



Evaluasi Net Energy Gain Solar Tracker Single-axis Berbasis Relay pada Panel Surya 50 Wp

Afdal Syarif^{*}, La Baride¹, Haryani¹, La Atina²

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Dayanu Ikhsanuddin, Baubau

²Jurusan Teknik Informatika, Universitas Dayanu Ikhsanuddin, Baubau

Riwayat Artikel:

Diajukan: 11/06/2026
Diterima: 19/06/2026
Daring: 26/06/2026
Terbit: 30/06/2026

Kata Kunci:

Penjejak matahari
Relay mekanis
Panel fotovoltaik
Net energy gain
Energi surya

Keywords:

Solar tracker
Mechanical relay
Photovoltaic panel
Net energy gain
Solar energy

Abstrak

Kinerja panel surya dipengaruhi oleh perubahan posisi matahari yang menyebabkan sudut datang radiasi terhadap permukaan panel berubah sepanjang hari. Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan penerimaan radiasi matahari adalah penerapan *solar tracker*. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya hanya berfokus pada peningkatan daya dan energi keluaran tanpa mempertimbangkan konsumsi energi sistem penggerak. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja *solar tracker single-axis* berbasis relai mekanis pada panel surya 50 Wp berdasarkan peningkatan daya, energi listrik yang dihasilkan, serta keuntungan energi bersih (*net energy gain*). Pengujian dilakukan di Kelurahan Lamangga, Kota Baubau, Sulawesi Tenggara selama lima hari, yaitu pada tanggal 6–10 Agustus 2023 pukul 09.00–16.00 WITA. Parameter yang dianalisis meliputi daya keluaran, energi listrik harian, konsumsi energi aktuator, peningkatan energi, dan *net energy gain*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *solar tracker* meningkatkan daya keluaran rata-rata panel surya dari 17,71 W menjadi 22,45 W atau sebesar 26,92%. Energi listrik harian meningkat dari 134,68 Wh menjadi 170,64 Wh dengan tambahan energi sebesar 35,96 Wh per hari. Konsumsi energi aktuator tercatat sebesar 15,30 Wh per hari sehingga sistem masih menghasilkan *net energy gain* sebesar 20,66 Wh per hari atau setara dengan 15,34%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *solar tracker single-axis* berbasis relai mekanis mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya secara efektif dengan sistem kendali yang sederhana dan biaya implementasi yang relatif rendah. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan periode pengamatan yang lebih panjang, pengukuran radiasi matahari secara langsung, serta membandingkan performa sistem dengan *solar tracker* berbasis mikrokontroler atau sistem *dual-axis* untuk memperoleh evaluasi yang lebih komprehensif.

Abstract

The performance of photovoltaic panels is affected by the apparent movement of the sun, which causes the angle of solar radiation incidence on the panel surface to change throughout the day. One method commonly used to increase solar radiation capture is the implementation of a solar tracking system. However, most previous studies have focused only on improvements in power output and energy production without considering the energy consumption of the tracking mechanism. This study aims to analyze the performance of a relay-based single-axis solar tracker applied to a 50 Wp photovoltaic panel in terms of power enhancement, energy generation, and net energy gain. The experiment was conducted in Lamangga Village, Baubau City, Southeast Sulawesi, Indonesia, for five days from August 6 to August 10, 2023, between 09:00 and 16:00 WITA. The analyzed parameters included output power, daily electrical energy, actuator energy consumption, energy gain, and net energy gain. The results showed that the solar tracker increased the average power output from 17.71 W to 22.45 W, representing an improvement of 26.92%. Daily electrical energy increased from 134.68 Wh to 170.64 Wh, resulting in an additional energy gain of 35.96 Wh per day. The actuator consumed 15.30 Wh per day, while the system still achieved a net energy gain of 20.66 Wh per day, equivalent to 15.34%. These findings indicate that the relay-based single-axis solar tracker effectively improves solar energy utilization while maintaining a simple control system and relatively low implementation cost. Future studies are recommended to employ longer observation periods, direct solar radiation measurements, and comparative evaluations with microcontroller-based or dual-axis solar tracking systems to obtain a more comprehensive assessment.

*Korespondensi: afdal@unidayan.ac.id



Pendahuluan

Kebutuhan energi dunia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan populasi, perkembangan industri, dan kemajuan teknologi. Di sisi lain, ketergantungan yang tinggi terhadap sumber energi fosil menimbulkan berbagai permasalahan, seperti keterbatasan cadangan energi, fluktuasi harga, serta peningkatan emisi gas rumah kaca yang berdampak terhadap lingkungan. Teknologi fotovoltaik mengalami perkembangan yang pesat dan diproyeksikan menjadi salah satu teknologi utama dalam transisi menuju sistem energi berkelanjutan [1]. Energi surya memiliki potensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan karena ketersediaannya yang melimpah dan ramah lingkungan [1]. Perkembangan teknologi fotovoltaik dalam beberapa dekade terakhir juga telah meningkatkan efisiensi serta menurunkan biaya investasi sistem pembangkit listrik tenaga surya sehingga penggunaannya semakin luas pada sektor rumah tangga, industri, maupun fasilitas publik [1]. Selain itu, negara-negara yang berada di wilayah tropis, termasuk Indonesia, memiliki potensi energi surya yang besar sepanjang tahun sehingga pemanfaatan teknologi fotovoltaik menjadi salah satu alternatif yang strategis dalam mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan [2].

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi energi surya yang sangat besar karena terletak di wilayah khatulistiwa dengan tingkat penyinaran matahari yang relatif stabil sepanjang tahun. Potensi energi surya nasional diperkirakan mencapai lebih dari 200 GWp, namun tingkat pemanfaatannya masih jauh lebih rendah dibandingkan potensi yang tersedia [2]. Dalam beberapa tahun terakhir, pemerintah Indonesia terus mendorong pengembangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sebagai bagian dari upaya peningkatan bauran energi baru terbarukan dan pengurangan ketergantungan terhadap energi fosil [2]. Seiring dengan meningkatnya penerapan teknologi fotovoltaik, perhatian tidak hanya tertuju pada peningkatan kapasitas pemasangan sistem, tetapi juga pada upaya optimalisasi kinerja panel surya agar energi listrik yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara lebih efektif. Oleh karena itu, berbagai faktor yang mempengaruhi performa sistem fotovoltaik perlu diperhatikan untuk memperoleh keluaran energi yang optimal sesuai dengan potensi radiasi matahari yang tersedia [3].

Kinerja sistem fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh besarnya radiasi matahari yang diterima permukaan panel surya. Salah satu faktor yang menentukan jumlah radiasi yang dapat diserap oleh panel adalah sudut datang sinar matahari (*angle of incidence*) terhadap permukaan modul fotovoltaik [4]. Semakin tegak lurus arah datang cahaya terhadap permukaan panel, semakin besar energi radiasi yang dapat diterima dan dikonversi menjadi energi listrik. Sebaliknya, perubahan posisi matahari sepanjang hari menyebabkan sudut datang cahaya terus berubah sehingga jumlah radiasi yang diterima panel juga mengalami fluktuasi [3],[4]. Pada sistem panel surya statis, orientasi dan sudut kemiringan panel ditetapkan pada posisi tertentu sehingga panel tidak selalu berada pada kondisi penerimaan radiasi maksimum. Akibatnya, potensi energi matahari yang tersedia tidak dapat dimanfaatkan secara optimal sepanjang periode penyinaran. Kondisi ini menjadi salah satu faktor yang menyebabkan keluaran daya dan energi panel surya statis mengalami penurunan pada waktu-waktu tertentu selama proses operasi [5],[6].

Upaya untuk mengatasi keterbatasan panel surya statis dalam menerima radiasi matahari, berbagai sistem *solar tracker* telah dikembangkan guna mempertahankan orientasi panel agar tetap mendekati posisi optimal terhadap pergerakan matahari [5],[7]. *Solar tracker* merupakan sistem yang dirancang untuk mengubah posisi panel surya secara otomatis sehingga sudut datang cahaya yang diterima panel dapat dipertahankan mendekati kondisi tegak lurus sepanjang periode penyinaran. Berdasarkan jumlah sumbu pergerakannya, *solar tracker* umumnya diklasifikasikan menjadi sistem *single-axis* dan *dual-axis* [5],[7]. Sistem *single-axis* mengikuti pergerakan matahari pada satu sumbu, sedangkan sistem *dual-axis* mampu mengikuti pergerakan matahari pada dua sumbu sehingga memberikan fleksibilitas orientasi yang lebih tinggi. Penerapan teknologi *solar tracker* bertujuan untuk meningkatkan penerimaan radiasi matahari oleh panel surya sehingga daya dan energi listrik yang dihasilkan dapat lebih optimal dibandingkan sistem panel surya statis [5],[8].

Berbagai penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa penerapan *solar tracker* mampu meningkatkan performa sistem fotovoltaik dibandingkan panel surya statis [7],[8]. Peningkatan tersebut diperoleh karena panel surya dapat mempertahankan orientasi yang lebih optimal terhadap arah datang radiasi matahari sepanjang hari. Beberapa penelitian melaporkan bahwa penggunaan sistem *single-axis tracker*, *dual-axis tracker*, maupun pengujian *tracker* manual dapat meningkatkan daya keluaran dan energi listrik yang dihasilkan dibandingkan sistem statis dengan besaran peningkatan yang bervariasi bergantung pada kondisi geografis, intensitas radiasi matahari, metode pengendalian, serta konfigurasi sistem yang digunakan [7],[8],[9]. Selain meningkatkan penerimaan radiasi matahari, teknologi *solar tracker* juga telah banyak dikembangkan melalui berbagai pendekatan pengendalian, mulai dari penggunaan sensor cahaya, mikrokontroler, hingga sistem berbasis *Internet of Things (IoT)* [10],[12]. Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *solar tracker* merupakan salah satu metode yang efektif untuk meningkatkan pemanfaatan energi surya pada sistem fotovoltaik [7],[8].

Meskipun berbagai penelitian telah membuktikan bahwa *solar tracker* mampu meningkatkan daya keluaran dan energi yang dihasilkan sistem fotovoltaik, sebagian besar evaluasi kinerja masih berfokus pada parameter keluaran seperti tegangan, arus, daya, efisiensi, dan energi listrik yang dihasilkan

panel surya [7],[8],[11],[12]. Pada banyak penelitian, peningkatan performa sistem umumnya dinilai berdasarkan selisih energi yang dihasilkan antara panel statis dan panel yang menggunakan *solar tracker*. Namun, pendekatan tersebut belum sepenuhnya menggambarkan kinerja aktual sistem karena konsumsi energi yang dibutuhkan oleh aktuator sebagai penggerak *solar tracker* sering kali tidak diperhitungkan dalam analisis [13]. Padahal, energi yang digunakan oleh sistem penggerak merupakan bagian dari total energi yang harus dikeluarkan selama proses pelacakan matahari. Akibatnya, peningkatan energi keluaran yang diperoleh belum tentu mencerminkan keuntungan energi bersih yang sesungguhnya. Oleh karena itu, evaluasi yang hanya berfokus pada peningkatan energi keluaran berpotensi menghasilkan interpretasi yang kurang komprehensif terhadap efektivitas sistem *solar tracker* [11],[13].

Berdasarkan tinjauan penelitian terdahulu, masih terdapat kebutuhan untuk mengembangkan pendekatan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap kinerja sistem *solar tracker*. Sebagian besar penelitian berfokus pada peningkatan daya dan energi keluaran tanpa mempertimbangkan konsumsi energi yang digunakan oleh sistem penggerak selama proses pelacakan matahari[13]. Selain itu, penelitian mengenai *solar tracker* sederhana berbasis relay mekanis masih relatif terbatas dibandingkan sistem yang menggunakan mikrokontroler, sensor cerdas, atau teknologi *IoT* [10],[12]. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian dalam aspek evaluasi keuntungan energi bersih (*net energy gain*), khususnya pada sistem *solar tracker* berbiaya rendah dengan mekanisme kendali yang sederhana. Selain itu, sebagian besar penelitian yang mengevaluasi *solar tracker* masih menggunakan indikator peningkatan daya atau energi keluaran sebagai parameter utama, sehingga informasi mengenai keuntungan energi bersih sistem setelah dikurangi konsumsi energi penggerak masih sangat terbatas[13]. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang tidak hanya membandingkan energi yang dihasilkan oleh panel surya statis dan dinamis, tetapi juga memperhitungkan konsumsi energi aktuator sehingga efektivitas sistem dapat dinilai berdasarkan keuntungan energi bersih yang diperoleh.

Berdasarkan latar belakang dan kesenjangan penelitian yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem *solar tracker* berbasis relai mekanis pada modul fotovoltaik 50 Wp dibandingkan dengan panel surya statis. Evaluasi dilakukan dengan menganalisis daya keluaran, energi yang dihasilkan, konsumsi energi aktuator, serta keuntungan energi bersih yang diperoleh selama periode pengamatan. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada penggunaan parameter keuntungan energi bersih (*net energy gain*) sebagai indikator utama evaluasi kinerja dengan memperhitungkan konsumsi energi aktuator, serta penerapan sistem *solar tracker single-axis* berbasis relai mekanis yang sederhana dan berbiaya rendah tanpa menggunakan mikrokontroler maupun sistem *IoT*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode evaluasi kinerja *solar tracker* sederhana berbiaya rendah serta menjadi referensi bagi penerapan sistem pelacakan matahari yang lebih efektif dan efisien pada aplikasi fotovoltaik skala kecil. Penulis meyakini bahwa penelitian mengenai evaluasi *net energy gain* pada *solar tracker single-axis* berbasis relai mekanis tanpa mikrokontroler masih sangat terbatas sehingga penelitian ini diharapkan dapat mengisi kesenjangan tersebut.

Metodologi

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Kelurahan Lamangga, Kecamatan Murhum, Kota Baubau, Provinsi Sulawesi Tenggara, Indonesia. Lokasi pengujian berada pada koordinat sekitar 5,60° LS dan 120° BT yang termasuk wilayah tropis dengan potensi radiasi matahari yang relatif tinggi sepanjang tahun. Pengujian dilakukan secara langsung di ruang terbuka untuk memperoleh paparan sinar matahari secara maksimal selama periode pengamatan. Pengambilan data dilakukan selama lima hari berturut-turut, yaitu pada tanggal 6 Agustus 2023 sampai dengan 10 Agustus 2023. Pengamatan dilaksanakan setiap hari mulai pukul 09.00 hingga 16.00 WITA. Selama periode pengujian dilakukan pengukuran tegangan, arus, daya, dan energi listrik yang dihasilkan oleh sistem panel surya statis dan sistem panel surya yang menggunakan *solar tracker* berbasis relai mekanis. Data yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menganalisis peningkatan energi yang dihasilkan serta keuntungan energi bersih setelah memperhitungkan konsumsi energi aktuator.

B. Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan sistem panel surya statis dan sistem panel surya dinamis yang dilengkapi dengan *solar tracker* berbasis relai mekanis. Beberapa alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Alat dan Bahan Penelitian

No	Alat/Bahan	Spesifikasi
1	Panel surya	TOR-50 WP, Pmax 50 W, Vmp 18 V, Imp 2,8 A, Voc 21,6 V, Isc 3,1 A
2	<i>Solar tracker</i>	Sistem pelacak matahari berbasis relai mekanis

No	Alat/Bahan	Spesifikasi
3	Aktuator linear	Stroke 18 inci, tegangan kerja 12 V DC
4	Relai	Digunakan sebagai pengendali arah gerak aktuator
5	Voltmeter digital	Pengukuran tegangan keluaran panel surya
6	Amperemeter digital	Pengukuran arus keluaran panel surya
7	Stopwatch/Jam digital	Pengaturan interval pengamatan
8	Beban listrik	Beban pengujian sistem panel surya

Panel surya yang digunakan merupakan modul fotovoltaik tipe TOR-50 Wp dengan daya nominal sebesar 50 Wp. Sistem *solar tracker* yang digunakan bekerja menggunakan mekanisme relai untuk mengendalikan aktuator linear sehingga panel surya dapat mengikuti perubahan posisi matahari selama periode pengamatan. Konfigurasi tersebut dipilih karena memiliki konstruksi yang sederhana, biaya implementasi yang relatif rendah, serta mudah diaplikasikan pada sistem fotovoltaik skala kecil.

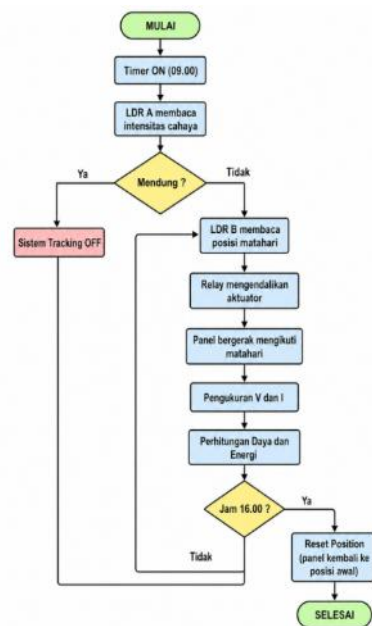
C. Rancangan Sistem Solar Tracker

Sistem *solar tracker* yang digunakan pada penelitian ini merupakan *solar tracker single-axis* berbasis relai mekanis yang dirancang untuk mengikuti pergerakan matahari dari timur ke barat. Pemilihan sistem *single-axis* didasarkan pada konstruksinya yang lebih sederhana, biaya implementasi yang lebih rendah, serta kebutuhan sistem kendali yang lebih sederhana dibandingkan *solar tracker dual-axis* [5],[6]. Sistem terdiri atas baterai 12 V DC, *digital timer switch*, dua modul *Light Dependent Resistor* (LDR), relai 8 kaki 12 V DC, aktuator linear 12 V DC, panel surya 50 WP, dan *solar charge controller* (SCC).

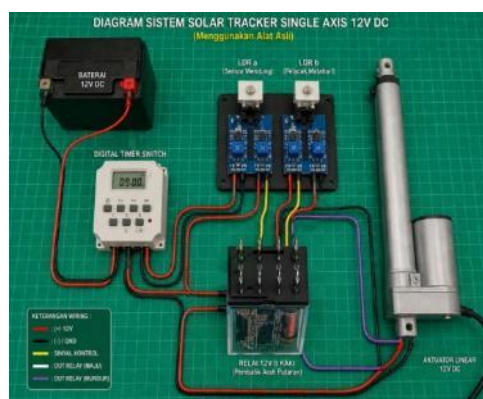
Sumber energi utama sistem berasal dari baterai 12 V DC yang mensuplai rangkaian kontrol dan aktuator. Energi listrik yang dihasilkan panel surya terlebih dahulu disalurkan ke baterai melalui *solar charge controller* (SCC) untuk proses pengisian dan pengaturan tegangan. Selanjutnya, energi dari baterai digunakan untuk mensuplai *digital timer switch*, modul LDR, relai, dan aktuator linear selama sistem beroperasi.

Digital timer switch digunakan untuk mengatur waktu operasi sistem sehingga *solar tracker* hanya aktif pada pukul 09.00–16.00. Pembatasan waktu operasi dilakukan untuk mengurangi konsumsi energi serta menyesuaikan periode efektif penerimaan radiasi matahari selama pengamatan. Modul LDR A berfungsi sebagai sensor kondisi cuaca. Sensor ini mendeteksi intensitas cahaya lingkungan untuk membedakan kondisi cerah dan mendung. Apabila intensitas cahaya berada di bawah nilai ambang yang telah ditentukan, maka suplai daya menuju modul LDR B akan diputus sehingga proses pelacakan matahari dihentikan. Mekanisme ini bertujuan mengurangi konsumsi energi yang tidak diperlukan ketika radiasi matahari rendah.

Modul LDR B berfungsi sebagai sensor pelacak matahari. Sensor ini membandingkan intensitas cahaya yang diterima pada kedua sisi sensor. Ketika terjadi perbedaan intensitas cahaya, modul menghasilkan sinyal kontrol yang diteruskan ke relai 8 kaki. Relai tersebut bekerja sebagai pembalik



Gambar 1. Diagram alir sistem solar tracker single-axis berbasis relai mekanis



Gambar 2. Diagram sistem solar tracker single-axis berbasis relai mekanis

polaritas tegangan pada aktuator linear sehingga aktuator dapat bergerak maju atau mundur mengikuti arah datang cahaya matahari.

Aktuator linear digunakan untuk mengubah sudut kemiringan panel surya sehingga posisi panel selalu mendekati tegak lurus terhadap arah datang sinar matahari. Penggunaan aktuator linear pada sistem pelacakan matahari telah banyak diterapkan karena mampu menghasilkan pergerakan yang stabil dan memiliki kemampuan menahan posisi panel selama proses operasi [12].

Selama periode operasi, sistem secara otomatis melakukan penyesuaian posisi panel sesuai perubahan arah datang cahaya matahari. Dengan mekanisme tersebut, panel surya dapat mempertahankan orientasi yang lebih optimal dibandingkan panel surya statis sehingga potensi penerimaan radiasi matahari dapat ditingkatkan [5],[7]. Pada pukul 16.00, *digital timer switch* memutuskan suplai daya ke sistem pelacakan dan mengaktifkan proses *reset* posisi panel. Relai pembalik polaritas mengarahkan aktuator linear kembali menuju posisi awal sehingga panel siap menerima radiasi matahari pada hari berikutnya. Diagram kerja sistem *solar tracker single-axis* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 2**.

D. Prosedur Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan prosedur yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Proses pengamatan berlangsung selama lima hari berturut-turut, yaitu tanggal 6–10 Agustus 2023. Pengamatan dilakukan setiap hari mulai pukul 09.00 hingga 16.00 WITA. Pada penelitian ini digunakan dua konfigurasi sistem panel surya, yaitu panel surya statis dan panel surya dinamis yang menggunakan *solar tracker single-axis*. Kedua sistem diuji pada kondisi lingkungan yang sama sehingga perbedaan keluaran energi yang diperoleh hanya dipengaruhi oleh metode penjejakan matahari.

Data yang diukur meliputi tegangan keluaran panel surya, arus keluaran panel surya, daya listrik sesaat, energi listrik harian, konsumsi energi aktuator, serta keuntungan energi bersih yang diperoleh sistem *solar tracker*. Pengukuran dilakukan secara periodik selama waktu pengamatan dan hasilnya direkapitulasi menjadi nilai rata-rata harian.

Data hasil pengukuran kemudian digunakan untuk menghitung daya rata-rata, energi harian, peningkatan energi, keuntungan energi bersih, dan rasio keuntungan energi bersih antara sistem panel surya statis dan dinamis.

E. Perhitungan dan Analisis Data

Data hasil pengukuran berupa tegangan dan arus keluaran panel surya digunakan untuk menghitung daya listrik yang dihasilkan oleh sistem panel surya statis dan sistem panel surya dinamis. Selanjutnya dilakukan perhitungan energi listrik harian, peningkatan energi, konsumsi energi aktuator, serta keuntungan energi bersih (*net energy gain*) untuk mengevaluasi kinerja sistem *solar tracker* yang dikembangkan.

1 Perhitungan Daya Keluaran Panel Surya

Daya keluaran panel surya dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan Persamaan (1).

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

dengan:

P : daya keluaran panel surya (W)
V : tegangan keluaran panel surya (V)
I : arus keluaran panel surya (A)

2 Perhitungan Energi Listrik Harian

Daya keluaran panel surya dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan Persamaan (1). Persamaan ini merupakan hubungan dasar antara tegangan dan arus yang umum digunakan dalam analisis sistem fotovoltaik

$$E = P \times t \quad (2)$$

dengan:

E : energi listrik (Wh)
P : daya rata-rata (W)
t : waktu operasi (jam)

3 Perhitungan Persentase Peningkatan Energi

Persentase peningkatan energi sistem *solar tracker* terhadap panel statis dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$\eta_{gain} = \left(\frac{(E_{tracker} - E_{statis})}{E_{statis}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

dengan:

η_{gain} : persentase peningkatan energi (%)
 $E_{tracker}$: energi sistem *solar tracker* (Wh)
 E_{statis} : energi sistem panel statis (Wh)

4 Perhitungan Konsumsi Energi Aktuator

Energi yang digunakan oleh aktuator selama proses pelacakan dihitung berdasarkan daya aktuator dan total waktu operasinya sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (4).

$$E_{aktuator} = P_{aktuator} \times t_{aktuator} \quad (4)$$

dengan:

$E_{aktuator}$: konsumsi energi aktuator (Wh)
 $P_{aktuator}$: daya aktuator (W)
 $t_{aktuator}$: total waktu kerja aktuator (jam)

5 Perhitungan Keuntungan Energi Bersih (Net Energy Gain)

Keuntungan energi bersih (*net energy gain*) merupakan selisih antara energi tambahan yang diperoleh dari sistem *solar tracker* dan energi yang dikonsumsi oleh aktuator selama proses pelacakan. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi manfaat energi aktual dari sistem *solar tracker* dengan mempertimbangkan konsumsi energi penggerakannya [13].

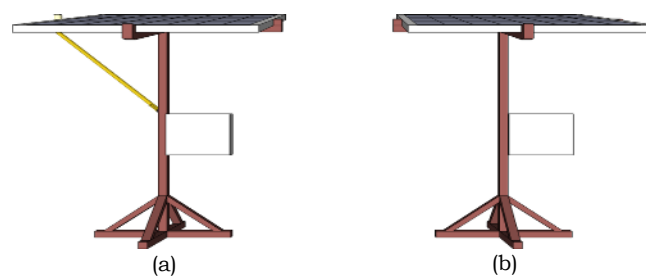
$$E_{net} = (E_{tracker} - E_{statis}) - E_{aktuator} \quad (5)$$

dengan:

E_{net} : keuntungan energi bersih (Wh)
 $E_{tracker}$: energi sistem *solar tracker* (Wh)
 E_{statis} : energi sistem panel statis (Wh)
 $E_{aktuator}$: energi yang digunakan aktuator (Wh)

6 Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan membandingkan daya rata-rata, energi listrik harian, persentase peningkatan energi, konsumsi energi aktuator, dan keuntungan energi bersih antara sistem panel surya statis dan sistem panel surya dinamis. Desain konstruksi sistem panel surya statis dan *solar tracker single-axis* yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3**. Selanjutnya Hasil perhitungan kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi pengaruh penggunaan *solar tracker single-axis* terhadap peningkatan kinerja panel surya 50 WP.



Gambar 3. Desain Konstruksi *solar tracker single-axis* (a) Dinamis dan (b) Statis

Hasil dan Pembahasan

A. Perbandingan Daya Keluaran

Hasil pengujian selama lima hari menunjukkan bahwa penggunaan sistem *solar tracker single-axis* berbasis relai mekanis mampu meningkatkan daya keluaran panel surya dibandingkan sistem panel surya statis. Berdasarkan hasil pengukuran, rata-rata daya keluaran panel surya statis sebesar 17,71 W, sedangkan panel surya dinamis menghasilkan rata-rata daya sebesar 22,45 W. Dengan demikian diperoleh peningkatan daya rata-rata sebesar 4,74 W atau sebesar 26,92%.

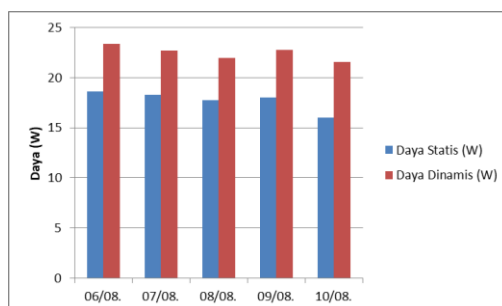
Peningkatan daya tersebut terjadi karena panel surya pada sistem dinamis mampu mempertahankan orientasi yang lebih mendekati tegak lurus terhadap arah datang radiasi matahari sepanjang periode pengamatan. Sebaliknya, pada sistem statis sudut datang cahaya terus berubah akibat pergerakan semu matahari sehingga energi radiasi yang diterima panel cenderung menurun terutama pada pagi dan sore hari. Kondisi ini menyebabkan panel surya statis tidak selalu menerima radiasi matahari pada sudut optimum sehingga daya keluaran yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan sistem yang menggunakan mekanisme pelacakan matahari [5].

Berdasarkan data pengamatan harian, peningkatan daya tertinggi terjadi pada tanggal 10 Agustus 2023 sebesar 34,72%, sedangkan peningkatan terendah terjadi pada tanggal 8 Agustus 2023 sebesar 23,70%. Variasi tersebut menunjukkan bahwa efektivitas sistem *solar tracker* dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan intensitas radiasi matahari harian. Pada kondisi cuaca cerah, sistem pelacakan mampu mempertahankan orientasi panel terhadap matahari secara lebih optimal sehingga peningkatan daya yang diperoleh menjadi lebih besar. Sebaliknya, pada kondisi radiasi matahari yang berfluktuasi akibat awan atau mendung, keuntungan yang diperoleh dari sistem pelacakan cenderung menurun. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Hafez dkk. [5] yang menyatakan bahwa sistem solar tracker mampu meningkatkan penerimaan radiasi matahari melalui penyesuaian orientasi panel terhadap pergerakan matahari. Temuan ini juga mendukung hasil kajian Efendi dkk. [7] yang melaporkan bahwa penggunaan *single-axis solar tracker* dapat meningkatkan efisiensi dan energi yang dihasilkan dibandingkan panel surya statis. Selain itu, penelitian Prasetyo dkk. [8] menunjukkan bahwa panel surya yang menggunakan *solar tracker* menghasilkan daya listrik yang lebih tinggi dibandingkan panel tanpa sistem pelacakan. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini juga sejalan dengan penelitian Ramful dan Soweruth [11] yang menunjukkan bahwa sistem *solar tracker* berbiaya rendah tetap mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya secara signifikan pada wilayah beriklim tropis.

Tabel 2 menunjukkan ringkasan perbandingan rata-rata daya keluaran antara sistem panel surya statis dan sistem panel surya dinamis selama periode pengujian.

Tabel 2. Perbandingan Rata-rata Daya Keluaran Sistem

Parameter	Nilai
Daya rata-rata panel statis	17,71 W
Daya rata-rata panel dinamis	22,45 W
Selisih daya	4,74 W
Peningkatan daya	26,92 %



Gambar 4. Perbandingan Daya Harian Panel Surya Statis dan Dinamis

Gambar 4 menunjukkan perbandingan daya rata-rata harian yang dihasilkan panel surya statis dan panel surya dinamis selama periode pengujian. Terlihat bahwa pada seluruh hari pengamatan, sistem panel surya dinamis menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan sistem panel surya statis. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme pelacakan matahari yang diterapkan mampu meningkatkan penerimaan radiasi matahari sehingga daya keluaran panel surya menjadi lebih besar.

B. Perbandingan Energi Harian Sistem Panel Surya

Selain meningkatkan daya keluaran sesaat, penggunaan *solar tracker* juga meningkatkan energi listrik harian yang dihasilkan panel surya. Selama lima hari pengamatan, energi rata-rata yang dihasilkan panel surya statis sebesar 134,68 Wh per hari, sedangkan panel surya dinamis menghasilkan energi rata-rata sebesar 170,64 Wh per hari. Dengan demikian, sistem *solar tracker single-axis* mampu menghasilkan tambahan energi sebesar 35,96 Wh per hari dibandingkan sistem panel surya statis.

Peningkatan energi tersebut menunjukkan bahwa mekanisme pelacakan matahari mampu mempertahankan orientasi panel surya pada posisi yang lebih optimal terhadap arah datang radiasi matahari selama periode operasi. Akibatnya, energi radiasi yang diterima panel surya menjadi lebih besar sehingga energi listrik yang dihasilkan juga meningkat. Berbeda dengan panel surya statis yang hanya bekerja pada sudut pemasangan tetap, sistem *solar tracker* secara kontinu menyesuaikan posisi panel mengikuti pergerakan matahari dari timur ke barat.

Berdasarkan data pengamatan harian yang ditunjukkan pada Tabel 4, peningkatan energi tertinggi terjadi pada tanggal 10 Agustus 2023 dengan selisih energi sebesar 41,62 Wh, sedangkan peningkatan energi terendah terjadi pada tanggal 8 Agustus 2023 sebesar 31,55 Wh. Variasi tersebut menunjukkan bahwa efektivitas sistem *solar tracker* dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan intensitas radiasi matahari selama pengujian. Pada saat cuaca cerah, panel surya memperoleh keuntungan yang lebih besar dari proses pelacakan karena mampu menerima radiasi matahari secara lebih optimal sepanjang hari.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Mamun dkk. [3] yang menunjukkan bahwa orientasi dan sudut penerimaan radiasi matahari berpengaruh langsung terhadap energi listrik yang dihasilkan panel surya. Temuan ini juga mendukung penelitian Zhang dkk. [4] yang menjelaskan bahwa sudut datang radiasi matahari merupakan salah satu faktor penting yang menentukan performa sistem fotovoltaik. Selain itu, hasil penelitian Efendi dkk. [7] menunjukkan bahwa penggunaan *single-axis solar tracker* mampu meningkatkan energi listrik yang dihasilkan dibandingkan sistem panel surya statis. Hasil penelitian Ramful dan Sowaruth [11] juga menunjukkan bahwa sistem *solar tracker* berbiaya rendah tetap mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya secara signifikan pada daerah beriklim tropis.

Tabel 3 menunjukkan perbandingan rata-rata energi harian yang dihasilkan oleh sistem panel surya statis dan sistem panel surya dinamis selama periode pengujian.

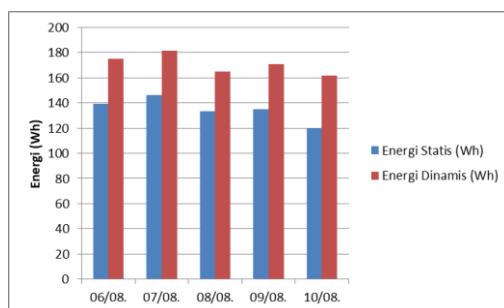
Tabel 3. Rata-rata Energi Harian Sistem

Parameter	Nilai
Energi panel statis	134,68 Wh
Energi panel dinamis	170,64 Wh
Selisih energi	35,96 Wh

Tabel 4. Rekap harian

Tanggal	Rata-rata Daya Statis (W)	Rata-rata Daya Dinamis (W)	Selisi h Daya (W)	Peningkatan (%)	Energi Statis (Wh)	Energi Dinamis (Wh)	Energi Aktuator (Wh)	Energi Dinamis Bersih (Wh)	Keuntungan Energi Bersih (Wh)	Rasio Keuntungan Energi Bersih (%)	Tambahan Energi (Energy Gain)
H1	18,5	23,3	4,7	25,7	139,3	175,2	15,3	159,9	20,6	14,8	35,9
H2	18,2	22,6	4,4	24,2	145,9	181,3	15,3	166,0	20,1	13,7	35,4
H3	17,7	21,9	4,2	23,7	133,1	164,6	15,3	149,3	16,2	12,2	31,5
H4	18,0	22,7	4,7	26,1	135,1	170,4	15,3	155,1	20,0	14,8	35,3
H5	15,9	21,5	5,5	34,7	119,8	161,4	15,3	146,1	26,3	21,9	41,6
Rerata	17,7	22,4	4,7	26,9	134,6	170,6	15,3	155,3	20,6	15,3	35,9

Gambar 5 menunjukkan perbandingan energi harian yang dihasilkan sistem panel surya statis dan sistem panel surya dinamis selama periode pengujian. Terlihat bahwa energi yang dihasilkan sistem panel surya dinamis selalu lebih tinggi dibandingkan sistem panel surya statis pada seluruh hari pengamatan. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme pelacakan matahari yang diterapkan mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya secara konsisten selama periode operasi sistem.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Energi Harian Panel Statis dan Dinamis

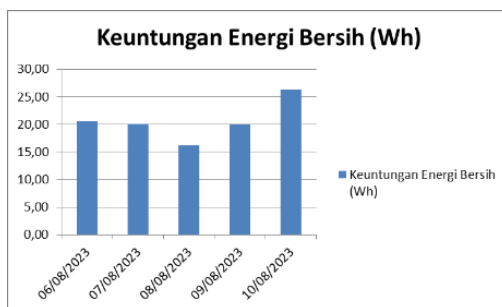
C. Analisis Konsumsi Energi Aktuator

Salah satu aspek yang sering diabaikan dalam penelitian *solar tracker* adalah konsumsi energi sistem penggerak yang digunakan untuk menggerakkan panel surya. Sebagian besar penelitian lebih berfokus pada peningkatan daya dan energi keluaran panel surya tanpa memperhitungkan energi yang

dibutuhkan oleh aktuator selama proses pelacakan. Padahal, energi yang dikonsumsi sistem penggerak akan memengaruhi keuntungan energi aktual yang diperoleh dari penerapan *solar tracker* [13]. Penelitian ini menggunakan aktuator linear sebagai sumber daya selama proses pelacakan dan proses *reset* posisi panel dihitung dan dimasukkan ke dalam evaluasi kinerja sistem. Berdasarkan hasil pengukuran, konsumsi energi aktuator relatif konstan selama periode pengamatan, yaitu sebesar 15,30 Wh per hari. Nilai tersebut diperoleh dari akumulasi energi yang digunakan aktuator untuk mengikuti pergerakan matahari selama periode operasi pukul 09.00–16.00 WITA serta energi yang dibutuhkan untuk mengembalikan panel ke posisi awal setelah pengujian selesai.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem *solar tracker* menghasilkan tambahan energi (*energy gain*) rata-rata sebesar 35,96 Wh per hari dibandingkan sistem panel surya statis. Dari jumlah tersebut, sebesar 15,30 Wh digunakan untuk mengoperasikan aktuator linear. Dengan demikian, konsumsi energi aktuator setara dengan sekitar 42,55% dari tambahan energi yang diperoleh sistem *solar tracker*. Meskipun sebagian energi tambahan digunakan untuk mengoperasikan aktuator, energi yang diperoleh dari proses pelacakan masih lebih besar dibandingkan energi yang dikonsumsi sistem penggerak. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan aktuator linear pada sistem yang dikembangkan tetap memberikan keuntungan energi yang positif terhadap sistem secara keseluruhan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Osman dkk. [13] yang menunjukkan bahwa evaluasi performa *solar tracker* tidak hanya perlu mempertimbangkan peningkatan energi keluaran panel surya, tetapi juga energi yang dikonsumsi oleh sistem pelacakan. Oleh karena itu, analisis konsumsi energi aktuator menjadi penting untuk memperoleh gambaran yang lebih realistis mengenai efektivitas sistem *solar tracker* yang dikembangkan.

Perbandingan antara tambahan energi yang diperoleh dari proses pelacakan matahari dan energi yang dikonsumsi aktuator, hubungan kedua parameter tersebut ditunjukkan pada **Gambar 6**. Berdasarkan **Gambar 6**, tambahan energi yang diperoleh sistem *solar tracker* sebesar 35,96 Wh per hari masih jauh lebih besar dibandingkan konsumsi energi aktuator sebesar 15,30 Wh per hari. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan aktuator linear pada sistem yang dikembangkan masih memberikan keuntungan energi yang positif sehingga penerapan sistem pelacakan matahari layak digunakan untuk meningkatkan pemanfaatan energi surya.



Gambar 6. Perbandingan Tambahan Energi dan Konsumsi Energi Aktuator

D. Analisis Keuntungan Energi Bersih (*Net Energy Gain*)

Keuntungan energi bersih (*net energy gain*) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi manfaat energi aktual yang diperoleh dari penggunaan *solar tracker*. Pada penelitian ini, *net energy gain* dihitung sebagai selisih antara tambahan energi yang diperoleh dari proses pelacakan matahari (*energy gain*) dan energi yang dikonsumsi aktuator selama proses pelacakan serta *reset* posisi panel. Dengan demikian, parameter ini tidak hanya memperhitungkan peningkatan energi keluaran panel surya, tetapi juga energi yang diperlukan untuk mengoperasikan sistem pelacakan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *solar tracker single-axis* berbasis relai mekanis menghasilkan tambahan energi (*energy gain*) rata-rata sebesar 35,96 Wh per hari dibandingkan sistem panel surya statis. Setelah dikurangi konsumsi energi aktuator sebesar 15,30 Wh per hari, diperoleh *net energy gain* rata-rata sebesar 20,66 Wh per hari. Nilai tersebut setara dengan rasio keuntungan energi bersih sebesar 15,34% terhadap energi yang dihasilkan sistem panel surya statis.

Berdasarkan hasil pengamatan harian pada **Tabel 4**, *net energy gain* tertinggi terjadi pada tanggal 10 Agustus 2023 sebesar 26,31 Wh, sedangkan nilai terendah terjadi pada tanggal 8 Agustus 2023 sebesar 16,25 Wh. Variasi tersebut dipengaruhi oleh perubahan kondisi cuaca dan intensitas radiasi matahari selama periode pengujian. Pada saat radiasi matahari tinggi, tambahan energi yang diperoleh dari proses pelacakan menjadi lebih besar sehingga keuntungan energi bersih yang dihasilkan juga meningkat.

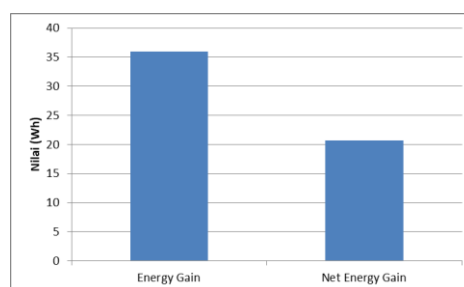
Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun sistem *solar tracker* mampu meningkatkan energi keluaran sebesar 26,92%, keuntungan energi aktual setelah memperhitungkan konsumsi energi aktuator menjadi 15,34%. Temuan ini menunjukkan bahwa evaluasi berbasis peningkatan daya atau energi keluaran saja belum cukup untuk menggambarkan efektivitas sistem secara menyeluruh. Dengan mempertimbangkan konsumsi energi sistem penggerak, parameter *net energy gain* mampu

memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai manfaat energi yang benar-benar diperoleh dari penerapan *solar tracker*.

Temuan penelitian ini sejalan dengan penelitian Osman dkk. [13] yang menunjukkan bahwa evaluasi kinerja *solar tracker* sebaiknya tidak hanya didasarkan pada peningkatan energi keluaran panel surya, tetapi juga mempertimbangkan energi yang dikonsumsi oleh sistem pelacakan selama operasi. Oleh karena itu, penggunaan parameter *net energy gain* pada penelitian ini memberikan pendekatan evaluasi yang lebih komprehensif dibandingkan metode yang hanya menggunakan indikator peningkatan daya atau energi keluaran panel surya. Ringkasan hasil utama penelitian ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Ringkasan Temuan Penelitian

Parameter	Nilai
Daya statis	17,71 W
Daya dinamis	22,45 W
Peningkatan daya	26,92 %
Energi statis	134,68 Wh
Energi dinamis	170,64 Wh
Tambahan energi (<i>Energy Gain</i>)	35,96 Wh
Energi aktuator	15,30 Wh
<i>Net Energy Gain</i>	20,66 Wh
Rasio keuntungan bersih	15,34 %



Gambar 7. Grafik Keuntungan Energi Bersih Harian

Berdasarkan **Gambar 7**, terlihat bahwa sebagian energi tambahan yang diperoleh dari proses pelacakan digunakan untuk mengoperasikan aktuator. Meskipun demikian, sistem masih menghasilkan *net energy gain* positif sebesar 20,66 Wh per hari. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan sistem *solar tracker single-axis* berbasis relai mekanis tetap memberikan manfaat energi yang nyata dibandingkan sistem panel surya statis.

E. Implikasi Hasil Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *solar tracker single-axis* berbasis relai mekanis mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya secara efektif dengan konstruksi yang sederhana dan biaya implementasi yang relatif rendah. Sistem yang dikembangkan tidak memerlukan mikrokontroler seperti *Arduino* maupun *ESP32* sehingga proses perancangan, pengoperasian, dan pemeliharaan sistem menjadi lebih sederhana dibandingkan sistem *solar tracker* berbasis kendali digital yang lebih kompleks. Karakteristik tersebut menjadikan sistem ini berpotensi diterapkan pada instalasi fotovoltaik skala kecil yang membutuhkan biaya investasi dan perawatan yang relatif rendah.

Penggunaan sensor cuaca berbasis LDR untuk menghentikan proses pelacakan saat kondisi mendung serta fitur *reset* posisi otomatis menggunakan *digital timer switch* juga memberikan keuntungan operasional. Mekanisme tersebut membantu mengurangi pergerakan aktuator yang tidak diperlukan sehingga konsumsi energi sistem dapat ditekan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun aktuator mengonsumsi energi sebesar 15,30 Wh per hari, sistem masih mampu menghasilkan *net energy gain* sebesar 20,66 Wh per hari. Temuan ini menunjukkan bahwa energi tambahan yang diperoleh dari proses pelacakan masih lebih besar dibandingkan energi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem penggerak. Selain menunjukkan peningkatan daya dan energi keluaran panel surya, penelitian ini menegaskan pentingnya penggunaan parameter *net energy gain* dalam evaluasi kinerja *solar tracker*. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada peningkatan daya atau

energi keluaran panel surya, sedangkan penelitian ini juga mempertimbangkan konsumsi energi aktuator sehingga manfaat energi aktual dari sistem dapat dievaluasi secara lebih komprehensif [13].

Temuan penelitian ini sejalan dengan penelitian Ramful dan Sowaruth [11] yang menunjukkan bahwa sistem *solar tracker* berbiaya rendah mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya secara efektif pada wilayah beriklim tropis. Hasil penelitian ini juga mendukung penelitian Nugroho [12] yang menunjukkan bahwa penggunaan aktuator pada sistem *solar tracker* mampu meningkatkan kemampuan panel surya dalam mengikuti pergerakan matahari sehingga energi yang diterima panel menjadi lebih besar. Namun demikian, berbeda dengan sebagian penelitian sebelumnya yang hanya melaporkan peningkatan energi keluaran, penelitian ini turut mengevaluasi konsumsi energi aktuator dan *net energy gain* sebagai indikator performa sistem secara keseluruhan. Perbandingan hasil penelitian dengan beberapa penelitian terdahulu ditunjukkan pada **Tabel 6**.

Tabel 6 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Studi Terdahulu

Penelitian	Jenis Tracker	Hasil Utama
Efendi dkk. [7]	<i>Single-axis</i> dan <i>Dual-axis</i>	Peningkatan energi sekitar 20–35%
Hadiyanto dan Prasetyo [8]	<i>Single-axis</i>	Meningkatkan daya keluaran panel surya dibanding sistem statis
Ramful dan Sowaruth [11]	<i>Single-axis</i> biaya rendah	Meningkatkan pemanfaatan energi surya pada wilayah tropis
Penelitian ini	<i>Single-axis</i> berbasis relai mekanis	Peningkatan daya 26,92%, tambahan energi 35,96 Wh/hari, dan <i>net energy gain</i> 20,66 Wh/hari

F. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, yaitu periode pengamatan yang hanya dilakukan selama lima hari sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan variasi kondisi cuaca sepanjang tahun. Selain itu, penelitian ini belum menggunakan alat ukur radiasi matahari (*pyranometer*) untuk memperoleh data iradiasi secara langsung, padahal intensitas dan sudut datang radiasi matahari merupakan faktor yang berpengaruh terhadap kinerja panel surya [4]. Penelitian ini juga belum melakukan analisis ekonomi yang mencakup biaya investasi, biaya operasi dan perawatan, serta periode pengembalian modal (*payback period*) dari sistem *solar tracker*. Evaluasi teknis dan ekonomis secara bersamaan diperlukan untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kelayakan penerapan *solar tracker* pada sistem fotovoltaik skala kecil [13]. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu dilakukan dengan periode pengamatan yang lebih panjang, pengukuran parameter lingkungan yang lebih lengkap, serta analisis kelayakan ekonomi untuk memperoleh hasil yang lebih representatif.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, sistem *solar tracker single-axis* berbasis relai mekanis mampu meningkatkan kinerja panel surya dibandingkan sistem panel surya statis. Hasil pengujian selama lima hari menunjukkan bahwa rata-rata daya keluaran panel surya meningkat dari 17,71 W menjadi 22,45 W atau mengalami peningkatan sebesar 26,92%. Peningkatan tersebut berdampak pada kenaikan energi listrik harian dari 134,68 Wh menjadi 170,64 Wh, sehingga diperoleh tambahan energi (*energy gain*) sebesar 35,96 Wh per hari. Konsumsi energi aktuator selama proses pelacakan dan *reset* posisi tercatat sebesar 15,30 Wh per hari. Setelah memperhitungkan konsumsi energi tersebut, sistem masih menghasilkan *net energy gain* sebesar 20,66 Wh per hari dengan rasio keuntungan energi bersih sebesar 15,34%. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem *solar tracker single-axis* berbasis relai mekanis mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya secara efektif dengan sistem kendali yang sederhana dan biaya implementasi yang relatif rendah. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan periode pengamatan yang lebih panjang, melakukan pengukuran radiasi matahari secara langsung menggunakan *pyranometer*, serta membandingkan performa sistem dengan *solar tracker* berbasis mikrokontroler atau sistem *dual-axis* untuk memperoleh evaluasi teknis dan ekonomis yang lebih komprehensif.

Daftar Pustaka

- [1] M. Victoria et al., "Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future," *Joule*, vol. 5, no. 5, pp. 1041–1056, doi: 10.1016/j.joule.2021.03.005.
- [2] F. Afif, A. Martin, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia," *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 6, no. 1, pp. 43–52, 2022.
- [3] M. I. M.A.A. Mamun, M. Hasanuzzaman, and J. Selvaraj, "Effect of tilt angle on the performance and electrical parameters of a PV module : Comparative indoor and outdoor experimental investigation maximum Power Point Tracker," *Energy Built Environ.*, vol. 3, no. 3, pp. 278–290, 2022, doi: 10.1016/j.enbenv.2021.02.001.

- [4] Y. Zhang, J. Qi, Y. Yu, Q. Shi, and Z. Liu, "Influence of incidence angle effects on the performance of bifacial photovoltaic modules considering rear-side reflection," *Sol. Energy*, vol. 245, no. oct., pp. 404–409, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.08.027.
- [5] A. Z. Hafez, A. M. Yousef, and N. M. Harag, "Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, pp. 754–782, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.094.
- [6] L. O. A. Barata, Samhuddin, R. F. Naryanto, M. K. Delimayanti, and L. Baride, "Studi Karakteristik Energi Surya untuk Pemanenan Energi: Studi Awal di Kota Kendari ", *Piston: Jurnal Teknologi*, vol. 10, no. 1, pp. 8–18, 2025, doi: 10.55679/pistonjt.v10i1.85
- [7] M. Efendi, R. I. Mainil, A. Aziz, U. Riau, and C. Author, "Comparison of the Efficiency of Solar PV Fixed, Single-Axis, and Dual-Axis Solar Trackers: A Review," *J. Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 10, no. 1, pp. 84–93, 2025, doi: 10.21009/JKEM.10.1.9.
- [8] E. E. Prasetyo, G. Marausna, R. Rasmi, and D. Rahmiullah, "Analisis Perbandingan Hasil Daya Listrik Panel Surya Dengan dan Tanpa Solar Tracker," *JTT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 10, no. 2, 2022, doi: 10.32487/jtt.v10i2.1426.
- [9] F. D. Putra, H. Radhiati, L. O. A. Barata, and L. K. Mangalla, "Studi Karakteristik PV Panel sebagai Pemanenan Energi Listrik: Efek Solar Tracking", *Enthalpy: Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin*, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, Feb. 2025, doi: 10.55679/enthalpy.v10i1.2.
- [10] M. A. Al Sheikh, "IoT-Enabled Dual-Axis Solar Tracking System Using ESP32 and Blynk for Real-Time Monitoring and Energy Optimization," *Jupiter Publ. Ilmu Keteknikan Ind. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 3, no. 1, pp. 187–204, 2025, doi: 10.61132/jupiter.v3i1.695.
- [11] R. Ramful and N. Soweruth, "Low-cost solar tracker to maximize the capture of solar energy in tropical countries," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 295–302, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.10.145.
- [12] H. Nugroho, M. H. Kemal, F. H. Rumawan, and D. Suprihanto, "Penerapan Solar Tracking System Berlengan Ganda dengan Memanfaatkan Potensi Tenaga Surya," vol. 8, no. 01, pp. 21–26, 2025, doi: 10.30651/cl.v8i01.23872.
- [13] I. S. Osman, I. K. Almadani, N. G. Hariri, and T. S. Maatallah, "Experimental Investigation and Comparison of the Net Energy Yield Using Control-Based Solar Tracking Systems," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 8, no. 4, pp. 1123–1132, 2022, doi: 10.1155/2022/7715214.

Pernyataan Penulis

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam publikasi artikel ini. Semua penulis menyetujui penerbitan artikel ini. Jangan dihapus bagian ini.

Lampiran

Dokumentasi penelitian

