J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin
ISSN: 2528-6382 (print), 2541-3562 (online)
http://ejurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/J-Proteksion
Received date:30-06-2026 *Revised date: 12-08-2026* *Accepted date:18-08-2026*

Analisis Eksperimental Performa Panel Surya 50 Wp menggunakan *Solar tracker dual-axis* dan Panel Tetap dengan Berbagai Sudut Kemiringan

Experimental Comparison of the Performance of a 50 Wp Photovoltaic Panel Using a Dual-axis Solar tracker and a Fixed-Tilt Panel at Various Tilt Angles

Nurlaila Rajabiah[1,a)], Asroni[1], Tino Aldi Kusuma[1]
[1]Jurusan Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Metro
[a)]*Corresponding author*: lailams8990@gmail.com

Abstrak

Kebutuhan energi dan isu lingkungan mendorong pemanfaatan energi surya, namun kinerjanya dipengaruhi posisi matahari dan sudut kemiringan, sementara studi komparatif masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis performa panel surya 50 Wp menggunakan *solar tracker dual-axis* dan panel tetap dengan berbagai sudut kemiringan berdasarkan parameter tegangan, arus, daya keluaran, energi listrik, dan efisiensi konversi energi. Metode yang digunakan adalah eksperimen lapangan selama lima hari pengujian dengan pengukuran parameter listrik secara berkala pada kedua sistem. Efisiensi panel (μ) dihitung menggunakan persamaan μ=(P/(GxA))x100%, dengan (P) sebagai daya keluaran, (G) sebagai intensitas radiasi matahari yang diukur pada waktu yang sama, dan (A) sebagai luas permukaan panel surya monokristalin 50 Wp sebesar 0,27 m². Hasil penelitian menunjukkan bahwa panel surya dengan *solar tracker dual-axis* menghasilkan daya rata-rata sebesar 9,46 W, lebih tinggi dibandingkan panel tetap sebesar 5,34 W. Efisiensi sistem *solar tracker* mencapai 3,79%, sedangkan panel tetap sebesar 1,90%, dengan peningkatan efisiensi sekitar 1,89%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *solar tracker dual-axis* lebih efektif dalam meningkatkan performa dan efisiensi panel surya dibandingkan panel tetap dengan variasi sudut kemiringan, sehingga berpotensi mendukung pengembangan teknologi *green energy* secara berkelanjutan

Kata Kunci: panel fotovoltaik; *solar tracker dual-axis*; sudut kemiringan; daya keluaran; efisiensi

Abstract

Growing energy demand and environmental concerns have accelerated the adoption of solar energy as a sustainable renewable energy source. However, the performance of photovoltaic (PV) panels is significantly influenced by the sun's position and the panel tilt angle, while comparative studies remain limited. This study aims to analyze the performance of a 50 Wp photovoltaic panel using a dual-axis solar tracker and a fixed-tilt panel with various tilt angles based on voltage, current, output power, electrical energy, and energy conversion efficiency. An experimental field method was conducted over five consecutive days, during which electrical parameters were measured periodically for both systems. Panel efficiency (μ) was calculated using the equation μ=(P/(GxA))x100%, with (P) as the output power, (G) as the solar radiation intensity measured at the same time, and (A) as the surface area of a 50 Wp monocrystalline solar panel of 0.27 m². The results indicate that the dual-axis solar tracker achieved an average output power of 9,46 W, outperforming the fixed-tilt panel, which produced 5,34 W. The dual-axis solar tracker also achieved an energy conversion efficiency of 3,79%, compared with 1,89% for the fixed-tilt panel, representing an efficiency improvement of approximately 1,89%. These findings demonstrate that the dual-axis solar tracker is more effective in enhancing the performance and efficiency of photovoltaic panels than a fixed-tilt panel with various tilt angles, highlighting its potential to support the sustainable development of green energy technologies.

Keywords: *photovoltaic panel; dual-axis solar tracker; tilt angle; output power; energy efficiency*

PENDAHULUAN

Transisi energi global menuju sistem energi rendah karbon telah mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan secara masif, terutama energi surya fotovoltaik (PV) yang memiliki ketersediaan melimpah, ramah lingkungan [1]. Dalam beberapa tahun terakhir, peningkatan kapasitas terpasang sistem PV dunia menunjukkan tren yang sangat signifikan seiring meningkatnya kebutuhan energi bersih dan target net-*zero emission* berbagai negara [2]. Namun demikian, salah satu tantangan utama teknologi PV adalah rendahnya efisiensi konversi energi akibat perubahan posisi matahari sepanjang hari sehingga sudut datang radiasi matahari terhadap permukaan panel tidak selalu optimal [3], [5]. Kondisi tersebut menyebabkan energi yang diterima panel berkurang dan berdampak langsung terhadap penurunan tegangan, arus, daya keluaran, serta energi listrik yang dihasilkan [4], [6].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa orientasi dan sudut kemiringan panel surya merupakan faktor yang sangat menentukan performa sistem PV [5]–[8]. Panel yang dipasang pada sudut kemiringan tertentu dapat menghasilkan energi yang berbeda meskipun berada pada lokasi dan kondisi iradiasi yang sama [7], [8]. Penentuan sudut kemiringan optimum bertujuan untuk memaksimalkan penerimaan radiasi matahari sehingga meningkatkan efisiensi sistem [6]. Beberapa studi melaporkan bahwa variasi sudut kemiringan antara 10° hingga 45° dapat menghasilkan perbedaan energi harian sebesar 5–20% tergantung kondisi geografis dan musim [7], [9]. Oleh karena itu, optimasi sudut kemiringan masih menjadi topik penelitian yang relevan khususnya untuk sistem PV skala kecil hingga menengah.

Selain optimasi sudut kemiringan, penerapan solar *tracker* menjadi solusi yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan penerimaan radiasi matahari secara dinamis [3], [10], [11]. Solar *tracker* memungkinkan panel surya bergerak mengikuti lintasan matahari sehingga sudut datang radiasi dapat dipertahankan mendekati tegak lurus sepanjang waktu [10]. Berdasarkan derajat kebebasannya, sistem tracking dibedakan menjadi *Single-axis* dan *dual-axis tracker* [3], [11]. *Single-axis tracker* hanya mengikuti satu arah pergerakan matahari, sedangkan *dual-axis tracker* mampu mengikuti perubahan azimut dan elevasi secara simultan sehingga menghasilkan akurasi pelacakan yang lebih tinggi [3], [12].

Penelitian terkini menunjukkan bahwa *dual-axis* solar *tracker* mampu meningkatkan energi keluaran panel surya dibandingkan sistem panel tetap (fixed panel). Yang dan Xiao [3] melaporkan peningkatan energi listrik sebesar 26–41% dibanding panel tetap tergantung kondisi operasi dan algoritma pengendalian. Shang dan Shen [11] menunjukkan bahwa *dual-axis tracker* mampu menghasilkan radiasi matahari yang diterima lebih tinggi dibanding panel tetap dengan sudut 30°. Moldovan dkk. [12] menemukan peningkatan produksi energi tahunan pada berbagai jenis modul PV yang dipasang pada platform *dual-axis tracker* dibandingkan sistem *fixed mounting*. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Utomo dkk. [13] yang menunjukkan peningkatan performa sistem PV ketika dikombinasikan dengan *dual-axis tracking*.

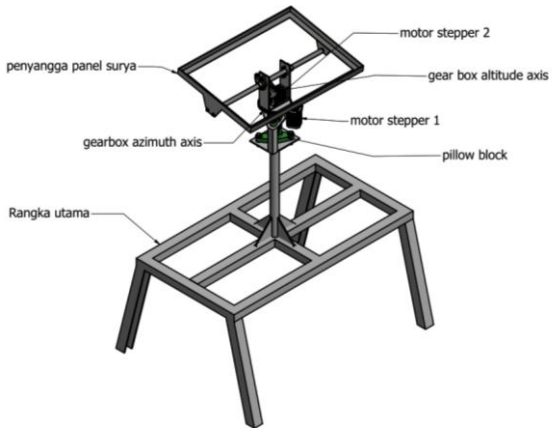
Meskipun penelitian mengenai solar *tracker* telah berkembang pesat, sebagian besar studi masih berfokus pada perbandingan antara panel tetap dan panel dengan *tracker* pada satu sudut kemiringan tertentu, umumnya 25°, 30°, atau mengikuti lintang lokasi penelitian [11]–[15]. Studi oleh Shang dan Shen [11] menggunakan panel tetap dengan sudut 30° sebagai pembanding. Moldovan dkk. [12] membandingkan performa panel tetap dan *dual-axis tracker* tanpa mengevaluasi pengaruh beberapa variasi sudut kemiringan panel tetap secara bersamaan. Penelitian Thungsuk dkk. [14] mengevaluasi sistem tracking berdasarkan posisi pelacakan tetapi tidak mengkaji variasi sudut kemiringan panel tetap secara komprehensif. Dengan demikian, informasi mengenai hubungan antara performa *dual-axis tracker* dan panel tetap pada berbagai sudut kemiringan masih terbatas.

Berdasarkan telaah literatur lima tahun terakhir parameter yang dianalisis umumnya terbatas pada daya atau energi keluaran saja [13]. Sangat sedikit penelitian yang secara simultan mengevaluasi tegangan, arus, daya, energi, dan efisiensi pada sistem *dual-axis tracker* dibandingkan panel tetap dengan beberapa variasi sudut kemiringan berbeda. Keterbatasan ini menyebabkan belum tersedianya data eksperimental yang mampu menjelaskan secara kuantitatif bagaimana perubahan sudut kemiringan panel tetap memengaruhi selisih performa terhadap *dual-axis tracker*. Secara khusus, penelitian yang menggunakan panel surya berkapasitas kecil 50 Wp masih relatif terbatas dibandingkan penelitian pada sistem PV skala besar [16]. Padahal panel 50 Wp banyak digunakan pada aplikasi rumah tangga, sistem penerangan mandiri, laboratorium pendidikan, serta sistem energi terbarukan skala komunitas. Informasi mengenai peningkatan performa yang dapat diperoleh dari penerapan *dual-axis tracker* pada panel 50 Wp sangat penting sebagai dasar pertimbangan teknis dan ekonomis dalam implementasi sistem PV skala kecil.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis eksperimental performa panel surya 50 Wp menggunakan solar *tracker dual-axis* dan panel tetap dengan berbagai sudut kemiringan 0°, 15°, 30°, dan 45°. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menggunakan satu sudut referensi panel tetap, penelitian ini mengevaluasi secara simultan pengaruh variasi sudut kemiringan terhadap parameter tegangan, arus, daya, energi listrik, dan efisiensi sistem. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengisi kesenjangan penelitian (*research gap*) terkait perbandingan kuantitatif antara *dual-axis tracker* dan panel tetap pada beberapa konfigurasi sudut kemiringan sekaligus serta memberikan rekomendasi teknis yang lebih komprehensif untuk optimalisasi sistem PV skala kecil.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan metode eksperimen melalui pengujian dan perbandingan performa panel surya monokristalin berkapasitas 50 Wp pada kondisi menggunakan solar *tracker* dan kondisi pemasangan tetap. Kegiatan pengambilan data dilakukan di Desa Nampirejo, Kecamatan Batanghari, Lampung Timur selama lima hari pengamatan berturut-turut. Sistem yang digunakan terdiri atas panel surya monokristalin berkapasitas 50 Wp dengan spesifikasi tegangan rangkaian terbuka (Voc) sebesar 21,6 V, arus hubung singkat (Isc) sebesar 3,26 A, tegangan maksimum (Vmp) sebesar 17,2 V, arus maksimum (Imp) 2,91 A, dan luas efektif panel sebesar 0,27 m². Energi listrik yang dihasilkan panel disalurkan melalui Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM 12 A untuk mengatur proses pengisian baterai VRLA 12 V 20 Ah, sebelum setiap pengujian agar kondisi pengujian tetap seragam. Beban yang digunakan selama pengujian berupa beban resistif DC sebesar 20 W yang dipertahankan konstan pada setiap pengambilan data. Sistem *solar tracker dual-axis* dikendalikan oleh *Arduino Uno* dengan memanfaatkan empat sensor Light *Dependent* Resistor (LDR) yang disusun secara kuadran sebagai pendeteksi arah datangnya cahaya matahari. Pergerakan panel dilakukan menggunakan dua motor *stepper* NEMA 23 pada sumbu azimut dan elevasi yang dikendalikan melalui *driver* motor. Algoritma pelacakan yang diterapkan menggunakan metode *light-seeking*, yaitu membandingkan intensitas cahaya yang diterima masing-masing sensor LDR. Apabila selisih intensitas melebihi nilai ambang (*threshold*), aktuator akan menggerakkan panel hingga selisih pembacaan sensor berada pada rentang toleransi sehingga posisi panel kembali tegak lurus terhadap arah datang sinar matahari. Konsumsi daya sistem *solar tracker*, yang meliputi mikrokontroler, sensor, driver motor, dan aktuator selama proses pelacakan, berkisar 3–5 W, sehingga tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap daya keluaran panel selama pengujian. Pengukuran dilakukan secara berkala setiap 30 menit dari pukul 09.00 sampai dengan 15.00 WIB untuk memperoleh karakteristik keluaran panel surya pada kedua metode pemasangan yang diuji.

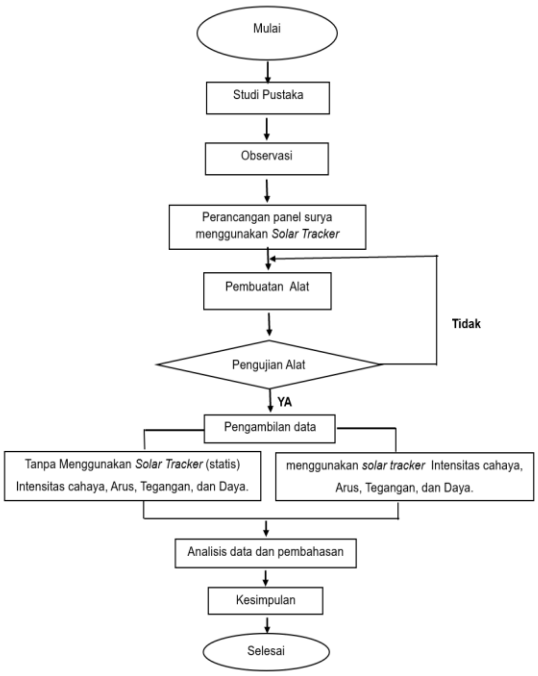


Gambar 1. Desain Panel Surya

Sistem pengujian yang digunakan terdiri atas panel surya (Gambar 1) monokristalin 50 Wp, mekanisme *dual-axis* solar *tracker*, baterai, solar charge controller (SCC), inverter, *mikrokontroler* Arduino, dan sensor cahaya sebagai komponen utama. Pengukuran parameter penelitian dilakukan menggunakan multimeter digital, power meter, dan *pyranometer* untuk memperoleh data keluaran listrik serta intensitas radiasi matahari secara akurat.

Berdasarkan Gambar 2 Variabel penelitian dibedakan menjadi variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Variabel bebas berupa metode pemasangan panel surya, yaitu menggunakan sistem solar *tracker* dan sistem statis. Variabel terikat meliputi tegangan, arus, daya, dan energi listrik yang dihasilkan panel surya. Adapun variabel kontrol mencakup kapasitas panel surya, lokasi penelitian, jadwal pengukuran, iradiasi, suhu modul, suhu udara, angin, dan cuaca untuk menjamin validitas hasil perbandingan.

Analisis data dilakukan dengan menghitung daya keluaran berdasarkan hubungan antara tegangan dan arus listrik. Efisiensi sistem dihitung dengan membandingkan daya *output* berbanding dengan daya *input* dengan mengalikan antara iradiasi cahaya dengan luas permukaan panel surya.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Karakteristik Tegangan, Arus, Daya, dan Energi pada Panel Surya

Karakteristik listrik panel monokristalin umumnya direpresentasikan dengan menunjukkan hubungan antara arus dan tegangan keluaran panel pada kondisi operasi tertentu, sedangkan kurva P–V menggambarkan variasi daya yang dihasilkan terhadap perubahan tegangan [17]. Titik operasi optimum panel surya dikenal sebagai *Maximum Power Point* (MPP), yaitu kondisi ketika hasil perkalian tegangan dan arus mencapai nilai maksimum.

Daya listrik keluaran panel surya dapat dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$P = V \times I \quad (1)$$

dengan:
P = daya listrik (W)
V = tegangan (V)
I = arus (A)

Energi listrik dihitung berdasarkan integrasi daya terhadap waktu. Karena daya keluaran panel berubah pada setiap interval pengukuran 30 menit, perhitungan energi dilakukan menggunakan integrasi numerik metode trapesium sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$E = \sum_{i=1}^{n-1}\left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2}\right)\Delta t \quad (2)$$

dengan E adalah energi listrik (Wh), Pi dan Pi+1 adalah daya keluaran pada dua titik pengukuran berturut-turut (W), dan Δt adalah interval waktu pengukuran sebesar 0,5 jam. Metode ini digunakan untuk memperhitungkan perubahan daya panel pada setiap interval pengukuran selama periode pengujian.

Dalam sistem PV, energi listrik yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh durasi penyinaran efektif dan jumlah radiasi yang diterima permukaan panel [18]. Oleh karena itu, peningkatan penerimaan radiasi matahari menjadi salah satu strategi utama dalam optimasi performa sistem fotovoltaik.

Sudut Kemiringan Panel Surya

Sudut kemiringan (*tilt angle*) merupakan sudut antara permukaan panel surya terhadap bidang horizontal. Penentuan sudut kemiringan yang tepat bertujuan untuk memaksimalkan jumlah radiasi matahari yang diterima permukaan panel sepanjang periode operasi [19]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sudut kemiringan optimum berbeda untuk setiap lokasi geografis karena dipengaruhi oleh lintang wilayah, kondisi atmosfer, dan karakteristik lintasan matahari [20].

Pada wilayah tropis seperti Indonesia, sudut kemiringan panel umumnya berada pada rentang 0°–30° untuk memperoleh energi tahunan yang optimal. Namun demikian, beberapa penelitian melaporkan bahwa sudut yang berbeda dapat memberikan performa lebih baik pada waktu atau musim tertentu [21]. Oleh karena itu, evaluasi beberapa variasi sudut kemiringan menjadi penting untuk menentukan konfigurasi pemasangan yang paling efektif.

Perubahan sudut kemiringan panel dapat menghasilkan perbedaan energi keluaran hingga lebih dari 15% pada kondisi iradiasi yang sama [22]. Hasil tersebut menunjukkan bahwa optimasi sudut kemiringan merupakan parameter penting dalam peningkatan performa sistem PV tanpa memerlukan tambahan komponen mekanik yang kompleks.

Dalam penelitian ini digunakan variasi sudut kemiringan 0°, 15°, 30°, dan 45° sebagai representasi konfigurasi yang umum digunakan pada instalasi panel surya skala kecil.

***Solar Tracker* Dua Sumbu**

Solar tracker adalah perangkat yang menggabungkan mekanisme gerak dan sistem kendali untuk menyesuaikan orientasi panel surya berdasarkan pergerakan matahari. Dengan demikian, panel dapat menerima radiasi matahari pada sudut yang mendekati tegak lurus selama periode penyinaran [23]. Penggunaan solar *tracker* bertujuan meningkatkan energi yang diterima panel dan memperbesar produksi listrik dibandingkan sistem panel tetap.

Berdasarkan jumlah sumbu geraknya, solar *tracker* dibedakan menjadi *Single-axis* dan *dual-axis tracker*. *Single-axis tracker* hanya bergerak pada satu sumbu rotasi, sedangkan *dual-axis tracker* mampu bergerak

pada sumbu azimut dan elevasi secara bersamaan [24]. Kemampuan tersebut memungkinkan panel mengikuti perubahan posisi matahari secara lebih akurat sehingga meningkatkan penerimaan radiasi sepanjang hari.

Menurut Yang dan Xiao, teknologi *dual-axis* solar *tracker* mampu meningkatkan energi keluaran sistem PV antara 20% hingga 45% dibandingkan sistem panel tetap tergantung lokasi geografis, musim, dan metode pengendalian yang digunakan [25]. Kajian serupa juga menunjukkan bahwa *dual-axis tracker* menghasilkan peningkatan penerimaan radiasi yang lebih tinggi dibandingkan *Single-axis tracker* karena mampu mengoreksi kesalahan orientasi pada dua arah sekaligus [26].

Moldovan dkk. melakukan pengujian lima jenis modul PV yang dipasang pada sistem tetap dan *dual-axis tracker* selama satu tahun penuh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh jenis modul mengalami peningkatan produksi energi ketika dipasang pada sistem *dual-axis* dibandingkan sistem tetap

Sistem Kendali dan Sensor pada Solar *Tracker*

Performa solar *tracker* sangat dipengaruhi oleh sistem kendali yang digunakan untuk menentukan posisi panel terhadap matahari. Secara umum terdapat dua pendekatan utama, yaitu sistem berbasis sensor (sensor-based tracking) dan sistem berbasis algoritma astronomi (sensorless tracking) [27].

Sistem berbasis sensor umumnya menggunakan Light Dependent Resistor (LDR), fotodioda, atau sensor cahaya lainnya untuk mendeteksi perbedaan intensitas cahaya pada beberapa titik pengukuran. Perbedaan sinyal yang diterima sensor digunakan sebagai dasar untuk menggerakkan aktuator menuju posisi optimum [28]. Metode ini memiliki keunggulan berupa biaya yang relatif rendah dan implementasi yang sederhana.

Sementara itu, sistem berbasis algoritma astronomi menentukan posisi panel berdasarkan data waktu, tanggal, koordinat geografis, serta model lintasan matahari. Metode ini mampu menghasilkan akurasi tinggi tanpa dipengaruhi kondisi bayangan atau gangguan lokal pada sensor cahaya [29].

Penggunaan mikrokontroler seperti Arduino, ESP32, dan PLC juga semakin banyak diterapkan pada sistem solar *tracker* karena mampu mengintegrasikan sensor, aktuator, serta sistem pemantauan data secara real-time [30], [31].

Efisiensi Sistem Fotovoltaik

Efisiensi panel surya menunjukkan kemampuan sistem dalam mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Efisiensi dapat dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$\mu = (Pout / (GxA)) \times 100\% \quad (3)$$

dengan:
η = efisiensi (%)
Pout = daya keluaran panel (W)
G = intensitas radiasi matahari (W/m²)
A = luas permukaan panel (m²)

Nilai efisiensi dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti temperatur modul, intensitas radiasi, sudut datang cahaya, kebersihan permukaan panel, serta konfigurasi pemasangan. Ketika sudut datang radiasi semakin mendekati tegak lurus terhadap permukaan panel, refleksi cahaya berkurang sehingga energi yang diserap sel surya meningkat [32].

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan *dual-axis tracker* mampu meningkatkan efisiensi sistem PV secara signifikan dibandingkan panel tetap karena memungkinkan penerimaan radiasi yang lebih optimal sepanjang hari [23], [25].

Penelitian mengenai optimasi performa panel surya umumnya dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu optimasi sudut kemiringan panel tetap dan penerapan solar *tracker* [19]. Sebagian besar penelitian terdahulu hanya membandingkan *dual-axis tracker* dengan satu konfigurasi sudut panel tetap atau hanya mengevaluasi parameter daya dan energi keluaran [25].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahapan awal analisis data dilakukan dengan mengonversi data mentah berupa hasil pengukuran tegangan (V) dan arus (I) menjadi besaran daya listrik (P), yang diperoleh melalui perkalian kedua parameter tersebut.

Tabel 1. Hasil Rata-Rata dengan Sistem Solar Tracker Hari ke 1-5

Hari Ke-	Intensitas Cahaya (W/m^2)	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (Watt)
1	1030	0,30	20,14	6.04
2	1146,92	0,31	21,14	6.55
3	888,23	1,34	17,98	24.09
4	786	0,26	18,31	4.76
5	922,07	0,30	19,53	5.86

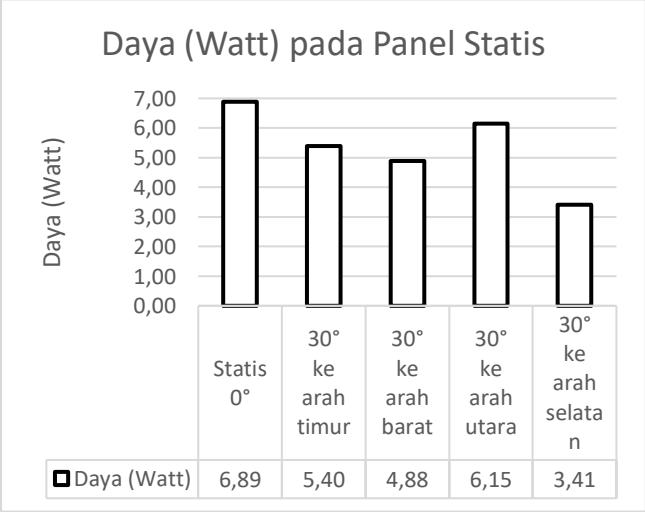
Hasil pengujian pada Tabel 1 yang dilakukan selama lima hari memperlihatkan adanya perbedaan kinerja antara panel surya yang dipasang secara statis dan panel surya yang dilengkapi dengan sistem solar *tracker*. Pada panel statis, baik dengan posisi sudut 0° maupun pada berbagai variasi arah pemasangan, nilai daya listrik yang dihasilkan cenderung mengalami fluktuasi yang lebih

besar karena dipengaruhi oleh perubahan posisi matahari terhadap orientasi panel.

Tabel 2. Hasil Rata-Rata Panel Surya Tanpa Sistem Solar *Tracker* Solar *Tracker* (Statis) Dengan Sudut Kemiringan 30° Pada Arah Kardinal (Utara, Selatan, Timur, Barat) Dan 0°

Arah sumbu	Intensitas Cahaya (W/m^2)	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (Watt)
Statis 0°	1149,23	0,32	21,53	6.89
30° ke arah timur	943,4	0,25	21,59	5.40
30° ke arah barat	975,46	0,26	18,77	4.88
30° ke arah utara	1123,84	0,29	21,20	6.15
30° ke arah selatan	988,61	0,16	21,31	3.41

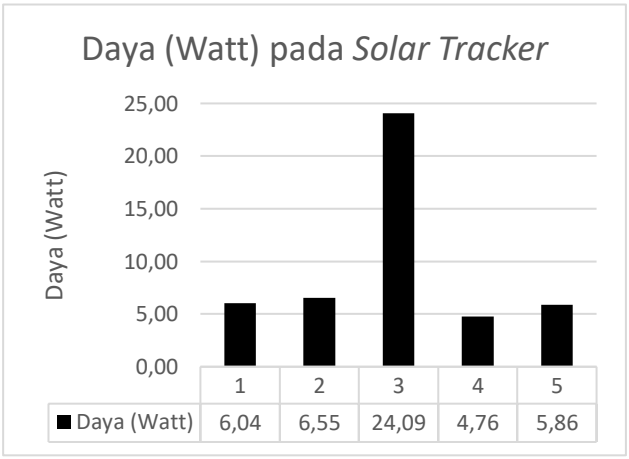
Berdasarkan Tabel 2 Nilai daya tertinggi pada sistem statis diperoleh pada hari pertama dengan sudut pemasangan 0°, yaitu sebesar 6,94 W, sedangkan nilai daya terendah tercatat pada hari kelima saat panel diarahkan 30° ke selatan, yaitu sebesar 3,58 W. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa orientasi dan kemiringan panel berperan penting dalam menentukan besarnya energi radiasi matahari yang dapat diserap, khususnya pada periode pagi dan sore hari ketika sudut datang sinar matahari berubah secara signifikan.



Gambar 3. Grafik Daya Panel Surya Statis Selama 5 Hari

Berbeda dengan sistem statis, pada Gambar 3 panel surya yang menggunakan solar *tracker* menghasilkan daya yang lebih stabil selama periode pengamatan. Nilai daya rata-rata yang diperoleh berada pada rentang 5,13 W hingga 6,69 W. Stabilitas ini terjadi karena sistem pelacak mampu menyesuaikan posisi panel secara otomatis mengikuti pergerakan matahari, sehingga sudut datang radiasi matahari terhadap permukaan panel tetap mendekati kondisi optimal.

Dengan demikian, energi surya yang diterima panel dapat dimanfaatkan secara lebih efektif. Meskipun pada hari pertama panel statis menghasilkan daya sedikit lebih tinggi dibandingkan panel dengan solar *tracker*, yaitu 6,94 W berbanding 6,25 W, kondisi tersebut dipengaruhi oleh posisi sudut panel statis yang kebetulan berada pada orientasi yang sangat sesuai terhadap arah datang sinar matahari pada saat pengukuran dilakukan. Namun demikian, secara keseluruhan rata-rata daya listrik yang dihasilkan sistem solar *tracker* tetap menunjukkan nilai yang lebih tinggi



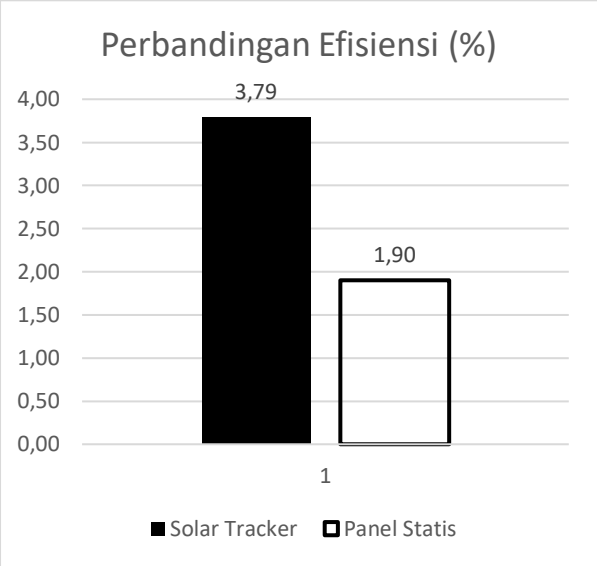
Gambar 4. Grafik Daya Panel Surya Dengan Sistem Solar *Tracker* Selama 5 Hari

Berdasarkan Gambar 4 Hasil analisis juga mengindikasikan bahwa penerapan solar *tracker* mampu meminimalkan penurunan daya yang umumnya terjadi akibat perubahan posisi matahari sepanjang hari. Kemampuan sistem dalam mempertahankan orientasi panel pada posisi yang lebih optimal menghasilkan keluaran daya yang lebih seragam serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi surya. Perbandingan karakteristik daya listrik antara panel surya statis dan panel surya dengan solar *tracker* dapat diamati pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Meskipun panel surya statis menawarkan keunggulan dari sisi kesederhanaan desain dan kemudahan instalasi, hasil penelitian mengindikasikan bahwa sistem solar *tracker* lebih efektif dalam mengoptimalkan penyerapan radiasi matahari. Kemampuan sistem pelacak dalam mempertahankan orientasi panel mendekati posisi optimal terhadap arah datang sinar matahari berkontribusi pada peningkatan kinerja energi yang dihasilkan.

Perhitungan efisiensi menunjukkan bahwa panel surya statis memiliki efisiensi sebesar 1,9%, sedangkan sistem yang dilengkapi solar *tracker* mencapai 3,79%.

Peningkatan efisiensi tersebut mengonfirmasi bahwa penggunaan solar *tracker* mampu memperbaiki pemanfaatan energi surya yang diterima panel. Perbandingan kinerja efisiensi antara kedua konfigurasi sistem dapat dilihat pada grafik perbandingan efisiensi panel surya yang ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Efisiensi Panel Surya Statis dan Solar *Tracker*.

Nilai tersebut menunjukkan adanya selisih efisiensi sebesar 1,89% antara panel surya statis dan panel surya yang dilengkapi sistem solar *tracker*. Perbedaan kinerja ini berkaitan erat dengan karakteristik penerimaan radiasi matahari pada masing-masing sistem. Pada panel surya statis, posisi modul tetap sepanjang hari sehingga sudut datang sinar matahari terhadap permukaan panel terus berubah dan tidak selalu berada pada kondisi tegak lurus. Kondisi tersebut menyebabkan intensitas radiasi yang diserap tidak maksimal, sehingga energi listrik yang dihasilkan menjadi lebih rendah dibandingkan potensi optimalnya. Sebaliknya, panel surya yang menggunakan solar *tracker* dapat menyesuaikan orientasinya mengikuti pergerakan matahari dari timur ke barat.

Kemampuan ini memungkinkan panel mempertahankan sudut penerimaan radiasi yang lebih ideal selama periode pengukuran, sehingga penyerapan energi surya meningkat dan menghasilkan daya keluaran serta efisiensi yang lebih tinggi. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya, seperti yang dilaporkan oleh Maysha et al. (2013), yang menyatakan bahwa penerapan solar *tracker* dapat meningkatkan efektivitas penyerapan energi matahari dibandingkan sistem panel statis. Meskipun peningkatan efisiensi yang diperoleh dalam penelitian ini hanya sebesar 0,15%, nilai tersebut tetap memberikan dampak yang berarti apabila diterapkan dalam jangka waktu operasional yang panjang karena berpotensi menghasilkan akumulasi energi listrik yang lebih besar.

Penelitian ini memiliki karakteristik yang berbeda dari berbagai studi terdahulu yang umumnya hanya membandingkan performa panel surya statis dan solar *tracker* single axis pada rentang kapasitas panel 20–100 Wp tanpa mempertimbangkan penerapan spesifik tertentu. Pada penelitian ini digunakan panel surya *monocrystalline* berkapasitas 50 Wp yang dipadukan dengan sistem solar *tracker dual axis*, sehingga mampu mengikuti pergerakan matahari secara lebih akurat pada sumbu horizontal maupun vertikal. Selain itu, pengujian panel statis dilakukan pada beberapa variasi orientasi, yaitu 0°, 30° ke arah Timur, Barat, Utara, dan Selatan. Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai pengaruh posisi dan orientasi panel terhadap kinerja sistem, sehingga hasil perbandingan yang diperoleh menjadi lebih komprehensif dan representatif.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan selama lima hari, panel surya monokristalin 50 Wp yang dilengkapi dengan sistem *solar tracker* menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan panel surya statis dalam menghasilkan daya dan energi listrik. Rata-rata daya keluaran yang dihasilkan oleh sistem *solar tracker* mencapai 9,46 W, sedangkan panel surya statis menghasilkan rata-rata daya sebesar 5,34 W. Hasil ini menunjukkan bahwa kemampuan *solar tracker* dalam menyesuaikan orientasi panel terhadap pergerakan matahari berkontribusi terhadap peningkatan pemanfaatan energi surya yang diterima oleh modul fotovoltaik.

Hasil pengukuran intensitas radiasi matahari menunjukkan adanya variasi nilai iradiasi pada setiap konfigurasi pengujian. Pada beberapa kondisi, panel statis dengan orientasi tertentu mampu menerima intensitas radiasi yang lebih tinggi dibandingkan sistem *solar tracker*. Namun demikian, sistem *solar tracker* mampu mempertahankan penerimaan radiasi yang lebih konsisten sepanjang periode pengamatan karena orientasi panel selalu mengikuti posisi matahari. Selama lima hari pengujian, rata-rata akumulasi iradiasi yang diterima sistem *solar tracker* tercatat sebesar 954,64 W/m², sedangkan panel statis sebesar 1036,11 W/m². Meskipun demikian, nilai daya keluaran yang dihasilkan *solar tracker* tetap lebih tinggi, yang mengindikasikan bahwa efektivitas konversi energi surya menjadi energi listrik tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya intensitas

radiasi yang diterima, tetapi juga oleh kesesuaian sudut datang radiasi terhadap permukaan panel.

Analisis efisiensi menunjukkan bahwa panel surya dengan sistem *solar tracker* memiliki efisiensi rata-rata sebesar 3,79%, lebih tinggi dibandingkan panel surya statis yang memiliki efisiensi sebesar 1,90%. Selisih efisiensi sebesar 1,89% mengindikasikan bahwa penerapan teknologi *solar tracker* mampu meningkatkan efektivitas konversi energi pada sistem fotovoltaik. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan *solar tracker*, khususnya pada panel surya monokristalin berkapasitas 50 Wp, merupakan pendekatan yang potensial untuk mengoptimalkan produksi energi listrik dari sumber energi surya. Dengan demikian, implementasi teknologi *solar tracker* dapat menjadi salah satu alternatif yang efektif dalam meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan serta mendukung pengembangan sistem energi yang berkelanjutan dan berorientasi pada konsep *green energy*.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan sistem *dual-axis* solar *tracker* berbasis kecerdasan buatan (AI) untuk optimasi sudut pelacakan secara adaptif serta mengintegrasikannya dengan sistem pendingin panel fotovoltaik (PV cooling) dan monitoring Internet of Things (IoT). Selain itu, pengujian perlu dilakukan dalam jangka waktu yang lebih panjang pada berbagai kondisi cuaca dan jenis modul fotovoltaik guna memperoleh evaluasi performa, efisiensi, dan keandalan sistem yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Hadi, I. Syaukani, H. Nuryadi, and P. I. Kencana, “Literature review: Metode evaluasi performa sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) di Indonesia,” *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 280–289, Jan. 2025, doi: 10.30596/rele.v8i1.22193.

[2] J. Fahmi, J. Windarta, and A. Y. Wardaya, “Studi awal penerapan distributed generation untuk optimalisasi PLTS atap on grid pada pelanggan PLN sistem Jawa Bali untuk memenuhi target EBT nasional,” *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 2, no. 1, pp. 1–13, 2021, doi: 10.14710/jebt.2021.10038..

[3] Z. Yang and Z. Xiao, "A Review of the Sustainable Development of Solar Photovoltaic Tracking System Technology," *Energies*, vol. 16, no. 23, p. 7768, 2023, doi: 10.3390/en16237768.

[4] A. K. Shukla, K. Sudhakar, and P. Baredar, "Recent advancement in solar photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 820–839, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.109872.

[5] M. A. A. Algarni, A. F. Al-Sulaiman, S. A. Al-Harbi, and Y. A. Al-Turki, "Optimization of photovoltaic tilt angle under varying climatic conditions," *Solar Energy*, vol. 255, pp. 112–124, 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.02.031.

[6] H. A. Kazem and M. T. Chaichan, "Effect of tilt angle on photovoltaic performance," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 310–321, 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.01.044.

[7] M. M. Rahman, M. S. Hossain, M. A. Rahman, and S. M. A. Motakabber, "Experimental investigation of PV tilt angle optimization," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 58, p. 103421, 2024, doi: 10.1016/j.seta.2024.103421.

[8] S. Kumar and R. Kumar, "Performance assessment of tilted photovoltaic modules," *Energy Conversion and Management*, vol. 286, p. 117032, 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117032.

[9] H. S. Bahaidarah, A. A. Al-Harthi, and M. A. Al-Hadhrami, "Impact of inclination angle on photovoltaic *energy* yield," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 51, p. 103614, 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.103614.

[10] U. Mamodiya and N. Tiwari, "Design and Implementation of Hardware-Implemented *Dual-axis* Solar Tracking System for Enhanced *Energy* Efficiency," *Engineering Proceedings*, vol. 59, no. 1, p. 122, 2023, doi: 10.3390/engproc2023059122.

[11] H. Shang and W. Shen, "Design and Implementation of a *Dual-axis* Solar Tracking System," *Energies*, vol. 16, no. 17, p. 6330, 2023, doi: 10.3390/en16176330.

[12] M. Moldovan, B. G. Burduhos, and I. Visa, "Efficiency Assessment of Five Types of Photovoltaic Modules Installed on a Fixed and on a *Dual-axis* Solar-Tracked Platform," *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1229, 2023, doi: 10.3390/en16031229.

[13] B. R. Utomo, A. Sulistyanto, T. W. B. Riyadi, and A. T. Wijayanta, "Enhanced Performance of Combined Photovoltaic–Thermoelectric Generator and Heat Sink Panels with a *Dual-axis tracking* System," *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2658, 2023, doi: 10.3390/en16062658.

[14] N. Thungsuk, S. Wongwises, N. Chaiyat, and P. Naphon, "Performance Analysis of Solar Tracking Systems by Five-Position Angles with a Single Axis and Dual Axis," *Energies*, vol. 16, no. 16, p. 5869, 2023, doi: 10.3390/en16165869.

[15] F. Badr, M. Abdelsalam, and A. El-Hameed,

"Performance assessment of a *dual-axis* solar *tracker* for concentrator photovoltaic systems," *International Journal of Energy Research*, vol. 46, no. 10, pp. 13424–13440, 2022, doi: 10.1002/er.8124.

[16] A. Jamroen, W. Boonchom, and T. Bunnang, "A low-cost intelligent *dual-axis* solar tracking system," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102122, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102122.

[17] A. Rezk, A. K. El-Said, and M. A. Hamdy, "I–V and P–V Characterization of Photovoltaic Modules," *Applied Energy*, vol. 346, p. 121435, 2023, doi: 10.1016/j.ap*energy*.2023.121435.

[18] H. Bahaidarah, M. H. Siddiqui, and M. Al-Hadhrami, "*Energy* Yield Assessment of Photovoltaic Systems," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 51, p. 103615, 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.103615.

[19] M. Algarni, A. Al-Sulaiman, and Y. Al-Turki, "Optimization of Photovoltaic Tilt Angle," *Solar Energy*, vol. 255, pp. 112–124, 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.02.031.

[20] H. Kazem and M. Chaichan, "Optimum Tilt Angle Determination of PV Systems," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 310–321, 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.01.044.

[21] R. Kumar, S. Kumar, and A. Kumar, "Influence of Tilt Angle on PV Performance," *Renewable Energy*, vol. 221, p. 119756, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2023.119756.

[22] M. M. Rahman, M. S. Hossain, and M. A. Rahman, "Experimental Investigation of PV Tilt Angle Optimization," *Sustainable Energy Technologies and Assessments (SETA)*, vol. 58, p. 103421, 2024, doi: 10.1016/j.seta.2024.103421.

[23] M. Moldovan, B. G. Burduhos, and I. Visa, "Efficiency Assessment of Five Types of Photovoltaic Modules Installed on a Fixed and on a *Dual-axis* Solar-Tracked Platform," *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1229, 2023, doi: 10.3390/en16031229.

[24] H. Shang and W. Shen, "Design and Implementation of a *Dual-axis* Solar Tracking System," *Energies*, vol. 16, no. 17, p. 6330, 2023, doi: 10.3390/en16176330.

[25] M. Mohamed-Abdulhussein and R. M. Mokhtar, "A Review of Solar Tracking Configuration and Optimization Algorithms for the Dual Axis Solar *Tracker* Systems," *ASEAN Engineering Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 45–58, 2024, doi: 10.11113/aej.v14.20986.

[26] A. Jamroen, W. Boonchom, and T. Bunnang, "A Low-Cost Intelligent *Dual-axis* Solar Tracking System," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102122, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102122.

[27] S. Sawant, P. N. Kulkarni, and A. V. Deshpande, "Design and Analysis of Automated Dual Axis Solar *Tracker* Based on Light Sensors," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 145, no. 4, p. 041007, 2023, doi: 10.1115/1.4056789.

[28] R. Jallal, S. El-Atillah, and A. El-Bakkali, "Deep Neural Network-Based Monitoring for *Dual-axis* Solar *Tracker*s," *Renewable Energy*, vol. 211, pp. 789–801, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.04.067.

[29] T. Kanwal, S. U. Rehman, T. Ali, K. Mahmood, S. G. Villar, L. A. D. Lopez, and I. Ashraf, "An Intelligent *Dual-axis* Solar Tracking System for Remote Weather Monitoring," *Agriculture*, vol. 13, no. 8, p. 1600, 2023, doi: 10.3390/agriculture13081600.

[30] F. J. Edas, N. Nachrowie, and Subairi, "Power Manajemen Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan SCADA," *Blend Sains Jurnal Teknik*, vol. 2, no. 4, pp. 298–302, 2024, doi: 10.56211/blendsains.v2i4.450.

[31] A. Derouich, A. El-Harouri, and M. Ouassaid, "Optimal Solar Tracking Systems: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 172, p. 113059, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2022.113059.

[32] D. Song, H. Yang, and J. Liu, "*Dual-axis* Solar Tracking Daylighting System Based on Optical Fiber Transmission," *Applied Energy*, vol. 362, p. 122998, 2024, doi: 10.1016/j.ap*energy*.2024.122998.

.