



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 22459-22474

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Sistem Manajemen Energi Panel Surya Off-Grid Berbasis ESP32 dengan Dual-Axis Tracking

Singgih Pangestu Rachman Wijaya¹, Ahmad Aftah Syukron²

¹²Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Ma'arif Nahdlatul Ulama Kebumen

¹singgihwijaya27@gmail.com*

Abstrak

Pemanfaatan panel surya sebagai sumber energi terbarukan pada sistem off-grid masih menghadapi tantangan berupa rendahnya efisiensi penyerapan energi akibat perubahan posisi matahari, keterbatasan pengelolaan penyimpanan energi, serta belum terintegrasinya sistem monitoring secara real-time. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem Dual-Axis Automatic Solar Tracker berbasis ESP32 yang mengintegrasikan mekanisme pelacakan matahari, battery protection, dan monitoring berbasis Internet of Things (IoT) melalui Website Android untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem panel surya. Metode penelitian meliputi perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi sistem, serta pengujian terhadap efisiensi energi, akurasi sensor, keandalan battery protection, performa komunikasi IoT, dan penerimaan pengguna menggunakan User Acceptance Test (UAT). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu meningkatkan rata-rata efisiensi daya sebesar 31,07% dibandingkan panel surya statis. Pengujian akurasi sensor menghasilkan rata-rata error sebesar 1,36% pada sensor tegangan dan 1,85% pada sensor arus INA219. Selain itu, mekanisme battery protection berhasil mencegah kondisi overcharge dan overdischarge, sedangkan komunikasi data berbasis IoT memiliki rata-rata delay sebesar 0,89 detik, sehingga mampu mendukung monitoring secara real-time. Evaluasi pengguna memperoleh nilai rata-rata 90,25% dengan kategori sangat layak, yang menunjukkan bahwa sistem mudah digunakan dan mampu menyajikan informasi secara efektif. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa pengembangan arsitektur manajemen energi terintegrasi yang menggabungkan optimasi penyerapan energi, pengamanan baterai, dan monitoring real-time dalam satu sistem, sehingga berpotensi mendukung implementasi sistem fotovoltaik off-grid yang lebih efisien, aman, dan andal.

Kata Kunci: Dual-Axis Solar Tracker, ESP32, Internet Of Things, Manajemen Energi, Panel Surya Off-Grid

1. Latar Belakang

Peningkatan kebutuhan energi listrik yang terus terjadi seiring pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, dan transformasi digital mendorong berbagai negara untuk mempercepat pemanfaatan sumber energi terbarukan [1]. Di antara berbagai sumber energi terbarukan yang tersedia, energi surya menjadi salah satu alternatif yang paling potensial karena bersifat melimpah, ramah lingkungan, dan dapat dimanfaatkan pada berbagai skala kebutuhan, mulai dari rumah tangga hingga sistem pembangkit listrik mandiri (*off-grid*) [2], [3]. Indonesia sebagai negara tropis memiliki intensitas radiasi matahari yang relatif tinggi sepanjang tahun sehingga memiliki peluang besar untuk mengembangkan sistem pembangkit listrik tenaga surya sebagai salah satu solusi dalam mendukung ketahanan energi nasional [4], [5]. Meskipun demikian, potensi tersebut belum sepenuhnya dimanfaatkan secara optimal karena masih terdapat berbagai kendala teknis yang memengaruhi performa sistem fotovoltaik dalam menghasilkan energi listrik secara efisien.

Salah satu faktor utama yang memengaruhi kinerja panel surya adalah perubahan posisi matahari sepanjang hari yang menyebabkan sudut datang cahaya terhadap permukaan panel terus berubah. Pada sistem panel surya konvensional, panel umumnya dipasang dengan sudut kemiringan tetap (*fixed tilt*) sehingga hanya mampu menerima radiasi matahari secara optimal pada waktu tertentu [2], [3], [4], [6]. Kondisi tersebut mengakibatkan intensitas cahaya yang diterima panel berkurang ketika posisi matahari bergeser, sehingga daya keluaran dan energi listrik yang dihasilkan menjadi kurang maksimal. Selain itu, sistem fotovoltaik *off-grid* juga menghadapi tantangan lain berupa pengelolaan baterai sebagai media penyimpanan energi. Ketidakmampuan sistem dalam mengendalikan proses pengisian maupun pengosongan baterai berpotensi menyebabkan kondisi *overcharge* maupun *overdischarge* yang dapat menurunkan umur pakai baterai serta mengurangi keandalan sistem secara keseluruhan [7], [8].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan tersebut melalui penerapan teknologi *automatic solar tracking*, *Internet of Things* (IoT), maupun sistem monitoring berbasis *web* dan perangkat bergerak. Penelitian mengenai *solar tracking* umumnya menunjukkan bahwa mekanisme pelacakan matahari mampu meningkatkan penyerapan radiasi dibandingkan panel statis karena panel selalu berada pada orientasi yang lebih optimal terhadap arah datang cahaya matahari [9]. Di sisi lain, perkembangan teknologi IoT memungkinkan proses pemantauan parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya, serta kondisi sistem dilakukan secara *real-time* melalui jaringan internet sehingga mempermudah proses pengawasan dan evaluasi performa panel surya. Beberapa penelitian juga telah mengembangkan sistem proteksi baterai untuk meningkatkan keamanan proses penyimpanan energi, namun implementasinya masih banyak dilakukan sebagai subsistem yang berdiri sendiri dan belum terintegrasi secara menyeluruh dengan mekanisme *solar tracking* maupun sistem monitoring [10], [11].

Meskipun perkembangan penelitian mengenai panel surya berbasis IoT terus mengalami peningkatan, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang perlu mendapat perhatian. Sebagian besar penelitian lebih menitikberatkan pada peningkatan efisiensi panel melalui mekanisme *dual-axis solar tracking* tanpa mengevaluasi aspek pengelolaan energi secara komprehensif [12], [13]. Penelitian lain lebih berfokus pada pengembangan sistem monitoring *real-time*, namun hanya berfungsi sebagai media visualisasi data tanpa dikaitkan dengan keandalan sistem penyimpanan energi. Selain itu, kajian mengenai proteksi baterai umumnya belum diintegrasikan dengan sistem pelacakan matahari serta belum dievaluasi secara bersamaan menggunakan indikator kuantitatif seperti peningkatan efisiensi energi, akurasi pembacaan sensor, keandalan proteksi baterai, dan latensi komunikasi data IoT. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa masih diperlukan suatu pendekatan yang mampu mengintegrasikan berbagai subsistem tersebut ke dalam satu arsitektur manajemen energi yang saling mendukung.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan sebuah arsitektur sistem manajemen energi panel surya *off-grid* yang mengintegrasikan *dual-axis automatic solar tracking* berbasis sensor *Light Dependent Resistor* (LDR), sistem proteksi baterai, serta monitoring *real-time* menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan Firebase dan antarmuka *Website* Android. Integrasi tersebut dirancang tidak hanya untuk meningkatkan kemampuan panel surya dalam mengikuti arah datang cahaya matahari, tetapi juga untuk menjaga keamanan proses penyimpanan energi serta menyediakan informasi operasional sistem secara cepat dan berkelanjutan. Evaluasi sistem dilakukan melalui pengujian peningkatan efisiensi pemanenan energi dibandingkan panel statis, pengukuran akurasi sensor kelistrikan, pengujian keandalan mekanisme proteksi baterai, serta analisis latensi komunikasi data IoT. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berupa model implementasi sistem manajemen energi fotovoltaiik terpadu yang tidak hanya meningkatkan efisiensi pemanenan energi, tetapi juga memperkuat keandalan operasional sistem panel surya skala *off-grid*.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) yang berfokus pada perancangan, implementasi, dan evaluasi sistem manajemen energi panel surya berbasis *Internet of Things* (IoT) [14], [15]. Pendekatan ini dipilih karena tujuan penelitian tidak hanya menghasilkan sebuah prototipe, tetapi juga mengevaluasi kinerja sistem secara kuantitatif berdasarkan beberapa parameter performa yang telah ditentukan. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan mekanisme *dual-axis automatic solar tracking*, proteksi baterai, serta monitoring *real-time* dalam satu platform yang saling terhubung. Seluruh proses penelitian dilaksanakan secara bertahap mulai dari analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, hingga pengujian performa sistem secara menyeluruh.

2.1. Desain Sistem

Sistem yang dikembangkan merupakan sistem fotovoltaiik *off-grid* yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi pemanenan energi sekaligus menjaga keandalan operasional melalui integrasi beberapa subsistem. Arsitektur sistem terdiri atas panel surya, sensor *Light Dependent Resistor* (LDR), dua motor servo SG90 sebagai penggerak sumbu horizontal dan vertikal, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali, sensor arus INA219, sensor tegangan, *Solar Charge Controller* (SCC), baterai 12 V, Firebase sebagai *cloud database*, serta antarmuka monitoring berbasis *Website* Android. ESP32 berfungsi membaca seluruh data sensor, mengendalikan pergerakan motor servo berdasarkan intensitas cahaya yang diterima sensor LDR, menghitung parameter kelistrikan panel surya, kemudian mengirimkan data tersebut ke Firebase agar dapat dimonitor secara *real-time* melalui jaringan internet.



Gambar 1. Arsitektur Sistem

2.2. Alat dan Bahan

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas panel surya monokristalin, empat sensor LDR, dua motor servo SG90, ESP32 DevKit V1, sensor arus INA219, modul sensor tegangan DC, *Solar Charge Controller*, baterai VRLA 12 V, serta beberapa komponen pendukung seperti rangka mekanik dan catu daya. Sensor LDR digunakan untuk mendeteksi distribusi intensitas cahaya matahari dari empat arah sehingga panel dapat bergerak mengikuti posisi matahari. Sensor INA219 dan sensor tegangan digunakan untuk memperoleh nilai arus dan tegangan keluaran panel yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan daya listrik.

Perangkat lunak yang digunakan meliputi Arduino IDE sebagai lingkungan pengembangan program ESP32, Firebase Realtime Database sebagai media penyimpanan data, Visual Studio Code sebagai lingkungan pengembangan antarmuka *Website*, serta peramban (*browser*) Android untuk menampilkan hasil monitoring secara *real-time*. Seluruh komunikasi data dilakukan menggunakan jaringan Wi-Fi sehingga memungkinkan proses pemantauan dilakukan dari lokasi yang berbeda selama perangkat terhubung ke internet.

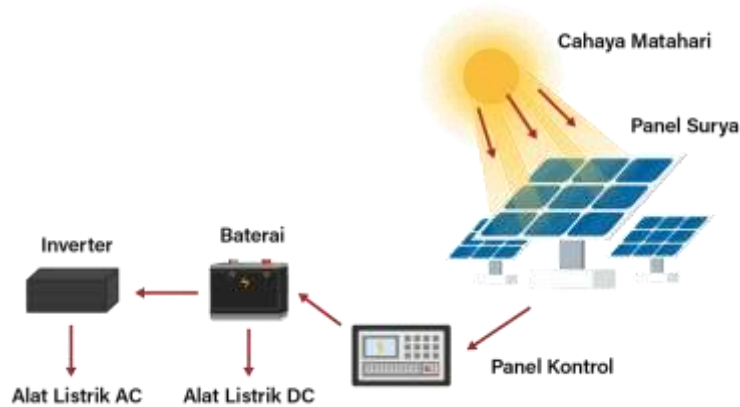
Table 1. Alat dan Bahan

No	Alat dan Bahan	Keterangan	Gambar
1.	2 Motor Servo SG90 SG-90	Untuk menggerakkan dual axis tracker	
2.	4 LDR GL5516 5MM Photoresistor	Untuk mendeteksi arah intensitas cahaya	
3.	Jumper	Untuk menghubungkan antar komponen	
4.	Resistor 10K ohm	Rangkaian pembagian tegangan LDR	

5.	Small solar panel 5V	Untuk sumber energi Listrik	
6.	Breadboard	Papan perakitan rangkaian	
7.	ESP32	Untuk mengontrol dan mengendalikan system dengan koneksi wifi	
8.	Sensor arus INA219	Untuk mengukur arus keluaran panel	
9.	Voltage Sensor Module	Untuk mengukur tegangan sistem	
10.	12V Rechargeable Battery	Untuk menyimpan energi	
11.	Solar Charge Controller	Untuk mengatur pengisian baterai	
12.	Modul Proteksi Baterai Lipo Lion	Untuk Mencegah overcharge/overdischarge	
13.	Arduino IDE	Pemrograman ESP32	
14.	Firestore	Penyimpanan dan pengiriman data secara <i>real-time</i>	

2.3. Mekanisme *Dual-Axis Automatic Solar Tracking*

Mekanisme pelacakan matahari dilakukan menggunakan empat sensor LDR yang ditempatkan pada empat kuadran permukaan panel. Perbedaan intensitas cahaya yang diterima masing-masing sensor digunakan sebagai dasar dalam menentukan arah pergerakan panel surya. ESP32 membaca nilai analog dari setiap sensor LDR kemudian membandingkan nilai intensitas antar pasangan sensor pada sumbu horizontal maupun vertikal. Apabila selisih intensitas melebihi batas toleransi yang telah ditentukan, ESP32 akan mengirimkan sinyal kendali kepada motor servo untuk mengubah orientasi panel hingga posisi panel kembali menghadap titik intensitas cahaya tertinggi. Pendekatan tersebut memungkinkan panel surya mengikuti perubahan posisi matahari secara otomatis sepanjang periode pengujian. Setelah orientasi panel mencapai kondisi seimbang, motor servo akan berhenti bergerak sehingga konsumsi daya aktuator tetap efisien. Mekanisme ini dilakukan secara berulang selama sistem beroperasi sehingga posisi panel selalu menyesuaikan arah datang radiasi matahari. Berikut Alur *Dual-Axis Solar Tracking* di presentasikan di Gambar 2.



Gambar 2. Alur Dual-Axis Solar Tracking

2.4. Sistem Monitoring Berbasis IoT

Selain mengendalikan sistem pelacakan matahari, ESP32 juga bertugas membaca parameter kelistrikan berupa tegangan, arus, daya, dan kondisi baterai secara berkala. Data hasil pembacaan sensor diproses terlebih dahulu sebelum dikirim menuju Firebase Realtime Database melalui jaringan Wi-Fi. Firebase berfungsi sebagai media pertukaran data antara ESP32 dengan antarmuka monitoring sehingga informasi yang diperoleh dapat ditampilkan secara *real-time*. Antarmuka monitoring dikembangkan menggunakan teknologi berbasis *web* yang dapat diakses melalui perangkat Android. Halaman monitoring menampilkan informasi mengenai tegangan panel, arus keluaran, daya yang dihasilkan, kondisi baterai, serta status koneksi sistem. Dengan adanya mekanisme ini, pengguna dapat memantau kondisi panel surya tanpa harus berada di lokasi instalasi sehingga proses pengawasan menjadi lebih mudah dan efisien.

2.5. Skenario Pengujian

Pengujian dilakukan di Desa Puring, Kabupaten Kebumen, dengan membandingkan performa sistem panel surya berbasis *dual-axis automatic solar tracking* terhadap panel surya statis pada kondisi lingkungan yang sama. Pengamatan dilakukan pada rentang waktu pukul 08.00–16.00 WIB dengan interval pengukuran setiap satu jam. Parameter yang diamati meliputi tegangan (*voltage*), arus (*current*), daya keluaran (*output power*), kondisi baterai, serta waktu tunda (*latency*) komunikasi data menuju sistem monitoring. Seluruh data direkam dan dianalisis untuk mengevaluasi performa sistem yang diusulkan berdasarkan empat indikator utama, yaitu efisiensi energi, akurasi sensor, keandalan operasional, dan performa komunikasi IoT. Tabel Parameter Pengujian di jelaskan di Tabel 2.

Table 2. Parameter Pengujian

Parameter	Indikator	Metode
Efisiensi Energi	Output Power	Perbandingan Tracker dengan statis
Akurasi Sensor	Error (%)	Multimeter
Battery Protection	Cut-off	Fungsional
IoT	Delay	Stopwatch/Timestamp
UAT	Likert	Kuesioner

Selain pengujian komparatif terhadap efisiensi energi, penelitian ini juga melakukan pengujian terhadap akurasi sensor INA219 dan sensor tegangan menggunakan multimeter digital sebagai alat pembanding. Pengujian proteksi baterai dilakukan untuk memastikan mekanisme pemutusan arus saat kondisi *overcharge* maupun *overdischarge* dapat bekerja sesuai rancangan. Selanjutnya dilakukan pengujian latensi komunikasi data dari ESP32 menuju Firebase dan antarmuka monitoring untuk mengetahui respons sistem dalam menampilkan data secara *real-time*.

Untuk mengevaluasi aspek kegunaan sistem (*usability*), dilakukan *User Acceptance Test* terhadap 20 responden menggunakan instrumen kuesioner berbasis skala Likert lima tingkat..

2.6. Teknik Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan pendekatan kuantitatif dengan membandingkan performa sistem yang diusulkan terhadap panel surya statis. Besarnya peningkatan efisiensi energi dihitung berdasarkan selisih daya keluaran antara kedua sistem menggunakan Persamaan (1).

$$Efisiensi (\%) = \frac{Daya Tracker - Daya Statis}{Daya Statis} \times 100\% \quad (1)$$

Akurasi sensor arus dan tegangan dihitung menggunakan persentase *error* antara hasil pembacaan sensor dengan hasil pengukuran multimeter digital sebagai nilai acuan. Sementara itu, performa sistem monitoring dianalisis berdasarkan waktu tunda (*latency*) pengiriman data dari ESP32 menuju Firebase hingga informasi ditampilkan pada antarmuka *Website* Android. Hasil pengujian selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel, grafik, dan pembahasan komparatif untuk mengevaluasi efektivitas sistem manajemen energi yang diusulkan secara menyeluruh. Keandalan sistem proteksi baterai dianalisis berdasarkan keberhasilan mekanisme pemutusan arus pada kondisi *overcharge* dan *overdischarge* sesuai batas tegangan yang telah ditentukan. Selain itu, tingkat penerimaan pengguna (*User Acceptance Test*) dianalisis menggunakan kuesioner skala Likert lima tingkat dengan menghitung persentase skor setiap indikator untuk mengetahui tingkat kemudahan penggunaan, kualitas antarmuka, kebermanfaatan sistem, dan transparansi informasi yang ditampilkan.

3. Hasil dan Diskusi

3.1. Implementasi Sistem

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan sebuah sistem manajemen energi panel surya *off-grid* yang mengintegrasikan mekanisme *dual-axis automatic solar tracking*, sistem proteksi baterai, serta monitoring *real-time* berbasis *Internet of Things* (IoT). Implementasi sistem dilakukan dengan menggabungkan komponen perangkat keras dan perangkat lunak ke dalam satu arsitektur yang mampu bekerja secara terpadu. Seluruh subsistem dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pusat pengendali dalam proses akuisisi data sensor, pengambilan keputusan, pengendalian aktuatur, serta komunikasi data menuju *cloud database*. Hasil implementasi menunjukkan bahwa setiap komponen mampu beroperasi sesuai dengan fungsi yang telah dirancang sehingga sistem siap digunakan pada tahap pengujian performa.

Prototype yang dikembangkan terdiri atas panel surya yang dipasang pada rangka mekanik dua sumbu sehingga mampu bergerak pada arah horizontal (*azimuth*) dan vertikal (*elevation*). Pergerakan panel dikendalikan oleh dua motor servo SG90 yang menerima sinyal kendali dari ESP32 berdasarkan hasil pembacaan empat sensor *Light Dependent Resistor* (LDR). Sensor tersebut ditempatkan pada empat kuadran untuk mendeteksi perbedaan intensitas cahaya matahari sehingga orientasi panel dapat disesuaikan secara otomatis menuju arah dengan intensitas cahaya tertinggi. Mekanisme ini memungkinkan panel surya mempertahankan posisi yang lebih optimal dibandingkan sistem panel statis selama periode pengoperasian.

Selain mekanisme pelacakan matahari, sistem juga dilengkapi dengan modul pengukuran parameter kelistrikan yang terdiri atas sensor arus INA219 dan modul sensor tegangan. Kedua sensor tersebut digunakan untuk memperoleh data tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya secara *real-time*. Informasi yang diperoleh selanjutnya diproses oleh ESP32 sebelum dikirimkan menuju Firebase melalui jaringan Wi-Fi. Integrasi antara sensor kelistrikan dan mikrokontroler memungkinkan proses pemantauan kondisi sistem dilakukan secara berkesinambungan tanpa memerlukan pengukuran manual menggunakan alat ukur eksternal.

Untuk menjaga keandalan penyimpanan energi, sistem memanfaatkan *Solar Charge Controller* (SCC) yang terhubung dengan baterai 12 V sebagai media penyimpanan energi listrik. SCC berfungsi mengatur proses pengisian baterai sekaligus memberikan proteksi terhadap kondisi *overcharge* maupun *overdischarge*. Implementasi subsistem ini bertujuan untuk menjaga kestabilan operasi sistem serta memperpanjang umur pakai baterai selama proses penggunaan. Dengan adanya mekanisme tersebut, energi yang berhasil dipanen oleh panel surya tidak hanya meningkat melalui mekanisme pelacakan matahari, tetapi juga dapat disimpan dan dimanfaatkan secara lebih aman.

Implementasi sistem tidak hanya berfokus pada aspek perangkat keras, tetapi juga mencakup pengembangan sistem monitoring berbasis IoT yang dapat diakses melalui *Website* pada perangkat Android. Data hasil pembacaan

sensor dikirimkan secara berkala menuju Firebase sebagai media penyimpanan sementara sebelum ditampilkan pada antarmuka pengguna. Halaman monitoring menyajikan informasi mengenai tegangan, arus, daya keluaran panel surya, kondisi baterai, serta status sistem secara *real-time*. Ketersediaan informasi tersebut memberikan kemudahan bagi pengguna dalam melakukan pemantauan tanpa harus berada di lokasi pemasangan panel surya.

Berdasarkan hasil implementasi, seluruh subsistem berhasil diintegrasikan menjadi satu sistem manajemen energi panel surya yang mampu melakukan pelacakan arah datang cahaya matahari, mengukur parameter kelistrikan, mengelola proses penyimpanan energi, serta menampilkan informasi operasional melalui antarmuka monitoring secara *real-time*. Integrasi tersebut menunjukkan bahwa sistem tidak hanya berfungsi sebagai *automatic solar tracker*, tetapi juga sebagai platform manajemen energi yang mendukung pengoperasian sistem fotovoltaik *off-grid*. Hasil implementasi ini menjadi dasar bagi pelaksanaan pengujian performa yang meliputi efisiensi pemanenan energi, akurasi sensor, keandalan sistem proteksi baterai, performa komunikasi IoT, serta evaluasi penerimaan pengguna yang dibahas pada subbab berikutnya.

3.2. Hasil Pengujian

Pengujian efisiensi energi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem *dual-axis solar tracker* dalam meningkatkan daya keluaran panel surya dibandingkan sistem panel surya statis. Pengujian dilaksanakan di Desa Puring dengan rentang waktu pengamatan mulai pukul 08.00 hingga 16.00 WIB. Pada setiap interval pengamatan dilakukan pencatatan terhadap parameter tegangan (*voltage*), arus (*current*), dan daya (*power*) dari kedua sistem. Data tersebut kemudian digunakan untuk menghitung rata-rata daya keluaran serta persentase peningkatan efisiensi yang dihasilkan oleh sistem yang diusulkan.

Table 3. Hasil Pengujian Efisiensi Energi Sistem Dual-Axis Solar Tracker dan Panel Surya Statis

Jam	V Tracker (V)	I Tracker (A)	P Tracker (W)	V Statis (V)	I Statis (A)	P Statis (W)
08.00	4,95	0,38	1,88	4,80	0,25	1,20
09.00	5,02	0,55	2,76	4,88	0,40	1,95
10.00	5,10	0,72	3,67	4,95	0,58	2,87
11.00	5,12	0,85	4,35	5,00	0,72	3,60
12.00	5,15	0,92	4,74	5,10	0,88	4,49
13.00	5,10	0,86	4,39	4,98	0,70	3,49
14.00	5,05	0,70	3,54	4,90	0,52	2,55
15.00	4,98	0,52	2,59	4,82	0,32	1,54
16.00	4,90	0,35	1,72	4,75	0,18	0,86

Keterangan:

- Rata rata daya sistem *dual-axis solar tracker* : 3,29 W
- Rata-rata daya panel surya statis : 2,51 W
- Peningkatan efisiensi daya rata-rata : 31,07%

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem *dual-axis solar tracker* secara konsisten menghasilkan daya keluaran yang lebih tinggi dibandingkan panel surya statis pada seluruh periode pengamatan. Rata-rata daya yang dihasilkan sistem *dual-axis solar tracker* mencapai 3,29 W, sedangkan panel surya statis hanya menghasilkan rata-rata 2,51 W. Berdasarkan hasil tersebut diperoleh peningkatan efisiensi daya rata-rata sebesar 31,07%, yang menunjukkan bahwa mekanisme pelacakan matahari mampu meningkatkan proses pemanenan energi dibandingkan konfigurasi panel dengan sudut tetap. Temuan ini mengindikasikan bahwa orientasi panel yang selalu menyesuaikan arah datang radiasi matahari memberikan kontribusi langsung terhadap peningkatan energi listrik yang berhasil dikonversi.

Apabila diamati berdasarkan waktu pengujian, peningkatan daya terbesar terjadi pada periode pagi hingga menjelang siang serta kembali meningkat pada sore hari. Pada pukul 08.00, sistem *dual-axis solar tracker* menghasilkan daya sebesar 1,88 W, sedangkan panel statis hanya menghasilkan 1,20 W. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa ketika posisi matahari masih berada pada sudut datang yang rendah, mekanisme pelacakan mampu mempertahankan orientasi panel sehingga radiasi matahari dapat diterima secara lebih optimal. Kondisi serupa juga terlihat pada pukul 15.00 hingga 16.00, ketika sudut datang cahaya kembali berubah dan panel statis mulai kehilangan efisiensinya akibat tidak mampu mengikuti pergeseran posisi matahari.

Sebaliknya, selisih daya antara kedua sistem cenderung mengecil pada periode sekitar tengah hari. Pada pukul 12.00, sistem *dual-axis solar tracker* menghasilkan daya sebesar 4,74 W, sedangkan panel statis menghasilkan 4,49 W sehingga selisih keduanya relatif kecil dibandingkan periode pagi maupun sore hari. Kondisi tersebut

terjadi karena posisi matahari berada mendekati titik tertinggi sehingga panel statis masih menerima radiasi matahari dengan sudut datang yang relatif optimal. Meskipun demikian, sistem yang diusulkan tetap mampu mempertahankan daya keluaran yang lebih tinggi karena orientasi panel terus disesuaikan secara dinamis terhadap perubahan posisi matahari yang terjadi secara bertahap.

Peningkatan efisiensi yang diperoleh tidak hanya dipengaruhi oleh mekanisme *dual-axis solar tracking*, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam melakukan penyesuaian orientasi secara berkelanjutan berdasarkan informasi yang diperoleh dari empat sensor *Light Dependent Resistor* (LDR). ESP32 secara kontinu membandingkan nilai intensitas cahaya dari setiap sensor untuk menentukan arah pergerakan dua motor servo pada sumbu horizontal dan vertikal. Mekanisme tersebut memungkinkan panel selalu berada pada posisi yang mendekati arah datang cahaya dengan intensitas tertinggi sehingga kehilangan energi akibat perubahan sudut penyinaran dapat diminimalkan. Dengan demikian, sistem mampu memanfaatkan radiasi matahari secara lebih efektif dibandingkan panel yang dipasang pada posisi tetap.

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa penerapan *dual-axis solar tracking* mampu meningkatkan energi yang dipanen dibandingkan sistem panel statis. Namun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada peningkatan daya keluaran tanpa mengintegrasikan aspek pengelolaan energi lainnya, seperti proteksi baterai dan monitoring *real-time*. Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi energi dapat dicapai bersamaan dengan pengelolaan penyimpanan energi serta pemantauan sistem secara terpadu dalam satu arsitektur. Dengan demikian, hasil penelitian tidak hanya memperkuat temuan sebelumnya mengenai efektivitas *solar tracking*, tetapi juga memperluas implementasinya melalui pendekatan manajemen energi yang lebih komprehensif.

Dari perspektif implementasi sistem *off-grid*, peningkatan efisiensi sebesar 31,07% memiliki implikasi yang signifikan terhadap ketersediaan energi listrik. Energi tambahan yang berhasil dipanen selama periode penyinaran dapat meningkatkan jumlah energi yang tersimpan pada baterai sehingga waktu operasional beban menjadi lebih panjang. Kondisi tersebut sangat penting terutama pada wilayah pedesaan atau daerah dengan keterbatasan akses terhadap jaringan listrik, di mana kontinuitas pasokan energi sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam memanfaatkan energi matahari secara optimal. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi yang diperoleh tidak hanya berdampak pada performa panel surya, tetapi juga meningkatkan keandalan keseluruhan sistem manajemen energi.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan sistem *dual-axis solar tracker* berhasil memenuhi tujuan utama penelitian, yaitu meningkatkan efisiensi pemanenan energi pada sistem fotovoltaik *off-grid*. Peningkatan daya keluaran yang diperoleh pada seluruh periode pengamatan membuktikan bahwa mekanisme pelacakan mampu mengurangi kehilangan energi akibat perubahan posisi matahari sepanjang hari. Selain itu, keberhasilan sistem dalam mempertahankan performa yang lebih baik dibandingkan panel statis memperkuat bahwa integrasi *dual-axis solar tracking* merupakan komponen penting dalam arsitektur manajemen energi yang diusulkan. Temuan ini sekaligus menjadi dasar untuk mengevaluasi aspek performa lainnya, seperti akurasi sensor, keandalan proteksi baterai, dan komunikasi *real-time*, yang dibahas pada subbab berikutnya.

3.3. Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi sensor dilakukan untuk mengevaluasi tingkat ketelitian pembacaan parameter kelistrikan yang digunakan pada sistem monitoring. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa data tegangan dan arus yang dikirimkan oleh ESP32 menuju sistem *cloud* memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap hasil pengukuran menggunakan alat ukur standar. Sebagai pembanding digunakan *multimeter* digital Sanwa CD800a yang telah dikalibrasi sehingga dapat dijadikan sebagai nilai acuan (*reference value*). Evaluasi dilakukan terhadap dua jenis sensor, yaitu *Voltage Sensor Module* untuk pengukuran tegangan dan sensor INA219 untuk pengukuran arus.

3.3.1. Hasil Pengujian Akurasi Sensor Tegangan

Table 4. Hasil Pengujian Akurasi Voltage Sensor Module				
No	Multimeter (V)	Sensor Tegangan (V)	Absolute Error (V)	Error (%)
1	4,80	4,85	0,05	1,04
2	5,00	5,08	0,08	1,60
3	11,50	11,35	0,15	1,30
4	12,60	12,42	0,18	1,43
5	13,80	13,60	0,20	1,45
Rata-rata				1,36%

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *Voltage Sensor Module* memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap hasil pengukuran menggunakan *multimeter* digital. Berdasarkan lima kali pengujian pada rentang tegangan yang

berbeda, diperoleh rata-rata *error* sebesar **1,36%**. Nilai tersebut menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil pembacaan sensor dan alat ukur acuan relatif kecil sehingga sensor mampu merepresentasikan kondisi tegangan sistem secara akurat. Dengan tingkat kesalahan di bawah 2%, sensor tegangan dinilai cukup andal untuk digunakan sebagai bagian dari sistem monitoring *real-time*.

Apabila diamati pada setiap titik pengujian, nilai *error* cenderung stabil meskipun pengukuran dilakukan pada rentang tegangan yang berbeda, mulai dari 4,80 V hingga 13,80 V. Perbedaan pembacaan terbesar hanya mencapai 0,20 V pada pengujian tegangan tertinggi, sedangkan pada rentang tegangan operasional panel surya, selisih pengukuran berada pada kisaran 0,05–0,18 V. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik sensor tetap konsisten meskipun terjadi perubahan kondisi pengukuran. Konsistensi tersebut penting karena sistem monitoring harus mampu memberikan informasi yang representatif selama proses pengisian baterai maupun saat panel menghasilkan energi listrik.

Rendahnya nilai *error* dipengaruhi oleh proses kalibrasi sensor serta kemampuan *analog-to-digital converter* pada ESP32 dalam mengolah sinyal masukan secara stabil. Selain itu, penggunaan pembagi tegangan (*voltage divider*) pada modul sensor juga membantu menjaga rentang pembacaan agar sesuai dengan kemampuan masukan mikrokontroler. Kombinasi kedua faktor tersebut menghasilkan data tegangan yang cukup presisi untuk mendukung proses pengambilan keputusan pada sistem. Dengan demikian, informasi tegangan yang ditampilkan pada antarmuka monitoring dapat dijadikan acuan dalam mengevaluasi kondisi operasional panel surya maupun baterai.

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa *Voltage Sensor Module* memiliki tingkat *error* yang relatif rendah apabila digunakan pada sistem monitoring panel surya berbasis mikrokontroler. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu hanya memanfaatkan sensor sebagai alat pencatat data tanpa mengintegrasikannya dengan sistem pengelolaan energi secara menyeluruh. Pada penelitian ini, sensor tegangan tidak hanya berfungsi sebagai perangkat akuisisi data, tetapi juga menjadi bagian dari sistem manajemen energi yang terhubung dengan proses monitoring *real-time*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu mempertahankan tingkat akurasi yang baik meskipun digunakan dalam sistem yang memiliki beberapa subsistem yang saling terintegrasi.

3.3.2 Hasil Pengujian Akurasi Sensor Arus (INA219)

Table 5. Hasil Pengujian Akurasi Sensor Arus INA219

No	Multimeter (A)	INA219 (A)	Absolute Error (A)	Error (%)
1	0,18	0,184	0,004	2,22
2	0,35	0,356	0,006	1,71
3	0,55	0,560	0,010	1,82
4	0,72	0,733	0,013	1,80
5	0,92	0,936	0,016	1,74
Rata-rata				1,85%

Selain pengujian tegangan, penelitian ini juga mengevaluasi tingkat akurasi sensor arus INA219 yang digunakan untuk mengukur arus keluaran panel surya secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor INA219 memiliki rata-rata *error* sebesar **1,85%** dibandingkan hasil pengukuran menggunakan *multimeter* digital. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu melakukan pengukuran arus dengan tingkat ketelitian yang baik sehingga layak digunakan sebagai sumber data pada sistem monitoring. Perbedaan pembacaan yang relatif kecil juga mengindikasikan bahwa sensor tetap mampu mempertahankan performa pada berbagai tingkat arus yang dihasilkan panel surya.

Nilai *error* terbesar tercatat sebesar 2,22% pada arus terendah, yaitu 0,18 A, sedangkan pada rentang arus yang lebih tinggi nilai *error* cenderung stabil di bawah 2%. Fenomena tersebut umum dijumpai pada sensor arus berbasis *shunt resistor*, di mana pengaruh gangguan sinyal dan resolusi pembacaan relatif lebih besar pada arus yang sangat kecil. Meskipun demikian, variasi tersebut tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perhitungan daya karena selisih pembacaan masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima. Oleh sebab itu, sensor INA219 tetap mampu menyediakan data arus yang representatif untuk mendukung evaluasi performa sistem.

Akurasi sensor arus memiliki peran yang sangat penting dalam penelitian ini karena nilai daya keluaran panel dihitung berdasarkan hasil perkalian antara tegangan dan arus ($P = V \times I$). Dengan demikian, kesalahan pembacaan arus secara langsung akan memengaruhi hasil perhitungan daya serta evaluasi efisiensi sistem. Hasil pengujian yang menunjukkan rata-rata *error* hanya sebesar 1,85% memberikan keyakinan bahwa peningkatan efisiensi

energi sebesar 31,07% yang diperoleh pada subbab sebelumnya didasarkan pada data pengukuran yang memiliki tingkat keandalan yang baik. Hal ini memperkuat validitas hasil penelitian sekaligus mengurangi potensi bias akibat kesalahan instrumen.

Hasil penelitian ini juga mendukung berbagai penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa sensor INA219 merupakan salah satu sensor arus yang memiliki tingkat akurasi tinggi untuk aplikasi monitoring sistem fotovoltaik skala kecil. Namun demikian, penelitian ini tidak hanya memanfaatkan sensor untuk kebutuhan pencatatan data, melainkan mengintegrasikannya dengan mekanisme *dual-axis solar tracking*, sistem proteksi baterai, dan monitoring berbasis IoT. Integrasi tersebut menunjukkan bahwa sensor tetap mampu memberikan performa yang stabil meskipun bekerja pada sistem yang memiliki proses komunikasi data dan pengendalian perangkat secara bersamaan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian akurasi sensor menunjukkan bahwa *Voltage Sensor Module* dan sensor INA219 memiliki rata-rata *error* masing-masing sebesar **1,36%** dan **1,85%**. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa kedua sensor mampu menghasilkan data pengukuran yang akurat dan konsisten sehingga layak digunakan sebagai dasar evaluasi performa sistem manajemen energi panel surya. Tingkat akurasi yang tinggi ini memberikan kepercayaan bahwa seluruh data tegangan, arus, dan daya yang digunakan pada penelitian memiliki validitas yang memadai. Dengan demikian, hasil pengujian efisiensi energi pada subbab sebelumnya dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dan menjadi dasar yang kuat untuk melanjutkan evaluasi terhadap keandalan sistem proteksi baterai serta performa komunikasi IoT pada subbab berikutnya.

3.4. Hasil Pengujian Sistem

Keandalan sistem merupakan salah satu aspek penting dalam implementasi pembangkit listrik tenaga surya *off-grid*. Selain mampu menghasilkan energi listrik secara optimal, sistem juga harus dapat menjaga keamanan proses penyimpanan energi serta menjamin bahwa informasi kondisi sistem dapat dipantau secara *real-time*. Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi dua indikator utama keandalan sistem, yaitu kinerja mekanisme *battery protection* dan performa komunikasi data berbasis *Internet of Things* (IoT). Kedua pengujian tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa sistem tidak hanya memiliki performa yang baik dari sisi efisiensi energi, tetapi juga mampu beroperasi secara stabil dan aman dalam kondisi penggunaan nyata.

3.4.1 Hasil Pengujian Battery Protection

Pengujian *battery protection* dilakukan untuk memastikan bahwa *Solar Charge Controller* (SCC) dan modul proteksi baterai mampu mengendalikan proses pengisian maupun pelepasan energi sesuai batas tegangan yang telah ditentukan. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi operasi, yaitu *overcharge*, *overdischarge*, dan kondisi pengisian normal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh mekanisme proteksi dapat bekerja sesuai dengan parameter yang telah dirancang sehingga mampu menjaga keamanan baterai selama proses pengoperasian sistem.

Table 6. Hasil Pengujian Battery Protection

Kondisi Pengujian	Parameter Tegangan	Status Sistem	Hasil
Overcharge Protection	13,8 V	Pengisian baterai diputus	Berhasil
Overdischarge Protection	11,4 V	Beban diputus dari baterai	Berhasil
Charging Normal	11,5-13,7 V	Pengisian berlangsung normal	Berhasil

Berdasarkan Tabel 6, mekanisme proteksi berhasil menghentikan proses pengisian ketika tegangan baterai mencapai 13,8 V. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa SCC mampu mendeteksi batas tegangan maksimum baterai kemudian memutuskan arus pengisian secara otomatis sehingga risiko *overcharge* dapat dihindari. Sebaliknya, ketika tegangan baterai turun hingga 11,4 V, sistem juga berhasil memutuskan suplai daya menuju beban sebagai bentuk perlindungan terhadap kondisi *overdischarge*. Keberhasilan kedua mekanisme tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan untuk menjaga baterai tetap bekerja pada rentang tegangan yang aman.

Keberadaan *battery protection* memberikan kontribusi yang sangat penting terhadap keberlangsungan operasi sistem *off-grid*. Peningkatan efisiensi energi yang telah diperoleh melalui mekanisme *dual-axis solar tracker* tidak akan memberikan manfaat optimal apabila energi yang berhasil dipanen tidak dikelola dengan baik. Pengisian baterai secara berlebihan dapat mempercepat degradasi sel baterai, sedangkan pelepasan energi hingga melewati batas aman dapat mengurangi kapasitas penyimpanan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, integrasi SCC dan

modul proteksi pada penelitian ini berfungsi sebagai mekanisme pengelolaan energi yang memastikan bahwa peningkatan energi keluaran juga diikuti dengan peningkatan keamanan penyimpanannya.

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa sistem yang diusulkan tidak hanya berorientasi pada peningkatan produksi energi, tetapi juga memperhatikan aspek keberlanjutan (*sustainability*) dari media penyimpanan energi. Pada banyak penelitian sebelumnya, evaluasi *solar tracker* umumnya hanya difokuskan pada peningkatan daya keluaran panel tanpa membahas bagaimana energi tersebut disimpan dan dimanfaatkan secara aman. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengelolaan baterai merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari sistem manajemen energi, sehingga efisiensi pembangkitan dan keandalan penyimpanan dapat berjalan secara seimbang. Dengan demikian, kontribusi penelitian tidak hanya terletak pada peningkatan efisiensi panel surya, tetapi juga pada kemampuan menjaga umur pakai baterai melalui mekanisme proteksi otomatis.

3.4.2 Hasil Pengujian Performa IoT

Selain mengevaluasi sistem proteksi baterai, penelitian ini juga menguji performa komunikasi data antara ESP32, Firebase, dan antarmuka monitoring berbasis *Website* Android. Pengujian dilakukan sebanyak sepuluh kali dengan mengukur waktu yang dibutuhkan sejak data sensor dikirim oleh ESP32 hingga berhasil ditampilkan pada antarmuka monitoring. Parameter ini digunakan untuk mengetahui tingkat responsivitas sistem dalam menyediakan informasi kondisi panel surya secara *real-time*.

Table 7. Hasil Pengujian Latensi Komunikasi IoT

Percobaan	Delay
1	0,8
2	1,0
3	0,9
4	0,8
5	1,1
6	0,7
7	0,9
8	1,0
9	0,8
10	0,9
Rata rata	0,89 detik

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki rata-rata waktu tunda komunikasi sebesar **0,89 detik**, dengan rentang *delay* antara 0,7 hingga 1,1 detik. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses pengiriman data berlangsung secara cepat dan relatif stabil selama pengujian dilakukan. Variasi waktu tunda yang relatif kecil mengindikasikan bahwa komunikasi antara ESP32, Firebase, dan antarmuka monitoring mampu bekerja secara konsisten tanpa mengalami gangguan yang signifikan. Dengan demikian, pengguna dapat memperoleh informasi kondisi sistem hampir secara langsung setelah data berhasil diakuisisi oleh sensor.

Rendahnya nilai *delay* dipengaruhi oleh penggunaan ESP32 yang telah memiliki modul Wi-Fi terintegrasi serta layanan Firebase yang mendukung mekanisme sinkronisasi data secara *real-time*. Proses komunikasi tidak memerlukan konfigurasi jaringan yang kompleks sehingga waktu pemrosesan dapat ditekan seminimal mungkin. Selain itu, ukuran data yang dikirim berupa parameter tegangan, arus, daya, dan status baterai relatif kecil sehingga tidak membebani proses transmisi. Faktor-faktor tersebut berkontribusi terhadap terciptanya sistem monitoring yang responsif dan mampu memberikan pembaruan informasi secara cepat.

Performa komunikasi yang baik memiliki peranan penting dalam sistem manajemen energi karena memungkinkan pengguna melakukan pemantauan terhadap kondisi panel surya dan baterai tanpa harus berada di lokasi pemasangan. Informasi mengenai tegangan, arus, daya, maupun status pengisian baterai dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan apabila terjadi kondisi yang tidak diinginkan. Dengan demikian, sistem monitoring tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi data, tetapi juga menjadi bagian dari mekanisme pengawasan operasional yang mendukung keandalan sistem secara keseluruhan.

Hasil ini juga menunjukkan bahwa integrasi antara perangkat keras dan platform IoT mampu memberikan performa komunikasi yang memadai untuk aplikasi panel surya skala kecil. Dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang umumnya hanya menampilkan data monitoring tanpa menghubungkannya dengan sistem pengelolaan energi, penelitian ini menghadirkan komunikasi *real-time* sebagai bagian dari arsitektur manajemen energi terpadu. Integrasi tersebut memungkinkan pengguna memperoleh informasi mengenai kondisi pembangkitan energi, status baterai, dan performa sistem dalam satu antarmuka yang terhubung secara langsung dengan perangkat di lapangan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian keandalan sistem menunjukkan bahwa mekanisme *battery protection* dan komunikasi IoT mampu bekerja sesuai dengan fungsi yang telah dirancang. Sistem berhasil menjaga baterai tetap berada pada rentang operasi yang aman sekaligus menyediakan informasi kondisi operasional dengan rata-rata *delay* hanya **0,89 detik**. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi energi yang diperoleh pada subbab sebelumnya didukung oleh sistem pengelolaan dan monitoring yang memiliki tingkat keandalan yang baik. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya menawarkan peningkatan performa pembangkitan energi, tetapi juga menghadirkan sistem manajemen energi yang lebih aman, responsif, dan sesuai untuk implementasi pada sistem fotovoltaik *off-grid*.

3.5. Hasil Evaluasi Pengguna

Evaluasi pengguna dilakukan untuk mengetahui tingkat penerimaan terhadap sistem monitoring berbasis *Website* Android yang dikembangkan pada penelitian ini. Pengujian menggunakan metode *User Acceptance Test* (UAT) dengan instrumen kuesioner berbasis skala Likert lima tingkat. Sebanyak 20 responden yang terdiri atas masyarakat Desa Puring dan teknisi lapangan dilibatkan dalam proses evaluasi. Penilaian difokuskan pada empat aspek utama, yaitu kemudahan penggunaan, kualitas antarmuka, kejelasan informasi yang disajikan, serta kebermanfaatan sistem dalam mendukung pengelolaan panel surya *off-grid*.

Table 8. Hasil User Acceptance Test (UAT)

No	Aspek Penilaian	Persentase	Kategori
1	Kemudahan Penggunaan (<i>Ease of Use</i>)	89,0%	Sangat Baik
2	Tampilan Antarmuka (<i>User Interface/User Experience</i>)	91,5%	Sangat Baik
3	Kejelasan Informasi dan Transparansi Data	92,0%	Sangat Baik
4	Kebermanfaatan Sistem	88,5%	Sangat Baik
	Rata-rata	90,25%	Sangat Layak

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 8, sistem memperoleh nilai rata-rata sebesar **90,25%** dengan kategori **Sangat Layak**. Seluruh aspek penilaian memperoleh persentase di atas 88%, yang menunjukkan bahwa sistem diterima dengan baik oleh responden. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa antarmuka yang dikembangkan mampu memberikan pengalaman penggunaan yang mudah dipahami, baik oleh masyarakat umum maupun teknisi yang terlibat dalam pengoperasian sistem. Tingginya tingkat penerimaan pengguna juga menunjukkan bahwa integrasi fungsi monitoring dan penyajian informasi telah berjalan sesuai dengan kebutuhan pengguna di lapangan.

Aspek dengan nilai tertinggi diperoleh pada indikator **informatif dan transparansi data**, yaitu sebesar **92,0%**. Hasil ini menunjukkan bahwa pengguna merasa informasi mengenai tegangan, arus, daya keluaran, serta status baterai yang ditampilkan pada antarmuka sudah cukup jelas dan mudah dipahami. Penyajian data secara *real-time* memungkinkan pengguna memantau kondisi sistem tanpa harus melakukan pengukuran langsung menggunakan alat ukur konvensional. Dengan demikian, sistem monitoring tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi data, tetapi juga sebagai sarana pendukung dalam proses pengambilan keputusan selama pengoperasian panel surya.

Aspek **tampilan antarmuka (*User Interface/User Experience*)** memperoleh nilai sebesar **91,5%**, yang menunjukkan bahwa desain antarmuka dinilai mudah dipahami oleh pengguna. Informasi disajikan dalam bentuk yang sederhana sehingga memudahkan pengguna untuk mengakses parameter penting tanpa memerlukan pemahaman teknis yang mendalam. Kondisi ini penting mengingat sistem dirancang agar dapat digunakan tidak hanya oleh teknisi, tetapi juga oleh masyarakat yang memanfaatkan panel surya sebagai sumber energi alternatif. Antarmuka yang sederhana dan responsif menjadi salah satu faktor yang mendukung keberhasilan implementasi sistem di lingkungan pedesaan.

Sementara itu, aspek **kemudahan penggunaan** memperoleh nilai **89,0%**, sedangkan aspek **kebermanfaatan sistem** memperoleh nilai **88,5%**. Persentase tersebut menunjukkan bahwa responden menilai sistem mudah dioperasikan dan memberikan manfaat nyata dalam memantau kondisi panel surya serta baterai. Meskipun memperoleh nilai yang sedikit lebih rendah dibandingkan aspek lainnya, kedua indikator tersebut tetap berada

pada kategori **Sangat Baik**. Hal ini menunjukkan bahwa pengguna dapat beradaptasi dengan sistem tanpa mengalami kendala yang berarti selama proses pengujian berlangsung.

Hasil evaluasi pengguna memperlihatkan bahwa keberhasilan sistem tidak hanya ditentukan oleh peningkatan efisiensi energi atau keakuratan sensor, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam menyampaikan informasi kepada pengguna secara efektif. Sistem monitoring yang responsif dan mudah digunakan memungkinkan pengguna melakukan pengawasan terhadap kondisi panel surya secara berkelanjutan. Kondisi tersebut menjadi penting terutama pada sistem *off-grid*, di mana proses pemantauan berperan dalam menjaga kontinuitas pasokan energi dan mendeteksi potensi gangguan sejak dini. Dengan demikian, aspek *usability* menjadi salah satu komponen yang mendukung keberhasilan implementasi sistem secara keseluruhan.

Temuan penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa tingkat penerimaan pengguna merupakan faktor penting dalam keberhasilan implementasi sistem berbasis *Internet of Things*. Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada evaluasi antarmuka aplikasi tanpa mengaitkannya dengan performa teknis perangkat yang dikendalikan. Pada penelitian ini, evaluasi pengguna dilakukan terhadap sistem yang telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi, memiliki tingkat akurasi sensor yang baik, serta didukung oleh mekanisme *battery protection* dan komunikasi *real-time*. Oleh karena itu, tingkat penerimaan pengguna yang tinggi tidak hanya mencerminkan kualitas antarmuka, tetapi juga menunjukkan bahwa integrasi seluruh subsistem mampu menghasilkan pengalaman penggunaan yang positif.

Secara keseluruhan, hasil *User Acceptance Test* menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis *Website* Android yang dikembangkan pada penelitian ini memiliki tingkat penerimaan pengguna yang sangat baik dengan nilai rata-rata sebesar **90,25%**. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa sistem mampu memenuhi kebutuhan pengguna dalam memperoleh informasi kondisi panel surya secara cepat, mudah, dan transparan. Keberhasilan ini melengkapi hasil pengujian teknis yang telah dibahas pada subbab sebelumnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem tidak hanya memiliki performa yang baik dari sisi efisiensi energi dan keandalan operasional, tetapi juga layak diterapkan pada lingkungan nyata. Dengan demikian, penelitian ini berhasil menghadirkan sebuah sistem manajemen energi panel surya yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga dapat diterima oleh pengguna sebagai solusi pendukung pengelolaan energi *off-grid*.

3.6 Diskusi Umum

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan performa sistem panel surya *off-grid* tidak hanya dipengaruhi oleh kemampuan panel dalam mengikuti arah datang cahaya matahari, tetapi juga oleh integrasi berbagai subsistem yang saling mendukung dalam proses pengelolaan energi. Berbeda dengan sebagian besar penelitian sebelumnya yang mengevaluasi *dual-axis solar tracking* hanya berdasarkan peningkatan daya keluaran panel [16], penelitian ini mengembangkan pendekatan yang lebih komprehensif melalui integrasi mekanisme pelacakan matahari, sistem proteksi baterai, monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT), dan antarmuka pengguna berbasis *Website* Android. Pendekatan tersebut menghasilkan sebuah sistem yang tidak hanya mampu meningkatkan pemanenan energi, tetapi juga menjaga keamanan penyimpanan energi serta menyediakan informasi operasional secara *real-time*. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berorientasi pada peningkatan efisiensi panel surya, tetapi juga pada peningkatan keandalan pengelolaan energi secara menyeluruh.

Peningkatan efisiensi energi yang diperoleh menunjukkan bahwa mekanisme *dual-axis solar tracking* mampu mengurangi kehilangan energi akibat perubahan sudut datang cahaya matahari sepanjang hari. Keberhasilan tersebut didukung oleh kemampuan empat sensor *Light Dependent Resistor* (LDR) dalam mendeteksi distribusi intensitas cahaya dan mengarahkan dua motor servo untuk mempertahankan orientasi panel pada posisi yang lebih optimal. Namun demikian, peningkatan energi yang berhasil dipanen tidak akan memberikan manfaat maksimal apabila tidak diikuti oleh sistem penyimpanan energi yang andal. Oleh karena itu, integrasi *Solar Charge Controller* dan mekanisme *battery protection* menjadi komponen penting yang memastikan energi hasil pembangkitan dapat disimpan secara aman tanpa meningkatkan risiko kerusakan baterai akibat kondisi *overcharge* maupun *overdischarge*.

Selain aspek pembangkitan dan penyimpanan energi, penelitian ini juga menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT memiliki peranan penting dalam mendukung pengelolaan sistem fotovoltaik *off-grid*. Proses komunikasi data yang berlangsung secara *real-time* memungkinkan pengguna memperoleh informasi mengenai kondisi panel surya, parameter kelistrikan, serta status baterai tanpa harus melakukan pengukuran secara langsung di lokasi pemasangan. Ketersediaan informasi tersebut tidak hanya meningkatkan kemudahan proses pemantauan, tetapi juga memungkinkan tindakan korektif dilakukan lebih cepat apabila terjadi perubahan kondisi sistem. Dengan demikian, teknologi IoT pada penelitian ini tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi data, melainkan menjadi bagian dari mekanisme pengawasan operasional yang mendukung keberlanjutan sistem.

Keandalan sistem juga diperkuat oleh tingkat akurasi sensor tegangan dan sensor arus yang relatif tinggi sehingga data yang digunakan dalam proses monitoring memiliki tingkat validitas yang baik. Akurasi pengukuran merupakan aspek yang sangat penting karena seluruh proses evaluasi performa sistem bergantung pada kualitas data yang diperoleh dari sensor. Apabila data pengukuran tidak akurat, maka proses pengambilan keputusan terkait pengelolaan energi juga berpotensi menghasilkan kesimpulan yang kurang tepat. Oleh sebab itu, keberhasilan sistem dalam mempertahankan tingkat kesalahan pengukuran yang rendah memberikan keyakinan bahwa informasi yang ditampilkan kepada pengguna benar-benar merepresentasikan kondisi aktual sistem di lapangan.

Hasil evaluasi pengguna semakin memperkuat bahwa sistem yang dikembangkan tidak hanya memenuhi aspek teknis, tetapi juga memenuhi aspek kegunaan (*usability*). Tingginya tingkat penerimaan pengguna menunjukkan bahwa informasi yang disajikan melalui antarmuka monitoring dapat dipahami dengan mudah oleh pengguna yang memiliki latar belakang berbeda, baik masyarakat umum maupun teknisi lapangan. Kondisi ini menjadi penting mengingat salah satu tantangan dalam implementasi teknologi energi terbarukan di tingkat masyarakat bukan hanya terletak pada aspek teknologi, tetapi juga pada kemudahan pengoperasian dan pemantauan sistem. Dengan demikian, keberhasilan implementasi penelitian ini tidak hanya ditentukan oleh performa perangkat keras, tetapi juga oleh kualitas interaksi antara sistem dan pengguna.

Apabila seluruh hasil penelitian dianalisis secara terpadu, terlihat bahwa setiap subsistem memiliki hubungan yang saling melengkapi dalam membentuk sebuah mekanisme manajemen energi yang utuh. Mekanisme *dual-axis solar tracking* berperan meningkatkan energi yang dipanen oleh panel surya, sedangkan *battery protection* memastikan energi tersebut dapat disimpan secara aman. Selanjutnya, sistem monitoring berbasis IoT menyediakan informasi kondisi operasional secara *real-time*, sementara antarmuka pengguna memungkinkan seluruh informasi tersebut dimanfaatkan secara efektif oleh pengguna. Hubungan antarkomponen tersebut menunjukkan bahwa peningkatan performa sistem tidak berasal dari satu komponen saja, melainkan dari sinergi seluruh subsistem yang bekerja secara terintegrasi.



Gambar 3. Tampilan Web



Gambar 4. Tampilan web di hp



Gambar 5. Firebase

Berdasarkan hasil penelitian, konsep integrasi sistem dapat digambarkan sebagai hubungan berkelanjutan antara proses pembangkitan energi, penyimpanan energi, pemantauan sistem, dan interaksi pengguna. Mekanisme pelacakan matahari meningkatkan energi yang dihasilkan panel surya, kemudian energi tersebut diamankan melalui sistem proteksi baterai sebelum dimanfaatkan oleh beban. Seluruh proses tersebut dipantau secara *real-time* menggunakan teknologi IoT sehingga kondisi sistem dapat diketahui setiap saat melalui antarmuka Website Android. Pendekatan ini membentuk suatu **arsitektur manajemen energi terintegrasi (*Integrated Energy Management Architecture*)** yang menghubungkan seluruh proses pengelolaan energi dalam satu sistem yang saling mendukung.

Dari sisi kontribusi ilmiah, penelitian ini menawarkan pendekatan yang berbeda dibandingkan penelitian terdahulu yang umumnya hanya berfokus pada satu aspek, seperti peningkatan efisiensi panel surya atau pengembangan sistem monitoring. Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan performa sistem fotovoltaik *off-grid* dapat dicapai melalui integrasi empat komponen utama, yaitu optimasi pembangkitan energi, keakuratan pengukuran, keamanan penyimpanan energi, dan monitoring *real-time*. Integrasi tersebut menghasilkan sistem yang tidak hanya memiliki performa teknis yang baik, tetapi juga memiliki tingkat keandalan operasional serta penerimaan pengguna yang tinggi. Dengan demikian, kontribusi penelitian ini tidak hanya terletak pada implementasi perangkat keras, tetapi juga pada pengembangan konsep sistem manajemen energi yang lebih komprehensif untuk aplikasi panel surya skala kecil.

Secara keseluruhan, hasil penelitian berhasil menjawab *research question* yang diajukan pada awal penelitian. Penerapan sistem *dual-axis automatic solar tracker* terbukti mampu meningkatkan efisiensi pemanenan energi, sedangkan integrasi *battery protection*, sensor berakurasi tinggi, serta monitoring berbasis IoT mampu meningkatkan keandalan pengelolaan energi pada sistem panel surya *off-grid*. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pendekatan integratif yang diusulkan layak dipertimbangkan sebagai alternatif pengembangan sistem fotovoltaik skala kecil, khususnya pada wilayah yang memiliki keterbatasan akses terhadap jaringan listrik

konvensional. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah sekaligus kontribusi praktis dalam mendukung pengembangan sistem energi terbarukan yang lebih efisien, aman, dan mudah dipantau.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem **Dual-Axis Automatic Solar Tracker** berbasis ESP32 yang mengintegrasikan mekanisme pelacakan matahari, sistem proteksi baterai, serta monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) melalui *Website* Android pada sistem panel surya *off-grid*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi tersebut mampu meningkatkan rata-rata efisiensi daya sebesar **31,07%** dibandingkan panel surya statis. Selain itu, sistem monitoring memiliki tingkat akurasi pengukuran yang baik dengan rata-rata *error* sensor tegangan sebesar **1,36%** dan sensor arus INA219 sebesar **1,85%**, sehingga data yang digunakan untuk mengevaluasi performa sistem dapat dipercaya. Dari sisi operasional, mekanisme *battery protection* berhasil menjaga baterai dari kondisi *overcharge* dan *overdischarge*, sedangkan komunikasi data berbasis IoT mampu menampilkan informasi secara *real-time* dengan rata-rata *delay* sebesar **0,89 detik**. Hasil evaluasi pengguna juga menunjukkan tingkat penerimaan yang sangat baik dengan nilai rata-rata **90,25%**, sehingga sistem dinilai layak untuk diterapkan sebagai media monitoring dan pengelolaan energi panel surya. Kontribusi utama penelitian ini tidak hanya terletak pada peningkatan efisiensi panel surya melalui mekanisme *dual-axis solar tracking*, tetapi juga pada pengembangan **arsitektur manajemen energi terintegrasi (*Integrated Energy Management Architecture*)** yang menghubungkan proses optimasi pembangkitan energi, pengamanan penyimpanan energi, monitoring *real-time*, dan interaksi pengguna dalam satu sistem yang saling mendukung. Pendekatan ini memperluas implementasi *solar tracker* yang sebelumnya umumnya hanya berfokus pada peningkatan daya keluaran, menjadi sistem yang lebih komprehensif untuk mendukung pengelolaan energi pada aplikasi fotovoltaiik *off-grid*. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem dengan menerapkan algoritma pelacakan yang lebih adaptif, seperti *fuzzy logic* atau *machine learning*, menambahkan prediksi kondisi cuaca, serta mengevaluasi performa sistem dalam periode pengujian yang lebih panjang dan pada berbagai kondisi lingkungan sehingga keandalan sistem dapat dianalisis secara lebih menyeluruh.

Referensi

- [1] R. Kusumah, H. I. Islam, dan S. Sobur, "Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Berbasis Internet of Things (IoT) Pada Ruang Data Center," *Journal of Applied Informatics and Computing*, vol. 7, no. 1, hlm. 88–94, Jul 2023, doi: 10.30871/jaic.v7i1.5199.
- [2] M. Ilham dan S. I. Haryudo, "Perancangan Sistem Power Tracking Panel Surya Menggunakan Real Time Clock dan Aktuator Berbasis Internet Of Things," *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, vol. 10, no. 18, hlm. 733–742, Sep 2024, doi: 10.5281/zenodo.13956139.
- [3] P. Lubis dkk., "Perancangan Solar Tracker Sistem Otomatis Secara Real-Time pada Panel Surya," *Impression : Jurnal Teknologi dan Informasi*, vol. 4, no. 2, hlm. 112–124, Jul 2025, doi: 10.59086/JTLV4I2.912.
- [4] I. Inayah dkk., "Realtime Monitoring System of Solar Panel Performance Based on Internet of Things Using Blynk Application," *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, vol. 7, no. 2, hlm. 135–143, Des 2022, doi: 10.21831/elinvo.v7i2.53365.
- [5] A. F. Nurhasanah, S. Sudarti, dan Y. Yushardi, "KAJIAN PERUBAHAN IKLIM TERHADAP EFISIENSI PANEL SURYA SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF DI INDONESIA," *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, vol. 7, no. 2, hlm. 366–375, Des 2023, doi: 10.37478/optika.v7i2.3284.
- [6] B. Edward Muhammad Salam, I. Kamil, N. Nadhiroh, J. Teknik Elektro, P. Studi Teknik Otomasi Listrik Industri, dan P. Negeri Jakarta Jl, "Sistem Monitoring Luaran Daya Panel Surya Solar Tracker Berbasis Internet of Things Dengan GOIOT," *Electrices*, vol. 3, no. 2, hlm. 53–59, Okt 2021, doi: 10.32722/ees.v3i2.4082.
- [7] M. D. Nugraha, K. A. Mahabojana, dan N. A. Prabawa, "Design and build an internet of thing (IoT) solar panel monitoring and solar tracking system," *International research journal of engineering, IT and scientific research*, vol. 9, no. 4, hlm. 99–110, Jun 2023, doi: 10.21744/irjeis.v9n4.2334.
- [8] W. Wahyono dkk., "Dual Axis Solar Tracker System Application Based on Arduino Atmega 2560 and Internet of Things (iot) for Submersible Pump Operation," *Eksergi*, vol. 18, no. 3, hlm. 206–209, Sep 2022, doi: 10.32497/eksergi.v18i3.3910.
- [9] I. Bagus Kurniansyah, F. Ronilaya, dan M. Fahmi Hakim, "Real Time Monitoring System Dari Active Solar Photovoltaic Tracker Berbasis Internet Of Things," *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 7, no. 3, hlm. 7–13, Nov 2020, doi: 10.33795/elposys.v7i3.5.
- [10] A. H. Dhanarparasaji, S. I. Haryudo, T. Wrahatnolo, dan M. Rohman, "IoT-Based Dual Axis Solar Tracker Design on Monocrystalline Photovoltaic for Hydroponic Plant Water Pump Power Supply," *Journal of Telecommunication Electronics and Control Engineering (JTECE)*, vol. 7, no. 1, hlm. 77–87, Jan 2025, doi: 10.20895/jtece.v7i1.1636.
- [11] S. Ma'shumah, E. K. Pramartaningthyas, dan A. G. Rokhim, "IMPLEMENTASI INTERNET OF THINGS (IOT) PADA SISTEM MONITORING DAN NOTIFIKASI PEMAKAIAN LISTRIK RUMAH TANGGA BERBASIS APLIKASI BLYNK," *Power Elektronik : Jurnal Orang Elektro*, vol. 12, no. 3, hlm. 144–149, Mei 2024, doi: 10.30591/polekro.v12i3.5282.
- [12] M. Z. Azmi, S. Syahririni, I. Anshory, dan S. D. Ayuni, "Solar Tracker Enhances Energy Yield by Over 35%," *Indonesian Journal of Innovation Studies*, vol. 25, no. 2, Apr 2024, doi: 10.21070/ijins.v25i2.1137.
- [13] J. Homepage, L. Oktaviana Sari, M. Fajar Edwin Saputra, E. Safrianti, dan C. Author, "Sistem Monitoring Arus Listrik Berbasis Internet of Things (IoT) pada Solar Panel di Laboratorium Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) UIN Suska Riau," *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, vol. 4, no. 1, hlm. 205–211, Jan 2024, doi: 10.57152/malcom.v4i1.1033.

- [14] John W. Creswell, "Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches," London: SAGE Publications, 2014. Diakses: 2 Maret 2026. [Daring]. Tersedia pada: https://books.google.co.id/books?id=4uB76IC_pOQC&printsec=copyright&hl=id#v=onepage&q&f=false
- [15] Sugiyono, "Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif Dan R&D," Bandung: Alfabeta, 2020. Diakses: 2 Maret 2026. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.scribd.com/document/729101674/Metode-Penelitian-Kuantitatif-Kualitatif-Dan-r-d-Sugiyono-2020>
- [16] A. Rizal, A. Wajiansyah, P. Negeri Samarinda, dan J. Cipto Mangunkusumo Samarinda, "ANALISIS INTEGRASI SISTEM PLTS OFF-GRID UNTUK JARINGAN RADIO LINK DI AREA PERTAMBANGAN PT. ARTHA TUNGGAL MANDIRI," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 14, no. 1, hlm. 2830–7062, Jan 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i1.8780.
