

Analisis Komparatif Energi Listrik Panel Surya Monokristalin 50 Wp pada Sistem Solar Tracker sebagai Sumber Green Energy pada Incinerator

Tino Aldi Kusuma¹, Nurlaila Rajabiah^{2*}, Asroni³, Eko Nugroho⁴, Tri Cahyo Wahyudi⁵

^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Metro

*Corresponding author: lailams8990@gmail.com

Abstract

This study aims to analyze the performance comparison of a 50 Wp photovoltaic (PV) panel equipped with a solar tracking system and a fixed PV panel as a green energy source for an incinerator application. The study was motivated by the limited capability of fixed PV panels to capture solar radiation optimally due to their constant tilt angle. An experimental method was conducted in Nampirejo Village, Batanghari District, East Lampung Regency, Indonesia, over five consecutive days from 09:00 to 15:00 WIB, with data recorded at 30-minute intervals. The measured parameters included solar irradiance, voltage, current, electrical power, and electrical energy. The experimental results revealed that the PV panel equipped with a solar tracker produced a normalized energy output of 42.844 Wh, whereas the fixed PV panel generated 40.098 Wh, representing an average performance improvement of approximately 4,55%. These findings indicate that the solar tracking system enhances solar radiation absorption by continuously aligning the PV panel with the sun's position, thereby increasing electrical energy production. The implementation of a solar tracker on a 50 Wp PV panel improves system performance compared with a fixed PV panel and demonstrates strong potential as an effective renewable energy solution for supporting environmentally friendly incinerator operations.

Keywords: Solar Tracker; Photovoltaic (PV); Green Energy; Normalized Energy.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis perbandingan kinerja panel surya berkapasitas 50 Wp yang menggunakan sistem *solar tracker* dan panel surya statis sebagai sumber *green energy* pada aplikasi incinerator. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh keterbatasan panel surya statis dalam menyerap radiasi matahari secara optimal akibat sudut kemiringan panel yang tetap. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen lapangan yang dilaksanakan di Desa Nampirejo, Kecamatan Batanghari, Kabupaten Lampung Timur, selama lima hari pengujian pada pukul 09.00–15.00 WIB dengan interval pengambilan data setiap 30 menit. Parameter yang diamati meliputi intensitas radiasi matahari, tegangan, arus, daya, dan energi listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panel surya dengan sistem *solar tracker* menghasilkan energi ternormalisasi sebesar 42,85 Wh, lebih tinggi dibandingkan panel surya statis yang menghasilkan 40,99 Wh, sehingga terjadi peningkatan kinerja rata-rata sebesar 4,55%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kemampuan *solar tracker* dalam mengikuti pergerakan matahari mampu meningkatkan penyerapan radiasi surya dan menghasilkan energi listrik yang lebih optimal. Penerapan sistem *solar tracker* pada panel surya 50 Wp mampu meningkatkan performa sistem dibandingkan panel surya statis serta berpotensi menjadi solusi energi terbarukan yang efektif untuk mendukung operasional incinerator ramah lingkungan.

Kata kunci: Solar Tracker; Photovoltaic (PV); Green Energy; Energi Ternormalisasi.

1. Pendahuluan

Transisi menuju pemanfaatan energi bersih menjadi salah satu fokus utama dalam mendukung pembangunan berkelanjutan dan pengurangan emisi karbon global. Ketergantungan terhadap energi fosil serta meningkatnya kebutuhan energi mendorong pengembangan sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Di antara berbagai sumber energi terbarukan, energi surya merupakan salah satu teknologi yang berkembang pesat karena memiliki potensi melimpah, biaya operasional relatif rendah, serta tidak menghasilkan emisi selama proses konversi energi [1,2]. Perkembangan teknologi fotovoltaik (*photovoltaic/PV*) juga semakin luas diterapkan pada sektor industri, rumah tangga, pertanian, dan fasilitas pengelolaan limbah.

Indonesia yang berada di wilayah khatulistiwa memiliki potensi energi surya yang besar dengan intensitas radiasi matahari relatif tinggi sepanjang tahun. Kondisi tersebut memberikan peluang pengembangan pembangkit listrik tenaga surya sebagai sumber energi alternatif maupun pendukung berbagai peralatan listrik [3]. Namun, pemanfaatan energi surya belum optimal karena dipengaruhi oleh orientasi dan sudut kemiringan panel, kondisi cuaca, temperatur lingkungan, serta perubahan posisi matahari sepanjang hari [4,5]. Panel surya yang dipasang secara statis tidak selalu menerima radiasi secara tegak lurus sehingga energi listrik yang dihasilkan dapat menurun, terutama pada pagi dan sore hari.

Kondisi tersebut mendorong pengembangan *solar tracker* yang mampu mengubah orientasi panel secara otomatis mengikuti posisi matahari sehingga sudut datang radiasi dapat dipertahankan mendekati kondisi optimum [6,7]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa *solar tracker* dapat meningkatkan produksi energi listrik sebesar 15% hingga lebih dari 60% dibandingkan panel statis, bergantung pada lokasi, kondisi atmosfer, jenis tracker, dan konfigurasi panel [8]. Meskipun demikian, penerapannya masih menghadapi tantangan

berupa kompleksitas mekanik, konsumsi daya aktuator, biaya investasi, dan kebutuhan perawatan [9]. Perkembangan sistem pelacakan juga mencakup penggunaan *Light Dependent Resistor* (LDR), fotodioda, *encoder*, algoritma astronomi, hingga *artificial intelligence* dan *machine learning* [12–14]. Kajian terbaru melaporkan peningkatan produksi energi dibandingkan sistem statis, dengan hasil yang dipengaruhi oleh kondisi geografis, cuaca, karakteristik modul, dan konfigurasi sistem [15].

Salah satu aplikasi yang berpotensi memanfaatkan energi surya sebagai sumber energi pendukung adalah incinerator. Sistem incinerator memerlukan energi listrik untuk mengoperasikan komponen seperti panel kendali, sensor temperatur, kipas pembakaran, aktuator, dan perangkat monitoring. Pemanfaatan sistem PV dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi konvensional sekaligus mendukung penerapan konsep *green energy* pada pengelolaan limbah [10,16–18]. Keberhasilan penerapan tersebut sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem PV dalam memanfaatkan radiasi matahari secara optimal selama periode operasi [19]. Dalam konteks pembangkit berkapasitas kecil, *solar tracker* berbasis LDR menjadi salah satu alternatif yang menarik karena memiliki konstruksi relatif sederhana, kebutuhan perangkat keras rendah, serta tidak memerlukan algoritma kendali yang kompleks [20].

Meskipun penelitian mengenai *solar tracker* telah berkembang pesat, sebagian besar studi masih berfokus pada aplikasi pembangkit listrik umum dan evaluasi berdasarkan tegangan, arus, daya sesaat, atau efisiensi konversi. Kajian yang menghubungkan penerapan *solar tracker* dengan kebutuhan energi pada incinerator skala edukasi atau laboratorium masih relatif terbatas. Selain itu, variasi intensitas radiasi selama pengujian sering belum diperhitungkan secara memadai sehingga perbandingan kinerja antar-sistem dapat dipengaruhi oleh perubahan kondisi cuaca

harian [11,22]. Pendekatan energi ternormalisasi terhadap iradiasi referensi dapat digunakan untuk memperoleh evaluasi yang lebih objektif karena memperhitungkan pengaruh fluktuasi intensitas radiasi selama pengujian [21].

Pengembangan incinerator ramah lingkungan memerlukan sistem pendukung yang mampu menyediakan energi secara efisien dan berkelanjutan. Oleh karena itu, peningkatan performa sistem PV melalui penerapan *solar tracker* menjadi salah satu pendekatan yang layak dikaji untuk mendukung kebutuhan energi tersebut. Dalam penelitian ini, digunakan panel surya monokristalin 50 Wp dengan *solar tracker* berbasis sensor LDR dan panel surya statis sebagai pembanding. Kinerja kedua sistem dievaluasi melalui parameter intensitas radiasi matahari, tegangan, arus, daya listrik, energi listrik, energi ternormalisasi, dan efisiensi sistem pada kondisi pengujian lapangan yang sama. Pendekatan tersebut memungkinkan karakteristik keluaran listrik akibat perubahan orientasi panel serta efektivitas pemanfaatan energi surya dibandingkan secara lebih objektif.

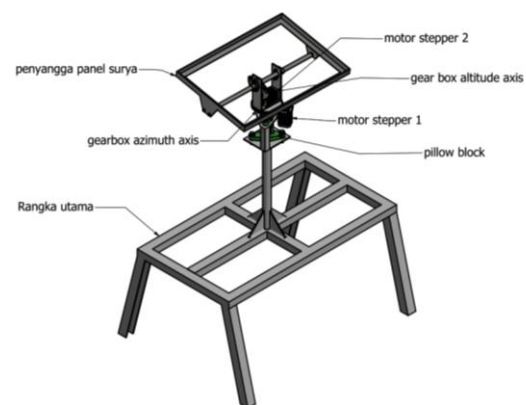
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis perbandingan kinerja panel surya 50 Wp menggunakan sistem *solar tracker* berbasis sensor LDR dengan panel surya statis berdasarkan parameter intensitas radiasi matahari, tegangan, arus, daya listrik, energi listrik, energi ternormalisasi, dan efisiensi sistem. Hasil penelitian diharapkan dapat mendukung pengembangan sistem fotovoltaik skala kecil yang sederhana, ekonomis, dan mudah diterapkan sebagai sumber energi terbarukan untuk mendukung operasional incinerator yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode eksperimen dengan membandingkan performa panel surya berkapasitas 50 Wp yang menggunakan sistem *solar tracker* dengan panel surya yang dipasang secara statis tanpa *solar tracker*. Pengumpulan data

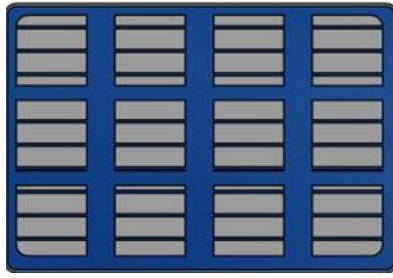
dilaksanakan di Desa Nampirejo, Kecamatan Batanghari, Kabupaten Lampung Timur, selama 10 hari berturut-turut yaitu panel statis selama 5 hari dan solar tracker selama 5 hari pada kondisi cuaca yang cerah (tidak hujan). Pengukuran dilakukan setiap 30 menit dalam rentang waktu pukul 09.00 hingga 15.00 WIB.

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi panel surya monokristalin berkapasitas 50 Wp, system *solar tracker* dua sumbu (*dual axis*), baterai 50 Ah, *solar charge controller* (SCC), inverter, Arduino sebagai unit pengendali, serta sensor cahaya. Adapun instrumen pengukuran yang digunakan terdiri atas multimeter digital, *power meter*, dan pyranometer yang berfungsi untuk mengukur intensitas radiasi matahari.



Gambar 1. Desain Panel Surya

Penelitian ini menggunakan tiga jenis variabel, yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Variabel bebas berupa jenis sistem panel surya yang diuji, yakni panel surya yang dilengkapi *solar tracker* dan panel surya statis tanpa *tracker*. Variabel terikat meliputi parameter keluaran listrik yang diamati, yaitu tegangan (V), arus (I), daya (P), dan energi listrik (Wh). Sementara itu, variabel kontrol mencakup kapasitas panel surya sebesar 50 Wp, lokasi serta waktu pelaksanaan pengujian, dan kondisi lingkungan selama proses pengambilan data agar hasil pengukuran dapat dibandingkan secara objektif.



Gambar 2. Permukaan Panel Surya

Proses pengujian dilakukan melalui beberapa tahap sebagai berikut:

1. Rekaman Data Cuaca.

Pencatatan kondisi cuaca selama proses pengujian berlangsung. Data yang direkam meliputi suhu udara, kelembaban, kecepatan angin, dan kondisi langit (berawan, cerah, atau hujan). Data ini penting karena cuaca sangat mempengaruhi kinerja panel surya

2. Pengukuran Intensitas Radiasi Matahari.

Pengukuran seberapa besar energi matahari yang jatuh pada permukaan bumi per satuan luas dalam satuan waktu. Diukur dalam satuan Watt/m^2 menggunakan alat pyranometer. Data ini digunakan untuk mengetahui seberapa banyak energi yang tersedia untuk diubah menjadi listrik oleh panel surya.

3. Pengukuran Daya Listrik.

Proses mencatat output listrik (tegangan, arus, dan daya) yang dihasilkan oleh panel surya. Pengukuran ini biasanya dilakukan menggunakan multimeter, wattmeter, atau alat pencatat data (datalogger) untuk mengetahui efisiensi kerja panel surya dalam kondisi tertentu.

4. Pengamatan Langsung (Observasi).

Kegiatan melihat dan mencatat langsung kondisi fisik sistem selama pengujian berlangsung. Ini bisa mencakup pengamatan posisi panel surya, adanya hambatan seperti bayangan, kondisi alat, hingga pergerakan solar tracker

5. Pencatatan Waktu dan Durasi Pengujian.

Penentuan kapan pengujian dilakukan dan berapa lama berlangsung. Pencatatan ini penting untuk membandingkan

performa sistem dalam waktu tertentu (misalnya pagi, siang, sore) dan memastikan konsistensi durasi pengambilan data antar skenario (dengan dan tanpa solar tracker)

Data yang diperoleh dari hasil pengukuran selanjutnya dianalisis melalui beberapa tahapan. Daya listrik dihitung berdasarkan hasil perkalian antara tegangan dan arus ($P = V \times I$). Energi listrik kemudian ditentukan dengan mengintegrasikan daya terhadap waktu selama periode pengamatan. Untuk memperoleh hasil yang dapat dibandingkan pada kondisi iradiasi yang berbeda, dilakukan proses normalisasi energi dengan membandingkan energi listrik harian terhadap nilai iradiasi acuan sehingga diperoleh energi ternormalisasi.

Tahap akhir analisis dilakukan dengan menghitung energi listrik yang dihasilkan, energi yang digunakan oleh mekanisme solar tracker, energi bersih, iradiasi matahari, energi listrik hasil normalisasi, dan efisiensi konversi panel. Normalisasi energi digunakan untuk membandingkan kinerja panel pada kondisi iradiasi yang berbeda, sedangkan efisiensi konversi menunjukkan perbandingan energi listrik terhadap energi radiasi matahari yang diterima panel. Untuk solar tracker, konsumsi energi motor dikurangkan dari energi listrik yang dihasilkan sehingga diperoleh energi bersih sistem.

Perhitungan energi listrik yang dihasilkan panel

Karena tegangan dan arus berubah selama pengujian, energi listrik dihitung secara diskrit pada setiap interval pengukuran. Dengan interval pengambilan data $\Delta t = 0,5$ jam, persamaan energi total harian dituliskan sebagai:

$$E_{\text{total}} = \sum_i (V_i \times I_i \times \Delta t) \quad (1)$$

dengan,

E_{tot} = energi listrik total selama periode pengukuran (Wh).

V_i = tegangan listrik pada interval pengukuran ke- i (V).

I_i = arus listrik pada interval pengukuran ke- i (A).

Δt = interval waktu pengukuran (jam), yaitu 0,5 jam.

Σ_i = penjumlahan seluruh interval pengambilan data.

Total iradiasi matahari selama satu hari diperoleh dari penjumlahan nilai irradiance pada setiap interval pengukuran. Dengan interval pengukuran 0,5 jam, persamaannya adalah:

$$H_{\text{total}} = \sum_i (G_i \times \Delta t) \quad (2)$$

dengan,

H_{total} = total iradiasi matahari harian (Wh/m²).

G_i = irradiance matahari pada interval pengukuran ke-i (W/m²).

Δt = interval waktu pengukuran (jam), yaitu 0,5 jam.

$\sum_i$ = penjumlahan seluruh interval pengambilan data selama satu hari.

Perhitungan iradiasi referensi

Untuk normalisasi energi, digunakan iradiasi referensi sebagai nilai rata-rata iradiasi harian dari seluruh hari pengujian dan kedua konfigurasi panel. Jika terdapat n hari pengujian, iradiasi referensi dihitung sebagai:

$$H_{\text{ref}} = (1 / 2n) \times [\sum_d H_{\text{total}, \text{statis}, d} + \sum_d H_{\text{total}, \text{tracker}, d}] \quad (3)$$

dengan,

H_{ref} = iradiasi referensi rata-rata harian (Wh/m²).

$H_{\text{total}, \text{statis}, d}$ = total iradiasi harian pada konfigurasi panel statis pada hari ke-d (Wh/m²).

$H_{\text{total}, \text{tracker}, d}$ = total iradiasi harian pada konfigurasi solar tracker pada hari ke-d (Wh/m²).

n = jumlah hari pengujian.

d = indeks hari pengujian.

Persamaan ini memperjelas bahwa pembagian dilakukan berdasarkan jumlah hari dan dua konfigurasi pengujian. Apabila H_{total} yang digunakan sudah berupa rata-rata harian, H_{ref} cukup dihitung sebagai rata-rata dari dua nilai rata-rata harian tersebut.

Perhitungan energi listrik hasil normalisasi

Energi hasil normalisasi digunakan untuk menyesuaikan energi listrik yang diperoleh terhadap iradiasi referensi. Untuk panel statis maupun solar tracker, persamaannya adalah:

$$E_{\text{norm}} = E \times (H_{\text{ref}} / H_{\text{total}}) \quad (4)$$

dengan,

E_{norm} = energi listrik harian hasil normalisasi (Wh).

E = energi listrik harian yang digunakan dalam normalisasi (Wh); untuk tracker dapat digunakan E_{net} .

H_{ref} = iradiasi referensi (Wh/m²).

H_{total} = total iradiasi harian aktual (Wh/m²).

Efisiensi konversi panel surya

Efisiensi konversi dihitung dengan membandingkan energi listrik keluaran panel terhadap energi radiasi matahari yang diterima oleh luas aktif panel. Untuk menjaga konsistensi dengan energi ternormalisasi, efisiensi berdasarkan energi normalisasi dituliskan sebagai:

$$\eta(\text{norm}) = [\bar{E}_{\text{norm}} / (H_{\text{ref}} \times A)] \times 100\% \quad (5)$$

dengan,

η_{norm} = efisiensi konversi berdasarkan energi yang telah dinormalisasi (%).

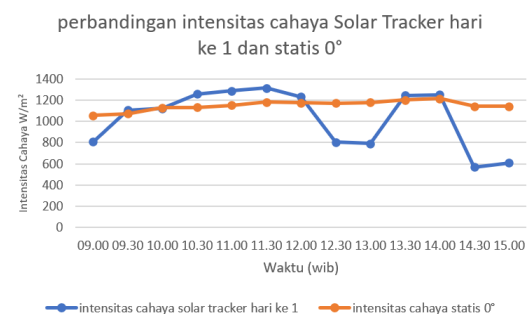
$\bar{E}_{\text{norm}}$ = rata-rata energi listrik harian hasil normalisasi (Wh).

H_{ref} = iradiasi referensi rata-rata harian (Wh/m²).

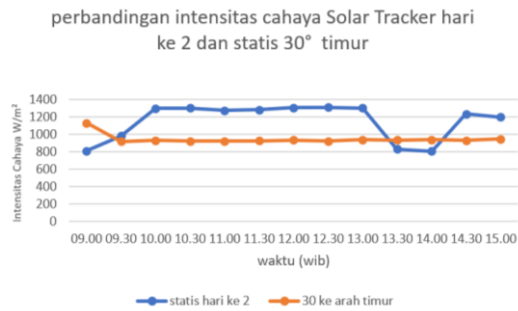
A = luas aktif permukaan panel surya (m²).

3. Hasil dan Pembahasan

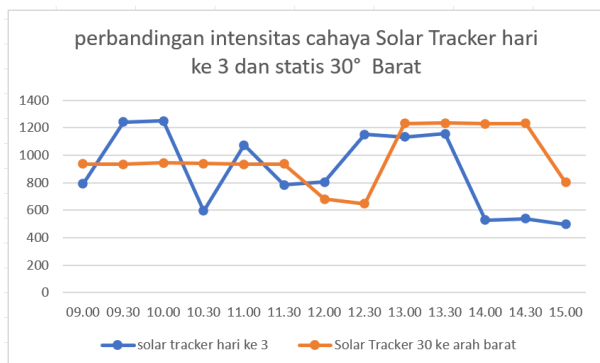
Berdasarkan hasil pengujian, terlihat adanya perbedaan performa yang cukup nyata antara panel surya yang menggunakan sistem *solar tracker* dan panel surya yang dipasang secara statis. Evaluasi dilakukan terhadap beberapa parameter keluaran listrik, yaitu tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan oleh masing-masing sistem. Pengambilan data dilaksanakan selama lima hari berturut-turut dengan selang waktu pencatatan setiap 30 menit, mulai pukul 09.00 hingga 15.00 WIB.



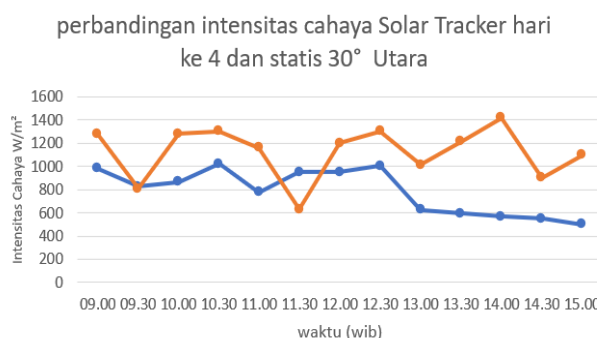
Gambar 3. Perbandingan Intensitas Cahaya Hari ke-1 dan panel statis dengan sudut 0°



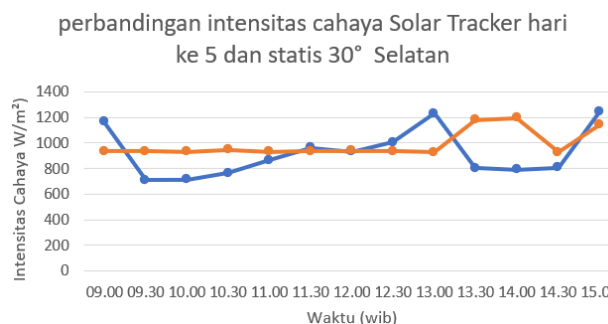
Gambar 4. Perbandingan Intensitas Cahaya Hari ke-2 dan panel statis dengan sudut 30° arah timur.



Gambar 5. Perbandingan Intensitas Cahaya Hari ke-3 dan panel statis dengan sudut 30° arah barat.



Gambar 6. Perbandingan Intensitas Cahaya Hari ke-4 dan panel statis dengan sudut 30° arah utara.



Gambar 7. Perbandingan Intensitas Cahaya Hari ke-5 dan panel statis dengan sudut 30° arah selatan.

Gambar 3 sampai dengan 7 menyajikan perbandingan intensitas radiasi matahari

yang diterima oleh panel surya yang menggunakan sistem *solar tracker* dengan panel surya statis yang dipasang pada berbagai sudut kemiringan 0° terhadap horizontal dan 30° ke arah utara, selatan, timur, dan barat. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa kedua sistem memiliki pola perubahan intensitas cahaya yang berbeda selama periode pengukuran, yaitu dari pukul 09.00 hingga 15.00 WIB.

Pada periode pagi hari (09.00–10.00 WIB), panel yang dilengkapi *solar tracker* menerima intensitas radiasi yang lebih tinggi dibandingkan panel statis. Nilai intensitas pada pukul 09.00 WIB mencapai sekitar 1180 W/m², kemudian mengalami penurunan cukup drastis hingga mendekati 700 W/m² pada pukul 09.30–10.00 WIB. Sebaliknya, panel statis menunjukkan nilai yang relatif lebih konstan pada rentang waktu tersebut, yaitu sekitar 900–950 W/m².

Memasuki waktu menjelang tengah hari hingga siang (11.00–12.30 WIB), intensitas radiasi yang diterima kedua sistem cenderung hampir sama, yaitu berada pada kisaran 900–1000 W/m². Perbedaan mulai terlihat kembali pada pukul 13.00 WIB, ketika panel dengan *solar tracker* mencatat intensitas sekitar 1220 W/m², sedangkan panel statis hanya menerima sekitar 960 W/m². Kondisi ini mengindikasikan bahwa mekanisme *solar tracker* mampu mengarahkan panel agar tetap mengikuti posisi matahari sehingga penyerapan radiasi menjadi lebih optimal pada saat intensitas matahari mencapai nilai maksimum.

Pada rentang waktu sore hari (13.30–15.00 WIB), panel statis yang dipasang dengan kemiringan 30° ke arah selatan memperlihatkan nilai intensitas yang relatif stabil, yaitu berkisar antara 1100 hingga 1200 W/m². Sementara itu, panel yang menggunakan *solar tracker* mengalami perubahan intensitas yang lebih dinamis, ditandai dengan penurunan hingga sekitar 800 W/m² sebelum kembali meningkat dan mencapai hampir 1250 W/m² pada pukul 15.00 WIB.

Berdasarkan hasil perhitungan energi listrik, panel surya yang menggunakan

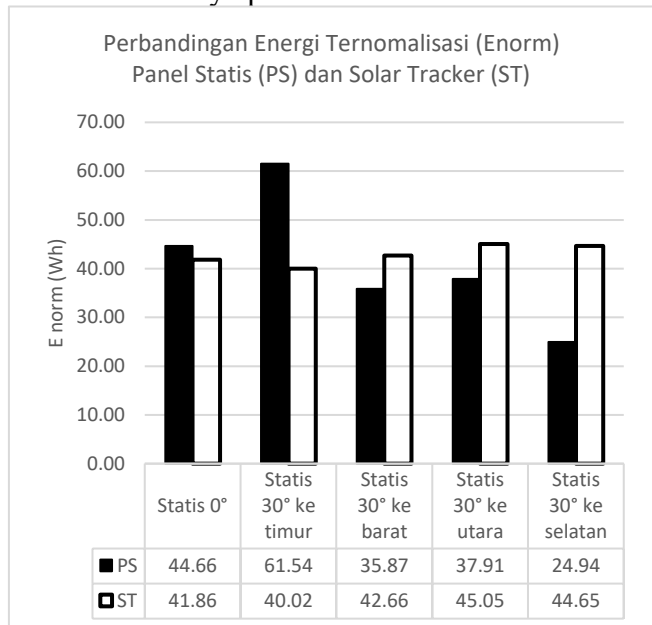
sistem *solar tracker* menghasilkan energi ternormalisasi sebesar 42,85 Wh, sedangkan panel statis memperoleh nilai sebesar 40,99 Wh. Perbedaan tersebut menunjukkan selisih sekitar 4,55%.. Hasil ini mengindikasikan bahwa kemampuan *solar tracker* dalam mempertahankan orientasi panel agar selalu menghadap arah datangnya sinar matahari berkontribusi terhadap proses penyerapan radiasi yang lebih efektif selama periode pengujian.

Tabel 1. Tabel Data Hasil Normalisasi Energi

Hari ke-	Panel	E_{total} (Wh)	$\frac{H_{Ref}}{H_{total}}$	E_{norm} (Wh)
1	Statis 0°	45.11	0.99	44.66
1	solar tracker	40.64	1.03	41.86
2	Statis 30° ke timur	54.95	1.12	61.54
2	Solar tracker	43.50	0.92	40.02
3	Statis 30° ke barat	32.91	1.09	35.87
3	Solar tracker	35.85	1.19	42.66
4	Statis 30° ke utara	40.33	0.94	37.91
4	Solar tracker	33.37	1.35	45.05
5	Statis 30° ke selatan	23.31	1.07	24.94
5	Solar tracker	38.83	1.15	44.65
Rata-rata	Statis	39.32	1.04	40.99
Rata-rata	Solar tracker	38.44	1.13	42.85

Berdasarkan hasil analisis, sistem panel surya yang menggunakan *solar tracker* menunjukkan tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan panel surya yang dipasang secara statis. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa penerapan *solar tracker* mampu meningkatkan pemanfaatan radiasi matahari dengan menjaga orientasi panel agar tetap menghadap ke arah datangnya sinar matahari. Sebaliknya, panel surya statis hanya mampu mencapai kondisi optimal pada waktu tertentu, yaitu ketika sudut datang cahaya matahari sesuai dengan sudut kemiringan panel. Oleh karena itu,

penggunaan *solar tracker* pada sistem fotovoltaik berkapasitas 50 Wp dapat meningkatkan kinerja pembangkitan energi listrik. Penerapan teknologi ini berpotensi menjadi solusi dalam penyediaan sumber energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, khususnya untuk memenuhi kebutuhan daya pada sistem incinerator.



Gambar 8. Perbandingan Energi Ternormalisasi harian sistem *solar tracker* dan panel statis.

Berdasarkan grafik pada Gambar 8, terlihat bahwa panel surya yang menggunakan system *solar tracker* menghasilkan nilai rata-rata energi ternormalisasi (E_{norm}) yang lebih tinggi dibandingkan panel surya yang dipasang secara statis dengan sudut kemiringan 0°. Nilai rata-rata E_{norm} pada panel statis sebesar 40,99 Wh, sedangkan pada panel yang menggunakan *solar tracker* mencapai 42,85 Wh. Perbedaan sebesar 1,86 Wh tersebut menunjukkan adanya peningkatan sekitar 4,55% pada penggunaan system *solar tracker*. Hasil ini memperkuat temuan yang diperoleh dari analisis grafik sebelumnya, yaitu bahwa *solar tracker* mampu mengoptimalkan penerimaan radiasi matahari sehingga energi listrik yang dihasilkan menjadi lebih besar selama periode pengujian.

Meskipun nilai efisiensi sistem secara keseluruhan masih relatif rendah, kondisi

tersebut diduga dipengaruhi oleh penggunaan *solar charge controller* (SCC) tipe PWM serta konfigurasi beban yang belum optimal. Akibatnya, panel surya belum dapat beroperasi pada kondisi *Maximum Power Point* (MPP), sehingga daya yang dihasilkan belum mencapai nilai maksimum. Namun demikian, karena seluruh pengujian dilaksanakan dengan kondisi operasional yang sama dan menggunakan data iradiasi yang telah dinormalisasi, maka hasil perbandingan kinerja antara panel surya statis dan panel dengan *solar tracker* tetap dapat dianggap valid serta mampu menggambarkan perbedaan performa kedua system secara objektif.

Temuan penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Rahman [23], yang menyatakan bahwa penggunaan sistem *solar tracker* mampu meningkatkan efisiensi panel surya dibandingkan dengan sistem panel surya yang dipasang secara statis.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan system *solar tracker* mampu meningkatkan kinerja panel surya dibandingkan dengan panel surya yang dipasang secara statis. Selama lima hari pengujian, panel surya yang menggunakan *solar tracker* menghasilkan daya rata-rata sebesar 29,55 W, sedangkan panel surya statis hanya mencapai 27,24 W. Hasil pengukuran intensitas radiasi matahari menunjukkan adanya perbedaan nilai iradiasi pada setiap variasi sudut kemiringan panel statis dan pada sistem *solar tracker*. Pada beberapa kondisi, panel statis menerima intensitas radiasi yang lebih tinggi, namun secara umum *solar tracker* mampu mempertahankan orientasi panel agar mengikuti pergerakan matahari sehingga penyerapan energi berlangsung lebih optimal sepanjang waktu pengujian. Rata-rata iradiasi harian yang diterima panel dengan *solar tracker* sebesar 6205 Wh/m², sedangkan panel statis sebesar 6629 Wh/m². Meskipun demikian, panel surya yang

menggunakan *solar tracker* tetap menghasilkan energi ternormalisasi yang lebih tinggi, yaitu rata-rata sebesar 42,85 Wh dibandingkan panel statis yang hanya mencapai 40,99 Wh. Temuan tersebut menunjukkan bahwa penerapan teknologi *solar tracker* mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya dan kinerja sistem fotovoltaik, sehingga berpotensi mendukung pengembangan sumber energi terbarukan yang lebih efisien serta implementasi konsep *green energy* secara berkelanjutan.

Ucapan terimakasih

Ucapan terimakasih kepada Dosen dan Karyawan di lingkungan Unniversitas Muhammadiyah Metro, Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih disampaikan kepada dosen pembimbing atas arahan dan bimbingan yang diberikan selama proses penelitian dan penyusunan artikel. Penulis juga mengapresiasi dukungan fasilitas dan bantuan teknis yang diberikan sehingga penelitian mengenai sistem *solar tracker* pada panel surya ini dapat terlaksana dengan baik.

Referensi

- [1] M. A. Alanazi and Z. Kaneesamkandi, "Performance studies on PVT assisted solar drying of municipal solid waste for enhancement of heat generation during combustion," *AIMS Energy*, vol. 13, no. 4, pp. 922–937, 2025. doi: 10.3934/energy.2025034.
- [2] Australian Renewable Energy Agency (ARENA), "Solar energy," 2026. [Online]. Available: <https://arena.gov.au/renewable-energy/solar/>. [Accessed: July 20, 2026].
- [3] M. A. Ponce-Jara, A. E. Castro, and J. L. M. García, "Assessment of Single-Axis Solar Tracking System Efficiency in Equatorial Regions: A Case Study of Manta,

- Ecuador," *Energies*, vol. 17, no. 16, p. 3946, Aug. 2024. doi: 10.3390/en17163946.
- [4] S. D. Prasetyo, Y. Trisnoaji, M. Munir, M. P. Permatasari, A. A. Mahadi, M. A. Rizkita, and Z. Arifin, "Optimization of solar panel orientation and tracking systems for standalone PV applications," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 2721–2730, Dec. 2025. doi: 10.11591/IJPEDS.V16.I4.PP2721-2730.
- [5] C. H. Pardosi, M. Siregar, and L. W. Pandjaitan, "Design and Implementation of A Dual-Axis Solar Tracking System using Arduino Uno Microcontroller," *Jurnal ELTIKOM*, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, Jun. 2024.
- [6] M. N. Howlader, S. Chowdhury, K. A. A. Imon, G. J. Khan, M. K. H. Mehedi, M. F. Rabbi, A. Islam, and S. A. Z. Alif, "Design and implementation of a low-cost IoT-enabled dual-axis photovoltaic tracking system with experimental and simulation-based validation," *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 13, no. 44, Apr. 2026. doi: 10.1186/s43067-026-00351-z.
- [7] A. Avasthi, R. Garg, and P. Mahajan, "Optimizing energy harvesting: a comprehensive analysis of tracking technologies in a 2 MWP floating solar photovoltaic system," *Electr. Eng.*, vol. 107, pp. 4663–4681, Oct. 2024. doi: 10.1007/s00202-024-02780-3.
- [8] Z. Li, C. Liu, G. Song, D. Han, Y. Li, and D. Du, "Photovoltaic power generation enhancement performance with a LDR-based dual-axis solar tracking system," *Clean Technol. Recycl.*, vol. 5, no. 2, pp. 127–142, 2025. doi: 10.3934/ctr.2025007.
- [9] "A comparative study based on performance and techno-economic analysis of different strategies for PV-Electrolyzer (green) hydrogen fueling incinerator system," *Waste Manage.*, vol. 156, pp. 1-12, Nov. 2022. doi: 10.1016/j.wasman.2022.11.005.
- [10] M. A. Alanazi and Z. Kaneesamkandi, "Performance studies on PVT assisted solar drying of municipal solid waste for enhancement of heat generation during combustion," *AIMS Energy*, vol. 13, no. 4, pp. 922–937, 2025. doi: 10.3934/energy.2025034.
- [11] O. M. Butt, M. S. Ahmad, T. K. Lun, H. S. Che, H. Fayaz, N. Abd Rahim, K. K. K. Koziol, N. Radwan, M. A. Khan, N. A. Khan, and L. Singh, "A comparative study based on performance and techno-economic analysis of different strategies for PV-Electrolyzer (green) hydrogen fueling incinerator system," *Waste Manage.*, vol. 156, pp. 1-11, Jan. 2023. doi: 10.1016/j.wasman.2022.11.016.
- [12] R. Sadeghi, M. Parenti, S. Memme, M. Fossa, and S. Morchio, "A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems," *Energies*, vol. 18, no. 10, p. 2553, May 2025. doi: 10.3390/en18102553.
- [13] R. Angraini, M. B. Sari, Yohandri, A. Jambak, C. T. Permata, and V. Nuova, "Solar Tracker Arduino," *J. Exp. Appl. Phys.*, vol. 3, no. 1, pp. 22-34, Mar. 2025. doi: 10.24036/jeap.v3i1.97.
- [14] A. Hraich, A. Haddi, A. El Fadar, and O. Begdouri, "Experimental Evaluation of Energy Efficiency of Four Sun-Tracking Photovoltaic Configurations," *Energies*, vol. 18, no. 22, p. 5943, Nov. 2025. doi: 10.3390/en18225943.
- [15] M. Efendi, R. I. Mainil, and A. Aziz, "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, Jan. 2025. doi: 10.21009/JKEM.10.1.9.
- [16] F. Z. Athara, F. A. Putra, M. D. Praskadana, and A. Arfriandi, "Dual Axis Solar Tracker with Arduino-

- Based Voltage Monitoring," *Eksergi*, vol. 22, no. 2, May 2026. doi: 10.32497/eksergi.v22i02.7559.
- [17] M. A. Nugraha and Asnil, "Enhancing electricity production in Photovoltaic systems using a double-axis solar tracker," *J. Inov. dan Apl. Energi Elektr.*, vol. 1, no. 1, pp. 1-12, May 2025.
- [18] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. A. Al-Waeli, and K. Sopian, "Dual axis solar photovoltaic trackers: An in-depth review," *Energy Sources, Part A: Recovery, Util., Environ. Eff.*, vol. 46, pp. 15331–15356, 2024. doi: 10.1080/15567036.2024.2416510.
- [19] A. Avasthi, R. Garg, and P. Mahajan, "Optimizing energy harvesting: a comprehensive analysis of tracking technologies in a 2 MWP floating solar photovoltaic system," *Electr. Eng.*, vol. 107, pp. 4663–4681, Oct. 2024. doi: 10.1007/s00202-024-02780-3.
- [20] Ha, David H. L., et al. 'An IoT-Based Open-Loop Dual Axis Solar Tracking and Monitoring System'. 2024 *10th International Conference on Smart Computing and Communication (ICSCC)* [Bali, Indonesia], 2024, pp. 676–82. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1109/ICSCC62041.2024.10690428>.
- [21] D.-A. Sima, E. Tudor, L.-A. El-Leathey, G. Cîrciumaru, and M.-G. Matache, "Increasing Photovoltaic Systems Efficiency Through the Implementation of Statistical Methods," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 10, p. 5300, 2025. doi: 10.3390/app15105300.
- [22] C. Sheng, Y. Wang, G. Yang, Y. Yao, J. Zhu, and H. Wang, "Design and Implementation of Vehicle-Mounted Dual-Axis Solar Tracking System," in *2023 IEEE 5th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*, Shenyang, China, Jul. 2023, pp. 534–540. doi: 10.1109/ICPICS58376.2023.10235525.
- [23] M. K. Rahman, "Analisis Perbandingan Efisiensi Panel Surya 55 Watt dengan Tracking dan Tanpa Tracking," *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 3, no. 11, pp. 1395–1411, Nov. 2022, doi: 10.46799/jsa.v3i11.504.