

# Dampak Penggunaan *Dual Axis Solar Trackers* terhadap Efisiensi Fotovoltaik

## *The Impact of Using Dual Axis Solar Trackers on Photovoltaic Efficiency*

Denny Haryanto Sinaga  
Prodi Teknik Elektro  
Universitas Negeri Medan,  
Medan, Indonesia  
denny.sinaga@unimed.ac.id

Handrea Bernando Tambunan  
PT. PLN (Persero) Puslitbang  
Jakarta, Indonesia  
handreatambunan@pln.co.id

Arwadi Sinuraya  
Prodi Teknik Elektro  
Universitas Negeri Medan  
Medan, Indonesia  
arwadisinuraya@unimed.ac.id

Olnes Yosefa Hutajulu  
Prodi Teknik Elektro  
Universitas Negeri Medan  
Medan, Indonesia  
olnes.hutajulu@unimed.ac.id

Muhammad Aulia Rahman Sembiring  
Prodi Pendidikan Teknik Elektro  
Universitas Negeri Medan  
Medan, Indonesia  
marsembiring@unimed.ac.id

T. Afrian  
Prodi Teknik Elektro  
Universitas Negeri Medan  
Medan, Indonesia  
t.afrian777@gmail.com

Diterima : Desember 2024  
Disetujui : Juli 2025  
Dipublikasi : Juli 2025

**Abstrak**— Pemanfaatan energi surya melalui sistem fotovoltaik (PV) masih menghadapi tantangan efisiensi akibat variabilitas intensitas cahaya dan posisi matahari sepanjang hari. Panel PV statis hanya menghasilkan daya maksimum saat tegak lurus terhadap arah sinar matahari, sehingga diperlukan sistem pelacakan yang adaptif. Penelitian ini merancang dan menguji sistem pelacak surya aktif dua sumbu berbiaya rendah dengan menggunakan sensor *light-dependent resistor* (LDR) dan mikrokontroler Arduino Uno, yang secara otomatis mengatur orientasi panel mengikuti pergerakan matahari. Pengujian dilakukan selama lima hari untuk membandingkan kinerja sistem pelacak dengan panel statis, menggunakan parameter daya keluaran, tegangan, arus, dan efisiensi. Hasil menunjukkan peningkatan daya rata-rata sebesar 7,41 W dan efisiensi sebesar 1,63% pada sistem pelacak. Efisiensi tertinggi sebesar 13,49% dicapai pada kondisi iradiasi rendah, mengindikasikan kemampuan sistem dalam menjaga performa optimal di bawah pencahayaan yang tidak stabil. Temuan ini menunjukkan bahwa pelacak dua sumbu merupakan solusi praktis dan efektif dalam meningkatkan efisiensi sistem PV, terutama di wilayah dengan fluktuasi harian intensitas surya yang signifikan.

**Kata Kunci**— Energi surya; energi terbarukan; Fotovoltaik; *Dual-axis solar tracker*; *light dependent resistor* (LDR)

**Abstract**— The utilization of solar energy through photovoltaic (PV) systems continues to face efficiency challenges due to variations in light intensity and the sun's changing position throughout the day. Static PV panels perform optimally only when positioned perpendicular to incoming sunlight, necessitating an adaptive tracking mechanism. This study designs and evaluates a low-cost dual-axis active solar tracking system employing light-dependent resistors (LDRs) and an Arduino Uno microcontroller to automatically adjust the panel's orientation in response to solar movement. A five-day performance test was conducted comparing

*the dual-axis tracker with a fixed-panel system, measuring output power, voltage, current, and overall efficiency. Results show an average power increase of 7.41 W and an efficiency gain of 1.63% with the tracking system. A peak efficiency of 13.49% was recorded under low irradiance conditions, indicating the system's ability to maintain optimal performance despite fluctuating light. These findings suggest that dual-axis tracking offers a practical and effective solution for enhancing PV efficiency, especially in regions with significant daily variations in solar intensity.*

**Keywords**— Solar energy; renewable energy; photovoltaic; *dual-axis solar tracker*; *light dependent resistor* (LDR)

### I. PENDAHULUAN

Permintaan global terhadap energi terbarukan terus meningkat, mendorong pengembangan sistem fotovoltaik (PV) sebagai solusi berkelanjutan [1]. Namun, efisiensi sistem PV sangat dipengaruhi oleh intensitas dan sudut datang sinar matahari, yang berubah sepanjang hari dan musim. Akibatnya, panel surya statis tidak selalu berada pada posisi optimal untuk menyerap energi secara maksimal [2] [3].

Beberapa penelitian telah mengkaji sistem pelacakan matahari sebagai upaya meningkatkan kinerja panel PV. Sistem pelacak satu sumbu yang menggunakan motor DC dan sensor cahaya telah menunjukkan peningkatan efisiensi, meskipun terbatas pada gerakan horizontal. Di sisi lain, sistem pelacak dua sumbu memiliki keunggulan dalam menyesuaikan orientasi panel secara horizontal dan vertikal, sehingga memungkinkan panel tetap tegak lurus terhadap cahaya matahari sepanjang hari [4].

Teknologi pelacak dua sumbu berbasis mikrokontroler seperti Arduino dan sensor LDR telah terbukti menawarkan presisi dan fleksibilitas lebih tinggi dibanding sistem

konvensional [5]. Beberapa studi melaporkan peningkatan daya dan efisiensi yang signifikan, namun masih terdapat variasi hasil terkait performa di kondisi radiasi rendah dan stabilitas jangka panjang [6].

Sebagian besar penelitian sebelumnya belum menguji sistem dual-axis secara langsung dalam kondisi lapangan di wilayah tropis dengan fluktuasi intensitas cahaya yang tinggi. Hal ini menciptakan celah penelitian (research gap) yang penting, terutama dalam mengevaluasi efisiensi aktual dan kestabilan sistem pada berbagai tingkat pencahayaan.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem pelacak surya dua sumbu yang ekonomis berbasis LDR dan Arduino Uno. Evaluasi dilakukan melalui pengujian langsung terhadap daya dan efisiensi yang dihasilkan, dengan membandingkannya terhadap sistem panel surya statis.

## II. METODE

### A. Sel Surya

Sel surya merupakan perangkat yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik melalui prinsip kerja efek fotovoltaiik. Teknologi ini memungkinkan konversi cahaya menjadi listrik arus searah (DC), yang dinyatakan dalam satuan Watt (W) atau kiloWatt (kW), dengan memanfaatkan material semikonduktor yang aktif terhadap paparan foton. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, proses pembangkitan listrik terjadi. Namun, tanpa adanya cahaya, perangkat ini tidak mampu menghasilkan energi. Berbeda dengan baterai, sel surya tidak memerlukan proses pengisian ulang untuk dapat digunakan kembali [7].

Umumnya, sel surya dibuat dari bahan semikonduktor seperti silikon yang memiliki kemampuan untuk menyerap foton dari cahaya matahari dan melepaskan elektron sebagai responsnya [8]. Sel surya berperan sebagai elemen utama dalam panel surya dan sistem energi surya secara keseluruhan, dengan fungsi krusial dalam penyediaan energi terbarukan yang bersifat ramah lingkungan.

### B. Panel Surya Monokristalin

Jenis panel surya ini diproduksi dari batang silikon kristal tunggal murni yang dipotong menjadi lapisan tipis. Sel surya monokristalin memiliki tampilan seragam karena tiap unit sel berasal dari struktur kristal yang sama, sehingga menghasilkan performa yang tinggi. Monokristalin dikenal sebagai tipe panel surya dengan efisiensi konversi energi terbaik, dengan tingkat efisiensi berkisar antara 15% hingga 20% [9].

### C. Karakteristik Panel Surya

Sel fotovoltaiik adalah sumber arus yang arus yang dihasilkannya bervariasi dengan iradiasi matahari (radiasi matahari yang diterima per satuan luas). Karakteristik sel PV tidak linier dan bervariasi dengan tingkat iradiasi dan suhu lingkungan yang berbeda. Daya panel PV meningkat seiring dengan peningkatan radiasi matahari [10].

Parameter dalam menentukan nilai output daya panel surya antara lain:

a. Arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ) merupakan arus keluaran maksimum yang diperoleh dari sel surya tanpa resistansi (R).

b. Tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ) merupakan tegangan pada saat tidak ada arus yang mengalir melalui rangkaian luar. Ini merupakan tegangan maksimum yang dapat dihasilkan oleh sel surya.  $V_{oc}$  sesuai dengan tegangan bias maju, di mana arus gelap mengkompensasi arus foto.  $V_{oc}$  bergantung pada kerapatan arus foto.

c. Daya yang dihasilkan oleh panel surya

Daya keluaran ( $P_{out}$ ) pada sel surya merupakan nilai perkalian tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ) dengan arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ) dan Faktor Pengisian (FF) yang dihasilkan oleh sel surya dapat dirumuskan dengan persamaan:

$$P_{out} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (1)$$

Dimana :

$P_{out}$	= Daya Keluaran (W)
$V_{oc}$	= Tegangan <i>open circuit</i> (V)
$I_{sc}$	= Arus <i>short circuit</i> (A)
FF	= <i>Fill Factor</i>

*Fill factor* (FF) atau faktor pengisian adalah parameter yang didefinisikan sebagai rasio titik daya maksimum dengan tegangan rangkaian terbuka terhadap arus rangkaian pendek panel surya [11]. Ini berarti daya sel surya tidak selalu disuplai pada beban penuh. Secara ideal, nilai FF berada di antara 0,7 hingga 0,85, tergantung pada kualitas sel surya. Nilai faktor pengisian yang lebih tinggi menunjukkan bahwa sel surya bekerja lebih efisien dalam mengonversi energi cahaya menjadi listrik.

Nilai FF juga mencerminkan kualitas metalisasi kontak sel surya, yang berhubungan dengan resistansi total dalam sel tersebut [12]. Selain itu, nilai faktor kurva berfungsi sebagai indikator mutu dari proses metalisasi kontak, yang dipengaruhi oleh total resistansi fotoelektron. Total resistansi ini terdiri dari resistansi seri ( $R_s$ ) dan resistansi paralel ( $R_p$ ). Nilai faktor kurva dapat diperoleh melalui perhitungan menggunakan persamaan berikut [13].

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0,72)}{V_{oc} + 1} \quad (2)$$

Selain parameter di atas, faktor pengisian juga dapat digunakan sebagai tolok ukur untuk menunjukkan kualitas modul panel surya.

### D. Efisiensi Panel Surya

Tingkat efisiensi panel surya menjadi salah satu parameter utama yang memengaruhi kinerja total dari sistem pembangkit listrik tenaga surya. Panel dengan efisiensi lebih tinggi dapat menghasilkan lebih banyak listrik dari jumlah sinar matahari yang sama, sehingga lebih produktif dan ideal untuk instalasi dengan ruang terbatas atau di mana memaksimalkan pembangkitan daya sangat penting.

Efisiensi Konversi Modul surya ( $\eta_p$ ) dapat dilihat pada persamaan berikut ini [14].

$$\eta_p = \frac{P_{act}}{G \times A} \times 100 \quad (3)$$

Dimana,

$\eta_p$  = kondisi pengukuran lapangan efisiensi konversi panel surya (%),  
 $P_{act}$  = Daya keluaran terukur panel (Watt),  
 $G$  = Radiasi matahari ( $W/m^2$ ),  
 $A$  = Luas panel surya ( $m^2$ ).

### E. Solar Tracking

*Solar tracker* adalah sistem pelacak matahari yang digunakan pada panel surya untuk memaksimalkan penyerapan sinar matahari dan dengan demikian meningkatkan produksi energi, sistem pelacak surya perlu diintegrasikan ke dalam sistem energi surya konvensional, di mana panel surya dapat dipasang pada struktur yang bergerak sesuai dengan jalur matahari. Tambahan 10–50% energi keluaran dapat diperoleh dengan menggunakan sistem solar tracker yang melacak sinar matahari, bukan sistem konvensional yang terpasang pada sudut tetap. Bergantung pada mekanisme yang digunakan untuk mengarahkan panel surya, perangkat pelacak surya dapat dibagi menjadi perangkat sumbu tunggal atau ganda [15].

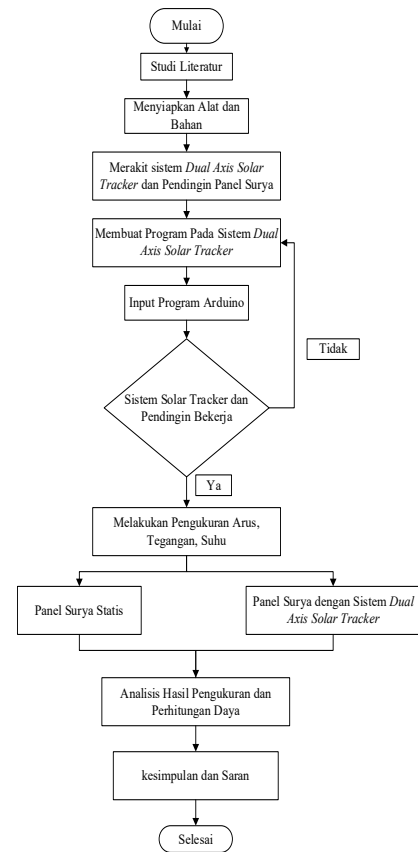
Sistem pelacak dua sumbu bekerja dengan memutar panel surya menggunakan dua motor agar selalu menghadap langsung ke arah sinar matahari. Sistem pelacakan ini beroperasi berdasarkan posisi sinar matahari dan mengandalkan teknik pelacakan otomatis, bukan pada pola gerakan yang sudah ditentukan sebelumnya atau teknik adaptif. Secara otomatis, sistem akan mengarahkan panel surya sehingga selalu tegak lurus terhadap sinar matahari [16]. Sensor memberikan sinyal umpan balik ke pengontrol untuk mengendalikan sistem tersebut.

### F. Light Dependent Resistor

Sensor LDR (Light Dependent Resistor) adalah alat yang peka terhadap cahaya, resistansi resistor yang bergantung pada cahaya dapat berubah dalam beberapa urutan saat cahaya menyinarinya. Nilai signifikansi resistansi menurun saat tingkat cahaya yang menyinari resistor yang bergantung pada cahaya meningkat [17]. Sensor ini sering digunakan untuk mendeteksi cahaya dalam perangkat seperti lampu jalan otomatis, sistem keamanan, dan alat pelacak matahari pada panel surya. Tujuan utamanya adalah untuk memberi tahu sistem kapan cahaya cukup terang atau gelap, sehingga perangkat dapat berfungsi sesuai kondisi Cahaya [10] [18].

### G. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan yang disusun secara sistematis. Proses penelitian dimulai dari identifikasi masalah dan studi literatur, dilanjutkan dengan perancangan sistem pelacak dua sumbu berbasis Arduino dan LDR. Setelah itu dilakukan tahap implementasi, pengujian sistem panel surya statis dan bergerak, hingga analisis perbandingan efisiensi dan penarikan kesimpulan. Secara umum, langkah-langkah tersebut dapat diilustrasikan melalui diagram alir yang ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilaksanakan selama lima hari di *rooftop* Laboratorium Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan, pada pukul 10.00–17.00 WIB. Pengujian dilakukan untuk membandingkan performa panel surya statis dengan panel surya yang dilengkapi sistem pelacak matahari dua sumbu (dual-axis), berdasarkan parameter tegangan open circuit ( $V_{oc}$ ), arus short circuit ( $I_{sc}$ ), suhu permukaan panel, intensitas radiasi matahari, serta efisiensi konversi energi. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh data berupa tegangan tanpa beban ( $V_{oc}$ ), arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ), suhu permukaan panel surya ( $^{\circ}C$ ), dan intensitas radiasi matahari ( $W/m^2$ ).

### A. Hasil Pengukuran Daya Panel Surya

Evaluasi daya keluaran panel surya memerlukan pengukuran parameter utama seperti tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ) dan arus rangkaian pendek ( $I_{sc}$ ). Kedua parameter ini digunakan untuk membandingkan kinerja antara panel surya statis dan panel surya dengan sistem pelacak dua sumbu (dual-axis tracker). Pengujian dilakukan selama lima hari untuk memperoleh data yang mencakup tegangan, arus, suhu permukaan panel, dan intensitas radiasi matahari. Rata-rata hasil pengukuran dari masing-masing sistem ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 sebagai dasar analisis efisiensi dan daya keluaran.

Hasil pengukuran panel surya statis selama lima hari pengamatan disajikan pada Tabel 1, sementara data untuk panel surya yang dilengkapi sistem dual-axis solar tracker disajikan pada Tabel 2. Parameter yang diukur meliputi intensitas radiasi matahari, suhu permukaan panel, tegangan

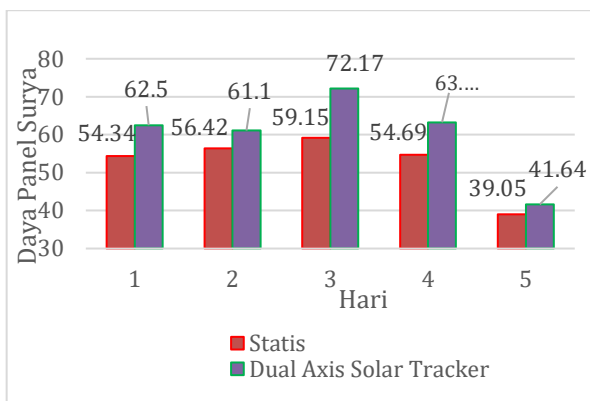
rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ), faktor pengisian ( $fill\ factor$ ), dan daya keluaran ( $W$ ).

TABEL 1. HASIL PENGUKURAN SISTEM PANEL SURYA STATIS

Hari	Radiasi Matahari ( $W/m^2$ )	Panel Surya Statis				
		T ( $^{\circ}C$ )	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	Fill Factor	Daya (W)
1	997.43	51.1	20.16	3.34	0.809077	54.34
2	928.75	55.12	19.75	3.53	0.80626	56.42
3	1074.66	50.31	20.45	3.56	0.811044	59.15
4	859.35	50.73	19.81	3.41	0.806666	54.69
5	460.44	36.13	19.13	2.54	0.801777	39.05
Rata-rata	864.126	48.67	19.86	3.28	0.806965	52.73

TABEL 2. HASIL PENGUKURAN SISTEM DUAL AXIS SOLAR TRACKER

Hari	Radiasi Matahari ( $W/m^2$ )	Panel Surya Sistem Dual Axis Solar Tracker				
		T ( $^{\circ}C$ )	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	Fill Factor	Daya (W)
1	997.43	51.25	20.84	3.68	0.81357	62.5
2	928.75	55.39	20.19	3.73	0.809254	61.1
3	1074.66	51.54	20.62	4.29	0.812106	72.17
4	859.35	55.61	19.98	3.9	0.807839	63.27
5	460.44	41.67	19.63	2.62	0.805394	41.64
Rata-rata	864.126	51.092	20.25	3.64	0.809633	60.14



Gambar 2. Grafik Daya Keluaran Panel Surya

Berdasarkan data rata-rata, sistem pelacak dua sumbu menghasilkan daya sebesar 60,14 W, sedangkan sistem statis hanya 52,73 W, menunjukkan peningkatan daya sebesar 7,41 W atau sekitar 14%. Fill factor juga sedikit lebih tinggi pada sistem pelacak, yaitu 0,8096 dibandingkan 0,8070 pada sistem statis, menandakan kualitas konversi daya yang lebih stabil. Parameter yang diukur antara lain seperti radiasi surya, suhu permukaan panel, tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ), faktor pengisian, dan keluaran daya [19].

Pada setiap hari pengamatan, panel surya dengan pelacak surya sumbu ganda secara konsisten menghasilkan daya yang lebih tinggi daripada panel surya statis. Faktor pengisian rata-rata panel surya statis adalah 0,806965. Sebaliknya, pelacak surya sumbu ganda mencapai faktor pengisian rata-rata 0,809633, yang menunjukkan sedikit peningkatan dalam kualitas keluaran daya listrik. Dengan demikian, data rata-rata ini mengonfirmasi bahwa penggunaan pelacak surya sumbu ganda secara signifikan meningkatkan jumlah energi daya panel surya dibandingkan dengan penggunaan sistem statis. Panel surya dengan *dual axis solar tracker* menghasilkan daya paling tinggi yaitu

sebesar 60,14 W dan daya keluaran yang dialami oleh panel surya statis sebesar 52,73 W yang ditunjukkan oleh grafik pada gambar 2.

Perbandingan daya keluaran panel surya statis dan dengan *dual-axis solar tracker* selama lima hari pengamatan ditunjukkan pada Gambar 2 dimana sistem pelacak menghasilkan daya lebih tinggi secara konsisten setiap hari. Peningkatan tertinggi terjadi pada hari ke-3 dengan selisih 13,02 W, sedangkan peningkatan terendah terjadi pada hari ke-5 dengan selisih 2,59 W. Tren ini mengonfirmasi bahwa sistem pelacak efektif dalam memaksimalkan daya meskipun fluktuasi radiasi terjadi.

Pada hari pertama pengujian, panel surya dengan sistem pelacak *dual-axis* menghasilkan daya sebesar 62,5 W, lebih tinggi dibandingkan panel surya statis yang hanya mencapai 54,34 W. Pada hari kedua, sistem pelacak dua sumbu mencatatkan daya sebesar 61,1 W, sementara panel statis menghasilkan 56,42 W. Peningkatan signifikan terjadi pada hari ketiga, di mana daya yang dihasilkan oleh sistem pelacak dua sumbu mencapai 72,17 W, sedangkan panel statis hanya menghasilkan 59,15 W. Pada hari keempat, daya yang dihasilkan *dual-axis* sebesar 63,27 W, lebih signifikan dibandingkan panel statis yang hanya mencapai daya sebesar 54,69 W. Pada hari kelima, meskipun terjadi penurunan daya pada kedua sistem, *dual-axis solar tracker* tetap unggul dengan daya sebesar 41,64 W dibandingkan panel statis yang hanya menghasilkan daya sebesar 39,05 W.

Data dalam tabel menggambarkan kinerja keseluruhan panel surya statis dan panel surya dengan pelacak *dual-axis* selama lima hari pengamatan. Secara umum, daya rata-rata yang dihasilkan oleh panel surya statis adalah 52,73 W. Sebaliknya, panel surya dengan *dual-axis solar tracker* memiliki daya rata-rata yang lebih tinggi yaitu 60,14 W. Hal ini mengindikasikan bahwa pelacak *dual-axis* mampu meningkatkan rata-rata daya keluaran panel surya sebesar 7,41 W dibandingkan dengan sistem statis.

## B. Hasil Pengukuran Efisiensi Panel Surya

Berdasarkan pengukuran yang telah dilakukan didapat rata-rata hasil pengukuran panel surya statis dan panel surya sistem *dual axis solar tracker*, kemudian setelah mengetahui nilai daya pengukuran dilanjutkan dengan menghitung efisiensi panel surya sistem *dual axis solar tracker* dengan cara menggunakan rumus

$$\eta_p = \frac{P_{act}}{G \times A} \times 100$$

$$\eta_p = \frac{52.73}{864.126 \times (1 \times 0.67)} \times 100$$

$$\eta_p = 9,10\%$$

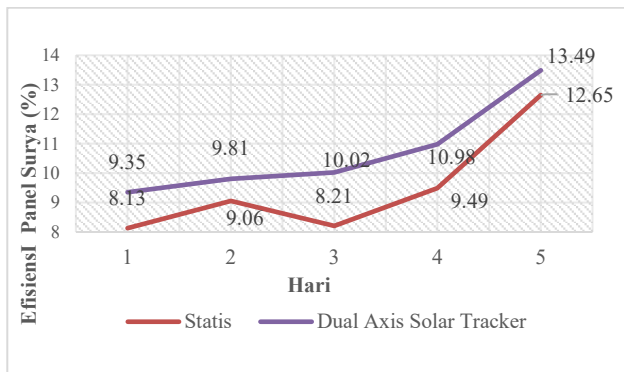
Setelah dilakukan perhitungan didapat nilai efisiensi panel surya *monocrystalline* dengan sistem *dual axis solar tracker* rata-rata sebesar 9,10%, perhitungan ini dilakukan dari hari pertama sampai hari kelima pada keseluruhan panel surya *monocrystalline*. Nilai efisiensi panel surya statis, panel surya sistem *dual axis solar tracker*, secara keseluruhan hari dapat dilihat pada tabel 3 dan 4.

TABEL 3. NILAI EFISIENSI PANEL SURYA STATIS

Hari	Solar Radiasi (W/m <sup>2</sup> )	Panel Surya Statis	
		Daya (W)	Efisiensi (%)
1	997.43	54.34	8.13
2	928.75	56.42	9.06
3	1074.66	59.15	8.21
4	859.35	54.69	9.49
5	460.44	39.05	12.65
Rata-Rata	864.126	52.73	9.10

TABEL 4. NILAI EFISIENSI PANEL SURYA DUAL AXIS SOLAR TRACKER

Hari	Solar Radiasi (W/m <sup>2</sup> )	Panel Surya dengan Dual Axis Solar Tracker	
		Daya (W)	Efisiensi (%)
1	997.43	62.5	9.35
2	928.75	61.1	9.81
3	1074.66	72.17	10.02
4	859.35	63.27	10.98
5	460.44	41.64	13.49
Rata-Rata	864.126	60.45	10.73



Gambar 3. Grafik Efisiensi Panel Surya

Tabel 3 dan 4 menyajikan perbandingan kinerja antara panel surya tanpa sistem pelacak (statis) dan panel surya yang menggunakan pelacak dua sumbu (*dual-axis*) selama periode pengamatan lima hari. Data menunjukkan bahwa radiasi matahari bervariasi setiap hari, dengan nilai tertinggi tercatat pada hari ke-3 sebesar 1074.66 W/m<sup>2</sup> dan nilai terendah pada hari ke-5 sebesar 460.44 W/m<sup>2</sup>. Tabel 3 menunjukkan efisiensi panel surya statis, sedangkan Tabel 4 menyajikan efisiensi panel dengan sistem dual-axis solar tracker selama lima hari. Nilai efisiensi dihitung berdasarkan perbandingan antara daya keluaran terhadap radiasi matahari dan luas panel.

Secara keseluruhan, efisiensi rata-rata sistem pelacak dua sumbu adalah 10,73%, lebih tinggi dibandingkan sistem statis yang hanya mencapai 9,10%. Peningkatan efisiensi mencapai 1,63%, yang menunjukkan efektivitas sistem pelacakan dalam meningkatkan konversi energi cahaya menjadi listrik, terutama saat kondisi radiasi matahari bervariasi.

Perbandingan efisiensi antara sistem panel surya statis dan *dual-axis solar tracker* ditunjukkan pada Gambar 3 dimana panel dengan pelacak menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi setiap hari. Menariknya, pada hari ke-5,

meskipun radiasi matahari rendah (460,44 W/m<sup>2</sup>), sistem pelacak tetap mencatat efisiensi tertinggi, yaitu 13,49%, menunjukkan bahwa pelacakan arah matahari meningkatkan penerimaan sinar secara optimal bahkan saat radiasi minimum. Secara umum, panel surya yang dilengkapi dengan sistem pelacak dua sumbu menunjukkan tingkat efisiensi yang lebih unggul dibandingkan panel surya statis pada seluruh hari pengamatan. Pada hari pertama, efisiensi panel surya statis tercatat sebesar 8,13%, sedangkan panel surya dengan dual-axis solar tracker mencapai efisiensi 9,35%.

Meskipun terjadi fluktuasi pada efisiensi sistem statis, seperti penurunan menjadi 8,21% pada hari ketiga, efisiensi sistem solar tracker dual-axis terus meningkat, mencapai puncaknya pada hari kelima dengan efisiensi sebesar 13,49%. Sementara itu, panel surya statis juga mengalami peningkatan pada hari kelima dengan efisiensi sebesar 12,65%, tetapi masih di bawah sistem solar tracker dual-axis. Data tersebut mengindikasikan bahwa pemanfaatan pelacak surya dua sumbu secara konsisten memberikan peningkatan efisiensi dalam penyerapan energi matahari dibandingkan dengan sistem panel statis.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan dual-axis solar tracker secara signifikan meningkatkan performa sistem fotovoltaik. Sistem pelacak dua sumbu menghasilkan daya rata-rata sebesar 60,14 W dan efisiensi 10,73%, dibandingkan panel statis yang hanya mencapai daya 52,73 W dan efisiensi 9,10%. Artinya, terjadi peningkatan efisiensi sebesar 1,63% dan daya sebesar 7,41 W. Implikasi praktis dari hasil ini menunjukkan bahwa sistem pelacak dua sumbu berpotensi besar diterapkan pada instalasi energi surya di wilayah dengan variasi intensitas cahaya tinggi, seperti wilayah tropis. Penggunaan sistem ini dapat meningkatkan efektivitas pembangkitan energi terbarukan dan mendukung optimalisasi sumber daya energi yang ramah lingkungan. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengeksplorasi efisiensi jangka panjang sistem pelacak di berbagai musim dan lokasi geografis, serta analisis biaya manfaat lebih lanjut guna mengkaji kelayakan implementasi dalam skala komersial.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Negeri Medan serta Pusat Unggulan Iptek Perguruan Tinggi *Innovation Centre of Renewable Sources and Waste Integration for Sustainable Energy* (PUI-PT INNERWISE) atas dukungan pendanaan dan kontribusi yang memungkinkan penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

#### REFERENSI

- [1]. R. N. Sumarno, L. Muntasiroh, and D. Mariani, "Study of the potential for solar power plant at At Taqwa Mosque Using PV Syst," *JJEEE*, vol. 6, no. 1, pp. 47–51, Jan. 2024, doi: 10.37905/jjee.v6i1.23081.
- [2]. B. T. Nguyen and H.-X. T. Ho, "Design, Implementation and Performance Analysis of a Dual Axis Solar Tracking System," *Adv. sci. technol. eng. syst. j.*, vol. 5, no. 3, pp. 41–45, 2020, doi: 10.25046/aj050306.

- [3]. Ghaedi, A., Mahmoudian, M., & Sedaghati, R. (2024). The Impact of Different Solar Tracker Systems on Reliability of Photovoltaic Farms. *Journal of Energy Management and Technology*, 8(1), 68–77.
- [4]. G. Mehdi, N. Ali, S. Hussain, A. A. Zaidi, A. Hussain Shah, and M. M. Azeem, “Design and Fabrication of Automatic Single Axis Solar Tracker for Solar Panel,” in *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, Sukkur, Pakistan: IEEE, Jan. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICOMET.2019.8673496.
- [5]. S. A. Jumaat, M. N. A. M. Said, and C. R. A. Jawa, “Dual axis solar tracker with IoT monitoring system using arduino,” *IJPEDS*, vol. 11, no. 1, p. 451, Mar. 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp451-458.
- [6]. Md. Hazrat Ali, “Performance Analysis of Designed and Implementation Dual-Axis Solar Tracker with Monitoring System,” *JEET*, no. 33, pp. 1–11, Apr. 2023, doi: 10.55529/jeet.33.1.11.
- [7]. Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.). (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester, UK: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-49196-5.
- [8]. R. H. Plante, *Solar Energy, Photovoltaics, and Domestic Hot Water: A Technical and Economic Guide for Project Planners, Builders, and Property Owners*, 1st ed. Amsterdam, Netherlands: Academic Press, 2014. ISBN: 978-0-12-420155-2.
- [9]. Boxwell, M. (2023). *Solar Electricity Handbook: A Simple, Practical Guide to Solar Energy – Designing and Installing Photovoltaic Solar Electric Systems* (16th ed.). Greenstream Publishing.
- [10]. R. S. Poliyama, F. E. P. Surusa, and R. K. Abdullah, “Rancang Bangun Alat Sistem Monitor Lampu Jalan Umum Tenaga Surya Berbasis Teknologi Lo - Ra,” *JJEEE*, vol. 3, no. 2, pp. 34–40, Jul. 2021, doi: 10.37905/jjee.v3i2.10202.
- [11]. Y. Abou Jieb and E. Hossain, *Photovoltaic Systems: Fundamentals and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-89780-2.
- [12]. S. Prayogi, F. Silviana, and Z. Zainuddin, “Peningkatan Performa Sel Surya Dengan Sistem Peredam Panas,” *JJEEE*, vol. 5, no. 2, pp. 143–147, Jul. 2023, doi: 10.37905/jjee.v5i2.18802.
- [13]. S. R. Wenham, Ed., *Applied photovoltaics*, 3rd ed. London ; New York: Earthscan, 2012.
- [14]. Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind* (5th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [15]. S. Motahhir and A. M. Eltamaly, Eds., *Advanced Technologies for Solar Photovoltaics Energy Systems*. in *Green Energy and Technology*. Cham: Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-64565-6.
- [16]. Y. Hashim, “Design of Arduino-Based Dual Axis Solar Tracking System,” *Journal on Advanced Research in Electrical Engineering (JAREE)*, vol. 4, no. 2, pp. 129–138, Oct. 2020, doi: 10.12962/j25796216.v4.i2.162.
- [17]. S. Amely Jumaat *et al.*, “Horizontal Single Axis Solar Tracker Using Arduino Approach,” *JJECS*, vol. 12, no. 2, p. 489, Nov. 2018, doi: 10.11591/ijeecs.v12.i2.pp489-496.
- [18]. F. Rozie, Y. Chandra, and I. Suwanda, “Monitoring Konsumsi Energi LPJU Panel Surya Berbasis LoRa dengan Fuzy Inference System Energy Consumption Monitoring of Solar-Powered Street Lighting Using LoRa and Fuzzy Inference System,” *JJEEE*, vol. 7, no. 1, 2025.
- [19]. A. Kusmantoro and I. Farikhah, “Power Flow Regulation of PLTS and Genset in Residential Using PLC Zelio,” *JJEEE*, vol. 7, no. 1, pp. 82–88, Jan. 2025, doi: 10.37905/jjee.v7i1.28308.