

Rancang Bangun Solar Tracker Single-Axis Berbasis ESP32 pada Sistem Otomasi Concentrated Solar Power

Muhammad Dzahabi¹, Perdana Putera^{2*}, Rina Novita³, Sri Aulia Novita⁴

*Email corresponding author: perdana@politanipyk.ac.id

^{1,2,3,4}Jurusan Rekayasa Pertanian dan Komputer, Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh

Article history: Received: 20 Juli 2026 | Revised: 14 Oktober 2026 | Accepted: 16 Oktober 2026

Abstract. Concentrated Solar Power (CSP) systems require solar tracking to maintain the direction of reflected solar radiation toward the receiver. This study aimed to design and test an ESP32-based single-axis solar tracker integrated with receiver temperature monitoring and Internet of Things (IoT)-based data logging. The novelty of this study lies in integrating reflector tracking, real-time thermal monitoring, and digital data logging into a single CSP prototype. Experimental testing involved Light Dependent Resistor (LDR) sensors, a DC linear actuator, a Type-K thermocouple, and digital monitoring platforms. The results showed that the actuator provided an estimated reflector movement range of 0°–130°, with 72.58% of LDR measurements meeting the defined balance criterion. The receiver temperature reached a maximum of 91.51 °C, with an average of 53.38 °C. Functional testing achieved a 100% success rate across 11 test items, while data logging achieved a success rate of 99.20%. These findings demonstrate the feasibility of integrating reflector tracking, thermal monitoring, and data logging into a single prototype. However, further evaluation of thermal performance requires quantitative solar irradiance measurements and direct comparison with a static reflector.

Keywords - Concentrated Solar Power; ESP32; Internet of Things; single-axis solar tracker; receiver temperature.

Abstrak. Sistem Concentrated Solar Power (CSP) memerlukan pelacakan matahari untuk menjaga arah pantulan radiasi menuju receiver. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji solar tracker single-axis berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan pemantauan suhu receiver dan pencatatan data berbasis Internet of Things (IoT). Kebaruan penelitian terletak pada integrasi pelacakan reflektor, pemantauan termal secara waktu nyata, dan pencatatan data digital dalam satu prototipe CSP. Pengujian dilakukan melalui integrasi sensor Light Dependent Resistor (LDR), aktuator linear DC, termokopel tipe-K, dan platform pemantauan digital. Hasil menunjukkan bahwa aktuator menghasilkan estimasi rentang gerak reflektor 0°–130°, sebanyak 72,58% data LDR memenuhi kriteria keseimbangan, dan suhu receiver mencapai maksimum 91,51 °C dengan rata-rata 53,38 °C. Pengujian fungsional mencapai keberhasilan 100% pada 11 butir uji, sedangkan keberhasilan pencatatan data mencapai 99,20%. Hasil ini menunjukkan bahwa pelacakan reflektor, pemantauan termal, dan pencatatan data dapat diintegrasikan dalam satu prototipe. Namun, evaluasi peningkatan kinerja termal masih memerlukan pengukuran iradiasi matahari dan perbandingan dengan reflektor statis.

Kata kunci - Concentrated Solar Power; ESP32; Internet of Things; single-axis solar tracker; suhu receiver.

PENDAHULUAN

Kebutuhan terhadap energi terbarukan terus meningkat seiring bertambahnya konsumsi energi, keterbatasan sumber energi fosil, serta tuntutan pengurangan emisi gas rumah kaca. Dalam konteks Indonesia, energi surya menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang potensial dikembangkan karena ketersediaan radiasi matahari relatif melimpah sepanjang tahun. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral melalui *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2024* menegaskan pentingnya penguatan data dan pengembangan sektor energi sebagai bagian dari perencanaan energi nasional[1]. Metode pemanfaatan energi surya tidak hanya terbatas pada sistem fotovoltaik, tetapi juga dapat dilakukan melalui teknologi termal seperti *concentrated solar power* (CSP), yaitu sistem yang memusatkan radiasi matahari untuk menghasilkan energi panas[2], [3].

Concentrated solar power bekerja dengan memanfaatkan reflektor atau konsentrator untuk mengarahkan radiasi matahari menuju receiver. Energi radiasi yang terkonsentrasi pada receiver kemudian dikonversi menjadi energi panas. Berbeda dengan sistem fotovoltaik yang langsung mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik, CSP lebih menekankan proses konversi energi surya menjadi energi termal. Oleh karena itu, performa CSP sangat dipengaruhi oleh efektivitas sistem optik, posisi reflektor, kemampuan pemusatan radiasi, dan kondisi termal pada receiver [2], [3]. Kajian perkembangan CSP juga menunjukkan bahwa sistem ini masih relevan dikembangkan karena memiliki potensi integrasi dengan penyimpanan energi termal, meskipun membutuhkan presisi optik dan kendali posisi yang baik [4], [5], [6].

Permasalahan utama pada CSP skala prototipe adalah penggunaan reflektor statis yang tidak mampu mempertahankan arah pantulan radiasi matahari menuju *receiver* sepanjang hari. Posisi semu matahari berubah dari timur ke barat, sehingga sudut datang radiasi terhadap permukaan reflektor juga berubah. Ketika sudut datang berubah, arah pantulan ikut bergeser dan titik fokus dapat tidak lagi tepat mengenai *receiver*. Pergeseran titik fokus tersebut menyebabkan konsentrasi panas menurun dan suhu *receiver* menjadi tidak stabil. Kondisi ini menunjukkan bahwa reflektor statis memiliki keterbatasan karena hanya bekerja optimal pada posisi matahari tertentu, sedangkan sistem CSP membutuhkan keterarahan reflektor yang lebih adaptif terhadap perubahan posisi matahari [2], [4].

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mengatasi keterbatasan reflektor statis adalah penerapan *solar tracker*. Sistem *solar tracker* berfungsi menggerakkan panel, kolektor, atau reflektor agar mengikuti perubahan arah datang cahaya matahari. Berdasarkan jumlah sumbu geraknya, sistem pelacak matahari dapat dibedakan menjadi *single-axis* dan *dual-axis*. *Single-axis tracker* hanya bergerak pada satu sumbu, sehingga konstruksinya lebih sederhana, biaya pembuatan relatif lebih rendah, konsumsi daya aktuator lebih kecil, dan sistem kendalinya lebih mudah dibandingkan *dual-axis tracker*. Pulungan et al. menunjukkan bahwa penggunaan *single-axis tracker* pada panel surya dapat meningkatkan penerimaan energi dibandingkan sistem tetap [7]. De Sá Campos dan Tiba menjelaskan bahwa optimasi posisi pada *single-axis tracker* dapat digunakan untuk meningkatkan pengumpulan energi dengan tetap mempertimbangkan kebutuhan gerak sistem [8].

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa solar tracker single-axis dapat dikembangkan dalam bentuk prototipe sederhana. Prasetyo et al. membandingkan kinerja panel surya dengan solar tracker dan tanpa solar tracker untuk mengevaluasi pengaruh pelacakan terhadap penerimaan energi [9]. Putra Bumi et al. merancang solar tracker single-axis menggunakan motor DC sebagai penggerak, sedangkan Kurniawan dan Taufik mengembangkan solar tracker sumbu tunggal berbasis motor stepper dan real time clock; kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem satu sumbu dapat dibuat dengan mekanisme yang relatif sederhana [10], [11]. Sementara itu, Paliyal et al. menegaskan bahwa pengembangan automatic solar tracking system perlu mempertimbangkan keseimbangan antara akurasi pelacakan, konsumsi energi, kompleksitas mekanik, dan keandalan sistem [12], [13]. Huang et al. juga menunjukkan bahwa strategi pelacakan single-axis berkaitan erat dengan geometri, arah radiasi, dan potensi bayangan pada sistem surya [14]. Berdasarkan pertimbangan tersebut, single-axis tracker dipilih dalam penelitian ini karena sesuai untuk prototipe CSP yang membutuhkan sistem pelacakan sederhana, stabil, dan mudah diintegrasikan dengan sistem monitoring.

Selain keterarahan reflektor, parameter termal pada *receiver* juga perlu dipantau karena suhu *receiver* menunjukkan keberhasilan proses pemusatan radiasi matahari menjadi energi panas. Tanpa monitoring suhu secara kontinu, evaluasi kinerja CSP menjadi kurang objektif karena penurunan suhu dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti perubahan intensitas radiasi, ketidaktepatan arah pantulan, rugi-rugi panas, gangguan angin, atau posisi sensor yang kurang stabil. Oleh karena itu, monitoring suhu *receiver* secara *real-time* diperlukan agar perubahan suhu dapat diamati berdasarkan data, bukan hanya pengamatan visual. Data suhu yang terekam secara berkala juga dapat digunakan untuk menilai hubungan antara respons pelacakan reflektor dan karakteristik termal *receiver* [15], [16].

Perkembangan mikrokontroler dan Internet of Things (IoT) memungkinkan sistem pelacakan dan monitoring digabungkan dalam satu perangkat. ESP32 banyak digunakan dalam pengembangan perangkat IoT karena memiliki kemampuan pemrosesan data, konektivitas Wi-Fi, antarmuka sensor, dan kemampuan pengiriman data ke platform digital [17]. El-Khozondar et al. menunjukkan bahwa ESP32 dapat digunakan pada sistem monitoring energi cerdas berbasis mikrokontroler [15]. Penelitian Inayah et al., Wijoseno et al., Lorozeby dan Krismadinata, serta Kurniawan et al. juga memperlihatkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT dapat digunakan untuk menampilkan dan mencatat data energi surya maupun data sensor secara digital [18], [19], [20], [21]. Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai pusat kendali untuk membaca dua sensor LDR, mengendalikan aktuator linear melalui driver L298N, membaca suhu receiver melalui thermocouple tipe-K dan modul MAX6675, serta mengirimkan data ke Firebase, aplikasi Kodular, dan Google Sheets. Dengan integrasi tersebut, sistem tidak hanya melakukan pelacakan arah cahaya, tetapi juga menghasilkan data pengujian yang dapat dipantau dan dianalisis.

Meskipun penelitian mengenai *solar tracker* dan monitoring berbasis IoT telah banyak dilakukan, sebagian besar masih berfokus pada sistem fotovoltaik. Pulungan et al., Prasetyo et al., dan Putra Bumi et al. lebih menitikberatkan kajian pada peningkatan penerimaan energi atau daya keluaran panel surya [7], [9], [10]. Setiana et al. telah mengembangkan *solar tracker dual-axis* berbasis ESP32 dan IoT, tetapi objek penelitiannya masih diarahkan pada sistem PLTS, bukan pada sistem termal CSP [22]. Sementara itu, penelitian akuisisi suhu dan data logging berbasis ESP32 umumnya belum secara khusus diarahkan untuk memantau suhu *receiver* pada sistem CSP skala prototipe [16]. Dengan demikian, celah penelitian terletak pada belum banyaknya sistem yang mengintegrasikan *solar tracker single-axis*, sensor LDR, aktuator linear, ESP32, *thermocouple* MAX6675, Firebase, Kodular, dan Google Sheets untuk mendukung monitoring suhu *receiver* pada sistem CSP. Beberapa penelitian terkait bisa dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Penelitian terkait.

Rujukan	Objek	Temuan relevan	Posisi penelitian ini
Pulungan et al. [7]	Panel PV single-axis	Membahas peningkatan daya panel	Penelitian ini menerapkan tracking pada reflektor CSP
Putra Bumi et al.[10]	Tracker motor DC	Fokus rancang bangun tracker	Penelitian ini memakai aktuator linear dan IoT
Setiana et al. [22]	Dual-axis ESP32-IoT pada PLTS	Monitoring IoT untuk PLTS	Penelitian ini diarahkan ke CSP dan suhu receiver
Pratama et al. [16]	ESP32 dan Google Sheets	Akuisisi data suhu digital	Diterapkan untuk logging suhu receiver CSP
Al-Alami et al. [2]	Teknologi CSP	Menjelaskan status teknologi CSP dan pentingnya konsentrator serta receiver	Menguatkan dasar bahwa suhu receiver menjadi indikator awal performa termal CSP
Kurkute dan Priyam [3]	Review teknologi CSP	Membahas teknologi CSP dan teknik peningkatan performa	Menguatkan pembahasan bahwa ketepatan pemusatan radiasi memengaruhi kondisi termal receiver
Paliyal et al. [12]	Review automatic solar tracking	Membahas akurasi pelacakan, konsumsi energi, kompleksitas, dan keandalan sistem	Menjadi dasar pembahasan toleransi kendali LDR dan kestabilan aktuator
Hercog et al. [17]	Perangkat IoT berbasis ESP32	Membahas desain dan implementasi perangkat IoT berbasis ESP32	Mendukung penggunaan ESP32 sebagai pusat kendali dan pengiriman data
El-Khozondar et al. [15]	Monitoring energi berbasis ESP32	Menunjukkan penggunaan ESP32 untuk sistem monitoring energi cerdas	Mendukung integrasi ESP32 dengan monitoring suhu dan pencatatan data
Desmira et al. [23]	Sensor LDR	Membahas pemanfaatan LDR sebagai sensor cahaya	Mendukung penggunaan LDR kiri-kanan untuk membaca selisih intensitas cahaya
Kurniawan dan Taufik [11]	Solar tracker sumbu tunggal	Rancang bangun solar tracker berbasis motor stepper dan RTC	Menjadi pembanding mekanisme pelacakan satu sumbu pada prototipe

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan membangun *solar tracker single-axis* berbasis ESP32 pada sistem otomasi CSP, mengintegrasikan sistem pelacakan reflektor dengan monitoring suhu *receiver* berbasis IoT, serta menganalisis kinerja sistem berdasarkan rentang gerak reflektor, respons sensor LDR, kestabilan suhu *receiver*, keberhasilan fungsional sistem, dan keberhasilan data logging. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengembangan prototipe CSP yang tidak hanya mampu menggerakkan reflektor mengikuti perubahan arah cahaya, tetapi juga mampu memantau suhu *receiver* secara *real-time* dan menyimpan data pengujian secara digital. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan menjadi dasar pengembangan sistem CSP skala prototipe yang lebih adaptif, terukur, dan mudah dipantau.

METODE

A. Jenis dan Lokasi Penelitian

Penelitian menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan model ADDIE. Model ini dipilih karena penelitian berorientasi pada pengembangan produk, yaitu prototipe *solar tracker single-axis* berbasis ESP32 pada sistem CSP. Penelitian dilaksanakan di lingkungan kampus Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh selama empat bulan. Tahapan penelitian meliputi analisis kebutuhan, perancangan sistem, pengembangan prototipe, implementasi pengujian, dan evaluasi kinerja.

Data pengujian utama diperoleh dari pengoperasian sistem secara terintegrasi. Pengujian dilakukan pukul 06.00-18.30 WIB, sedangkan data utama yang dianalisis adalah pukul 06.00-18.29 WIB. Analisis sudut efektif difokuskan pada pukul 08.00-16.00 WIB karena rentang tersebut mewakili lintasan gerak reflektor dari sisi timur menuju barat.

Data hasil pengujian diringkas dalam interval 1 jam agar pola perubahan suhu, respons LDR, dan data logging dapat disajikan secara lebih padat, jelas, dan mudah dianalisis tanpa mengurangi kecenderungan utama hasil pengujian.

B. Prosedur Pengembangan Model ADDIE

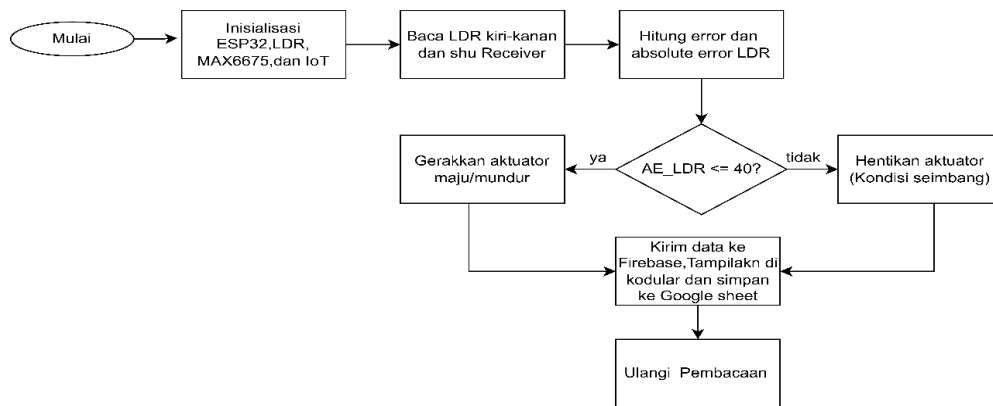
Pengembangan *solar tracker single-axis* berbasis ESP32 dilakukan menggunakan model ADDIE yang meliputi lima tahap, yaitu *Analysis, Design, Development, Implementation, dan Evaluation*.

1. Analysis (Analisis)

Tahap analisis dilakukan untuk mengidentifikasi kebutuhan sistem pelacakan matahari pada reflektor parabola, pengendalian aktuator, pemantauan suhu *receiver*, dan pencatatan data secara digital. Hasil analisis menjadi dasar penentuan kebutuhan mekanis, elektronik, dan perangkat lunak prototipe.

2. Design (Perancangan)

Perancangan meliputi sistem mekanis, elektronik, dan perangkat lunak. Sistem mekanis menggunakan reflektor parabola aluminium reflektif berdiameter bukaan 120 cm, rangka penyangga,udukan *receiver*,udukan sensor LDR, dan aktuator linear DC. Sistem elektronik terdiri atas ESP32, dua sensor LDR, driver motor L298N, termokopel tipe-K, modul MAX6675, serta catu daya. Perangkat lunak dirancang untuk mengolah pembacaan sensor, menentukan arah gerak aktuator, membaca suhu *receiver*, dan mengirimkan data ke platform pemantauan.. Alur kerja sistem *solar tracker single-axis* ditunjukkan pada Gambar 1. Diagram tersebut menjelaskan tahapan kerja sistem, mulai dari pembacaan posisi matahari oleh sensor, pemrosesan data oleh mikrokontroler, hingga pengendalian aktuator untuk mengarahkan reflektor agar mengikuti pergerakan matahari.



Gambar 1. Flowchart alur kerja sistem *solar tracker single-axis*

Desain mekanis alat *solar tracker single-axis* ditampilkan pada Gambar 2. Desain tersebut memperlihatkan susunan reflektor, rangka penopang, receiver, serta mekanisme penggerak yang digunakan untuk mengubah posisi reflektor pada satu sumbu sesuai dengan arah pergerakan matahari.



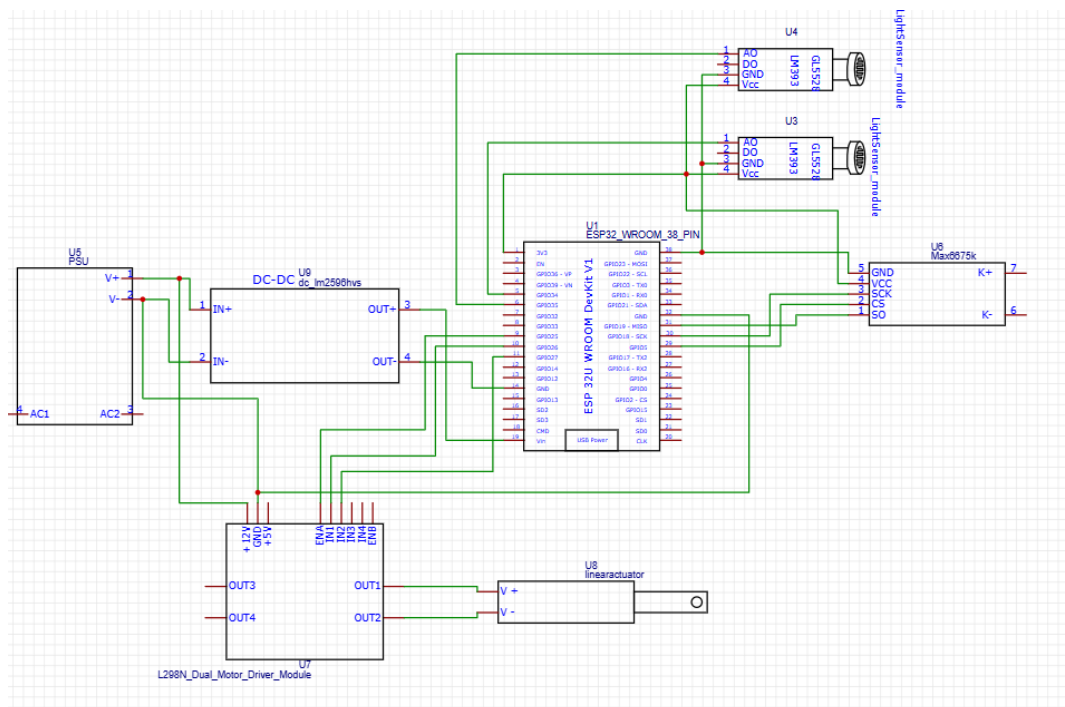
Gambar 2. Desain Alat *Solar Tracker Single-Axis*.

Spesifikasi utama komponen penyusun sistem disajikan pada Tabel 2. Tabel tersebut memuat jenis komponen, ukuran atau material yang digunakan, serta fungsi masing-masing komponen dalam mendukung proses pemusatan radiasi matahari menuju receiver.

Tabel 2. Spesifikasi utama sistem.

No.	Komponen	Spesifikasi	Fungsi
1	Reflektor	Kedalaman (t) = 21,5 cm Diameter bukaan reflector = 1,2 m ² Panjang busur reflector = 1,3 m Luas reflektor = $2\pi \cdot R \cdot t \approx 1.13 \text{ m}^2$	Memusatkan radiasi matahari ke titik fokus
2	Material reflektor	Aluminium	Memantulkan radiasi matahari
3	Titik fokus	$\approx 0.94 \text{ m}$	
4	Receiver/absorber	Pipa atau batang logam Posisi peletakan receiver $\pm 60\text{cm}$ dari dasar	Menyerap panas hasil konsentrasi cahaya
5	Rangka penopang	Tiang dan kaki penyangga berbahan besi	Menopang reflektor dan receiver

Rangkaian sistem kendali *solar tracker single-axis* ditunjukkan pada Gambar 3. Skematik tersebut memperlihatkan hubungan antara sensor, mikrokontroler, driver, aktuator, dan sumber daya yang digunakan untuk menjalankan proses pelacakan matahari secara otomatis.



Gambar 3. Skematik rangkaian sistem kendali.

3. Development (Pengembangan)

Tahap pengembangan dilakukan melalui pembuatan dan perakitan struktur mekanis, pemasangan komponen elektronik, serta pemrograman ESP32 sesuai rancangan. Selanjutnya, sistem diintegrasikan dengan Firebase Realtime Database, aplikasi Kodular, dan Google Sheets untuk mendukung pemantauan serta pencatatan data pengujian.

4. Implementation (Implementasi)

Prototipe dioperasikan untuk menguji respons sensor LDR, pengendalian aktuator, pembacaan suhu *receiver*, dan pengiriman data. Pengujian dilaksanakan pada 25 Mei 2026 pukul 06.00–18.30 WIB. Data yang dianalisis mencakup periode pukul 06.00–18.29 WIB, sedangkan analisis sudut pelacakan difokuskan pada pukul 08.00–16.00 WIB.

5. Evaluation (Evaluasi)

Evaluasi dilakukan berdasarkan hasil pengujian, meliputi keseimbangan pembacaan sensor LDR, estimasi rentang gerak reflektor, perubahan suhu *receiver*, keberhasilan fungsi sistem, dan keberhasilan pencatatan data. Estimasi sudut gerak dihitung berdasarkan panjang langkah aktuator dan faktor konversi sudut. Karena sistem tidak menggunakan sensor sudut, nilai sudut yang diperoleh merupakan estimasi, bukan hasil pengukuran langsung. Kondisi implementasi dan pengujian sistem *solar tracker single-axis* disajikan pada Tabel 3. Tabel tersebut memuat komponen utama, waktu pengujian, parameter yang dianalisis, serta media monitoring dan pencatatan data.

Tabel 3. Kondisi implementasi sistem.

Aspek	Keterangan
Sistem yang diuji	Solar tracker single-axis pada sistem CSP
Komponen utama	ESP32, LDR, aktuator linear, L298N, thermocouple MAX6675, power supply,
Fungsi utama	Melacak arah cahaya matahari dan monitoring suhu receiver
Waktu /tanggal pengujian keseluruhan	06.00-18.30 WIB / 25 mei 2026
Data utama dianalisis	06.00-18.29 WIB
Waktu efektif analisis sudut	08.00-16.00 WIB
Interval ringkasan data	1 jam
Data yang dicatat	LDR kiri, LDR kanan, suhu receiver, status aktuator, waktu pengujian
Media monitoring	Firebase Realtime Database dan aplikasi Kodular
Media data logging	Google Sheets

C. Instrumen Pengujian

Instrumen pengujian meliputi sensor LDR untuk membaca perbedaan intensitas cahaya kiri-kanan, thermocouple tipe-K dengan MAX6675 untuk membaca suhu receiver, busur derajat untuk kalibrasi sudut reflektor, thermometer sebagai pembanding dokumentasi suhu, dan solar power meter sebagai dokumentasi kondisi intensitas cahaya saat pengujian. Data operasional disimpan melalui Google Sheets, sedangkan pemantauan visual dilakukan melalui Firebase dan aplikasi Kodular. Penggunaan LDR sebagai sensor cahaya dan konverter daya/step-down sebagai pendukung catu daya mengacu pada prinsip dasar sensor cahaya dan elektronika daya yang relevan dengan sistem berbasis mikrokontroler [23], [24].

D. Teknik Analisis Data

Analisis sudut reflektor dilakukan berdasarkan hubungan antara panjang aktuator dan sudut reflektor. Karena sudut aktual tidak direkam terus-menerus menggunakan sensor sudut, hasil sudut pada artikel ini dinyatakan sebagai estimasi sudut berbasis panjang aktuator. Konstanta perubahan sudut dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$K_{\theta} = \frac{\theta_{maks}}{L_{maks}} \quad (1)$$

dengan K_{θ} adalah konstanta perubahan sudut ($^{\circ}/cm$), θ_{maks} adalah sudut maksimum reflektor ($^{\circ}$), dan L_{maks} adalah panjang maksimum aktuator (cm). Estimasi sudut reflektor berdasarkan panjang aktuator dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$\theta_{akt} = L_{akt} \times K_{\theta} \quad (2)$$

dengan θ_{akt} adalah estimasi sudut reflektor ($^{\circ}$), L_{akt} adalah panjang aktual aktuator (cm), dan K_{θ} adalah konstanta perubahan sudut. Perubahan sudut acuan terhadap waktu efektif dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$\Delta\theta_{1h} = \left(\frac{\theta_{maks}}{t_{efektif}} \right) \times 1 \quad (3)$$

Analisis LDR dilakukan dengan menghitung selisih pembacaan LDR kiri dan kanan serta nilai *absolute error*. Perhitungan tersebut ditunjukkan pada Persamaan (4) dan Persamaan (5).

$$E_{LDR} = LDR_{kiri} - LDR_{kanan} \quad (4)$$

$$AE_{LDR} = |E_{LDR}| \quad (5)$$

Kondisi seimbang ditentukan ketika $AE_{LDR} \leq 40$. Persentase kondisi seimbang dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$P_{seimbang} = \frac{N_{seimbang}}{N_{total}} \times 100\% \quad (6)$$

Kestabilan suhu dianalisis menggunakan suhu rata-rata dan fluktuasi suhu, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (7) dan Persamaan (8).

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (7)$$

$$\Delta T = T_{maks} - T_{min} \quad (8)$$

Keberhasilan fungsi sistem dan data logging dihitung berdasarkan rasio data berhasil terhadap total data uji, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (9) dan Persamaan (10).

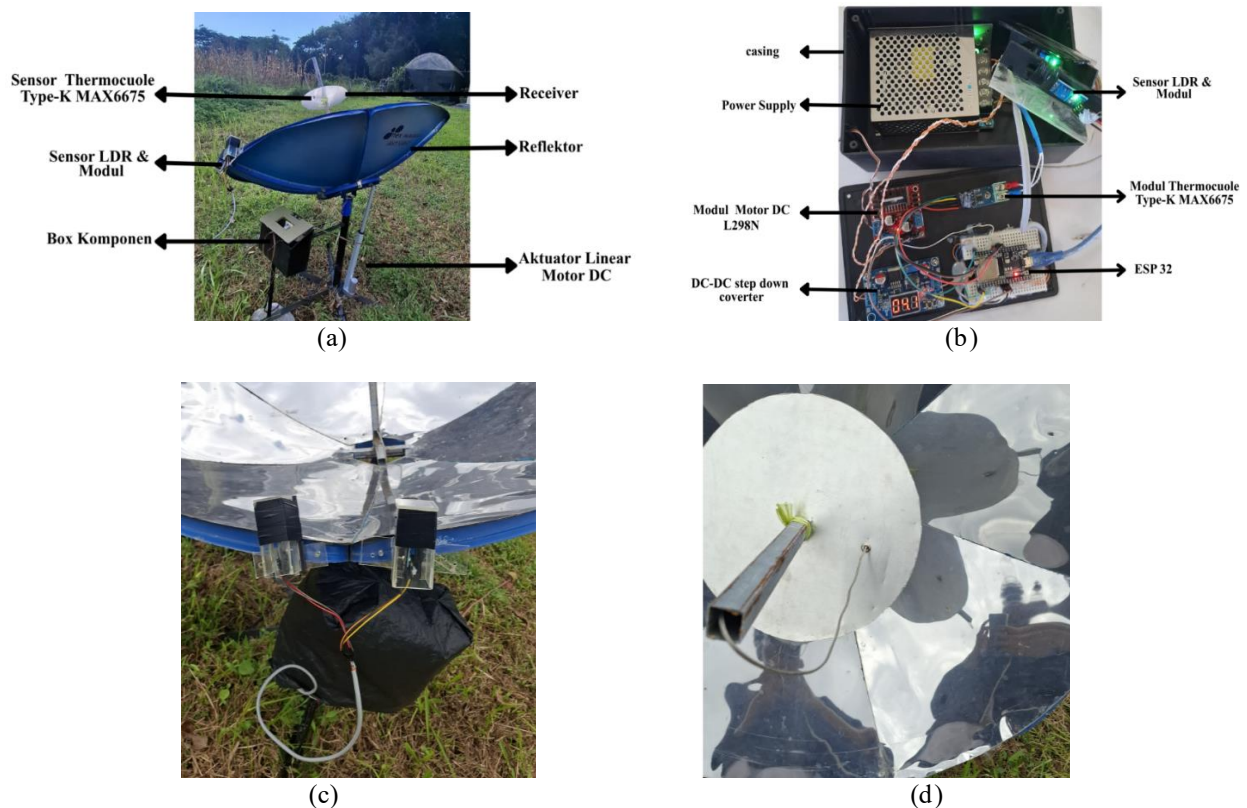
$$P_{fungsi} = \frac{N_{berhasil}}{N_{uji}} \times 100\% \quad (9)$$

$$P_{logging} = \frac{N_{tersimpan}}{N_{seharusnya}} \times 100\% \quad (10)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengembangan Prototipe

Prototipe berhasil direalisasikan sebagai sistem *solar tracker single-axis* pada CSP. Reflektor parabola dipasang pada rangka yang digerakkan oleh aktuator linear. Sensor LDR ditempatkan pada sisi kiri dan kanan untuk membaca perbedaan intensitas cahaya. ESP32 memproses pembacaan sensor dan mengendalikan aktuator melalui driver L298N. Sensor *thermocouple* tipe-K pada *receiver* membaca suhu hasil pemusatan radiasi, kemudian data dikirim ke Firebase, ditampilkan pada Kodular, dan disimpan di Google Sheets. Integrasi ini relevan dengan karakteristik perangkat ESP32 sebagai pengendali dan pengirim data sensor pada sistem IoT, sedangkan penggunaan *thermocouple* dan pencatatan data digital mendukung pemantauan suhu secara terukur [15], [16], [17]. Prototipe dan bagian utama sistem *solar tracker single-axis* ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Prototipe *solar tracker single-axis* pada sistem CSP (a) *solar tracker single-axis* (b) rangkaian elektronik (c) kedudukan sensor LDR (d) kedudukan sensor termokopel.

B. Rentang Gerak dan Estimasi Sudut Reflektor

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa aktuator linear dengan panjang maksimum 28 cm menghasilkan estimasi rentang sudut reflektor 0° – 130° , dengan konstanta konversi $4,64^{\circ}/\text{cm}$. Pada periode efektif 08.00–16.00 WIB, perubahan sudut acuan sebesar $16,25^{\circ}$ per jam digunakan sebagai dasar pergerakan reflektor. Namun, karena sudut aktual belum diukur secara langsung, hasil ini menunjukkan kemampuan mekanis aktuator, bukan bukti akurasi pelacakan matahari [10], [11], [12]. Hubungan antara perubahan panjang aktuator linear dan estimasi sudut reflektor disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Konversi panjang aktuator terhadap estimasi sudut reflektor.

No	Panjang aktuator (cm)	Sudut (°)	Keterangan
1	0	0,00	Posisi awal reflektor
2	2	9,28	Perubahan sudut kecil
3	4	18,56	Reflektor mulai bergerak
4	6	27,84	Posisi rendah
5	8	37,12	Posisi menengah awal
6	10	46,40	Posisi menengah
7	12	55,68	Posisi menengah
8	14	64,96	Setengah rentang gerak
9	16	74,24	Posisi menengah atas
10	18	83,52	Posisi menengah atas
11	20	92,80	Posisi tinggi
12	22	102,08	Posisi tinggi
13	24	111,36	Mendekati maksimum
14	26	120,64	Mendekati sudut maksimum
15	28	130,00	Sudut maksimum reflektor

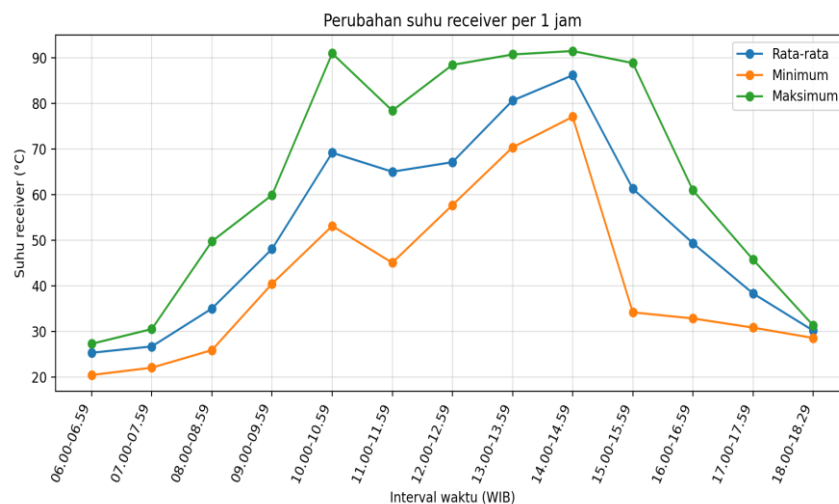
C. Kestabilan Suhu Receiver

Pengujian menghasilkan 744 data suhu receiver pada periode 06.00–18.29 WIB. Suhu minimum tercatat sebesar 20,41 °C, suhu maksimum 91,51 °C, dan suhu rata-rata 53,38 °C, dengan rentang perubahan suhu sebesar 71,10 °C. Suhu meningkat sejak pagi dan mencapai nilai tertinggi pada interval 14.00–14.59 WIB, kemudian menurun menjelang sore. Pola tersebut dapat berkaitan dengan perubahan radiasi matahari yang diterima reflektor, kesesuaian arah pantulan terhadap receiver, serta perpindahan panas ke lingkungan. Namun, karena data iradiasi matahari belum dianalisis secara kuantitatif dan belum tersedia pengujian pembandingan menggunakan reflektor statis, kontribusi masing-masing faktor belum dapat dipisahkan. Oleh karena itu, suhu receiver pada penelitian ini menjadi indikator awal respons termal sistem, bukan bukti kuantitatif peningkatan efisiensi termal CSP [2], [3], [6]. Ringkasan nilai rata-rata, minimum, maksimum, dan fluktuasi suhu receiver pada setiap interval pengujian disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Ringkasan suhu receiver pada interval 1 jam.

Interval	Rata-rata (°C)	Min (°C)	Maks (°C)	Fluktuasi (°C)
06.00-06.59	25,29	20,41	27,26	6,85
07.00-07.59	26,68	22,02	30,50	8,48
08.00-08.59	35,01	25,88	49,75	23,87
09.00-09.59	48,08	40,44	59,91	19,46
10.00-10.59	69,19	53,11	90,99	37,88
11.00-11.59	65,03	45,05	78,43	33,38
12.00-12.59	67,12	57,70	88,47	30,77
13.00-13.59	80,64	70,37	90,75	20,38
14.00-14.59	86,19	77,07	91,51	14,44
15.00-15.59	61,29	34,16	88,87	54,71
16.00-16.59	49,34	32,82	60,95	28,13
17.00-17.59	38,31	30,81	45,75	14,94
18.00-18.29	30,16	28,54	31,30	2,76

Perubahan rata-rata suhu receiver pada setiap interval satu jam selama proses pengujian ditunjukkan pada Gambar 5. Grafik tersebut memperlihatkan pola kenaikan dan penurunan suhu receiver dari pagi hingga sore hari.



Gambar 5. Grafik perubahan suhu receiver per 1 jam.

Fluktuasi suhu tidak hanya dipengaruhi oleh gerak reflektor, tetapi juga oleh perubahan radiasi matahari, awan, arah angin, konveksi alami, serta kestabilan kontak sensor pada permukaan *receiver*. Oleh karena itu, data suhu digunakan sebagai indikator performa termal awal, bukan sebagai perhitungan efisiensi termal penuh. Dengan demikian, hasil suhu pada penelitian ini digunakan sebagai indikator awal keberhasilan konsentrasi panas, sedangkan perhitungan efisiensi termal penuh masih memerlukan data iradiasi matahari yang lebih terstruktur dan pembandingan sistem statis [2], [3], [6].

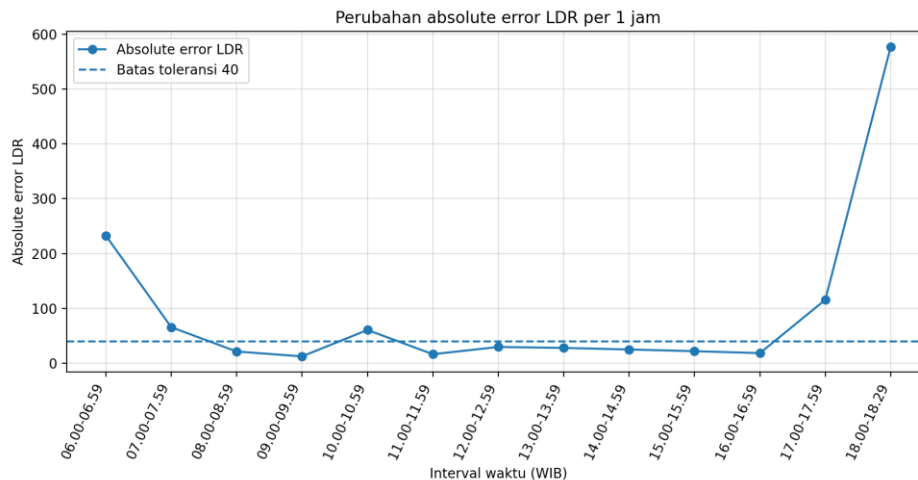
D. Kinerja Sensor LDR

Analisis terhadap 744 data menunjukkan bahwa 540 data memenuhi batas toleransi ($AE_{\{LDR\}} \leq 40$), sehingga persentase kondisi seimbang mencapai 72,58%. Hasil ini menunjukkan bahwa selisih pembacaan sensor LDR kiri dan kanan berada dalam batas yang ditetapkan pada sebagian besar pengamatan, terutama pada rentang 08.00–16.59 WIB. Sebaliknya, nilai rata-rata ($AE_{\{LDR\}}$) meningkat pada awal pagi, interval 10.00–10.59 WIB, dan menjelang sore; pada interval 18.00–18.29 WIB, nilainya mencapai 577,28. Pola tersebut mengindikasikan bahwa perbedaan pembacaan sensor lebih besar pada periode tertentu, yang mungkin berkaitan dengan perubahan intensitas atau arah datang cahaya dan bayangan pada sensor. Karena intensitas cahaya tidak dianalisis sebagai data kuantitatif yang terstruktur, faktor penyebab tersebut belum dapat dipastikan secara terpisah. Dengan demikian, persentase 72,58% menunjukkan tingkat pemenuhan kriteria keseimbangan sensor, tetapi belum dapat langsung ditafsirkan sebagai akurasi pelacakan matahari. Penggunaan batas toleransi tetap relevan untuk mengurangi respons kendali terhadap selisih pembacaan yang kecil [12], [13], [23]. Nilai rata-rata galat absolut antara pembacaan LDR kiri dan LDR kanan pada setiap interval satu jam disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Ringkasan AE_{LDR} pada interval 1 jam

Interval	AE_{LDR} rata-rata	Batas toleransi	Kondisi
06.00-06.59	232,69	40	Perlu koreksi
07.00-07.59	65,62	40	Perlu koreksi
08.00-08.59	21,32	40	Seimbang
09.00-09.59	12,38	40	Seimbang
10.00-10.59	60,58	40	Perlu koreksi
11.00-11.59	16,37	40	Seimbang
12.00-12.59	29,61	40	Seimbang
13.00-13.59	27,84	40	Seimbang
14.00-14.59	25,00	40	Seimbang
15.00-15.59	21,89	40	Seimbang
16.00-16.59	18,38	40	Seimbang
17.00-17.59	115,71	40	Perlu koreksi
18.00-18.29	577,28	40	Perlu koreksi

Perubahan nilai galat absolut LDR selama periode pengujian ditunjukkan pada Gambar 6. Grafik tersebut memperlihatkan kemampuan sistem dalam mempertahankan keseimbangan pembacaan kedua sensor LDR pada setiap interval pengamatan.



Gambar 6. Grafik absolute error LDR per 1 jam.

Pada interval 09.00-09.59 WIB, AE_LDR rata-rata berada jauh di bawah batas toleransi sehingga sistem berada pada kondisi seimbang. Sebaliknya, pada interval 18.00-18.29 WIB AE_LDR meningkat tajam karena intensitas cahaya menurun dan arah datang cahaya tidak lagi optimal. Hasil ini memperlihatkan perlunya toleransi kendali agar aktuator tidak bergerak berulang akibat fluktuasi pembacaan kecil. Kondisi tersebut sejalan dengan tantangan umum pada sistem pelacak matahari berbasis sensor cahaya, yaitu perlunya kompromi antara sensitivitas sensor, stabilitas aktuator, dan perubahan intensitas cahaya harian [12], [13], [23].

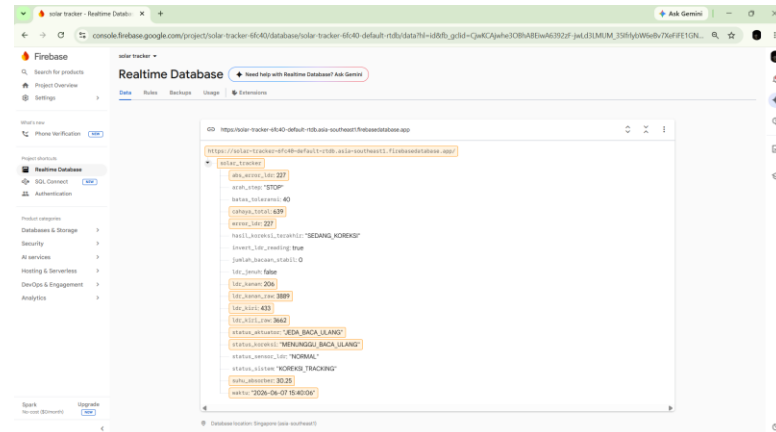
E. Pengujian Fungsional dan Monitoring IoT

Pengujian menunjukkan bahwa seluruh 11 fungsi utama sistem berjalan sesuai kriteria pengujian, sehingga keberhasilan fungsional mencapai 100% (11/11). Pada proses data logging, sebanyak 744 dari 750 data berhasil tersimpan, sedangkan 6 data tidak tercatat, sehingga tingkat keberhasilan pencatatan mencapai 99,20%. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi ESP32, Firebase, Kodular, dan Google Sheets mendukung pemantauan serta dokumentasi data selama pengujian. Meskipun demikian, keberhasilan fungsional 100% tidak berarti seluruh data berhasil direkam, sebagaimana terlihat dari enam data yang hilang. Kehilangan data tersebut mungkin berkaitan dengan koneksi jaringan, keterlambatan server, atau proses sinkronisasi, tetapi penyebabnya belum dapat dipastikan tanpa pencatatan log komunikasi. Oleh karena itu, penyimpanan lokal sebagai cadangan dan mekanisme pengiriman ulang data perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan kontinuitas pencatatan [15], [16], [17]. Hasil pengujian setiap fungsi utama sistem disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Ringkasan pengujian fungsional sistem.

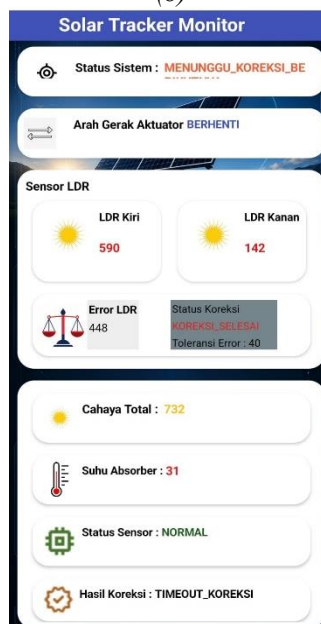
No.	Fungsi yang Diuji	Hasil Pengujian	Keterangan
1	Pembacaan sensor LDR kiri	Nilai LDR kiri terbaca dan tercatat.	Input pelacakan
2	Pembacaan sensor LDR kanan	Nilai LDR kanan terbaca dan tercatat.	Pembanding LDR kiri
3	Perhitungan absolute error LDR	Nilai selisih absolut kedua sensor berhasil dihitung.	Dasar evaluasi keseimbangan
4	Penentuan kondisi pelacakan	Sistem menentukan kondisi seimbang atau perlu koreksi.	Toleransi $AE_LDR \leq 40$
5	Kerja aktuator linear	Aktuator mampu menggerakkan reflektor pada satu sumbu.	Sudut gerak maksimum 130°
6	Kerja driver motor L298N	Driver mengendalikan arah gerak aktuator.	Maju, mundur, dan berhenti
7	Pembacaan suhu receiver	Suhu receiver terbaca dan tercatat.	Termokopel tipe-K dan MAX6675
8	Pengiriman data ESP32	Data sensor dikirim ke sistem monitoring.	Koneksi Wi-Fi
9	Tampilan aplikasi Kodular	Data berhasil ditampilkan pada aplikasi.	Monitoring melalui smartphone
10	Penyimpanan data Google Sheets	Sebanyak 744 dari 750 data berhasil tersimpan.	Keberhasilan data logging 99,20%
11	Integrasi sistem keseluruhan	Sistem mampu membaca, memproses, mengirim, dan menyimpan data.	Mendukung pengujian CSP

Keberhasilan proses pencatatan data melalui sistem IoT disajikan pada Tabel 8. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sebanyak 744 dari 750 data berhasil tersimpan, sehingga tingkat keberhasilan *data logging* mencapai 99,20%. Tampilan antarmuka yang digunakan untuk memantau dan menyimpan data sistem ditunjukkan pada Gambar 7. Data hasil pengukuran dikirim ke Firebase, ditampilkan melalui aplikasi Kodular, dan dicatat secara berkala pada Google Sheets.



(b)

No	Timestamp Server	Periode Muka ESP32	Periode Belakang ESP32	Jumlah Sampel	LDR Kiri Rate rata	LDR Kanan Rate rata	Error LDR Rate rata	Abes Error LDR Rate rata	Status Toleransi LDR	Cahaya Total Rate rata	Suhu Absorber Rate rata
1	5/300008 10:07:32	2026-05-30 10:08:36	2026-05-30 10:07:36	53	3599.72	3689	269.28	363.58	40	7468.72	33.1
2	5/300008 10:08:34	2026-05-30 10:07:34	2026-05-30 10:08:29	53	3667	3686.98	10.02	149.62	40	7723.98	38.0
3	5/300008 10:09:33	2026-05-30 10:08:36	2026-05-30 10:09:29	54	3624.74	3781.17	43.57	78.13	40	7605.91	40.1
4	5/300008 10:10:33	2026-05-30 10:09:36	2026-05-30 10:10:30	55	3462.84	3686.8	203.96	290.11	40	7188.64	37.9
5	5/300008 10:11:33	2026-05-30 10:10:36	2026-05-30 10:11:30	55	3137.09	4058.4	821.31	821.31	40	7195.49	35.5
6	5/300008 10:12:34	2026-05-30 10:11:36	2026-05-30 10:12:30	55	3665.6	3734.27	221.33	434.24	40	7605.87	38.2
7	5/300008 10:13:34	2026-05-30 10:12:36	2026-05-30 10:13:31	55	4009.05	4057.35	-48.29	53.45	40	8086.4	44.7
8	5/300008 10:14:35	2026-05-30 10:13:35	2026-05-30 10:14:31	56	4032.84	4063.57	-30.73	38.38	40	8096.41	51.0
9	5/300008 10:15:35	2026-05-30 10:14:37	2026-05-30 10:15:31	55	4057.2	4074.49	-7.29	7.65	40	8141.68	56.2
10	5/300008 10:16:35	2026-05-30 10:15:37	2026-05-30 10:16:31	55	4072.15	4071.38	0.76	3.67	40	8143.53	62.5
11	5/300008 10:17:35	2026-05-30 10:16:36	2026-05-30 10:17:32	56	4077.02	4066.71	10.3	10.3	40	8143.73	69.9
12	5/300008 10:18:36	2026-05-30 10:17:37	2026-05-30 10:18:33	56	4074.88	4061.8	13.05	13.38	40	8136.68	73.6
13	5/300008 10:19:36	2026-05-30 10:18:39	2026-05-30 10:19:32	54	4039.81	4053.44	-13.63	14.56	40	8053.25	68.0
14	5/300008 10:20:36	2026-05-30 10:19:36	2026-05-30 10:20:32	54	3978.37	4004.25	25.89	25.89	40	7982.63	59.6
15	5/300008 10:21:36	2026-05-30 10:20:38	2026-05-30 10:21:32	54	3887.49	3854.75	32.7	91.7	40	7742.22	54.7
16	5/300008 10:22:36	2026-05-30 10:21:38	2026-05-30 10:22:32	55	4056.44	4052.55	33.89	71.42	40	8055.99	54.2
17	5/300008 10:23:36	2026-05-30 10:22:38	2026-05-30 10:23:33	56	4079.02	4053.43	-14.41	18.62	40	8172.45	52.3
18	5/300008 10:24:37	2026-05-30 10:23:38	2026-05-30 10:24:33	55	4053.25	3568.95	484.31	524.93	40	7922.2	46.4
19	5/300008 10:25:36	2026-05-30 10:24:36	2026-05-30 10:25:24	56	4096.3	4047.57	19.23	22.95	40	8113.27	50.2
20	5/300008 10:26:36	2026-05-30 10:25:38	2026-05-30 10:26:35	56	4066.98	3975.11	98.87	108.05	40	8043.09	61.3
21	5/300008 10:27:36	2026-05-30 10:26:40	2026-05-30 10:27:35	56	4041.47	4062.49	-21.02	23.27	40	8103.96	6
22	5/300008 10:28:36	2026-05-30 10:27:40	2026-05-30 10:28:35	55	4059.65	4058.31	12.75	42.78	40	8086.96	50.6
23	5/300008 10:29:36	2026-05-30 10:28:40	2026-05-30 10:29:35	55	3874.09	3884	-9.91	90.85	40	7968.09	48.5
24	5/300008 10:30:36	2026-05-30 10:29:41	2026-05-30 10:30:36	55	4072.89	4075.25	-2.36	3.02	40	8148.15	5
25	5/300008 10:31:36	2026-05-30 10:30:41	2026-05-30 10:31:36	55	4095	4095	0	0	40	8190	87.2
26	5/300008 10:32:36	2026-05-30 10:31:40	2026-05-30 10:32:36	56	4095	4094.61	0.39	0.39	40	8189.61	64.5
27	5/300008 10:33:40	2026-05-30 10:32:40	2026-05-30 10:33:36	56	4094.95	4095	-0.05	0.05	40	8189.95	71.3
28	5/300008 10:34:40	2026-05-30 10:33:41	2026-05-30 10:34:36	56	4095	4095	0	0	40	8190	75.3
29	5/300008 10:35:40	2026-05-30 10:33:41	2026-05-30 10:35:37	108	4095	4095	0	0	40	8190	78.0



Gambar 7. Tampilan monitoring IoT: (a) Firebase, (b) Kodular, dan (c) Google Sheets.

Dari 750 data yang seharusnya tercatat, 744 data berhasil tersimpan dan 6 data tidak tersimpan. Keberhasilan data logging sebesar 99,20% menunjukkan bahwa integrasi ESP32, Firebase, Kodular, dan Google Sheets cukup andal untuk dokumentasi pengujian. Data yang hilang dapat disebabkan oleh koneksi internet, *delay* server, atau proses sinkronisasi awal. Hasil ini menguatkan bahwa ESP32 dapat digunakan sebagai perangkat akuisisi dan pengiriman data sensor pada sistem monitoring berbasis IoT, dengan catatan kestabilan jaringan tetap menjadi faktor yang memengaruhi kontinuitas pencatatan [15], [16], [17].

F. Pembahasan

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa sistem yang dikembangkan tidak hanya berfungsi sebagai penggerak reflektor, tetapi juga sebagai perangkat akuisisi data termal berbasis IoT. Penelitian terdahulu tentang *single-axis tracker* umumnya mengevaluasi keluaran daya panel fotovoltaik, sedangkan penelitian ini menempatkan suhu *receiver* sebagai indikator awal performa termal CSP. Perbedaan objek ini penting karena CSP bekerja melalui pemusatan panas, bukan konversi langsung cahaya menjadi listrik. Oleh karena itu, pembahasan hasil perlu dibedakan dari penelitian solar tracker berbasis PV, karena indikator utama penelitian ini bukan daya listrik panel, melainkan suhu *receiver* dan keberhasilan data logging pada prototipe CSP [2], [3], [7], [10], [16], [22].

Dari sisi mekanik, aktuator linear 28 cm mampu menghasilkan estimasi gerak reflektor 0°-130° sehingga memadai untuk pelacakan satu sumbu pada prototipe. Dari sisi sensor, nilai seimbang LDR 72,58% menunjukkan sistem mampu membaca perbedaan cahaya, tetapi masih sensitif terhadap bayangan dan intensitas rendah. Dari sisi termal, suhu maksimum 91,51°C menunjukkan adanya pemusatan panas, tetapi belum cukup untuk menyatakan efisiensi termal karena data iradiasi W/m² belum tersusun sebagai data kuantitatif. Dari sisi IoT, data logging 99,20% menunjukkan sistem monitoring bekerja baik, meskipun tetap memerlukan penyimpanan lokal cadangan. Keterkaitan mekanik, sensor, termal, dan IoT tersebut menunjukkan bahwa hasil penelitian berada pada irisan antara rancang bangun solar tracker satu sumbu, sistem termal CSP, dan monitoring data berbasis ESP32.

Keterbatasan penelitian ini adalah sudut aktual reflektor belum direkam menggunakan sensor sudut, pengukuran iradiasi matahari belum disajikan dalam tabel W/m², dan belum ada pengujian pembandingan langsung dengan reflektor statis. Dengan demikian, klaim peningkatan performa terhadap sistem statis tidak dinyatakan dalam persentase. Penelitian berikutnya perlu menambahkan sensor sudut, pencatatan iradiasi matahari, dan uji komparatif agar analisis performa CSP lebih kuat. Rekomendasi tersebut penting agar penelitian lanjutan dapat membedakan secara kuantitatif pengaruh tracking terhadap performa termal CSP, bukan hanya menunjukkan bahwa sistem dapat bergerak dan mencatat data.

KESIMPULAN

Sistem *solar tracker single-axis* berbasis ESP32 pada sistem otomasi CSP berhasil dirancang dan diuji. Prototipe menggunakan reflektor parabola aluminium reflektif berdiameter 120 cm, dua sensor LDR, ESP32, L298N, aktuator linear DC, *thermocouple* tipe-K, MAX6675, Firebase, Kodular, dan Google Sheets. Aktuator linear dengan stroke 28 cm menghasilkan estimasi sudut reflektor 0°-130° dengan konstanta sudut 4,64°/cm. Waktu efektif analisis sudut adalah 08.00-16.00 WIB, dengan perubahan sudut acuan 16,25° setiap 1 jam.

Pengujian LDR menunjukkan 540 dari 744 data berada dalam kondisi seimbang atau 72,58%. Suhu *receiver* berada pada rentang 20,41°C-91,51°C dengan rata-rata 53,38°C dan fluktuasi keseluruhan 71,10°C. Pengujian fungsional menunjukkan 11 dari 11 fungsi berhasil atau 100%. Data logging IoT berhasil menyimpan 744 dari 750 data atau 99,20%. Sistem ini layak digunakan sebagai prototipe CSP yang adaptif dan terukur, dengan rekomendasi pengembangan berupa penambahan sensor sudut, pencatatan iradiasi W/m², penyimpanan data lokal, kalibrasi sensor, dan pengujian komparatif terhadap reflektor statis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh, khususnya Jurusan Rekayasa Pertanian dan Komputer, atas dukungan fasilitas dan sarana yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada dosen pembimbing serta semua pihak yang telah memberikan arahan, bantuan, dan dukungan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] K. E. dan S. D. M. R. Indonesia, "Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2024," Kementerian ESDM, Jakarta, 2025. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/publikasi/handbook-of-energy-economic-statistics-of-indonesia>

- [2] A. H. Al-Alami, "Concentrating solar power technologies: Status and analysis," *International Journal of Thermofluids*, vol. 18, p. 100340, 2023, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100340.
- [3] N. Kurkute and A. Priyam, "A thorough review of the existing concentrated solar power technologies and various performance enhancing techniques," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 147, pp. 14713–14737, 2022, doi: 10.1007/s10973-022-11634-8.
- [4] S. Rodat and R. Thonig, "Status of concentrated solar power plants installed worldwide: Past and present data," *Clean Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 365–378, 2024, doi: 10.3390/cleantechnol6010018.
- [5] S. Pascual, P. Lisbona, and L. M. Romeo, "Thermal energy storage in concentrating solar power plants: A review of European and North American R&D projects," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 22, p. 8570, 2022, doi: 10.3390/en15228570.
- [6] M. Mubarrat, M. M. Mashfy, T. Farhan, and M. M. Ehsan, "Research advancement and potential prospects of thermal energy storage in concentrated solar power application," *International Journal of Thermofluids*, vol. 20, p. 100431, 2023, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100431.
- [7] A. B. Pulungan, Q. Fajri, and I. Yelfianhar, "Peningkatan daya keluaran panel surya menggunakan single axis tracker pada daerah khatulistiwa," *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, vol. 7, no. 2, pp. 261–270, 2021, doi: 10.24036/jtev.v7i2.113304.
- [8] M. H. de Sá Campos and C. Tiba, "npTrack: A n-position single axis solar tracker model for optimized energy collection," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 4, p. 925, 2021, doi: 10.3390/en14040925.
- [9] E. E. Prasetyo, G. Marausna, and R. R. D. Rahmiullah, "Analisis perbandingan hasil daya listrik panel surya dengan solar tracker dan tanpa solar tracker," *JTT: Jurnal Teknologi Terpadu*, vol. 10, no. 2, pp. 77–83, 2022, doi: 10.32487/jtt.v10i2.1426.
- [10] F. A. Putra Bumi, E. E. Prasetyo, and G. Marausna, "Rancang bangun solar tracker single axis dengan motor power window DC CSD60-B," *JTT: Jurnal Teknologi Terpadu*, vol. 10, no. 1, pp. 34–40, 2022, doi: 10.32487/jtt.v10i1.1420.
- [11] S. A. Kurniawan and M. Taufik, "Rancang bangun solar tracker sumbu tunggal berbasis motor stepper dan real time clock," *Jurnal Ilmiah Teknologi dan Rekayasa*, vol. 26, no. 1, pp. 1–12, 2021, doi: 10.35760/tr.2021.v26i1.3685.
- [12] P. S. Paliyal, S. Mondal, S. Layek, P. Kuchhal, and J. K. Pandey, "Automatic solar tracking system: A review pertaining to advancements and challenges in the current scenario," *Clean Energy*, vol. 8, no. 6, pp. 237–262, 2024, doi: 10.1093/ce/zkae085.
- [13] K. Kumba, P. Upender, P. Buduma, M. Sarkar, S. P. Simon, and V. Gundu, "Solar tracking systems: Advancements, challenges, and future directions: A review," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 3566–3583, 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.09.038.
- [14] B. Huang, "Development of a solar-tracking system for horizontal single-axis PV arrays using spatial projection analysis," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 10, p. 4008, 2023, doi: 10.3390/en16104008.
- [15] H. J. El-Khozondar, "A smart energy monitoring system using ESP32 microcontroller," *e-Prime: Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 9, p. 100666, 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100666.
- [16] R. A. Pratama, Pratikto, and M. Arman, "Sistem akuisisi data temperatur showcase berbasis IoT menggunakan ESP32 dengan sensor termokopel dan logging ke Google Spreadsheets," in *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 2023, pp. 252–257. doi: 10.35313/irwns.v14i1.5395.
- [17] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntic, and O. Tezak, "Design and implementation of ESP32-based IoT devices," *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6739, 2023, doi: 10.3390/s23156739.
- [18] I. Inayah, N. Hayati, A. Nurcholis, A. Dimiyati, and M. G. Prasetya, "Realtime monitoring system of solar panel performance based on Internet of Things using Blynk application," *ELINVO*, vol. 7, no. 2, pp. 135–143, 2022, doi: 10.21831/elinvo.v7i2.53365.
- [19] A. Wijoseno, H. P. Uranus, and J. Pangaribuan, "Pengendalian pengisian air otomatis menggunakan ESP32, MQTT, dan Kodular dengan notifikasi WhatsApp dan data logging melalui Google Sheets," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3.7139.
- [20] T. D. Lorobezy and Krismadinata, "Rancang bangun sistem monitoring PLTS off-grid berbasis IoT," *MSI Transaction on Education*, vol. 4, no. 2, pp. 71–84, 2023, doi: 10.46574/mtd.v4i2.111.
- [21] G. W. Kurniawan, I. G. A. P. R. Agung, and P. Rahardjo, "Rancang bangun sistem pemantauan panel surya berbasis Internet of Things," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 22, no. 1, pp. 133–140, 2023, doi: 10.24843/MITE.2023.v22i01.P17.
- [22] H. Setiana, A. B. Kusumaningtyas, and R. Maulana, "Rancang bangun PLTS solar tracker dual axis berbasis IoT menggunakan ESP32," in *Prosiding Seniati*, 2023, pp. 177–182. doi: 10.36040/seniati.v7i2.7944.
- [23] Desmira, D. Ariwibowo, G. Priyogi, and S. Islam, "Aplikasi sensor LDR (Light Dependent Resistor) untuk efisiensi energi pada lampu penerangan jalan umum," *Prosisko*, vol. 9, no. 1, pp. 21–29, 2022, doi: 10.30656/prosisko.v9i1.4465.

- [24] N. Fuada and I. Husnaini, "Rancang bangun buck converter dengan kontrol PID berbasis mikrokontroler Arduino," JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia, vol. 4, no. 2, pp. 781–791, 2023, doi: 10.24036/jtein.v4i2.513.