



Analisis Eksperimental Pengaruh Sudut Kemiringan dan Intensitas Cahaya terhadap Kinerja Panel Surya Portabel

Heri Kiswanto, Noviarianto, Suyono, Prijo Harsono, Yulius Oscar, Wahyu Ari Putranto

Jurusan Teknika, Politeknik Maritim Negeri Indonesia, Jl. PTP Ngobo, Bergas, Semarang 50552

* Corresponding author. E-mail: hkiswanto@polimarin.ac.id

ABSTRAK

Optimalisasi sudut kemiringan dan pemanfaatan intensitas cahaya alami merupakan faktor penting dalam meningkatkan kinerja panel surya pada sistem pembangkit listrik portabel. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi sudut kemiringan terhadap daya keluaran panel surya monokristalin berkapasitas 100 Wp di bawah kondisi cahaya alami di wilayah tropis. Pengujian dilakukan dengan variasi sudut kemiringan 0° hingga 60° dengan rentang sudut 5 derajat, sedangkan parameter yang diukur meliputi tegangan, arus, daya keluaran, intensitas cahaya, dan suhu panel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya maksimum sebesar 20,39 W diperoleh pada sudut kemiringan 25° dengan intensitas cahaya sekitar 1003 W/m^2 . Hubungan antara intensitas cahaya dan daya keluaran bersifat hampir linier, dengan pengaruh yang lebih besar terhadap arus dibandingkan tegangan. Efisiensi relatif sistem terhadap daya nominal panel mencapai 20,39%, menunjukkan performa yang baik untuk sistem portabel berbasis panel monokristalin tanpa pelacak posisi matahari. Temuan ini menegaskan bahwa penyesuaian sudut kemiringan panel merupakan faktor kunci dalam mengoptimalkan kinerja sistem tenaga surya portabel, terutama di lingkungan tropis dengan kondisi radiasi

INFO ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diserahkan November 2025

Diterima Desember 2025

Tersedia online Desember 2025

Tanggal Publikasi 8 Des 2025

Kata Kunci:

panel surya, off-grid portable, sudut kemiringan, intensitas cahaya, efisiensi energi

matahari yang bervariasi. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar teknis bagi pengembangan rancangan sistem panel surya portabel yang efisien, ringan, dan adaptif terhadap kondisi lapangan nyata.

ABSTRACT

The optimization of tilt angle and utilization of natural light intensity are crucial factors in improving the performance of solar panels in off-grid portable power systems. This study aims to analyze the effect of tilt angle variations on the output power of a 100 Wp monocrystalline solar panel under natural sunlight conditions in tropical regions. The experiment was conducted tilt angle variations from 0° to 60° with a 5-degree interval, while the measured parameters included voltage, current, output power, light intensity, and panel temperature. The results show that the maximum power output of 20.39 W was achieved at a 25° tilt angle with a light intensity of approximately 1003 W/m². The relationship between light intensity and power output was found to be nearly linear, with a stronger influence on current than on voltage. The system's relative efficiency to the panel's nominal power reached 20.39%, demonstrating good performance for a portable monocrystalline-based solar system without a solar tracking mechanism. These findings emphasize that adjusting the panel's tilt angle is a key factor in optimizing the performance of portable solar power systems, particularly in tropical environments with varying solar radiation conditions. The results of this study can serve as a technical foundation for the development of efficient, lightweight, and adaptive portable solar panel systems for real-world field applications.

ARTICLE INFO

Article History:

Submitted November 2025

Accepted December 2025

Available online December 2025

Publication Date Dec 8, 2025

Keyword:

solar panel, portable off-grid, tilt angle, light intensity, energy efficiency

1. Pendahuluan

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling potensial dikembangkan di Indonesia. Letak geografis Indonesia yang berada di garis khatulistiwa menjadikannya menerima radiasi matahari sepanjang tahun dengan intensitas rata-rata 4–5,5 kWh/m² per hari ^[1,2]. Potensi ini memberikan peluang besar bagi pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) baik dalam skala besar maupun kecil. Di sisi lain, peningkatan konsumsi energi nasional dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil menuntut adanya inovasi teknologi energi bersih yang efisien dan mudah diimplementasikan di berbagai kondisi geografis ^[3].

Panel surya monokristalin saat ini menjadi pilihan utama dalam sistem PLTS karena memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan panel polikristalin, yaitu sekitar 18–22% ^[4,5]. Selain itu, jenis panel ini menunjukkan performa yang lebih stabil pada kondisi cahaya rendah, sehingga cocok digunakan di wilayah tropis yang sering mengalami variasi cuaca ^[6,7]. Meskipun demikian, kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan, di antaranya intensitas radiasi matahari, suhu permukaan ^[3,8,9], orientasi, dan sudut kemiringan panel terhadap arah datangnya sinar matahari.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menyoroti pentingnya pengaturan sudut kemiringan panel untuk meningkatkan efisiensi konversi energi. Misalnya, penelitian oleh Harie dan Rahmawati ^[10,11] menunjukkan bahwa penyesuaian sudut kemiringan 10–15° dapat meningkatkan daya keluaran hingga 12% pada sistem panel surya statis. Wahyu dan Nugroho ^[12,13] juga melaporkan bahwa sudut optimal panel di wilayah tropis berkisar antara 25–35°, tergantung pada lintang geografis dan kondisi atmosfer. Sementara itu, Hardianto ^[14,15] menambahkan bahwa kombinasi antara sudut kemiringan dan kondisi intensitas cahaya alami secara simultan memengaruhi stabilitas daya keluaran panel surya. Meskipun berbagai studi telah dilakukan, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada sistem panel surya stasioner yang dipasang secara permanen di atap bangunan atau struktur tetap, dengan kondisi uji yang terkontrol dan relatif konstan ^[16,17].

Namun demikian, mayoritas penelitian tersebut dilakukan pada panel surya statis yang dipasang secara permanen di atap bangunan atau struktur tetap ^[14,15]. Pola penelitian seperti ini memiliki beberapa kelemahan. Pertama, orientasi panel tidak berubah, sehingga data yang diperoleh tidak merepresentasikan kondisi dinamis di lapangan ketika panel sering berpindah lokasi. Kedua, banyak penelitian

menggunakan sumber cahaya buatan atau simulasi perangkat lunak ^[18,19], sehingga tidak sepenuhnya menggambarkan variasi intensitas cahaya alami. Ketiga, sebagian besar panel yang dikaji memiliki mekanisme kemiringan tetap, sehingga tidak memberikan gambaran performa panel pada berbagai sudut.

Keterbatasan tersebut berbeda dengan aplikasi pembangkit listrik *off-grid* portabel ^[20], di mana panel surya harus dioperasikan secara fleksibel pada berbagai lokasi, kondisi cuaca, dan orientasi penempatan. Pada sistem portabel, mekanisme pelacakan cahaya otomatis (*sun tracking*) umumnya tidak digunakan karena alasan biaya, konsumsi daya, serta keterbatasan ruang pada desain yang kompak. Oleh sebab itu, penyesuaian sudut kemiringan secara manual merupakan pendekatan yang paling praktis untuk optimasi penerimaan cahaya.

Upaya optimalisasi ini menjadi penting mengingat pengaturan sudut kemiringan panel dapat meningkatkan penyerapan radiasi matahari tanpa perlu menambah jumlah panel atau memperluas permukaan instalasi. Beberapa studi terdahulu telah membahas topik serupa, namun sebagian besar masih terbatas pada simulasi berbasis perangkat lunak atau pengujian laboratorium dengan sumber cahaya buatan ^[18,19]. Kajian eksperimental langsung di lapangan menggunakan intensitas cahaya alami pada sistem portabel masih jarang dilakukan,

padahal hasilnya lebih merepresentasikan kondisi aktual di lapangan.

Dalam penelitian ini digunakan variasi sudut kemiringan 0° hingga 60° dengan rentang variasi sudut kemiringan 5 derajat. Hal ini bertujuan untuk melihat kinerja panel surya pada kondisi optimum maupun kondisi non-optimum ^[5,21,22], baik pada deviasi sudut yang lebih landai maupun lebih curam, sehingga dapat diamati bagaimana perubahan orientasi yang tidak ideal memengaruhi respons daya keluaran panel. Sudut 0° mewakili kondisi panel diletakkan datar, yang merupakan praktik umum pada penggunaan panel portabel di lapangan ketika tidak tersedia penopang sudut, sedangkan sudut 60° dipilih untuk menguji performa panel pada kondisi kemiringan ekstrem yang sering terjadi akibat keterbatasan posisi atau orientasi saat pemasangan. Dengan pemilihan variasi sudut tersebut, penelitian ini tidak hanya bertujuan menentukan sudut kemiringan yang paling optimal, tetapi juga mengevaluasi rentang toleransi performa panel surya ketika digunakan.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penerapan metode eksperimental di lapangan untuk sistem pembangkit listrik *portable* sistem pembangkit *off-grid*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan desain sistem panel surya portabel yang efisien, adaptif terhadap

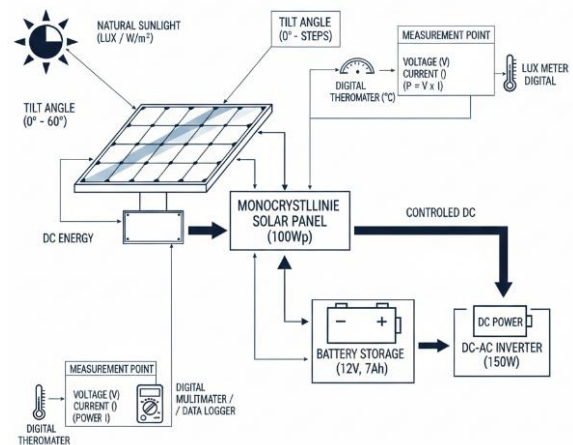
kondisi geografis tropis, dan mudah diterapkan pada berbagai kebutuhan lapangan seperti kegiatan kelautan, perikanan, militer, maupun penggunaan di daerah terpencil yang belum terjangkau listrik konvensional.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk menganalisis pengaruh sudut kemiringan dan intensitas cahaya alami terhadap kinerja panel surya monokristalin pada sistem pembangkit listrik *off-grid* portabel. Pengujian dilakukan secara langsung di lapangan dengan memanfaatkan kondisi radiasi matahari alami tanpa penggunaan sumber cahaya buatan. Metode ini dipilih untuk memperoleh data empiris yang lebih representatif terhadap kondisi operasi aktual sistem panel surya portabel di lingkungan tropis.

2.1. Desain Sistem

Sistem pembangkit listrik yang digunakan dirancang dalam bentuk modul portabel, terdiri atas satu unit panel surya monokristalin berkapasitas 100 Wp, *solar charge controller* 12 V 10 A, baterai penyimpanan 12 V 7 Ah, dan inverter DC–AC berdaya 150 W. Panel surya dipasang pada rangka aluminium yang dapat diatur tingkat kemiringannya secara bertahap menggunakan engsel penyangga yang fleksibel seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Desain sistem prototipe

2.2. Variabel dan Alat Ukur

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah sudut kemiringan panel surya dan intensitas cahaya alami. Variasi sudut kemiringan yang digunakan adalah 0° hingga 60° dengan rentang variasi sudut kemiringan 5 derajat. Pemilihan rentang tersebut didasarkan pada penelitian sebelumnya [23–25]. Variabel terikat meliputi tegangan keluaran (V), arus keluaran (I), serta daya listrik (P) yang dihasilkan panel surya. Parameter-parameter ini diukur secara langsung pada terminal keluaran panel dengan menggunakan multimeter digital dan data logger. Suhu lingkungan juga dicatat sebagai variabel pendukung menggunakan termometer digital guna memastikan kondisi pengujian berlangsung relatif konstan. Selain itu, intensitas cahaya alami (lux yang nantinya akan dikonversi menjadi W/m²) dicatat menggunakan lux meter digital untuk setiap sudut kemiringan yang diuji.

Intensitas cahaya yang diukur dalam satuan lux kemudian dikonversi menjadi irradiansi (W/m^2) menggunakan persamaan:

$$G = \frac{\text{Lux}}{120} \quad (1)$$

Konversi ini digunakan karena pada radiasi matahari alami, 1 W/m^2 setara dengan sekitar 120 lux berdasarkan karakteristik spektrum cahaya matahari menurut standar CIE. Nilai W/m^2 yang digunakan dalam analisis telah mewakili irradiansi sesungguhnya yang diterima panel.

2.3. Lokasi dan Waktu Penelitian

Pengujian dilakukan di area terbuka dengan paparan sinar matahari langsung tanpa halangan bayangan, berlokasi di atas *rooftop* Laboratorium Teknik, Politeknik Maritim Negeri Indonesia. Pengujian dilaksanakan selama tiga hari berturut-turut pada kondisi cuaca cerah antara pukul 09.00 hingga 15.00 WIB, sesuai dengan periode intensitas radiasi tertinggi di wilayah tersebut. Pengukuran dilakukan setiap 15 menit untuk setiap sudut kemiringan, sehingga diperoleh data yang cukup representatif terhadap variasi intensitas cahaya harian.

2.4. Parameter Pengujian

Nilai daya keluaran panel surya pada setiap kondisi dihitung menggunakan persamaan dasar:

$$P = V \times I \quad (2)$$

Dengan P menyatakan daya *output* panel surya (watt), V adalah tegangan keluaran

(volt), dan I adalah arus keluaran (ampere). Melalui pendekatan ini, diperoleh hubungan kuantitatif antara sudut kemiringan, intensitas cahaya, dan daya keluaran panel surya, yang menjadi dasar dalam analisis kinerja panel surya *off-grid portable* yang dikembangkan.

Efisiensi sistem dihitung berdasarkan perbandingan daya keluaran aktual terhadap daya nominal panel:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

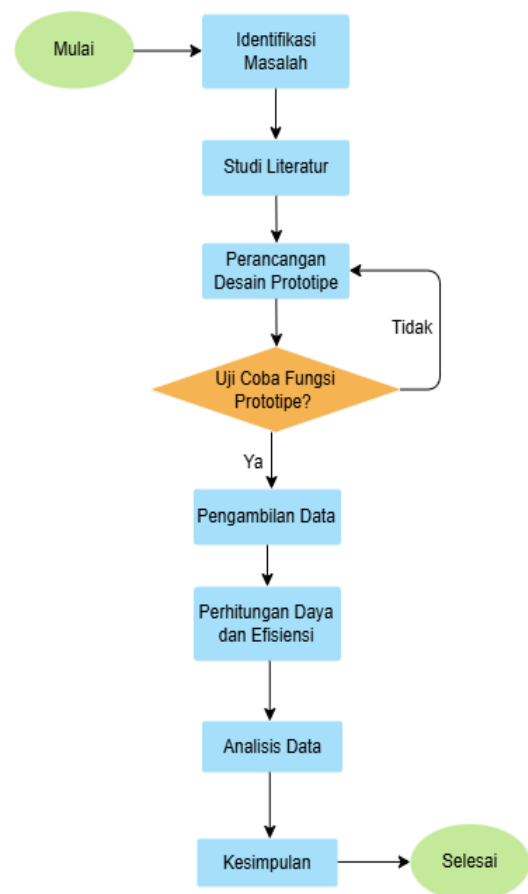
Data yang diperoleh dari hasil pengukuran dianalisis secara deskriptif kuantitatif untuk menentukan hubungan antara sudut kemiringan, intensitas cahaya, dan daya keluaran panel. Setiap set data diplot dalam bentuk grafik untuk memvisualisasikan tren perubahan daya terhadap sudut dan intensitas.

Analisis dilakukan dengan mengidentifikasi sudut kemiringan optimum, yaitu sudut di mana daya keluaran mencapai nilai maksimum dengan efisiensi tertinggi. Selain itu, dilakukan perbandingan hasil dengan data intensitas cahaya harian untuk melihat konsistensi performa sistem di bawah kondisi lingkungan tropis. Hasil analisis ini digunakan untuk merumuskan rekomendasi teknis dalam pengaturan sudut panel surya *portable* agar efisiensi konversi energi dapat dimaksimalkan

2.5. Prosedur Pengujian

Alur penelitian secara keseluruhan digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 2 yang mencakup tahapan mulai dari perancangan hingga pengujian sistem untuk memperoleh data kinerja secara menyeluruh. Prototipe memiliki kapasitas 100 Wp dengan konfigurasi rangka aluminium ringan yang dapat disesuaikan sudut kemiringannya. Desain ini memungkinkan pengujian dilakukan secara fleksibel untuk memperoleh data *real-time* terhadap variasi intensitas cahaya matahari alami. Selain itu, sistem dilengkapi dengan alat ukur digital untuk memantau tegangan, arus, dan intensitas cahaya secara simultan.

Sebelum pengujian dimulai, sistem dirakit dan diperiksa untuk memastikan tidak terdapat hambatan atau kehilangan energi pada sambungan listrik. Panel surya kemudian dipasang dengan sudut kemiringan awal 0° dan dihadapkan ke arah utara untuk mengikuti lintasan harian matahari di belahan bumi selatan. Proses pengujian dilakukan di bawah kondisi cahaya matahari alami untuk memperoleh hasil yang representatif terhadap kondisi lapangan. Pada tahap awal, panel surya diatur pada sudut kemiringan 0° dan dibiarkan beroperasi selama sekitar 15 menit hingga mencapai kondisi termal yang stabil. Setelah stabil, dilakukan pencatatan parameter utama meliputi intensitas cahaya, tegangan keluaran, dan arus keluaran.



Gambar 2. Alur penelitian

Selanjutnya, sudut kemiringan panel diubah secara bertahap ke posisi mulai dari 0° hingga 60° dengan rentang sudut pengukuran sebesar 5° . Pada setiap perubahan sudut, prosedur pengukuran diulangi dengan cara yang sama untuk menjaga konsistensi data. Setiap pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali untuk memperoleh nilai rata-rata yang lebih akurat dan meminimalkan kesalahan pengamatan akibat fluktuasi intensitas cahaya atau kondisi lingkungan.

Pengujian dilakukan di ruang terbuka pada kondisi cuaca cerah tanpa bayangan langsung untuk menjamin hasil pengukuran yang representatif terhadap kondisi aktual radiasi

matahari. Sebelum dilakukan pengambilan data utama, prototipe sistem pembangkit listrik tenaga surya portabel menjalani tahap uji coba awal, untuk memastikan seluruh komponen bekerja dengan baik dan memberikan hasil pengukuran yang stabil. Uji coba ini meliputi pemeriksaan koneksi listrik antara panel surya, pengontrol daya, dan alat ukur digital, serta pengujian fungsi sensor intensitas cahaya dan multimeter yang digunakan.

Prototipe kemudian dioperasikan pada kondisi radiasi matahari sedang hingga tinggi untuk memastikan sistem dapat mencapai kondisi tunak (*steady state*) dalam waktu yang relatif singkat. Hasil pengujian awal menunjukkan bahwa panel surya ini mampu menghasilkan tegangan stabil pada kisaran 16–17 volt setelah sekitar 10–15 menit penyinaran kontinu.

Selain memastikan kestabilan keluaran daya, tahap uji coba ini juga digunakan untuk mengevaluasi respon sistem terhadap perubahan sudut kemiringan panel. Penyesuaian mekanis pada rangka portabel dilakukan untuk memastikan sudut dapat diubah secara presisi dari 0° hingga 60° dengan penguncian yang aman selama proses pengukuran. Observasi visual terhadap refleksi dan distribusi cahaya pada permukaan panel membantu menentukan rentang sudut yang paling efektif untuk pengujian berikutnya. Oleh karena itu, hasil

dari tahap uji coba ini memastikan bahwa sistem dalam kondisi optimal dan seluruh instrumen pengukuran berfungsi akurat sebelum dilakukan pengambilan data utama di lapangan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.



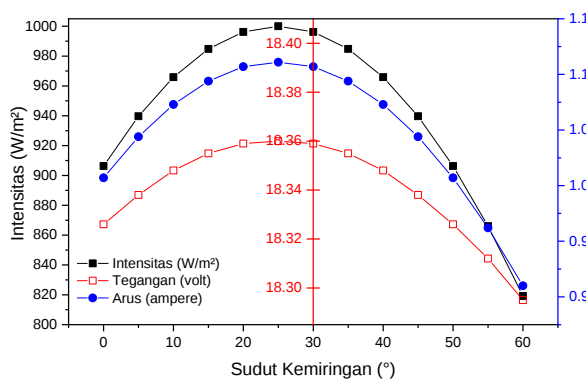
Gambar 3. Desain prototipe *portable*

Selama pengujian, dilakukan pengambilan data terhadap perubahan tegangan dan arus yang dihasilkan pada setiap variasi sudut kemiringan panel surya. Data yang terkumpul kemudian dianalisis untuk mengetahui hubungan antara sudut kemiringan, intensitas cahaya, dan daya keluaran yang dihasilkan oleh panel. Pengamatan visual terhadap prototipe menunjukkan bahwa perubahan sudut sangat memengaruhi arah pantulan dan penyerapan cahaya pada permukaan panel.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hubungan Sudut Kemiringan pada Kinerja Panel Surya

Hasil pengujian pengaruh sudut kemiringan terhadap kinerja panel surya ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh sudut kemiringan terhadap intensitas, arus dan tegangan

Berdasarkan gambar 4, diperoleh bahwa daya *output* meningkat secara bertahap seiring bertambahnya sudut kemiringan hingga mencapai titik maksimum pada sudut 25°, kemudian menurun pada sudut yang lebih besar. Fenomena ini sesuai dengan prinsip proyeksi intensitas radiasi matahari terhadap bidang permukaan panel, di mana intensitas efektif radiasi yang diserap panel dapat dinyatakan sebagai:

$$I_{eff} = I_0 \cos \theta \quad (3)$$

dengan I_{eff} merupakan intensitas efektif yang diterima panel, I_0 intensitas radiasi matahari langsung, dan θ sudut antara arah sinar matahari dan garis normal permukaan panel. Pada posisi mendekati tegak lurus ($\theta \approx 0$), nilai $\cos \theta$ mendekati 1, sehingga

energi radiasi yang diserap mencapai maksimum.

Secara fisis, kondisi optimum pada sudut 25° dapat dijelaskan berdasarkan posisi lintang geografis lokasi pengujian yang berada di wilayah tropis, di mana sudut datang sinar matahari pada siang hari pukul 11.00–13.00 WIB saat pengambilan data dilakukan. Sudut kemiringan ini berada pada kisaran 20°–35°, hal ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya [23–25] yang menegaskan bahwa sudut optimal panel surya di daerah tropis berada sekitar nilai lintang setempat $\pm 5^\circ$. Beberapa penelitian terdahulu, seperti oleh Nugroho dan Suprajitno [13,26] juga menunjukkan bahwa pada wilayah tropis, panel surya akan mencapai efisiensi maksimum ketika sudut kemiringannya disesuaikan dengan lintang tempat ditambah $\pm 5^\circ$, karena konfigurasi tersebut memaksimalkan radiasi global (*direct and diffuse*). Hasil penelitian ini memperkuat temuan tersebut, di mana posisi kemiringan 25° memberikan hasil paling optimal. Di samping itu, temuan penelitian ini juga memberikan kontribusi baru (*novelty*) karena pengujian dilakukan pada sistem portabel, bukan sistem statis, sehingga sudut optimum yang diperoleh tidak hanya mencerminkan potensi energi maksimum, tetapi juga rentang toleransi performa ketika panel dipindah-pindah dan tidak selalu berada pada posisi ideal.

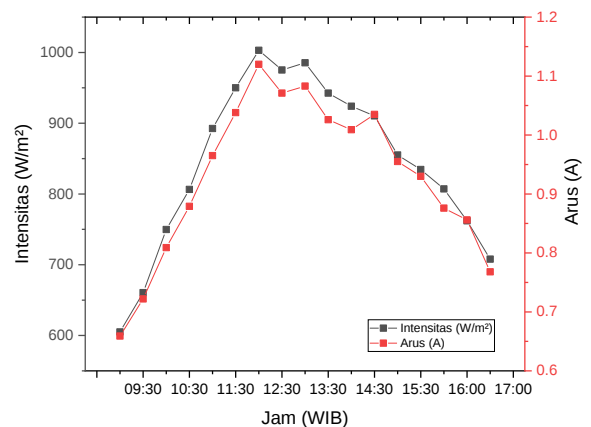
Selain itu, hasil pengukuran menunjukkan bahwa suhu panel meningkat dari 34,1°C pada sudut 0° menjadi 35,0°C pada sudut 20–25°, kemudian menurun kembali pada sudut yang lebih besar. Variasi suhu ini relevan karena kenaikan suhu semikonduktor umumnya menurunkan tegangan keluaran panel. Namun, dalam penelitian ini pengaruh suhu relatif kecil, menunjukkan bahwa panel monokristalin pada sistem portabel masih mampu mempertahankan performa stabil pada fluktuasi suhu ringan di lapangan. Dengan demikian, sudut 25° tidak hanya terbukti paling optimal, tetapi juga paling adaptif terhadap perubahan intensitas dan temperatur yang terjadi secara alami pada penggunaan panel surya portabel.

3.2. Pengaruh Intensitas Cahaya terhadap Kinerja Panel Surya

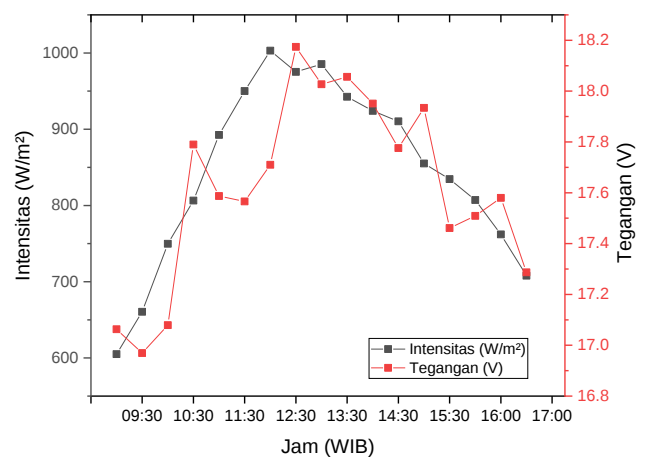
Data hasil pengukuran yang meliputi sudut kemiringan, intensitas cahaya, tegangan, arus, daya serta suhu panel secara lengkap disajikan pada Tabel 1. Pada tabel 1 terlihat bahwa peningkatan sudut kemiringan dari 0° ke 25° menghasilkan peningkatan daya keluaran dari 18,45 W menjadi 20,39 W, atau meningkat sekitar 10,6%. Setelah melewati sudut optimum tersebut, daya menurun secara bertahap hingga mencapai 16,65 W pada sudut 60°, yang berarti terjadi penurunan sekitar 18% dibandingkan kondisi optimum seperti yang ditunjukkan pada gambar 5 dan 6.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Kinerja Panel

Surya					
Sudut (°)	Intens. Cahaya (W/m ²)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Suhu Panel (°C)
0	906.3	18.33	1.01	18.45	34.1
5	939.7	18.34	1.00	19.14	34.4
10	965.9	18.35	1.07	19.68	34.7
15	984.8	18.36	1.09	20.08	34.8
20	996.2	18.36	1.10	20.32	35.0
25	1003.0	18.36	1.11	20.39	35.0
30	996.2	18.35	1.10	20.32	35.0
35	984.8	18.35	1.09	20.08	34.8
40	965.9	18.35	1.07	19.68	34.7
45	939.7	18.34	1.04	19.14	34.4
50	906.3	18.33	1.00	18.45	34.1
55	866.0	18.31	0.96	17.61	33.7
60	819.2	18.29	0.91	17.55	33.2



Gambar 5. Pengaruh intensitas terhadap arus



Gambar 6. Pengaruh intensitas terhadap tegangan

Hubungan antara intensitas cahaya dan parameter keluaran (tegangan dan arus) menunjukkan karakteristik yang sejalan dengan teori dasar efek fotovoltaiik. Dalam sel surya berbasis silikon monokristalin, foton yang memiliki energi lebih besar dari energi gap (*bandgap*) silikon (1,12 eV) akan menumbuk elektron dalam pita valensi dan memindahkannya ke pita konduksi, menghasilkan pasangan elektron-hole yang kemudian digerakkan oleh medan listrik internal dalam persambungan p-n (*p-n junction*).

Proses ini menyebabkan kenaikan arus keluaran (I) seiring meningkatnya intensitas cahaya (G), sedangkan tegangan (V) meningkat secara lebih lambat. Hubungan antara arus dan intensitas cahaya dapat dituliskan secara empiris dengan:

$$I_{ph} = k \times G \quad (5)$$

Dengan I_{ph} adalah arus foton yang dihasilkan dan k merupakan konstanta proporsionalitas yang bergantung pada luas permukaan aktif dan efisiensi material semikonduktor. Dalam hasil pengujian, perubahan intensitas dari 819,2 W/m² pada sudut 60° menjadi 1003,0 W/m² pada sudut 25° meningkatkan arus dari 0,91 A menjadi 1,11 A, atau naik sekitar 22%. Sedangkan tegangan hanya berubah sedikit dari 18,295 V menjadi 18,36 V (naik <0,4%). Hal ini menunjukkan bahwa sensitivitas arus terhadap intensitas jauh lebih tinggi

dibandingkan tegangan, sebagaimana dijelaskan dalam karakteristik I-V sel surya:

$$V = V_{oc} - nV_T \ln \left(1 + \frac{I}{I_0} \right) \quad (6)$$

di mana V_T adalah tegangan termal I_0 dan arus saturasi balik.

Hasil pengukuran ini mengindikasikan bahwa fluktuasi intensitas (misalnya akibat pergerakan awan atau orientasi panel yang berubah) berpengaruh lebih besar terhadap arus dan daya keluaran dibandingkan tegangan. Oleh karena itu, pengaturan orientasi dan pemantauan intensitas secara *real-time* menjadi penting untuk menjaga kestabilan daya pada sistem *off-grid*.

3.3. Analisis Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem dihitung berdasarkan perbandingan antara daya keluaran aktual terhadap daya radiasi matahari yang diterima oleh permukaan panel surya. Dengan menggunakan panel surya monokristalin berkapasitas 100 Wp, pengukuran dilakukan pada kondisi alami dengan intensitas tertinggi sebesar 1003 W/m² dan daya keluaran maksimum 20,39 W pada sudut kemiringan optimum 25°.

Secara matematis, efisiensi konversi energi dapat dihitung dengan persamaan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{G \times A} \times 100\% \quad (7)$$

Dengan η = efisiensi konversi panel surya (%), P_{out} adalah daya listrik keluaran maksimum (W), G adalah intensitas radiasi matahari (W/m²), dan A adalah luas aktif panel surya (m²).

Pada penelitian ini digunakan dua jenis nilai efisiensi yang perlu dibedakan dengan jelas. Pertama, efisiensi relatif terhadap daya nominal panel, yaitu rasio antara daya keluaran aktual yang terukur dengan daya nominal 50 Wp. Nilai ini tidak menggambarkan efisiensi fisik sel surya, namun dipakai untuk menunjukkan performa sistem portabel secara keseluruhan, termasuk pengaruh kerugian kabel, suhu panel, orientasi sudut, dan kondisi lapangan. Kedua, efisiensi konversi fotovoltaik aktual, yaitu efisiensi yang diperoleh dari perbandingan antara daya keluaran panel dengan daya radiasi matahari yang diterima panel ($G \times A$). Nilai ini mewakili efisiensi sesungguhnya dari proses konversi energi fotovoltaik. Pada manuskrip ini, nilai efisiensi yang disajikan merujuk pada efisiensi sistem portabel sehingga mencerminkan kondisi operasi riil di lapangan.

Berdasarkan data spesifikasi panel 100 Wp dengan luas efektif sekitar 0,45 m², maka:

$$\eta = \frac{20,39}{1003 \times 0,45} \times 100\% = 4,52\%$$

Nilai efisiensi sebesar 4,5% ini merupakan efisiensi aktual sistem portabel secara keseluruhan, yang mencakup berbagai sumber kehilangan energi selama pengujian. Nilai ini dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis. Pertama, resistansi kabel dan konektor menyebabkan penurunan tegangan dan arus, terutama pada sistem portabel yang

menggunakan kabel fleksibel dengan panjang bervariasi. Kedua, intensitas radiasi matahari tidak selalu datang tegak lurus ke permukaan panel, sehingga komponen radiasi efektif yang diserap panel menurun sesuai persamaan proyeksi $\cos \theta$. Ketiga, suhu panel yang meningkat hingga sekitar 35°C turut menurunkan tegangan keluaran, karena material silikon memiliki koefisien temperatur negatif (sekitar $-0,45\%/^{\circ}\text{C}$). Hal ini dikarenakan tegangan panel juga dipengaruhi oleh suhu (*temperature coefficient*)^[8]. Artinya, setiap kenaikan 1°C di atas temperatur standar 25°C akan menurunkan tegangan sekitar 0,45%, sehingga pada kenaikan 10°C terjadi penurunan tegangan mendekati 4,5%. Akumulasi dari seluruh faktor tersebut menyebabkan efisiensi panel tidak mencapai nilai idealnya, sehingga efisiensi sistem portabel pada pengujian ini tercatat berada pada kisaran 4–5%.

Jika efisiensi dihitung terhadap daya nominal panel (100 Wp), maka rasio keluaran aktual terhadap nominal adalah:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{nom}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\eta = \frac{20,39}{100} \times 100\% = 20,4\%$$

Nilai 20,39 % ini menggambarkan performa relatif sistem dibandingkan kapasitas maksimum teoritisnya, dan tergolong baik untuk sistem portabel *off-grid* yang diuji di bawah paparan cahaya matahari tanpa pelacak posisi matahari (*sun tracker*).

Efisiensi aktual konversi energi sebesar 4,5% dihitung terhadap daya radiasi matahari yang diterima, sedangkan efisiensi relatif sebesar 20,39% menunjukkan perbandingan terhadap daya nominal panel 100 Wp.

Menurut teori konversi energi fotovoltaik, efisiensi maksimum panel monokristalin pada kondisi *Standard Test Condition* (STC) (intensitas 1000 W/m^2 , suhu 25°C) dapat mencapai 18–22% tergantung jenis sel dan kualitas lapisan antirefleksi. Nilai efisiensi aktual sebesar 4,5% masih berada di bawah efisiensi teoritis STC (18–22%), namun tergolong tinggi untuk kondisi lapangan alami tanpa sistem pelacak dan pendinginan aktif. Efisiensi relatif sebesar 20,39% terhadap kapasitas nominal menunjukkan performa yang stabil dan efisien.

Kinerja ini juga memperlihatkan stabilitas tegangan yang baik di kisaran 18,3–18,4 V, dengan fluktuasi arus yang mengikuti perubahan intensitas cahaya. Hal ini memperkuat keunggulan sel monokristalin, yang memiliki struktur atom homogen dengan hambatan batas butir (*grain boundary*) yang sangat rendah, sehingga memungkinkan aliran elektron yang lebih efisien dibandingkan sel polikristalin.

Oleh karena itu, prototipe panel surya monokristalin 100 Wp ini menunjukkan kinerja efisien dan stabil pada sudut kemiringan 25° , yang sesuai dengan lintang geografis wilayah tropis. Temuan ini memiliki implikasi praktis penting bagi

penerapan di lapangan, terutama untuk aplikasi kelautan, penelitian lapangan, dan daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional.

4. Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sudut kemiringan panel surya memiliki pengaruh signifikan terhadap daya keluaran sistem pembangkit listrik portabel *off-grid*. Berdasarkan hasil pengujian, daya maksimum sebesar 20,39 W dicapai pada sudut kemiringan 25° dengan intensitas cahaya alami sekitar 1003 W/m^2 , yang sesuai dengan karakteristik geografis wilayah tropis. Hubungan antara intensitas cahaya dan daya keluaran menunjukkan kecenderungan hampir linier, dengan pengaruh yang lebih dominan terhadap arus dibandingkan tegangan.

Efisiensi relatif sistem terhadap daya nominal panel (100 Wp) mencapai 20,39%, menunjukkan bahwa sistem bekerja dengan performa tinggi meskipun tanpa pelacak posisi matahari dan dalam kondisi lingkungan alami yang fluktuatif. Hasil ini memperkuat bahwa pengaturan sudut kemiringan merupakan faktor kunci dalam mengoptimalkan kinerja panel surya di lapangan, khususnya untuk sistem portabel berbasis panel monokristalin, yang dikenal memiliki stabilitas tegangan dan efisiensi konversi energi yang lebih baik dibandingkan tipe polikristalin.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan pengembangan sistem pelacak matahari otomatis yang dapat menyesuaikan sudut kemiringan secara dinamis sesuai pergerakan matahari, serta integrasi sensor intensitas cahaya dan pengendali berbasis mikrokontroler agar sistem bekerja lebih adaptif. Selain itu, perlu dilakukan analisis pengaruh suhu dan uji performa di berbagai lokasi untuk memperoleh model efisiensi yang lebih komprehensif dan aplikatif bagi penerapan energi surya di wilayah tropis.

5. Referensi

- [1] Hartanti, M., & Amilian, D. (2025). Efek Fotolistrik dan Aplikasinya Dalam Teknologi Surya. *Journal of Science and Technology: Alpha*, 1(2), 48–54. <https://doi.org/10.70716/alpha.v1i2.174>
- [2] Marpaung, M. D., Debtan Marpaung, M., & Sufriadi Purba, J. (2024). Analisis Pengaruh Variasi Sudut Kemiringan Panel Surya Untuk Pemanas Air Dengan Sumber Energi Surya. *JURNAL MEDIA INFORMATIKA*, 6(1), 71–82.
- [3] Kiswanto, H. (2022). *Fisika Lingkungan: Memahami Alam Dengan Fisika*. Syiah Kuala University Press. https://books.google.co.id/books?id=J_dxEAAAQBAJ
- [4] Elgi Octavianto, D., Fauzi Rahman, A., Firdaus Adji Arrazaq, A., Sondia, F., Ulfiana, A., Ekayuliana, A., Studi Teknik Konversi Energi, P., Teknik Mesin, J., Negeri Jakarta, P., & A Siwabessy, J. G. (2021). Analisa Perbandingan Daya Keluaran Solar Panel Dengan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (Surya-Angin). In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*. <http://prosiding.pnj.ac.id>
- [5] Hariningrum, R. (2021). Analisa Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya100 WP Terhadap Daya Listrik. *Marine Science and Technology Journal*, 1(2), 67–76. <https://doi.org/10.31331/maristec.v1i2>
- [6] Custer, J., & Lianda, J. (2018). Rancang Bangun Pembangkit Listrik Hybrid Angin Dan Surya di Pulau Bengkalis. *Jurnal PROTek*, 5(2), 67–71.
- [7] Hidayanti, D., Dewangga, G., M.P., P. Y., Sarita, I., Sumarno, F. G., & W., W. P. (2019). Rancang Bangun Pembangkit Hybrid Tenaga Angin dan Surya dengan Penggerak Otomatis pada Panel Surya. *EKSERGI: Jurnal Teknik Energi*, 15(3), 93–101.
- [8] Kiswanto, H. (2022). *Fisika Dasar 1*. Syiah Kuala University Press. https://books.google.co.id/books?id=P_dxEAAAQBAJ
- [9] Matalata, H., Johar, L. W., Yulianto, D., Sahputra, R., & Aldiansyah, R. R. (2025). ANALISA PRODUKSI ENERGI PHOTOVOLTAIC SEBAGAI INFRASTRUKTUR PENGISIAN DAYA MOBIL LISTRIK DI KANTOR DPRD MUARO JAMBI. *Jurnal Teknologi Dan Vokasi*, 3(1), 49–56.
- [10] Harie Satiyadi, J., Muhamad Hudan, R., & Asrori, A. (2024). Analisis Pengaruh Suhu Panel

- Surya Terhadap Output Panel Performance. *Journal of Mechanical Engineering*, 1(1), 42–51.
<https://doi.org/10.47134/jme.v1i1.2189>
- [11] Rahmawati, Bayusari, I., & Mawarni, L. (2023). Desain Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Sumber Energi Alternatif pada. *Jurnal Rekayasa Elektro Sriwijaya*, 4(2), 73.
- [12] Wahyu Alisia Pratama, Mohammad Fatkhurrokhman, & Irwanto Irwanto. (2025). Pengaruh Azimuth terhadap Intensitas Cahaya, Tegangan, dan Arus Panel Surya 50 WP Off-Grid pada Program Match Fund Solar Cell UNTIRTA. *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Informatika*, 4(1), 94–106.
<https://doi.org/10.55606/jtmei.v4i1.4761>
- [13] Nugroho, B. A., Setyawan, F. X. A., & Yudamson, A. (2024). Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dengan Sudut Panel Optimal Sebagai Sumber Energi Listrik Pada Area Keramba Jaring Apung Padang Cermin. *JURNAL AMPLIFIER : JURNAL ILMIAH BIDANG TEKNIK ELEKTRO DAN KOMPUTER*, 14(1), 1–8.
<https://doi.org/10.33369/jamplifier.v14i1.31547>
- [14] Hardianto, M. andre, Putri, N. U., Pranita, E., & Dalimunthe, E. R. (2025). Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Terhadap Daya Keluaran Pada Panel Surya Jenis Polycrystalline 100 WP Menggunakan Regression Quadratic. *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 17(1), 72.
<https://doi.org/10.28989/angkasa.v17i1.2628>
- [15] Jutisya Putrih Senaen, Alfrie Rampengan, & Farly Tumimomor. (2023). Analisis Pengaruh Intensitas Radiasi Matahari Terhadap Tegangan Dan Arus Pada Panel Surya Di Universitas Negeri Manado. *Jurnal Arjuna : Publikasi Ilmu Pendidikan, Bahasa Dan Matematika*, 1(6), 220–231.
<https://doi.org/10.61132/arjuna.v1i6.327>
- [16] Kiswanto, H., Purwanto, P., Nurhidayati, I., Ari Putranto, W., & Susanto, S. (2024). Rancang Bangun Prototype Portable Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan Bayu dengan Sistem Hybrid. *Momentum*, 20(2), 124–131.
<https://doi.org/10.36499/jim.v20i1.11726>
- [17] Leticia Yorlanda, R., Daffa Alfarizi, M., Apriana, A., & Manggala, A. (2025). PENGARUH KAPASITAS PANEL SURYA DAN SUDUT KEMIRINGAN TERHADAP KINERJA SISTEM PLTS OFF GRID 12 VOLT. *Chemical Engineering Journal Storage*, 5(5), 729–743.
<https://doi.org/10.29103/cejs.v5i5.23905>
- [18] Devrifqi, U. M., & Mowaviq, M. I. (2021). Rancang Bangun Pembangkit Listrik Hybrid Tenaga Surya dan Bayu Untuk Simulasi Pompa Aerator Kolam 25 W. *Jurnal Ilmiah SUTET*, 11(1), 36–50.
<https://doi.org/10.33322/sutet.v11i1.1455>
- [19] Ramadhan, D. W., Nakhoda, I., & Agustini, N. P. (2020). Rancang

- Bangun Pembangkit Listrik Portable Tenaga Surya dan Angin Dengan Sistem Hybrid Untuk Tempat Pengungsian Bencana Alam. *Alinier Jurnal*, 1(2), 121–143. www.elektro.itn.ac.id
- [20] Sukandi, A., Ridwan, E., Andini, D., Naufal Gifari, H., Irawan, I., & Fikri Iriansyah, M. (2020). Rancang Bangun Kontroler Pembangkit Listrik Hybrid Angin Dan Surya Berbasis Arduino. *ProsidingSeminar Nasional Teknik Mesin*, 62–72. <http://jurnal.pnj.ac.id>
- [21] Widyawati Putri, S., Marausna, G., & Eko Prasetyo, E. (2022). ANALISIS PENGARUH INTENSITAS CAHAYA MATAHARI TERHADAP DAYA KELUARAN PADA PANEL SURYA. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 8(1), 29–37. <https://doi.org/10.56521/teknika.v8i1.442>
- [22] Aksa Seku Sidik, S., Vasco Tarigan, B., & Gusnawati. (2022). PENGARUH BESAR SUDUT CERMIN TERHADAP EFISIENSI PANEL SURYA. *Jurnal Fisika: Fisika Sains Dan Aplikasinya*, 7(1), 56–63.
- [23] Annam, C. (2022). *Sistem Kontrol dan Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Turbin Angin dan Modul Surya*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- [24] Aziz, H., Pawenary, & Sitorus, M. (2019). Analisis Hasil Uji Pembangkit Listrik Hybrid Turbin Angin 1kWh Dan Panel Surya 100 WP. *Jurnal Ilmiah SUTET*, 9(1), 16–25. <https://doi.org/10.33322/sutet.v9i1.384>
- [25] Suhamim, & Sjahmanto, M. (2025). Analisis Sudut Kemiringan Solar Cell sebagai Sistem Pembangkit Listrik Pada Mesin Peniris Bawang Goreng. *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*, 5(4).
- [26] Suprajitno, A., Utomo, S. B., Nugroho, D. D., & Elektro, J. T. (2022). Optimasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Energi Angin dan Surya Melalui Sistem Battery Charging Switching. *Cyclotron: Jurnal Teknik Elektro*, 5(1), 14–20.