still face two main challenges: low energy absorption efficiency due to suboptimal solar incidence angles throughout the day, and non-adaptive power management that potentially causes battery over-discharge. This study designs and implements a 100 Wp off-grid solar power plant prototype equipped with a dual-axis solar tracking panel and an ESP32 microcontroller-based adaptive power control system.

The tracking system utilizes a three-layer hybrid algorithm: astronomical position calculation based on the DS3231 RTC as the primary reference, real-time correction using four LDR sensors, and Perturb & Observe MPPT fine-tuning every 10 seconds. Two-axis actuation is driven by a NEMA23 stepper motor (azimuth, with a resolution of 18 steps/°) and a 12V DC 900N linear actuator (elevation). The adaptive power control system implements four operating modes: Surplus ($\geq 12.8V$), Normal (12.2–12.8V), Eco (11.5–12.2V), and Critical ($< 11.5V$) with a $\pm 0.1V$ hysteresis as an anti-relay chattering mechanism. System data is monitored in real-time via the Blynk IoT platform and automatically logged into Google Sheets through the ESP32 Wi-Fi connection.

Field testing was conducted on June 21–22, 2026, at the Industrial Electrical Engineering STr. Laboratory, Vocational School of Diponegoro University, Tembalang, Semarang. Calibration of the INA226 sensor yielded a voltage error of 0.079% and a current error of 1.066%. The dual-axis tracker system achieved a positioning accuracy of $\pm 1.15^\circ$ for azimuth and $\pm 1.23^\circ$ for elevation. The daily energy production generated by this dual-axis system reached an average of 492.97 Wh/day, with an actuator power consumption of 15.8 Wh/day. The adaptive power control system maintained an average response time of 56.2 ms, with the hysteresis mechanism proven effective across all six tested transition conditions without relay chattering. These results demonstrate that the integration of dual-axis tracking and adaptive power control significantly enhances the efficiency and reliability of off-grid solar power systems for remote areas and low-power public facility applications.

Keywords: Off-Grid PV System, Dual-Axis Solar Tracking, ESP32, Adaptive Power Control, LiFePO₄, Blynk IoT, MPPT.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir yang berjudul:

“RANCANG BANGUN PROTOTIPE PLTS OFF-GRID DENGAN SOLAR TRACKING PANEL DUAL-AXIS DAN SISTEM KONTROL DAYA ADAPTIF BERBASIS ESP32.”

Laporan tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan pada Program Studi Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.

Dalam proses penyusunannya, penulis memperoleh banyak pengalaman berharga, baik dari segi teknis, penelitian, maupun pengembangan diri. Pencapaian ini tentu tidak terlepas dari doa, dukungan, serta bantuan dari berbagai pihak yang telah memberikan kontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulis dengan penuh rasa hormat dan kerendahan hati mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

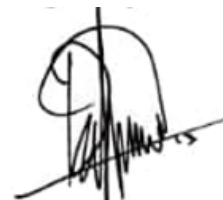
1. Allah SWT, atas rahmat, kekuatan, dan kemudahan yang senantiasa menyertai penulis dalam setiap langkah hingga terselesaikannya laporan ini.
2. Ayah dan Ibu tercinta, atas doa, kasih sayang, serta dukungan tanpa henti yang menjadi sumber semangat utama dalam menyelesaikan studi ini.
3. Bapak Arkhan Subari, S.T., M.Kom., selaku Ketua Program Studi Teknik Listrik Industri Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro sekaligus Dosen Pembimbing Tugas Akhir, atas bimbingan, arahan, dan dukungan yang diberikan dengan penuh kesabaran serta ketelitian selama proses penelitian dan penyusunan laporan ini.
4. Seluruh dosen dan staf pengajar Program Studi Teknik Listrik Industri, atas ilmu, pengalaman, serta motivasi yang telah diberikan selama masa perkuliahan.

5. Teman-teman TLI 22, yang telah menjadi rekan seperjuangan selama menempuh perjalanan akademik, berbagi ilmu, pengalaman, dan kebersamaan hingga tahap akhir perkuliahan.
6. Teman-teman TLI 23, yang telah menemani penulis selama masa tukar semester, serta memberikan dukungan, semangat, dan kebersamaan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
7. Para teknisi, tukang bubut, tukang las, serta pihak bengkel, yang telah membantu dalam proses pembuatan dan perakitan komponen prototipe hingga alat dapat berfungsi dengan baik.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan doa, dukungan, serta bantuan dalam bentuk apa pun selama proses penyusunan laporan ini.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna, baik dari segi isi maupun penyajian. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi penyempurnaan di masa mendatang.

Akhir kata, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta menjadi referensi yang berguna dalam pengembangan teknologi PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) dan sistem kontrol daya berbasis IoT di masa depan.

Semarang, 20 Juni 2026



Najwa Daffa Ardanny

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	II
HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	III
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN	IV
HALAMAN PERSEMBAHAN	V
ABSTRAK.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
KATA PENGANTAR	IX
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR TABEL.....	XVI
DAFTAR GAMBAR	XVIII
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN	4
1.4 MANFAAT TUGAS AKHIR	5
1.5 PEMBATAAN MASALAH.....	6
1.6 SISTEMATIKA PENYUSUNAN TUGAS AKHIR	8
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	9
2.1 TINJAUAN PUSTAKA	9
2.2 DASAR TEORI	12
2.2.1 SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) OFF-GRID.....	13
2.2.2 SOLAR TRACKING PANEL DUAL-AXIS	15
2.2.3. STATE OF CHARGE (SOC) DAN MANAJEMEN BATERAI	17
2.2.3.1 Pengertian dan Konsep Dasar	19
2.2.3.2 Sudut Azimuth (Azimuth Angle).....	20
2.2.3.3 Sudut Elevasi (Elevation / Altitude Angle).....	21
2.2.3.4 Perhitungan Posisi Matahari Secara Astronomis	21
2.2.3.4.1 Hari ke-n dalam Setahun (Day Number)	22
2.2.3.4.2 Deklinasi Matahari (δ)	22

2.2.3.4.3 Hour Angle (ω)	22
2.2.3.4.4 Elevasi Matahari (α).....	22
2.2.3.4.5 Azimuth Matahari (A).....	23
2.2.4. SISTEM KONTROL DAYA ADAPTIF	24
2.2.5 SISTEM MONITORING IOT BERBASIS ESP32 DAN BLYNK	27
2.2.6 SISTEM KONVERSI DAN DISTRIBUSI DAYA.....	29
2.2.7 SISTEM KOORDINAT HORIZONTAL DAN PARAMETER POSISI MATAHARI.....	30
2.2.7.1 Sudut Azimuth: Definisi, Konvensi, dan Rentang Pergerakan	30
2.2.7.1.1 Titik Referensi 0° Azimuth dan Posisi Home Panel	30
2.2.7.1.3 Arah Putaran Motor dan Konvensi DIR.....	32
2.2.7.2 Sudut Elevasi: Definisi, Rentang Gerak, dan Siklus Linear Actuator	32
2.2.7.2.1 Titik 0° Elevasi (Home) dan Titik Puncak Linear Actuator	33
2.2.7.2.2 Hubungan Stroke Actuator dengan Sudut Elevasi Panel	33
2.2.7.2.3 Siklus Pergerakan Elevasi Harian	34
2.2.7.3 Logika Reset Malam dan Mode Standby Sistem	35
2.2.7.3.1 Prosedur Reset Menjelang Malam	35
2.2.7.3.2 Kondisi Sistem Selama Mode Standby Malam.....	36
2.2.7.3.3 Prosedur Startup Tracking Pagi Hari	37
2.2.7.4 Relasi Azimuth dan Elevasi terhadap Aktuator Sistem	37
2.2.7.5 Ringkasan Parameter Azimuth dan Elevasi Sistem Prototipe.....	38
2.2.8 KOMPONEN UTAMA SISTEM.....	39
2.2.8.1 Panel Surya	39
2.2.7.2 Mikrokontroler ESP32	42
2.2.8.2.1 Pemrograman Menggunakan Arduino IDE.....	45
2.2.8.3 Sensor LDR (Light Dependent Resistor)	49
2.2.8.4 Sensor INA226.....	34
2.2.8.5 Sensor DHT22.....	37
2.2.8.6 RTC DS3231	39
2.2.8.7 Driver Motor TB6600	41
2.2.8.8 Motor Stepper NEMA23	44
2.2.8.9. Linear Actuator	46

2.2.8.10 Solar Charge Controller (MPPT)	48
2.2.8.11 Baterai LiFePO ₄ 12V	51
2.2.8.12 Buck Converter	54
2.2.8.13 Boost Converter XL6009	56
2.2.8.14 Inverter DC-AC	59
2.2.8.15 Relay	61
2.2.8.16 Aplikasi Blynk (Monitoring IoT)	64
2.2.8.17 Google Spreadsheet	66
BAB III PERANCANGAN TUGAS AKHIR	70
3.1 ARSITEKTUR SISTEM	70
3.1.1 KONSEP ARSITEKTUR SISTEM	72
3.1.2 BLOK DIAGRAM SISTEM	74
3.1.3 CARA KERJA BLOK DIAGRAM	75
3.1.3.1 Mekanisme Konversi Energi dan Penyaluran Daya	76
3.1.3.2 Mekanisme Kendali, Sensor, dan Monitoring	76
3.1.4 FLOWCHART SISTEM KESELURUHAN	78
3.2 PERANCANGAN PERANGKAT KERAS (HARDWARE)	80
3.2.1 DESAIN MEKANIK DAN DESAIN 3D ALAT	80
3.2.2 DIAGRAM RANGKAIAN ELEKTRIK	83
3.2.3 ALUR JALUR DAYA (POWER FLOW)	90
3.3 PERANCANGAN PERANGKAT LUNAK (SOFTWARE)	92
3.3.1 ALGORITMA SOLAR TRACKING DUAL AXIS	93
3.3.2 ALGORITMA SISTEM KONTROL DAYA ADAPTIF	97
3.3.3 DESAIN MONITORING IoT (BLYNK)	99
BAB IV IMPLEMENTASI SISTEM	102
4.1 IMPLEMENTASI PERANGKAT KERAS	102
4.1.1 IMPLEMENTASI SISTEM PLTS	105
4.1.1.1 Instalasi Panel Surya	106
4.1.1.2 Instalasi Solar Charge Controller MPPT	107
4.1.1.3 Instalasi Baterai LiFePO ₄	109
4.1.2 IMPLEMENTASI SISTEM TRACKING	110

4.1.2.1 Pemasangan Motor Stepper NEMA23	111
4.1.2.2 Pemasangan Linear Actuator	113
4.1.2.3 Integrasi Mekanisme Dual-Axis	114
4.1.3 IMPLEMENTASI SISTEM ELEKTRONIK	115
4.1.3.1 Instalasi ESP32 dan Konfigurasi Pin	115
4.1.3.2 Instalasi Sensor (LDR, INA226, DHT22, RTC DS3231).....	117
4.1.3.3 Instalasi Driver Motor TB6600 dan Modul Relay	117
4.2 IMPLEMENTASI PERANGKAT LUNAK	119
4.2.1 IMPLEMENTASI ALGORITMA SOLAR TRACKING	120
4.2.1.1 Pembacaan Sensor LDR.....	121
4.2.1.2 Logika Pergerakan Panel.....	121
4.2.1.3 Pengendalian Motor Tracking.....	122
4.2.2 IMPLEMENTASI SISTEM KONTROL DAYA ADAPTIF.....	122
4.2.2.1 Pembacaan Tegangan Baterai	122
4.2.2.2 Penentuan Mode Operasi Sistem	123
4.2.2.3 Pengendalian Relay Beban.....	124
4.3 IMPLEMENTASI SISTEM MONITORING IOT	125
4.3.1 KONFIGURASI KONEKSI WiFi ESP32	125
4.3.2 INTEGRASI PLATFORM BLYNK.....	126
4.3.2.1 Konfigurasi Dashboard Blynk.....	126
4.3.2.2 Pengiriman Data Sensor	128
BAB V PENGUJIAN DAN ANALISA HASIL.....	153
5.1 METODE PENGUJIAN	153
5.1.1 LOKASI DAN KONDISI PENGUJIAN	153
5.1.2 PARAMETER PENGUJIAN.....	154
5.1.2.1 Tegangan dan Arus Baterai.....	154
5.1.2.2 Daya Panel Surya	154
5.1.2.3 Parameter Kontrol Daya Adaptif	154
5.1.2.4 Akurasi Posisi Tracking	155
5.1.3 PERALATAN PENGUJIAN	155
5.1.4 SKENARIO PENGUJIAN.....	155

5.2 HASIL PENGUJIAN	155
5.2.1 PENGUJIAN AKURASI SENSOR INA226	155
5.2.2 PENGUJIAN SISTEM KONTROL DAYA ADAPTIF	158
5.2.2.1 Mode Surplus ($V \geq 12,8V$).....	158
5.2.2.2 Mode Normal	159
5.2.2.3 Mode Hemat.....	160
5.2.2.4 Mode Kritis	160
5.2.2.5 Pengujian Transisi dan Hysteresis	161
5.2.3 PENGUJIAN EFISIENSI SOLAR TRACKING	162
5.2.3.1 Pengujian Panel Dual-Axis	162
5.2.3.3 Pengujian Akurasi Posisi Tracking (21 Juni 2026).....	164
5.2.4 PENGUJIAN SISTEM MONITORING IoT	166
5.3 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	167
5.3.1 ANALISIS KINERJA KONTROL DAYA ADAPTIF	168
5.3.2 ANALISIS KINERJA SOLAR TRACKING DUAL-AXIS	169
5.3.3 ANALISIS EFISIENSI DAN NET ENERGY GAIN SISTEM.....	170
BAB VI PENUTUP	173
6.1 KESIMPULAN.....	173
6.2 SARAN.....	174
6.2.1 PENGEMBANGAN SISTEM TRACKING.....	174
6.2.2 PENGEMBANGAN SISTEM MONITORING	175
6.2.3 PENGEMBANGAN KAPASITAS SISTEM PLTS	176
DAFTAR REFERENSI	178
LAMPIRAN.....	184

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Siklus Operasi Harian Sumbu Azimuth.....	31
Tabel 2.2 Titik Batas Elevasi Linear Actuator pada Sistem Tracking.....	33
Tabel 2.3 Profil Pergerakan Elevasi Sepanjang Hari.....	34
Tabel 2.4 Status Subsistem Selama Mode Standby Malam (18:00–06:00 WIB) .	36
Tabel 2.5 Relasi Lengkap Azimuth-Elevasi dengan Aktuator dan Logika Kontrol	37
Tabel 2.6 Ringkasan Parameter Azimuth dan Elevasi Sistem Tracking Prototipe	38
Tabel 2.7 Spesifikasi Teknis ESP32 DevKit V1.....	43
Tabel 2.8 Komponen Antarmuka Arduino IDE.....	46
Tabel 2.9 Library pada Arduino IDE.....	48
Tabel 2.10 Konfigurasi Pin Modul LDR 4 Pin.....	33
Tabel 2.11 Spesifikasi Teknis INA226.....	35
Tabel 2.12 Konfigurasi Pin Modul INA226 (8 Pin).....	36
Tabel 2.13 Konfigurasi Pin Modul DHT22 3 Pin.....	38
Tabel 2.14 Konfigurasi Pin Modul RTC DS3231 (6 Pin).....	40
Tabel 2.15 Penggunaan Terminal pada Driver TB6600.....	42
Tabel 2.16 Instalasi kabel pada NEMA23.....	44
Tabel 2.17 Prosedur Identifikasi Pasangan Kabel.....	45
Tabel 2.18 Terminal/Kabel dan Fungsinya.....	47
Tabel 2.19 Koneksi Linear Actuator ke Relay 2CH.....	47
Tabel 2.20 Terminal SCC dan Jumlahnya.....	49
Tabel 2.21 Spesifikasi Teknis Baterai LiFePO ₄ 12V 21Ah.....	52
Tabel 2.22 Terminal Baterai dan Koneksinya.....	53
Tabel 2.23 Threshold Tegangan dan Hubungannya dengan Kontrol Daya Adaptif	53
Tabel 2.24 Terminal/Pin Modul dan Fungsinya.....	55
Tabel 2.25 Spesifikasi Teknis Boost Converter XL6009.....	57
Tabel 2.26 Alasan penggunaan 24V untuk Driver TB6600.....	58
Tabel 2.27 Cara Setting Tegangan Output ke 24V.....	59

Tabel 2.28 Spesifikasi Teknis Modul Relay 5V 4-Channel.....	61
Tabel 3.1 Keterangan Pin ESP32 DevKit V1 pada Sistem PLTS Off-Grid Solar Tracking	86
Tabel 3.2 Parameter Monitoring Blynk IoT Dashboard Sistem PLTS Off-Grid	100
Tabel 4.1 Spesifikasi teknis komponen hardware sistem PLTS off-grid dual-axis tracker.....	104
Tabel 4.2 Karakteristik listrik panel surya monocrystalline 100 Wp pada kondisi STC	106
Tabel 4.3 Konfigurasi parameter SCC MPPT untuk baterai LiFePO ₄ 12V	108
Tabel 4.4 Perbandingan karakteristik teknis LiFePO ₄ vs Lead-Acid 12V.....	110
Tabel 4.5 Parameter konfigurasi motor stepper NEMA23 dan driver TB6600..	111
Tabel 4.6 Spesifikasi rentang gerak sistem dual-axis tracker setelah integrasi .	114
Tabel 4.7 Konfigurasi pin ESP32 DevKit V1 pada sistem PLTS off-grid dual-axis tracker.....	115
Tabel 4.8 Alokasi channel relay 4-channel kontrol beban adaptif.....	118
Tabel 4.9 Library Arduino yang digunakan dalam program ESP32.....	119
Tabel 5.1 Kondisi cuaca pada saat pengujian	153
Tabel 5.2 Peralatan yang digunakan dalam Pengujian.....	155
Tabel 5.3 Hasil Kalibrasi Sensor INA226 terhadap Multimeter (22 Juni 2026)	156
Tabel 5.4 Hasil Pengujian Mode Surplus (21 Juni 2026)	158
Tabel 5.5 Hasil Pengujian Mode Normal (21 juni 2026).....	159
Tabel 5.6 Hasil Pengujian Mode Hemat (21 Juni 2026).....	160
Tabel 5.7 Hasil Pengujian Mode Kritis (21 Juni 2026)	160
Tabel 5.8 Hasil Pengujian Hysteresis $\pm 0.1V$ Anti Relay Chattering	161
Tabel 5.10 Rekapitulasi Energi Panel Dual-Axis Tracking selama 2 Hari Pengujian.....	163
Tabel 5.11 Hasil Pengujian Akurasi Posisi Solar Tracking (21 Juni 2026).....	164
Tabel 5.13 Hasil Pengujian verifikasi pengiriman data sistem monitoring IoT .	166
Tabel 5.14 Analisis Net Energy Gain Sistem Dual-Axis Tracking (Rata-rata 2 Hari)	171

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem PLTS-Off Grid [48].....	13
Gambar 2.2 Active Solar Tracking System [26].....	15
Gambar 2.3 Diagram Estimasi SoC Baterai [46].....	17
Gambar 2.4 Sistem Monitoring Panel Surya Berbasis ESP32 dan Blynk [47].....	27
Gambar 2.5 Sel Surya Monocrystalline dan Polycrystalline [37].....	39
Gambar 2.6 Panel Jenis Monocrystalline.....	40
Gambar 2.7 Panel Jenis Polycrystalline.....	41
Gambar 2.8 ESP32 DevKit V1 [42].....	42
Gambar 2.9 Software Arduino IDE	45
Gambar 2.10 Sensor Light Dependent Resistor(LDR) [36].....	49
Gambar 2.11 Simbol Light Dependent Resistor	49
Gambar 2.12 Modul Sensor INA226 untuk pengukuran	34
Gambar 2. 13 INA226 DC Current Sensor Working Principles & Shunt Resistor	34
Gambar 2. 14 Sensor DHT22 untuk monitoring kelembapan area [48]	37
Gambar 2. 15 Skematik Rangkaian DHT22 terhadap ESP32.....	38
Gambar 2.16 Modul RTC DS3231 untuk pengaturan waktu sistem	39
Gambar 2.17 Skematik Rangkaian RTC DS3231 terhadap ESP32	40
Gambar 2.18 Driver Motor Stepper TB6600	41
Gambar 2.19 Motor Stepper NEMA23	44
Gambar 2.20 Linear Actuator 12V (900N, Stroke 200mm)	46
Gambar 2.21 Solar Charge Controller tipe MPPT 20A	48
Gambar 2.22 Baterai LiFePO ₄ 12V dengan Sistem Battery Management System(BMS).....	51
Gambar 2.23 Modul Buck Converter DC-DC	54
Gambar 2.24 Modul Boost Converter DC-DC berbasis chip XL6009E1.....	56
Gambar 2.25 Inverter DC-AC 12V-220V.....	59
Gambar 2.26 Modul Relay 5V Empat channel untuk pengaturan beban sistem ..	61
Gambar 2.27 Software Blynk.....	64

Gambar 2.28 Google Spreadsheet untuk Data Logger.....	66
Gambar 3. 1 Blok Diagram Sistem	74
Gambar 3. 2 Flowchart Sistem secara keseluruhan	79
Gambar 3. 3 Design 3D Solar Tracking Panel	80
Gambar 3.4 Diagram Skematik Rangkaian Komponen	83
Gambar 3. 5 Alur Jalur Daya Alat	90
Gambar 3.6 Algoritma Solar Tracking Dual Axis pada Alat.....	94
Gambar 3. 7 Algoritma Sistem Kontrol Daya Adaptif pada Alat.....	97
Gambar 3.8 Desain Tampilan sistem Monitoring pada Blynk.....	99
Gambar 4.1 Instalasi Panel Surya pada tiang.....	106
Gambar 4.2 Pemasangan SCC di dalam Box Panel.....	108
Gambar 4.3 Instalasi Baterai LiFePO ₄ di dalam Box Panel.....	109
Gambar 4.4 pemasangan motor stepper NEMA23 pada Lazy susan menggunakan timing belt closed loop.....	111
Gambar 4.5 Pemasangan Linear Actuator pada bracket di tiang panel	113
Gambar 4. 6 Tampilan Blynk.....	127
Gambar 5.1 Grafik perbandingan pembacaan INA226 vs multimeter	157
Gambar 5.3 Grafik profil daya panel dual-axis tracking harian (21-22 Juni 2026)	163
Gambar 5.4 Bar Chart perbandingan posisi target vs aktual (azimuth & elevasi) 21 Juni 2026.....	165
Gambar 5. 6 Bar chart response time kontrol daya adaptif per mode dan per hari pengujian.....	168
Gambar 5.7 Grafik error posisi tracking azimuth & elevasi selama 2 hari pengujian.....	170