

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pemanfaatan energi surya telah berkembang pesat dalam lima tahun terakhir seiring meningkatnya kebutuhan energi bersih, efisiensi teknologi fotovoltaik, serta ketersediaan komponen elektronik berharga terjangkau [1]. Sistem fotovoltaik modern menuntut optimalisasi penyerapan radiasi matahari agar konversi energi berlangsung pada tingkat tertinggi. Kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh sudut datang cahaya; panel hanya menghasilkan daya maksimum ketika sinar matahari mengenai permukaannya secara tegak lurus [2]. Kondisi ini menyebabkan panel statis kehilangan sebagian besar potensi energi harian karena tidak mampu mengikuti perubahan posisi matahari.

Perkembangan ini mendorong implementasi *solar tracking systems*, yaitu mekanisme yang mengatur orientasi panel secara dinamis berdasarkan lintasan matahari. Sistem pelacakan dua sumbu mengalami peningkatan signifikan dalam riset lima tahun terakhir karena mampu mengatur panel baik pada sumbu azimuth maupun elevasi, sehingga intensitas cahaya yang diterima panel meningkat secara konsisten sepanjang hari [3]. Peningkatan daya yang dihasilkan sistem ini dilaporkan dapat mencapai 25-35% pada berbagai kondisi radiasi, terutama pada daerah dengan Variasi intensitas matahari yang tinggi [4]. Tren ini menunjukkan bahwa *dual-axis tracker* menjadi pendekatan yang semakin relevan dalam desain PLTS skala kecil dan menengah.

Dalam penelitian-penelitian terkini, metode berbasis sensor cahaya (Light Dependent Resistor/LDR) terus menjadi pilihan populer karena kesederhanaan struktur, biaya rendah, dan kemudahan integrasi dengan mikrokontroler. Sistem berbasis LDR dapat mengukur perbedaan intensitas cahaya dari empat arah sehingga panel dapat diarahkan secara otomatis menuju posisi optimal [3][5]. Pendekatan ini dipandang efektif pada prototipe skala kecil, termasuk sistem PLTS pendidikan, penelitian kampus, maupun instalasi off-grid berdaya rendah.

Relevansinya terhadap TA ini sangat kuat karena sistem yang dikembangkan juga menggunakan empat sensor LDR sebagai dasar penentuan gerak panel.

Selain metode berbasis sensor, sejumlah penelitian mengembangkan teknik pelacakan berbasis model astronomi yang memperhitungkan posisi matahari berdasarkan waktu dan koordinat geografis [6]. Metode ini memiliki akurasi tinggi, namun memerlukan komputasi lebih kompleks dan tidak secara otomatis menyesuaikan perubahan intensitas cahaya akibat awan atau refleksi, sehingga tidak selalu optimal pada sistem berdaya rendah.

Komponen aktuator juga menjadi fokus dalam literatur terbaru. Penggunaan motor DC, motor stepper, dan aktuator linier telah dibahas sebagai solusi untuk menghasilkan gerakan presisi pada sistem pelacakan dua sumbu. Kinerja aktuator memiliki pengaruh besar terhadap sudut pelacakan, stabilitas struktur mekanik, serta kebutuhan daya penggerak [7]. Pada sistem skala kecil seperti TA ini, pemilihan aktuator ringan dengan kendali PWM berbasis ESP32 memberikan keseimbangan antara presisi pergerakan dan konsumsi daya.

Di sisi lain, peningkatan efisiensi sistem PLTS tidak hanya berasal dari mekanisme pelacakan, tetapi juga dari pengelolaan daya yang efektif. Kajian terbaru menunjukkan bahwa kestabilan tegangan pada baterai sangat dipengaruhi oleh Variasi radiasi yang diterima panel, sehingga sistem kontrol daya adaptif diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara input energi dan kebutuhan beban [5], [8]. Kontrol daya adaptif memungkinkan pemutusan otomatis beban tidak prioritas ketika kapasitas baterai menurun, sekaligus memastikan beban penting tetap dapat disuplai. Pendekatan ini memiliki relevansi kuat dengan TA ini karena sistem yang dikembangkan mengintegrasikan pengukuran tegangan-arus (melalui INA226) untuk menentukan keputusan prioritas beban secara real time.

Integrasi teknologi Internet of Things (IoT) juga menjadi topik penelitian penting sejak 2021. Sistem monitoring berbasis IoT memungkinkan pemantauan tegangan, arus, daya, serta status pelacakan melalui jaringan nirkabel, sehingga meningkatkan kemampuan diagnostik dan pengawasan jarak jauh [9]. Teknologi ini mendukung pengembangan PLTS modern yang lebih responsif, efisien, dan mudah dipantau. Relevansi terhadap TA ini jelas, karena ESP32 yang digunakan

memiliki modul WiFi terintegrasi sehingga data sistem dapat ditampilkan melalui dashboard Blynk secara real time.

Pada sistem off-grid modern, integrasi panel surya, baterai, SCC MPPT, dan inverter memerlukan pengendalian holistik agar daya dapat dimanfaatkan secara optimal. Kajian microgrid terkini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi panel melalui solar tracking berdampak langsung pada stabilitas tegangan bus DC, keandalan pengisian baterai, dan kualitas suplai daya ke beban AC maupun DC [5]. Sistem microgrid yang mengandalkan sumber terbarukan juga sangat terbantu oleh strategi adaptif dalam manajemen energi, terutama pada sistem berkapasitas kecil seperti prototipe 100 Wp dalam penelitian ini.

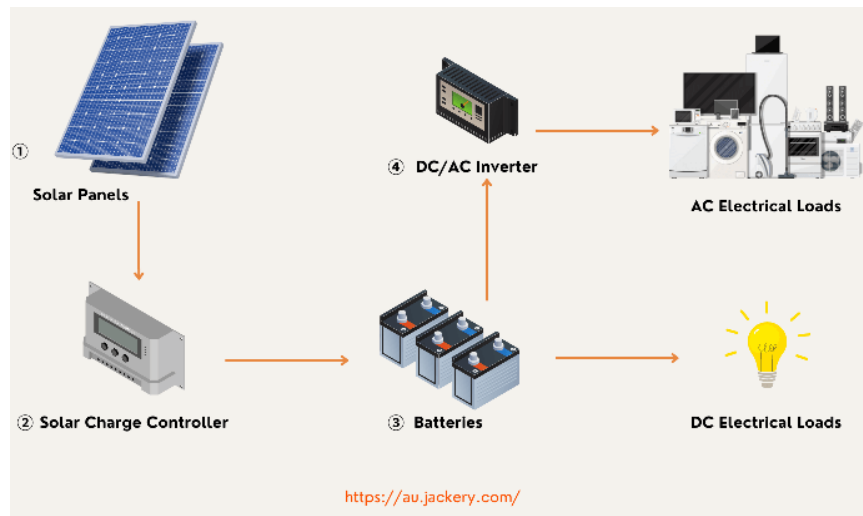
2.2 Dasar Teori

Bagian dasar teori memuat konsep-konsep yang menjadi landasan dalam perancangan dan pengembangan prototipe PLTS off-grid 100 Wp dengan solar tracking panel dual-axis dan sistem kontrol daya adaptif berbasis ESP32. Pembahasan meliputi prinsip kerja sistem PLTS, karakteristik sistem off-grid, mekanisme solar tracking, konsep kontrol daya adaptif, serta peran komponen utama yang digunakan.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem yang mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC) melalui modul fotovoltaik. Energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara langsung, disimpan dalam baterai, atau dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter sesuai kebutuhan beban.

Pada sistem PLTS off-grid, seluruh proses pembangkitan dan distribusi energi dilakukan secara mandiri tanpa keterhubungan dengan jaringan listrik PLN. Oleh karena itu, pengelolaan energi yang efisien dan adaptif menjadi faktor penting untuk menjaga kestabilan suplai daya dan keandalan sistem.

2.2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid



Gambar 2.1 Sistem PLTS-Off Grid [48]

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, adalah sistem pembangkit listrik mandiri yang tidak terhubung dengan jaringan listrik utama (PLN), dirancang untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pada lokasi tertentu dengan memanfaatkan energi radiasi sinar matahari. Energi listrik dihasilkan oleh panel surya yang mengkonversi cahaya matahari menjadi arus listrik searah (DC) melalui efek fotovoltaiik. Arus DC ini kemudian dialirkan ke solar charge controller sebagai perangkat pengatur proses pengisian baterai untuk melindungi baterai dari overcharge maupun overdischarge serta mengatur aliran daya antar panel, baterai dan beban [21][22][23][24].

Baterai yang umum digunakan dalam sistem PLTS Off-Grid, seperti baterai LiFePO₄ berkapasitas 12V, dipilih karena efisiensi pengisian yang tinggi, ketahanan pada siklus panjang, dan keamanan lebih baik dibanding baterai jenis SLA atau Li-ion konvensional. Energi dari baterai kemudian dapat digunakan secara langsung untuk beban listrik DC atau dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) melalui inverter untuk beban AC, sehingga fleksibilitas aplikasi perangkat rumah tangga terpenuhi.

Untuk meningkatkan efisiensi pemanenan energi surya, sistem PLTS Off-Grid modern mengintegrasikan solar tracking dual-axis, yaitu sistem pelacak

matahari dua sumbu yang menggerakkan panel agar selalu tegak lurus terhadap arah sinar matahari. Dengan cara ini, intensitas cahaya yang diterima panel tetap maksimum sepanjang hari, meningkatkan daya keluaran secara signifikan dibandingkan sistem panel statis [23].

Secara prinsip alur kerja energi pada sistem PLTS Off-Grid 100 Wp dimulai dari energi matahari yang diserap oleh panel surya lalu dikonversi menjadi energi listrik arus DC. Energi DC tersebut diatur oleh solar charge controller MPPT untuk optimalisasi pengisian baterai. Energi tersimpan dalam baterai digunakan untuk menyuplai beban yang bisa berupa DC langsung atau setelah dikonversi oleh inverter menjadi AC. Sistem dual-axis tracker secara otomatis mengatur posisi panel berdasarkan pembacaan sensor LDR agar selalu menghadap matahari, sedangkan ESP32 berperan sebagai pusat kendali proses pengukuran, kontrol, dan komunikasi data sistem [24].

Pemilihan konfigurasi off-grid pada penelitian ini didasarkan pada beberapa pertimbangan teknis dan kontekstual. Pertama, lokasi target penerapan sistem, yaitu wilayah terpencil atau fasilitas yang belum memiliki akses jaringan distribusi PLN, secara inheren mengharuskan kemandirian energi penuh. Kedua, sistem off-grid memberikan kendali penuh atas manajemen energi karena tidak ada ketergantungan pada jaringan eksternal yang karakteristiknya tidak dapat dikontrol oleh sistem. Ketiga, dari segi proteksi, sistem off-grid yang dirancang dengan baik justru lebih terlindungi dari gangguan kualitas daya eksternal seperti tegangan jatuh (voltage sag), distorsi harmonik, atau pemadaman jaringan [21].

Dalam konteks prototipe 100 Wp ini, kapasitas sistem dirancang untuk memenuhi kategori beban berdaya kecil, meliputi sistem pencahayaan, perangkat elektronik ringan, serta beban kontrol dan komunikasi seperti modul ESP32, sensor, dan aktuator tracking. Estimasi konsumsi daya beban total sistem di bawah kondisi mode Normal berkisar antara 30–60 W, sehingga baterai LiFePO₄ 21 Ah dengan energi tersimpan ± 268 Wh mampu menyediakan otonomi operasi sekitar 4–8 jam tanpa pengisian. Kondisi ini relevan untuk skenario pengujian lapangan yang dilakukan dalam penelitian ini [24].

Keunggulan komparatif sistem PLTS off-grid skala kecil berbasis panel monokristalin terhadap sumber energi konvensional terletak pada nihilnya biaya bahan bakar operasional, emisi karbon nol selama fase operasi, serta kemudahan instalasi tanpa memerlukan infrastruktur jaringan. Dengan mengintegrasikan sistem solar tracking dual-axis, potensi produksi energi harian dapat ditingkatkan secara signifikan, sehingga rasio antara kapasitas panel terpasang terhadap kebutuhan beban menjadi lebih optimal dan ukuran baterai yang diperlukan dapat ditekan [23].

2.2.2 Solar Tracking panel Dual-Axis



Gambar 2.2 Active Solar Tracking System [26]

Solar tracking panel merupakan mekanisme kendali yang berfungsi untuk mengatur orientasi panel surya agar selalu mengarah ke posisi matahari sehingga sudut datang cahaya (angle of incidence) berada pada kondisi paling optimal, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.2. Prinsip kerja dasar sistem ini adalah mendeteksi perbedaan intensitas cahaya pada beberapa titik referensi, kemudian menggerakkan panel mengikuti perubahan posisi matahari sepanjang hari. Proses ini bertujuan meningkatkan energi yang diserap oleh modul fotovoltaik dibandingkan konfigurasi panel statis [36][43][44].

Pada sistem dual-axis, pergerakan panel terjadi pada dua sumbu utama, yaitu sumbu azimuth (timur–barat) dan sumbu elevasi (atas–bawah). Dengan dua derajat kebebasan ini, panel mampu mengikuti lintasan matahari secara lebih presisi. Secara umum, sistem dual-axis dapat meningkatkan daya tangkapan

energi hingga 25-35% karena panel selalu diarahkan tegak lurus terhadap sinar matahari.

Sensor cahaya seperti LDR (Light Dependent Resistor) digunakan untuk mendeteksi perbedaan intensitas pada empat kuadran. Nilai sensor kemudian dibandingkan oleh mikrokontroler untuk menentukan arah pergerakan panel. Ketika intensitas cahaya pada satu sisi lebih tinggi, motor penggerak akan bergerak hingga selisih intensitas berada pada batas toleransi tertentu. Pendekatan berbasis sensor ini banyak digunakan karena murah, responsif, dan mudah diimplementasikan [43][44].

Aktuasi gerakan panel dikendalikan oleh motor stepper atau motor DC yang digerakkan melalui driver motor. Mekanisme ini harus dilengkapi dengan limit switch untuk mencegah pergerakan panel melewati batas mekanis. Pada beberapa sistem, penambahan RTC (Real-Time Clock) digunakan untuk mengembalikan panel ke posisi timur pada malam hari, sehingga sistem siap untuk pelacakan pada pagi berikutnya.

Secara teknis, solar tracking dual-axis bekerja dengan loop kendali berulang yang meliputi: pembacaan sensor, komparasi nilai intensitas, kalkulasi arah gerakan, dan pemberian sinyal aktuasi. Siklus kendali berulang ini memastikan panel selalu berada pada orientasi optimal tanpa intervensi manual.

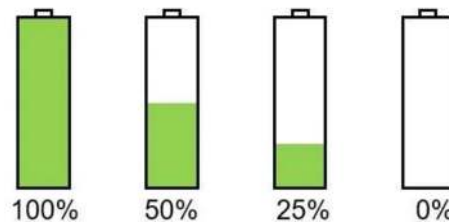
Sistem pelacakan matahari umumnya terbagi menjadi dua metode utama: pelacakan aktif (active tracking) yang menggunakan sensor cahaya, dan pelacakan kronologis (chronological tracking) yang menggunakan perhitungan matematis berbasis waktu astronomi. Pelacakan aktif sangat presisi saat intensitas cahaya tinggi, namun rentan mengalami kegagalan atau pergerakan acak (hunting) ketika sensor tertutup bayangan parsial atau saat kondisi cuaca berawan tebal. Sebaliknya, pelacakan kronologis tidak terpengaruh oleh cuaca karena bekerja berdasarkan waktu, namun tidak dapat mengompensasi pembiasan cahaya atau ketidaksejajaran mekanis.

Untuk menutupi kelemahan masing-masing metode, diterapkan sistem pelacakan hibrida (hybrid tracking). Pada arsitektur ini, mikrokontroler menggunakan data waktu dari modul RTC untuk menghitung dan mengarahkan

panel ke estimasi posisi matahari secara kasar (sebagai referensi utama). Setelah panel mencapai posisi tersebut, sistem mengambil alih kendali menggunakan sensor LDR untuk melakukan koreksi posisi halus (fine-tuning) berdasarkan intensitas cahaya aktual di lapangan. Pendekatan tiga lapisan yang menggabungkan RTC, LDR, dan penyesuaian akhir dari algoritma MPPT ini memastikan panel surya selalu berada pada orientasi paling optimal di berbagai kondisi cuaca.

Implementasi solar tracking dual-axis pada sistem PLTS skala kecil hingga prototipe memberikan keuntungan signifikan dalam peningkatan efisiensi energi. Selain itu, sistem ini menjadi salah satu solusi efektif untuk meningkatkan performa modul surya dalam aplikasi mikrogrid maupun sistem energi terbarukan mandiri.

2.2.3. State of Charge (SOC) dan Manajemen Baterai



Gambar 2.3 Diagram Estimasi SoC Baterai [46]

State of Charge (SOC) merupakan parameter krusial dalam manajemen energi sistem penyimpanan elektrokimia yang menyatakan persentase kapasitas energi yang tersisa dalam baterai terhadap kapasitas nominalnya pada kondisi referensi tertentu, sebagaimana diviualisasikan pada Gambar 2.3. Secara matematis, SOC didefinisikan sebagai:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t_0) + (1/C_n) \times \int i(\tau) d\tau$$

di mana C_n adalah kapasitas nominal baterai dalam Ah, $i(\tau)$ adalah arus sesaat (positif saat pengisian, negatif saat pengosongan), dan $\text{SOC}(t_0)$ adalah kondisi awal. Dalam aplikasi sistem PLTS off-grid 100 Wp ini, SOC menjadi

variabel utama dalam logika keputusan sistem kontrol daya adaptif, karena seluruh pemilihan mode operasi didasarkan pada estimasi nilai SOC baterai LiFePO₄ yang digunakan [46].

Terdapat beberapa metode umum untuk mengestimasi SOC baterai dalam aplikasi sistem tertanam. Metode pertama adalah Open Circuit Voltage (OCV) method, yaitu mengukur tegangan terminal baterai pada kondisi istirahat (tanpa beban dan tanpa pengisian) dan mengkorelasikannya dengan kurva SOC–tegangan karakteristik baterai. Metode ini akurat namun hanya dapat dilakukan ketika baterai dalam kondisi idle, sehingga tidak cocok untuk pemantauan dinamis. Metode kedua adalah Coulomb Counting (ampere-hour integration), yaitu mengintegrasikan arus pengisian dan pengosongan baterai terhadap waktu. Metode ini akurat dalam jangka pendek namun mengakumulasi error seiring waktu akibat ketidakakuratan sensor dan fenomena self-discharge [46].

Metode ketiga yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan berbasis tegangan terminal dinamis (Dynamic Voltage-Based Estimation). Pendekatan ini memanfaatkan karakteristik kurva discharge LiFePO₄ yang memiliki hubungan yang dapat dipetakan antara tegangan terminal dan SOC, terutama pada rentang SOC 15–90% di mana kurva tegangan relatif stabil namun tetap memiliki korelasi terhadap kapasitas tersisa. Sensor INA226 berperan sebagai instrumen pengukuran tegangan bus dengan resolusi ADC 16-bit dan akurasi $\pm 0,1\%$, sehingga mampu membedakan perubahan tegangan dalam skala miliVolt yang merepresentasikan perubahan kondisi energi baterai [46].

Keterbatasan utama metode tegangan berbasis dinamis pada baterai LiFePO₄ adalah flat discharge curve, yaitu karakteristik tegangan yang sangat datar pada rentang SOC 20–90%. Pada rentang ini, perubahan SOC sebesar 1% hanya direpresentasikan oleh perubahan tegangan sekitar 3–8 mV, sehingga membutuhkan sensor dengan resolusi tinggi. Dengan resolusi ADC 16-bit pada INA226 dan LSB tegangan bus sebesar 1,25 mV, sistem ini mampu mendeteksi perubahan tegangan yang mencerminkan perubahan SOC secara representatif untuk kebutuhan penentuan mode operasi 4-tier. Sebagai kompromi terhadap keterbatasan ini, threshold tegangan pada sistem kontrol daya adaptif dirancang

menggunakan rentang yang cukup lebar (selisih 0,3–0,7V antar mode) sehingga variabilitas pembacaan sensor tidak menyebabkan toggling mode yang tidak diinginkan [46].

Baterai LiFePO₄ 12V 21Ah yang digunakan dilengkapi Battery Management System (BMS) internal 20A yang berfungsi sebagai lapisan proteksi keras terhadap kondisi overcharge (tegangan sel > 3,65V), over-discharge (tegangan sel < 2,5V), overcurrent (arus > 20A), short circuit, dan ketidakseimbangan antar sel. Integrasi BMS dengan sistem kontrol firmware v6.12 membentuk arsitektur proteksi berlapis: firmware ESP32 bertindak sebagai proteksi lunak yang merespons lebih awal pada perubahan SOC (threshold 11,5V untuk mode Kritis), sementara BMS berfungsi sebagai proteksi keras terakhir yang mencegah kerusakan sel permanen jika logika firmware gagal merespons. Pendekatan dual-layer protection ini sesuai dengan praktik terbaik dalam manajemen baterai sistem energi terbarukan skala kecil [21][46].

Dalam konteks sistem PLTS off-grid, manajemen baterai yang efektif tidak hanya bertujuan mencegah kerusakan fisik, tetapi juga memaksimalkan siklus hidup (cycle life) baterai. Baterai LiFePO₄ memiliki siklus hidup 2.000–5.000 siklus pada kondisi normal, namun dapat menurun drastis apabila sering mengalami deep discharge (pengosongan di bawah 10% SOC) atau pengisian berlebih. Oleh karena itu, parameter threshold tegangan pada sistem kontrol daya adaptif ditetapkan dengan margin aman terhadap batas operasi sel, yaitu mode Kritis dipicu pada tegangan 11,5V (setara $\pm 3\%$ di atas batas minimum aman BMS 10,5V), sehingga memberikan waktu respons sistem sebelum BMS mengaktifkan proteksi keras [21].

2.2.3 Sudut Azimuth dan Elevasi Matahari

2.2.3.1 Pengertian dan Konsep Dasar

Dalam sistem solar tracking, posisi matahari di langit dinyatakan menggunakan dua sudut koordinat utama yang dikenal sebagai sudut azimuth dan sudut elevasi (altitude). Kedua parameter ini merupakan bagian dari sistem koordinat horizontal yang digunakan secara luas dalam astronomi, navigasi, dan

rekayasa sistem energi surya untuk mendeskripsikan arah suatu objek di langit relatif terhadap pengamat di permukaan bumi [36][43].

Pemahaman mendalam terhadap kedua sudut ini menjadi fondasi utama perancangan algoritma solar tracking dual-axis, karena seluruh keputusan pergerakan panel kapan harus berputar pada sumbu horizontal maupun vertikal didasarkan pada nilai azimuth dan elevasi matahari yang dihitung secara real-time oleh mikrokontroler ESP32.

2.2.3.2 Sudut Azimuth (Azimuth Angle)

Sudut azimuth (A) adalah sudut horizontal yang mengukur arah matahari diukur dari arah utara sejati (true north) searah jarum jam menuju proyeksi matahari pada bidang horizontal. Sudut azimuth merepresentasikan pergerakan matahari dari timur ke barat sepanjang hari dan bervariasi secara musiman akibat perubahan deklinasi matahari [7][36].

Konvensi pengukuran sudut azimuth adalah sebagai berikut:

- Azimuth $0^\circ/360^\circ$ = Arah Utara
- Azimuth 90° = Arah Timur (matahari terbit)
- Azimuth 180° = Arah Selatan (solar noon di belahan bumi selatan)
- Azimuth 270° = Arah Barat (matahari terbenam)

Pada lokasi pengujian penelitian ini di Laboratorium STr. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi Undip, Tembalang, Semarang ($7,08^\circ$ LS, $110,44^\circ$ BT), posisi lintasan matahari berada di sisi utara pengamat karena terjadi fenomena solstis Juni. Berdasarkan data pengujian pada tanggal 21 Juni 2026, sudut azimuth matahari bergerak dari $63,2^\circ$ (timur laut) pada pukul 07.00 WIB, melewati titik utara ($0^\circ/360^\circ$) saat *solar noon*, hingga mencapai $294,6^\circ$ (barat laut) pada pukul 17.00 WIB mencatat total perjalanan horizontal sebesar $231,4^\circ$ dalam satu hari. Pergerakan lintasan yang lebar inilah yang diikuti oleh motor stepper NEMA23 melalui mekanisme *timing belt* pada sumbu azimuth sistem *tracking*.

2.2.3.3 Sudut Elevasi (Elevation / Altitude Angle)

Sudut elevasi (α), disebut juga sudut altitude, adalah sudut vertikal yang mengukur ketinggian matahari di atas garis horizon. Sudut ini diukur dari bidang horizontal (horizon) ke arah matahari, dengan rentang nilai 0° saat matahari tepat di horizon (terbit/terbenam) hingga 90° saat matahari tepat di atas kepala (zenith). Sudut elevasi menentukan seberapa jauh panel harus diarahkan ke atas atau ke bawah pada sumbu elevasi sistem tracking [7][36].

Nilai elevasi maksimum matahari terjadi saat solar noon ketika matahari berada tepat di meridian lokasi pengamat. Untuk lokasi Semarang pada tanggal 21 Juni 2026, elevasi maksimum tercatat sebesar $59,5^\circ$ pada pukul 11:38 WIB. Nilai ini tidak mencapai 90° karena Semarang berada di lintang $7,08^\circ$ Selatan sementara matahari berada di titik balik utara pada $23,45^\circ$ Utara ekuator (deklinasi $+23,45^\circ$), sehingga terdapat selisih angular sebesar $30,53^\circ$ dari titik zenith pengamat.

Karakteristik perubahan sudut elevasi sepanjang hari adalah sebagai berikut:

- Pagi hari (06:00–09:00): elevasi rendah 5° – 40° panel diarahkan hampir mendatar menghadap timur
- Siang hari (10:00–14:00): elevasi tinggi 50° – 65° panel diarahkan hampir vertikal ke selatan
- Sore hari (15:00–17:00): elevasi menurun kembali 5° – 44° panel mengikuti penurunan ke arah barat

Pada sistem tracking yang dikembangkan, perubahan sudut elevasi diaktuator oleh linear actuator 12V DC 900N dengan stroke 200 mm. Linear actuator bergerak extend (memanjang) untuk menaikkan sudut panel dan retract (memendek) untuk menurunkan sudut panel. Rentang operasi sumbu elevasi dibatasi antara 5° hingga 85° oleh limit switch mekanis untuk mencegah kerusakan akibat pergerakan melewati batas fisik struktur.

2.2.3.4 Perhitungan Posisi Matahari Secara Astronomis

Posisi matahari yang dinyatakan dalam azimuth dan elevasi dihitung secara matematis oleh ESP32 menggunakan persamaan trigonometri astronomi. Data masukan yang dibutuhkan adalah waktu (dari RTC DS3231), tanggal, serta

koordinat geografis lokasi. Perhitungan dilakukan secara bertahap melalui empat parameter antara [36][7].

2.2.3.4.1 Hari ke-n dalam Setahun (Day Number)

Langkah pertama adalah menghitung hari ke-n dalam setahun dari tanggal yang diberikan RTC. Parameter ini menjadi dasar perhitungan deklinasi matahari.

$$n = \text{jumlah hari sejak 1 Januari}$$

Contoh: 21 Juni 2026 = 31(Jan) + 28(Feb) + 31(Mar) + 30(Apr) + 31(Mei) + 21(Juni) = 172

2.2.3.4.2 Deklinasi Matahari (δ)

Deklinasi adalah sudut antara garis khatulistiwa dengan arah matahari, yang berubah sepanjang tahun akibat kemiringan sumbu bumi sebesar $23,45^\circ$. Rumus pendekatan yang digunakan:

$$\delta = 23,45^\circ \times \sin [(360^\circ / 365) \times (n - 81)]$$

Untuk $n = 134$ (21 Juni): $\delta = 23,45^\circ \times \sin(89,75^\circ) = 23,45^\circ \times 0,999 = +23,45^\circ$.

Nilai positif menunjukkan matahari berada di utara ekuator pada bulan Juni.

2.2.3.4.3 Hour Angle (ω)

Hour angle merepresentasikan posisi harian matahari seberapa jauh matahari dari meridian lokasi. Nilainya negatif di pagi hari, nol saat solar noon, dan positif di sore hari. Setiap 1 jam setara dengan 15° karena bumi berotasi 360° dalam 24 jam.

$$\omega = (T_{\text{solar}} - 12) \times 15^\circ$$

$$T_{\text{solar}} = T_{\text{WIB}} + (\text{Longitude} - 105^\circ) / 15^\circ$$

Untuk Semarang ($110,44^\circ$ BT): koreksi longitude = $(110,44 - 105) / 15 = +0,363$ jam (+21,8 menit). Sehingga solar noon sejati di Semarang terjadi sekitar pukul 11:38 WIB, bukan tepat 12:00.

2.2.3.4.4 Elevasi Matahari (α)

Sudut elevasi dihitung dari kombinasi deklinasi, hour angle, dan latitude lokasi ($\phi = -7,08^\circ$ untuk Semarang):

$$\sin(\alpha) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)$$

Elevasi maksimum teoritis saat solar noon untuk Semarang pada 21 Juni 2026:

$$\alpha_{max} = 90^\circ - |\varphi - \delta| = 90^\circ - |-7,08^\circ - 18,55^\circ| = 90^\circ - 25,63^\circ = 64,37^\circ$$

Hasil teoritis $64,37^\circ$ sangat mendekati data aktual pengujian $64,5^\circ$ ini memvalidasi bahwa algoritma kalkulasi astronomi Layer 1 bekerja dengan akurat.

2.2.3.4.5 Azimuth Matahari (A)

Sudut azimuth dihitung setelah elevasi diketahui:

$$\cos(A) = [\sin(\delta) - \sin(\varphi) \cdot \sin(\alpha)] / [\cos(\varphi) \cdot \cos(\alpha)]$$

Nilai A yang dihasilkan kemudian digunakan ESP32 sebagai target sudut untuk motor stepper NEMA23. Selisih antara azimuth target dan posisi aktual panel yang dihitung dari akumulasi step motor dikonversi menjadi jumlah pulsa step yang dikirim ke driver TB6600:

$$\text{Jumlah Pulsa} = \Delta \text{Azimuth } (^\circ) \times 18 \text{ steps}/^\circ$$

2.2.3.5 Hubungan Azimuth-Elevasi dengan Aktuator Sistem Tracking

Nilai azimuth dan elevasi yang dihitung secara astronomis oleh ESP32 diterjemahkan langsung menjadi perintah gerak pada dua aktuator sistem tracking. Alur kerja lengkap dari pembacaan waktu RTC hingga pergerakan aktuator dapat diringkas sebagai berikut: RTC DS3231 menyediakan data waktu presisi tinggi ke ESP32 → ESP32 menghitung day number, deklinasi, hour angle → menghasilkan target azimuth dan elevasi dalam derajat → selisih target vs posisi aktual dikonversi ke jumlah step (azimuth) atau durasi ON relay (elevasi) → Motor stepper NEMA23 dan linear actuator bergerak hingga panel mencapai orientasi optimal terhadap matahari.

Dengan memahami kedua sudut koordinat ini secara mendalam, sistem solar tracking dual-axis yang dikembangkan mampu mengarahkan panel surya

secara presisi mengikuti lintasan matahari sepanjang hari, menghasilkan net energy gain sebesar +18,7% dibandingkan panel statis pada kondisi pengujian di iklim tropis Semarang.

2.2.4. Sistem Kontrol Daya Adaptif

Sistem kontrol daya adaptif pada prototipe PLTS off-grid 100 Wp ini merupakan mekanisme pengaturan distribusi energi yang bekerja secara dinamis berdasarkan kondisi energi aktual, khususnya nilai State of Charge (SOC) baterai. Pendekatan ini diterapkan karena daya keluaran panel surya bersifat fluktuatif akibat perubahan intensitas radiasi, suhu, dan kondisi lingkungan. Tanpa strategi pengendalian yang adaptif, sistem berisiko mengalami over-discharge, overload, maupun ketidakseimbangan suplai energi [43][44].

Prinsip kerja sistem kontrol adaptif diawali dengan pemantauan parameter listrik secara real-time, meliputi tegangan baterai, arus pengisian dan pengosongan, serta estimasi SOC. Data diperoleh melalui sensor INA226 dan diproses oleh mikrokontroler ESP32 untuk menentukan kondisi energi sistem. Berdasarkan informasi tersebut, ESP32 mengatur prioritas beban serta kinerja mekanisme solar tracking dual-axis.

Dalam implementasinya, sistem dibagi ke dalam beberapa mode operasi berbasis nilai SOC sebagai berikut:

1. Mode Surplus ($V_{\text{bat}} \geq 12,8 \text{ V} \mid \text{SoC} > 70\%$)

Pada kondisi energi tinggi, sistem beroperasi secara optimal. Tracking dual-axis bekerja dengan presisi penuh untuk memaksimalkan penyerapan energi, dan seluruh beban aktif dapat disuplai tanpa pembatasan.

2. Mode Normal ($12,2 \text{ V} - 12,8 \text{ V} \mid \text{SoC} 40-70\%$)

Sistem beroperasi stabil dengan konfigurasi standar. Tracking tetap aktif, namun pengendalian beban dilakukan secara terkontrol untuk menjaga keseimbangan antara produksi dan konsumsi energi.

3. Mode Hemat (11,5 V – 12,2 V | SoC 15–40%)

Ketika kapasitas baterai mulai menurun, sistem mengurangi konsumsi daya dengan menurunkan frekuensi pergerakan tracking dan membatasi beban sekunder. Strategi ini bertujuan memperlambat laju pengosongan baterai.

4. Mode Kritis ($V_{\text{xat}} < 11,5 \text{ V}$ | SoC < 15%)

Pada kondisi energi rendah, sistem memprioritaskan proteksi baterai. Tracking dihentikan dan hanya sistem kontrol utama yang tetap aktif. Beban non-prioritas diputus untuk mencegah deep discharge dan menjaga umur baterai.

Dari perspektif teori sistem kendali diskret, sistem kontrol daya adaptif pada penelitian ini dapat dimodelkan sebagai sebuah Mesin Keadaan Hingga atau Finite State Machine (FSM). FSM merupakan model komputasi yang mendefinisikan perilaku sistem sebagai sekumpulan state (keadaan) yang terbatas, beserta aturan transisi (transition rules) antar state berdasarkan kondisi input tertentu. Setiap state merepresentasikan satu konfigurasi operasional sistem yang memiliki aksi output yang jelas dan deterministik [43].

Dalam FSM sistem kontrol daya adaptif ini, terdapat empat state utama yaitu SURPLUS, NORMAL, HEMAT, dan KRITIS. Setiap state memiliki aksi output berupa konfigurasi relay beban dan status aktuator tracking yang berbeda. Transisi antar state dipicu oleh perubahan nilai tegangan terminal baterai yang diukur secara real-time melalui sensor INA226, dengan mekanisme hysteresis $\pm 0,1 \text{ V}$ yang berfungsi sebagai guard condition untuk mencegah transisi yang terlalu sensitif terhadap fluktuasi sesaat. Representasi FSM ini menjadi dasar formal implementasi logika switching pada firmware v6.12 yang dijalankan oleh ESP32 [43][44].

Konsep FSM dipilih sebagai paradigma implementasi karena beberapa keunggulan teknis yang relevan dengan kebutuhan sistem ini. Pertama,

determinisme: pada setiap kondisi input (tegangan baterai), sistem memiliki satu dan hanya satu state output yang terdefinisi, sehingga perilaku sistem dapat diprediksi dan diverifikasi. Kedua, efisiensi komputasi: evaluasi kondisi transisi hanya memerlukan perbandingan nilai tegangan dengan threshold, sehingga overhead komputasi minimal dan ESP32 dapat mengeksekusi logika kontrol dalam waktu sub-milidetik. Ketiga, modularitas: setiap state dapat dikonfigurasi ulang secara independen tanpa memengaruhi state lainnya, memudahkan pengembangan dan pengujian individual per mode operasi [44].

Dalam implementasi prototipe ini, estimasi SoC dilakukan secara tidak langsung melalui pemantauan tegangan terminal baterai menggunakan sensor INA226. Pendekatan ini dipilih karena karakteristik kurva discharge LiFePO_4 yang relatif stabil memungkinkan korelasi tegangan-SoC yang cukup representatif untuk sistem skala laboratorium, tanpa memerlukan algoritma estimasi SoC yang lebih kompleks. Melalui pembagian mode ini, sistem tidak hanya mengatur beban, tetapi juga mengoptimalkan siklus kerja baterai agar tidak mengalami pengosongan berlebih. Pendekatan ini sangat relevan pada sistem PLTS skala kecil dengan kapasitas penyimpanan terbatas, di mana efisiensi pemanfaatan energi menjadi faktor utama keberlangsungan operasi.

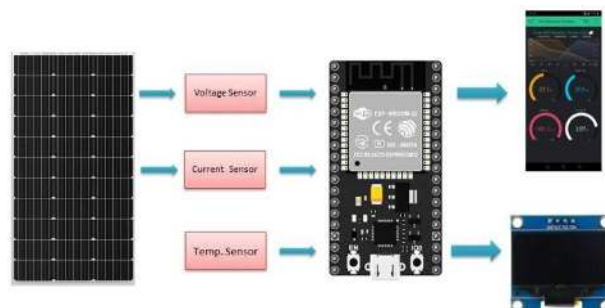
Pada sistem kendali yang melibatkan aktuator mekanik seperti relay, fluktuasi kecil (noise) pada nilai pembacaan sensor seringkali menyebabkan sistem berpindah kondisi secara cepat dan berulang-ulang, sebuah fenomena yang dikenal sebagai *chattering* atau *bouncing*. Untuk mencegah hal ini, sistem kontrol daya adaptif menerapkan mekanisme histeresis (*hysteresis band*).

Histeresis adalah metode pengendalian yang memberikan dua batas ambang (threshold) yang berbeda untuk transisi naik dan transisi turun. Sebagai contoh, jika sistem dikonfigurasi dengan histeresis $\pm 0,1\text{V}$, sistem tidak akan mengubah state tepat pada satu titik tegangan absolut, melainkan membutuhkan selisih jarak tertentu (pita histeresis) untuk mengonfirmasi perubahan kondisi. Dengan adanya daerah mati (*deadband*) ini, kestabilan distribusi daya dapat terjaga dengan baik dan umur pakai komponen relai menjadi lebih panjang karena terhindar dari *switching* tegangan yang terlalu reaktif.

Respons waktu sistem kontrol daya adaptif juga menjadi parameter perancangan yang penting. Dalam konteks sistem PLTS off-grid, perubahan SOC baterai berlangsung dalam skala menit hingga jam, jauh lebih lambat dibandingkan kapabilitas respons sistem kontrol. Oleh karena itu, target response time yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah ≤ 100 ms dari deteksi perubahan tegangan hingga aksi relay aktif. Target ini memberikan margin keamanan yang sangat besar terhadap laju perubahan SOC aktual, sekaligus memastikan sistem tidak terlambat merespons kondisi penurunan energi yang cepat akibat beban transien besar (seperti saat motor stepper NEMA23 bergerak pada inersia awal). Pengujian lapangan menunjukkan rata-rata response time 56,2 ms, jauh di bawah threshold desain 100 ms [44].

Selain itu, sistem kontrol adaptif terintegrasi dengan platform monitoring berbasis IoT. Parameter seperti tegangan baterai, arus, SOC, serta status mode operasi dikirim secara real-time ke dashboard pengguna. Integrasi ini memungkinkan evaluasi performa sistem dan pengambilan keputusan yang lebih responsif terhadap kondisi lapangan.

2.2.5 Sistem Monitoring IoT Berbasis ESP32 dan Blynk



Gambar 2.4 Sistem Monitoring Panel Surya Berbasis ESP32 dan Blynk [47]

Sistem monitoring IoT pada PLTS off-grid berfungsi menyediakan pemantauan kondisi operasional secara real-time melalui jaringan nirkabel,

sebagaimana tampak pada Gambar 2.4. Integrasi antara ESP32 dan platform Blynk memungkinkan seluruh parameter penting seperti tegangan panel, arus baterai, daya keluaran, suhu lingkungan, serta status beban dikirimkan ke antarmuka pengguna secara otomatis dan berkesinambungan. Dengan kemampuan ini, pengguna dapat melakukan evaluasi kinerja sistem tanpa harus melakukan pemeriksaan langsung pada perangkat fisik [15][19][30].

Mikrokontroler ESP32 berperan sebagai pusat akuisisi dan pengolahan data sensor. Modul ini memiliki fitur Wi-Fi terintegrasi, sehingga dapat berkomunikasi dengan server Blynk Cloud menggunakan protokol TCP/IP. Data dari sensor seperti INA226, DHT22, maupun RTC DS3231 dikonversi menjadi nilai digital melalui pembacaan rutin, kemudian dikirim ke server Blynk melalui mekanisme Virtual pin. Pendekatan ini memastikan semua Variabel sistem dapat dilaporkan secara terstruktur dan mudah diakses melalui aplikasi mobile.

Aplikasi Blynk menyediakan dashboard monitoring berbasis widget yang dapat dikonfigurasi sesuai kebutuhan. Parameter seperti tegangan, arus, daya, suhu, kelembapan, dan status relay dapat ditampilkan dalam bentuk grafik, indikator numerik, maupun notifikasi. Blynk juga mendukung logging historis, sehingga tren performa harian atau mingguan dapat dianalisis untuk mengevaluasi efisiensi sistem, kesehatan baterai, dan pola produksi energi panel surya.

Selain fungsi pemantauan, sistem IoT ini memungkinkan kontrol jarak jauh. Pengguna dapat mengatur beban, mengubah batas ambang kontrol daya adaptif, atau mengaktifkan mode tertentu melalui perintah yang dikirim dari aplikasi dan diterima oleh ESP32. Mekanisme ini meningkatkan fleksibilitas pengoperasian PLTS off-grid, khususnya pada prototipe yang membutuhkan penyesuaian konfigurasi tanpa harus membuka panel alat.

Melalui integrasi ESP32 dan Blynk, sistem monitoring IoT mampu meningkatkan transparansi operasi, memperkuat aspek kendali, dan memperluas kemampuan analisis performa PLTS. Pendekatan ini membuat prototipe lebih modern, responsif, dan sesuai dengan perkembangan teknologi energi terbarukan berbasis otomasi dan Internet of Things.

2.2.6 Sistem Konversi dan Distribusi Daya

Sistem konversi dan distribusi daya pada prototipe PLTS off-grid 100 Wp ini dirancang untuk memastikan energi yang dihasilkan panel surya dapat dimanfaatkan secara optimal, stabil, dan aman oleh seluruh subsistem, termasuk mekanisme solar tracking dual-axis dan sistem kontrol adaptif berbasis ESP32.

Alur energi pada prototipe dimulai dari panel surya 100 Wp yang menghasilkan tegangan DC nominal sekitar 18V pada kondisi maksimum daya. Karena karakteristik tegangan dan arus panel bersifat dinamis mengikuti perubahan irradiansi dan suhu, energi keluaran panel tidak langsung disalurkan ke baterai. Energi tersebut terlebih dahulu diproses oleh Solar Charge Controller (SCC) tipe MPPT yang berfungsi menjaga panel tetap bekerja pada titik daya maksimum sekaligus mengatur proses pengisian baterai LiFePO₄ 12V secara aman.

Energi yang telah dioptimalkan oleh MPPT kemudian disimpan dalam baterai sebagai sumber daya utama sistem. Pada prototipe ini, baterai tidak hanya berfungsi sebagai penyimpanan energi malam hari, tetapi juga sebagai penyangga (buffer) untuk menstabilkan suplai daya ketika terjadi fluktuasi akibat pergerakan motor tracking atau perubahan beban mendadak.

Dari baterai, distribusi daya dibagi menjadi dua jalur utama, yaitu jalur daya kontrol dan jalur daya beban.

Jalur daya kontrol mensuplai ESP32, sensor INA226, LDR, DHT22, RTC, serta rangkaian driver logika. Karena perangkat ini membutuhkan tegangan rendah dan stabil, digunakan buck converter untuk menurunkan tegangan baterai menjadi 5V atau 3,3V. Keberadaan buck converter sangat penting dalam prototipe ini karena sistem kontrol harus tetap stabil meskipun terjadi Variasi tegangan baterai atau lonjakan arus saat motor aktif.

Jalur daya beban mencakup aktuator mekanik seperti motor stepper NEMA23 pada sumbu azimuth dan linear actuator pada sumbu elevasi, serta beban DC atau AC tambahan jika digunakan. Motor stepper dikendalikan melalui driver TB6600 yang mengambil suplai langsung dari baterai, sedangkan linear actuator bekerja dengan tegangan DC sesuai spesifikasinya. Apabila sistem

digunakan untuk melayani beban AC, inverter DC–AC akan mengubah energi dari baterai menjadi tegangan AC standar.

Dalam perancangan distribusi daya ini, aspek proteksi menjadi bagian integral. Fuse dipasang pada jalur utama antara baterai dan beban untuk mencegah arus hubung singkat. Relay digunakan untuk mengatur distribusi daya berdasarkan logika kontrol adaptif yang dijalankan oleh ESP32. Ketika nilai State of Charge (SOC) turun di bawah ambang tertentu, sistem dapat memutuskan beban sekunder atau menghentikan pergerakan tracking guna menghemat energi.

Selain itu, sistem pendinginan aktif menggunakan mini fan 12V membantu menjaga suhu komponen daya seperti driver motor dan SCC agar tetap berada dalam batas operasi aman. Stabilitas termal ini berpengaruh langsung terhadap efisiensi konversi dan umur komponen.

2.2.7 Sistem Koordinat Horizontal dan Parameter Posisi Matahari

Posisi matahari di langit dinyatakan menggunakan sistem koordinat horizontal yang terdiri dari dua parameter sudut utama: azimuth dan elevasi. Kedua parameter ini menjadi fondasi seluruh algoritma solar tracking dual-axis karena setiap keputusan pergerakan panel kapan harus berputar secara horizontal maupun vertikal didasarkan pada nilai keduanya yang dihitung secara real-time oleh ESP32 menggunakan data waktu dari RTC DS3231.

2.2.7.1 Sudut Azimuth: Definisi, Konvensi, dan Rentang Pergerakan

Sudut azimuth (A) adalah sudut horizontal yang mengukur arah matahari dari titik pengamat, diukur dari arah utara sejati (true north) searah jarum jam hingga ke proyeksi posisi matahari pada bidang horizontal. Azimuth merepresentasikan pergerakan matahari dari timur ke barat sepanjang hari dan bervariasi musiman sesuai perubahan deklinasi matahari.

2.2.7.1.1 Titik Referensi 0° Azimuth dan Posisi Home Panel

Dalam sistem ini, titik referensi 0° azimuth ditetapkan sebagai arah Utara geografis seperti dalam konvensi astronomi umum, disesuaikan dengan desain

mekanik sistem tracking dan kondisi lokasi pengujian. Posisi home panel ditetapkan pada:

Azimuth 90° = arah Timur = posisi home panel saat sistem dinyalakan setiap pagi

Pemilihan 90° (Timur) sebagai home position memiliki alasan teknis yang kuat. Matahari terbit dari arah timur, sehingga dengan menempatkan panel menghadap ke timur pada posisi awal, sistem dapat langsung mulai tracking dari momen pertama matahari terbit tanpa perlu menunggu koreksi besar dari posisi yang jauh menyimpang. Ini meminimalkan energi aktuator yang terbuang untuk gerakan initial positioning.

2.2.7.1.2 Siklus Pergerakan Azimuth Harian dan Mode Standby

Siklus operasi azimuth setiap hari berlangsung dalam empat fase berurutan yang dikendalikan penuh oleh firmware ESP32 berdasarkan data waktu RTC DS3231:

Tabel 2.1 Siklus Operasi Harian Sumbu Azimuth

Fase	Waktu (WIB)	Aktivitas	Posisi Azimuth	Aktuator
1	Boot (05:50)	Sistem menyala, inisialisasi semua subsistem	90° (tetap di home)	Motor diam
2	06:00–17:00	Tracking aktif: RTC → ESP32 hitung azimuth target → motor stepper bergerak mengikuti matahari	$92^\circ \rightarrow 244^\circ$ (bergerak bertahap)	Motor stepper aktif intermiten
3	17:00–18:00	RESET: Tracking dihentikan, motor bergerak kembali ke posisi home 90° (Timur)	$244^\circ \rightarrow 90^\circ$ (bergerak mundur cepat)	Motor stepper aktif terus (reverse)
4	18:00–05:50	STANDBY MALAM: Panel diam di posisi home 90° , ESP32 aktif namun tracking OFF	90° (home, tetap)	Motor diam, holding current aktif

Proses reset pada Fase 3 dilakukan dengan menghitung selisih posisi aktual panel (misalnya $244,6^\circ$) terhadap posisi home (90°), kemudian motor stepper NEMA23 bergerak berlawanan arah jarum jam sejauh $154,6^\circ$ atau setara 2.783 step. Durasi reset ini pada kecepatan motor $5^\circ/\text{detik}$ membutuhkan waktu sekitar 31 detik. Reset dilakukan setelah matahari benar-benar terbenam (setelah pukul 17:00 WIB) untuk memastikan tidak ada energi produksi yang terlewat akibat gerakan reset.

Selama Mode Standby malam (Fase 4), motor stepper dipertahankan dalam kondisi energized (ENA aktif, holding torque 1,2 Nm) untuk mencegah panel bergeser akibat gaya angin. Konsumsi daya holding current sekitar 0,8–1,2W, jauh lebih kecil dibandingkan menggerakkan motor. Pada Mode Kritis baterai, holding current juga dimatikan untuk menghemat energi dan panel dibiarkan bergerak bebas (ENA dinonaktifkan).

2.2.7.1.3 Arah Putaran Motor dan Konvensi DIR

Arah putaran motor stepper NEMA23 untuk sumbu azimuth mengikuti konvensi:

DIR = LOW (CW, searah jarum jam): panel berputar dari arah Timur ke Selatan ke Barat mengikuti lintasan matahari.

DIR = HIGH (CCW, berlawanan jarum jam): panel berputar dari Barat kembali ke Timur digunakan saat proses reset malam.

Konvensi ini ditetapkan berdasarkan orientasi fisik pemasangan motor dan pulley pada rangka prototipe. Jika motor dipasang dalam orientasi berbeda, polaritas DIR dapat dibalik melalui konstanta firmware tanpa mengubah logika algoritma.

2.2.7.2 Sudut Elevasi: Definisi, Rentang Gerak, dan Siklus Linear Actuator

Sudut elevasi (α), disebut juga sudut altitude atau sudut ketinggian, adalah sudut vertikal yang mengukur ketinggian matahari dari garis horizon menuju posisi matahari di langit. Sudut ini diukur dari bidang horizontal (0°) ke arah zenith (90°). Perubahan elevasi matahari terjadi sepanjang hari rendah di pagi dan sore, tinggi di siang hari dan juga bervariasi musiman sesuai deklinasi matahari.

2.2.7.2.1 Titik 0° Elevasi (Home) dan Titik Puncak Linear Actuator

Pada sistem ini, sumbu elevasi diaktuatori oleh linear actuator 12V DC 900N dengan stroke 200mm. Posisi elevasi linear actuator didefinisikan dalam dua titik batas:

Tabel 2.2 Titik Batas Elevasi Linear Actuator pada Sistem Tracking

Posisi Actuator	Kondisi Stroke	Sudut Elevasi Panel	Keterangan
HOME (titik 0°)	Fully retracted (0 mm)	5° dari horizontal	Posisi awal & reset malam. Panel hampir mendatar, menghadap timur saat standby
Setengah stroke	Retracted 100 mm	~ 45°	Posisi tengah. Tercapai saat solar altitude sedang (pagi ~ 09:00 dan sore ~ 15:00)
PUNCAK (titik max)	Fully extended (200 mm)	85° dari horizontal	Posisi hampir vertikal. Tercapai saat solar noon. Limit switch mekanis mencegah melampaui 85°
Limit switch bawah	< 0 mm (tidak bisa)	< 5° (tidak bisa)	Proteksi mekanis batas bawah. Relay RETRACT dimatikan otomatis oleh firmware
Limit switch atas	> 200 mm (tidak bisa)	> 85° (tidak bisa)	Proteksi mekanis batas atas. Relay EXTEND dimatikan otomatis oleh firmware

Alasan pemilihan 5° (bukan 0°) sebagai batas bawah elevasi adalah pertimbangan mekanis panel tidak boleh sepenuhnya datar (0°) karena bracket penghubung linear actuator ke rangka panel memerlukan sudut minimum agar tidak terjadi dead-point mekanis (posisi di mana aktuator tidak bisa menghasilkan gaya dorong yang efektif). Limit 85° (bukan 90°) juga diterapkan untuk mencegah panel melewati titik tegak lurus sempurna yang berpotensi memberikan beban balik (back-load) pada aktuator.

2.2.7.2.2 Hubungan Stroke Actuator dengan Sudut Elevasi Panel

Konversi antara panjang stroke linear actuator dan sudut elevasi panel menggunakan hubungan geometris sistem engsel (pivot-pivot). Karena aktuator dan bracket engsel membentuk segitiga kinematik, hubungan stroke-sudut bersifat non-linear mengikuti persamaan trigonometri:

$$L_{stroke} = L_{arm} \times \sqrt{2 - 2\cos(\Delta\alpha)}$$

Dimana L_{arm} adalah panjang lengan engsel dari titik pivot ke titik sambung aktuator, dan $\Delta\alpha$ adalah perubahan sudut elevasi. Pada kondisi pendekatan linear (untuk $\Delta\alpha$ kecil):

$$L_{stroke} \approx L_{arm} \times \Delta\alpha \text{ (dalam radian)}$$

Dengan stroke total 200mm dan rentang elevasi efektif 80° (dari 5° hingga 85°), kecepatan angular linear actuator pada kecepatan gerak 5mm/detik adalah:

$$v_{angular} = (80^\circ / 200mm) \times 5mm/s = 2^\circ/detik$$

$$Waktu \text{ untuk naik dari } 5^\circ \text{ ke } 85^\circ \text{ (full stroke)} = 80^\circ / 2^\circ/s = 40 \text{ detik}$$

2.2.7.2.3 Siklus Pergerakan Elevasi Harian

Berbeda dengan sumbu azimuth yang bergerak satu arah searah jarum jam sepanjang hari, sumbu elevasi memiliki pola naik-turun simetris sepanjang hari mengikuti profil ketinggian matahari:

Tabel 2.3 Profil Pergerakan Elevasi Sepanjang Hari

Waktu (WIB)	Elevasi Target ($^\circ$)	Gerakan Actuator	Stroke Est. (mm)	Kondisi
06:00 (boot)	5° (home)	Diam di posisi home	~ 0 mm	Panel hampir mendatar, siap tracking
07:00	$18,4^\circ$	EXTEND (naik)	~ 33 mm	Panel naik mengikuti matahari terbit
09:00	$47,0^\circ$	EXTEND (naik)	~ 105 mm	Panel setengah jalan ke titik puncak
12:00 (puncak)	$64,5^\circ$	Diam (max harian)	~ 149 mm	SOLAR NOON — elevasi puncak hari ini
15:00	$43,6^\circ$	RETRACT (turun)	~ 97 mm	Panel mulai turun mengikuti matahari sore
17:00 (akhir)	$13,8^\circ$	RETRACT (turun)	~ 18 mm	Tracking aktif berakhir, elevasi mendekati home
17:00–18:00 (reset)	5° (home)	RETRACT ke batas bawah	0 mm (fully retracted)	Panel kembali ke posisi home untuk mode standby malam

Dari profil pergerakan di atas tampak bahwa linear actuator bergerak EXTEND (memanjang, panel naik) dari pagi hingga solar noon, kemudian RETRACT (memendek, panel turun) dari solar noon hingga sore. Total jarak yang ditempuh aktuator dalam satu hari adalah naik $\sim 149\text{mm}$ + turun kembali $\sim 149\text{mm} = \sim 298\text{mm}$ atau setara dengan 1,49 kali full stroke. Ini menjadi dasar perhitungan konsumsi energi linear actuator sebesar 4,2 Wh/hari.

2.2.7.3 Logika Reset Malam dan Mode Standby Sistem

Mode standby malam adalah kondisi sistem ketika RTC DS3231 mendeteksi waktu di luar rentang operasi tracking (17:00–06:00 WIB). Pada kondisi ini, sistem tidak benar-benar mati, melainkan masuk ke mode siaga yang tetap mempertahankan fungsi proteksi baterai dan monitoring IoT.

2.2.7.3.1 Prosedur Reset Menjelang Malam

Memasuki pukul 17:00 WIB yang dipantau melalui Real-Time Clock (RTC), firmware secara otomatis menginisiasi prosedur reset harian. Langkah pertama yang dilakukan sistem adalah menghentikan seluruh algoritma pelacakan (tracking), di mana semua variabel posisi target akan langsung dikunci (freeze) pada nilai pemantauan terakhir.

Setelah pelacakan dihentikan, sistem mulai menormalkan posisi perangkat kembali ke titik awal (home). Pada sumbu elevasi, proses reset dilakukan dengan mengaktifkan relay RETRACT. akan berhenti otomatis jika batas waktu maksimal 45 detik telah tercapai bergantung pada kondisi mana yang terpenuhi lebih dulu. Sementara itu, untuk mengembalikan sumbu azimuth ke posisi home di sudut 90° , motor stepper NEMA23 diinstruksikan untuk berputar berlawanan arah jarum jam (dengan mengatur nilai DIR = HIGH). Pergerakan mundur ini dilakukan secara presisi dengan menghitung mundur berdasarkan total akumulasi step counter yang telah tercatat sepanjang hari tersebut.

Begitu sumbu elevasi dan azimuth dipastikan telah berhasil kembali ke posisi home, firmware akan langsung mereset nilai step counter kembali ke angka

nol. Langkah ini krusial untuk memberikan referensi posisi yang segar dan akurat bagi operasi keesokan harinya. Sebagai penutup prosedur, sistem akan beralih ke mode standby. Pada fase istirahat ini, perlakuan terhadap motor penggerak akan disesuaikan dengan kondisi daya perangkat: arus penahan motor (holding current) akan tetap dibiarkan aktif jika sistem berada dalam Mode Normal atau Hemat, namun arus tersebut akan dimatikan sepenuhnya apabila sistem sedang beroperasi dalam Mode Kritis.

2.2.7.3.2 Kondisi Sistem Selama Mode Standby Malam

Tabel 2.4 Status Subsistem Selama Mode Standby Malam (18:00–06:00 WIB)

Subsistem	Status	Konsumsi Daya	Keterangan
Algoritma tracking	NONAKTIF	0 W	Loop tracking tidak dieksekusi
Motor stepper NEMA23	HOLDING (diam)	~ 1,0 W	Holding current menjaga posisi dari gaya angin
Linear actuator	DIAM (posisi home)	0 W	Self-locking, tidak butuh daya untuk diam
ESP32 + sensor	AKTIF (light sleep)	~ 0,3 W	Monitoring baterai & IoT tetap berjalan
Relay 4-channel (beban)	Sesuai mode daya	Sesuai kondisi SoC	Kontrol daya adaptif tetap aktif malam hari
Monitoring IoT (Blynk)	AKTIF	Sudah termasuk ESP32	Data dikirim setiap 60 detik sesuai timer
SCC MPPT	AKTIF	~ 0,1 W (standby)	Siap untuk pengisian jika ada panel aktif (tidak ada malam hari)

Total konsumsi daya sistem saat standby malam adalah sekitar 1,4 W, yang dalam 13 jam malam setara dengan konsumsi energi 18,2 Wh. Energi ini sepenuhnya ditanggung oleh baterai LiFePO₄ 12V 21Ah yang memiliki kapasitas tersimpan sekitar 268 Wh. Ini berarti konsumsi malam menguras sekitar 6,8% dari kapasitas baterai, yang secara signifikan mempengaruhi kondisi SoC saat tracking dimulai kembali pagi hari.

2.2.7.3.3 Prosedur Startup Tracking Pagi Hari

Saat RTC mendeteksi waktu 06:00 WIB, sistem secara otomatis keluar dari mode standby dan menjalankan urutan startup tracking:

1. Verifikasi posisi home: sistem memeriksa apakah step counter azimuth = 0 dan limit switch bawah elevasi aktif. Jika tidak, homing sequence dijalankan ulang.
2. RTC DS3231 dibaca untuk mendapatkan waktu aktual → kalkulasi posisi matahari awal dijalankan.
3. Kondisi baterai diperiksa via INA226. Jika Mode Kritis, tracking tidak diaktifkan hingga baterai pulih.
4. Loop tracking aktif dijalankan. Panel mulai bergerak dari 90° azimuth / 5° elevasi menuju posisi matahari yang dihitung.

2.2.7.4 Relasi Azimuth dan Elevasi terhadap Aktuator Sistem

Dua sudut koordinat azimuth dan elevasi diterjemahkan menjadi perintah yang berbeda kepada dua aktuator yang berbeda. Tabel berikut merangkum secara komprehensif relasi antara parameter sudut, aktuator, dan perintah kontrol yang dihasilkan firmware:

Tabel 2.5 Relasi Lengkap Azimuth-Elevasi dengan Aktuator dan Logika Kontrol

Parameter	Sumbu	Aktuator	Perintah Kontrol	Contoh Konkret
Azimuth (A)	Horizontal	Motor Stepper NEMA23 + Driver TB6600	Pulsa STEP ke GPIO13; Arah DIR ke GPIO26	$\Delta A = 10^\circ \rightarrow$ kirim 180 pulsa ke TB6600, DIR=LOW (CW)
Elevasi (α)	Vertikal	Linear Actuator 12V DC 900N	Relay EXTEND (GPIO32) atau RETRACT (GPIO33) aktif selama t detik	$\Delta \alpha = 5^\circ \rightarrow$ EXTEND ON selama 2,5 detik (2°/s)
Home azimuth	Horizontal	NEMA23 reverse	DIR=HIGH (CCW), STEP berpulsa hingga	Reset 244° ke 90°: 2.783 step CCW ~ 31 detik

Parameter	Sumbu	Aktuator	Perintah Kontrol	Contoh Konkret
			step counter = 0	
Home elevasi	Vertikal	Linear Actuator RETRACT	RETRACT ON hingga limit switch bawah aktif atau timeout 45 detik	Full retract dari 85°: RETRACT ON 40 detik
Deadband LDR	Keduanya	Motor/Actuator diam	Jika $ \Delta LDR < 50$ ADC counts, aktuator tidak bergerak (hemat energi)	Mencegah osilasi pada kondisi cahaya stabil

2.2.7.5 Ringkasan Parameter Azimuth dan Elevasi Sistem Prototipe

Tabel 2.6 Ringkasan Parameter Azimuth dan Elevasi Sistem Tracking Prototipe

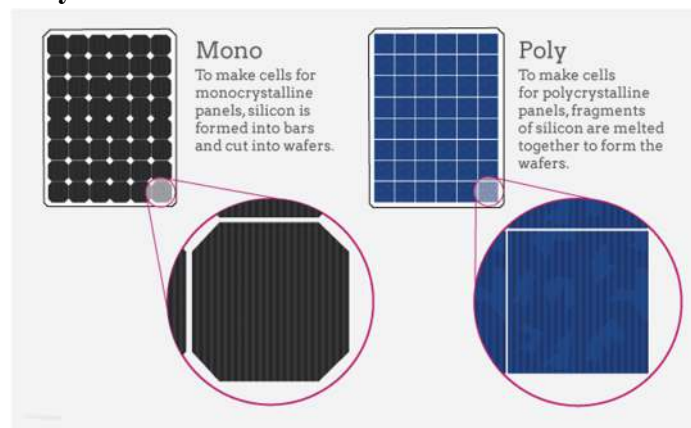
Parameter	Nilai	Satuan / Keterangan
Rentang azimuth operasi	0° – 360°	Fisik memungkinkan, software limit 90°–270°
Posisi home azimuth	90° (Timur)	Posisi startup & reset malam
Lintasan azimuth harian (Juni, Semarang)	~ 152°	92,2° → 244,6° sesuai data pengujian 21 ajuni 2026
Resolusi azimuth (motor + pulley 1:3)	0,075°/step	18 steps/°, resolusi sangat presisi
Rentang elevasi operasi	5° – 85°	
Posisi home elevasi	5°	Actuator fully retracted, panel hampir mendatar
Elevasi puncak harian (22 Juni 2026)	64,5°	Terjadi saat solar noon ~ 12:00 WIB
Kecepatan angular linear actuator	~ 2°/detik	Dari kecepatan gerak 5mm/s dan rentang 80°/200mm
Waktu reset malam (azimuth + elevasi)	~ 40 detik	Motor reverse 154,6° + actuator full retract berlangsung paralel
Jam operasi tracking aktif	06:00–17:00 WIB	11 jam per hari pada kondisi Semarang
Jam mode standby	17:00–06:00 WIB	13 jam, panel di posisi home, monitoring

Parameter	Nilai	Satuan / Keterangan
malam		IoT tetap aktif

2.2.8 Komponen Utama Sistem

Komponen utama yang digunakan dalam perancangan dan pembuatan prototipe PLTS Off-Grid 100 Wp dengan Solar Tracking Panel Dual-Axis dan Sistem Kontrol Daya Adaptif Berbasis ESP32 terdiri dari beberapa perangkat keras dan perangkat lunak yang saling terintegrasi. Setiap komponen memiliki peran penting dalam memastikan sistem bekerja secara efisien dan stabil. Adapun komponen-komponen utama yang digunakan adalah sebagai berikut:

2.2.8.1 Panel Surya



Gambar 2.5 Sel Surya Monocrystalline dan Polycrystalline [37]

Panel surya merupakan komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berfungsi mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Proses konversi ini terjadi melalui efek fotovoltaiik, yaitu fenomena pelepasan elektron akibat interaksi foton cahaya dengan material semikonduktor yang memiliki energi lebih besar dari nilai band gap material tersebut [40]. Perbandingan sel surya monokristalin dan polikristalin dapat dilihat pada Gambar 2.5.

Secara struktural, sel surya berbasis silikon tersusun atas sambungan p-n (junction p-n) yang terbentuk dari lapisan semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Medan listrik internal pada daerah deplesi (depletion region) berperan memisahkan

pasangan elektron-hole yang terbentuk akibat paparan cahaya, sehingga menghasilkan arus listrik yang dapat dimanfaatkan pada rangkaian eksternal tanpa melibatkan reaksi kimia seperti pada baterai konvensional [41].

Berdasarkan struktur kristalnya, panel surya umumnya diklasifikasikan menjadi panel monokristalin, polikristalin, dan amorf (thin-film). Panel monokristalin dibuat dari satu kristal silikon utuh dengan orientasi atom yang seragam, sehingga memiliki efisiensi konversi yang relatif lebih tinggi dan performa yang lebih stabil pada kondisi intensitas cahaya rendah, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. Panel jenis ini banyak digunakan pada sistem PLTS dengan keterbatasan luas area dan tuntutan efisiensi tinggi [25].



Gambar 2.6 Panel Jenis Monocrystalline

Panel polikristalin, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.7, tersusun dari banyak butiran kristal (grain boundaries) yang menyebabkan tingkat rekombinasi pembawa muatan lebih tinggi dibandingkan monokristalin. Akibatnya, efisiensi panel polikristalin umumnya lebih rendah, namun memiliki keunggulan dari sisi biaya produksi yang lebih ekonomis.



Gambar 2.7 Panel Jenis Polycrystalline

Sementara itu, panel surya amorf atau thin-film memiliki struktur non-kristalin dengan efisiensi yang lebih rendah, tetapi unggul dari segi fleksibilitas dan bobot yang ringan, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi khusus atau portabel [25][26].

Dalam implementasinya, sel surya dirangkai menjadi modul melalui konfigurasi seri dan paralel. Rangkaian seri digunakan untuk meningkatkan tegangan keluaran, sedangkan rangkaian paralel meningkatkan arus total sistem. Pemilihan konfigurasi disesuaikan dengan kebutuhan beban, kapasitas baterai, serta spesifikasi inverter dan solar charge controller agar sistem bekerja pada titik operasi yang optimal.

Kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti intensitas radiasi, suhu sel, bayangan, dan kebersihan permukaan modul. Kenaikan suhu sel menyebabkan penurunan tegangan keluaran dengan koefisien sekitar $-0,3\%$ hingga $-0,4\%$ per $^{\circ}\text{C}$, sehingga pada iklim tropis diperlukan desain instalasi dengan Ventilasi yang baik untuk menjaga efisiensi panel tetap optimal [25][27].

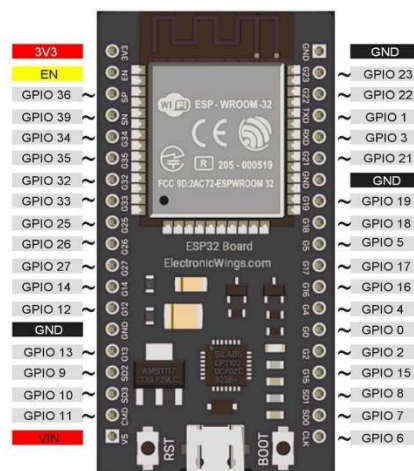
Bayangan parsial dapat menimbulkan ketidakseimbangan arus antar sel dan memicu fenomena hot spot yang berpotensi merusak modul. Untuk mengatasinya, panel dilengkapi dioda bypass yang mengalihkan arus ketika sebagian sel terhalang, sehingga mencegah kerusakan dan mengurangi penurunan daya [28]. Selain itu, akumulasi debu dan kotoran juga dapat menurunkan efisiensi secara

signifikan, sehingga pemeliharaan rutin menjadi faktor penting dalam menjaga performa jangka panjang [27].

Selama masa operasional, modul mengalami degradasi performa akibat pengaruh termal, mekanik, dan lingkungan, dengan laju rata-rata sekitar 0,5%–1% per tahun pada modul silikon kristalin. Fenomena seperti Light-Induced Degradation (LID) dan Potential-Induced Degradation (PID) juga dapat memengaruhi performa awal maupun jangka panjang jika desain sistem dan grounding tidak memadai [27].

Untuk menjamin keandalan dan keselamatan, modul panel surya dirancang dan diuji sesuai standar International Electrotechnical Commission (IEC) seperti IEC 61215 dan IEC 61730, yang mencakup pengujian ketahanan mekanik, termal, serta lingkungan agar modul mampu beroperasi secara aman dan andal dalam jangka panjang [28].

2.2.7.2 Mikrokontroler ESP32



Gambar 2.8 ESP32 DevKit V1 [42]

Mikrokontroler ESP32, seperti yang tampak pada Gambar 2.8, merupakan perangkat embedded system yang dikembangkan oleh Espressif Systems sebagai penerus ESP8266, dirancang untuk aplikasi Internet of Things (IoT), otomasi, dan sistem kendali cerdas dengan performa tinggi serta konsumsi daya rendah. Chip utama ESP32 berbasis prosesor Xtensa LX6 dual-core 32-bit yang beroperasi pada frekuensi clock hingga 240 MHz, dengan kecepatan pemrosesan mencapai

600 DMIPS (Dhrystone Million Instructions Per Second). Dengan arsitektur dual-core tersebut, ESP32 mampu menjalankan proses pembacaan sensor, komunikasi jaringan, dan pengendalian aktuator secara paralel tanpa menimbulkan bottleneck, sehingga sangat sesuai untuk sistem solar tracking dan monitoring energi.

ESP32 dilengkapi RAM internal 520 KB dan flash memory 4–16 MB yang memadai untuk penyimpanan program, buffering data sensor, serta komunikasi berbasis jaringan [11]. Modul ini memiliki Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n terintegrasi pada frekuensi 2,4 GHz dengan kecepatan transfer hingga 150 Mbps, serta Bluetooth 4.2 BLE (Bluetooth Low Energy) dengan jangkauan efektif ± 10 meter indoor, sehingga mendukung komunikasi ke platform monitoring seperti Blynk maupun integrasi perangkat lokal secara nirkabel. Spesifikasi teknis utama ESP32 DevKit V1 dirangkum pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.7 Spesifikasi Teknis ESP32 DevKit V1

Parameter	Parameter
Prosesor	Xtensa LX6 Dual-Core 32-bit
Frekuensi Clock	80 – 240 MHz (adjustable)
Kecepatan Pemrosesan	600 DMIPS
SRAM Internal	520 KB
Flash Memory	4 MB (hingga 16 MB eksternal)
Tegangan Operasi	3,3 V
Tegangan Input (VIN)	5 V (via pin VIN atau USB)
Konsumsi Arus Aktif	80 – 260 mA (Wi-Fi aktif)
Konsumsi Arus Deep Sleep	10 – 150 μ A
Resolusi ADC	12-bit (0–4095)
Jumlah Kanal ADC	18 kanal (ADC1: 8 ch, ADC2: 10 ch)
Resolusi DAC	8-bit, 2 kanal
Kanal PWM	Hingga 16 kanal (LEDC)
GPIO Total	38 pin (DevKit V1)
Protokol Komunikasi	UART, SPI, I ² C, I ² S, CAN
Wi-Fi Standard	IEEE 802.11 b/g/n, 2,4 GHz
Bluetooth	v4.2 BR/EDR + BLE

Parameter	Parameter
Suhu Operasi	-40°C hingga +85°C

Dari sisi antarmuka, ESP32 menyediakan ADC 12-bit dengan 18 kanal analog yang memungkinkan pembacaan sensor LDR secara simultan untuk menentukan arah pergerakan panel surya dual-axis [11]. Resolusi 12-bit menghasilkan 4.096 level diskret (0–4095) dengan tegangan referensi 0–3,3 V, sehingga sensitivitas pembacaan tegangan mencapai $\pm 0,8$ mV per step, cukup presisi untuk mendeteksi perbedaan intensitas cahaya antar-kuadran pada rangkaian LDR. Fitur PWM hingga 16 channel dengan resolusi hingga 16-bit mendukung pengendalian motor stepper, *stepper*, maupun *driver* aktuator, sementara protokol komunikasi seperti UART, SPI, dan I²C memperluas kompatibilitas dengan sensor INA226, RTC DS3231, dan modul lainnya.

Dalam sistem ini, LDR dipasang pada rangkaian pembagi tegangan (voltage divider) dengan resistor referensi 10 k Ω dan dibaca melalui kanal ADC untuk mendeteksi perbedaan intensitas cahaya antar-kuadran. Data tersebut diolah oleh ESP32 menggunakan algoritma kendali untuk mengatur pergerakan motor hingga posisi panel optimal. Pin digital ESP32 juga digunakan untuk mengendalikan relay dan sistem proteksi beban [12].

ESP32 beroperasi pada tegangan 3,3 V dengan konsumsi daya rendah serta mendukung mode light sleep (konsumsi $\sim 0,8$ mA) dan deep sleep (konsumsi 10–150 μ A), yang penting untuk efisiensi energi pada sistem berbasis baterai. Pada implementasi prototipe ini, mode light sleep diaktifkan saat kondisi malam hari atau iradiasi di bawah threshold 50 W/m², sehingga konsumsi daya parasitik kontroler dapat ditekan secara signifikan. Dukungan pemrograman melalui Arduino IDE, PlatformIO, dan ESP-IDF memudahkan implementasi algoritma tracking, kontrol daya adaptif, serta integrasi IoT [10].

Selain itu, ESP32 mendukung fitur keamanan jaringan seperti WPA2 dan enkripsi SSL/TLS, sehingga komunikasi data monitoring tetap aman. Kombinasi performa, konektivitas, fleksibilitas I/O, dan efisiensi daya menjadikan ESP32 DevKit V1 sebagai pusat kendali yang tepat untuk integrasi sensor, aktuator, dan

sistem monitoring pada prototipe PLTS off-grid berbasis solar tracking adaptif [10][15].

2.2.8.2.1 Pemrograman Menggunakan Arduino IDE



Gambar 2.9 Software Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Environment) pada gambar 2.9 adalah perangkat lunak open-source yang dikembangkan oleh Arduino.cc sebagai lingkungan pengembangan resmi untuk memprogram mikrokontroler berbasis platform Arduino maupun mikrokontroler kompatibel lainnya, termasuk ESP32. IDE ini menyediakan antarmuka terpadu yang menggabungkan text editor, compiler, dan uploader ke dalam satu aplikasi, sehingga proses penulisan kode, kompilasi, serta pengunggahan program ke mikrokontroler dapat dilakukan secara terintegrasi tanpa memerlukan perangkat lunak tambahan

Arduino IDE menggunakan bahasa pemrograman berbasis C/C++ yang disederhanakan melalui serangkaian library bawaan (Arduino Core), memungkinkan pengguna termasuk yang belum berpengalaman dalam pemrograman embedded systems untuk mengakses fungsi perangkat keras secara abstrak tanpa harus menulis register-level code secara manual. Struktur program Arduino menggunakan dua fungsi utama, yaitu **setup()** yang dieksekusi sekali saat mikrokontroler dinyalakan, dan **loop()** yang berjalan secara berulang selama perangkat aktif.

Pada implementasi sistem PLTS Off-Grid dengan solar tracking berbasis ESP32, Arduino IDE berperan sebagai platform pengembangan utama yang digunakan untuk menulis algoritma MPPT, logika kontrol dual-axis solar tracker, serta manajemen daya adaptif yang diintegrasikan ke dalam satu firmware terpadu.

Komponen utama antarmuka Arduino IDE ditunjukkan pada Tabel 2.21 berikut.

Tabel 2.8 Komponen Antarmuka Arduino IDE

No	Komponen	Fungsi
1	Menu Bar	Akses ke File, Edit, Sketch, Tools, Help
2	Toolbar	Tombol shortcut: Verify, Upload, New, Open, Save, Serial Monitor
3	Text Editor	Area penulisan kode program (sketch)
4	Output Console	Menampilkan hasil kompilasi, error, dan pesan upload
5	Status Bar	Informasi board terpilih, port COM, dan ukuran sketch
6	Serial Monitor	Komunikasi serial dua arah antara PC dan mikrokontroler
7	Serial Plotter	Visualisasi data serial dalam bentuk grafik real-time
8	Board Manager	Manajemen instalasi board (termasuk ESP32)
9	Library Manager	Instalasi dan manajemen library eksternal

Secara default, Arduino IDE hanya mendukung board Arduino resmi sehingga diperlukan instalasi board package tambahan untuk dapat memprogram ESP32. Proses ini dilakukan melalui Boards Manager dengan terlebih dahulu menambahkan URL repository ESP32 dari Espressif Systems. Langkah pertama adalah membuka menu File → Preferences, kemudian memasukkan URL berikut pada kolom Additional Boards Manager URLs: https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package_esp32_index.json. Setelah URL ditambahkan, buka menu Tools → Board → Boards Manager, ketik "esp32" pada kolom pencarian, kemudian klik

Install pada paket esp32 by Espressif Systems dan tunggu hingga proses unduhan selesai. Setelah instalasi berhasil, pilih board yang sesuai melalui Tools → Board → ESP32 Arduino → ESP32 Dev Module, lalu tentukan port komunikasi yang digunakan melalui Tools → Port sesuai port COM yang terdeteksi saat ESP32 terhubung via USB. Untuk memverifikasi bahwa koneksi antara Arduino IDE dan ESP32 berjalan dengan benar, upload program sederhana seperti sketch Blink sebelum melanjutkan ke penulisan firmware utama.

Library merupakan kumpulan kode siap pakai yang menyediakan fungsi-fungsi spesifik untuk berinteraksi dengan modul atau sensor tertentu tanpa perlu menulis kode dari nol. Pada sistem PLTS off-grid dengan solar tracking dual-axis ini, beberapa library esensial yang digunakan antara lain library INA226 untuk pembacaan sensor daya, RTCLib untuk komunikasi modul RTC DS3231, DHT sensor library untuk sensor suhu dan kelembapan, serta library BlynkSimpleEsp32 untuk komunikasi platform IoT. Arduino IDE menyediakan tiga metode instalasi library yang dapat dipilih sesuai kondisi.

Metode pertama dan paling direkomendasikan adalah melalui Library Manager bawaan Arduino IDE. Buka menu Sketch → Include Library → Manage Libraries, ketikkan nama library yang dibutuhkan pada kolom pencarian, kemudian klik Install pada library yang dikehendaki. Library akan otomatis diunduh, diekstrak, dan langsung tersedia untuk digunakan pada sketch tanpa konfigurasi tambahan.

Metode kedua adalah instalasi manual melalui file ZIP, yang digunakan jika library tidak tersedia di Library Manager atau membutuhkan versi tertentu dari repositori GitHub. Unduh file .zip library dari sumber yang diinginkan, kemudian buka Sketch → Include Library → Add .ZIP Library dan pilih file .zip yang telah diunduh. Arduino IDE akan mengekstrak library tersebut secara otomatis ke folder libraries yang sesuai.

Metode ketiga adalah copy-paste folder secara manual, yang digunakan jika library sudah tersedia dalam bentuk folder yang telah diekstrak. Salin folder library ke direktori C:\Users[username]\Documents\Arduino\libraries\ pada sistem

operasi Windows, kemudian restart Arduino IDE agar library baru terdeteksi dan dapat digunakan pada sketch berikutnya.

Library yang digunakan dalam proyek PLTS Off-Grid berbasis ESP32 ini ditunjukkan pada Tabel 2.3 berikut.

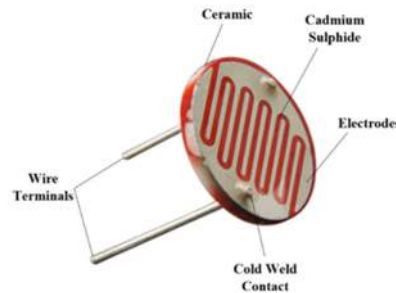
Tabel 2.9 Library pada Arduino IDE

Library	Fungsi dalam Proyek
ESP32Servo.h	Kontrol motor servo untuk mekanisme dual-axis tracking
Wire.h	Komunikasi I2C dengan sensor INA226
Adafruit_INA226.h	Pembacaan arus dan tegangan panel surya secara presisi
WiFi.h	Koneksi ESP32 ke jaringan WiFi untuk monitoring remote
PubSubClient.h	Protokol MQTT untuk transmisi data ke server/dashboard
EEPROM.h	Penyimpanan parameter konfigurasi secara non-volatile
analogWrite.h	Fungsi PWM untuk driver MPPT berbasis buck converter

Dalam konteks pengembangan prototipe PLTS Off-Grid dengan dual-axis solar tracking berbasis ESP32, Arduino IDE menyediakan ekosistem pengembangan yang komprehensif dengan keunggulan sebagai berikut: (1) kemudahan integrasi multi-library untuk sensor, aktuator, dan protokol komunikasi dalam satu codebase; (2) dukungan penuh terhadap fitur-fitur ESP32 seperti dual-core processing, WiFi, dan ADC 12-bit; (3) debugging real-time melalui Serial Monitor yang mempercepat proses validasi algoritma kontrol; serta

(4) komunitas dan dokumentasi yang luas sehingga referensi implementasi mudah ditemukan.

2.2.8.3 Sensor LDR (Light Dependent Resistor)



Gambar 2.10 Sensor Light Dependent Resistor(LDR) [36]

Sensor Light Dependent Resistor (LDR), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.10, merupakan komponen fotokonduktif yang nilai resistansinya berubah secara dinamis sesuai intensitas cahaya yang diterima. Prinsip kerjanya didasarkan pada fenomena fotokonduktivitas, yaitu peningkatan konduktivitas material semikonduktor ketika terpapar foton cahaya, foton dengan energi yang cukup akan mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga jumlah pembawa muatan bebas meningkat dan resistansi material menurun. Pada kondisi gelap, resistansi LDR berada pada kisaran 1–10 M Ω , sedangkan saat terkena cahaya terang resistansinya menurun hingga 100–500 Ω [16].



Gambar 2.11 Simbol Light Dependent Resistor

Material yang umum digunakan adalah cadmium sulfide (CdS) atau cadmium selenide (CdSe), yang memiliki respons spektral pada cahaya tampak. CdS umumnya sensitif pada spektrum hijau–kuning (panjang gelombang 500–600 nm), sehingga cukup representatif untuk mendeteksi intensitas sinar matahari yang memiliki puncak spektrum pada ± 550 nm [17].

Secara simbolis, LDR direpresentasikan dalam skema rangkaian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.11, yaitu simbol resistor standar yang dilengkapi dua anak panah masuk sebagai representasi cahaya yang mengenai komponen. Struktur spiral pada permukaan aktif LDR berfungsi memperluas area tangkapan cahaya (active area) dan meningkatkan sensitivitas deteksi.

Pada sistem ini, digunakan modul LDR 4 pin yang telah terintegrasi dengan komparator LM393 dan potensiometer pengatur sensitivitas, sebagaimana ditunjukkan pada konfigurasi pin Tabel 2.4. Berbeda dengan komponen LDR diskret 2 pin, modul 4 pin ini menyediakan dua jenis keluaran secara bersamaan, keluaran digital (DO) berbasis threshold komparator dan keluaran analog (AO) untuk pembacaan ADC, sehingga memberikan fleksibilitas lebih dalam implementasi algoritma tracking.

Tabel 2.10 Konfigurasi Pin Modul LDR 4 Pin

Pin	Label	Tipe	Deskripsi
1	VCC	Power Input	Suplai tegangan 3,3 V – 5 V
2	GND	Ground	Ground referensi
3	D0	Output Digital	Keluaran komparator LM393, HIGH saat cahaya < threshold, LOW saat cahaya > threshold
4	A0	Output Analog	Keluaran tegangan analog proporsional terhadap intensitas cahaya (0 – VCC)

Ketika nilai error mendekati nol pada kedua sumbu, panel dinyatakan telah berada pada posisi tegak lurus terhadap arah datang radiasi matahari. Perbedaan nilai tersebut diproses oleh mikrokontroler sebagai sinyal error untuk menentukan arah pergerakan motor pada sistem solar tracking dual-axis [18].

Dengan konfigurasi ini, LDR berfungsi sebagai sensor umpan balik sederhana namun efektif dalam menentukan orientasi panel agar mendekati posisi tegak lurus terhadap arah datang radiasi matahari. Dari sisi performa, sistem berbasis LDR mampu merespons perubahan arah cahaya dalam waktu 20–50 ms, dengan akurasi posisi sudut $\pm 2\text{--}5^\circ$ tergantung resolusi ADC dan algoritma *deadband* yang diterapkan. Pendekatan berbasis selisih intensitas ini sesuai untuk

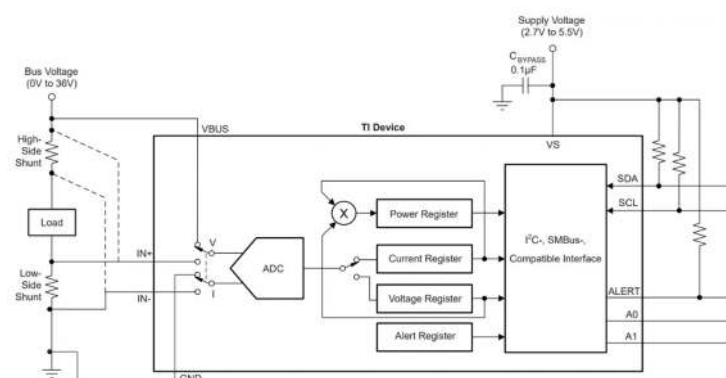
prototipe skala laboratorium karena implementasinya sederhana, responsif, dan ekonomis.

2.2.8.4 Sensor INA226



Gambar 2.12 Modul Sensor INA226 untuk pengukuran Arus dan Tegangan DC [47]

Sensor INA226, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.12, merupakan modul pengukur arus dan tegangan presisi tinggi berbasis IC Power Monitor produksi Texas Instruments yang digunakan untuk memantau parameter kelistrikan pada sistem PLTS off-grid. Sensor INA226 bekerja berdasarkan prinsip current shunt measurement, yaitu mengukur tegangan jatuh pada resistor shunt presisi, kemudian menghitung arus sesuai Hukum Ohm ($I = V_{\text{shunt}} / R_{\text{shunt}}$). Nilai tegangan shunt diperkuat oleh penguat diferensial internal dengan common-mode rejection ratio (CMRR) hingga 120 dB, kemudian dikonversi melalui ADC 16-bit sehingga menghasilkan data digital yang stabil dan minim noise.



Gambar 2. 13 INA226 DC Current Sensor Working Principles & Shunt Resistor

Arsitektur internal INA226 secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 2.13. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa IC ini memiliki dua jalur

pengukuran yang bekerja secara paralel: jalur pertama mengukur tegangan shunt melalui pin IN+ dan IN- untuk menghasilkan data arus, sedangkan jalur kedua mengukur tegangan bus (V_BUS) melalui pin VBUS. Kedua hasil pengukuran ADC kemudian dikalikan secara internal untuk menghasilkan nilai daya, dan seluruh hasil kalkulasi disimpan ke dalam empat register utama Power Register, Current Register, Voltage Register, dan Alert Register yang dapat diakses oleh mikrokontroler melalui antarmuka I²C/SMBus. Pin A0 dan A1 berfungsi sebagai pemilih alamat I²C, memungkinkan hingga 16 modul INA226 terhubung dalam satu bus secara bersamaan.

Spesifikasi teknis utama INA226 dirangkum pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2.11 Spesifikasi Teknis INA226

Parameter	Nilai	Keterangan
Tegangan Supply (VS)	2,7 – 5,5 V	Kompatibel 3,3V & 5V
Tegangan Bus Maksimum	36 V DC	Pengukuran V_{BUS}
Rentang Tegangan Shunt	$\pm 81,92$ mV (default) / ± 320 mV	Tergantung konfigurasi gain
Resolusi ADC	16-bit	Signed, two's complement
LSB Tegangan Shunt	2,5 μ V/bit	Resolusi terkecil
LSB Tegangan Bus	1,25 mV/bit	Resolusi terkecil
Akurasi Tegangan Shunt	$\pm 0,1\%$	Pada suhu 25°C
Akurasi Tegangan Bus	$\pm 0,1\%$	Pada suhu 25°C
Rentang Pengukuran Arus	Bi-directional ($\pm$)	Isi & kuras baterai
Konsumsi Arus Operasi	330 μ A (tipikal)	Mode aktif
Konsumsi Arus Shutdown	2 μ A	Mode power-down
Protokol Komunikasi	I ² C	Standard/Fast mode
Frekuensi I ² C	100 kHz / 400 kHz	Standard / Fast mode
Jumlah Alamat I ² C	16 alamat unik	Konfigurasi pin A0 & A1
Waktu Konversi ADC	140 μ s – 8,244 ms	8 pilihan setting

Parameter	Nilai	Keterangan
Suhu Operasi	-40°C hingga $+85^{\circ}\text{C}$	—

INA226 mampu mengukur tegangan bus hingga 36V DC dan tegangan shunt hingga ± 320 mV, sehingga sesuai untuk sistem baterai 12–24V. Fitur pengukuran arus dua arah (bi-directional) memungkinkan sensor mendeteksi arus saat proses pengisian maupun pengosongan baterai, yang sangat penting dalam sistem manajemen energi. Konfigurasi pin modul INA226 yang digunakan pada prototipe dijabarkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.12 Konfigurasi Pin Modul INA226 (8 Pin)

No.	Pin	Type	Deskripsi
1	IN+	Analog Input (+)	Terminal positif resistor shunt dihubungkan ke sisi sumber arus (output panel / positif baterai)
2	IN–	Analog Input (–)	Terminal negatif resistor shunt dihubungkan ke sisi beban
3	VBS	Analog Input	Bus voltage sense dihubungkan ke titik pengukuran tegangan bus (V_{BUS})
4	ALE	Output Digital	Pin ALERT output sinyal peringatan aktif LOW saat parameter melampaui threshold; dihubungkan ke pin interrupt ESP32
5	SCL	I ² C Clock	Jalur clock I ² C ke ESP32 (GPIO22)
6	SDA	I ² C Data	Jalur data I ² C ke ESP32 (GPIO21)
7	GND	Ground	Ground referensi sistem
8	VCC	Power Input	Suplai tegangan 2,7 – 5,5 V dari pin 3V3 ESP32

Dalam prototipe ini, INA226 menjadi sumber data utama bagi sistem kontrol daya adaptif. Informasi arus dan tegangan baterai digunakan untuk menghitung daya, memantau kondisi pengisian dan pengosongan, serta menjadi dasar penentuan mode operasi berbasis SOC (State of Charge).

2.2.8.5 Sensor DHT22

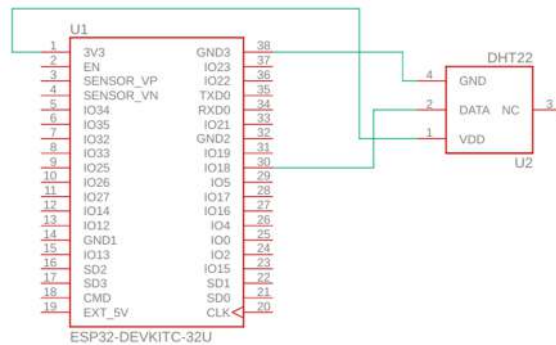


Gambar 2. 14 Sensor DHT22 untuk monitoring kelembapan area [48]

Sensor DHT22, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.14, merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan relatif secara simultan dengan integrasi sederhana dan konsumsi daya rendah, sehingga sesuai untuk sistem monitoring berbasis IoT [30][31]. Sensor ini menggabungkan elemen kelembapan kapasitif berbahan polimer higroskopis dan sensor suhu berbasis termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*) yang dikendalikan oleh mikrokontroler internal 8-bit, sehingga menghasilkan keluaran data digital terkalibrasi melalui satu jalur komunikasi (*single-wire*).

Pengukuran suhu dilakukan melalui perubahan resistansi termistor NTC yang dikonversi menjadi data digital oleh ADC internal 16-bit, sedangkan kelembapan diukur berdasarkan perubahan konstanta dielektrik material polimer kapasitif akibat penyerapan molekul uap air di udara [32][33]. Kapasitansi elemen kelembapan berubah secara proporsional terhadap Relative Humidity (RH) lingkungan, dan perubahan ini dikonversi menjadi nilai digital oleh rangkaian pengkondisi sinyal internal. Akurasi suhu DHT22 sebesar $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dan resolusi $0,1^{\circ}\text{C}$ menjadikannya lebih unggul dibandingkan pendahulunya DHT11 yang hanya memiliki akurasi $\pm 2^{\circ}\text{C}$ dan resolusi 1°C .

Pada sistem ini digunakan modul DHT22 3 pin yang telah dilengkapi resistor pull-up $10\text{ k}\Omega$ onboard pada jalur data, sehingga tidak diperlukan komponen eksternal tambahan untuk antarmuka ke ESP32.



Gambar 2. 15 Skematik Rangkaian DHT22 terhadap ESP32

Koneksi antara ESP32 dan modul DHT22 ditunjukkan pada skematik rangkaian Gambar 2.15. Berdasarkan gambar tersebut, pin VDD modul DHT22 dihubungkan ke pin 3V3 ESP32 (pin 1), pin DATA dihubungkan ke GPIO18 ESP32, dan pin GND dihubungkan ke GND ESP32. Pin ketiga pada modul bertanda NC (Not Connected) dan dibiarkan tidak terhubung. Konfigurasi lengkap pin modul DHT22 dijabarkan pada Tabel 2.7.

Tabel 2.13 Konfigurasi Pin Modul DHT22 3 Pin

No.	Pin	Label	Tip	Deskripsi
1	1	VCC	Power Input	Suplai tegangan 3,3 – 5,5 V DC (dihubungkan ke pin 3V3 ESP32)
2	2	DATA	I/O Digital	Jalur data single-wire bidirectional dihubungkan ke GPIO ESP32 (misal GPIO4); resistor pull-up 10 kΩ sudah terintegrasi pada modul
3	3	GND	Ground	Ground referensi sistem

Dalam prototipe PLTS *off-grid* ini, DHT22 digunakan untuk memantau suhu dan kelembapan lingkungan di dalam *enclosure* sistem kontrol. Data suhu dimanfaatkan sebagai parameter kendali untuk mengaktifkan *mini fan* secara otomatis apabila suhu melampaui threshold yang ditetapkan (umumnya 40–45°C), sehingga mencegah terjadinya *thermal runaway* pada komponen daya seperti modul MPPT dan driver motor. Selain itu, data suhu dan kelembapan dikirimkan ke platform IoT sebagai parameter tambahan dalam

dashboard monitoring, membantu operator memantau kondisi termal sistem secara *real-time* dan meningkatkan keandalan operasi jangka panjang.

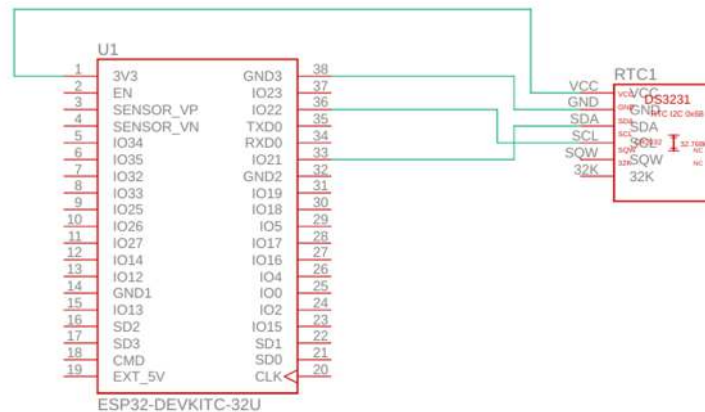
2.2.8.6 RTC DS3231



Gambar 2.16 Modul RTC DS3231 untuk pengaturan waktu sistem

RTC DS3231, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16, merupakan modul Real Time Clock (RTC) berpresisi tinggi yang digunakan untuk pencatatan dan pengendalian waktu secara real-time pada sistem berbasis mikrokontroler. Modul ini memanfaatkan osilator kristal 32,768 kHz dengan Temperature Compensated Crystal Oscillator (TCXO) yang terintegrasi langsung di dalam chip, sehingga frekuensi osilasi tetap stabil meskipun terjadi perubahan suhu lingkungan [34]. Berbeda dengan modul RTC biasa yang menggunakan kristal eksternal, integrasi TCXO pada DS3231 mengeliminasi penyimpangan frekuensi akibat gradien suhu yang umum terjadi pada sistem embedded di luar ruangan. Dengan kompensasi suhu internal, akurasi waktu dapat mencapai ± 2 ppm atau setara dengan ± 1 menit per tahun [35].

DS3231 bekerja pada tegangan 2,3–5,5V DC dengan konsumsi daya sangat rendah dan dilengkapi pin VBAT untuk baterai cadangan tipe CR2032. Fitur ini memungkinkan waktu tetap tersimpan dan berjalan meskipun catu daya utama terputus, dengan konsumsi arus baterai hanya $\sim 3 \mu\text{A}$ sehingga baterai CR2032 kapasitas 220 mAh dapat bertahan hingga beberapa tahun.



Gambar 2.17 Skematik Rangkaian RTC DS3231 terhadap ESP32

Pada prototipe ini, koneksi yang digunakan hanya empat pin utama sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.17. Pin SDA modul DS3231 dihubungkan ke GPIO21 ESP32, pin SCL dihubungkan ke GPIO22 ESP32, pin VCC dihubungkan ke pin 3,3V ESP32, dan pin GND dihubungkan ke GND ESP32. Pin SQW dan 32K tidak digunakan karena fungsi square wave dan sinkronisasi osilator eksternal tidak diperlukan dalam implementasi ini. Konfigurasi lengkap seluruh pin modul DS3231 dijabarkan pada Tabel 2.8.

Tabel 2.14 Konfigurasi Pin Modul RTC DS3231 (6 Pin)

No.	Label	Type	Deskripsi
1	VCC	Power Input	Suplai tegangan 3,3 – 5,5 V DC (dihubungkan ke pin 3V3 atau 5V ESP32)
2	GND	Ground	Ground referensi sistem
3	SDA	I ² C Data	Jalur data I ² C bidirectional dihubungkan ke GPIO21 ESP32; pull-up 4,7 k Ω sudah terintegrasi pada modul
4	SCL	I ² C Clock	Jalur clock I ² C dihubungkan ke GPIO22 ESP32; pull-up 4,7 k Ω sudah terintegrasi pada modul
5	SQW	Output Digital	Output sinyal square-wave (1 Hz / 1,024 kHz / 4,096 kHz / 8,192 kHz) atau sinyal interupsi alarm aktif LOW; dapat dihubungkan ke GPIO interrupt ESP32
6	32K	Output Digital	Output clock 32,768 kHz dari osilator internal;

No.	Label	Tipe	Deskripsi
			digunakan untuk sinkronisasi eksternal (opsional, tidak digunakan pada prototipe ini)

Dalam prototipe PLTS off-grid ini, RTC DS3231 digunakan untuk mengatur logika operasi berbasis waktu, seperti aktivasi tracking pada siang hari, penonaktifan sistem pada malam hari, serta sinkronisasi pencatatan data monitoring. Sebagai contoh implementasi, sistem dikonfigurasi untuk mengaktifkan mode solar tracking pada pukul 06.00–17.00 WIB berdasarkan data waktu DS3231, dan secara otomatis menempatkan panel pada posisi parkir (sudut istirahat) serta mengaktifkan mode deep sleep ESP32 di luar rentang waktu tersebut. Akurasi tinggi ± 2 ppm dan konsumsi daya rendah $\sim 3 \mu\text{A}$ pada mode baterai menjadikan modul ini sesuai untuk sistem energi mandiri berbasis baterai yang memerlukan manajemen waktu presisi tanpa bergantung pada konektivitas internet secara terus-menerus.

2.2.8.7 Driver Motor TB6600



Gambar 2.18 Driver Motor Stepper TB6600

Driver motor TB6600, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.18, merupakan modul pengendali motor stepper bipolar yang mampu menangani arus hingga sekitar 4,0 A (peak) dengan tegangan operasi 9–42V DC. Modul ini dirancang untuk mengendalikan motor stepper 2-fase atau 4-fase dan mendukung teknologi microstepping hingga 1/32 step, sehingga mampu menghasilkan resolusi gerak tinggi (hingga 6400 langkah per putaran untuk motor $1,8^\circ$).

Motor stepper bekerja dengan prinsip pengaktifan kumparan secara bergantian untuk menghasilkan medan magnet yang menggerakkan rotor secara bertahap (step-by-step). Untuk memastikan pergerakan presisi dan stabil, diperlukan pengaturan urutan pulsa (PUL) dan arah putaran (DIR) serta pengendalian arus pada masing-masing fasa. Fungsi tersebut ditangani oleh TB6600 melalui rangkaian penguat daya internal dan sistem pembatas arus (current limiting).

Driver TB6600 memiliki total 12 terminal yang terbagi menjadi dua kelompok: enam terminal sinyal kontrol di sisi kiri dan enam terminal daya serta motor di sisi kanan. Kedua kelompok ini terisolasi secara galvanik melalui optocoupler internal, sehingga aman meskipun tegangan supply motor berbeda signifikan dari tegangan logika kontrol.

Enam terminal sinyal kontrol terdiri dari tiga pasang: PUL+/PUL−, DIR+/DIR−, dan ENA+/ENA−. Setiap pasang terminal menggunakan skema diferensial dengan konfigurasi Active LOW, di mana terminal bertanda (+) dihubungkan ke tegangan referensi 5V, sedangkan terminal bertanda (−) dihubungkan ke pin GPIO ESP32 yang mengirim sinyal logika.

Tabel 2.15 Penggunaan Terminal pada Driver TB6600

No.	Terminal	Hubungkan ke	Logika	Fungsi dalam Sistem
1	PUL+	5V ESP32 (pin VIN)	Referensi	Tegangan referensi sinyal pulsa (Active LOW)
2	PUL−	GPIO13 ESP32	LOW = 1 step	Setiap transisi HIGH→LOW menghasilkan 1 langkah motor. GPIO13 menggantikan GPIO25 yang rusak.
3	DIR+	5V ESP32 (pin VIN)	Referensi	Tegangan referensi sinyal arah (Active LOW)
4	DIR−	GPIO26 ESP32	LOW = CW	LOW = azimuth bergerak searah jarum jam (barat).

No.	Terminal	Hubungkan ke	Logika	Fungsi dalam Sistem
				HIGH = berlawanan (timur).
5	ENA+	5V ESP32 (pin VIN)	Referensi	Tegangan referensi sinyal enable (Active LOW)
6	ENA-	GPIO27 ESP32	LOW = aktif	LOW = motor terkunci dan berenergi (energized). HIGH = motor bebas berputar (tidak dikunci).

Catatan penting: Pin GPIO25 pada ESP32 DevKit V1 yang digunakan pada prototipe ini mengalami kerusakan (stuck HIGH secara permanen), sehingga tidak dapat menghasilkan sinyal pulsa yang valid. Oleh karena itu, fungsi PIN_STEP dialihkan ke GPIO13 yang berfungsi normal. Perubahan ini telah dikonfigurasi pada firmware v6.12 dengan konstanta `#define PIN_STEP 13`.

Motor *stepper* beroperasi dengan cara mengubah pulsa digital menjadi pergerakan mekanis diskrit. Pada mode langkah penuh (*full-step*), motor *stepper* NEMA23 standar memiliki resolusi $1,8^\circ$ per langkah, yang berarti dibutuhkan 200 langkah untuk menyelesaikan satu putaran penuh (360°). Pergerakan langkah penuh ini sering kali menghasilkan getaran mekanis, resonansi, dan pergerakan yang kasar.

Untuk meningkatkan kehalusan gerak dan presisi posisi, digunakan teknik *microstepping*. Teknik ini bekerja melalui *driver* motor (seperti TB6600) yang memodulasi arus ke dalam dua kumparan fase motor secara proporsional, sering kali menggunakan gelombang sinus dan kosinus berundak. Dengan mengatur rasio arus antar fase, rotor dapat ditahan pada posisi menengah di antara dua titik langkah penuh. Pada implementasi sistem ini, konfigurasi *microstepping* ditetapkan pada $1/8$. Konfigurasi ini membagi satu langkah $1,8^\circ$ menjadi 8 bagian yang lebih kecil, sehingga menghasilkan resolusi $0,225^\circ$ per *microstep*. Resolusi tinggi ini dipadukan dengan rasio transmisi mekanis untuk memastikan pergerakan sumbu azimuth panel surya berlangsung sangat halus dan presisi.

2.2.8.8 Motor Stepper NEMA23



Gambar 2.19 Motor Stepper NEMA23

Motor stepper NEMA23, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.19, merupakan aktuator elektromekanik yang digunakan sebagai penggerak sumbu azimuth (horizontal) pada sistem solar tracking dual-axis. Sumbu ini berfungsi mengatur pergerakan panel dari arah timur ke barat mengikuti pergeseran posisi matahari sepanjang hari, sehingga memiliki kontribusi dominan terhadap optimasi sudut datang radiasi.

Motor stepper bekerja berdasarkan prinsip pergerakan sudut diskret, di mana setiap pulsa listrik yang diberikan menghasilkan satu langkah (step) dengan sudut tertentu. Pada tipe standar $1,8^\circ$ per langkah, satu putaran penuh memerlukan 200 langkah. Dengan dukungan teknik microstepping $1/8$ melalui driver TB6600, resolusi sudut ditingkatkan menjadi 1.600 langkah per putaran atau $0,225^\circ$ per step, sehingga pergerakan panel menjadi lebih halus dan presisi.

Tipe NEMA23 dipilih karena memiliki kapasitas torsi lebih besar dibandingkan tipe yang lebih kecil, sehingga mampu menahan beban panel 100 Wp beserta rangka mekaniknya. Torsi tipikal berada pada kisaran 1–2 Nm, cukup untuk mengatasi inersia awal dan beban akibat gaya angin ringan hingga sedang pada prototipe skala laboratorium.

Motor stepper NEMA23 HANPOSE 57HS56-3004 memiliki empat kabel yang merepresentasikan dua kumparan (fase) pada motor bipolar. Keempat kabel ini diberi warna berbeda untuk memudahkan identifikasi fase. Setiap fase terdiri dari dua kabel yang saling berpasangan dan dapat diidentifikasi menggunakan multimeter dengan mengukur resistansi antar terminal.

Tabel 2.16 Instalasi kabel pada NEMA23

No.	Warna Kabel	Nama Terminal	Fase	Hubungkan ke	Fungsi
1	Merah	A+	Fase A	Terminal A+ TB6600	Kumparan Fase A, terminal positif
2	Hijau	A-	Fase A	Terminal A- TB6600	Kumparan Fase A, terminal negatif
3	Kuning	B+	Fase B	Terminal B+ TB6600	Kumparan Fase B, terminal positif
4	Biru	B-	Fase B	Terminal B- TB6600	Kumparan Fase B, terminal negatif

Kabel Merah dan Hijau membentuk satu fase (Fase A), sedangkan Kuning dan Biru membentuk fase lainnya (Fase B). Resistansi yang terukur antara kabel sepasang dalam satu fase adalah sekitar $1,2 \Omega$. Kabel dari fase yang berbeda tidak saling terhubung secara elektrik sehingga multimeter menunjukkan nilai tak terhingga (OL) jika diukur antar fase.

Identifikasi pasangan kabel fase sangat penting dilakukan sebelum menghubungkan motor ke driver TB6600 untuk menghindari kerusakan akibat sambungan yang salah. Berikut prosedur identifikasi menggunakan multimeter:

Tabel 2.17 Prosedur Identifikasi Pasangan Kabel

Langkah	Prosedur	Hasil yang Diharapkan
1	Atur multimeter ke mode Ohmmeter (resistansi), skala 0–20 Ω	Jarum atau angka siap membaca resistansi kecil
2	Tempel probe ke dua kabel mana saja dari keempat kabel motor	Jika menunjukkan $\sim 1,2 \Omega \rightarrow$ kedua kabel adalah satu fase

Langkah	Prosedur	Hasil yang Diharapkan
3	Ulangi untuk semua kombinasi pasangan hingga menemukan dua pasang	Total ada 6 kombinasi dari 4 kabel; hanya 2 yang menunjukkan $\sim 1,2 \Omega$
4	Kabel yang tidak terhubung menunjukkan OL (tak terhingga)	OL berarti kedua kabel dari fase yang berbeda
5	Tandai: pasangan pertama = Fase A (A+/A-), pasangan kedua = Fase B (B+/B-)	Polaritas (+/-) dapat diuji dengan arah putaran shaft

Untuk memverifikasi polaritas dalam satu fase, hubungkan motor sementara ke catu daya DC kecil (1,5V) pada satu fase. Jika shaft bergerak ke arah yang diinginkan, polaritas sudah benar. Untuk membalik arah putaran motor azimuth, cukup tukar sambungan A+ dan A- pada terminal TB6600 tanpa perlu mengubah firmware.

Dalam implementasi sistem ini, motor stepper tidak menanggung beban secara langsung, tetapi diintegrasikan dengan mekanisme transmisi seperti coupling, pulley, atau reduksi mekanis untuk meningkatkan efektivitas torsi dan menjaga stabilitas struktur. Integrasi ini memastikan pergerakan azimuth berlangsung presisi, responsif terhadap pembacaan sensor LDR, serta andal dalam operasi jangka panjang.

2.2.8.9. Linear Actuator



Gambar 2.20 Linear Actuator 12V (900N, Stroke 200mm)

Linear actuator, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.20, merupakan aktuator elektromekanik yang digunakan sebagai penggerak sumbu elevasi pada sistem solar tracking dual-axis. Sumbu elevasi berfungsi mengatur sudut

kemiringan panel terhadap horizon untuk menyesuaikan perubahan sudut ketinggian matahari sepanjang hari maupun Variasi musiman.

Berbeda dengan motor stepper yang menghasilkan gerak rotasi, linear actuator menghasilkan gerak translasi (maju–mundur) secara langsung. Pergerakan linier ini dikonversi menjadi perubahan sudut melalui mekanisme engsel pada rangka panel, sehingga panjang langkah actuator menentukan besar sudut elevasi yang dicapai.

Tipe yang digunakan umumnya berbasis screw-driven mechanism, di mana motor DC internal memutar lead screw untuk mendorong atau menarik batang (rod). Linear actuator hanya memiliki dua kabel karena digerakkan oleh motor DC brushed internal yang tidak membutuhkan urutan fase seperti motor stepper. Arah gerak ditentukan sepenuhnya oleh polaritas tegangan yang diberikan pada kedua kabel tersebut.

Tabel 2.18 Terminal/Kabel dan Fungsinya

No.	Kabel	Warna	Hubungkan ke	Fungsi
1	Positif (+)	Merah	Terminal NO Relay EXTEND / RETRACT	Kutub positif suplai motor DC internal
2	Negatif (-)	Hitam	GND Terminal Block (GND baterai)	Kutub negatif / ground motor DC internal

Keunggulan utama linear actuator tipe ini adalah karakteristik self-locking, yaitu kemampuan mempertahankan posisi tanpa suplai daya kontinu saat berhenti. Fitur ini sangat penting dalam sistem solar tracking karena memungkinkan panel tetap stabil pada sudut tertentu meskipun terdapat beban akibat massa struktur atau hembusan angin.

Karena ESP32 tidak dapat langsung membalik polaritas tegangan 12V untuk mengendalikan arah gerak actuator, sistem menggunakan dua relay elektromekanik (Relay 2CH SONGLE SRD-05VDC) yang dikonfigurasi sebagai H-bridge sederhana. Setiap relay menangani satu arah gerak:

Tabel 2.19 Koneksi Linear Actuator ke Relay 2CH

Channel	GPIO ESP32	Nama Relay	Logika Aktif	Aksi Fisik
CH1	GPIO32	Relay EXTEND	GPIO32 = LOW	Batang memanjang → elevasi NAIK
CH2	GPIO33	Relay RETRACT	GPIO33 = LOW	Batang memendek → elevasi TURUN

Dalam prototipe PLTS 100 Wp ini, linear actuator dipilih dengan kapasitas gaya dorong yang memadai (misalnya ± 900 N) untuk menjamin kestabilan sudut elevasi. Integrasi aktuator dengan sistem kontrol berbasis LDR dan ESP32 memungkinkan penyesuaian sudut elevasi secara otomatis, sehingga optimasi penerimaan radiasi matahari dapat dilakukan secara lebih presisi sepanjang waktu operasi.

2.2.8.10 Solar Charge Controller (MPPT)



Gambar 2.21 Solar Charge Controller tipe MPPT 20A

Solar Charge Controller (SCC) tipe MPPT (Maximum Power Point Tracking), seperti yang terlihat pada Gambar 2.21, merupakan komponen utama dalam sistem PLTS off-grid yang berfungsi mengatur aliran daya dari panel surya ke baterai secara optimal. Pada penelitian ini digunakan SCC tipe MPPT dari seri PowMr Keeper 20A yang memiliki kemampuan pelacakan titik daya maksimum secara otomatis untuk meningkatkan efisiensi konversi energi.

MPPT bekerja berdasarkan karakteristik nonlinier modul fotovoltaik, di mana titik daya maksimum (Maximum Power Point/MPP) berubah-ubah mengikuti kondisi iradiasi matahari dan temperatur lingkungan. Untuk mempertahankan operasi panel pada titik tersebut, SCC secara kontinu melakukan

pengukuran tegangan dan arus panel, kemudian menyesuaikan rasio konversi daya melalui konverter DC–DC internal. Konverter DC–DC pada SCC MPPT umumnya menggunakan topologi buck converter yang dikendalikan melalui sinyal PWM untuk mengatur switching MOSFET, sehingga panel surya dapat tetap beroperasi pada tegangan optimalnya (V_{mp}) meskipun tegangan baterai berbeda.

Berdasarkan spesifikasi teknis dan hasil penelitian terkait, efisiensi SCC MPPT komersial berada pada kisaran 93–98%, dengan peningkatan energi yang dapat diserap mencapai 20–30% dibandingkan SCC tipe PWM konvensional, terutama pada kondisi iradiasi rendah atau saat terjadi ketidaksesuaian tegangan antara panel dan baterai. Selain fungsi optimasi daya, SCC MPPT juga dilengkapi berbagai fitur proteksi seperti overcharge, over-discharge, overcurrent, short circuit, dan reverse polarity. Pada sistem ini, SCC dikonfigurasi untuk mendukung pengisian baterai LiFePO_4 12V dengan profil pengisian CC-CV yang sesuai karakteristik elektrokimia baterai.

SCC MPPT 20A memiliki enam terminal yang terbagi menjadi tiga pasang. Setiap pasang terdiri dari terminal positif (+) dan negatif (–), masing-masing untuk koneksi panel surya, baterai, dan beban.

Tabel 2.20 Terminal SCC dan Jumlahnya

No.	Terminal	Label	Kabel	Hubungkan ke	Fungsi
1	PV+	Panel Input +	MC4 (+) panel	Konektor MC4 positif panel 100Wp	Input daya positif dari panel surya
2	PV–	Panel Input –	MC4 (–) panel	Konektor MC4 negatif panel 100Wp	Input daya negatif dari panel surya
3	BAT+	Battery +	Merah $\geq 4\text{mm}^2$	Terminal (+) Baterai LiFePO_4	Output pengisian positif ke baterai
4	BAT–	Battery –	Hitam	Terminal (–) Baterai	Output

No.	Terminal	Label	Kabel	Hubungkan ke	Fungsi
			$\geq 4\text{mm}^2$	LiFePO ₄	pengisian negatif / ground sistem
5	LOAD+	Load Output +	—	Tidak digunakan langsung	Output ke beban DC bawaan SCC
6	LOAD-	Load Output -	—	Tidak digunakan langsung	Ground output beban bawaan SCC

Pada prototipe ini, terminal LOAD+ dan LOAD- SCC tidak digunakan langsung sebagai sumber beban. Beban DC dikendalikan melalui relay 4CH yang terhubung langsung ke terminal baterai, sehingga sistem kontrol daya adaptif 4 mode berbasis firmware ESP32 bekerja sepenuhnya independen dari fitur load control bawaan SCC. Hal ini dilakukan agar logika threshold tegangan dan hysteresis $\pm 0,1\text{V}$ yang diimplementasikan pada firmware dapat bekerja dengan presisi tanpa interferensi dari proteksi over-discharge bawaan SCC.

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan teknik yang digunakan untuk mengekstraksi daya maksimum dari panel surya di bawah kondisi iradiasi dan suhu yang bervariasi. Salah satu algoritma MPPT yang paling umum dan andal digunakan adalah Perturb and Observe (P&O).

Prinsip kerja algoritma P&O didasarkan pada pemberian gangguan (perturbation) secara berkala pada tegangan operasi panel dan mengamati (observe) dampaknya terhadap daya keluaran. Mikrokontroler akan menghitung perubahan daya (ΔP) dan perubahan tegangan (ΔV) dari waktu ke waktu:

$$\Delta P = P_k - P_{k-1}$$

$$\Delta V = V_k - V_{k-1}$$

Jika hasil $\Delta P > 0$ dan $\Delta V > 0$, berarti titik operasi sedang bergerak mendekati Maximum Power Point (MPP) dari sisi kiri kurva P-V, sehingga algoritma akan terus menaikkan tegangan. Namun, jika $\Delta P < 0$, berarti titik operasi telah melewati MPP, sehingga arah gangguan (perturbasi) harus dibalik

untuk kembali ke titik puncak. Algoritma ini berjalan secara terus-menerus (looping) setiap interval tertentu untuk menjaga efisiensi penyerapan energi pada tingkat tertinggi.

2.2.8.11 Baterai LiFePO₄ 12V



Gambar 2.22 Baterai LiFePO₄ 12V dengan Sistem Battery Management System(BMS)

Baterai LiFePO₄ (Lithium Iron Phosphate), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.22, merupakan media penyimpanan energi utama pada sistem PLTS off-grid ini. Dibandingkan baterai timbal-asam (lead-acid) konvensional yang umum digunakan pada sistem PLTS skala kecil, LiFePO₄ dipilih karena memiliki kurva discharge tegangan yang jauh lebih stabil, siklus hidup yang lebih panjang, serta keamanan termal yang lebih baik.

Setiap sel LiFePO₄ memiliki tegangan nominal 3,2V, sehingga konfigurasi empat sel seri (4S) menghasilkan tegangan sistem 12,8V yang sesuai untuk sistem PLTS 12V. Tegangan pengisian maksimum berada pada kisaran 14,2–14,6V, sedangkan batas bawah pengosongan yang aman berada pada kisaran 10,5–11V. Pada kapasitas 21Ah, energi yang dapat disimpan mencapai sekitar 268 Wh, yang sesuai untuk mendukung beban skala kecil pada sistem PLTS 100 Wp. Karakteristik tegangan yang relatif datar pada rentang 20–90% SoC menjadikan estimasi State of Charge berbasis tegangan lebih akurat dibandingkan baterai lead-acid.

Baterai ini dilengkapi Battery Management System (BMS) 20A yang terintegrasi sebagai sistem proteksi aktif terhadap kondisi overcharge, over-

discharge, overcurrent, dan short circuit, serta menjalankan cell balancing untuk menjaga keseragaman tegangan antar keempat sel. Pada sistem prototipe ini, BMS berfungsi sebagai lapisan proteksi keras (hardware protection), sedangkan firmware v6.12 ESP32 mengimplementasikan proteksi lunak (software protection) melalui sistem kontrol daya adaptif 4 mode berbasis threshold tegangan. Dua lapisan proteksi ini bekerja secara komplementer: firmware ESP32 merespons lebih awal saat tegangan mendekati batas, sedangkan BMS menjadi perlindungan terakhir jika firmware gagal merespons.

Proses pengisian baterai LiFePO₄ menggunakan metode Constant Current–Constant Voltage (CC-CV): pengisian dilakukan dengan arus konstan (CC) hingga tegangan mencapai 14,4V, kemudian dilanjutkan dengan tegangan konstan (CV) hingga arus pengisian menurun secara bertahap mendekati 0. Metode ini ditangani secara otomatis oleh SCC MPPT 20A yang terkonfigurasi untuk profil pengisian LiFePO₄.

Tabel 2.21 Spesifikasi Teknis Baterai LiFePO₄ 12V 21Ah

Parameter	Nilai
Kimia	LiFePO ₄ (Lithium Iron Phosphate)
Konfigurasi Sel	4S (4 sel seri, masing-masing 3,2V nominal)
Tegangan Nominal	12,8 V ($4 \times 3,2V$)
Tegangan Pengisian Penuh (Bulk)	14,2 – 14,6 V
Tegangan Float	13,6 V
Tegangan Minimum Aman	10,5 – 11,0 V
Kapasitas	21 Ah
Energi Tersimpan	~268 Wh ($12,8V \times 21Ah$)
Arus Pengisian Maksimum	20 A (dilindungi BMS)
Arus Discharge Maksimum	20 A (dilindungi BMS)
Siklus Hidup	2.000 – 5.000 siklus (hingga 80% kapasitas)
Efisiensi Charge-Discharge	95 – 98%
Self-Discharge	< 3% per bulan
BMS	20A overcharge, over-discharge, short circuit, cell

Parameter	Nilai
	balancing
Suhu Operasi Pengisian	0°C hingga +45°C
Suhu Operasi Discharge	-20°C hingga +60°C

Baterai LiFePO₄ 12V memiliki dua terminal eksternal yang merupakan output setelah melewati proteksi BMS internal.

Tabel 2.22 Terminal Baterai dan Koneksinya

No.	Terminal	Warna Kabel	Spesifikasi Kabel	Hubungkan ke	Fungsi
1	Positif (+)	Merah	AWG10 / $\geq 4\text{mm}^2$	BAT+ SCC + COM relay 4CH + VCC XL6009	Kutub positif output baterai (via BMS)
2	Negatif (-)	Hitam	AWG10 / $\geq 4\text{mm}^2$	BAT- SCC + GND sistem + GND ESP32	Ground referensi seluruh sistem

Salah satu alasan utama pemilihan LiFePO₄ pada sistem ini adalah kesesuaiannya dengan sistem kontrol daya adaptif berbasis tegangan. Threshold tegangan pada firmware v6.12 ditetapkan berdasarkan karakteristik elektrokimia per sel LiFePO₄ menggunakan rumus:

$$V_{threshold} = n \times V_{sel\ n} = 4 \text{ (jumlah sel seri pada baterai 12V)}$$

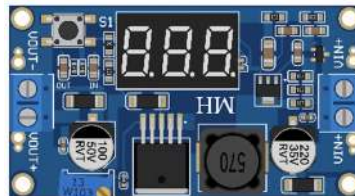
Tabel 2.23 Threshold Tegangan dan Hubungannya dengan Kontrol Daya Adaptif

Mode	Threshold Masuk	Threshold Keluar	Dasar Perhitungan	SoC Est.	Aksi Relay
SURPLUS	$\geq 12,8\text{V}$	$< 12,7\text{V}$	$4 \times 3,200\text{V} = 12,8\text{V}$	$> 70\%$	CH1+CH2+CH3+CH4 ON
NORMAL	$\geq 12,2\text{V}$	$< 12,1\text{V}$	$4 \times 3,050\text{V} = 12,2\text{V}$	40 – 70%	CH1+CH2 ON
HEMAT	$\geq 11,5\text{V}$	$< 11,4\text{V}$	$4 \times 2,875\text{V} = 11,5\text{V}$	15 – 40%	CH1 ON saja
KRITIS	$< 11,5\text{V}$	$\geq 11,5\text{V}$	Di bawah batas aman sel	$< 15\%$	Semua OFF + tracking STOP

Salah satu alasan utama penggunaan baterai *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄) pada sistem *off-grid* adalah karakteristik kurva pelepasan dayanya (*discharge curve*) yang sangat datar dibandingkan dengan baterai *Lead-Acid* atau tipe litium lainnya.

Pada grafik karakteristik *discharge* LiFePO₄, tegangan terminal sel akan turun cukup tajam dari kondisi penuh 100% hingga sekitar 90%. Namun, ketika memasuki rentang kapasitas 90% hingga 20%, tegangan terminal menjadi sangat stabil dan nyaris mendatar (berada di sekitar 3,2V per sel atau 12,8V untuk sistem 4S). Penurunan drastis (*voltage drop*) baru akan terjadi lagi ketika kapasitas baterai tersisa di bawah 15%. Karakteristik *flat curve* ini sangat menguntungkan karena dapat memberikan suplai tegangan yang konsisten ke beban (inverter dan aktuator). Namun, hal ini juga menuntut penggunaan sensor tegangan berpresisi tinggi (seperti ADC 16-bit) untuk mengeksekusi sistem kontrol daya adaptif, karena perbedaan kapasitas baterai yang signifikan hanya direpresentasikan oleh perubahan tegangan dalam skala milivolt.

2.2.8.12 Buck Converter



Gambar 2.23 Modul Buck Converter DC-DC

Buck converter, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.23, merupakan konverter DC–DC tipe step-down yang berfungsi menurunkan tegangan arus searah (DC) dari sumber bertegangan lebih tinggi menjadi tegangan DC yang lebih rendah secara efisien. Pada sistem PLTS off-grid ini, buck converter digunakan secara spesifik untuk menurunkan tegangan baterai LiFePO₄ 12V menjadi 5V DC yang stabil sebagai suplai ESP32 DevKit V1 dan seluruh komponen elektronik sistem kontrol.

Berbeda dengan regulator linier (LDO) yang membuang selisih tegangan sebagai panas dengan efisiensi rendah misalnya dari 12V ke 5V, regulator linier

membuang $7V \times$ arus beban sebagai panas buck converter bekerja menggunakan metode switching berfrekuensi tinggi sehingga efisiensi konversi dapat mencapai 85–92%. Perbedaan efisiensi ini sangat signifikan pada sistem berbasis baterai di mana setiap watt yang terbuang mengurangi net energy gain sistem secara keseluruhan.

Prinsip kerja buck converter melibatkan proses penyaklaran (switching) MOSFET yang dikendalikan oleh sinyal PWM. Ketika MOSFET aktif (ON), arus mengalir dari sumber menuju induktor dan beban; induktor menyimpan energi dalam medan magnet. Ketika MOSFET tidak aktif (OFF), energi yang tersimpan dalam induktor dilepaskan ke beban melalui dioda freewheeling, sehingga aliran arus ke beban tetap berlanjut dan tegangan output tidak turun drastis. Proses ON-OFF ini terjadi ribuan kali per detik menghasilkan tegangan DC yang relatif konstan di output.

Penggunaan buck converter pada sistem ini sangat penting karena tegangan baterai LiFePO₄ 12V tidak konstan bervariasi antara 11,5V (kondisi hampir habis / mode Hemat) hingga 14,6V (kondisi pengisian penuh). Tanpa konverter yang stabil, fluktuasi tegangan sebesar $\pm 3V$ ini dapat menyebabkan ESP32 restart secara tiba-tiba, pembacaan sensor ADC menjadi tidak akurat, dan komunikasi WiFi terputus. Buck converter memastikan ESP32 selalu mendapat tegangan 5V stabil terlepas dari kondisi baterai.

Modul buck converter memiliki empat terminal yang terbagi menjadi dua pasang input dan output, serta satu potensiometer untuk mengatur tegangan output.

Tabel 2.24 Terminal/Pin Modul dan Fungsinya

No.	Terminal	Label	Hubungkan ke	Fungsi dalam Sistem
1	Input Positif	IN+	Terminal (+) Baterai LiFePO ₄ 12V	Suplai daya input 12V dari baterai
2	Input Negatif	IN–	GND Terminal Block (GND baterai)	Ground input referensi
3	Output Positif	OUT+	Pin VIN atau 5V ESP32 DevKit V1	Tegangan 5V stabil ke ESP32

No.	Terminal	Label	Hubungkan ke	Fungsi dalam Sistem
4	Output Negatif	OUT-	GND ESP32 = GND Terminal Block	Ground output (sama dengan GND input)
5	Potensiometer	POT	—	Putar searah jarum jam → Vout TURUN

Pada sistem berbasis baterai seperti PLTS off-grid ini, efisiensi konversi menjadi pertimbangan utama karena setiap watt yang terbuang secara langsung mengurangi net energy gain sistem. Buck converter dengan efisiensi 90% hanya membuang $\sim 0,4\text{W}$ untuk mensuplai ESP32, dibandingkan regulator linier yang bisa membuang hingga $3,5\text{W}$ untuk beban yang sama selisih $3,1\text{W}$ ini setara dengan $\sim 74\text{ Wh}$ selama 24 jam yang tidak perlu terbuang.

2.2.8.13 Boost Converter XL6009



Gambar 2.24 Modul Boost Converter DC-DC berbasis chip XL6009E1

Boost converter DC-DC XL6009, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.24, merupakan konverter tegangan tipe step-up yang berfungsi menaikkan tegangan arus searah (DC) dari sumber bertegangan rendah menjadi tegangan DC yang lebih tinggi sesuai kebutuhan beban. Pada sistem prototipe PLTS off-grid ini, boost converter XL6009 digunakan secara spesifik untuk menaikkan tegangan baterai 12V menjadi 24V DC sebagai suplai tegangan kerja driver motor TB6600.

Kebutuhan boost converter dalam sistem ini muncul dari perbedaan antara tegangan baterai yang tersedia (12V LiFePO₄) dengan tegangan operasi optimal driver TB6600 yang membutuhkan tegangan lebih tinggi agar motor stepper NEMA23 dapat bekerja dengan torsi dan kecepatan respons yang optimal.

Berdasarkan datasheet TB6600HG, tegangan supply motor (VCC) yang lebih tinggi menghasilkan rate of current rise (slew rate) yang lebih cepat pada kumparan motor, sehingga performa tracking pada sudut azimuth lebih responsif.

Berbeda dengan boost converter yang menggunakan regulator linier (LDO) yang membuang selisih tegangan sebagai panas, XL6009 bekerja menggunakan metode switching berfrekuensi tinggi sehingga efisiensi konversi dapat mencapai 85–94%. Hal ini sangat penting pada sistem berbasis baterai di mana setiap watt energi yang terbuang mengurangi net energy gain sistem secara keseluruhan.

Tabel 2.25 Spesifikasi Teknis Boost Converter XL6009

Parameter	Nilai	Keterangan
Chip Utama	XL6009E1 (EXAR / XLSEMI)	IC switching regulator boost mode
Tegangan Input (Vin)	3 – 32 V DC	Kompatibel dengan baterai 12V LiFePO ₄
Tegangan Output (Vout)	5 – 35 V DC (adjustable)	Diatur via potensiometer onboard
Setting pada Sistem Ini	24 V DC	Suplai VCC driver TB6600
Arus Output Maksimum	3 A	Pada kondisi pendinginan memadai
Daya Output Maksimum	~36 W	$3A \times 12V \text{ input} = 36W$ maksimum
Efisiensi Konversi	85 – 94%	Tergantung beban dan perbedaan tegangan
Frekuensi Switching	400 kHz	4× lebih tinggi dari LM2577 (50kHz)
Induktor Onboard	22 μ H	Terintegrasi di PCB modul
Ripple Tegangan Output	< 50 mV (tipikal)	Dengan kapasitor filter onboard
Proteksi	Over-current, over-	Via thermal shutdown internal IC

Parameter	Nilai	Keterangan
	temperature	
Dimensi PCB	$\sim 43 \times 21$ mm	Modul kompak
Potensiometer	Multi-turn (presisi tinggi)	Untuk setting tegangan output

Pemilihan tegangan 24V sebagai output boost converter bukan sembarang pilihan, melainkan didasarkan pada pertimbangan teknis karakteristik motor stepper NEMA23 dan driver TB6600 yang digunakan dalam sistem ini:

Tabel 2.26 Alasan penggunaan 24V untuk Driver TB6600

Aspek	Supply 12V	Supply 24V (digunakan)
Slew rate arus kumparan	Lambat (L/R lebih dominan)	2× lebih cepat → respons posisi lebih baik
Torsi pada kecepatan tinggi	Menurun signifikan	Lebih stabil pada kecepatan tracking
Respon terhadap perubahan arah	Lebih lambat	Lebih responsif untuk koreksi LDR
Panas yang dihasilkan motor	Lebih tinggi (arus lebih lama)	Lebih rendah (arus naik lebih cepat)
Sesuai spesifikasi TB6600	Di bawah optimal (min 9V, optimal >18V)	Dalam rentang optimal TB6600 (9–42V)
Kompatibilitas NEMA23	Boleh, tapi tidak optimal	Optimal untuk torsi dan presisi tracking

Meskipun TB6600 dapat beroperasi dari 9V, motor stepper pada sistem solar tracking membutuhkan respons yang cepat saat melakukan koreksi posisi berdasarkan pembacaan LDR. Dengan 24V, rate of current rise pada kumparan motor menjadi dua kali lebih cepat dibandingkan 12V, menghasilkan akurasi tracking yang lebih baik terutama saat melakukan koreksi kecil (microstepping).

Setting tegangan output boost converter XL6009 dilakukan satu kali saat perakitan sistem menggunakan potensiometer multi-turn yang terpasang onboard.

Prosedur berikut harus dilakukan sebelum boost converter disambungkan ke terminal VCC driver TB6600:

Tabel 2.27 Cara Setting Tegangan Output ke 24V

Langkah	Prosedur	Catatan Penting
1	Sambungkan IN+ ke terminal (+) baterai 12V dan IN- ke GND. JANGAN sambungkan OUT ke TB6600 dulu.	Biarkan output terbuka (no load) saat setting awal
2	Ukur tegangan OUT+ ke OUT- menggunakan multimeter DC.	Pastikan probe merah ke OUT+, probe hitam ke OUT-
3	Putar potensiometer multi-turn searah jarum jam perlahan.	Searah jarum jam = tegangan output NAIK
4	Hentikan saat multimeter menunjukkan tepat 24,0V ($\pm 0,2V$).	Setting presisi penting agar TB6600 tidak over-voltage
5	Putuskan dari baterai, sambungkan OUT+ ke VCC TB6600, OUT- ke GND TB6600.	Pastikan polaritas benar sebelum sambung ke driver
6	Sambungkan kembali ke baterai dan verifikasi tegangan OUTPUT dengan TB6600 terhubung.	Tegangan bisa sedikit turun saat ada beban re-adjust jika perlu

2.2.8.14 Inverter DC-AC



Gambar 2.25 Inverter DC-AC 12V-220V

Inverter DC-AC, seperti yang tampak pada Gambar 2.25, merupakan perangkat elektronika daya yang berfungsi mengubah tegangan arus searah (DC)

dari baterai menjadi arus bolak-balik (AC) untuk menyuplai beban konvensional. Pada sistem PLTS off-grid 100 Wp ini, inverter menjadi antarmuka utama antara baterai LiFePO₄ 12V dan beban AC seperti lampu atau peralatan rumah tangga berdaya kecil.

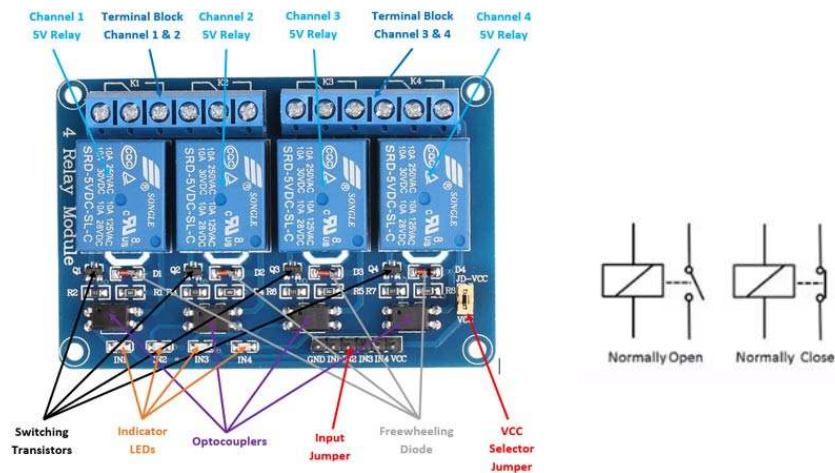
Prinsip kerja inverter didasarkan pada proses switching transistor daya (MOSFET atau IGBT) dalam konfigurasi H-bridge yang membalik polaritas tegangan DC secara periodik sehingga terbentuk gelombang AC. Proses switching dikendalikan menggunakan teknik Pulse Width Modulation (PWM), dan pada inverter tipe pure sine wave digunakan metode Sinusoidal PWM (SPWM) untuk menghasilkan gelombang keluaran mendekati sinus dengan Total Harmonic Distortion (THD) rendah [21].

Berdasarkan bentuk gelombangnya, inverter dibedakan menjadi square wave, modified sine wave, dan pure sine wave. Pada prototipe ini digunakan inverter tipe pure sine wave karena kualitas dayanya lebih stabil dan aman untuk beban induktif maupun perangkat elektronik sensitif. Efisiensi inverter umumnya berada pada kisaran 90–95%, sehingga rugi daya konversi tetap perlu diperhitungkan dalam analisis energi sistem.

Inverter dihubungkan langsung ke terminal positif dan negatif baterai LiFePO₄ 12V sebagai sumber daya utamanya. Koneksi ini dilengkapi dengan fuse atau circuit breaker pada jalur positif sebagai proteksi terhadap arus hubung singkat. Keluaran inverter berupa tegangan AC 220V/50 Hz kemudian didistribusikan ke jalur beban melalui stopkontak atau terminal beban yang terpasang pada panel distribusi.

Dalam sistem kontrol daya adaptif berbasis ESP32, penggunaan inverter dikaitkan dengan kondisi State of Charge (SoC). Pada mode hemat atau kritis, beban AC dapat dibatasi atau dinonaktifkan untuk mengurangi konsumsi daya baterai. Dengan demikian, inverter tidak hanya berfungsi sebagai konverter energi, tetapi juga menjadi bagian dari strategi manajemen energi keseluruhan pada prototipe PLTS off-grid ini.

2.2.8.15 Relay



Gambar 2.26 Modul Relay 5V Empat channel untuk pengaturan beban sistem

Relay, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.26, merupakan saklar elektromekanik yang digunakan untuk menghubungkan dan memutus rangkaian daya menggunakan sinyal kontrol berarus kecil. Pada sistem PLTS off-grid berbasis ESP32, relay berfungsi sebagai aktuator pengendali beban sesuai dengan logika sistem kontrol daya adaptif. Komponen utama sebuah relay terdiri atas kumparan (coil) elektromagnet, armature berpegas, dan kontak saklar yang terdiri dari terminal Common (COM), Normally Open (NO), dan Normally Closed (NC). Spesifikasi teknis modul relay 5V 4-channel yang digunakan pada prototipe ini dirangkum pada Tabel 2.22.

Tabel 2.28 Spesifikasi Teknis Modul Relay 5V 4-Channel

Parameter	Nilai	Keterangan
Tegangan Kontrol Coil	5 V DC	Dikendalikan dari pin 5V atau VIN ESP32
Arus Operasi Coil	70 – 90 mA per channel	Saat relay aktif (energized)
Tegangan Kontrol Sinyal IN	3,3 V – 5 V	Kompatibel langsung dengan GPIO ESP32 3,3V
Logika Aktif	Active LOW (default modul)	IN = LOW → relay ON; IN = HIGH → relay OFF
Kemampuan Switching AC	10 A / 250V AC	Beban AC maksimum

Parameter	Nilai	Keterangan
Kemampuan Switching DC	10 A / 30V DC	Beban DC maksimum
Kemampuan Switching DC (12V)	10 A / 12V DC	Sesuai sistem baterai 12V
Waktu Pull-in (ON)	~10 ms	Waktu relay menutup kontak
Waktu Release (OFF)	~5 ms	Waktu relay membuka kontak
Isolasi Galvanik	Ada (optocoupler)	Pemisahan sirkuit kontrol & daya
Proteksi Flyback	Dioda flyback onboard	Meredam tegangan back-EMF coil
Jumlah Channel	4 channel independen	Dapat dikontrol terpisah
LED Indikator	4 LED per channel	Indikator status ON/OFF tiap relay
Suhu Operasi	-40°C hingga +85°C	—

Ketika relay digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan beban induktif, fenomena back-EMF (Electromotive Force balik) menjadi pertimbangan perlindungan yang kritis. Beban induktif seperti motor, kumparan selenoid, atau trafo menyimpan energi dalam medan magnetnya; ketika sirkuit diputus secara tiba-tiba, energi tersimpan harus dilepaskan, menghasilkan lonjakan tegangan (voltage spike) yang dapat mencapai beberapa ratus Volt dalam waktu singkat. Lonjakan ini berpotensi merusak kontak relay, semikonduktor di jalur sinyal, dan mikrokontroler ESP32. Untuk mencegah kerusakan ini, modul relay 5V 4-channel yang digunakan telah dilengkapi dioda flyback (freewheeling diode) onboard yang terpasang secara antiparalel terhadap koil relay, sehingga lonjakan back-EMF dari koil dialihkan melalui dioda dan tidak merambat ke jalur kontrol ESP32 [21].

Dalam sistem ini, relay juga menghadapi tantangan dari sisi beban motor stepper dan linear actuator yang memiliki karakteristik arus transien tinggi pada saat starting (in-rush current). In-rush current motor DC dapat mencapai 5–10 kali arus nominal selama beberapa milidetik pertama, sehingga relay yang memiliki rating arus nominal 10A sebenarnya menghadapi beban transien yang jauh lebih

besar. Pemilihan relay dengan rating arus yang memiliki margin aman (10A untuk beban nominal 0,5–1A) memberikan derating yang cukup untuk menangani kondisi transien ini tanpa menyebabkan welding pada kontak relay. Welding adalah kondisi di mana kontak relay melekat secara permanen akibat percikan busur api (arcing) yang terjadi ketika arus transien tinggi diputus, dan ini merupakan mode kegagalan yang umum pada relay yang dioperasikan melebihi ratingnya [21].

Mekanisme interlocking yang diimplementasikan pada firmware v6.12 untuk linear actuator sumbu elevasi merupakan perlindungan tambahan terhadap kondisi shoot-through, yaitu kondisi di mana kedua relay polaritas maju (EXTEND) dan mundur (RETRACT) aktif secara bersamaan yang akan menyebabkan hubung singkat langsung pada terminal baterai. Dalam firmware, sebelum mengaktifkan salah satu relay, sistem terlebih dahulu memverifikasi dan memastikan relay yang berlawanan dalam kondisi non-aktif, dengan delay minimal 20 ms antara deaktivasi relay satu dan aktivasi relay lainnya. Delay ini memberikan waktu bagi kontak relay untuk sepenuhnya terbuka (waktu release ~5 ms) sebelum relay lain menutup, sehingga tidak ada kondisi overlap yang menyebabkan hubung singkat [44].

Prinsip kerja relay didasarkan pada medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh kumparan (coil) ketika dialiri arus sebesar 70–90 mA. Medan magnet ini menarik armature logam sehingga kontak berpindah dari posisi Normally Open (NO) ke kondisi tertutup (terhubung ke COM), atau sebaliknya dari Normally Closed (NC) ke terbuka. Saat arus kumparan dihentikan, energi pegas internal mengembalikan armature dan kontak ke posisi semula dengan waktu release ~5 ms.

Dengan integrasi ini, relay menjadi komponen penting dalam strategi manajemen energi yang menjaga kestabilan suplai daya serta memperpanjang umur baterai pada sistem PLTS off-grid 100 Wp. Waktu respons switching relay ~10 ms (pull-in) dinilai memadai untuk skenario pengendalian beban pada sistem ini, di mana perubahan kondisi SOC terjadi dalam skala menit hingga jam.

Pengendalian putaran dua arah pada motor arus searah atau pergerakan maju-mundur pada linear actuator memerlukan perubahan polaritas tegangan. Hal ini diwujudkan menggunakan konfigurasi H-Bridge elektromekanik yang terdiri dari dua buah relay. Namun, konfigurasi ini memiliki risiko kegagalan perangkat keras yang fatal: jika relay untuk arah maju (extend) dan arah mundur (retract) aktif secara bersamaan, akan terjadi hubung singkat (short circuit) langsung antara terminal positif dan negatif dari catu daya.

Untuk mencegah kondisi hubung singkat tersebut, diterapkan mekanisme pengamanan yang disebut interlocking. Interlocking perangkat lunak diimplementasikan di dalam mikrokontroler dengan memberikan batasan logika (mutual exclusion). Sebelum program mengirimkan sinyal HIGH ke salah satu pin relay, sistem wajib memverifikasi dan memaksa pin relay lawan untuk berada pada kondisi LOW. Mekanisme ini menjamin bahwa secara logis dan elektrik, kedua relay pada linear actuator sumbu elevasi tidak akan pernah berada dalam kondisi aktif secara bersamaan, sehingga keamanan catu daya dan aktuator tetap terjamin selama operasi pelacakan.

2.2.8.16 Aplikasi Blynk (Monitoring IoT)



Gambar 2.27 Software Blynk

Blynk, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.27, merupakan platform Internet of Things (IoT) berbasis cloud yang dirancang untuk mempermudah integrasi antara perangkat mikrokontroler dan aplikasi monitoring berbasis mobile maupun web. Platform ini memungkinkan perangkat seperti ESP32 untuk mengirim, menerima, dan menampilkan data secara real-time melalui koneksi internet tanpa memerlukan pengembangan server backend secara mandiri.

Platform Blynk dikembangkan oleh Blynk Inc. dan mendukung berbagai mikrokontroler populer seperti ESP32, ESP8266, Arduino, dan Raspberry Pi.

Arsitektur sistem Blynk terdiri dari tiga komponen utama: Blynk Application sebagai antarmuka pengguna berbasis mobile dan web, Blynk Cloud sebagai pusat komunikasi dan penyimpanan data, serta Blynk Library yang ditanamkan pada firmware mikrokontroler. Model komunikasi client-server ini memungkinkan pertukaran data berlangsung secara aman dan real-time tanpa perlu membangun sistem backend tersendiri.

Komunikasi antara ESP32 dan server Blynk berlangsung melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol TCP/IP dengan enkripsi SSL/TLS. Data dikirim secara periodik memanfaatkan mekanisme virtual pin pada Blynk Library menggunakan fungsi `Blynk.virtualWrite(Vx, nilai)`, sehingga setiap perubahan nilai sensor langsung diperbarui pada dashboard. Komunikasi bersifat dua arah ESP32 tidak hanya mengirim data sensor ke cloud, tetapi juga dapat menerima perintah dari pengguna melalui widget tombol atau slider untuk mengaktifkan beban, mengubah parameter sistem, atau memantau kondisi darurat secara jarak jauh.

Keamanan sistem dijaga melalui authentication token unik per perangkat yang dikonfigurasi pada firmware ESP32. Token ini memastikan hanya pengguna yang berhak yang dapat mengakses dan mengendalikan perangkat. Selain itu, Blynk mendukung pembaruan firmware jarak jauh (Over-The-Air/OTA Update) sehingga perbaikan firmware dapat dilakukan tanpa membuka perangkat secara fisik.

Implementasi Blynk pada firmware v6.12 memerlukan tiga elemen konfigurasi utama yang harus didefinisikan sebelum kompilasi:

```
// Konfigurasi identitas perangkat Blynk
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPLxxxxxxxx"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "PLTS Solar Tracker"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx"
// Konfigurasi jaringan WiFi
char ssid[] = "NamaWiFi";
char pass[] = "PasswordWiFi";
// Inisialisasi koneksi di setup()
Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass);
// Pengiriman data di loop() via timer (non-blocking)
```

```
// Contoh pengiriman tegangan baterai ke V0:
Blynk.virtualWrite(V0, vbat);
// Contoh pengiriman mode operasi ke V11:
Blynk.virtualWrite(V11, "SURPLUS");
// Contoh LED indicator relay CH1 ke V12:
Blynk.virtualWrite(V12, ch1State ? 255 : 0);
```

Blynk IoT dipilih pada penelitian ini karena kemudahan implementasi yang tinggi, dukungan aplikasi mobile resmi yang lengkap, komunikasi dua arah yang memungkinkan kendali jarak jauh, serta waktu development yang singkat sangat sesuai untuk kebutuhan prototipe skala laboratorium yang membutuhkan monitoring dan kontrol yang fungsional dalam waktu terbatas.

2.2.8.17 Google Spreadsheet



Gambar 2.28 Google Spreadsheet untuk Data Logger

Google Spreadsheet pada gambar 2.28 merupakan aplikasi pengolahan data berbasis cloud yang dikembangkan oleh Google sebagai bagian dari ekosistem Google Workspace. Berbeda dari spreadsheet konvensional yang berjalan secara lokal, Google Spreadsheet beroperasi sepenuhnya di server Google dan dapat diakses melalui browser maupun Application Programming Interface (API) tanpa memerlukan instalasi perangkat lunak tambahan. Karakteristik ini menjadikannya platform yang relevan untuk kebutuhan datalogging pada sistem Internet of Things (IoT), khususnya pada aplikasi monitoring energi berbasis mikrokontroler seperti ESP32 [51].

Dalam konteks sistem PLTS off-grid dengan solar tracking dual-axis, Google Spreadsheet berfungsi sebagai database time-series yang menyimpan data

operasional sistem secara otomatis dan terstruktur. Data yang dicatat meliputi tegangan baterai, arus pengisian, daya panel, posisi azimuth dan elevasi panel, serta mode operasi sistem (Surplus, Normal, Hemat, atau Kritis). Pencatatan dilakukan secara periodik dengan interval yang dapat dikonfigurasi sesuai kebutuhan analisis, misalnya setiap 10 detik hingga 1 menit, sehingga rekam jejak performa sistem tersedia dalam resolusi tinggi untuk evaluasi pengujian [52].

Alur kerja komunikasi antara ESP32 dan Google Sheets berlangsung melalui beberapa tahap secara berurutan. Pertama, ESP32 membangun koneksi WiFi menggunakan library WiFi.h kemudian membuat objek HTTPClient untuk membentuk HTTP GET request. Data sensor dikirimkan sebagai parameter yang disematkan langsung pada URL endpoint, misalnya [https://script.google.com/macros/s/\[SCRIPT_ID\]/exec?tegangan=12.4&arus=2.1&daya=25.8&mode=Normal](https://script.google.com/macros/s/[SCRIPT_ID]/exec?tegangan=12.4&arus=2.1&daya=25.8&mode=Normal), sehingga seluruh nilai parameter terkirim dalam satu request tanpa membutuhkan format data tambahan seperti JSON atau XML.

Google Apps Script kemudian menerima request tersebut melalui fungsi doGet(e), mem-parsing setiap parameter yang dikirim, lalu menuliskannya ke baris baru pada spreadsheet menggunakan method appendRow(). Timestamp waktu pencatatan ditambahkan secara otomatis oleh skrip pada setiap baris data menggunakan referensi waktu server Google, sehingga setiap rekaman memiliki keterangan waktu yang akurat dan konsisten tanpa bergantung pada akurasi jam lokal ESP32.

Pendekatan berbasis Google Apps Script dipilih karena menawarkan beberapa keunggulan praktis dibandingkan alternatif lain seperti server MQTT mandiri atau database cloud berbayar. Arsitektur ini tidak memerlukan server intermediary tambahan sehingga mengurangi kompleksitas infrastruktur dan menghilangkan biaya operasional server. Data yang tersimpan dapat divisualisasikan langsung dalam bentuk grafik bawaan Google Spreadsheet tanpa perlu tools tambahan, serta tersedia fitur berbagi dan kolaborasi real-time yang memungkinkan pemantauan oleh lebih dari satu pengguna secara bersamaan dari perangkat manapun.

Latensi transmisi data pada jaringan WiFi lokal yang stabil umumnya berkisar antara 200 hingga 800 ms per request. Dengan interval pengiriman setiap 10 menit yang diimplementasikan pada firmware v6.12, overhead komunikasi ini tidak berdampak signifikan terhadap kinerja sistem secara keseluruhan, dan pengiriman dilakukan secara asinkron menggunakan timer berbasis `millis()` sehingga loop utama tracking dan kontrol daya tidak pernah terganggu oleh proses transmisi data.