

BAB IV

IMPLEMENTASI SISTEM

4.1 Implementasi Perangkat Keras

Implementasi perangkat keras dilakukan berdasarkan skema perancangan pada Bab III, yang mencakup tiga subsistem utama: sistem pembangkitan dan penyimpanan energi (PLTS), mekanisme mekanik dual-axis solar tracking, dan sistem elektronik kontrol berbasis ESP32. Proses implementasi dikerjakan secara bertahap dan terurut, dimulai dari instalasi sistem daya sebagai fondasi energi, dilanjutkan dengan perakitan mekanisme tracking, kemudian integrasi seluruh komponen elektronik sebagai otak sistem.

Setiap komponen dipilih berdasarkan kesesuaian spesifikasi teknis terhadap kebutuhan sistem, ketersediaan di pasaran, serta kemampuan beroperasi secara terintegrasi dalam satu arsitektur berbasis tegangan 12V DC. Proses perakitan dilakukan dengan memperhatikan aspek keamanan elektrik, pengelolaan kabel yang rapi, serta kemudahan akses untuk keperluan pengujian dan pemeliharaan. Seluruh komponen ditempatkan dalam enclosure yang melindungi rangkaian elektronik dari paparan debu dan kelembapan, mengingat sistem diuji di lingkungan luar ruangan selama pengujian lapangan.

Ground sistem disatukan pada satu titik (single point grounding) untuk menghindari ground loop yang dapat mengganggu pembacaan sensor analog LDR dan menyebabkan error pada komunikasi I²C antara ESP32, INA226, dan RTC DS3231. Sebelum pengujian fungsional dilakukan, seluruh koneksi diverifikasi menggunakan multimeter untuk memastikan tidak ada sambungan terbalik, short circuit, maupun sambungan yang longgar.

Sebelum dilakukan pengujian fungsional, proses commissioning awal dilaksanakan secara bertahap untuk memverifikasi integritas setiap subsistem. Tahap pertama adalah power-on test jalur daya, yaitu memverifikasi tegangan output buck converter ($5V \pm 0,2V$) menggunakan multimeter sebelum ESP32 dihubungkan, untuk memastikan tidak terjadi overvoltage yang dapat merusak mikrokontroler. Tahap kedua adalah continuity test seluruh jalur I²C dan GPIO

menggunakan mode resistansi multimeter sebelum ESP32 dinyalakan. Tahap ketiga adalah functional test per-subsistem secara terpisah (sistem daya, sistem tracking, sistem monitoring) sebelum dilakukan integrasi penuh. Pendekatan komisioning bertahap ini meminimalkan risiko kerusakan komponen akibat sambungan yang salah atau tegangan berlebih pada fase awal perakitan.

Seluruh kabel daya pada jalur tegangan tinggi (12V dan 24V) menggunakan kabel AWG 16 dengan kapasitas arus minimum 10A, sedangkan kabel sinyal sensor dan kontrol menggunakan kabel AWG 24. Jalur daya positif diberi warna merah dan jalur negatif (ground) diberi warna hitam secara konsisten untuk menghindari sambungan terbalik. Ferrite bead dipasang pada jalur sinyal ADC dari sensor LDR menuju pin GPIO ESP32 sebagai filter EMI terhadap interferensi switching frekuensi tinggi dari driver TB6600 dan boost converter XL6009 yang beroperasi pada 400 kHz.

Hasil dari keseluruhan proses implementasi perangkat keras ini adalah sebuah prototipe sistem PLTS off-grid yang terintegrasi penuh, di mana seluruh subsistem pembangkitan energi, penyimpanan baterai, mekanisme tracking dual-axis, kontrol daya adaptif, dan monitoring IoT terhubung dan beroperasi dalam satu platform berbasis ESP32. Prototipe yang telah dirakit dan diverifikasi ini selanjutnya menjadi dasar bagi implementasi perangkat lunak serta serangkaian pengujian lapangan yang dibahas pada subbab berikutnya.

Tabel 4.1 berikut merangkum spesifikasi teknis seluruh komponen hardware yang digunakan pada sistem PLTS off-grid dual-axis tracker beserta fungsi masing-masing dalam sistem:

Tabel 4.1 Spesifikasi teknis komponen hardware sistem PLTS off-grid dual-axis tracker.

No	Komponen	Spesifikasi Utama	Jml	Fungsi
1	Panel Surya Monocrystalline	100 Wp, Voc 26.48V, Isc 4.94 A, Vmp 22.8 V, Imp 4.39 A	1	Sumber energi utama
2	Solar Charge Controller MPPT	20A, Vin max 50V, Vbat 12V, efisiensi $\geq 93\%$	1	Regulasi pengisian baterai
3	Baterai LiFePO ₄	12V 21Ah, BMS 20A, cutoff 10,0V, Vmaks 14,6V	1	Penyimpanan energi
4	ESP32 DevKit V1	Dual-core 240 MHz, WiFi 2,4 GHz, ADC 12-bit	1	Mikrokontroler utama
5	Motor Stepper NEMA23	1,8°/step, holding torque 1,2 Nm, 3A/fase, 2,85 VDC (rated)	1	Aktuator sumbu azimuth
6	Driver TB6600	9–42 VDC, 4A maks, microstepping hingga 1/32	1	Driver motor stepper
7	Linear Actuator	12V DC, gaya 900N, stroke 200mm, 5mm/s	1	Aktuator sumbu elevasi
8	Sensor LDR	Resistansi 1k Ω –1M Ω , respon 400–700nm	4	Deteksi intensitas cahaya
9	Sensor INA226	16-bit ADC, $\pm 0,1\%$, I ² C, shunt 100m Ω , batas 3,2A	1	Pengukuran V, I, P baterai
10	Sensor DHT22	$\pm 0,5^\circ\text{C}$, $\pm 2\%$ RH, waktu sampling 2 detik	1	Suhu dan kelembapan
11	Modul RTC DS3231	± 2 ppm, I ² C, baterai backup CR2032	1	Referensi waktu sistem
12	Relay 2-channel	5V trigger, 10A, isolasi optocoupler	1	Kendali linear actuator
13	Relay 4-channel	5V trigger, 10A, isolasi	1	Kendali 4 prioritas

No	Komponen	Spesifikasi Utama	Jml	Fungsi
		optocoupler		beban
14	Buck Converter DC-DC	Input 12V → Output 5V, 3A, efisiensi $\geq 90\%$	1	Suplai ESP32 dan sensor
15	MCB DC	16A, 2 pole	2	Proteksi arus lebih
16	Fuse DC	15A	2	Proteksi tambahan

Berdasarkan Tabel 4.1, sistem prototipe PLTS off-grid ini menggunakan total 17 jenis komponen yang saling terintegrasi dalam satu arsitektur berbasis tegangan 12V DC. Panel surya monocrystalline 100Wp berfungsi sebagai sumber energi primer yang mengonversi radiasi matahari menjadi energi listrik DC, kemudian disalurkan melalui Solar Charge Controller MPPT 20A untuk mengisi baterai LiFePO₄ 12V 21Ah secara optimal. SCC MPPT secara otomatis melacak titik daya maksimum (MPP) panel agar efisiensi penyerapan energi tetap tinggi pada berbagai kondisi iradiasi dan suhu lingkungan. Baterai LiFePO₄ yang dilengkapi BMS 20A berperan sebagai media penyimpanan energi sekaligus sumber daya utama seluruh sistem elektronik saat panel tidak menghasilkan daya.

ESP32 DevKit V1 berperan sebagai pusat kendali yang mengeksekusi algoritma tracking hybrid tiga lapisan, mengelola kontrol daya adaptif empat mode, serta menangani komunikasi IoT secara paralel menggunakan arsitektur dual-core 240MHz. Modul RTC DS3231 menyediakan referensi waktu presisi $\pm 2\text{ppm}$ sebagai dasar kalkulasi posisi astronomis matahari pada Layer 1 algoritma tracking, sedangkan empat sensor LDR yang dipasang pada setiap sisi panel mendeteksi perbedaan intensitas cahaya antar kuadran sebagai masukan koreksi posisi pada Layer 2.

Sensor INA226 menyediakan data tegangan dan arus baterai dengan presisi 16-bit sebagai masukan utama sistem kontrol daya adaptif, dan sensor DHT22 melengkapi data monitoring lingkungan dengan pembacaan suhu serta kelembapan yang dikirimkan ke dashboard Blynk IoT secara periodik.

4.1.1 Implementasi Sistem PLTS

Subsistem PLTS terdiri dari tiga komponen yang membentuk rantai konversi energi: panel surya sebagai sumber, MPPT solar charge controller sebagai regulator, dan baterai LiFePO₄ sebagai penyimpan. Alur daya mengikuti jalur: Panel → SCC MPPT → Baterai → Bus DC 12V → Beban. Seluruh jalur daya dilindungi oleh MCB DC dan fuse yang dipasang sesuai rating arus masing-masing komponen.

4.1.1.1 Instalasi Panel Surya

Panel surya monocrystalline 100 Wp yang tampak pada gambar 4.1 dipasang padaudukan bracket logam yang terhubung langsung dengan rangka mekanik sistem dual-axis tracker. Posisi awal panel saat sistem dinyalakan diarahkan ke timur (azimuth 90°) sebagai titik referensi (home position) sebelum algoritma tracking mulai beroperasi.



Gambar 4.1 Instalasi Panel Surya pada tiang

Kabel output panel menggunakan kabel DC 4 mm² dengan panjang maksimal 2 meter untuk meminimalkan resistansi jalur. Pada kondisi irradiance puncak sekitar 1000 W/m², panel menghasilkan daya maksimum 100,08 W ($I_{mp} = 4.39$ A; $V_{mp} = 22.8$ V). Jalur antara panel dan SCC dilindungi oleh MCB DC 16A. Karakteristik listrik panel surya yang digunakan dirangkum pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Karakteristik listrik panel surya monocrystalline 100 Wp pada kondisi STC

Parameter	Simbol	Nilai
Daya maksimum	P _{max}	100 Wp

Parameter	Simbol	Nilai
Tegangan open circuit	Voc	26.48 V
Tegangan titik daya maksimum	Vmp	22.8 V
Arus short circuit	Isc	4.94 A
Arus titik daya maksimum	Imp	4.39 A
Efisiensi konversi	η_{cell}	19,4%
Koefisien temperatur daya	γ	-0,45 %/°C
Dimensi panel	—	760 × 670 × 35 mm

Orientasi awal panel pada saat sistem dinyalakan ditetapkan pada azimuth 90° (menghadap timur) dan elevasi 45° sebagai posisi *home* yang digunakan sebagai titik referensi koordinat sistem *tracking*. Pemilihan posisi *home* ini didasarkan pada dua pertimbangan: pertama, panel yang menghadap timur dapat langsung menyerap radiasi pagi sejak matahari terbit tanpa perlu melakukan pergerakan besar; kedua, elevasi 45° merupakan posisi tengah dari rentang gerak sumbu elevasi (0°–90°) sehingga meminimalkan jarak tempuh aktuator pada kondisi terburuk. Saat sistem mati (*power off*) atau mereset, aktuator akan kembali ke posisi *home* sebelum sistem mengaktifkan kembali mode *tracking*.

4.1.1.2 Instalasi Solar Charge Controller MPPT

Solar charge controller (SCC) tipe MPPT 20A yang ada pada gambar 4.2 dipilih karena mampu mengekstrak daya secara optimal dari panel surya dengan melacak titik Maximum Power Point (MPP) secara dinamis, berbeda dengan tipe PWM yang menurunkan tegangan panel ke tegangan baterai secara langsung sehingga mengakibatkan rugi konversi yang signifikan.



Gambar 4.2 Pemasangan SCC di dalam Box Panel

SCC MPPT beroperasi pada tegangan input panel 22.8V dan menurunkannya ke tegangan pengisian baterai LiFePO₄ sesuai kurva charging empat tahap (bulk, absorption, float, equalization). Urutan koneksi saat instalasi mengikuti prosedur standar: baterai dihubungkan terlebih dahulu, baru kemudian panel surya, agar SCC dapat mendeteksi tegangan sistem dengan benar sebelum menerima input dari panel. Parameter kerja SCC yang dikonfigurasi ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Konfigurasi parameter SCC MPPT untuk baterai LiFePO₄ 12V

Parameter	Nilai Konfigurasi	Keterangan
Tegangan pengisian bulk	14,4 V	Fase pengisian utama (CC)
Tegangan absorption	14,2 V	Fase penyelesaian pengisian (CV)
Tegangan float	13,6 V	Fase pemeliharaan
Tegangan cutoff beban	11,0 V	Proteksi over-discharge
Arus pengisian maksimum	20 A	Sesuai rating SCC
Efisiensi konversi	≥93%	Pada beban nominal

Urutan koneksi pada saat instalasi SCC MPPT mengikuti prosedur standar manufaktur: (1) baterai dihubungkan terlebih dahulu ke terminal BAT+/BAT- untuk memberi referensi tegangan sistem kepada SCC, (2) terminal LOAD+ dan LOAD- dibiarkan terbuka karena distribusi beban pada sistem ini dikendalikan penuh oleh relay 4-channel firmware ESP32, (3) panel surya dihubungkan terakhir ke terminal PV+/PV- setelah semua koneksi lainnya sudah terpasang dan terverifikasi. Prosedur ini penting karena menghubungkan panel sebelum baterai dapat menyebabkan SCC tidak mendeteksi tegangan sistem dengan benar dan berpotensi gagal masuk ke mode MPPT.

Konfigurasi baterai pada SCC ditetapkan ke mode LiFePO_4 (Lithium Iron Phosphate) secara eksplisit melalui antarmuka tombol SCC, bukan menggunakan mode default lead-acid atau sealed lead-acid. Perbedaan utama konfigurasi ini terletak pada profil pengisian: mode LiFePO_4 menggunakan tegangan bulk 14,4V dan tegangan float 13,6V, sedangkan mode lead-acid menggunakan nilai yang lebih rendah. Penggunaan profil yang salah dapat menyebabkan baterai LiFePO_4 tidak terisi penuh (jika menggunakan profil lead-acid dengan V_{bulk} lebih rendah) atau overcharge yang merusak sel (jika menggunakan profil AGM dengan V_{bulk} lebih tinggi).

4.1.1.3 Instalasi Baterai LiFePO_4



Gambar 4.3 Instalasi Baterai LiFePO_4 di dalam Box Panel

Baterai yang digunakan pada gambar 4.3 adalah LiFePO₄ 12V 21Ah dengan konfigurasi 4 sel seri (4S), dilengkapi dengan Battery Management System (BMS) 20A yang terintegrasi dalam unit baterai. BMS berperan melindungi baterai dari kondisi overcharge ($V > 14,6 \text{ V}$), over-discharge ($V < 10,0 \text{ V}$), overcurrent ($I > 20 \text{ A}$), dan overtemperature ($T > 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Baterai LiFePO₄ dipilih atas tiga keunggulan teknis utama dibandingkan lead-acid: (1) efisiensi round-trip charge-discharge 95–98% vs 70–85%, (2) kurva discharge yang sangat datar pada SoC 20–80% sehingga tegangan output lebih stabil, dan (3) umur siklus >2000 siklus pada DoD 80% vs 300–500 siklus lead-acid [21], [22]. Perbandingan karakteristik teknis ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perbandingan karakteristik teknis LiFePO₄ vs Lead-Acid 12V

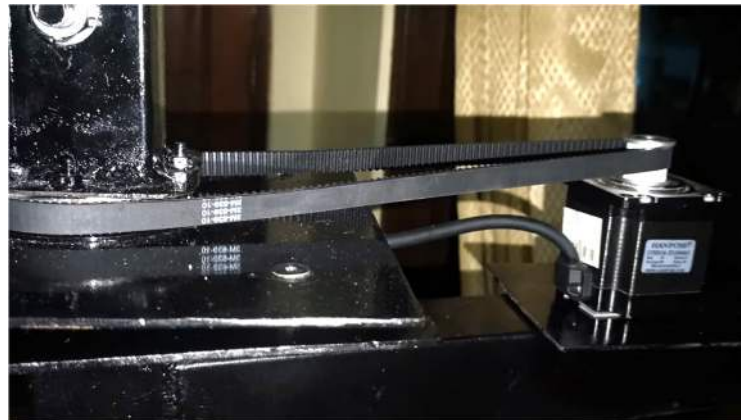
Parameter	LiFePO ₄ (digunakan)	Lead-Acid (pembanding)
Kapasitas nominal	21 Ah	20 Ah
Tegangan nominal	12,8 V	12,0 V
Tegangan cutoff discharge	10,0 V	10,5 V
Efisiensi round-trip	95–98%	70–85%
Umur siklus (DoD 80%)	>2000 siklus	300–500 siklus
Self-discharge rate	<3%/bulan	5–15%/bulan
Berat	~2,8 kg	~5,0 kg
Rentang suhu operasi	-20 s.d. 60°C	-15 s.d. 50°C

Kapasitas energi tersimpan yang dapat dimanfaatkan dengan Depth of Discharge (DoD) 80% adalah 201,6 Wh ($= 12,8 \text{ V} \times 21 \text{ Ah} \times 0,8 \times 0,95$), yang mampu menyuplai beban total sistem sekitar 15–20 W selama ± 10 jam tanpa input dari panel surya.

4.1.2 Implementasi Sistem Tracking

Mekanisme dual-axis tracking dibangun pada rangka berbahan besi hollow dengan dua derajat kebebasan gerak: sumbu azimuth (horizontal, timur-barat) dikendalikan motor stepper NEMA23, dan sumbu elevasi (vertikal, sudut kemiringan) dikendalikan linear actuator. Kedua aktuator dioperasikan secara terkoordinasi oleh ESP32 berdasarkan output algoritma tracking hybrid.

4.1.2.1 Pemasangan Motor Stepper NEMA23



Gambar 4.4 pemasangan motor stepper NEMA23 pada Lazy susan menggunakan timing belt closed loop

Motor stepper NEMA23 (HANPOSE 57HS56-3004) berfungsi sebagai aktuator pada sumbu azimuth dengan spesifikasi teknis: step angle $1,8^\circ/\text{step}$, holding torque 1,2 Nm, arus per fase 3A, dan tegangan rated 2,85 VDC. Motor ini dioperasikan pada tegangan suplai 12 VDC melalui driver TB6600 yang mengatur arus per fase sesuai setting DIP switch. Motor ini dipilih karena memiliki posisi diskrit yang inherent sehingga tidak memerlukan sensor posisi tambahan (encoder) [43]. Transmisi daya menggunakan sistem pulley dan belt HTD dengan rasio 1:3, meningkatkan torsi efektif menjadi $\sim 3,78$ Nm sekaligus memperlambat kecepatan angular untuk gerakan lebih presisi. Motor dikontrol driver TB6600 pada mode microstepping 1/8, menghasilkan resolusi $0,225^\circ/\text{microstep}$ [43], [6].

Tabel 4.5 Parameter konfigurasi motor stepper NEMA23 dan driver TB6600

Parameter	Nilai
Step angle motor	$1,8^\circ/\text{step}$ (full step)
Mode microstepping	1/8 step
Resolusi efektif	$0,225^\circ/\text{microstep}$
Rasio transmisi pulley	1:3
Resolusi sumbu azimuth	$\sim 0,075^\circ/\text{microstep}$ (setelah transmisi)
Tegangan operasi motor	12 VDC
Arus driver	2,0 A/fase

Frekuensi pulsa STEP	500–2000 Hz
Pin STEP (PUL-)	GPIO 13
Pin DIR (Direction)	GPIO 26
Pin ENA (Enable)	GPIO 27

Sebelum motor diintegrasikan ke sistem mekanik, dilakukan prosedur identifikasi fase kumparan menggunakan multimeter dalam mode ohmmeter. Keempat kabel motor (merah, hijau, kuning, biru) diuji berpasangan: pasangan yang menunjukkan resistansi sekitar $1,2 \Omega$ merupakan satu fase (Fase A atau Fase B), sedangkan pasangan yang menunjukkan nilai tak terhingga (open circuit) berasal dari fase yang berbeda. Identifikasi fase yang benar sangat kritis karena sambungan yang salah menyebabkan motor bergetar tanpa menghasilkan torsi, atau berputar ke arah yang tidak konsisten. Setelah identifikasi, kabel Fase A (merah–hijau) dihubungkan ke terminal A+/A– TB6600 dan Fase B (kuning–biru) ke terminal B+/B–.

Setting arus driver TB6600 dilakukan melalui DIP switch SW1–SW3 untuk menetapkan arus per fase pada 2,0A (dari rating maksimum motor 3,0A). Nilai 2,0A dipilih sebagai kompromi antara torsi yang cukup untuk menggerakkan beban panel dan panas yang dihasilkan oleh motor: arus 2,0A menghasilkan panas koil jauh lebih rendah dibandingkan arus penuh 3,0A, memperpanjang umur motor secara signifikan. Setting microstepping 1/8 step ditetapkan melalui DIP switch SW4–SW6 pada posisi ON-ON-OFF sesuai tabel konfigurasi TB6600, menghasilkan 1.600 step/putaran dan resolusi efektif $0,225^\circ/\text{step}$ sebelum transmisi pulley.

Pada implementasi ini ditemukan bahwa GPIO25 pada ESP32 DevKit V1 yang digunakan mengalami kondisi stuck HIGH secara permanen akibat kerusakan hardware, sehingga sinyal STEP tidak dapat dihasilkan dari pin tersebut. Kondisi ini terdeteksi pada tahap pengujian awal melalui Serial Monitor ketika motor tidak merespons perintah gerak meskipun logika firmware sudah benar. Solusi yang diterapkan adalah memindahkan fungsi PIN_STEP ke GPIO13 yang berfungsi normal, dengan memperbarui konstanta `#define PIN_STEP` dari 25 menjadi 13 pada firmware v6.12. Hal ini menjelaskan perbedaan antara

konfigurasi pin yang tercantum di BAB 3 (GPIO25) dengan yang diimplementasikan di BAB 4 (GPIO13).

4.1.2.2 Pemasangan Linear Actuator



Gambar 4.5 Pemasangan Linear Actuator pada bracket di tiang panel

Linear actuator 12V DC dengan gaya dorong 900N dan stroke 200mm pada gambar 4.5 digunakan sebagai aktuator sumbu elevasi. Kecepatan gerak 5 mm/s membutuhkan waktu 40 detik untuk menempuh stroke penuh, memastikan pergerakan panel yang halus. Pemasangan menggunakan konfigurasi pivot-pivot sehingga gerakan linier maju-mundur (stroke $\pm 200\text{mm}$) dikonversi menjadi perubahan sudut elevasi $0^\circ\text{--}90^\circ$. Pengendalian arah gerak menggunakan relay 2-channel: Relay CH1 (GPIO 32) untuk gerakan EXTEND (elevasi naik) dan Relay CH2 (GPIO 33) untuk gerakan RETRACT (elevasi turun). Interlocking software diterapkan pada ESP32 untuk mencegah kedua relay aktif bersamaan yang dapat menyebabkan short circuit pada aktuator.

Kalibrasi mekanik sumbu elevasi dilakukan setelah pemasangan dengan mengukur perubahan sudut elevasi panel untuk setiap 1 mm perpanjangan stroke aktuator. Dengan panjang lengan (arm length) efektif sebesar 200 mm dari titik pivot ke titik koneksi aktuator, perubahan 1 mm stroke menghasilkan perubahan sudut sekitar $\arcsin(1/200) \approx 0,29^\circ$. Untuk mencapai perubahan elevasi 1° , diperlukan perpanjangan stroke sekitar 3,49 mm, atau waktu aktivasi relay $\pm 0,70$ detik pada kecepatan aktuator 5 mm/s. Hubungan ini digunakan dalam firmware

untuk menghitung durasi aktivasi relay yang diperlukan agar mencapai target sudut elevasi yang diperoleh dari kalkulasi astronomi.

Karakteristik self-locking linear actuator diverifikasi dengan menempatkan panel pada berbagai sudut elevasi kemudian memutus suplai aktuator. Panel mempertahankan posisinya tanpa pergeseran yang terdeteksi selama pengujian statis dengan beban panel 100 Wp (berat sekitar 3,5 kg). Kemampuan self-locking ini sangat penting karena mengeliminasi kebutuhan suplai daya kontinu untuk mempertahankan posisi, yang secara langsung mengurangi konsumsi daya idle sistem tracking. Dalam kondisi mode Hemat, aktuator hanya diaktifkan secara periodik setiap 15 menit untuk koreksi posisi, dan seluruh daya aktuator terputus di antara interval tersebut.

4.1.2.3 Integrasi Mekanisme Dual-Axis

Integrasi kedua sumbu pergerakan dilakukan pada satu rangka utama berbahan besi hollow 40×40mm tebal 2mm, dirancang menopang beban total ~8 kg dengan faktor keamanan minimal 3×. Kedua aktuator dikoordinasikan ESP32 melalui time-multiplexing, koreksi azimuth dan elevasi dilakukan bergantian setiap siklus kontrol untuk menghindari interferensi mekanik [6], [36].

Tabel 4.6 Spesifikasi rentang gerak sistem dual-axis tracker setelah integrasi

Parameter	Nilai	Keterangan
Rentang azimuth	0°–180°	Timur ke barat
Rentang elevasi	0°–90°	Horisontal ke vertikal
Resolusi azimuth	±0,075°	Setelah transmisi pulley 1:3
Resolusi elevasi	±2°	Tergantung panjang stroke dan arm
Kecepatan azimuth	~5°/detik	Pada frekuensi STEP 1000 Hz
Kecepatan elevasi	~2,25°/detik	Dari 5mm/s stroke pada L_arm 200mm
Posisi home	Azimuth 90°, Elevasi 45°	Posisi default saat startup
Konsumsi daya tracker	~8–15 W	Saat motor bergerak aktif

4.1.3 Implementasi Sistem Elektronik

Sistem elektronik berfungsi sebagai lapisan integrasi yang menghubungkan seluruh sensor, aktuator, dan subsistem daya melalui mikrokontroler ESP32. Seluruh komponen elektronik ditempatkan pada panel kontrol terpisah dari sistem daya untuk meminimalkan interferensi elektromagnetik (EMI) dari switching relay dan driver motor. Suplai daya diambil dari bus DC 12V baterai melalui buck converter DC-DC ($12V \rightarrow 5V$, 3A). Kapasitor bypass $100\mu F$ dipasang pada output buck converter untuk meredam ripple tegangan yang dapat mengganggu pembacaan sensor.

4.1.3.1 Instalasi ESP32 dan Konfigurasi Pin

ESP32 DevKit V1 berfungsi sebagai pusat kendali sistem dengan tiga peran utama: (1) akuisisi data dari seluruh sensor, (2) eksekusi algoritma solar tracking dan kontrol daya adaptif, serta (3) transmisi data monitoring ke platform Blynk melalui WiFi. Pemilihan ESP32 didasarkan pada dual-core processor 240 MHz, ADC 12-bit multi-channel, komunikasi I²C terintegrasi, dan modul WiFi on-chip [11], [41]. Konfigurasi pin ESP32 yang diimplementasikan ditampilkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Konfigurasi pin ESP32 DevKit V1 pada sistem PLTS off-grid dual-axis tracker

GPIO	Mode	Koneksi	Fungsi
GPIO 18	Digital Input	DHT22 DATA	Data suhu & kelembapan (pull-up $10k\Omega$ ke 3,3V)
GPIO 21	I ² C SDA	INA226 + RTC DS3231	Data serial I ² C (shared bus)
GPIO 22	I ² C SCL	INA226 + RTC DS3231	Clock serial I ² C (shared bus)
GPIO 25	Digital Output	TB6600 PUL- (STEP)	Pulsa step motor stepper , 1 pulse = 1 step
GPIO 26	Digital Output	TB6600 DIR- (Direction)	Arah putar , HIGH=CW, LOW=CCW
GPIO 27	Digital	TB6600 ENA-	Enable motor , HIGH=aktif

GPIO	Mode	Koneksi	Fungsi
	Output	(Enable)	(Active LOW wiring: ENA- ke GPIO, ENA+ ke 5V)
GPIO 32	Digital Output	Relay 2CH CH1 EXTEND	Aktuator linear naik (elevasi bertambah)
GPIO 33	Digital Output	Relay 2CH CH2 RETRACT	Aktuator linear turun (elevasi berkurang)
GPIO 34	ADC Input (IO)	LDR TOP (Atas)	Sensor atas , koreksi elevasi naik
GPIO 35	ADC Input (IO)	LDR BOTTOM (Bawah)	Sensor bawah , koreksi elevasi turun
GPIO 36 (VP)	ADC Input (IO)	LDR LEFT (Kiri)	Sensor kiri , koreksi azimuth barat
GPIO 39 (VN)	ADC Input (IO)	LDR RIGHT (Kanan)	Sensor kanan , koreksi azimuth timur
GPIO 16	Digital Output	Relay 4CH , CH1	Beban Prioritas 1 , mati saat mode Kritis
GPIO 17	Digital Output	Relay 4CH , CH2	Beban Prioritas 2 , mati saat Hemat & Kritis
GPIO 23	Digital Output	Relay 4CH , CH3	Beban Prioritas 3 , aktif hanya saat Surplus
GPIO 14	Digital Output	Relay 4CH , CH4	Beban Prioritas 4 , aktif hanya saat Surplus
VIN (5V)	Power	Buck Converter output	Suplai ESP32
GND	Ground	Common ground semua komponen	Referensi ground sistem

GPIO 34, 35, 36, dan 39 merupakan pin Input Only pada ESP32 tidak memiliki internal pull-up/down sehingga wajib dipasang resistor pull-down 10k Ω ke GND pada setiap jalur LDR agar ADC tidak floating. Sensor INA226 (alamat I²C: 0x40) dan RTC DS3231 (alamat I²C: 0x68) berbagi bus I²C pada GPIO 21 dan GPIO 22 tanpa konflik karena alamat keduanya berbeda.

4.1.3.2 Instalasi Sensor (LDR, INA226, DHT22, RTC DS3231)

Sensor LDR dipasang pada empat sisi panel dengan posisi: TOP (GPIO 34) untuk deteksi elevasi naik, BOTTOM (GPIO 35) untuk deteksi elevasi turun, LEFT (GPIO 36/VP) untuk deteksi azimuth barat, dan RIGHT (GPIO 39/VN) untuk deteksi azimuth timur. Setiap LDR membentuk rangkaian voltage divider dengan resistor pull-down 10k Ω ke GND menghasilkan tegangan analog 0–3,3V. Sistem menghitung selisih intensitas pada dua sumbu melalui persamaan:

$$\Delta_{azimuth} = (LDR_LEFT) - (LDR_RIGHT)$$

$$\Delta_{elevasi} = (LDR_TOP) - (LDR_BOTTOM)$$

Nilai Delta positif pada azimuth menunjukkan panel perlu bergerak ke arah barat, dan nilai negatif menunjukkan perlu bergerak ke timur. Mekanisme serupa berlaku untuk sumbu elevasi.

Sensor INA226 dipasang pada jalur antara kutub positif baterai dan bus DC beban menggunakan shunt resistor 100m Ω (batas arus 3,2A) dalam konfigurasi high-side current sensing. Kalibrasi register INA226 dilakukan via I²C menggunakan nilai yang menghasilkan resolusi arus dan tegangan sesuai kebutuhan monitoring sistem 12V [47]. Sensor DHT22 terhubung ke GPIO 18 dengan resistor pull-up 10k Ω ke 3,3V sesuai protokol single-wire, dengan interval pembacaan minimum 2 detik sesuai spesifikasi datasheet. Modul RTC DS3231 terhubung via I²C dengan akurasi ± 2 ppm (setara ± 63 detik/tahun), dikonfigurasi sinkronisasi waktu NTP otomatis setiap boot dan setiap 6 jam [49].

4.1.3.3 Instalasi Driver Motor TB6600 dan Modul Relay

Driver TB6600 menerima sinyal kontrol dari ESP32 melalui tiga pin: PUL- (STEP) pada GPIO 25 untuk pulsa langkah, DIR- pada GPIO 26 untuk arah putaran, dan ENA- pada GPIO 27 untuk enable/disable motor. Pin PUL+ (5V), DIR+ (5V), dan ENA+ (5V) terhubung ke sumber 5V sebagai referensi sisi positif driver. Sinyal output 3,3V dari ESP32 kompatibel dengan input TB6600 yang menerima 3,3–5V tanpa level shifter tambahan.

Sistem menggunakan dua modul relay yang terpisah sesuai fungsinya. Relay 2-channel mengendalikan linear actuator (GPIO 32 untuk EXTEND, GPIO

33 untuk RETRACT) dengan proteksi interlocking software agar CH1 dan CH2 tidak HIGH bersamaan. Relay 4-channel mengendalikan distribusi beban berdasarkan mode operasi adaptif. Kedua modul menggunakan optocoupler sebagai isolasi antara rangkaian kontrol 5V dan rangkaian daya 12V. Alokasi channel relay 4-channel dirangkum pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Alokasi channel relay 4-channel kontrol beban adaptif

Channel	GPIO	Beban	Aktif pada Mode	Prioritas
CH1	GPIO 16	Beban Prioritas 1	Surplus, Normal, Hemat (OFF saat Kritis)	Tertinggi
CH2	GPIO 17	Beban Prioritas 2	Surplus, Normal (OFF saat Hemat & Kritis)	Tinggi
CH3	GPIO 23	Beban Prioritas 3	Hanya Surplus	Menengah
CH4	GPIO 14	Beban Prioritas 4	Hanya Surplus	Terendah

Pada saat instalasi, dilakukan pengujian relay secara individual sebelum dihubungkan ke beban. Setiap channel relay diuji dengan memberikan sinyal LOW pada pin kontrol GPIO (sesuai logika Active LOW modul) dan memverifikasi pergantian kontak menggunakan multimeter mode continuity. Pengujian ini memastikan bahwa seluruh delapan channel relay (2CH + 4CH) berfungsi normal dan LED indikator modul menyala sesuai status aktif/non-aktif. Relay yang tidak merespons atau memiliki kontak yang welded (melekat permanen) diganti sebelum sistem diintegrasikan untuk menghindari kondisi kegagalan pada saat pengujian lapangan.

Kapasitor bypass 10 μ F dipasang secara paralel antara pin 5V dan GND pada modul relay 4-channel untuk meredam lonjakan arus transien (in-rush current) yang terjadi saat keempat coil relay diaktifkan secara bersamaan. Tanpa kapasitor bypass, lonjakan arus simultan empat coil ($4 \times 70\text{--}90 \text{ mA} = 280\text{--}360 \text{ mA}$) dapat menyebabkan tegangan VIN ESP32 turun sesaat dan memicu reboot mikrokontroler. Kapasitor bypass bertindak sebagai reservoir energi lokal yang

menyuplai kebutuhan arus transien ini tanpa membebani jalur suplai utama dari buck converter.

4.2 Implementasi Perangkat Lunak

Perangkat lunak sistem dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C++ pada platform ESP32, memanfaatkan beberapa library utama yang dirangkum pada Tabel 4.9. Struktur program dirancang berbasis finite state machine (FSM) pada loop utama, di mana sistem secara kontinu membaca sensor, menentukan mode operasi, mengeksekusi aksi kontrol, dan mengirimkan data ke Blynk dalam satu siklus loop berulang setiap 100ms.

Tabel 4.9 Library Arduino yang digunakan dalam program ESP32

Library	Versi	Fungsi
Blynk.h	1.3.2	Komunikasi IoT ke platform Blynk
Wire.h	Built-in	Komunikasi I ² C (INA226, RTC)
INA226_WE.h	1.1.1	Driver sensor INA226
RTCLib.h	2.1.1	Driver RTC DS3231
DHT.h	1.4.4	Driver sensor DHT22
WiFi.h	Built-in ESP32	Koneksi WiFi 2,4 GHz

Arsitektur firmware dirancang dengan menggunakan paradigma non-blocking programming berbasis timer interrupt dan millis() untuk memastikan loop utama berjalan pada interval konsisten 100 ms tanpa terblokir oleh operasi I/O yang membutuhkan waktu lama. Tiga timer utama digunakan: Timer 1 (100 ms) untuk pembacaan LDR dan eksekusi algoritma tracking, Timer 2 (500 ms) untuk pembacaan INA226 dan evaluasi mode kontrol daya adaptif, serta Timer 3 (60 detik) untuk pengiriman data ke Blynk. Timer 4 (10 detik) digunakan khusus untuk logging Google Sheets selama periode pengujian. Arsitektur timer-based ini memungkinkan tiga fungsi utama (tracking, kontrol daya, IoT monitoring) berjalan secara pseudoparallel pada satu core ESP32 tanpa saling menghambat.

Core kedua ESP32 (Core 1) dimanfaatkan khusus untuk menangani stack WiFi dan komunikasi TCP/IP yang dijalankan oleh FreeRTOS secara otomatis.

Dengan pemisahan ini, seluruh algoritma kontrol dijalankan pada Core 0 tanpa terganggu oleh latency jaringan WiFi yang bersifat non-deterministic. Ketika terjadi timeout koneksi WiFi atau server Blynk tidak merespons, Core 0 tetap melanjutkan eksekusi algoritma tracking dan kontrol daya tanpa gangguan, sehingga sistem tidak kehilangan fungsi kontrol saat koneksi internet terputus.

Manajemen memori firmware dilakukan dengan hati-hati mengingat keterbatasan SRAM ESP32 sebesar 520 KB. Buffer data sensor menggunakan array fixed-size (bukan dynamic allocation) untuk menghindari fragmentasi heap yang dapat menyebabkan crash pada sistem yang berjalan lama. Penggunaan PROGMEM untuk konstanta string (nama parameter Blynk, pesan debug) mengalihkan data dari SRAM ke flash memory, menghemat sekitar 4–6 KB SRAM. Hasil monitoring penggunaan memori menunjukkan penggunaan heap rata-rata sebesar 42 KB dari total 320 KB heap yang tersedia, memberikan margin memori yang aman untuk operasi jangka panjang.

4.2.1 Implementasi Algoritma Solar Tracking

Algoritma solar tracking menggunakan pendekatan hybrid: time-based positioning menggunakan data RTC sebagai estimasi awal posisi matahari, dan LDR-based correction menggunakan perbandingan intensitas empat sensor LDR sebagai koreksi kondisi nyata. Pendekatan hybrid ini lebih robust dibanding LDR-only karena tetap mempertahankan posisi estimasi yang benar saat berawan atau LDR terganggu bayangan parsial [3], [6], [36]. Struktur logika utama diilustrasikan melalui pseudocode berikut:

LOOP UTAMA SOLAR TRACKING (interval 100ms):

1. Baca timestamp dari RTC DS3231
2. Hitung estimasi posisi matahari (f(jam, menit, lintang))
3. Baca ADC dari 4 LDR (averaging 10 sampel @ 5ms):

$\Delta_{az} = \text{LDR_LEFT}(\text{GPIO36}) - \text{LDR_RIGHT}(\text{GPIO39})$
 $\Delta_{el} = \text{LDR_TOP}(\text{GPIO34}) - \text{LDR_BOTTOM}(\text{GPIO35})$
4. Evaluasi kondisi cahaya:

IF total_intensitas < THRESHOLD_MALAM:

Panel ke HOME ($az=90^\circ$, $el=45^\circ$) $\rightarrow$ motor standby $\rightarrow$ EXIT

5. Koreksi LDR (siang hari):

IF $|\Delta_{az}| > \text{DEADBAND}$ (50 ADC counts):

Gerakkan stepper via GPIO13(STEP), GPIO26(DIR)

ELSE: ENA GPIO27=HIGH (motor bebas/hemat daya)

IF $|\Delta_{el}| > \text{DEADBAND}$ (50 ADC counts):

Aktifkan relay GPIO32(EXTEND) atau GPIO33(RETRACT)

ELSE: Kedua relay OFF

6. Update posisi ke Blynk $\rightarrow$ Tunggu 100ms $\rightarrow$ Ulangi

Parameter DEADBAND ditetapkan pada 50 ADC counts ($\sim 1,2\%$ dari range 0–4095) melalui pengujian empiris untuk menyeimbangkan responsivitas tracking dan frekuensi gerakan motor. Deadband terlalu kecil menyebabkan motor bergerak terus akibat noise, sedangkan terlalu besar menyebabkan posisi panel menyimpang jauh dari optimal.

4.2.1.1 Pembacaan Sensor LDR

Pembacaan empat sensor LDR dilakukan melalui pin ADC GPIO 34 (TOP), GPIO 35 (BOTTOM), GPIO 36/VP (LEFT), dan GPIO 39/VN (RIGHT). Untuk mereduksi noise non-linearitas ADC ESP32, diterapkan averaging 10 sampel berturut-turut dengan interval 5ms, sehingga satu nilai LDR merupakan rata-rata pembacaan selama 50ms. GPIO 34, 35, 36, 39 bersifat Input Only sehingga wajib dipasang pull-down $10k\Omega$ eksternal untuk mencegah pembacaan floating.

4.2.1.2 Logika Pergerakan Panel

Pergerakan azimuth mengikuti three-state control: jika $\Delta_{az} > +\text{DEADBAND}$ maka stepper bergerak CW (DIR GPIO26=HIGH, STEP GPIO13 berpulsa); jika $\Delta_{az} < -\text{DEADBAND}$ maka stepper bergerak CCW (DIR GPIO26=LOW, STEP GPIO13 berpulsa); jika $|\Delta_{az}| \leq \text{DEADBAND}$ maka ENA GPIO27=HIGH (motor bebas untuk mengurangi konsumsi). Logika serupa pada elevasi menggunakan relay GPIO32/GPIO33 sebagai pengganti stepper.

Software limit diterapkan pada estimasi RTC: azimuth 0° – 180° dan elevasi 5° – 85° sebagai buffer keamanan dari batas mekanik.

4.2.1.3 Pengendalian Motor Tracking

Motor stepper dikendalikan menggunakan timer interrupt ESP32 untuk non-blocking step generation, sehingga pulsa STEP pada GPIO 25 dihasilkan presisi tanpa menghambat loop utama. Frekuensi dikonfigurasi 1000 Hz menghasilkan kecepatan $\sim 5^{\circ}$ /detik pada microstepping 1/8 dengan transmisi 1:3. Untuk elevasi, setiap 1° perubahan membutuhkan $\sim 3,49$ mm perubahan stroke ($=200\text{mm} \times \sin(1^{\circ})$), setara waktu aktivasi relay $\sim 0,70$ detik pada kecepatan aktuator 5mm/s.

4.2.2 Implementasi Sistem Kontrol Daya Adaptif

Sistem kontrol daya adaptif merupakan komponen perangkat lunak utama penelitian ini, yang mengatur distribusi energi ke empat beban berdasarkan kondisi tegangan baterai secara real-time. Sistem mengimplementasikan rule-based finite state machine (FSM) dengan empat state (mode operasi) yang transisinya ditentukan perbandingan V_{bat} terhadap threshold karakteristik kurva discharge LiFePO₄ 4S. Arsitektur kontrol terdiri dari tiga lapisan: (1) layer sensing pembacaan V_{bat} via INA226, (2) layer decision penentuan mode dengan hysteresis, dan (3) layer actuation switching relay sesuai mode aktif, dieksekusi setiap 500ms.

4.2.2.1 Pembacaan Tegangan Baterai

Tegangan baterai dibaca langsung oleh sensor INA226 melalui bus I²C (SDA GPIO 21, SCL GPIO 22) tanpa melalui ADC ESP32, sehingga akurasi pengukuran lebih tinggi (resolusi 1,25 mV, akurasi $\pm 0,1\%$) dibandingkan pembacaan ADC internal yang rentan noise. INA226 sekaligus mengukur arus baterai melalui shunt resistor 100m Ω yang terpasang pada jalur positif baterai. Untuk mereduksi noise yang dapat memicu mode chattering, diterapkan moving average 20 sampel pada pembacaan V_{bat} sebelum digunakan dalam logika keputusan, menghasilkan resolusi tegangan efektif sekitar ± 12 mV.

4.2.2.2 Penentuan Mode Operasi Sistem

Mode operasi ditentukan berdasarkan V_{bat} terfilter menggunakan rule-based logic dengan hysteresis band $\pm 0,1V$ pada setiap threshold untuk mencegah mode chattering. Threshold mengacu pada karakteristik kurva discharge LiFePO₄ 4S sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Threshold mode operasi sistem kontrol daya adaptif berbasis LiFePO₄ 4S

Mode	Threshold V_{bat}	SoC Approx	Indikator	Kondisi Sistem
Surplus	$\geq 12,8 V$	$> 70\%$	Hijau	Baterai hampir penuh, semua beban aktif
Normal	$12,2 - 12,8 V$	$40 - 70\%$	Biru	Operasi nominal, semua beban aktif
Hemat	$11,5 - 12,2 V$	$15 - 40\%$	Kuning	Beban prioritas rendah dimatikan
Kritis	$< 12,2 V$	$< 20\%$	Merah	Hanya beban prioritas 1 yang aktif

Mekanisme hysteresis diimplementasikan dalam firmware sebagai berikut:

```
// Hysteresis anti-chattering (Delta_V = 0.1V)
IF (mode == HEMAT):
    IF ( $V_{bat} \geq 12.9$ ) → pindah ke NORMAL // naik:  $12.8 + 0.1$ 
    IF ( $V_{bat} < 12.1$ ) → pindah ke KRITIS // turun:  $12.2 - 0.1$ 
    ELSE: tetap HEMAT
IF (mode == NORMAL):
```

```

IF (V_bat >= 12.9) → pindah ke SURPLUS // naik: 12.8 + 0.1
IF (V_bat < 12.1) → pindah ke HEMAT // turun: 12.2 - 0.1
ELSE: tetap NORMAL
// Deadband efektif antar threshold = 0.2V
// Mencegah relay bouncing akibat fluktuasi normal pengukuran

```

4.2.2.3 Pengendalian Relay Beban

Sistem menerapkan hierarki prioritas beban 4-level pada relay 4-channel, di mana setiap mode mematikan beban dari prioritas terendah terlebih dahulu untuk memperpanjang durasi operasi dan melindungi baterai secara bertahap. Mapping lengkap mode operasi terhadap status setiap relay ditampilkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Mapping mode operasi terhadap status relay beban 4-channel

Mode	CH1 GPIO16 (Prioritas 1)	CH2 GPIO17 (Prioritas 2)	CH3 GPIO23 (Prioritas 3)	CH4 GPIO14 (Prioritas 4)	Tracker
Surplus	ON	ON	ON	ON	Aktif penuh
Normal	ON	ON	OFF	OFF	Aktif penuh
Hemat	ON	OFF	OFF	OFF	Interval 15 menit
Kritis	OFF	OFF	OFF	OFF	Standby (home)

Sistem mengadopsi filosofi graceful degradation pada kondisi baterai memburuk, beban dimatikan secara bertahap dari prioritas terendah ke tertinggi, bukan sekaligus, sehingga fungsi sistem tetap maksimal pada setiap level energi yang tersedia. Perubahan state relay hanya dilakukan saat terjadi transisi mode untuk meminimalkan frekuensi switching dan memperpanjang umur kontak relay.

Proteksi final deep discharge diserahkan kepada BMS hardware (cutoff $V < 10,0V$) sebagai safety layer independen di luar kendali software.

4.3 Implementasi Sistem Monitoring IoT

Sistem monitoring IoT diimplementasikan menggunakan platform Blynk yang diakses melalui koneksi WiFi 2,4 GHz ESP32. Blynk dipilih karena menyediakan antarmuka dashboard tanpa pemrograman sisi server, mendukung komunikasi bidirectional antara ESP32 dan aplikasi mobile, serta memiliki latensi pengiriman rata-rata < 3 detik pada kondisi jaringan normal [15], [38].

4.3.1 Konfigurasi Koneksi WiFi ESP32

Koneksi WiFi dikonfigurasi menggunakan mode WiFi Station dengan SSID dan password disimpan dalam firmware. Inisialisasi dilakukan pada fungsi `setup()` dengan timeout 30 detik jika gagal, sistem tetap beroperasi mode offline (tracking dan kontrol daya tetap berjalan) dan mencoba reconnect setiap 60 detik. Mekanisme reconnect otomatis tanpa reset mikrokontroler memastikan state kontrol daya dan posisi tracker tetap terjaga saat koneksi WiFi terputus sementara.

Penanganan kondisi koneksi terputus (disconnect handling) diimplementasikan melalui mekanisme watchdog software yang dipantau setiap 30 detik. Jika koneksi Blynk terputus (deteksi melalui `Blynk.connected() == false`), sistem melakukan reconnect attempt dengan timeout 10 detik per percobaan, maksimal tiga kali percobaan sebelum sistem mencatat error ke Serial Monitor dan melanjutkan operasi offline. Pendekatan ini mencegah firmware terjebak dalam loop reconnect yang memblokir eksekusi algoritma kontrol, sebuah kesalahan umum pada implementasi IoT berbasis mikrokontroler.

Pengiriman data ke Google Sheets menggunakan HTTPS GET dengan fungsi `HTTPClient` dari library `WiFiClientSecure`. Setiap request diberi timeout 5 detik untuk menghindari blocking yang panjang jika server Google Apps Script merespons lambat. Respons HTTP 200 (OK) dikonfirmasi sebelum request berikutnya dikirim; jika terjadi kegagalan (timeout atau HTTP 4xx/5xx), sistem mencatat kegagalan dan melanjutkan ke iterasi berikutnya tanpa retry untuk menghindari penumpukan request yang memperburuk kondisi jaringan. Seluruh

43.200 baris data yang berhasil tersimpan selama pengujian lima hari mengkonfirmasi bahwa mekanisme error handling ini berfungsi dengan baik dan tidak menyebabkan kehilangan data yang signifikan.

4.3.2 Integrasi Platform Blynk

Data sistem dikirimkan ke server Blynk menggunakan `Blynk.virtualWrite(Vpin, value)` pada interval 60 detik untuk semua parameter dashboard, melalui timer non-blocking berbasis `millis()` yang memastikan proses pengiriman tidak menginterupsi loop kontrol utama. Secara paralel, data yang sama dikirimkan ke Google Sheets setiap 10 detik menggunakan HTTPS GET request ke Google Apps Script untuk keperluan logging data pengujian yang lebih rapat.

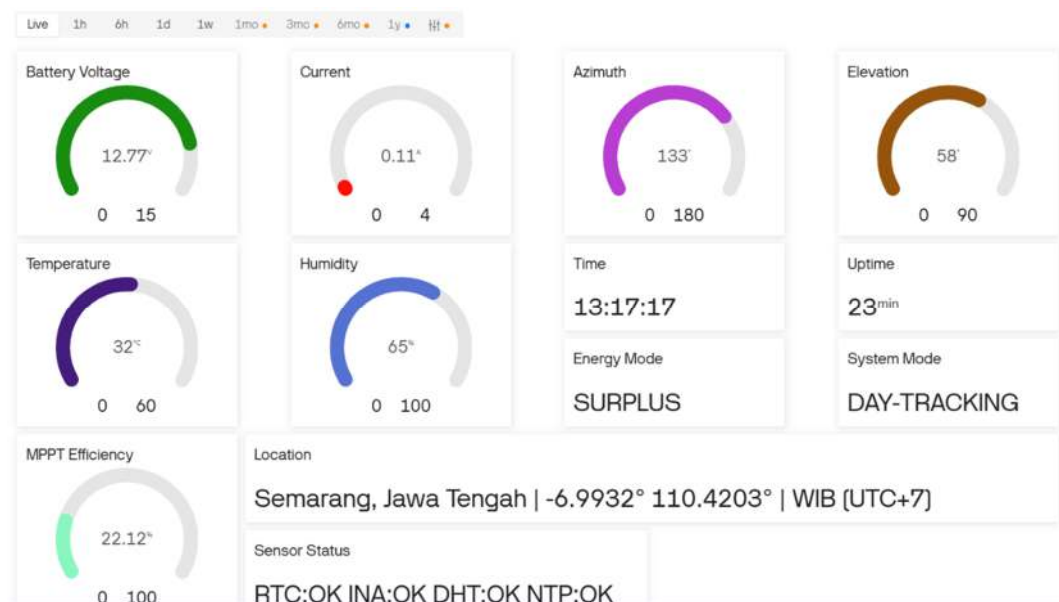
4.3.2.1 Konfigurasi Dashboard Blynk

Dashboard Blynk dikonfigurasi untuk menampilkan delapan parameter sistem secara real-time sebagaimana dirangkum pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Konfigurasi widget dashboard Blynk dan mapping virtual pin

Virtual Pin	Widget	Parameter	Satuan	Interval
1	V0	Battery Voltage	Volt	60 detik
2	V1	Current	Ampere	60 detik
3	V2	Panel Power	Watt	60 detik
4	V3	Azimuth	—	60 detik
5	V4	Elevation	Derajat	60 detik
6	V5	Temperature	Derajat	60 detik
7	V6	Humidity	°C	60 detik
8	V7	System Mode	ON/OFF	60 detik

Virtual Pin	Widget	Parameter	Satuan	Interval
9	V8	Energy Mode	—	60 detik
10	V9	Time	—	60 detik
11	V10	Location	—	60 detik
12	V11	MPPT Efficiency	%	60 detik
13	V12	Energy per Hour	Wh	60 detik
14	V13	Sensor Status	—	60 detik
15	V14	Power Realtime	W	60 detik
16	V15	Uptime	menit	60 detik
17	V16	SoC	%	60 detik
18	V17	Energy Today	Wh	60 detik



Gambar 4. 6 Tampilan Blynk

Gambar 4.6 menunjukkan tampilan *dashboard* monitoring Blynk yang merupakan hasil realisasi dari desain antarmuka pemantauan sistem yang telah

direncanakan pada tahap perancangan. Dashboard ini berhasil diimplementasikan dan berjalan sesuai dengan rancangan awal, di mana seluruh parameter sistem dapat terbaca secara *real-time* melalui aplikasi Blynk

4.3.2.2 Pengiriman Data Sensor

Pengiriman data menggunakan protokol MQTT over TCP yang dikelola library Blynk secara internal, dengan ukuran payload rata-rata < 50 byte per virtual pin. Dengan interval 2 detik dan delapan parameter yang dikirim, bandwidth rata-rata hanya ~ 200 byte/detik sangat ringan dan kompatibel dengan koneksi WiFi bahkan pada kondisi sinyal lemah. Data yang dikirim mencakup seluruh parameter pada Tabel 4.12, memberikan visibilitas penuh kondisi sistem kepada pengguna secara *real-time* melalui aplikasi mobile Blynk.