

## Analisis Sistem Monitoring Dan Pencatatan Data Pada Panel Surya Dengan Menggunakan Solar Tracker

Moh. Wahyu Aminullah<sup>1\*</sup>, Alisha Gita Gumilang<sup>2</sup>, Thriska Dewi Umi Rasyda<sup>3</sup>, Pramadhony<sup>4</sup>, Redi Setiawan<sup>5</sup>, M. Rayhan Al Fiansha<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,5,6</sup> Program Studi Teknik Elektro, Universitas Tridinanti, Indonesia.

<sup>4</sup> Program Studi Teknik Mesin, Universitas Tridinanti, Indonesia.

\*e-mail: [m.wahyuaminullah@gmail.com](mailto:m.wahyuaminullah@gmail.com)

### ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan energi akibat pertumbuhan ekonomi dan menipisnya cadangan energi konvensional mendorong pemanfaatan energi terbarukan, salah satunya energi matahari. Energi ini dapat dikonversi menjadi listrik melalui sistem fotovoltaik (solar cell), yang efisiensinya sangat bergantung pada luas permukaan dan kemampuan penyerapan cahaya. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem solar tracker berbasis Arduino UNO dan modul WiFi ESP32 yang mampu mengoptimalkan penyerapan energi matahari dengan mengikuti pergerakan matahari secara otomatis. Data intensitas cahaya dan daya listrik dipantau secara real-time melalui platform ThingSpeak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem solar tracker mampu menghasilkan daya puncak sebesar 9,11 W pada intensitas cahaya 1377,4 W/m<sup>2</sup>. Namun, tidak seluruh intensitas cahaya dikonversi menjadi energi listrik karena sebagian dipantulkan kembali oleh sel surya. Rata-rata efisiensi konversi energi pada sistem solar tracker mencapai 32,4%, lebih tinggi dibandingkan panel statis yang hanya mencapai 19,2%. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan solar tracker dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi matahari secara signifikan.

**Kata Kunci:** Panel Surya, Sistem Penjejak Surya, Efisiensi, Sistem Monitoring

### *Analysis of Monitoring and Data Logging System on Solar Panel Using Solar Tracker*

### ABSTRACT

*The utilization of naturally available energy has become a key solution to address the growing demand for energy, driven by economic development and the depletion of conventional energy reserves. Solar energy presents a promising alternative due to its abundance and accessibility, and can be harnessed through photovoltaic systems (solar cells). The amount of solar energy absorbed depends on the surface area of the cells and their light absorption capability, which can be optimized using a solar tracking system that follows the sun's movement. This study aims to enable real-time data monitoring, ensure data quality and performance in a given environment, and enhance the efficiency of a solar tracker system. The experiment employs solar cells to convert sunlight into electricity, with output data captured by sensors and processed via an Arduino UNO. Instructions are transmitted through an ESP32 WiFi module, and data is visualized on the ThingSpeak platform in graphical form. The results show a peak power output of 9.11 W at a light intensity of 1377.4 W/m<sup>2</sup>. However, not all received solar intensity is converted into electrical energy, as some is reflected by the solar cells during electron release. The average efficiency achieved by the solar tracker system is 32%, significantly higher than the 19% efficiency of a non-tracking solar panel.*

**Keywords:** Solar Cells, Solar Tracker, Efficiency, Monitoring System

### PENDAHULUAN

Kegiatan produksi yang berperan penting dalam pembangunan nasional terkait penggunaan energi [1] perlu diperhatikan. Ketika terjadi peningkatan pertumbuhan ekonomi, kebutuhan akan konsumsi energi menjadi semakin kompleks sehingga membutuhkan *renewable energy* seperti pemanfaatan energi matahari.

Energi surya, memiliki peluang besar dalam membantu memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia. Hal ini disebabkan oleh tingginya potensi energi matahari di negara ini, karena

Indonesia berada di wilayah tropis dengan intensitas cahaya matahari relatif tinggi sepanjang tahun. Energi surya di Indonesia memiliki potensi rata-rata sekitar 4,8 kWh/m<sup>2</sup> per hari menurut data Dewan Energi Nasional [2][3]. Energi surya merupakan energi terbarukan ramah lingkungan serta menjadi sumber energi berkelanjutan. Pemanfaatan sinar matahari yang berlimpah, tanpa biaya, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menurunkan ketergantungan terhadap penggunaan energi fosil serta emisi gas rumah kaca dapat berkurang. Tantangan iklim yang berubah dan isu ketersediaan energi, PLTS muncul sebagai solusi potensial untuk mewujudkan sistem energi yang berkelanjutan [4].

Pemanfaatan energi surya dapat dilakukan secara langsung maupun tidak langsung, ramah lingkungan, dan tersedia melimpah[5]. *Solar cell* merupakan perangkat untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik [6]. *Solar cell* banyak dimanfaatkan setiap negara untuk berbagai kebutuhan industri, harus dilengkapi dengan sistem kendali otomatis, dan sistem yang memonitor dan mencatat data yang dihasilkan sehingga pengawasan dan pengaturan pergerakan panel surya lebih mudah dan energi matahari terserap dengan efisiensi tinggi. Penggunaan sistem yang mampu mengatur posisi *solar cell* sehingga paparan sinar matahari dapat diperoleh secara maksimal, dan daya serap panel surya lebih efisien. Sistem ini disebut dengan solar tracker[7].

Penelitian sebelumnya [8] kinerja panel surya berbasis arduino uno menghasilkan data yang didapat secara langsung dan membantu memonitor data yang diperoleh dari jarak jauh melalui internet. Hasil data tersebut telah dikumpulkan secara langsung berupa dokumen excel didapat dari database yang tersedia oleh sistem, namun tidak membahas mengenai monitoring keluaran panel surya. Penelitian selanjutnya [9] menggunakan mikrokontroler ATmega8535 dengan bantuan penampil LCD, hasil pengukuran menunjukkan terjadinya tegangan sel surya yang naik sebesar 11,53% dibandingkan dengan tidak menggunakan *solar tracker* (statis). Sehingga hasil penggunaan *solar tracker* menjadi lebih baik dibandingkan tanpa menggunakan *solar tracker*.

Sistem *solar tracking* mampu memonitoring nilai yang dihasilkan *solar cell* secara *realtime* sehingga hasil keluaran *solar cell* menjadi lebih efisien, Pengujian dilakukan menggunakan mikrokontroler Arduino yang dipadukan dengan sensor LDR (*Light Dependent Resistor*) sebagai komponen pendeteksi cahaya, yang berfungsi memberikan sinyal untuk menggerakkan panel surya. Sistem berbasis Arduino yang terintegrasi dengan sensor LDR, modul WiFi ESP8266, sensor tegangan, serta sensor arus ACS712, guna memperoleh nilai efisiensi maksimum dari sistem *solar tracker* yang dikembangkan [10]. Efektivitas solar tracker otomatis di iklim panas, menunjukkan peningkatan efisiensi output hingga 35% dibanding sistem statis [11]. Merancang solar tracker berbasis Arduino dan sensor cahaya (LDR), terbukti meningkatkan penyerapan energi harian secara signifikan[12]. Mengintegrasikan IoT dengan solar tracker untuk monitoring di daerah pedesaan, menghasilkan peningkatan daya output sekitar 30%[13]. Membandingkan sistem solar tracker satu sumbu dan dua sumbu, dengan hasil bahwa dual-axis lebih unggul untuk area dengan pergerakan matahari variatif[14]. Mengembangkan solar tracker pintar berbasis IoT untuk atap perkotaan, memudahkan pemantauan jarak jauh sekaligus meningkatkan efisiensi panel hingga 28% [15]. Platform ThingSpeak memungkinkan pengguna melakukan pemantauan jarak jauh, penyimpanan data otomatis, serta analisis performa secara visual dan real-time [16]. Sistem pelacak dua sumbu berbasis IoT mampu mengoptimalkan posisi panel terhadap matahari dan meningkatkan output daya[17],[18].

Penelitian-penelitian terdahulu telah mengkaji penggunaan solar tracker dan integrasi IoT pada panel surya, namun sebagian besar masih berfokus pada peningkatan tegangan atau mekanisme pelacakan posisi panel. Monitoring keluaran listrik panel surya secara realtime, analisis efisiensi daya yang dihasilkan, serta integrasi sistem tracking dengan pencatatan data berbasis IoT belum dikaji secara komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini memposisikan diri untuk mengembangkan sistem solar tracker berbasis Arduino yang terintegrasi dengan sensor arus dan



tegangan serta platform IoT untuk monitoring dan pencatatan performa panel surya secara realtime, sehingga mampu memberikan analisis efisiensi energi yang lebih akurat pada kondisi iklim tropis Indonesia.

## METODE PENELITIAN

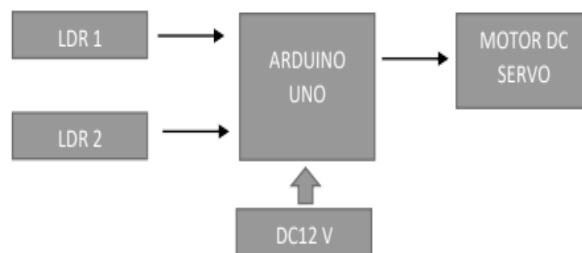
Penelitian ini menggunakan metode eksperimen lapangan (field experiment) dengan pendekatan comparative performance test, yaitu membandingkan kinerja panel surya statis (tanpa solar tracker) dan panel surya dengan solar tracker otomatis berbasis Arduino. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan (V), arus (I), daya keluaran (P), energi harian (Wh), serta efisiensi sistem berdasarkan pengukuran langsung di lapangan secara *real-time*.

Penelitian dilaksanakan di lapangan terbuka Kelurahan Talang Jambi, Kota Palembang, dengan kondisi bebas bayangan dari bangunan maupun pepohonan. Pengujian dilakukan selama tiga hari berturut-turut, yaitu pada 22–24 Oktober 2025, dengan rentang waktu pengambilan data pukul 07.00–16.00 WIB. Selama pengujian, kondisi cuaca bervariasi meliputi cerah, berawan, dan hujan.

## Desain Sistem dan Konfigurasi Alat

Desain sistem panel surya dengan solar tracker ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan spesifikasi modul surya yang digunakan ditampilkan pada Gambar 2. Sistem terdiri dari panel surya 10 Wp, sensor LDR sebagai pendeteksi intensitas cahaya, Arduino Uno sebagai unit pengendali, motor servo sebagai aktuator penggerak panel, serta sumber daya DC 12 V sebagai catu daya sistem kontrol.

Berdasarkan Gambar 1, prinsip kerja sistem kontrol panel surya adalah sensor LDR mendeteksi perbedaan intensitas cahaya matahari, kemudian data tersebut diproses oleh Arduino Uno untuk mengendalikan motor servo sehingga panel surya dapat mengikuti arah datangnya matahari secara otomatis.



Gambar 1. Blok Diagram Control Panel Surya (Tracker)



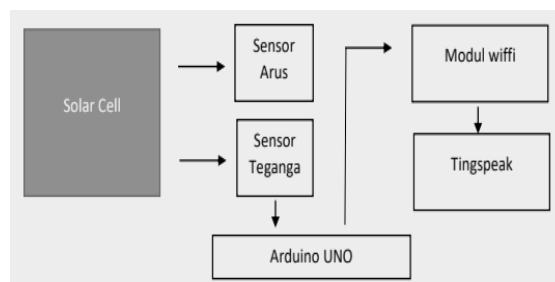
POLYCRYSTALLINE SOLAR MODULE		10W
MODEL NO	VISERD-10WP	
RATED MAXIMUM POWER [P <sub>max</sub> ]	10WP	
VOLTAGE AT MAXIMUM POWER [V <sub>mp</sub> ]	17.5V	
CURRENT AT MAXIMUM POWER [I <sub>mp</sub> ]	0.571A	
OPEN CIRCUIT VOLTAGE [V <sub>oc</sub> ]	21V	
SHORT CIRCUIT CURRENT [I <sub>sc</sub> ]	0.64A	
MAXIMUM SYSTEM VOLTAGE	1000 V	

All technical data at Standard Test Conditions  
AM=1.5    E=1000 W/m<sup>2</sup>    TC=25°C  
Measurement Tolerance 0 ±3

**Gambar 2. Nameplate Modul Surya**

### Sistem Monitoring dan Akuisisi Data

Perancangan sistem monitoring ditunjukkan pada Gambar 3. Panel surya mengonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik, yang selanjutnya diukur menggunakan sensor arus ACS712 dan sensor tegangan. Data hasil pengukuran diproses oleh Arduino Uno dan dikirimkan ke platform ThingSpeak melalui modul WiFi ESP32 untuk keperluan monitoring dan pencatatan data secara real-time..



**Gambar 3. Blok Diagram Sistem Monitoring**

Pengambilan data dilakukan dengan interval 30 menit, meliputi tegangan panel, arus panel, dan daya keluaran yang dihitung menggunakan persamaan

$$P = V \times I \tag{1}$$

### Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dalam dua kondisi, yaitu panel statis dan panel dengan solar tracker.

1. Pengujian Panel Statis  
Panel surya dipasang tanpa solar tracker dengan sudut kemiringan tetap sebesar 45°. Pengukuran tegangan, arus, dan daya dilakukan dari pukul 07.00–16.00 WIB. Data yang diperoleh digunakan sebagai baseline pembanding.
2. Pengujian Panel dengan Solar Tracker  
Sistem solar tracker diaktifkan sehingga panel surya dapat mengikuti posisi matahari secara otomatis. Pengukuran dilakukan pada hari dan rentang waktu yang sama dengan pengujian panel statis untuk memastikan kesetaraan kondisi pengujian.



### Metode Perhitungan Efisiensi

Efisiensi panel surya dihitung untuk mengetahui perbandingan kinerja sistem dengan dan tanpa solar tracker. Nilai efisiensi ditentukan menggunakan persamaan [10]

$$\eta = \frac{P_{out} \times 100\%}{P_{in}} \tag{2}$$

dengan  $P_{out}$  merupakan daya listrik keluaran panel surya (W) dan  $P_{in}$  merupakan daya radiasi matahari yang diterima panel surya (W). Nilai  $P_{in}$  dihitung menggunakan persamaan

$$P_{in} = E \times A \tag{3}$$

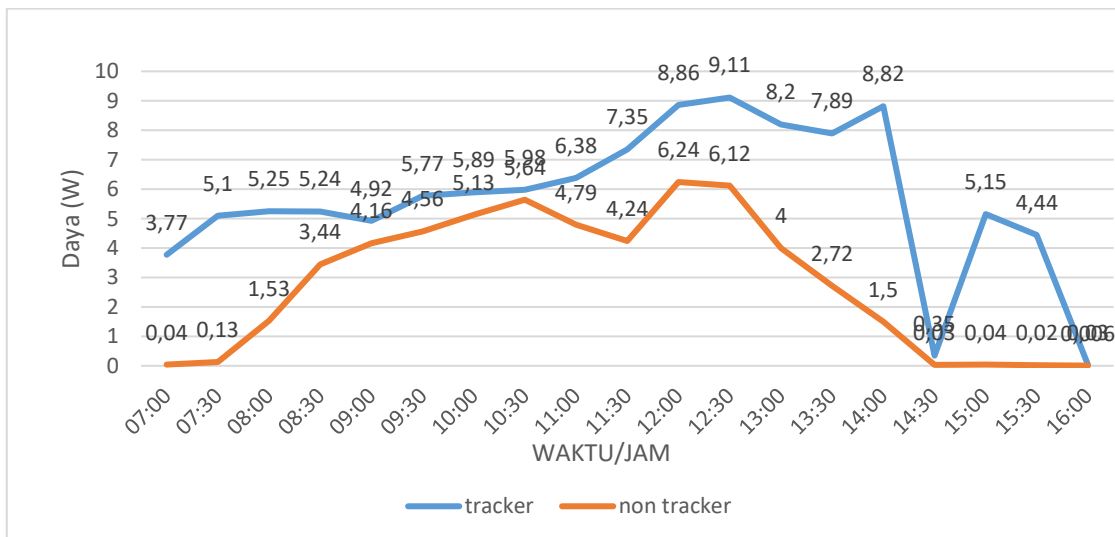
di mana  $E$  adalah intensitas iradiasi matahari dan  $A$  adalah luas permukaan panel surya. Panel surya yang digunakan memiliki dimensi 32 cm × 26 cm, sehingga luas panel sebesar 0,0832 m<sup>2</sup>. Perhitungan efisiensi mengacu pada Standard Test Condition (STC) dengan iradiasi matahari sebesar 1000 W/m<sup>2</sup>.

### HASIL DAN ANALISA

Pengujian dilakukan untuk membandingkan kinerja panel surya statis dengan sudut kemiringan tetap 45° dan panel surya dengan sudut yang dikendalikan secara otomatis menggunakan solar tracker. Pengukuran dilakukan menggunakan jenis modul surya dan beban yang sama, sehingga perbedaan keluaran yang diperoleh sepenuhnya dipengaruhi oleh metode pengaturan sudut panel. Data hasil pengukuran direkam secara *real-time* menggunakan sistem monitoring berbasis Arduino-ESP32 dan ditampilkan melalui platform *ThingSpeak*.

#### Hasil Pengujian Hari Pertama

Hasil pengujian pada hari pertama (22 Oktober 2025) ditampilkan pada Gambar 4. Grafik menunjukkan bahwa sistem panel surya dengan solar tracker menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan panel surya statis sepanjang waktu pengujian (07.00–16.00 WIB).



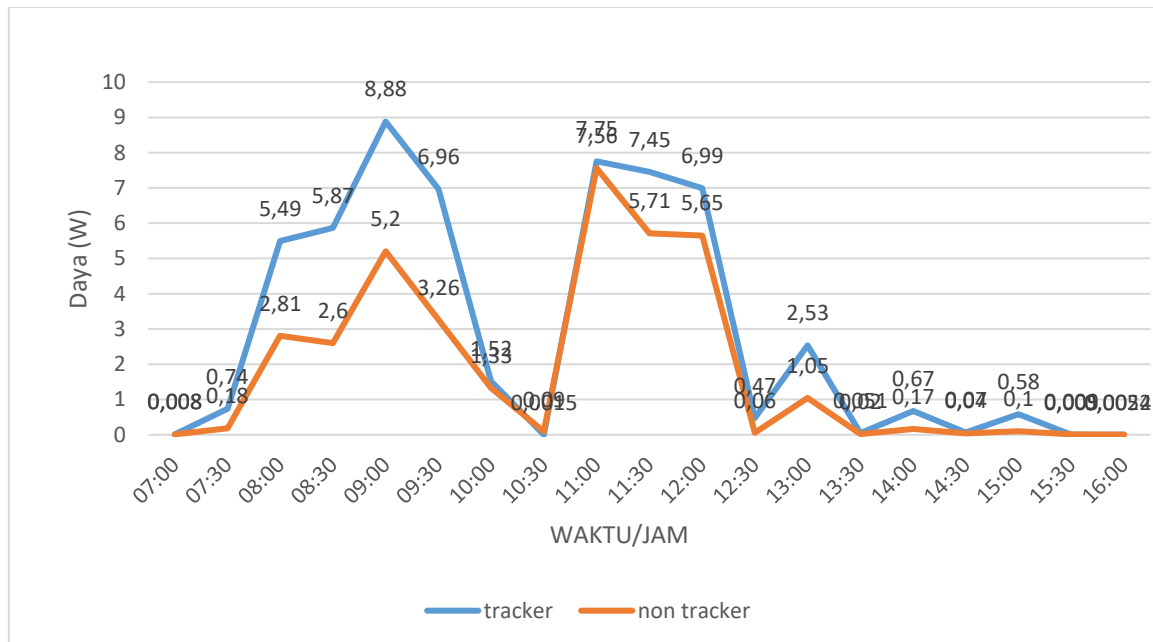
Gambar 4. Grafik Hasil Pengujian Daya Hari Pertama (22 Oktober 2025)

Hal ini disebabkan oleh kemampuan solar tracker dalam menjaga orientasi panel agar selalu mendekati arah datang sinar matahari secara optimal. Meskipun demikian, grafik juga memperlihatkan adanya penurunan daya pada waktu tertentu, khususnya pada siang hari. Penurunan ini dipengaruhi oleh kondisi atmosfer, terutama cuaca berawan yang menyebabkan berkurangnya irradianse matahari yang mencapai permukaan panel.

Daya maksimum yang dihasilkan oleh sistem solar tracker pada hari pertama mencapai 9,11 W, dengan daya rata-rata selama 9 jam pengujian sebesar 5,81 W.

### Hasil Pengujian Hari Kedua

Hasil pengujian pada hari kedua (23 Oktober 2025) ditunjukkan pada Gambar 5. Pada hari ini, kondisi cuaca didominasi oleh awan dan hujan, yang berdampak signifikan terhadap daya keluaran panel surya. Daya maksimum yang tercatat sebesar 8,88 W terjadi saat cuaca cerah sesaat, sedangkan daya minimum turun hingga 0,05 W ketika hujan.

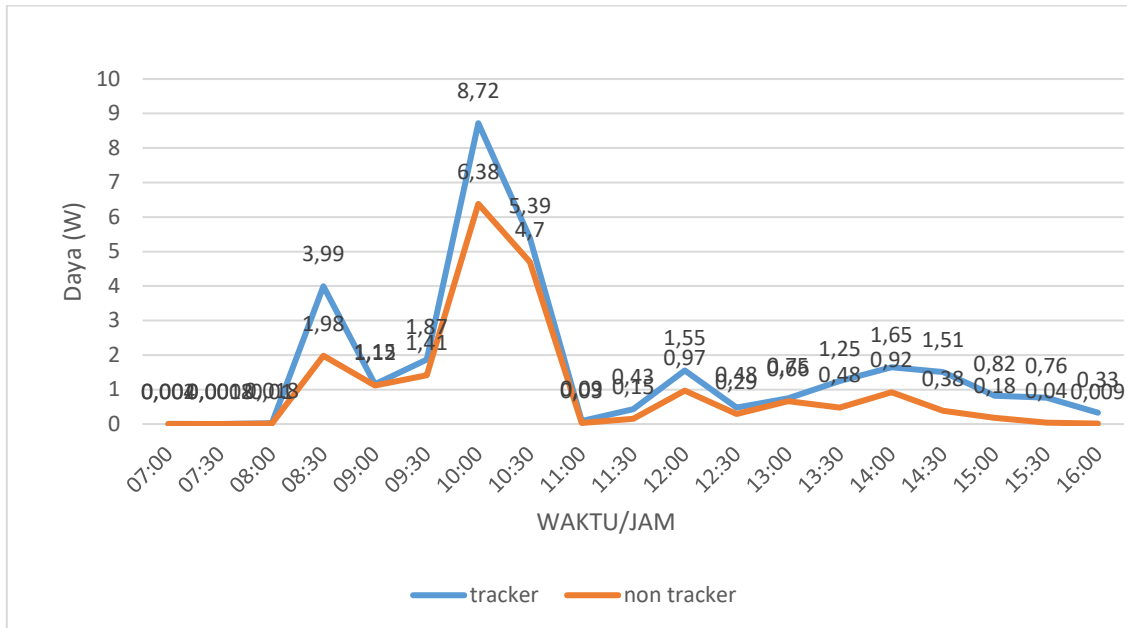


Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian Daya Hari Kedua (23 Oktober 2025)

Daya rata-rata yang dihasilkan oleh sistem solar tracker pada hari kedua adalah 2,95 W, lebih rendah dibandingkan hari pertama. Hal ini menunjukkan bahwa solar tracker mampu meningkatkan daya, namun tetap sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca.

### Hasil Pengujian Hari Ketiga

Hasil pengujian hari ketiga (24 Oktober 2025) ditampilkan pada Gambar 6. Kondisi cuaca yang tidak stabil, dengan dominasi awan tebal dan hujan, menyebabkan penurunan daya yang lebih signifikan dibandingkan hari sebelumnya. Daya maksimum yang tercatat sebesar 8,72 W, sementara daya minimum turun hingga 0,002 W.



**Gambar 6. Grafik Hasil Pengujian Daya Hari Ketiga (24 Oktober 2025)**

Daya rata-rata selama pengujian hari ketiga adalah 1,61 W. Penurunan daya yang drastis ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain berkurangnya irradiance matahari akibat awan, pantulan cahaya oleh tetesan air pada permukaan panel, serta perubahan cepat kondisi atmosfer. Rekapitulasi daya rata-rata hasil pengujian selama tiga hari ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1: Perhitungan Daya Rata-rata**

Pengujian	Solar Tracking (W)	Non-Tracking (W)
22 Oktober 2025	5,81	2,86
23 Oktober 2025	2,95	1,88
24 Oktober 2025	1,61	1,03
Rata-rata	3,24	1,92

Berdasarkan Tabel 1, sistem solar tracker menghasilkan daya rata-rata 3,24 W, sedangkan sistem panel statis menghasilkan 1,92 W. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan solar tracker mampu meningkatkan daya keluaran panel surya secara signifikan dibandingkan sistem non-tracking.

Meskipun solar tracker aktif, daya keluaran panel tetap mengalami fluktuasi. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain pergerakan awan yang cepat, perbedaan cahaya langsung (direct sunlight) dan cahaya difus, serta sensitivitas sensor LDR terhadap noise. Perubahan irradiance dapat terjadi dalam rentang waktu sangat singkat, sehingga meskipun panel telah mengikuti arah matahari, intensitas cahaya yang diterima tetap berubah-ubah.

Selain itu, ketidaklinieran karakteristik sensor LDR menyebabkan sudut panel tidak selalu berada pada posisi optimum irradiance. Sensor arus ACS712 juga memiliki error sekitar  $\pm 1-2\%$  full scale dan tingkat noise yang cukup tinggi pada arus kecil, sehingga nilai daya hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan (1), tampak berfluktuasi, terutama saat kondisi mendung atau hujan.

Berdasarkan daya rata-rata sistem solar tracker sebesar 3,24 W dan daya nominal panel 10 Wp, efisiensi sistem solar tracker dihitung menggunakan Persamaan (2) sebagai berikut :

$$\eta = \frac{3,24 \times 100\%}{10 \text{ watt}} = 32,4\%$$

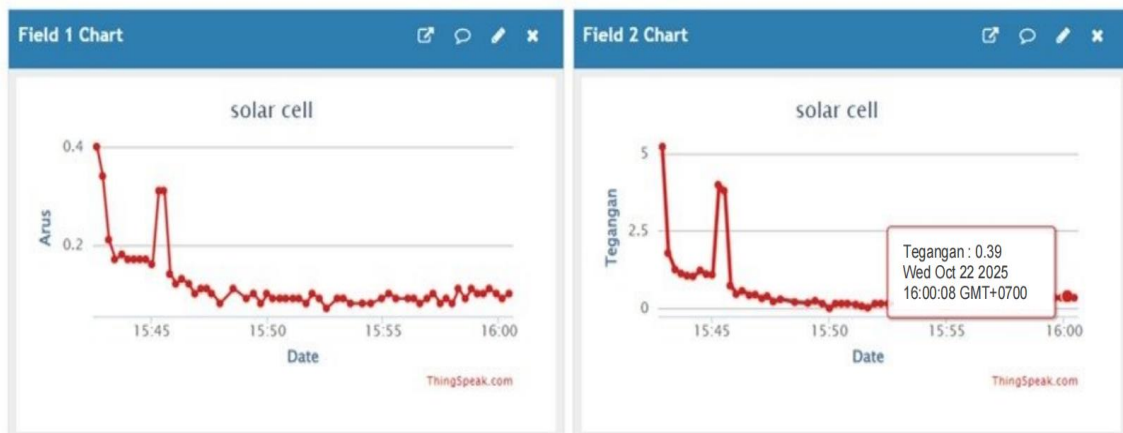
Sementara itu, sistem panel surya non-tracking menghasilkan daya rata-rata 1,92 W, sehingga efisiensi sistem sebesar

$$\eta = \frac{1,92 \times 100\%}{10 \text{ watt}} = 19,2\%$$

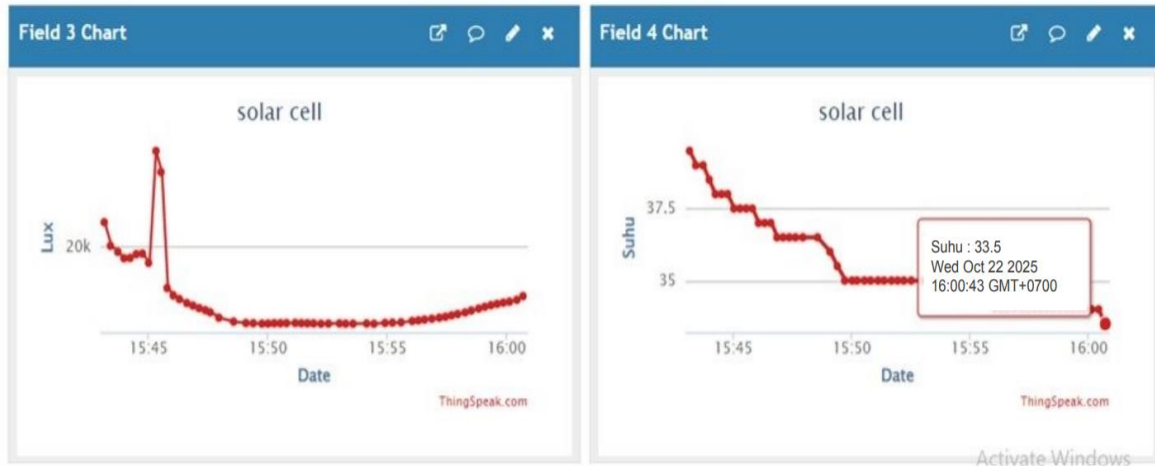
Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan solar tracker berbasis IoT mampu meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan dibandingkan panel surya statis. Peningkatan kinerja ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa solar tracker dapat memaksimalkan penyerapan energi matahari. Rugi-rugi sistem dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain resistansi kabel, koneksi terminal, suhu panel, mismatch sel, shading parsial, serta kondisi lingkungan seperti debu dan air.

### Monitoring Data Berbasis IoT

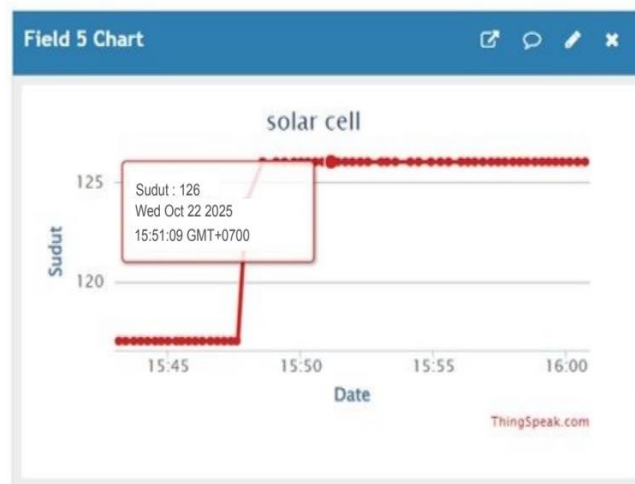
Hasil monitoring parameter kelistrikan dan lingkungan ditampilkan melalui platform *ThingSpeak*. Gambar 7 menunjukkan perubahan nilai arus dan tegangan, Gambar 8 memperlihatkan perubahan intensitas cahaya dan suhu, sedangkan Gambar 9 menunjukkan perubahan sudut panel selama proses tracking



Gambar 7. Monitoring perubahan nilai Arus dan Tegangan dalam tampilan Thingspeak



Gambar 8. Monitoring perubahan nilai Lux dan Suhu dalam tampilan Thingspeak



Gambar 9. Monitoring nilai perubahan sudut dalam tampilan Thingspeak

## KESIMPULAN

Hasil pengukuran menunjukkan daya tertinggi sebesar 9,11 W dengan intensitas cahaya sebesar 54612 Lux atau sama dengan  $3050,9 \text{ w/m}^2$ . Kemampuan serap panel surya tidak dapat mencapai 100%. Hal ini dikarenakan faktor intensitas cahaya dan karakteristik panel tersebut. Efisiensi hasil pengujian daya rata-rata selama 3 hari sebesar 32,4% untuk solar tracker berbasis Arduino terintegrasi sensor arus dan tegangan serta platform IoT, sedangkan solar panel non tracker memperoleh nilai efisiensi 19,2%.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. A. E. Jurnal, A. Dan, dan S. Fevriera, “Pengaruh Konsumsi Energi dan Kemajuan Teknologi terhadap Pertumbuhan,” *Jurnal Aplikasi Ekonomi*, vol. 8, no. 3, 2023.
- [2] Dewan Energi Nasional, *Bauran Energi Nasional 2020*. Jakarta, Indonesia: Dewan Energi Nasional, 2020.

- [3] N. A. Adistia, R. A. Nurdiansyah, J. Fariko, V. Vincent, dan J. W. Simatupang, “Potensi Energi Panas Bumi, Angin, dan Biomassa Menjadi Energi Listrik di Indonesia,” *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 22, no. 2, pp. 105–112, 2020.
- [4] F. Pijoh, B. D. P. K., dan L. P. Purba, “Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Energi Ramah Lingkungan,” vol. 2, no. 2, pp. 201–207, 2024.
- [5] A. Niwanda, E. Kardiana, M. Arif, P. Rahmadani, dan R. Amalan, “Analisis Potensi Pemanfaatan Energi Matahari melalui Panel Surya di Kota Medan,” vol. 3, no. September, 2025.
- [6] T. Haryanto, “Perancangan Energi Terbarukan Solar Panel untuk Essential Load dengan Sistem Switch,” *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 10, no. 1, pp. 43, 2021.
- [7] A. Firmansyah, I. T. Yuniahastuti, dan C. Sari, “Sensorless Solar Tracker Optimization on Photovoltaic (PV),” *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 11, no. 2, pp. 44–50, 2024.
- [8] R. R. A. Siregar dan N. Wardana, “Sistem Monitoring Kinerja Panel Listrik Tenaga Surya Menggunakan Arduino Uno,” vol. 14, pp. 81–100, 2017.
- [9] R. Syafrialdi dan W. Wildian, “Rancang Bangun Solar Tracker Berbasis Mikrokontroler ATmega8535 dengan Sensor LDR dan Penampil LCD,” *Jurnal Fisika Unand*, vol. 4, no. 2, pp. 113–122, 2015..
- [10] Z. Iqimal dan I. Devi, “Aplikasi Sistem Tenaga Surya sebagai Sumber Tenaga Listrik Pompa Air,” vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [11] S. Alqahtani dan A. Rehman, “Development and Performance Evaluation of an Automatic Solar Tracking System for Photovoltaic Applications in Hot Climates,” *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 360–371, 2020.
- [12] S. Yadav dan A. Singh, “Design and Implementation of a Dual-Axis Solar Tracking System Using Arduino and LDR Sensors,” *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 11, no. 2, pp. 872–880, 2021.
- [13] M. Abdullah, A. Rahman, R. Putra, D. Santoso, dan F. Haryanto, “Performance Analysis of IoT-Enabled Solar Tracking System for Rural Electrification,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, pp. 102019, 2022.
- [14] R. Patel dan V. Sharma, “Comparative Study of Single-Axis and Dual-Axis Solar Tracking Systems for Photovoltaic Panels,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1823–1834, 2023.
- [15] L. Chen, Y. Zhang, dan H. Wu, “Smart Solar Tracking System with IoT-Based Monitoring for Urban Rooftop Applications,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 45321–45335, 2024.
- [16] MathWorks, “ThingSpeak IoT Analytics Platform,” [Online]. Available: <https://thingspeak.com>. Accessed: Sep. 2025.
- [17] R. Singh dan Kumar, “IoT-Enabled Dual-Axis Solar Tracking System for Real-Time Performance Monitoring,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 10294–10306, 2025.
- [18] M. S. Al-Obaidi, L. A. Ahmed, dan Ahmed, “Smart Solar Tracking System Using IoT for Energy Optimization,” *Renewable Energy Journal*, vol. 218, pp. 120–129, 2024.

