

RANCANG BANGUN SISTEM SOLAR TRACKER DUA SUMBU DENGAN MODE KENDALI OTOMATIS DAN MANUAL BERBASIS APLIKASI BLYNK

Irfan Akbar khoiri; Ir. Pratomo Budi Santosa, M. T

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem *solar tracker* dua sumbu berbasis mikrokontroler ESP32 guna mewujudkan fleksibilitas kendali posisi panel surya secara dinamis, baik melalui mode otomatis maupun manual berbasis platform *Internet of Things* (IoT) Blynk. Sistem otomatis memanfaatkan karakteristik empat sensor *Light Dependent Resistor* (LDR) untuk melacak arah datangnya cahaya matahari secara *real-time*, sedangkan kendali manual terintegrasi untuk kebutuhan pemeliharaan fisik dari jarak jauh. Pengujian mode otomatis menunjukkan sistem berhasil mengarahkan panel mengikuti pergerakan matahari dari timur (sudut 18° – 22°) hingga barat (sudut 149° – 160°), dengan pola parabola vertikal yang mencapai puncak elevasi pada pukul 12.00 WIB (sudut 48° – 56°) saat intensitas cahaya melebihi 105.000 Lux. Pada kendali manual, translasi data dari *widget slider* Blynk via *driver* PCA9685 berjalan presisi, meskipun terdapat selisih sudut aktual 1° hingga 5° akibat struktur penopang poros yang kurang kaku. Hasil analisis daya membuktikan bahwa penggunaan *solar tracker* mampu menghasilkan energi yang jauh lebih optimal dibandingkan panel statis, dengan total produksi harian mencapai 252,94 Wh berbanding 181,65 Wh. Keunggulan ini memberikan surplus energi panen sebesar +71,29 Wh (+39,24%). Setelah dikurangi konsumsi daya alat sebesar 5,88 Wh, sistem ini mencatatkan *Net Energy Gain* positif sebesar +65,41 Wh, yang secara murni meningkatkan pasokan energi bersih sebesar +36,01% sehingga terbukti sangat efektif dan menguntungkan.

Kata Kunci: *Solar tracker* Dua Sumbu, Aplikasi Blynk, Sensor LDR, Mode Manual dan otomatis.

Abstract

This study aims to design and implement an ESP32 microcontroller-based dual-axis solar tracker system to achieve dynamic control over solar panel positioning, utilizing both automatic and manual modes via the Blynk Internet of Things (IoT) platform. The automatic system employs four Light Dependent Resistor (LDR) sensors to track the direction of sunlight in real-time, while manual control is integrated to facilitate remote physical maintenance. Testing of the automatic mode demonstrated the system's success in orienting the panel to follow the sun's movement from east (18° – 22° angle) to west (149° – 160° angle), tracing a vertical parabolic path that reached peak elevation at 12:00 WIB (48° – 56° angle) when light intensity exceeded 105,000 Lux. Regarding manual control, data translation from the Blynk slider widget via the PCA9685 driver operated precisely, although an actual angular deviation of 1° to 5° was observed due to insufficient rigidity in the shaft support structure. Power analysis results confirm that the solar tracker generates significantly more optimal energy compared to a static panel, with a total daily production of 252.94 Wh versus 181.65 Wh. This advantage yields an energy harvest surplus of +71.29 Wh (+39.24%). After deducting the system's own power consumption of 5.88 Wh, the system achieved a positive Net Energy Gain of +65.41 Wh, representing a net energy supply increase of +36.01%, thereby proving the system to be highly effective and advantageous.

Keywords: *Solar tracker, Blynk application, LDR sensor, manual and automatic modes.*

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar karena letak geografisnya yang berada di garis khatulistiwa, sehingga intensitas radiasi matahari relatif tinggi sepanjang tahun (Niwanda et al., 2025). Namun, tingkat adopsi teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk skala domestik atau rumah tangga saat ini masih tergolong rendah. Ketika masyarakat memilih untuk menerapkan PLTS, mayoritas instalasi panel surya yang digunakan di lapangan masih dipasang secara statis atau dengan posisi tetap. Pilihan terhadap sistem statis ini umumnya didasari oleh faktor kesederhanaan struktur, biaya instalasi yang murah, serta bebas dari perawatan mekanis yang rumit, meskipun secara teknis permukaan fotovoltaik tidak dapat menyerap energi secara maksimal sepanjang hari karena arah datangnya sinar matahari yang terus berubah setiap waktu (Saragih et al., 2024).

Penggunaan teknologi pelacak matahari (*solar tracker*) sebenarnya dapat dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dari posisi panel yang statis tersebut (Niwanda et al., 2025). Namun, sistem *solar tracker* otomatis penuh yang ada saat ini masih memiliki keterbatasan operasional di mata pengguna awam karena sifat kendalinya yang kaku. Ketergantungan mutlak pada mode otomatis penuh sering kali membuat sistem kehilangan arah ketika terjadi anomali cuaca mendung pekat yang mengaburkan pembacaan sensor, atau saat instrumen luar ruangan mengalami kendala teknis (Hasrul, 2021). Pada kondisi cuaca buruk tersebut, pengguna tidak memiliki kemampuan atau akses untuk mengintervensi posisi panel secara praktis demi alasan keamanan alat maupun pemeliharaan fisik.

Berangkat dari batasan operasional tersebut, penelitian ini dilakukan dengan berfokus penuh pada aspek rancang bangun mekatronika dan sistem kendali posisi dari *solar tracker* dua sumbu (*dual-axis*) berbasis mikrokontroler ESP32 dengan mengintegrasikan fungsionalitas ganda (Hidayati et al., 2020). Penelitian ini secara sengaja membatasi diri untuk tidak menitikberatkan pada analisis komparatif performa penyerapan daya atau efisiensi energi surya secara mendalam, melainkan berfokus pada keberhasilan realisasi mekanik, pergerakan sudut pelacaknya, serta fungsionalitas program kendalinya. Pada mode otomatis, sistem ini memanfaatkan karakteristik sensor *Light Dependent Resistor* (LDR) yang sensitif terhadap perubahan intensitas cahaya, sehingga mikrokontroler dapat menginstruksikan motor penggerak untuk mengarahkan panel surya pada sumbu horizontal dan vertikal secara *real-time* (Faris Hamidin & Syafiq Sadun, 2023). Meskipun fokus utama berada pada fungsionalitas kendali, penelitian ini juga mengkaji pembebanan daya sistem secara objektif. Pengukuran konsumsi daya pada sisi AC inverter dan adaptor penting dilakukan guna memastikan bahwa energi operasional mikrokontroler serta motor servo tidak melebihi surplus daya hasil pelacakan, sehingga performa mekanis yang dihasilkan tidak menjadi sia-sia.

Sebagai aspek kebaruan dan pembeda utama dari penelitian-penelitian terdahulu yang mayoritas menggunakan sistem otomatis murni, dalam sistem ini diintegrasikan platform *Internet of Things* (IoT) Blynk melalui koneksi nirkabel (Karjadi, 2025). Penambahan fitur Blynk ini secara khusus bertujuan untuk menyediakan fungsionalitas kendali manual yang interaktif melalui pemanfaatan *widget Slider* virtual pada aplikasi *smartphone*. Ketika mode manual diaktifkan, pengguna diberikan hak intervensi penuh untuk mengirimkan data parameter sudut baru. Mikrokontroler ESP32 selanjutnya akan memproses data input tersebut dan mentranslasikannya menjadi sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) berfrekuensi 50 Hz melalui modul *driver* PCA9685 untuk mengendalikan pergerakan putaran motor servo secara spesifik dan halus. Mekanisme kendali manual nirkabel ini menjadi solusi alternatif yang praktis bagi pengguna skala rumah tangga agar posisi sudut horizontal maupun vertikal panel dapat diatur secara presisi kapan pun dibutuhkan, tanpa harus bergantung pada kondisi cuaca maupun pembacaan sensor LDR di lokasi fisik alat.

2. METODE

2.1. Analisis Kebutuhan Sistem

Penelitian ini diawali dengan adanya permasalahan pada sistem pemanfaatan energi surya yang belum optimal akibat keterbatasan pengaturan posisi panel surya secara dinamis. Panel surya yang tidak dapat menyesuaikan arah datangnya cahaya secara otomatis maupun manual menyebabkan sistem kurang fleksibel dalam berbagai kondisi operasional, seperti proses kalibrasi, perawatan, maupun penyesuaian sudut tertentu sesuai kebutuhan pengguna (Alhamzani & Ibrohim Burhan, 2025).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk merancang dan membangun sistem *solar tracker* dua sumbu berbasis mikrokontroler ESP32 yang memiliki dua mode operasi, yaitu mode otomatis menggunakan sensor LDR dan mode manual menggunakan aplikasi Blynk untuk pengaturan sudut panel. penelitian ini juga memfokuskan analisis pada aspek net energi guna mengevaluasi efisiensi daya riil dari sistem pelacak yang dibuat. Pengujian dilakukan dengan membandingkan produksi daya panel solar tracker terhadap panel statis, serta mengukur konsumsi daya total pada sisi kontroler, motor servo, dan rugi-rugi daya pada inverter. Langkah ini krusial untuk membuktikan secara empiris bahwa penambahan sistem mekanis pelacak matahari mampu menghasilkan surplus energi bersih bagi baterai dan tidak berakhir sia-sia akibat konsumsi operasional alat. Tahap awal penelitian dimulai dengan melakukan analisis terhadap kebutuhan komponen, baik perangkat keras maupun perangkat lunak, serta studi literatur untuk memperoleh referensi terkait sistem *solar tracker*, sensor LDR, lampu indikator LED, motor servo, serta sistem kendali berbasis ESP32 dan

komunikasi *Internet of Things* (IoT). Rincian mengenai spesifikasi alat dan bahan yang telah dianalisis tersebut dirangkum secara mendetail pada Tabel 1.

Tabel 1. Daftar Alat dan Bahan Perangkat Keras serta Perangkat Lunak

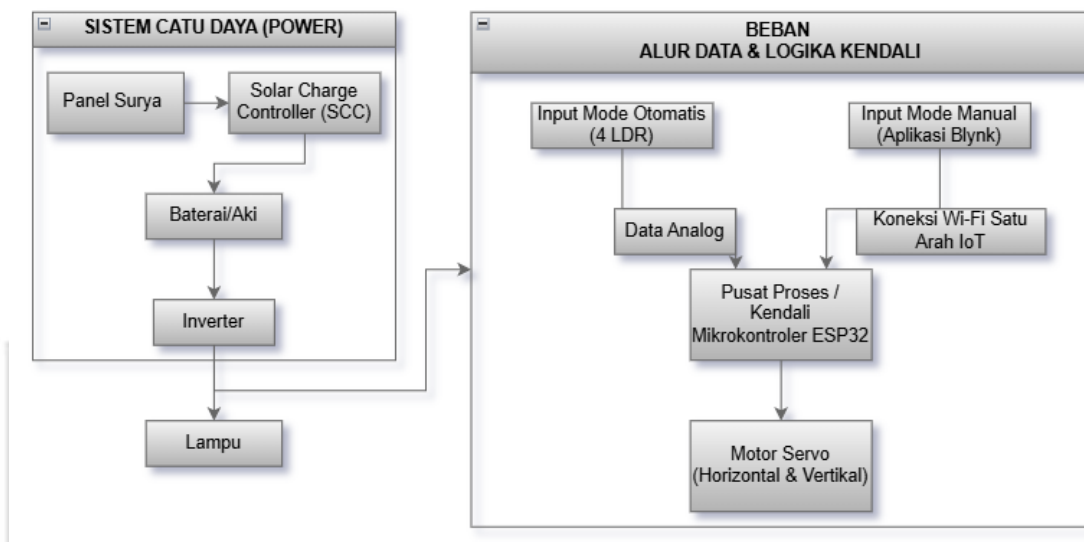
Alat dan Bahan	Jumlah
ESP-32S	1
<i>Servo Driver</i> I2C PCA9685	1
<i>Digital Servo</i> DS3225MG 25 KG	2
Sensor LDR	4
PCB polos	1
<i>Box control</i>	1
Panel Surya 20 WP	1
Inverter 1000 W	1
<i>Solar Charge Controller</i> (SCC)	1
Baterai (Aki)	1
kerangka besi	1
Saklar	2
Lampu LED	1
Adaptor	1

2.2. Perancangan Perangkat Keras (*Hardware Design*)

Tahapan perancangan perangkat keras (*hardware*) difokuskan pada pemetaan fungsional dan integrasi kelistrikan antar komponen elektronik yang telah dipilih pada tahap analisis kebutuhan. Pada penelitian ini, perancangan perangkat keras dibatasi khusus pada aspek sistem kontrol elektronik serta jalur distribusi daya, tanpa melibatkan kalkulasi struktur mekanik fabrikasi. Implementasi perancangan ini dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu visualisasi makro hubungan antar-elemen melalui blok diagram sistem, serta visualisasi mikro koneksi pin antar-komponen melalui skematik rangkaian elektronika. Visualisasi hubungan antar-elemen melalui blok diagram sistem, serta visualisasi koneksi pin antar-komponen melalui skematik rangkaian. Fokus utama dalam perancangan jalur distribusi daya ini mencakup analisis aliran energi dari baterai 12V yang dikonversi oleh inverter 1000W menjadi tegangan AC 220V, untuk kemudian diturunkan kembali menjadi DC 5V menggunakan adaptor pengisi daya 67W guna menyuplai ESP32 dan modul *driver* PCA9685. Struktur konfigurasi daya ganda ini dirancang secara khusus agar parameter konsumsi dayanya dapat diukur pada sisi AC menggunakan perangkat Power Meter. Langkah pengujian kelistrikan ini diintegrasikan ke dalam skematik rangkaian untuk

mempermudah pemetaan titik ukur (test point) arus dan tegangan, baik pada output panel surya 20 WP maupun pada beban motor servo DS3225MG, sehingga evaluasi efisiensi energi bersih (Net Energy Gain) dapat dianalisis secara akurat.

2.2.1. Blok Diagram Sistem



Gambar 1. Blok diagram sistem catu daya dan *solar tracker*

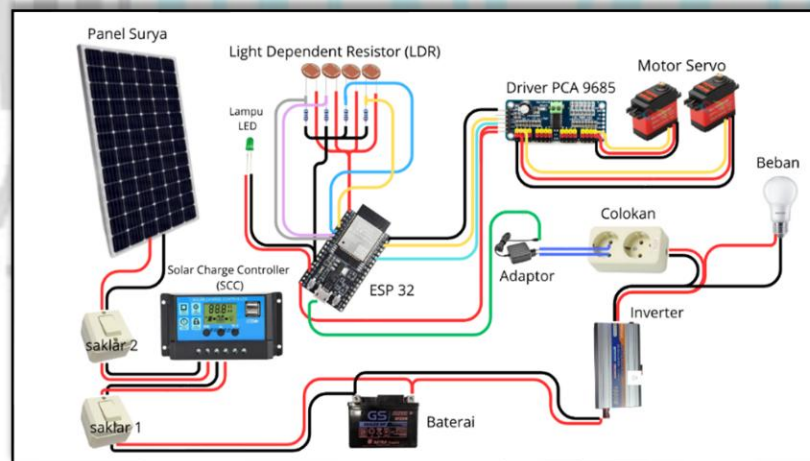
Berdasarkan Gambar 1, mekanisme operasional sistem *solar tracker* secara garis besar dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu sistem catu daya (*power*) sebagai penyedia energi dan alur data serta logika kendali sebagai pusat pemrosesan sistem. Pada bagian sistem catu daya, panel surya bertindak sebagai pemanen energi yang mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Energi listrik tersebut kemudian dialirkan menuju *Solar Charge Controller* (SCC) untuk diregulasi tegangannya agar proses pengisian daya ke dalam baterai atau aki dapat berjalan secara aman dan stabil. Daya yang telah tersimpan di dalam aki selanjutnya didistribusikan ke dua jalur beban yang berbeda, yaitu disalurkan menuju inverter untuk dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) guna menyuplai beban berupa lampu AC, serta dialirkan secara langsung melalui regulasi tegangan rendah untuk memenuhi kebutuhan operasional sistem kontrol *solar tracker* (Wibowo et al., 2021).

Sementara itu, bagian alur data dan logika kendali berfungsi untuk mengatur jalannya informasi, pemrosesan data, serta eksekusi gerakan mekanis yang berpusat pada mikrokontroler ESP32. Sistem kendali ini bekerja berdasarkan dua pilihan mode *input* yang dapat ditentukan oleh pengguna, yaitu mode otomatis dan mode manual. Pada mode *input* otomatis, empat buah sensor *Light Dependent Resistor* (LDR) bertindak sebagai unit masukan yang mendeteksi intensitas cahaya matahari di sekitar panel dan mengirimkan data analog ke

ESP32. Mikrokontroler kemudian mengolah data tersebut melalui logika program untuk menghitung selisih pembacaan cahaya, lalu mengirimkan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) menuju motor servo sebagai aktuator keluaran untuk menggerakkan dan mengatur sudut posisi panel surya agar selalu tegak lurus mengikuti arah datangnya cahaya matahari (Nurdiansyah et al., 2020).

Sebaliknya, ketika sistem dialihkan ke mode *input* manual, kontrol pencarian cahaya dinonaktifkan dan kendali penuh berpindah ke aplikasi Blynk yang bertindak sebagai antarmuka pengguna (Nur et al., 2024). Melalui aplikasi ini, pengguna dapat menentukan sudut kemiringan panel surya secara spesifik dengan mengatur komponen *slider* sesuai keinginan. Proses pengiriman data instruksi dari aplikasi Blynk menuju ESP32 dilakukan secara nirkabel dengan memanfaatkan jaringan internet berbasis Wi-Fi (Aezwani et al., 2024). Setelah data tersebut diterima, ESP32 akan langsung mengolah informasi sudut tersebut dan mengirimkan sinyal PWM untuk menggerakkan motor servo ke posisi yang diperintahkan. Bersamaan dengan aktifnya mode manual ini, mikrokontroler juga akan mengirimkan sinyal digital untuk menyalakan lampu indikator LED hijau di lapangan sebagai penanda visual bahwa sistem sedang berada di bawah kendali manual dan mode otomatis sedang tidak aktif.

2.2.2. Skematik Rangkaian Elektronika



Gambar 2. Skematik sistem Panel Surya dan *solar tracker*

Berdasarkan Gambar 2, sistem pengkabelan dirancang untuk mengintegrasikan seluruh komponen elektronik ke mikrokontroler serta mengatur distribusi daya dari sistem pembangkit. Jalur kelistrikan dimulai dari panel surya yang dihubungkan menuju *Solar Charge Controller* (SCC) melalui sebuah saklar pembatas. Dari SCC, jalur dilanjutkan menuju baterai (aki) yang juga dijembatani oleh sebuah saklar eksternal. Penempatan saklar-saklar ini berfungsi sebagai pengatur urutan penyambungan (*SOP pairing*) guna memastikan

baterai terhubung lebih dahulu ke SCC sebelum panel surya menyuplai arus, demi menghindari kerusakan pada modul SCC (Pawitra Teguh Dharma Priatam et al., 2021). Selanjutnya, daya dari baterai dihubungkan ke unit inverter untuk dikonversi menjadi tegangan AC guna menyuplai beban lampu. Untuk menghidupkan sistem kontrol *solar tracker*, arus listrik dialirkan melalui adaptor yang berfungsi menurunkan dan menstabilkan tegangan suplai yang di minta mikrokontroler ESP32 sebagai sumber listrik.

Bagian interkoneksi data, gambar skematik menampilkan konfigurasi pin masukan (*input*) dan keluaran (*output*) yang terpusat pada ESP32. Untuk komponen *input*, empat buah sensor LDR dirangkai menggunakan metode pembagi tegangan (*voltage divider*) bersama resistor bertenaga 1,2k Ω , di mana masing-masing jalur datanya terhubung secara berurutan ke pin analog GPIO35, GPIO34, GPIO33, dan GPIO32 (Majhool et al., 2021). Sementara itu, untuk meminimalkan beban pin pada mikrokontroler, bagian *output* aktuator tidak dihubungkan langsung ke ESP32, melainkan dijembatani oleh *driver* servo PCA9685. Modul *driver* PCA9685 ini terhubung ke ESP32 menggunakan protokol komunikasi I2C melalui pin SDA (GPIO21) dan SCL (GPIO22). Dua buah motor servo yang bertindak sebagai penggerak sudut vertikal dan horizontal kemudian dihubungkan secara fisik ke port keluaran pada *driver*, masing-masing pada *Channel* 0 dan *Channel* 1. Terakhir, skematik juga memperlihatkan sebuah lampu LED hijau yang difungsikan sebagai indikator aktifnya mode manual, yang terhubung langsung ke pin digital D2 (GPIO2) pada mikrokontroler ESP32.

2.3. Perancangan Antarmuka (*Interface*) Blynk

Perancangan perangkat lunak antarmuka (*interface*) pada ponsel pintar dirancang memanfaatkan platform IoT Blynk yang berfungsi sebagai media interaksi, pemantauan, dan kendali jarak jauh. Rencana arsitektur antarmuka ini didesain secara ergonomis dengan membagi menu kontrol menjadi dua fungsionalitas utama, yaitu *widget* pemilihan mode operasi berbasis tombol digital (*button*) dan *widget* pengatur sudut mekanis berbasis geser (*slider*). Seluruh parameter kendali pada antarmuka ini direncanakan untuk dihubungkan dengan pin virtual (*Virtual Pin*) Blynk agar dapat diidentifikasi oleh program pada mikrokontroler ESP32 melalui jaringan Wi-Fi.

Bagian pertama merupakan menu pemilihan mode operasi yang dirancang menggunakan dua buah komponen *Button Widget* yang diposisikan secara berdampingan, masing-masing dialokasikan untuk tombol "OTOMATIS" dan tombol "MANUAL". Kedua tombol ini dikonfigurasi menggunakan tipe data Integer pada pin virtual khusus. Ketika salah satu mode diaktifkan oleh pengguna (bernilai logika 1 atau "ON"), tombol tersebut akan mengirimkan sinyal interupsi digital ke ESP32 untuk mengubah jalannya urutan algoritma utama. Sistem

pemrograman dirancang agar aktivasi salah satu tombol secara otomatis akan mengubah status tombol mode pasangannya menjadi bernilai logika 0 ("OFF"), sehingga mencegah terjadinya bentrok instruksi (*collision command*) pada sistem kendali di lapangan.

Bagian kedua yang berada di bawah menu tombol mode adalah dua buah komponen *Slider Widget* yang berfungsi sebagai interaksi pengontrol sudut aktuator secara manual pada masing-masing sumbu pergerakan panel surya. *Slider* pertama dialokasikan untuk parameter "VERTIKAL" yang digunakan untuk menentukan batas sudut kemiringan panel pada sumbu elevasi atas-bawah, sedangkan *slider* kedua dialokasikan untuk parameter "HORIZONTAL" guna mengatur pergerakan pada sumbu azimuth kiri-kanan. Masing-masing *slider* dirancang memiliki rentang nilai (*range value*) dari 0 hingga 180 untuk yang horizontal dan untuk yang vertikal 0 hingga 180 yang merepresentasikan batasan sudut maksimal motor servo dalam satuan derajat. Setiap perubahan posisi *slider* oleh pengguna akan mengirimkan pembaruan nilai variabel secara *real-time* ke ESP32, yang kemudian akan dikonversi menjadi lebar pulsa sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk menggerakkan poros mekanis panel surya secara presisi di lapangan (Setiana et al., 2023).

2.4. Metode Pengujian Sistem

Tahap akhir dalam metodologi penelitian ini adalah pengujian sistem yang bertujuan untuk mengukur tingkat keberhasilan, keandalan, dan fungsionalitas dari alat *solar tracker* dua sumbu yang telah dirancang. Metode pengujian dilakukan secara bertahap, diawali dengan pengujian Komponen Satu per Satu. Pengujian awal difokuskan pada pengamatan terhadap kemampuan respon perangkat keras saat menerima instruksi dari program, seperti memeriksa apakah empat buah sensor LDR dapat membaca nilai analog intensitas cahaya secara akurat, serta menguji respon akurasi pergerakan sudut motor servo saat menerima perubahan nilai parameter dari program. Pada tahap ini, pengujian juga dilakukan terhadap aspek konektivitas dengan mengamati kecepatan respon perpindahan data nirkabel antara aplikasi Blynk pada ponsel pintar dengan mikrokontroler ESP32 melalui jaringan Wi-Fi.

Setelah seluruh komponen dipastikan bekerja dengan baik secara parsial di laboratorium, tahapan dilanjutkan dengan pengujian performa secara terintegrasi langsung di bawah kondisi lingkungan langsung dengan pencahayaan alami matahari. Pengujian lapangan ini difokuskan untuk mengevaluasi stabilitas dan keandalan sistem dalam menjalankan dua mode operasi yang telah dirancang. Pada pengujian mode otomatis, pengamatan diarahkan pada kemampuan algoritma sistem dalam menggerakkan kedua motor servo secara dinamis pada sumbu vertikal dan horizontal agar panel surya tetap tegak lurus mengikuti pergerakan semu matahari dari timur ke

barat berdasarkan selisih pembacaan sensor LDR. Sementara itu, pada pengujian mode manual, fokus pengamatan terletak pada keandalan sistem dalam mengeksekusi parameter sudut yang dikirim melalui *slider* aplikasi Blynk, keakuratan angka sudut yang ditampilkan pada layar antarmuka ponsel pintar, serta keberhasilan aktivasi lampu LED hijau sebagai indikator visual peralihan kendali di lapangan.

Data hasil pengujian yang diperoleh dari pengamatan langsung di lapangan tersebut selanjutnya dicatat dan dikumpulkan ke dalam tabel instrumen pengujian. Data yang telah terkumpul kemudian dianalisis secara deskriptif komparatif untuk mengevaluasi persentase *error* pergerakan sudut mekanis, stabilitas tegangan *output* yang dihasilkan, serta efisiensi pengisian daya pada sistem catu daya. Melalui hasil analisis deskriptif ini, tingkat keberhasilan rancang bangun sistem *solar tracker* dua sumbu berbasis ESP32 ini dapat disimpulkan secara ilmiah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini diperoleh dari proses perancangan dan implementasi sistem *solar tracker* dua sumbu berbasis mikrokontroler ESP32 yang memiliki dua mode operasi, yaitu mode otomatis berbasis sensor *Light Dependent Resistor* (LDR) dan mode manual berbasis aplikasi Blynk. Sistem yang telah dirancang kemudian diuji untuk mengetahui kemampuan dalam melakukan pelacakan cahaya secara otomatis serta kemampuan menerima dan mengeksekusi perintah sudut secara manual melalui aplikasi Blynk. Pengujian dilakukan pada kondisi pencahayaan alami di luar ruangan untuk melihat respon nyata sistem terhadap perubahan intensitas cahaya matahari.

Pengujian mode otomatis, sistem menunjukkan bahwa pembacaan sensor LDR mampu menghasilkan respons pergerakan motor servo pada sumbu horizontal dan vertikal sesuai dengan perbedaan intensitas cahaya yang diterima masing-masing sensor. Ketika salah satu sisi LDR menerima intensitas cahaya yang lebih besar, sistem secara otomatis menggerakkan panel menuju arah tersebut hingga nilai pembacaan antar sensor menjadi seimbang. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma perbandingan nilai LDR yang diterapkan pada mikrokontroler ESP32 dapat bekerja dengan baik dalam mengarahkan posisi panel surya secara *real-time*.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa penggunaan sekat pada posisi empat LDR mampu meningkatkan stabilitas pembacaan arah cahaya, karena setiap sensor dapat menangkap perbedaan intensitas cahaya secara lebih jelas. Namun demikian, masih ditemukan sedikit fluktuasi pada nilai pembacaan sensor ketika kondisi cahaya berubah secara cepat akibat bayangan awan atau objek lain yang melintas, sehingga menyebabkan pergerakan servo terkadang melakukan koreksi kecil secara berulang. Gerakan maju-mundur servo yang berulang-ulang ini tentu saja berpengaruh pada konsumsi listrik alat. Oleh karena itu, pengujian dilanjutkan dengan mengaudit kondisi kelistrikan sistem secara

total. Kami membandingkan total energi yang berhasil dipanen oleh panel surya 20 WP dengan total energi yang disedot oleh inverter 1000W beserta komponen kontrolnya. Dari perbandingan ini, kita bisa melihat data keuntungan energi bersih (Net Energy Gain) untuk membuktikan apakah alat pelacak matahari ini bekerja secara efisien atau tidak.

3.1. Hasil Implementasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

3.1.1. Fisik Alat *Solar tracker*

Tahap ini memaparkan hasil fisik dari rancang bangun sistem *solar tracker* dua sumbu berbasis ESP32 yang telah dirakit. Bentuk fisik dari alat terintegrasi ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



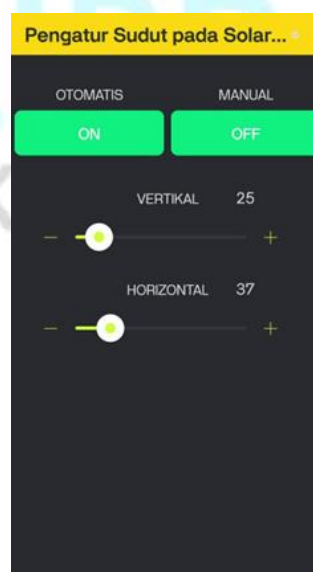
Gambar 3 Perangkat Fisik Keseluruhan Sistem *Solar tracker* Dua Sumbu.

Berdasarkan Gambar 3, struktur alat dibangun di atas rangka besi penyangga berwarna hitam yang kokoh untuk menopang beban seluruh komponen. Implementasi perangkat keras ini dibagi menjadi dua bagian penempatan utama, yaitu unit mekanik pelacak pada bagian atas dan unit panel kontrol kelistrikan pada bagian bawah. Pada bagian atas rangka, terdapat satu unit panel surya (*photovoltaic*) yang dipasang secara dinamis pada poros mekanik dua sumbu agar dapat bergerak secara vertikal maupun horizontal melalui pergerakan dua buah motor servo. Di sudut kanan atas panel surya, terdapat modul sensor LDR yang disekat membentuk empat kuadran untuk mendeteksi arah datangnya cahaya matahari pada mode otomatis. Sementara itu, komponen kontrol kelistrikan ditata secara rapi pada papan panel bagian bawah yang terdiri dari beberapa elemen utama sebagai berikut:

- a. Sistem Pengatur dan Saklar berada di bagian kiri atas, terdapat dua buah saklar rumahan berwarna putih yang berfungsi sebagai pemutus arus (SOP keamanan) untuk memisahkan jalur pengisian antara panel surya, *Solar Charge Controller* (SCC), dan baterai.
- b. Modul SCC terletak di sisi kiri tengah, berfungsi menampilkan status pengisian daya dan meregulasi tegangan dari panel surya menuju baterai.
- c. Box Kontrol Utama (*Main Controller Box*) berada di sisi kanan tengah, merupakan sebuah kotak proteksi berwarna putih yang di dalamnya berisi rangkaian PCB elektronik (menampilkan layout jalur rangkaian pada penutupnya) serta mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali data. Pada permukaan box ini juga dipasang sebuah lampu LED indikator hijau yang akan menyala secara otomatis ketika sistem dialihkan ke mode manual via Blynk.
- d. Bagian bawah panel terdapat aki kering sebagai penyimpan daya utama, modul inverter di sisi kanan bawah untuk mengubah arus DC menjadi AC, stopkontak, serta sebuah lampu AC (bohlam putih) di sisi kiri bawah sebagai beban riil pembuktian keberhasilan *output* daya sistem PLTS.

3.1.2. Antarmuka Blynk

Tampilan visual dari perangkat lunak antarmuka yang digunakan sebagai media interaksi dan kendali jarak jauh pada ponsel pintar ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Antarmuka Aplikasi Blynk pada *Smartphone*.

Antarmuka aplikasi Blynk didesain secara ergonomis dengan membagi menu kontrol menjadi dua bagian utama. Pada bagian atas layar, terdapat dua buah komponen *Button Widget*

(tombol) yang diletakkan berdampingan untuk memilih mode kerja sistem, yaitu tombol "OTOMATIS" dan tombol "MANUAL". Pada bagian bawah tombol mode, terdapat dua buah komponen *Slider Widget* yang dilengkapi dengan *Value Display* angka digital untuk mengontrol sudut aktuator secara spesifik, di mana *slider* atas digunakan untuk menentukan sudut kemiringan sumbu vertikal dan *slider* bawah untuk sumbu horizontal.

3.1.3. Sistem pemrograman IoT

Realisasi bentuk fisik dan antarmuka visual, implementasi perangkat lunak pada penelitian ini diwujudkan melalui baris kode program berbasis Arduino IDE yang ditanamkan ke dalam mikrokontroler ESP32. Kode program ini berfungsi sebagai otak pengatur logika sistem sekaligus pengatur komunikasi data nirkabel.

```

1  #define BLYNK_TEMPLATE_ID   "TMPL6y3BPYBH_"
2  #define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Pengatur Sudut pada Solar Tracker"
3  #define BLYNK_AUTH_TOKEN    "Lmgaw1FINbADPkfo3gE9ZQ811d_QkNJf"
4
5  #include <WiFi.h>
6  #include <BlynkSimpleEsp32.h>
7  #include <Wire.h>
8  #include <Adafruit_PWMServoDriver.h>
9  char ssid[] = "A";
10 char pass[] = "11111113";
11 #define LED_PIN             2
12 #define PCA9685_ADDR        0x40
13 #define PWM_FREQ             50
14 #define SDA_PIN              21
15 #define SCL_PIN              22
16
17 #define SERVO_H               1
18 #define SERVO_V               0
19
20 #define SERVO_H_PWM_MIN      150
21 #define SERVO_H_PWM_MAX      570
22 #define SERVO_V_PWM_MIN      160
23 #define SERVO_V_PWM_MAX      570
24
25 #define SERVO_DEG_MIN        0
26 #define SERVO_H_MAX          180
27 #define SERVO_V_MAX          180
28
29 // PIN LDR
30 #define LDR_LF                32
31 #define LDR_RF                34
32 #define LDR_LB                35
33 #define LDR_RB                33
34
35 // PARAMETER TRACKING
36 #define DEADBAND_H            250
37 #define DEADBAND_V            200
38 #define STEP                  2
39 #define LDR_SAMPLES           10
40 #define LOOP_DELAY_MS        100
41
42 #define CAL_OFFSET_H          0
43 #define CAL_OFFSET_V          0

```

Gambar 5 Pemrograman Blynk dan Perangkat Kontrol.

Berdasarkan program pada Gambar 5, parameter orisinal dari *platform cloud* Blynk (BLYNK_TEMPLATE_ID, BLYNK_TEMPLATE_NAME, dan BLYNK_AUTH_TOKEN) yang berfungsi untuk mensinkronisasikan aplikasi pada ponsel pintar dengan perangkat fisik secara privat. Modul Wi-Fi internal pada ESP32 dikonfigurasi pada baris 12 dan 13 untuk terhubung secara nirkabel ke titik akses (*access point*) lokal dengan SSID jaringan wifi. Selain data sambungan ke wifi, gambar 4.3 tersebut juga menunjukkan deklarasi alokasi pin kontrol fisik alat. Pin keluaran digital untuk lampu indikator LED hijau dihubungkan pada LED_PIN yang diarahkan ke GPIO 2 pada ESP32. Komunikasi data antara ESP32 dengan modul driver servo PCA9685 menggunakan protokol I2C (Wire.h) yang dialokasikan pada pin SDA_PIN

(GPIO 21) dan SCL_PIN (GPIO 22) dengan alamat bus 0x40 serta frekuensi PWM sebesar 50 Hz.

Pemetaan pergerakan motor, program mendefinisikan konstanta pulsa PWM minimum dan maksimum secara spesifik untuk masing-masing jenis penggerak, di mana sumbu horizontal (SERVO_H) diatur pada batas pulsa 150 hingga 570, sedangkan sumbu vertikal (SERVO_V) berada pada rentang pulsa 160 hingga 570. Batasan sudut operasional untuk kedua sumbu tersebut ditentukan mulai dari nilai minimum 0° (SERVO_DEG_MIN) hingga mencapai batas maksimum sejauh 180° (SERVO_H_MAX dan SERVO_V_MAX). Penentuan nilai maksimum 180° ini memegang peranan penting dalam proses sinkronisasi parameter digital terhadap bentuk fisik alat. Melalui pembatasan rentang nilai ini, fungsi pemetaan (mapping) pada program dapat membagi lebar pulsa PWM secara proporsional, sehingga koordinat sudut penting seperti posisi awal (0°), posisi tengah tegak lurus (90°), hingga batas ayunan maksimal (180°) pada visual aplikasi Blynk dapat menghasilkan orientasi kemiringan panel yang akurat dan presisi saat diamati secara langsung pada fisik alat di lapangan. Seluruh susunan program inisialisasi dan parameter kalibrasi gerak ini menjadi fondasi utama bagi kelancaran transfer data serta akurasi posisi pada pengujian mode otomatis maupun manual.

3.2. Hasil Pengujian Sistem *Solar tracker* Mode Otomatis

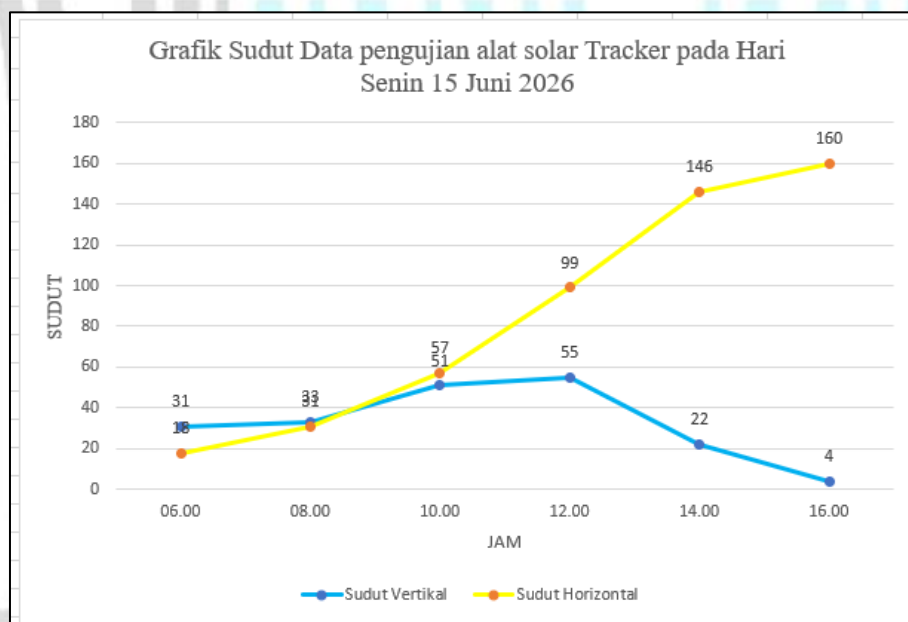
Hasil pengujian sistem *solar tracker* dua sumbu saat beroperasi pada mode otomatis menggunakan sensor LDR. Pengujian dilakukan selama tiga hari berturut-turut, mulai dari hari Senin, 15 Juni 2026 hingga Rabu, 17 Juni 2026, dengan interval pengambilan data setiap dua jam sekali dari pukul 06.00 hingga 14.00 WIB. Parameter yang diamati meliputi kondisi cuaca, nilai intensitas cahaya (Lux), serta respon perubahan sudut kemiringan panel pada sumbu vertikal dan horizontal. Seluruh data hasil pengamatan lapangan pada mode otomatis dirangkum dalam Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Hasil Pengujian Kinerja Sistem *Solar tracker* Mode Otomatis

Hari Tanggal	Jam	Kondisi Cuaca	Intensitas Cahaya (Lux)	Sudut Vertikal (°)	Sudut Horizontal (°)
Senin 15 Juni 2026	06.00	Cerah	2587	31	18
	08.00	Cerah	12910	33	31
	10.00	Cerah	98110	51	57
	12.00	Cerah	109700	55	99
	14.00	Cerah	83910	22	146
	16.00	Cerah	12310	4	160
Selasa 16 Juni 2026	06.00	Cerah	2312	32	20
	08.00	Cerah	13540	34	32
	10.00	Cerah	93110	49	52

	12.00	Cerah	115300	56	100
	14.00	Cerah	83880	23	150
	16.00	Cerah	13100	4	152
Rabu 17 Juni 2026	06.00	Cerah sedikit berkabut	1902	33	22
	08.00	Cerah	13310	35	33
	10.00	Cerah	95110	50	54
	12.00	Cerah	105700	48	114
	14.00	Cerah	86760	25	149
	16.00	Cerah	14130	6	149

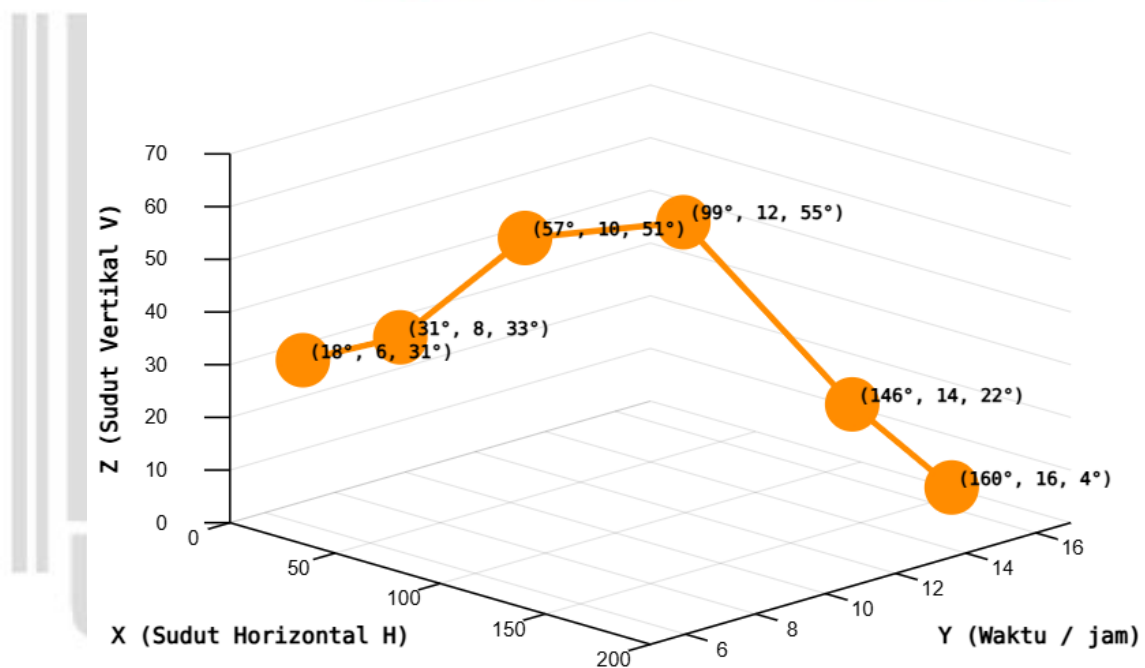
Kecenderungan perubahan sudut mekanis aktuator secara visual, data hasil pengujian pada hari pertama (Senin, 15 Juni 2026) dipetakan ke dalam bentuk kurva koordinat kartesian yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 6 Grafik Sudut Data Pengujian Alat *Solar Tracker* pada Hari Senin 15 Juni 2026.

Berdasarkan visualisasi kurva 2D pada Gambar 6, analisis awal difokuskan pada karakteristik dinamika pergerakan sudut mekanis secara mandiri pada masing-masing sumbu solar tracker berdasarkan variasi waktu pengujian. Melalui grafik dua dimensi tersebut, dapat diamati bahwa sepanjang hari pengujian, kedua sumbu menunjukkan karakteristik pergerakan geometris yang berbeda namun berjalan beriringan secara konsisten. Sumbu horizontal menunjukkan tren kenaikan yang bersifat linear dan konstan dari pagi hingga sore hari. Dimulai dari sudut 18° pada pukul 06.00 WIB, grafik kuning sumbu horizontal merangkak naik secara bertahap melewati sudut 31° , 57° , 99° , hingga akhirnya mengunci posisi di sudut barat maksimal sebesar 160° pada pukul 16.00 WIB. Pola linear bergradien positif ini merepresentasikan keberhasilan motor servo dalam mentranslasikan perubahan rotasi bumi terhadap matahari dari arah timur ke barat secara konstan.

Sebaliknya, kurva biru pada sumbu vertikal menunjukkan karakteristik pergerakan yang membentuk pola parabola atau kurva melengkung. Sumbu vertikal mengawali pergerakan pada sudut mendongak 31° di pagi hari, naik perlahan ke sudut 33° pada pukul 08.00 WIB, dan terus meningkat hingga mencapai titik kulminasi tertinggi sebesar 55° tepat pada pukul 12.00 WIB. Setelah melewati tengah hari, grafik sumbu vertikal menunjukkan penurunan yang sangat kontras menuju sudut 22° pada pukul 14.00 WIB, dan berakhir menunduk di sudut 4° pada pukul 16.00 WIB. Pemisahan visualisasi secara dua dimensi pada Gambar 6 ini sangat efektif untuk membuktikan bahwa secara individual, masing-masing motor servo telah merespon algoritma pemrograman berbasis perubahan nilai intensitas cahaya matahari secara tepat pada jalurnya masing-masing.



Gambar 7 Grafik 3D Hubungan Sinkronisasi Pergerakan Sumbu Horizontal dan Sumbu Vertikal Berdasarkan Faktor Waktu Pengujian.

Sinkronisasi antara kedua sumbu gerak tersebut seiring berjalannya waktu, analisis dilanjutkan dengan mengamati Gambar 7 yang menyajikan Grafik Lintasan 3 dimensi (X, Y, Z). Berbeda dengan grafik dua dimensi sebelumnya yang meninjau sumbu secara terpisah, grafik 3D ini mengintegrasikan Sudut Horizontal (H) pada Sumbu X, Waktu/Jam pada Sumbu Y, dan Sudut Vertikal (V) pada Sumbu Z. Melalui pemetaan ruang ini, hubungan interdependensi antar-komponen mekanis dapat divisualisasikan secara nyata, di mana seluruh titik koordinat membentuk sebuah lintasan melengkung menyerupai struktur pegunungan yang merepresentasikan perpindahan posisi matahari di kubah langit secara *real-time*.

Visualisasi 3D ini, pergerakan sistem berawal dari koordinat ruang pagi hari yaitu (18° , 6 , 31°). Seiring berjalannya waktu (Sumbu Y), lintasan garis oranye bergerak maju sekaligus mendaki naik secara tiga dimensi. Fenomena konvergensi koordinat ruang ini mencapai titik puncak gunungnya (*peak point*) tepat pada posisi tengah hari dengan koordinat (99° , 12 , 55°). Orientasi perpaduan sudut pada puncak grafik 3D ini secara mekanis mengonfirmasi bahwa penampang fisik panel surya berada dalam posisi paling ideal yaitu condong di area tengah horizontal namun mendongak maksimal secara vertikal guna meminimalkan sudut datang sinar datang agar sel surya dapat menyerap radiasi pada kondisi paling maksimal (*peak power*). Setelah melewati pukul 12.00 WIB, lintasan grafik 3D menunjukkan arah pergerakan yang meluncur turun secara curam menuju sore hari, hingga berakhir di titik koordinat (160° , 16 , 4°). Melalui visualisasi Gambar 7 ini, terbukti secara ilmiah bahwa logika program pada mikrokontroler ESP32 tidak hanya menggerakkan motor secara parsial, melainkan berhasil memadukan Sumbu X dan Sumbu Z secara simultan untuk membentuk satu kesatuan gerak penjejakan tiga dimensi yang presisi mengikuti lintasan harian matahari dari fajar hingga terbenam.

3.3. Hasil Pengujian Sistem *Solar tracker* Mode Manual (Blynk)

Pengujian selanjutnya dilakukan pada mode manual untuk mengetahui tingkat akurasi dan responsivitas pergerakan panel surya saat dikendalikan dari jarak jauh melalui aplikasi Blynk. Metode pengujian dilakukan dengan memberikan *input* parameter sudut tertentu pada komponen *slider* vertikal dan horizontal di aplikasi Blynk. Setelah motor servo selesai merespon perintah tersebut, posisi kemiringan fisik dari panel surya diukur secara langsung menggunakan alat ukur busur derajat guna mendapatkan nilai sudut aktualnya. Data hasil pengujian komparatif ini disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3 Hasil Pengujian Kinerja Sistem *Solar tracker* Mode Manual

No	Sudut Perintah Blynk ($^\circ$)		Sudut Aktual Alat ($^\circ$)		Persentase Error (%)	
	Vertikal	Horizontal	Vertikal	Horizontal	Vertikal	Horizontal
1	0°	0°	2°	0°	0%	0%
2.	45°	45°	47°	48°	4,44%	6,67%
3.	90°	90°	91°	95°	1,11%	5,56%
4.	135°	135°	138°	136°	2,22%	0,74%
5.	180°	180°	178°	179°	1,11%	0,56%

Berdasarkan data pada Tabel 3, secara prinsip fungsional, sistem IoT telah berjalan dengan baik di mana setiap perubahan nilai slider pada aplikasi Blynk terbukti mampu langsung ditangkap oleh ESP32 untuk menggerakkan motor servo. Namun, hasil komparasi fisik menggunakan busur derajat menunjukkan adanya ketidaksesuaian nilai sudut antara perintah

digital dengan output aktualnya, dengan nilai selisih mutlak berkisar antara 0° hingga 5° . Secara statistik, rata-rata persentase eror sumbu vertikal sebesar 1,98% dan sumbu horizontal sebesar 2,71%. Nilai persentase eror tertinggi ditemukan pada sumbu horizontal yaitu sebesar 6,67% saat mengeksekusi sudut target 45° (dengan deviasi fisik sebesar 3°). Meskipun terdapat fluktuasi, nilai rata-rata persentase eror sistem secara keseluruhan dari kedua sumbu tetap berada di bawah 3%, yaitu sebesar 2,35%, yang menegaskan bahwa tingkat akurasi pemosisian alat secara nirkabel masih sangat tinggi mencapai 97,65%.

Ketidakakuratan posisi sudut ini bersumber dari kondisi mekanis alat yang belum sempurna atau belum berada pada tingkat kepresisian yang ideal. Faktor utama yang memicu timbulnya selisih pembacaan tersebut adalah beban statis dari struktur rangka, di mana bobot panel surya beserta dudukan besi penyangga memberikan beban torsi eksentrik yang tidak merata pada poros servo. Struktur yang kurang kaku ini menyebabkan terjadinya sedikit defleksi struktural atau penurunan posisi fisik (meleyot) akibat pengaruh gaya gravitasi bumi saat motor servo mencoba berhenti menahan dan mengunci koordinat target. Selain itu, proses pengukuran manual di lapangan juga rentan terhadap keterbatasan akurasi alat ukur busur derajat serta adanya risiko kesalahan paralaks atau perbedaan sudut pandang mata pengamat saat mencocokkan garis busur dengan kemiringan fisik panel surya di lokasi penelitian.

Meskipun dihadapkan pada kendala mekanis tersebut, deviasi sudut ini secara keseluruhan masih berada dalam batas toleransi operasional sistem penjejak matahari purwarupa dan tidak sampai melumpuhkan fungsi kendali nirkabel. Kehadiran mode manual ini memiliki urgensi operasional yang sangat tinggi di lapangan, utamanya sebagai fitur toleransi kesalahan sensor (*sensor fault tolerance*). Ketika terjadi malfungsi sensor akibat faktor lingkungan seperti cuaca mendung pekat yang merata atau permukaan sensor LDR yang tertutup kotoran pembacaan intensitas cahaya akan menjadi kacau dan berisiko memicu gejala *hunting*, yaitu kondisi di mana motor servo bergerak bolak-balik secara agresif dan acak untuk mencari cahaya yang justru dapat menguras daya baterai aki kering secara sia-sia. Melalui mode manual, pengguna dapat langsung melakukan interupsi program (*override control*) dari jarak jauh untuk mengunci posisi panel secara statis, sehingga pemborosan energi tersebut dapat dihentikan secara instan tanpa menghentikan produksi listrik total pada sistem PLTS.

Selain itu, mode manual ini memberikan manfaat praktis yang signifikan dalam memfasilitasi pemeliharaan fisik alat. Mengingat fisik komponen penopang dan panel surya memiliki dimensi ukuran yang relatif besar serta dipasang di area samping atap rumah, proses perawatan rutin seperti pembersihan debu, pencucian penampang sel surya, ataupun perbaikan kabel akan sangat

sulit dijangkau jika posisi alat hanya mengandalkan pergerakan otomatis. Melalui kendali manual via Blynk, pengguna dapat dengan mudah mengubah orientasi mekanis ke sudut landai tertentu agar seluruh bagian fisik panel surya yang besar tersebut dapat diturunkan, dijangkau, dan dibersihkan secara aman tanpa risiko merusak roda gigi internal motor penggerak. Selama pengujian manual ini berlangsung, indikator lampu LED hijau pada *box* kontrol putih juga terbukti tetap menyala stabil, menegaskan bahwa jalur interupsi program untuk pengalihan kendali manual telah sukses dieksekusi secara sistemik oleh mikrokontroler ESP32.

3.4. Pengujian dan Analisis Pembangkitan Energi, Konsumsi Daya Motor, dan Hubungan Parameter Pergerakan Panel

Pengujian performa sistem dilakukan untuk mengukur efisiensi penyerapan energi surya pada dua metode pemasangan yang berbeda, yaitu panel surya dengan posisi tetap (*statis*) dan panel surya yang dikendalikan oleh sistem pelacak matahari (*solar tracker*) dua sumbu. Pengujian dilakukan secara real-time dan bersamaan selama 12 jam operasional, dimulai pukul 06.00 WIB hingga 17.00 WIB. Parameter kelistrikan yang dicatat meliputi tegangan (V), arus keluaran (I), dan intensitas cahaya matahari (Lux) menggunakan sensor yang terintegrasi. Data hasil pengujian harian disajikan pada Tabel 3. Daya listrik (P) pada setiap interval jam dihitung menggunakan rumus:

$$P = V \times I \quad (1)$$

Sedangkan total kumulatif energi harian (E) yang berhasil dipanen oleh masing-masing panel surya diperoleh melalui akumulasi penjumlahan daya pada setiap interval waktu pengujian ($t = 1\text{jam}$):

$$E = \sum P \times t \quad (2)$$

Tabel 3 Hasil Pengujian Pembangkitan Daya Panel Surya Statis dan Solar Tracker

Waktu	Panel Surya Tetap				Solar Tracker			
	Intensitas (Lux)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (P)	Intensitas (Lux)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (P)
06.00	4258	19,4	0,08	1,552	2059	19,7	0,1	1,97
07.00	20450	20,7	0,28	5,796	79260	21,5	0,81	17,42
08.00	65080	21,4	0,6	12,84	119600	21,6	1,07	23,11
09.00	103200	21,1	0,56	11,82	134500	21,1	1,18	24,9
10.00	130200	20,3	1,16	23,55	148800	21,6	1,24	26,78
11.00	155200	20,9	1,24	25,92	168800	21,4	1,31	28,03
12.00	157100	21,4	1,31	28,03	172600	21,7	1,38	29,95
13.00	141800	21,5	1,18	25,37	151100	21,2	1,27	26,92
14.00	122300	21,0	1,11	23,31	155300	21,1	1,3	27,43
15.00	80790	21,2	0,71	15,05	138700	21,3	1,21	25,77

16.00	34920	20,8	0,37	7,696	95000	21,3	0,91	19,38
17.00	4153	18	0,04	0,72	6261	18,6	0,07	1,302

3.4.1. Perhitungan Performa Pembangkitan Energi Panel Statis

Berdasarkan kolom panel surya tetap pada Tabel 3, total akumulasi energi harian yang berhasil dipanen oleh panel statis (E_{statis}) dihitung sebagai berikut:

$$E_{statis} = 1,552 + 5,796 + 12,84 + 11,82 + 23,55 + 25,92 + 28,03 + 25,37 \\ + 23,31 + 15,05 + 7,696 + 0,72 = 181,654 \text{ Wh}$$

Panel statis mengalami keterbatasan penyerapan daya secara signifikan pada pagi hari (pukul 06.00–08.00 WIB) dan sore hari (pukul 16.00–17.00 WIB). Kinerja puncak panel statis hanya terjadi pada pukul 11.00–12.00 WIB saat posisi matahari sejajar dengan kemiringan panel, di mana daya keluaran maksimum mencapai 28,03 Watt.

3.4.2. Perhitungan Performa Pembangkitan Energi Solar Tracker

Berdasarkan kolom solar tracker pada Tabel 3, total akumulasi energi harian yang berhasil dipanen oleh panel pelacak matahari ($E_{tracker}$) dihitung sebagai berikut:

$$E_{tracker} = 1,97 + 17,4 + 23,11 + 24,9 + 26,78 + 28,03 + 29,95 + 26,92 \\ + 27,43 + 25,77 + 19,38 + 1,302 = 252,942 \text{ Wh}$$

Sistem solar tracker secara dinamis mengoreksi posisi panel sehingga daya keluaran dapat dipertahankan mendekati titik optimumnya sepanjang hari. Selisih atau bonus energi panen (ΔE) yang didapatkan oleh solar tracker dibandingkan panel statis dihitung sebagai berikut:

$$\Delta E = E_{tracker} - E_{statis} \quad (3) \\ \Delta E = 252,942 - 181,654 = +71,286 \text{ Wh}$$

Hasil ini menunjukkan adanya kenaikan efisiensi kotor pembangkitan energi harian sebesar 71,286 Wh atau sekitar 39,24% dibandingkan panel posisi tetap.

3.4.3. Analisis Konsumsi Daya Motor Servo dan Sistem Kontrol

Menilai kelayakan sistem secara menyeluruh, pengukuran juga dilakukan pada beban internal alat. Sistem kontrol pelacak matahari terdiri dari mikrokontroler ESP32, modul Pulse Width Modulation (PCA9685), serta dua unit motor servo digital DS3225MG sebagai penggerak sumbu horizontal dan vertikal. Karakteristik konsumsi daya diukur pada kondisi diam menahan beban mekanik panel pada berbagai posisi sudut yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil Pengukuran Konsumsi Daya Sistem Kontrol dan Motor Servo

Waktu	Sudut Vertikal (°)	Sudut Horizontal (°)	Kondisi Pengujian / Posisi	Tegangan (V)	Arus (A)
06.00	31	18	Diam	4,85	0,11
08.00	32	32	Diam	4,99	0,1
10.00	51	56	Diam	5,01	0,09
12.00	55	98	Diam	5,02	0,09
14.00	21	147	Diam	4,89	0,09
16.00	4	160	Diam	4,69	0,12

Berdasarkan Tabel 4, arus operasional sistem pada kondisi diam menahan beban mekanik berada pada rentang yang stabil antara 0,09 A hingga 0,12 A, dengan tegangan kerja antara 4,69 V hingga 5,02 V. Nilai daya rata-rata ($P_{rata-rata}$) diperoleh dari perkalian antara rata-rata tegangan (4,91 V) dan rata-rata arus operasional (0,10 A) seluruh sistem kontrol pada Tabel 4:

$$P_{rata-rata} = V_{rata-rata} \times I_{rata-rata} \quad (4)$$

$$P_{rata-rata} = 4,91 \times 0,49 = 0,49 \text{ Watt}$$

Variasi sudut vertikal (4° hingga 55°) dan horizontal (18° hingga 160°) tidak menyebabkan lonjakan arus yang signifikan, membuktikan bahwa struktur mekanik memiliki keseimbangan titik berat yang baik. Total akumulasi energi ($E_{konsumsi}$) yang dikonsumsi seluruh sistem kontrol selama 12 jam operasional harian dihitung sebagai berikut:

$$E_{konsumsi} = P_{rata-rata} \times t \quad (5)$$

$$E_{konsumsi} = 0,49 \times 12 \text{ jam} = 5,88 \text{ Wh}$$

3.4.4. Analisis Keuntungan Energi Bersih

Kelayakan dan efisiensi sistem solar tracker ditentukan melalui perhitungan Keuntungan Energi Bersih, yaitu dengan menganalisis selisih antara bonus energi hasil panen (ΔE) dengan total energi yang digunakan oleh sistem kontroler alat ($E_{konsumsi}$):

$$\text{Energi Bersih} = \Delta E - E_{konsumsi} \quad (6)$$

$$\text{Energi Bersih} = 71,286 - 5,88 = +65,406 \text{ Wh}$$

Berdasarkan hasil kalkulasi gabungan di atas, didapatkan nilai Energi Bersih bernilai positif sebesar +65,406 Wh. Nilai ini memberikan kesimpulan ilmiah yang sangat kuat terkait kelayakan dan keuntungan sistem:

1. Sistem kontroler dan aktuator motor servo terbukti sangat hemat energi. Persentase konsumsi alat terhadap bonus panen dihitung sebagai berikut:

$$\text{Persentase konsumsi alat} = \frac{5,88 \text{ Wh}}{71,286 \text{ Wh}} \times 100\% = 8,25\%$$

Hal ini membuktikan bahwa alat hanya mengambil 8,25% dari total bonus energi yang berhasil dipanen, sehingga sisanya sebesar 91,75% tetap menjadi keuntungan murni.

2. Setelah dikurangi seluruh kebutuhan daya operasional alat (5,88), sistem solar tracker secara murni menyumbangkan surplus energi bersih sebesar +65,406 Wh ke baterai. Peningkatan pasokan energi bersih murni ini dihitung dengan membandingkannya terhadap total energi panel statis (164,38 Wh):

$$\text{Peningkatan Energi Bersih} = \frac{65,406 \text{ Wh}}{181,654 \text{ Wh}} \times 100\% = 36,01\%$$

3. Penerapan sistem solar tracker dua sumbu berbasis ESP32 terbukti Sangat Menguntungkan dan tidak sia-sia. Penggunaan alat ini memberikan surplus pasokan energi bersih sebesar +36,01% dibandingkan jika hanya menggunakan panel posisi diam.

3.4.5. Hubungan antara sudut panel, intensitas cahaya, dan daya listrik

Perubahan sudut posisi panel, tingkat intensitas cahaya matahari yang terserap, dan daya listrik yang dihasilkan merupakan inti dari prinsip kerja sistem *solar tracker*. Berdasarkan analisis data komparatif pada Tabel 3 dan Tabel 4, hubungan antar parameter tersebut dapat dijelaskan melalui pendekatan fisika optik dan karakteristik kelistrikan sel surya. Sesuai dengan Hukum Lambert (*Cosines Law of Illumination*), intensitas radiasi surya yang diterima oleh permukaan sel surya berbanding lurus dengan besarnya sudut datang sinar matahari terhadap permukaan panel.

Besarnya intensitas cahaya yang diserap sangat bergantung pada seberapa miring garis normal permukaan panel terhadap arah datangnya sinar matahari. Pada panel statis dengan posisi tetap, saat pagi hari (pukul 08.00 WIB) dan sore hari (pukul 16.00 WIB), posisi matahari berada sangat miring terhadap panel sehingga sudut datang sinar matahari menjadi sangat besar. Kondisi ini menyebabkan intensitas radiasi cahaya yang terukur pada permukaan panel statis merosot tajam dan nilainya sangat rendah, yaitu hanya sebesar 65.320 Lux pada pukul 08.00 WIB dan 18.200 Lux pada pukul 16.00 WIB. Sebaliknya, sistem solar tracker secara kontinu menggerakkan motor servo pada sumbu horizontal dan vertikal untuk

mempertahankan posisi permukaan sel surya agar selalu menghadap tegak lurus searah dengan kedatangan sinar matahari.

Dinamika pergerakan sudut ini terlihat jelas dari data pengujian harian. Pada pukul 06.00 WIB, motor mengarahkan panel pada sudut vertikal 31° dan horizontal 18° , menghasilkan intensitas sebesar 2.059 Lux dibandingkan panel statis yang hanya 1.332 Lux. Memasuki pukul 08.00 WIB, posisi dikoreksi ke sudut vertikal 32° dan horizontal 32° , sehingga intensitas cahaya melonjak tinggi hingga 119.600 Lux. Saat matahari berada di puncaknya pada pukul 12.00 WIB, panel membentuk sudut vertikal 55° dan horizontal 98° dengan intensitas puncak mencapai 141.200 Lux. Selanjutnya pada sore hari pukul 16.00 WIB, panel berputar ke sudut vertikal 4° dan horizontal 160° untuk menjaga intensitas cahaya tetap tinggi pada 38.010 Lux.

Karakteristik kelistrikan sel surya (*Photovoltaic Curve*), besarnya intensitas cahaya matahari (Lux) yang berhasil diserap berbanding lurus dengan arus foton yang dihasilkan oleh semikonduktor panel, sedangkan tegangan sel (V) cenderung relatif konstan setelah melewati ambang batas saturasi cahaya. Fenomena ini terbukti secara eksplisit dari data pengujian pada Tabel 3, di mana tegangan kedua panel cenderung stabil pada kisaran 18 V hingga 21,7 V sepanjang hari, sementara arus keluaran panel *solar tracker* mengalami lonjakan yang sangat signifikan mengikuti peningkatan nilai intensitas Lux. Pada pukul 08.00 WIB, arus panel statis hanya sebesar 0,6 A, sedangkan panel solar tracker mampu menghasilkan arus hingga 1,07 A. Demikian pula pada pukul 16.00 WIB, arus panel tracker bertahan di angka 0,91 A dibanding panel statis yang hanya 0,37 A. Daya listrik (P) merupakan perkalian antara tegangan dan arus.

3.5. Analisis dan Pembahasan Keseluruhan Sistem Alat

Proses perancangan, implementasi, serta pengujian sistem baik pada mode otomatis maupun manual, bagian ini membahas korelasi fungsional menyeluruh antara arsitektur perangkat keras, logika pemrograman IoT, dan performa penjejakan fisik di lapangan. Evaluasi komprehensif ini bertujuan untuk memetakan sejauh mana integrasi sistem mampu mencapai target efisiensi mekanis sekaligus mengidentifikasi kendala teknis yang memengaruhi akurasi alat di lingkungan riil.

Integrasi antara algoritma pemrograman pada mikrokontroler ESP32 dan susunan fisik perangkat keras terbukti mampu menghasilkan performa pelacakan matahari yang stabil dan reliabel pada mode otomatis. Karakteristik data pada pagi hari pukul 06.00 WIB membuktikan keberhasilan fungsi penanganan gangguan lingkungan mikro di lapangan. Meskipun penempatan fisik alat di samping atap rumah menyebabkan datangnya sinar matahari pagi sempat terhalang oleh vegetasi pepohonan sehingga nilai intensitas cahaya jatuh di rentang rendah antara 1.942 Lux hingga 2.587 Lux, sistem

tidak mengalami kegagalan orientasi arah gerak. Nilai batasan toleransi (*deadband*) yang ditanamkan pada kode program berfungsi sebagai penyaring fluktuasi data LDR, sehingga motor servo tetap mampu bergerak presisi mengarah ke posisi terbit matahari di timur dengan rentang sudut horizontal 18° hingga 22° tanpa adanya gerakan sentakan bolak-balik yang tidak stabil akibat bias bayangan pohon.

Selain ketahanan terhadap bayangan, sifat pergerakan mekanis dari kedua sumbu juga menunjukkan sinkronisasi geometri yang ideal dari pagi hingga sore hari. Sumbu horizontal menunjukkan karakteristik gerakan linear yang terus bertambah dari 18° hingga mencapai sudut maksimal 160° untuk melacak rotasi harian matahari dari timur ke barat. Di sisi lain, sumbu vertikal menunjukkan karakteristik gerakan berbentuk parabola atau kurva lonceng yang bergerak naik mengikuti tinggi deklinasi matahari, hingga mencapai posisi puncaknya di sudut 48° sampai 56° pada pukul 12.00 WIB saat nilai intensitas cahaya menyentuh level tertinggi di atas 100.000 Lux. Orientasi perpaduan sudut pada tengah hari benderang ini secara fisik memosisikan permukaan penampang panel surya berada dalam kondisi landai tegak lurus menghadap langit. Hal ini secara teori berhasil meminimalkan kerugian kosinus (*cosine loss*) sehingga pemanfaatan radiasi matahari berada pada titik paling maksimal (*peak power*).

Meskipun interaksi nirkabel melalui platform Blynk pada mode manual telah berjalan sukses yang ditandai dengan aktifnya interupsi program untuk menyalakan LED indikator hijau pada GPIO 2, hasil pengujian mengindikasikan adanya kendala struktural dan sistemik yang memicu deviasi sudut aktual sebesar 1° hingga 5° . Fenomena selisih antara perintah digital aplikasi dengan posisi fisik luar ini dipengaruhi oleh kondisi alat yang belum sempurna, baik secara rancangan mekanik maupun pada proses pemrogramannya. Dari sisi mekanik, struktur penopang pada setiap posisi sumbu horizontal maupun vertikal terpantau masih belum solid, tertata rapi, ataupun seimbang (*unbalanced*). Ketidakseimbangan distribusi massa panel surya terhadap poros dinamis ini menghasilkan beban torsi eksentrik yang tidak merata saat motor servo bergerak. Akibatnya, kekakuan mekanik yang rendah tersebut menimbulkan goyangan atau getaran tidak stabil yang secara langsung mengganggu pergerakan transisi antar-sudut dan menjadi pemicu utama munculnya eror mekanis berupa defleksi posisi saat servo mencoba mengunci koordinat target. Kelemahan mekanik tersebut diperparah oleh proses kompilasi program yang belum sepenuhnya sempurna dalam menangani redaman (*damping*) gerakan. Belum adanya algoritma umpan balik (*feedback loop*) yang matang pada kode program menyebabkan mikrokontroler tidak dapat mendeteksi apakah posisi sudut aktual servo sudah benar-benar sesuai dengan sudut ideal di lapangan atau justru bergeser akibat beban mekanis yang tidak stabil tadi. Selain masalah internal alat, faktor keterbatasan akurasi alat ukur busur derajat serta

adanya risiko kesalahan paralaks atau perbedaan sudut pandang mata pengamat saat pencatatan manual di bawah samping atap rumah turut menyumbang persentase eror pada data pengujian.

Secara keseluruhan, meskipun fluktuasi data dan eror mekanis akibat ketidaksempurnaan rancangan ini terjadi pada sistem, deviasi yang dihasilkan secara umum masih berada di dalam batas toleransi operasional sebuah *solar tracker* purwarupa. Kelemahan akurasi pada unit mekanik dan kestabilan program ini tidak sampai melumpuhkan fungsionalitas utama dari sistem pembangkit listrik tenaga surya, yang dibuktikan dengan tetap berjalannya regulasi pengisian daya oleh modul SCC menuju baterai aki kering. Keberhasilan konversi arus DC ke AC oleh modul inverter juga terbukti mampu menyalakan beban lampu AC berupa bohlam putih secara stabil. Dengan demikian, kendala ketidakseimbangan mekanik dan ketidaksempurnaan program ini akan menjadi poin evaluasi serta rekomendasi utama bagi penyempurnaan sistem kendali penjejak matahari pada penelitian selanjutnya.

4. PENUTUP

Keseluruhan tahapan penelitian yang meliputi proses perancangan, realisasi perangkat keras, penyusunan baris program, hingga pengujian riil di lapangan, dapat disimpulkan bahwa sistem *solar tracker* dua sumbu berbasis mikrokontroler ESP32 ini telah berhasil direalisasikan dan berfungsi secara manufaktur maupun sistemik. Integrasi antara komponen fisik seperti sensor LDR, modul pembagi pulsa PWM PCA9685, dan motor servo, bersama dengan ekosistem perangkat lunak Arduino IDE dan *platform IoT* Blynk telah membentuk suatu kesatuan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dinamis yang tangguh. Melalui dualisme mode kendali yang diterapkan, alat ini mampu memberikan fleksibilitas operasional yang tinggi, di mana interaksi jarak jauh melalui antarmuka *smartphone* dapat berjalan secara *real-time* berdampingan dengan algoritma penjejak otomatis yang bekerja secara mandiri di lapangan.

Pengoperasian mode otomatis, sistem menunjukkan performa pelacakan yang sangat adaptif dan konsisten dalam merespon pergerakan semu harian matahari berdasarkan fluktuasi nilai intensitas cahaya (Lux). Karakteristik pergerakan mekanis dari kedua sumbu menunjukkan sinkronisasi geometri yang sangat ideal, di mana sumbu horizontal bergerak secara linear dari sudut timur (18° - 22°) menuju sudut barat (149° - 160°), sedangkan sumbu vertikal bergerak secara parabolik mengikuti tinggi deklinasi matahari hingga mencapai puncaknya di sudut 48° - 56° pada tengah hari. Algoritma program terbukti memiliki tingkat ketahanan yang baik terhadap gangguan lingkungan berupa bayangan pepohonan di area samping atap rumah pada pagi hari. Meskipun intensitas cahaya sempat jatuh ke level rendah akibat terhalang pohon, fungsi batas toleransi (*deadband*) pada program sukses menyaring fluktuasi data LDR sehingga panel tetap tenang membidik arah fajar tanpa mengalami

pergerakan sentakan (*hunting*) yang dapat menguras konsumsi energi baterai. Ketika matahari mencapai titik kulminasi tertinggi pada pukul 12.00 WIB dengan intensitas cahaya melebihi 105.000 Lux, perpaduan sudut yang terbentuk secara otomatis memosisikan permukaan penampang panel surya berada dalam kondisi landai tegak lurus menghadap langit, yang secara teoritis berhasil meminimalkan kerugian kosinus (*cosine loss*) demi mengoptimalkan penyerapan radiasi pada kondisi daya puncak (*peak power*).

Sementara itu, dari hasil pengujian kontrol manual, interupsi program nirkabel via Blynk terbukti sukses mentransfer parameter input digital dari komponen *slider widget* untuk mengeksekusi pergerakan fisik motor servo di lapangan. Namun, pengujian komparatif menggunakan alat ukur busur derajat mengindikasikan adanya keterbatasan sistemik yang memicu timbulnya deviasi atau eror sudut aktual sebesar 1° hingga 5°. Berdasarkan hasil evaluasi, ketidaksesuaian posisi sudut ini bersumber dari kondisi internal alat yang masih belum sempurna, baik pada aspek rancangan struktural mekanik maupun pada proses pemrograman logika programnya. Secara mekanis, struktur penopang pada poros horizontal dan vertikal terpantau belum sepenuhnya solid, tertata rapi, ataupun seimbang (*unbalanced*). Ketidakseimbangan berat panel surya tidak pas di tengah-tengah engsel servo, beban jinjing yang diterima servo jadi berat sebelah. Akibatnya, besi penopangnya jadi agak meleyot dan getar-getar tidak stabil karena ketarik gaya gravitasi bumi saat servo mencoba berhenti menahan posisi panel. Kelemahan ini diperparah oleh pemrograman program awal yang belum dilengkapi dengan algoritma kendali umpan balik (*feedback loop*) yang matang, sehingga mikrokontroler tidak memiliki kapabilitas untuk mendeteksi serta mengoreksi penyimpangan posisi fisik tersebut secara mandiri.

Meskipun dihadapkan pada kendala mekanik dan pemrograman yang belum sempurna, penelitian purwarupa *solar tracker* ini memiliki nilai urgensi dan tingkat kepentingan kelayakan yang sangat tinggi dalam pengembangan teknologi PLTS skala domestik. Seluruh fluktuasi data dan eror mekanis yang terjadi terbukti masih berada di dalam batas toleransi operasional yang aman, sehingga sama sekali tidak mengganggu atau melumpuhkan fungsionalitas utama dari pemrosesan energi listrik. Hal ini dibuktikan secara valid melalui kelancaran regulasi pengisian daya arus searah oleh modul *Solar Charge Controller* (SCC) ke dalam unit penyimpanan baterai aki kering. Selain itu, sistem *output* daya arus bolak-balik melalui modul inverter juga terbukti mampu menyuplai energi listrik secara konstan untuk menyalakan beban lampu AC berupa bohlam putih secara stabil, baik saat sistem beroperasi pada mode pelacakan otomatis sensoris maupun saat dikendalikan secara manual via IoT. Kesuksesan fungsional ini menegaskan bahwa sistem yang dirancang telah memenuhi kriteria dasar sebagai model penjejak matahari dua sumbu yang andal dan aplikatif.

PERSANTUNAN

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tak terhingga kepada kedua orang tua tercinta atas segala doa dan dukungan yang luar biasa, terutama kepada Ayah yang telah meluangkan waktu dan tenaganya untuk terjun langsung membantu dalam pengerjaan serta perakitan fisik alat solar tracker ini, serta kepada Ibu yang selalu melangitkan doa-doa terbaik demi kelancaran langkah penulis. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang mendalam kepada seseorang yang sangat berarti, yang telah hadir membantu membuka wawasan, memberikan dukungan penuh dalam segala hal, menyemangati di kala sulit, serta mendampingi penulis dalam mengambil setiap keputusan penting. Tak lupa, terima kasih penulis haturkan kepada teman-teman yang selalu memberikan bantuan, kebersamaan, dan dukungan solid sepanjang masa perkuliahan hingga selesainya penelitian ini. Kehadiran dan ketulusan bantuan dari semua pihak, baik dalam bentuk diskusi, kerja sama, maupun semangat, menjadi bagian terpenting dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, dan semoga segala kebaikan yang diberikan mendapat balasan yang melimpah dari Allah SWT.

DAFTAR PUSTAKA

- Aezwani, W., Abu Bakar, W., Man, M., Laila, N., Josdi, N., & Hasbi, Z. A. (2024). *Design of Solar Tracking System for Solar Panel Using Microcontroller Based on Internet of Things*. <https://doi.org/10.25299/IJSR.2023.11xxxx>
- Alhamzani, I., & Ibrohim Burhan, L. (2025). Pengembangan Energi Terbarukan melalui Panel Surya di Desa Tertinggal. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Dan Inovasi Teknologi Tepat Guna*, 1(2).
- Faris Hamidin, M., & Syafiq Sadun, A. (2023). The Development of IoT Automatic Solar Tracking System for Oriented Solar Cell Applications. *Progress in Engineering Application and Technology*, 4(2), 186–195. <https://doi.org/10.30880/peat.2023.04.02.018>
- Hasrul, R. (2021). Analisis Efisiensi Panel Surya Sebagai Energi Alternatif. *Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri*, 5(2), 79–87.
- Hidayati, Q., Yanti, N., & Jamal, N. (2020). *Sistem Pembangkit Panel Surya dengan Solar tracker Dual Axis*.
- Karjadi, M. (2025). Optimalisasi Efisiensi Panel Surya dalam Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Skala Rumah Tangga. *Ranah Research*, 7(4). <https://doi.org/10.38035/rrij.v7i4>
- Majhool, M. H., Salim Alrikabi, H. T. H., & Farhan, M. S. (2021). *Design and Implementation of Sunlight Tracking Based on the Internet of Things*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 877(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/877/1/012026>
- Niwanda, A., Kardiana, E., Arif, M., Rahmadani, P., Saufi, R. A., & Manik, S. M. (2025). Analisis Potensi Pemanfaatan Energi Matahari Melalui Panel Surya di Kota Medan. *Jurnal Ilmiah Pendidikan IPS*, 3(3), 01–11. <https://doi.org/10.62383/sosial.v3i3.967>
- Nur, I., Hairil, H., Hanim, F., & Nor, M. (2024). *Development of an IoT Based on Solar Tracking System*. 5(2), 95–103. <https://doi.org/10.30880/peat.2024.05.02.010>

- Nurdiansyah, M., Chomper Sinurat, E., Bakri, M., Ahmad, I., & Bagus Prasetyo, A. (2020). Sistem Kendali Rotasi Matahari pada Panel Surya Berbasis Arduino Uno. In *JTIKOM* (Vol. 1, Number 2).
- Pawitra Teguh Dharma Priatam, P., Fitra Zambak, M., Suwarno, & Harahap, P. (2021). Analisa Radiasi Sinar Matahari Terhadap Panel Surya 50 WP. *Jurnal Teknik Elektro*, 4(1), 48–54. <https://doi.org/10.30596/rele.v4i1.7825>
- Saragih, F., Buaton, R., & Simanjuntak, M. (2024). Rancang Bangun *Solar tracker* Otomatis pada Pengisian Energi Panel Surya Berbasis *Internet of Things* (IoT). *Router : Jurnal Teknik Informatika Dan Terapan*, 2(3), 239–252. <https://doi.org/10.62951/router.v2i3.220>
- Setiana, H., Bening Kusumaningtyas, A., & Maulana, R. (2023). *Rancang Bangun PLTS Solar tracker Dual Axis Berbasis IoT Menggunakan ESP32*.
- Wibowo, H., Bow, Y., & Sitompul, C. R. (2021). Performance Comparison Analysis of Fixed and Solar-Tracker Installed Panel at PV System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 709(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/709/1/012003>

