



PENGEMBANGAN SISTEM SOLAR TRACKER DUAL-AXIS BERBASIS IOT DAN KONTROL BEBAN JARAK JAUH DENGAN RELAY UNTUK MENINGKATKAN EFEKTIVITAS PLTS OFF- GRID

Ilham Yudhistira Ardhana¹, Hasyim Asy'ari¹, Agus Supardi¹, Dedi Ary
Prasetya¹

¹ Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. A. Yani Tromol Pos 1, Pabelan, Kartasura,
Sukoharjo, Indonesia

 Email korespondensi: ilhamyudhistiraardhana10@gmail.com

Abstrak. Indonesia adalah negara yang terletak pada jalur khatulistiwa bumi. Dimana paparan sinar matahari melimpah sepanjang tahun begitupun dengan potensi energi yang bisa diserap dengan memanfaatkan sel surya. Untuk memaksimalkan konversi energi dan peningkatan efisiensi sel surya dibutuhkan suatu sistem *solar tracker*. *Solar tracker* merupakan suatu sistem yang digunakan untuk melacak arah datang sinar matahari yang dideteksi oleh 4 sensor *Light Dependent Resistor* (LDR), dilengkapi panel surya, *Solar Charge Controller*, baterai, inverter, motor servo TD8120MG sebagai penggerak, relay untuk kontrol beban, dan sensor PZEM-017 untuk monitoring tegangan, arus, dan daya melalui aplikasi Blynk secara *real time*. Metode penelitian menggunakan studi literatur untuk mengkaji teknologi pelacakan surya dan studi observasi melalui pengujian langsung *sistem tracking* dan *non-tracking*. Pengambilan data dilakukan setiap jam pada pukul 08.00-16.00 WIB dalam kondisi cuaca cerah. Hasil pengujian menunjukkan sistem *tracking* menghasilkan daya rata-rata 23.35 W pada hari pertama dan 20,89 W pada hari kedua dengan puncak tertinggi 35.76 W pada pukul 12.00. *Sistem non-tracking* menghasilkan daya rata-rata 16.96 W dan 15.83 W. Sistem *tracking* konsisten menghasilkan tegangan 0.4-0.6V lebih tinggi dan arus 0.3-0.7A lebih besar. Kesimpulan penelitian membuktikan sistem *solar tracker* meningkatkan efisiensi sekitar 34% dibandingkan sistem *non-tracking*, sehingga sistem *off-grid* dengan pelacak matahari lebih efektif memaksimalkan keluaran panel surya.

Kata kunci: *Solar Tracker Dual-Axis, Relay, ESP32, Light Dependent Resistor*



PENDAHULUAN

Matahari merupakan sumber energi yang melimpah, energi ini dapat ditangkap menggunakan sel surya dengan memanfaatkan efek photovoltaic (PV) untuk mengubah energi elektromagnetik dari sinar matahari menjadi energi listrik (Qory Hidayati., 2020). Teknologi fotovoltaiik (PV) menghadapi berbagai tantangan dalam optimalisasi performanya, terutama faktor lingkungan seperti akumulasi debu yang dapat mengurangi efisiensi sistem secara signifikan. El Shenawy dan El Ghetany (2021) menunjukkan dampak substansial akumulasi debu terhadap performa modul PV di bawah kondisi iklim Kairo. Untuk mengatasi tantangan efisiensi ini, teknologi *solar tracking* telah dikembangkan sebagai solusi inovatif. Fuentes-Morales et al. (2020) melakukan tinjauan komprehensif terhadap algoritma kontrol yang diterapkan pada sistem *solar tracking* aktif, mengidentifikasi berbagai pendekatan kontrol yang dapat meningkatkan efisiensi pengumpulan energi surya.

Implementasi sistem *solar tracking dual-axis* dapat dirancang dengan pendekatan ekonomis tanpa mengorbankan efektivitas. Jamroen et al. (2020) mengembangkan sistem *solar tracking dual-axis* berbiaya rendah berbasis desain logika digital. Panel surya dapat menyuplai energi listrik dalam bentuk listrik DC yang dapat dikonversi menjadi listrik AC melalui inverter. Keluaran inverter dapat digunakan untuk pengisian daya baterai dengan alat pengisi daya khusus, selain itu keluaran dari panel surya dapat langsung digunakan untuk pengisian daya baterai dengan menggunakan SCC (*Solar Charge Controller*) untuk mengatur pengisian daya baterai (Prianto, 2017).

Solar tracker adalah suatu sistem yang digunakan untuk melacak arah datang sinar matahari yang dideteksi oleh 4 sensor cahaya (*Light Dependent Resistor*) dan akan memberikan panduan informasi yang diolah oleh mikrokontroler ESP32 mengarahkan sistem penggerak 2 buah Motor servo TD8120MG dalam melacak sinar matahari, sehingga posisi sel surya langsung menghadap matahari setiap saat (Bangun Aji S dkk., 2022). Penggunaan sensor *Light Dependent Resistor* (LDR) menjadi elemen penting dalam sistem *solar tracker*. Sensor ini berfungsi untuk mendeteksi intensitas cahaya matahari dari berbagai arah, sehingga dapat memberikan data akurat untuk menggerakkan panel surya ke arah dengan sinar matahari paling optimal (Asmi. J dkk., 2020).

Pemantauan keluaran listrik dari panel surya, sensor PZEM-017 digunakan sebagai alat monitoring tegangan, arus, dan daya secara *real-time*. Sensor ini dirancang khusus untuk aplikasi monitoring daya listrik pada sistem DC, sehingga sangat cocok untuk PLTS *Off-grid*. PZEM-017 mampu memberikan data akurat mengenai parameter listrik yang dihasilkan oleh panel surya, seperti tegangan keluaran PV, arus yang mengalir ke beban, serta daya total yang dihasilkan (M. 'Aafi dkk., 2022).



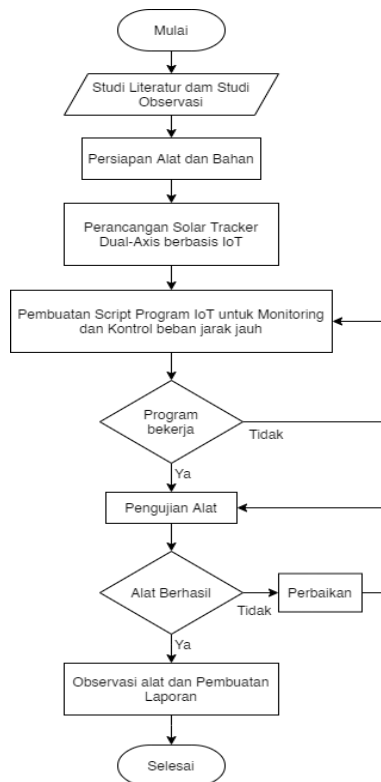
Penelitian pelacak surya berbasis IoT dengan menggunakan Arduino Uno dan Node MCU ESP 12 yang dilakukan oleh Yusak et al (2022) ini menggunakan sensor tegangan. Sistem IoT sendiri dapat dimonitoring menggunakan aplikasi Blynk yang menampilkan hasil pengukuran tegangan dan terdapat 2 mode yaitu manual dan otomatis. Mode tersebut berguna untuk mengatur gerak dari motor servo sehingga motor servo dapat dikendalikan melalui aplikasi blynk.

Berdasarkan permasalahan dan kondisi eksis pengembangan *solar tracker* tersebut, mendorong dilakukannya penelitian dan pengembangan lebih lanjut yaitu 2 dengan penambahan sumbu kerja menjadi sumbu x horizontal dan sumbu y vertikal. Serta dibuatkannya sistem monitoring data keluaran dari panel surya yang dapat dipantau dari jarak jauh secara *real-time* berbasis internet (*Internet of Things*) dengan bantuan mikrokontroler ESP32 yang dapat diakses melalui *smartphone* kapanpun dan dimanapun. *Internet of Things* juga diaplikasikan dalam mengendalikan relay untuk *switching* beban (*load*) dari PLTS *Off-grid solar tracker dual-axis* tersebut secara jarak jauh menggunakan *smartphone*. Dari hasil penelitian ini diharapkan dengan diterapkannya *solar tracker dual-axis* berbasis IoT mampu memaksimalkan konversi energi dan meningkatkan efisiensi panel surya.

METODE

Penelitian ini dimulai dengan melakukan kajian pustaka secara menyeluruh untuk mengumpulkan berbagai sumber referensi yang relevan, termasuk artikel jurnal ilmiah, dan laporan penelitian terdahulu. Proses ini bertujuan memberikan landasan teoretis yang kuat bagi penyusunan penelitian, sekaligus membantu dalam menentukan pilihan komponen dan material yang tepat, merancang arsitektur sistem, serta menetapkan metodologi pengumpulan data yang akan diterapkan. Setelah kajian pustaka selesai, langkah berikutnya adalah fase perancangan dan implementasi sistem berdasarkan temuan-temuan dari studi literatur. Pada tahap ini, berbagai komponen yang diperlukan diintegrasikan menjadi satu sistem yang utuh dengan mempertimbangkan secara teliti spesifikasi teknis setiap komponen agar performa sistem optimal. Tahap akhir melibatkan pengujian menyeluruh terhadap sistem yang telah dibangun serta proses akuisisi data eksperimental. Apabila ditemukan masalah teknis atau gangguan selama pengujian, dilakukan perbaikan dan kalibrasi ulang hingga sistem dapat beroperasi sesuai dengan parameter yang telah ditetapkan.

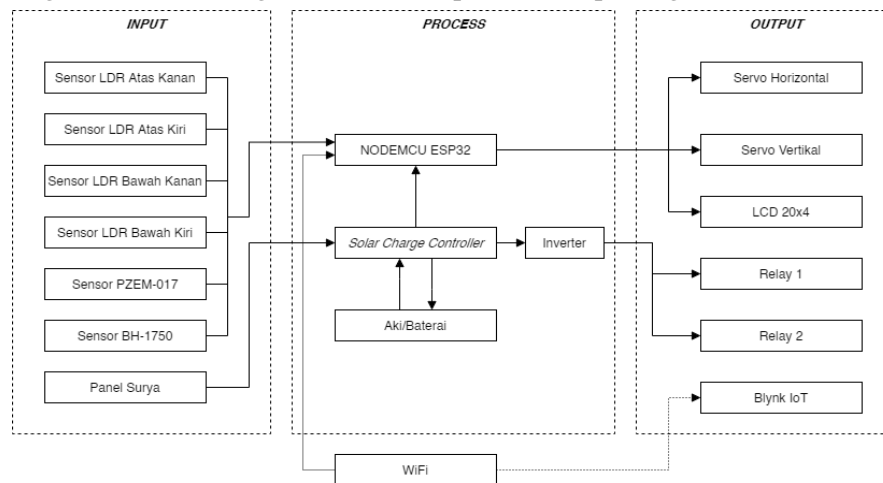




Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1 Tahap Perencanaan Sistem Alat

Blok diagram sistem disusun untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai alur kerja dari keseluruhan sistem, mulai dari tahap input, proses, hingga output. Diagram ini membantu memvisualisasikan bagaimana setiap komponen berinteraksi dalam mencapai hasil yang diinginkan. Blok diagram sistem dapat dilihat pada gambar 2.

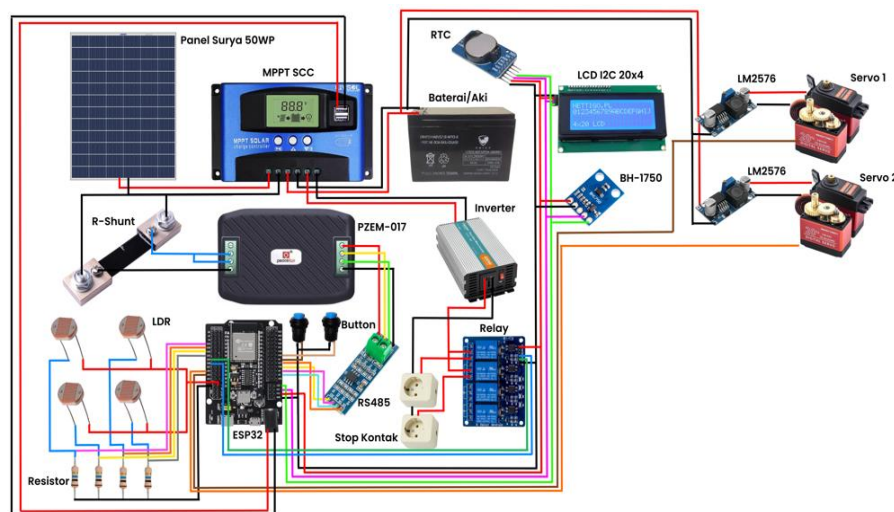


Gambar 2. Blok Diagram Sistem



Gambar 2 menjelaskan blok diagram sistem. Sistem solar tracker berbasis IoT terdiri dari tiga bagian utama: input, proses, dan output. Bagian input mencakup empat sensor LDR yang mendeteksi arah cahaya matahari, sensor PZEM-017 untuk mengukur tegangan, arus, dan daya listrik, serta sensor BH-1750 untuk mengukur intensitas cahaya (lux). Panel surya berfungsi sebagai sumber energi utama yang mengonversi energi matahari menjadi listrik. Seluruh data dari sensor dikirim ke mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali sistem. Pemilihan sensor yang tepat sangat penting agar data yang diterima akurat dan sistem dapat bekerja secara optimal. Pada bagian proses, ESP32 mengatur kinerja sistem berdasarkan data sensor, mengelola pengisian baterai melalui *solar charge controller*, serta menghubungkan sistem ke aplikasi Blynk melalui WiFi. Pada bagian output, ESP32 mengontrol dua motor servo (horizontal dan vertikal) untuk menggerakkan panel mengikuti arah matahari, menampilkan data ke LCD 20x4, dan mengaktifkan dua relay untuk perangkat eksternal. Dengan adanya konektivitas internet, pengguna dapat memantau dan mengendalikan sistem dari jarak jauh menggunakan *smartphone*. Sistem ini memungkinkan pelacakan matahari secara otomatis dan pemantauan *real-time* yang efisien berbasis IoT.

2.2 Perancangan Hardware



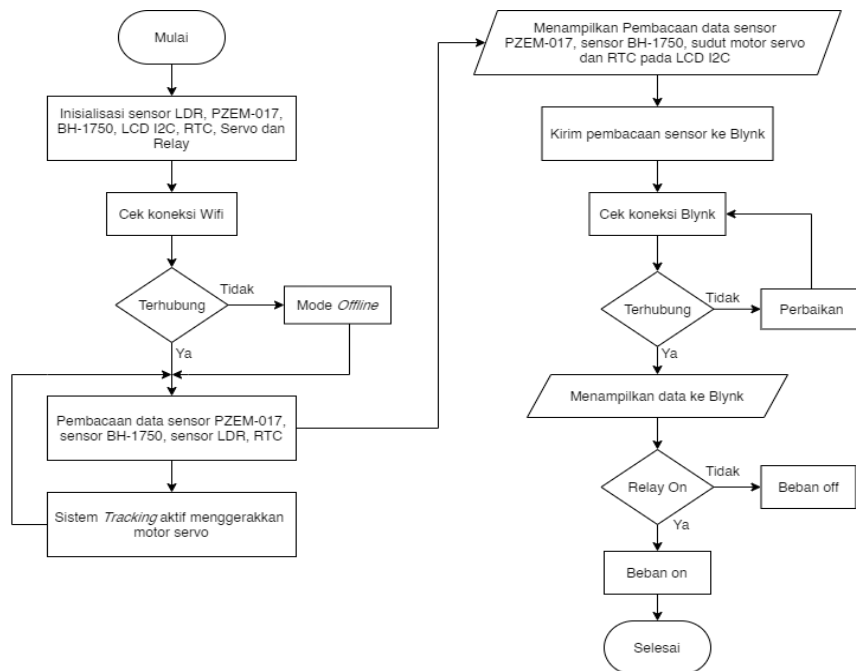
Gambar 3. Wiring Diagram Sistem

Gambar 3 menjelaskan sistem solar tracker dengan kontrol beban menggunakan relay yang terhubung ke aplikasi Blynk. Sistem ini merupakan integrasi antara teknologi pelacakan matahari otomatis dengan sistem monitoring dan kontrol jarak jauh yang canggih. Sistem dimulai dari panel surya 50WP yang terhubung ke MPPT *Solar Charge Controller* untuk mengoptimalkan pengisian baterai. *Solar Charge Controller* ini mengatur tegangan dan arus dari panel surya agar sesuai dengan karakteristik baterai 12V yang



digunakan sebagai penyimpanan energi. Energi yang tersimpan kemudian dapat dikonversi menjadi AC melalui inverter untuk mengoperasikan beban-beban rumah tangga. Inti dari sistem kontrol adalah mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai otak utama. ESP32 ini terhubung dengan berbagai sensor dan aktuator untuk menjalankan sistem *solar tracking*. Empat buah sensor LDR (*Light Dependent Resistor*) ditempatkan secara strategis untuk mendeteksi intensitas cahaya dari berbagai arah. Data dari keempat LDR ini diproses oleh ESP32 untuk menentukan posisi matahari yang optimal, kemudian menggerakkan dua servo motor yang berfungsi sebagai aktuator untuk mengatur posisi panel surya secara horizontal dan vertikal. Untuk monitoring sistem, terdapat beberapa komponen pendukung yang terintegrasi. LCD I2C 20x4 digunakan untuk menampilkan informasi real-time seperti status sistem, posisi panel, dan data sensor. RTC (*Real Time Clock*) memberikan informasi waktu yang akurat untuk sistem tracking dan logging data. R-Shunt berfungsi sebagai sensor arus untuk memonitor konsumsi daya sistem secara *real-time*. Komunikasi data menggunakan modul RS485 yang memungkinkan transmisi data jarak jauh.

2.3. Perancangan Software



Gambar 4. Diagram Alir Sistem

Gambar 4. Menunjukkan *flowchart* sistem *solar tracker* berbasis IoT yang menggambarkan alur kerja sistem monitoring dan kontrol otomatis yang dimulai dengan inisialisasi seluruh sensor (LDR, PZEM-017, BH-1750, LCD I2C, RTC, servo, dan relay), kemudian melakukan pengecekan koneksi WiFi untuk menentukan apakah sistem



beroperasi dalam mode *online* atau *offline*. Setelah koneksi WiFi berhasil, sistem melakukan pembacaan data dari sensor PZEM-017, BH-1750, LDR, dan RTC, lalu mengaktifkan sistem *tracking* untuk menggerakkan motor servo sesuai dengan posisi matahari. Secara paralel, sistem juga menampilkan dan mengirimkan data sensor ke Blynk untuk monitoring jarak jauh, kemudian melakukan pengecekan koneksi Blynk dan pengambilan data dari Blynk untuk mengontrol relay yang berfungsi sebagai saklar beban, dimana jika relay dalam kondisi "on" maka beban akan aktif, dan sebaliknya jika "off" maka beban akan dimatikan.

HASIL

3.1 Hasil Pembuatan *Hardware*

Berdasarkan desain perancangan *hardware*, sistem elektrikal dan mekanikal dibuat untuk mengetahui alur kelistrikan dari sistem *solar tracker* yang telah dibuat. Penulis menggunakan panel box supaya mempermudah dalam pemasangan seluruh komponen termasuk *sistem tracking* otomatis. Sistem menggunakan 1 buah panel surya kapasitas 50 wp yang dilengkapi dengan mekanisme *solar tracker* untuk mengikuti pergerakan matahari secara otomatis menggunakan motor servo dan sensor LDR sebagai pendeteksi intensitas cahaya. Alur kelistrikan dimulai dari panel surya yang dapat bergerak mengikuti arah matahari, kemudian menuju SCC (*Solar Charge Controller*). SCC bekerja untuk mengatur pengisian daya menuju baterai dengan efisiensi yang lebih optimal karena panel surya selalu menghadap matahari. Output beban SCC akan terhubung ke inverter untuk diubah dari listrik DC ke listrik AC. Pemasangan relay bertujuan agar sistem *solar tracker* bisa melayani beban AC yang dapat dikendalikan secara jarak jauh melalui Blynk maupun langsung menekan *push button* pada alat. Sensor PZEM-017 digunakan untuk mengukur tegangan, arus, daya panel surya dalam *sistem tracking* ini. Sensor PZEM-017 dilengkapi dengan serial antarmuka RS485 yang digunakan sebagai pembacaan keluaran data dari sensor PZEM-017. Mikrokontroler NodeMCU ESP32 digunakan untuk mengendalikan *sistem tracking*, membaca dan mengirim data keluaran dari sensor PZEM-017 serta sensor BH-1750 untuk pengukuran intensitas cahaya yang sudah terkoneksi dengan WiFi agar bisa ditampilkan dan dikontrol melalui aplikasi Blynk secara *real-time*.





(a)



(b)



(c)

Gambar 5. (a) rangkaian elektrik, (b) rangkaian mekanik, (c) desain sketchup

3.2 Sistem Program IoT (*Internet of Things*)

Sistem program IoT (*Internet of Things*) menggunakan program Arduino IDE yang digunakan sebagai perintah mikrokontroler ESP32 untuk mengontrol data yang dihasilkan dari sensor PZEM-017 serta mengendalikan sistem *solar tracker* secara otomatis. Sensor PZEM-017 memiliki *library* yang bertujuan supaya sensor dapat terhubung ke mikrokontroler ESP32 melalui komunikasi RS485 dan bisa melakukan pembacaan data keluaran sistem, sedangkan untuk *sistem tracking* menggunakan *library* servo dan sensor LDR untuk menggerakkan panel surya mengikuti arah matahari. Sistem monitoring menggunakan auth token yang menghubungkan ESP32 ke aplikasi Blynk untuk memungkinkan kontrol dan monitoring jarak jauh. Aplikasi Blynk digunakan untuk monitoring data keluaran sistem *solar tracker* secara *real-time* seperti tegangan, arus, daya panel surya, intensitas cahaya, dan posisi servo, serta dapat diamati melalui *smartphone* dari mana saja selama terhubung internet. Setingan konfigurasi ESP32 dengan Blynk

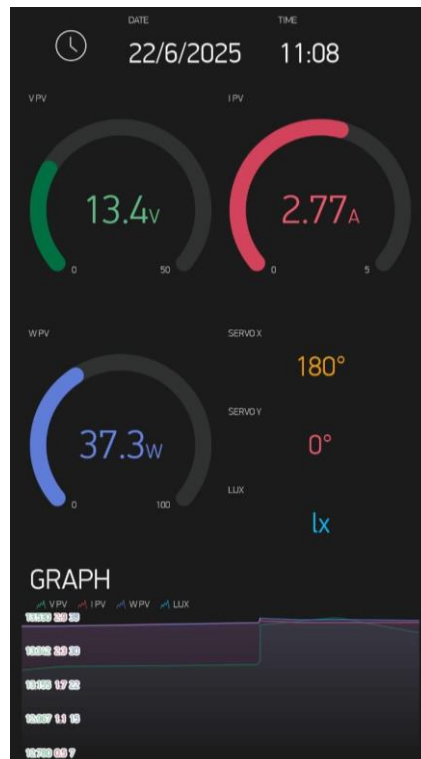


menggunakan virtual pin agar data keluaran dapat tertampil pada aplikasi dan memungkinkan kontrol on/off sistem relay beban, serta pengaturan parameter *solar tracker*. Integrasi IoT ini memungkinkan pengguna untuk memantau efisiensi panel surya, mengontrol beban listrik, dan mengoptimalkan kinerja sistem *solar tracker* melalui interface di aplikasi Blynk.

```

Trackerfixx.ino
1  #define BLYNK_PRINT Serial
2  #include <Wire.h>
3  #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4  #include <WiFi.h>
5  #include <BH1750.h>
6  #include <ModbusMaster.h>
7  #include <RTCLib.h>
8  #include <ESP32Servo.h>
9  #include <BlynkSimpleEsp32.h>
10 #include <time.h>
11
12 // Blynk Configuration
13 char auth[] = "C07kvqQArBfU3V67uxLp6eCJkP7fk78Y";
14 char ssid[] = "UMS WIFI";
15 char pass[] = "ums.wifi";
16 char server[] = "elec.cmtc.ac.th";
17 int port = 8080;
18 #define BUTTON1_PIN 5
19 #define BUTTON2_PIN 18
20 #define RELAY1_PIN 25
21 #define RELAY2_PIN 26
  
```

Gambar 6. Program Monitoring IoT



Gambar 7. Tampilan Aplikasi Blynk



3.3 Hasil Pengambilan Data

3.3.1 Pengujian Sensor dengan Alat ukur

Pengujian sensor dengan alat ukur dimaksudkan untuk menguji apakah nilai keluaran sensor dan alat ukur memiliki akurasi yang sama atau ada selisih nilai dari hasil pengukuran sensor dan alat ukur. Sensor yang digunakan sebagai pembanding yaitu sensor PZEM-017 yang dapat mengukur tegangan dan arus listrik DC.

3.3.1.1 Kalibrasi Sensor PZEM-017

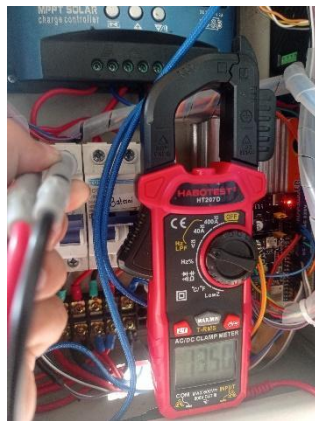
Tabel 1. Kalibrasi sensor PZEM-017 dengan alat ukur

Data	Alat Ukur			Sensor			Error (%)		
	V	I	P	V	I	P	V	I	P
1	13.2	0.26	3.43	13.2	0.06	0.79	0	0.77	0.77
2	13.44	0.44	5.91	13.44	0.38	5.1	0	0.14	0.14
3	13.78	0.68	9.37	13.78	0.53	7.3	0	0.22	0.22
4	14.12	0.72	10.17	14.12	0.6	8.47	0	0.17	0.17
5	14.45	0.79	11.42	14.45	0.62	8.95	0	0.22	0.22
6	14.5	0.84	12.18	14.5	0.67	9.71	0	0.20	0.20
Rata-rata	13.92	0.62	8.75	13.92	0.48	6.72	0	0.29	0.29

$$Presentase\ Error = \left| \frac{Nilai\ Alat\ ukur - Nilai\ sensor\ PZEM017}{Nilai\ Alat\ ukur} \right| \times 100\% \quad (1)$$

Tabel 1 menunjukkan hasil kalibrasi sensor terhadap alat ukur referensi untuk parameter tegangan (V), arus (I), dan daya (P). Dari enam data pengukuran, terlihat bahwa nilai sensor mendekati nilai alat ukur dengan rata-rata tegangan dan arus masing-masing sebesar 13.92 V dan 0.48 A, sedangkan alat ukur menunjukkan rata-rata 13.92 V dan 0.62 A. Rata-rata daya hasil sensor adalah 6.72 W, sedangkan alat ukur mencatat 8.67 W. Persentase error terbesar terdapat pada pengukuran arus dan daya, dengan rata-rata error sebesar 0.29%, sementara tegangan menunjukkan akurasi sangat tinggi dengan rata-rata error 0%. Secara keseluruhan, sensor menunjukkan performa yang cukup baik, terutama pada pengukuran tegangan, namun masih perlu peningkatan akurasi untuk parameter arus.





(a)



(b)



(c)

Gambar 8. (a) pengukuran alat ukur tegangan panel surya, (b) pengukuran alat arus panel surya, (c) pengukuran sensor tegangan, arus panel surya

3.3.1.2 Kalibrasi Sensor BH-1750

Tabel 2. Kalibrasi sensor BH-1750 dengan alat ukur

Data	Lux Meter (Lux)	Sensor (Lux)	Error (%)
1	26520	22563	0.15
2	17360	13754	0.21
3	29750	24987	0.16
4	24330	20376	0.16
5	37150	32076	0.14
6	39210	35765	0.09
Rata -rata	29053	24920	0.15



$$\text{Presentase Error} = \left| \frac{\text{Nilai Alat ukur} - \text{Nilai sensor BH1750}}{\text{Nilai Alat ukur}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

Tabel 2 menunjukkan hasil kalibrasi sensor BH1750 dengan membandingkan pembacaan intensitas cahaya terhadap alat ukur Lux Meter. Nilai lux yang diukur oleh sensor selalu lebih rendah dari alat ukur, dengan rata-rata pembacaan sensor sebesar 24920 lux dibandingkan 29053 lux pada Lux Meter. Persentase error berada dalam kisaran 0.9% hingga 0.21%, dengan rata-rata error sebesar 0.15%. Hal ini menunjukkan bahwa sensor BH1750 memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dan konsisten dalam membaca intensitas cahaya meskipun cenderung sedikit lebih rendah dari nilai referensi.

3.3.2 Pengamatan Sudut Motor Servo

Tabel 3. Pengamatan sudut motor servo

Data	Waktu Pengujian	Servo X (°)	Servo Y (°)
1	08.00	38	140
2	09.00	65	132
3	10.00	79	118
4	11.00	88	90
5	12.00	92	88
6	13.00	110	84
7	14.00	126	75
8	15.00	140	66
9	16.00	156	37

Tabel 3 menunjukkan hasil pengamatan sudut motor servo X (horizontal) dan Y (vertikal) dari pukul 08.00 hingga 16.00. Terlihat bahwa sudut servo X meningkat secara bertahap dari 38° hingga 156°, menunjukkan pergerakan mengikuti arah matahari dari timur ke barat. Sementara itu, sudut servo Y dari 140° hingga 37°, mencerminkan perubahan elevasi matahari yang semakin tinggi hingga tengah hari, lalu tetap tinggi pada sore hari. Pola pergerakan ini menunjukkan bahwa sistem *solar tracker* bekerja menyesuaikan arah dan sudut matahari secara dinamis untuk mengoptimalkan penyerapan cahaya.



3.3.3 Konsumsi Daya Energi Sistem *Solar Tracker*

Tabel 4. Total Kebutuhan Daya sistem *solar tracker*

No	Beban	Daya (w)	Jumlah (unit)	Durasi Pengoperasian (h)	Konsumsi Energi (wh)
1	Motor Servo	10	2	8	160
2	ESP32	1	1	8	8
3	BH-1750	0.33	1	8	2.64
4	PZEM-017	0.5	1	8	4
5	Sensor LDR	0.06	4	8	1.92
6	Lampu	15	1	8	120
7	Relay	0.5	2	8	8
8	LCD 20x4	0.37	1	8	2.96
9	RTC	0.37	1	8	2.96
Total Konsumsi Energi Perhari (Wh/d)					310.48
Total Konsumsi Energi selama 1 Bulan (Wh/m)					9314.4
Total Konsumsi Energi selama 1 Tahun (Wh/y)					113635.68

Berdasarkan tabel konsumsi daya sistem *solar tracker* tersebut, terlihat bahwa motor servo merupakan komponen dengan konsumsi daya tertinggi yaitu 160 Wh dengan daya 10 watt dan durasi operasi 8 jam, diikuti oleh lampu sebesar 120 Wh. Komponen elektronik seperti ESP32, sensor, dan modul kontrol lainnya memiliki konsumsi daya yang relatif rendah (di bawah 10 Wh masing-masing), namun secara kumulatif berkontribusi signifikan terhadap total konsumsi harian sebesar 310.48 Wh/hari. Dengan asumsi operasi selama 1 bulan (30 hari), sistem ini membutuhkan energi sebesar 9314.4 Wh/bulan atau setara dengan 9.31 kWh, yang menunjukkan bahwa sistem *solar tracker* ini memiliki konsumsi energi yang cukup efisien untuk aplikasi *tracking* panel surya otomatis.

3.3.4 Pengujian Sistem *Solar Tracker*

Data pengamatan terhadap output panel surya dengan sistem *tracking* dan tanpa *tracking* diperoleh dalam bentuk nilai arus dan tegangan. Data ini digunakan untuk menghitung efisiensi dari masing-masing sistem. Pengujian dilakukan setiap satu jam mulai pukul 08.00 hingga 16.00 selama 2 hari dengan sistem *tracking* dan 2 hari dengan sistem *non-tracking*. Pada sistem *non-tracking*, pengukuran dilakukan menggunakan multimeter, sementara sistem *tracking* menggunakan sensor PZEM-017 yang hasilnya dipantau melalui *smartphone*. Hasil perbandingan dari kedua sistem diharapkan memberikan gambaran seberapa besar peningkatan performa yang dapat dicapai dengan penerapan sistem *solar tracking*.



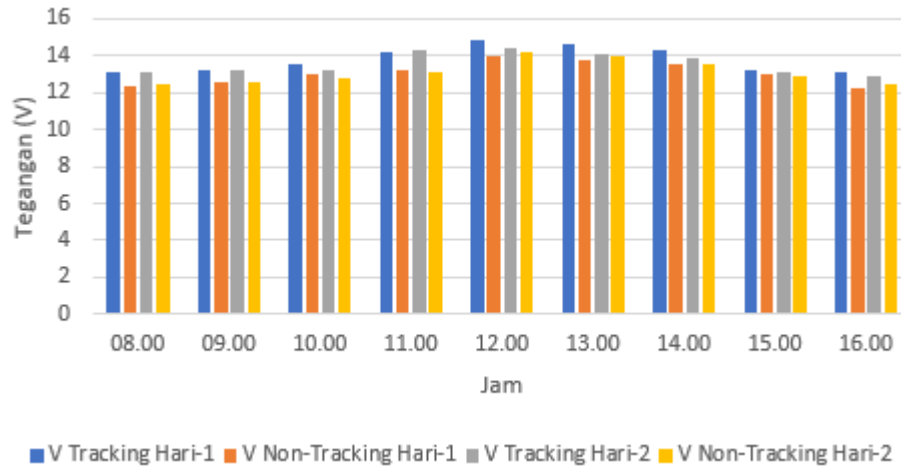
Tabel 5. Pengujian sistem *solar tracker*

Hari Pengujian	Waktu Pengujian	Sistem <i>Tracking</i>			Sistem <i>Non-tracking</i>		
		V	I	P	V	I	P
1	08.00	13.1	1.22	15.98	12.34	0.64	7.9
	09.00	13.23	1.51	19.98	12.55	0.72	9.04
	10.00	13.55	1.66	22.49	13.01	1.12	15.61
	11.00	14.22	2.35	33.4	13.2	1.2	15.84
	12.00	14.9	2.4	35.76	14	2.02	28.40
	13.00	14.67	2.2	32.27	13.78	1.88	25.91
	14.00	14.31	1.74	24.92	13.56	1.69	22.91
	15.00	13.2	1.11	14.95	13.06	1.2	15.02
	16.00	13.11	0.87	11.4	12.22	0.65	7.94
Rata - rata		13.79	1.68	23.35	13.10	1.35	16.96
2	08.00	13.12	1.25	16.40	12.47	0.75	9.35
	09.00	13.22	1.27	16.79	12.55	0.78	9.79
	10.00	13.26	1.36	18.03	12.81	1.1	14.09
	11.00	14.31	2.02	28.92	13.15	1.18	15.52
	12.00	14.45	2.11	30.49	14.23	2	28.46
	13.00	14.12	1.98	27.99	14.01	1.94	27.17
	14.00	13.89	1.25	17.36	13.56	1.22	16.54
	15.00	13.12	1.01	13.25	12.87	0.98	12.61
	16.00	12.85	0.84	10.79	12.43	0.72	8.95
Rata - rata		13.6	1.57	20.89	13.12	1.30	15.83

Pengujian dilakukan untuk membandingkan performa sistem panel surya dengan mekanisme *tracking* (mengikuti arah matahari) selama dua hari dan *non-tracking* (diam) selama dua hari juga, dari pukul 08.00 hingga 16.00. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sistem *tracking* secara konsisten menghasilkan daya yang lebih tinggi dibanding sistem *non-tracking*. Pada hari pertama, dengan kondisi cuaca yang cenderung cerah, sistem *tracking* menghasilkan daya rata-rata sebesar 23,35 W, sedangkan sistem *non-tracking* hanya 16,96 W. Puncak daya tertinggi pada sistem *tracking* tercatat sebesar 35,76 W pada pukul 12.00, menunjukkan efektivitas pelacakan posisi matahari dalam memaksimalkan penerimaan energi. Sementara itu, pada hari kedua, terjadi penurunan daya rata-rata sistem *tracking* menjadi 20,89 W, yang disebabkan oleh kondisi cuaca yang sedikit berawan pada siang hari. Meskipun demikian, daya sistem *non-tracking* tetap kurang efektif karena hanya menghasilkan daya rata-rata 15,83 W pada hari kedua, karena sistem ini tidak dipengaruhi oleh orientasi matahari. Perbandingan kedua sistem menunjukkan bahwa sistem *tracking* mampu meningkatkan output daya secara signifikan, dengan rata-rata peningkatan sekitar 34% dibanding sistem *non-tracking*. Hasil ini membuktikan bahwa penggunaan sistem pelacak matahari secara nyata dapat meningkatkan efisiensi konversi energi surya, terutama pada hari dengan intensitas cahaya yang optimal.



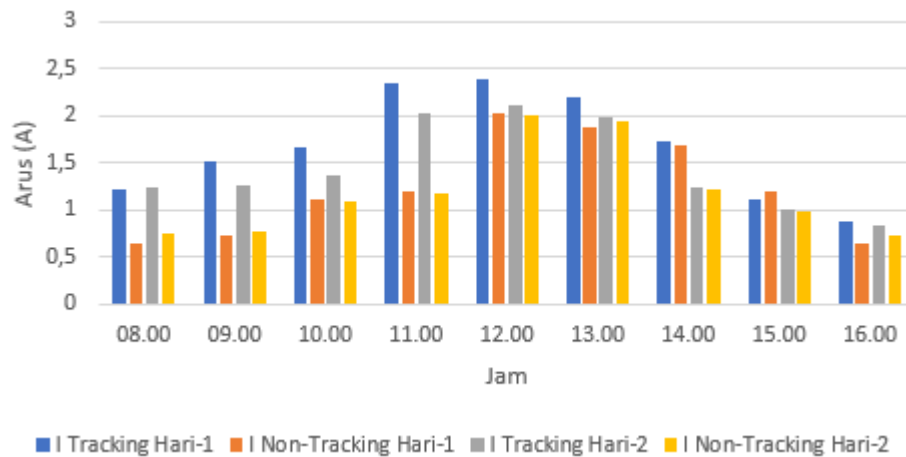
3.3.5 Perbandingan Pengaruh Sistem *Tracking* dan *Non-Tracking*



Gambar 9. Perbandingan Sistem *Tracking* terhadap Tegangan (V)

Gambar 9. Menunjukkan keunggulan sistem *solar tracker* dalam menghasilkan tegangan dibandingkan sistem *non-tracking* pada setiap jam pengamatan. Pada pukul 08.00, tegangan yang dihasilkan oleh sistem *tracking* baik pada hari-1 maupun hari-2 berada di kisaran 13,2–13,4 V, sedangkan sistem *non-tracking* hanya sekitar 12,8–13,0 V. Selanjutnya, pada pukul 10.00, sistem *tracking* menghasilkan tegangan sekitar 13,6–13,8 V, sementara *non-tracking* berada di kisaran 13,2–13,4 V. Puncak tegangan terjadi pada pukul 12.00, di mana sistem *tracking* mencapai sekitar 14,6 V pada kedua hari, sedangkan sistem *non-tracking* hanya sekitar 14,0–14,2 V. Setelah pukul 12.00, tegangan secara bertahap menurun. Pada pukul 14.00, sistem *tracking* masih mampu menghasilkan tegangan sekitar 14,0–14,2 V, sedangkan *non-tracking* turun ke 13,6–13,8 V. Pada sore hari, tepatnya pukul 16.00, tegangan sistem *tracking* turun menjadi sekitar 13,2–13,4 V, sementara *non-tracking* hanya sekitar 12,8–13,0 V. Dari data ini terlihat bahwa selisih tegangan antara sistem *tracking* dan *non-tracking* berkisar antara 0,4 hingga 0,6 V di setiap waktu pengamatan. Hal ini membuktikan bahwa sistem *solar tracker* mampu menjaga output tegangan panel surya tetap lebih tinggi dan stabil sepanjang hari dibandingkan sistem *non-tracking*, sehingga efisiensi penyerapan energi matahari meningkat secara signifikan.



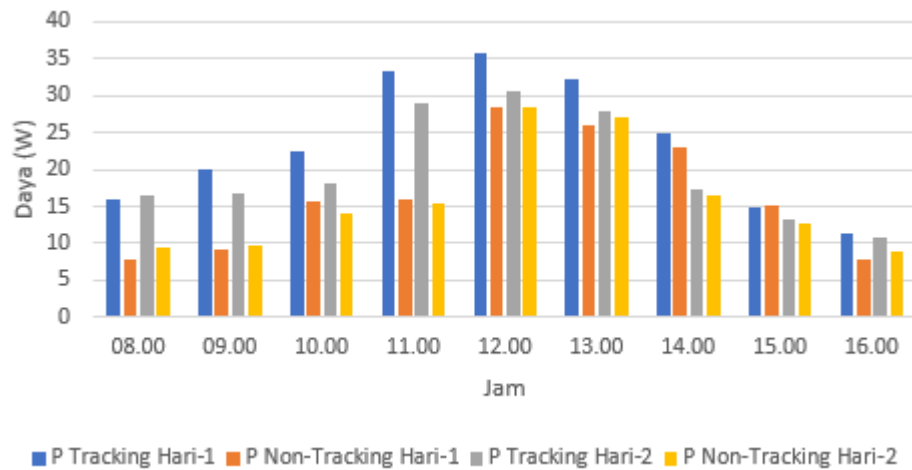


Gambar 10. Perbandingan Sistem *Tracking* terhadap Arus (A)

Gambar 10. Memperlihatkan perbandingan arus listrik (A) yang dihasilkan oleh sistem panel surya dengan dan tanpa sistem tracking pada dua hari pengamatan dalam rentang waktu pukul 08.00 hingga 16.00. Dari grafik ini, terlihat bahwa sistem *tracking* secara konsisten menghasilkan arus yang lebih tinggi dibandingkan sistem *non-tracking* pada setiap jam pengamatan, baik pada hari-1 maupun hari-2. Puncak arus tertinggi terjadi pada pukul 11.00 hingga 13.00, di mana sistem *tracking* mampu menghasilkan arus sekitar 2,3–2,5 A, sedangkan sistem *non-tracking* hanya sekitar 1,8–2,0 A. Selisih arus ini menunjukkan bahwa sistem *tracking* lebih efektif dalam menangkap energi matahari karena panel selalu diarahkan optimal terhadap posisi matahari, sehingga intensitas cahaya yang diterima lebih maksimal.

Selain itu, grafik juga menunjukkan bahwa pola kenaikan dan penurunan arus pada sistem *tracking* lebih tajam dan konsisten mengikuti pergerakan matahari, sedangkan pada sistem *non-tracking*, kenaikan arus cenderung lebih lambat dan penurunannya juga lebih cepat setelah melewati puncak intensitas cahaya. Hal ini menandakan bahwa sistem *non-tracking* kurang mampu memanfaatkan perubahan posisi matahari secara optimal, sehingga arus yang dihasilkan lebih rendah dan fluktuatif.





Gambar 11. Perbandingan Sistem *Tracking* terhadap Daya (W)

Gambar 11. Menunjukkan grafik yang ditampilkan, terlihat jelas pengaruh signifikan penggunaan sistem *solar tracker* terhadap daya (Watt) yang dihasilkan panel surya pada dua hari pengamatan. Pada setiap jam pengukuran, baik di hari-1 maupun hari-2, daya yang dihasilkan oleh sistem dengan *solar tracker* (ditunjukkan oleh batang biru dan abu-abu) selalu lebih tinggi dibandingkan dengan sistem *non-tracking* (batang oranye dan kuning). Hal ini menunjukkan bahwa *solar tracker* mampu memaksimalkan penyerapan energi matahari sepanjang hari dengan mengikuti pergerakan matahari, sehingga panel surya selalu berada pada posisi optimal terhadap sumber cahaya.

Puncak daya tertinggi tercapai pada pukul 12.00, di mana sistem tracking pada hari-1 menghasilkan daya sekitar 35 Watt, sedangkan sistem *non-tracking* pada waktu yang sama hanya sekitar 27 Watt. Selisih daya ini sangat signifikan, menandakan peningkatan efisiensi yang nyata akibat penggunaan *solar tracker*. Selain itu, pada jam-jam awal (08.00–10.00) dan akhir (15.00–16.00), sistem *tracking* juga tetap menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan *non-tracking*, meskipun intensitas cahaya matahari tidak setinggi tengah hari. Ini menunjukkan bahwa *solar tracker* membantu panel surya menangkap cahaya matahari secara lebih efektif bahkan saat sudut datang sinar matahari kurang optimal. Secara keseluruhan, grafik ini memperlihatkan bahwa sistem *solar tracker* tidak hanya meningkatkan daya puncak yang dihasilkan, tetapi juga menjaga kestabilan daya output panel surya sepanjang hari. Dengan demikian, penggunaan *solar tracker* sangat direkomendasikan untuk meningkatkan efisiensi dan total energi yang dihasilkan oleh sistem panel surya, terutama pada aplikasi yang membutuhkan pasokan energi konstan dan maksimal.



PEMBAHASAN

4.1 Analisis Performa Sistem Solar Tracker Dual-Axis

Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi sistem *solar tracker dual-axis* memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan sebesar 34% dibandingkan dengan sistem panel surya statis (*non-tracking*). Peningkatan ini sejalan dengan temuan penelitian Jamroen et al. (2020) yang mengembangkan sistem *solar tracking dual-axis* berbiaya rendah dan membuktikan efektivitasnya dalam meningkatkan output energi. Namun, persentase peningkatan efisiensi dalam penelitian ini sedikit lebih rendah dibandingkan dengan beberapa penelitian terdahulu yang melaporkan peningkatan hingga 40-45%. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain kondisi geografis lokasi pengujian, variasi intensitas cahaya matahari, dan karakteristik teknis komponen yang digunakan.

Analisis lebih mendalam terhadap data menunjukkan bahwa puncak daya tertinggi sistem tracking mencapai 35,76 W pada pukul 12.00, yang merepresentasikan kondisi optimal ketika panel surya berhasil diposisikan tegak lurus terhadap sinar matahari. Hal ini mengkonfirmasi teori bahwa efisiensi panel surya maksimal dicapai ketika sudut datang cahaya matahari mendekati 0° terhadap permukaan panel. Fuentes-Morales et al. (2020) dalam tinjauan komprehensif mereka menekankan pentingnya algoritma kontrol yang tepat untuk mencapai posisi optimal ini, yang dalam penelitian ini berhasil diimplementasikan melalui kombinasi sensor LDR dan kontrol servo motor.

4.2 Evaluasi Akurasi dan Konsistensi Sensor

Hasil kalibrasi sensor PZEM-017 menunjukkan akurasi yang sangat baik dengan *error rate* 0% untuk pengukuran tegangan dan rata-rata error 0,29% untuk arus dan daya. Tingkat akurasi ini sangat memuaskan dan mendukung reliabilitas data yang diperoleh selama pengujian. Sensor BH-1750 juga menunjukkan performa yang konsisten dengan rata-rata error 0,15%, yang mengindikasikan bahwa sistem monitoring intensitas cahaya berfungsi dengan baik untuk keperluan *tracking*. Namun, terdapat perbedaan pembacaan antara sensor dan alat ukur referensi pada parameter arus, dengan sensor cenderung memberikan nilai yang sedikit lebih rendah. Fenomena ini kemungkinan disebabkan oleh karakteristik respons sensor yang berbeda pada rentang arus tertentu atau pengaruh impedansi internal sensor. Meskipun demikian, perbedaan ini masih dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi monitoring sistem *solar tracker*.

4.3 Dinamika Pergerakan Sistem Tracking

Pengamatan terhadap sudut motor servo menunjukkan pola pergerakan yang logis dan sesuai dengan pergerakan matahari. Servo X (horizontal) bergerak dari 38° hingga 156° , mencerminkan pelacakan matahari dari timur ke barat, sementara servo Y (vertikal) bergerak dari 140° hingga 37° , menyesuaikan dengan perubahan elevasi matahari sepanjang hari. Pola pergerakan ini mengkonfirmasi bahwa algoritma kontrol berbasis



sensor LDR berhasil menginterpretasikan perubahan intensitas cahaya dan menerjemahkannya menjadi gerakan mekanis yang tepat. Penelitian Bangun Aji S et al. (2022) juga menggunakan sensor LDR untuk *sistem solar tracking* dan melaporkan hasil yang serupa dalam hal akurasi pelacakan. Namun, dalam penelitian ini, implementasi dual-axis memberikan keunggulan tambahan karena mampu mengoptimalkan orientasi panel pada kedua sumbu pergerakan, tidak hanya mengikuti pergerakan horizontal matahari tetapi juga menyesuaikan sudut elevasi secara dinamis.

4.4 Konsumsi Energi dan Efisiensi Sistem

Analisis konsumsi energi menunjukkan bahwa sistem membutuhkan 310,48 Wh per hari, dengan motor servo sebagai komponen dengan konsumsi tertinggi (160 Wh). Ketika dibandingkan dengan peningkatan output energi yang dihasilkan, rasio benefit-cost energi sistem ini menunjukkan nilai yang positif. Dengan daya rata-rata sistem *tracking* 22,12 W (rata-rata dari dua hari pengujian) selama 8 jam operasi menghasilkan 176,96 Wh, sedangkan sistem *non-tracking* hanya 130,32 Wh, maka gain energi harian adalah 46,64 Wh. Meskipun konsumsi sistem (310,48 Wh) melebihi gain energi harian, perlu dipertimbangkan bahwa perhitungan ini berdasarkan asumsi operasi kontinyu selama 8 jam penuh.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengamatan dan pengujian sistem *solar tracker* yang dilaksanakan selama 4 hari (2 hari sistem *tracking* dan 2 hari sistem *non-tracking*), dapat disimpulkan bahwa sistem pelacak matahari menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan sistem konvensional tanpa pelacakan. Pengujian yang dilakukan dari pukul 08.00 hingga 16.00 menunjukkan bahwa sistem *tracking* mampu menghasilkan daya rata-rata 23,35 W pada hari pertama dan 20,89 W pada hari kedua, sedangkan sistem *non-tracking* hanya menghasilkan 16,96 W dan 15,83 W. Puncak daya tertinggi dicapai sistem *tracking* sebesar 35,76 W pada pukul 12.00, menunjukkan efektivitas maksimal saat matahari berada pada posisi optimal. Dari aspek kalibrasi sensor, sistem menunjukkan tingkat akurasi yang sangat baik dengan sensor PZEM-017 memiliki akurasi sempurna untuk tegangan (*error rate* 0%) dan sensor BH-1750 menunjukkan konsistensi dengan rata-rata *error* hanya 0,15%.

Analisis parameter kelistrikan menunjukkan bahwa sistem *tracking* secara konsisten menghasilkan tegangan 0,4-0,6 V lebih tinggi dan arus 0,3-0,7 A lebih besar dibandingkan sistem *non-tracking* pada setiap waktu pengamatan. Pengamatan pergerakan motor servo membuktikan sistem bekerja dinamis dengan servo X bergerak dari 38° hingga 156° mengikuti pergerakan matahari timur-barat, dan servo Y dari 140° hingga 37° menyesuaikan elevasi matahari. Secara keseluruhan, implementasi sistem *solar tracker*



memberikan peningkatan efisiensi yang sangat signifikan dengan rata-rata peningkatan output daya sekitar 34% dibandingkan sistem non-tracking. Hasil ini membuktikan bahwa penggunaan sistem pelacak matahari secara nyata dapat meningkatkan efisiensi konversi energi surya dan sangat direkomendasikan untuk aplikasi yang membutuhkan pasokan energi maksimal sepanjang hari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyampaikan rasa syukur dan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan kemudahan yang diberikan selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta atas doa yang tidak pernah putus, dukungan moril dan materiil, serta pengorbanan yang telah diberikan selama masa studi.
3. Bapak Hasyim Asy'ari, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing, atas kesabaran, bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat berharga selama proses penelitian dan penulisan tugas akhir ini.
4. Kayla Auria Salsabilla atas semangat, motivasi, dan bantuan yang diberikan sehingga menambah kekuatan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Rekan-rekan angkatan 2021 Program Studi Teknik Elektro atas kebersamaan, dukungan, dan semangat yang selalu diberikan selama masa perkuliahan dan pengerjaan tugas akhir.
6. Para asisten laboratorium teknik elektro atas bantuan teknis, bimbingan praktis, dan dukungan yang diberikan selama proses penelitian di laboratorium.
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah membantu baik dalam bentuk diskusi, kerja sama, semangat, maupun dukungan lainnya selama masa pengerjaan tugas akhir ini.

Kehadiran dan dukungan dari semua pihak tersebut menjadi bagian penting dalam proses penyelesaian tugas akhir ini. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapat balasan yang berlipat ganda dari Allah SWT. Aamiin Ya Rabbal 'Alamiin.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Asyari and A. W. Aji, "Desain Solar Tracking Dual Axis Berbasis Arduino dan Sensor Light Dependent Resistor untuk Meningkatkan Daya Keluaran Sel Surya," *Jurnal Teknik Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, vol. 7, no. 2, pp. 320–324, 2023. doi: 10.36277/jteuniba.v7i2.218
- [2] Q. Hidayati, N. Y. N. J., "Sistem Pembangkit Panel Surya Dengan Solar Tracker Dual Axis," in *SNITT- Politeknik Negeri Balikpapan*, vol. 4, pp. 68-73, 2020.
- [3] E. Prianto, "Pengembangan Solar Panel Dan Inverter Sebagai Alat Untuk Charging Baterai Pada Sepeda Listrik," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 148–156, 2017. doi: 10.21831/jee.v1i2.17419
- [4] B. A. Suryatama and M. Alfian, "Prototipe Solar Tracking Berbasis Arduino dan Light Diode Resistor," *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 30-40, 2022.
- [5] J. Asmi and O. Candra, "Prototype solar tracker dua sumbu berbasis microcontroller Arduino Nano dengan sensor LDR," *Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional*, vol. 6, no. 2, pp. 54-63, 2020.
- [6] M. 'Aafi, J. Jamaaluddin, and I. Anshory, "Implementasi Sensor Pzem-017 Untuk Monitoring Arus, Tegangan Dan Daya Pada Instalasi Panel Surya Dengan Sistem Data Logger Menggunakan Google Spreadsheet Dan Smartphone," in *Proc. Semin. Nas. Tek. Elektro, Sist. Informasi, dan Tek. Inform.*, vol. 1, no. 1, pp. 191–196, 2022.
- [7] E. T. El Shenawy and H. El El Ghetany, "Effect of Dust Accumulation on the Performance of PV Modules under Cairo Climate Conditions," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 11, no. 3, pp. 1313-1321, 2021.
- [8] R. F. Fuentes-Morales et al., "Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review," *Solar Energy*, vol. 212, pp. 203-219, Dec. 2020. doi: 10.1016/j.solener.2020.10.071
- [9] M. Yusak, M. J. Afroni, and F. Rahman, "Pelacak Surya Otomatis Berbasis IoT," *Science Electro*, vol. 15, no. 1, pp. 1–7, 2022.
- [10] C. Jamroen et al., "A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 37, article 100618, Feb. 2020. doi: 10.1016/j.seta.2019.100618

