

## ***Comparative Study of 10 Wp Solar Panel Performance with Mirror Reflectors at Various Angles***

### **Article History:**

*Received*  
28 November 2025

*Revised*  
6 January 2026

*Accepted*  
23 January 2026

**BASYARUDDIN ISMAIL HARAHAHAP, SEPTIA REFLY\*,  
DOLI BONARDO, BAVITRA, BIMBI ADYTIA WANATIRTA**

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman,  
Universitas Maritim Raja Ali Haji, Tanjungpinang, Indonesia  
Email: [septiarefly@umrah.ac.id](mailto:septiarefly@umrah.ac.id)

### **ABSTRAK**

*Peningkatan kinerja panel surya menghadapi tantangan berupa kenaikan suhu modul akibat peningkatan intensitas radiasi matahari. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi sudut reflektor cermin datar terhadap suhu permukaan dan kinerja listrik panel surya monokristalin 10 Wp menggunakan sistem akuisisi data berbasis ESP32 dengan sensor INA219 dan DS18B20. Pengujian reflektor dilakukan pada sudut 45°, 60°, dan 75° selama pukul 08.00–16.00 WIB. Hasil menunjukkan bahwa sudut reflektor 45° menghasilkan suhu terendah 60 °C, tegangan rata-rata 19,7–20,0 V, arus maksimum 120 mA, dan daya tertinggi sebesar 2,6 W. Sebaliknya, sudut 75° menyebabkan kenaikan suhu hingga sekitar 72 °C yang menurunkan performa listrik. Dengan demikian, sudut reflektor 45° merupakan konfigurasi optimal untuk panel surya berdaya rendah di lingkungan tropis panas.*

**Kata kunci:** daya keluaran; panel surya; reflektor cermin; sudut reflektor; suhu panel

### **ABSTRACT**

*Improving solar panel performance is challenging due to increasing of solar radiation. This study investigates the effect of variations in the angle of the flat mirror reflector on the surface temperature and electrical performance of a 10 Wp monocrystalline solar panel using an ESP32-based data acquisition system with INA219 and DS18B20 sensors. Reflector angles of 45°, 60°, and 75° were tested from 08:00 to 16:00 WIB. The results indicate that the 45° reflector produced the lowest temperature ( $\approx 60$  °C), the highest average voltage (19.7–20.0 V), maximum current of 120 mA, and peak power of 2.6 W. In contrast, the 75° angle increased the temperature to 72 °C and reduced the electrical output. The study concludes that a 45° reflector angle is optimal for low-power solar panels in hot tropical environments.*

**Keywords:** output power; solar panel; mirror reflector; reflector angle; panel temperature



## 1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan sektor kependudukan dan industri yang terus meningkat berdampak langsung pada kenaikan kebutuhan energi listrik, sementara pemanfaatan bahan bakar fosil masih mendominasi dan berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca. Kondisi ini mendorong pengembangan energi terbarukan, khususnya energi surya, sebagai alternatif yang berkelanjutan. Letak geografis Indonesia di wilayah khatulistiwa memberikan potensi radiasi matahari yang melimpah, dengan nilai *Global Horizontal Irradiation* (GHI) rata-rata sekitar 4,8 kWh/m<sup>2</sup> per hari (**Silalahi, dkk, 2021**). Panel surya monokristalin dipilih pada penelitian ini karena efisiensinya yang relatif tinggi (sekitar 18–23%). Namun, kinerja panel monokristalin sangat sensitif terhadap suhu operasi; setiap kenaikan suhu modul sebesar 1°C dapat menurunkan daya maksimum sekitar 0,4–0,5% (**Meng, dkk, 2021**)(**Sun, dkk, 2022**). Artinya, pada iklim tropis seperti di Tanjungpinang yang cenderung panas, peningkatan intensitas radiasi berpotensi berbanding lurus dengan kenaikan suhu modul, sehingga diperlukan strategi yang mempertahankan kestabilan suhu permukaan panel meskipun paparan sinar matahari mengalami peningkatan yang signifikan.

Salah satu strategi peningkatan penerimaan sinar matahari adalah penggunaan reflektor cermin di sekitar panel. Reflektor ini berfungsi memantulkan sinar matahari tambahan ke permukaan panel, sehingga meningkatkan intensitas radiasi yang diterima. Berbagai studi eksperimental menunjukkan bahwa penggunaan reflektor dapat menambah radiasi yang ditangkap dan meningkatkan daya keluaran panel PV secara signifikan (**Ismail, dkk, 2025**). Misalnya, Suryo et al. melaporkan bahwa pemasangan reflektor cermin aluminium pada sudut kemiringan 45° mampu menaikkan daya keluaran panel hingga 16,7% (**Suryo, dkk, 2023**). Efektivitas reflektor sangat dipengaruhi oleh jumlah sisi reflektor yang digunakan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan reflektor dua sisi (kiri–kanan atau atas–bawah) sudah mampu meningkatkan energi serapan secara signifikan, tetapi peningkatannya terbatas pada rentang sudut tertentu karena hanya sebagian fluks cahaya yang dapat diarahkan ke permukaan panel. Sebaliknya, konfigurasi reflektor empat sisi dapat memberikan konsentrasi cahaya yang lebih merata dari berbagai arah, terutama ketika posisi matahari berubah sepanjang hari. Namun, sistem empat sisi juga memiliki konsekuensi berupa potensi kenaikan suhu panel yang lebih tinggi serta kompleksitas penyesuaian sudut yang lebih besar, sehingga pemilihannya perlu disesuaikan dengan tujuan desain dan kondisi lingkungan (**Kim, dkk, 2021**), penggunaan reflektor relatif sederhana dan ekonomis, sehingga layak dipertimbangkan sebagai metode optimasi panel statis.

Dalam penelitian ini dipilih reflektor jenis cermin datar karena memiliki beberapa keunggulan praktis: (1) mudah diperoleh dan berbiaya rendah, (2) memantulkan sinar secara *specular* sehingga arah pantulan dapat diprediksi dan diatur secara presisi, (3) tidak memerlukan fabrikasi lengkung seperti reflektor parabolik atau *V-groove*, dan (4) dapat dipasang pada panel statis tanpa mekanisme pelacakan matahari kompleks. Dibandingkan dengan sistem pelacakan dua sumbu yang mahal (**Kim, dkk, 2021**), penggunaan reflektor cermin datar menawarkan metode optimasi yang lebih sederhana dan ekonomis untuk meningkatkan performa panel PV statis.

Berbagai penelitian sebelumnya telah meneliti penggunaan reflektor dan optimasi sudut panel untuk meningkatkan *output*. Contohnya, Huang dan Sun menemukan reflektor kompak mampu menaikkan daya hingga 23% pada panel dengan sudut kemiringan tertentu, dan studi lainnya melaporkan peningkatan energi listrik sekitar 8–12% melalui reflektor (**Thadani & Go, 2021**). Meskipun demikian, masih sedikit studi eksperimental yang secara sistematis menguji pengaruh variasi sudut reflektor datar pada panel surya monokristalin di lapangan,

khususnya di iklim tropis. Padahal, suhu operasi yang tinggi pada panel PV dapat mengurangi produksi energi secara signifikan (misalnya  $>5\%$  di iklim panas (**Sakti, dkk, 2022**), sehingga sangat penting menyeimbangkan peningkatan penerimaan cahaya dengan pengendalian suhu modul. Keterbatasan kajian ini menimbulkan urgensi untuk penelitian lebih lanjut di lokasi tropis seperti Tanjungpinang, dengan menganalisis kinerja daya, efisiensi, dan suhu panel 10 Wp berreflektor pada berbagai sudut. Penelitian ini diharapkan mengisi celah tersebut dengan memberikan rekomendasi sudut reflektor yang optimal untuk meningkatkan daya keluaran sekaligus menjaga kestabilan suhu operasional pada kondisi lokal.

Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji penggunaan reflektor pada panel surya, sebagian besar studi masih berfokus pada peningkatan intensitas radiasi tanpa meninjau secara komprehensif pengaruh kenaikan suhu modul terhadap performa listrik, khususnya pada panel berdaya rendah di iklim tropis. Penelitian ini memiliki kebaruan pada pengujian eksperimental langsung variasi sudut reflektor cermin datar terhadap parameter suhu, tegangan, arus, dan daya panel surya monokristalin 10 Wp dalam kondisi lingkungan tropis nyata. Kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan rekomendasi sudut reflektor optimal yang tidak hanya meningkatkan daya keluaran, tetapi juga mempertahankan kestabilan suhu operasi panel, sehingga relevan untuk aplikasi panel surya statis skala kecil di wilayah tropis.

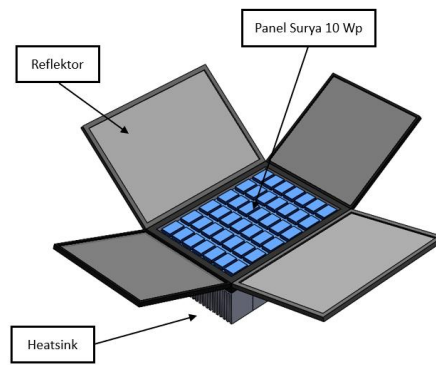
## 2. METODA

Penelitian ini menerapkan metode eksperimental untuk mengevaluasi kinerja panel surya dengan variasi sudut reflektor cermin datar pada kondisi iklim tropis di wilayah Tanjungpinang. Sistem pengujian dikembangkan untuk melakukan pemantauan parameter daya dan suhu secara otomatis melalui penggunaan sensor terintegrasi yang dikendalikan oleh mikrokontroler.

Panel surya monokristalin 10 Wp digunakan pada penelitian ini untuk mengubah energi pada cahaya matahari menjadi energi listrik. Pusat kendali dan pengolah data menggunakan mikrokontroler ESP32. Sensor INA219 digunakan untuk mengukur tegangan dan arus keluaran, sedangkan sensor DS18B20 digunakan untuk memantau suhu permukaan panel. Modul RTC DS3231 digunakan untuk memastikan pencatatan waktu yang akurat, dan modul Micro SD difungsikan untuk menyimpan data hasil pengukuran. Selain itu, sistem dilengkapi *heatsink* aluminium untuk pendinginan panel, lampu DC sebagai beban uji, serta reflektor cermin untuk meningkatkan intensitas cahaya yang diterima panel. Semua komponen elektronik dirakit pada papan PCB dan ditempatkan dalam box komponen untuk menjaga kestabilan dan keamanan sistem.

### 2.1 Perancangan Sistem dan Elektrikal

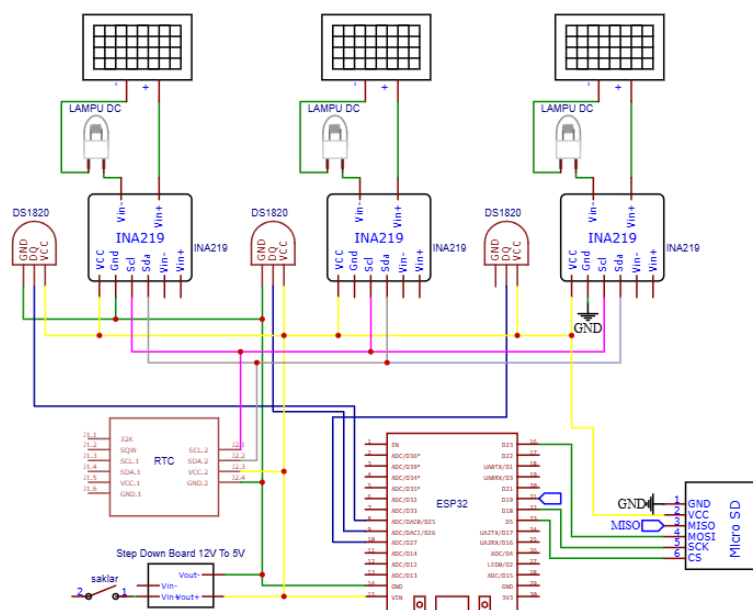
Sistem yang dirancang terbagi ke dalam tiga subsistem utama, yaitu bagian *input*, proses, dan *output*. Subsistem *input* terdiri atas sensor INA219 untuk pengukuran tegangan dan arus serta sensor DS18B20 untuk pemantauan suhu, yang dilengkapi dengan modul RTC sebagai penanda waktu pengambilan data. Pada subsistem proses, mikrokontroler ESP32 berperan sebagai pusat kendali untuk mengakuisisi dan mengolah data dari seluruh sensor. Selanjutnya, data hasil pengukuran disimpan pada media penyimpanan kartu SD melalui modul *Micro SD* sebagai bagian *output*. Desain mekanik sistem, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, menggunakan rangka besi berbentuk kotak yang berfungsi sebagai struktur penopang panel surya dan reflektor.



**Gambar 1. Desain panel surya, reflektor, dan *heatsink***

Reflektor cermin berukuran 36 cm × 25 cm dipasang dengan sudut kemiringan yang dapat diubah, yaitu 45°, 60°, dan 75°, sesuai dengan variasi pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini. Variasi sudut tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan sudut reflektor terhadap intensitas penerimaan cahaya dan performa daya keluaran panel surya. Reflektor memantulkan sinar matahari ke permukaan panel untuk meningkatkan efisiensi penyerapan cahaya.

Sistem pendingin menggunakan *heatsink* aluminium yang ditempatkan di bagian bawah panel, berfungsi mengurangi suhu operasional dan mencegah penurunan efisiensi akibat panas berlebih. Sensor suhu dipasang di antara *heatsink* dan panel untuk memperoleh data suhu aktual secara langsung. Rangkaian elektrik yang ditunjukkan pada Gambar 2 memperlihatkan integrasi antara sensor-sensor pengukuran dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali. Sensor INA219 terhubung ke panel surya untuk membaca tegangan dan arus keluaran, sedangkan sensor DS18B20 mengukur suhu kerja panel. Mikrokontroler kemudian mengolah data tersebut dan menambahkan informasi waktu dari RTC sebelum menyimpannya ke kartu SD. Sistem ini juga dilengkapi *step-down converter* untuk menurunkan tegangan dari adaptor, serta lampu DC sebagai beban uji guna menilai performa daya panel secara nyata.



**Gambar 2. Wiring Diagram Sistem Elektrikal**

## 2.2 Pengujian

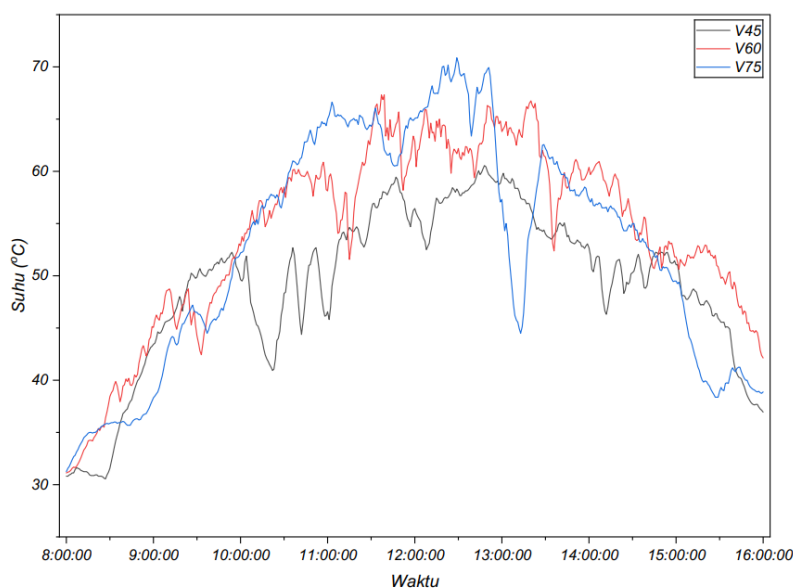
Pengujian dilakukan dengan memasang panel surya pada rangka besi yang stabil dengan orientasi *azimuth* yang dibuat seragam untuk seluruh konfigurasi pengujian. Reflektor cermin datar berukuran 36 cm × 25 cm dipasang pada beberapa variasi sudut kemiringan terhadap bidang horizontal panel, yaitu 45°, 60°, dan 75°. Setiap variasi sudut diuji selama lima hari pengamatan dengan rentang waktu pencatatan data dari pukul 08:00 hingga 16:00 WIB. Selama pengujian, parameter tegangan, arus, dan suhu panel direkam secara kontinu, sedangkan kondisi cuaca umum diamati secara visual dan dicatat sebagai data pendukung. Beban berupa lampu DC digunakan untuk merepresentasikan kondisi operasi nyata panel surya, sementara *heatsink* aluminium dipasang pada bagian bawah panel guna membantu proses pelepasan panas selama pengujian berlangsung.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Pengaruh Sudut Reflektor terhadap Suhu Permukaan Panel Surya

Hasil pengukuran suhu permukaan panel surya pada berbagai sudut reflektor ditunjukkan pada Gambar 3. Grafik tersebut memperlihatkan profil perubahan suhu selama periode pengujian harian dengan sudut reflektor 45°, 60°, dan 75°. Secara umum, suhu panel meningkat seiring bertambahnya intensitas radiasi matahari sejak pagi hari yang bertepatan dengan waktu siang hari (sekitar pukul 12:00–13:00 WIB). Setelah melewati puncaknya, suhu panel menurun secara bertahap hingga sore hari mengikuti penurunan intensitas radiasi (**Sun, dkk, 2022**).

Dari hasil pengujian tersebut terlihat bahwa peningkatan sudut reflektor berpengaruh terhadap kenaikan suhu kerja panel. Panel dengan reflektor pada sudut 75° menunjukkan suhu permukaan yang paling tinggi, mencapai 72°C, sedangkan pada sudut 60° suhu puncak berada di 67°C, dan pada sudut 45° suhu maksimumnya tercatat sekitar 60°C. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar sudut reflektor terhadap bidang horizontal, semakin besar pula intensitas cahaya pantulan yang diterima oleh permukaan panel, sehingga peningkatan suhu tidak dapat dihindari (**Ahmed & Das, 2024**).



**Gambar 3.** Kurva suhu permukaan panel surya pada berbagai sudut reflektor

Kurva suhu pada Gambar 3 menunjukkan bahwa masing-masing sudut reflektor menghasilkan karakteristik termal yang berbeda. Kurva sudut 45° memperlihatkan kenaikan suhu yang lebih gradual dan stabil, sedangkan sudut 60° dan 75° menunjukkan kenaikan suhu yang lebih tajam terutama pada periode mendekati tengah hari. Hal ini menandakan bahwa reflektor dengan sudut lebih curam memusatkan radiasi pantulan dalam durasi tertentu sehingga meningkatkan akumulasi panas pada permukaan panel.

Kenaikan suhu yang signifikan ini memiliki implikasi langsung terhadap penurunan efisiensi panel surya. Berdasarkan karakteristik termal sel surya monokristalin, setiap kenaikan suhu sebesar 1°C di atas kondisi standar (25°C) dapat menurunkan daya keluaran sekitar 0,4–0,5%. Dengan demikian, pada suhu operasional 70°C, daya yang dihasilkan berpotensi menurun hingga sekitar 18–22% dibandingkan kondisi ideal.

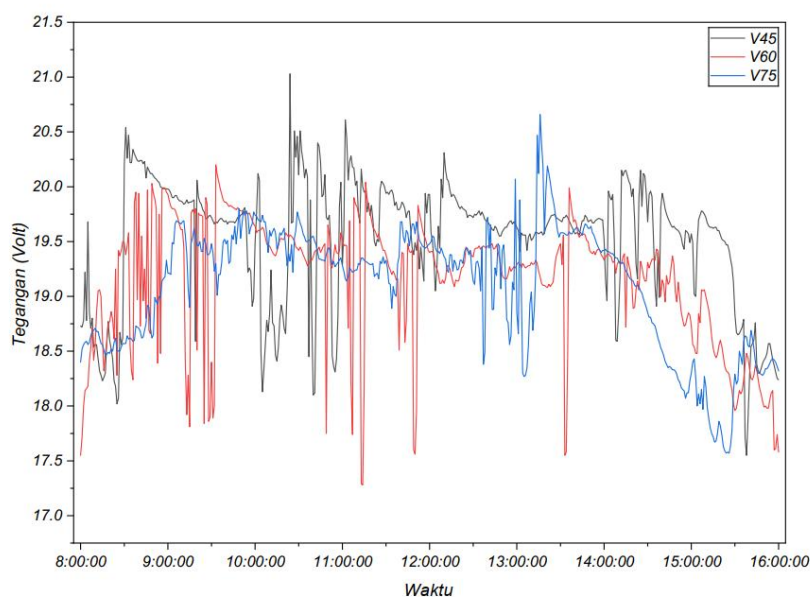
Meskipun reflektor dengan sudut besar seperti 75° mampu meningkatkan intensitas radiasi yang diterima, peningkatan suhu yang berlebihan justru menurunkan efisiensi konversi energi panel. Sebaliknya, reflektor dengan sudut 45° menghasilkan kenaikan suhu yang lebih moderat dengan distribusi panas yang relatif stabil sepanjang periode pengujian. Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat titik keseimbangan antara peningkatan radiasi pantulan dan kestabilan termal panel, yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan sudut reflektor optimal (**Mutlak, dkk, 2021**).

### **3.2 Pengaruh Reflektor terhadap Tegangan Keluaran Panel Surya**

Hasil pengukuran tegangan keluaran panel surya pada variasi sudut reflektor disajikan pada Gambar 4. Grafik tersebut menunjukkan pola perubahan tegangan selama periode pengamatan harian untuk tiga konfigurasi sudut reflektor, yaitu 45°, 60°, dan 75°. Secara umum, tegangan keluaran cenderung meningkat pada pagi hari seiring dengan bertambahnya intensitas radiasi matahari, mencapai nilai puncak menjelang tengah hari, kemudian menurun kembali pada sore hari seiring berkurangnya intensitas radiasi.

Berdasarkan pengamatan data, panel dengan reflektor pada sudut 45° menghasilkan tegangan keluaran paling tinggi dan stabil, dengan nilai maksimum sekitar 20,7 V, nilai minimum sekitar 19,0 V, dan rata-rata berada pada kisaran 19,7–20,0 V. Stabilitas ini menunjukkan bahwa sudut 45° mampu mengarahkan refleksi cahaya tambahan secara optimum tanpa menyebabkan fluktuasi termal yang berlebihan. Pada sudut 60°, tegangan keluaran berada sedikit lebih rendah, dengan nilai maksimum sekitar 20,1 V, minimum sekitar 18,2 V, dan rata-rata 19,0–19,3 V. Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa fluktuasi pada sudut ini memang lebih tajam pada beberapa interval, terutama sekitar pukul 09:00–11:00 WIB dan menjelang pukul 14:00 WIB, yang kemungkinan disebabkan oleh perubahan mendadak pada kondisi radiasi dan sudut pantulan yang kurang optimal.

Sementara itu, reflektor pada sudut 75° menunjukkan tegangan keluaran paling rendah, yaitu maksimum sekitar 19,8 V, minimum sekitar 18,0 V, dan rata-rata berada pada kisaran 18,7–19,0 V. Sudut yang lebih tegak membuat sebagian besar cahaya pantul tidak tepat mengenai permukaan panel, sehingga peningkatan tegangan yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dua sudut lainnya. Secara keseluruhan, sudut 45° memberikan intensitas cahaya pantul yang paling efektif sehingga menghasilkan tegangan keluaran tertinggi, sedangkan sudut 60° dan 75° menunjukkan penurunan performa akibat berkurangnya kontribusi cahaya pantul dan meningkatnya fluktuasi radiasi.



**Gambar 4. Kurva tegangan keluaran panel surya pada berbagai sudut reflektor**

Pada Gambar 4, kurva tegangan untuk sudut  $45^\circ$  menunjukkan kestabilan paling tinggi sepanjang periode pengujian dengan fluktuasi yang relatif kecil. Kurva sudut  $60^\circ$  memperlihatkan fluktuasi yang lebih tajam pada rentang waktu 09:00–11:00 WIB akibat variasi intensitas pantulan cahaya. Sementara itu, kurva sudut  $75^\circ$  menunjukkan tren penurunan tegangan yang lebih cepat setelah mencapai puncak, yang berkorelasi dengan kenaikan suhu panel yang signifikan.

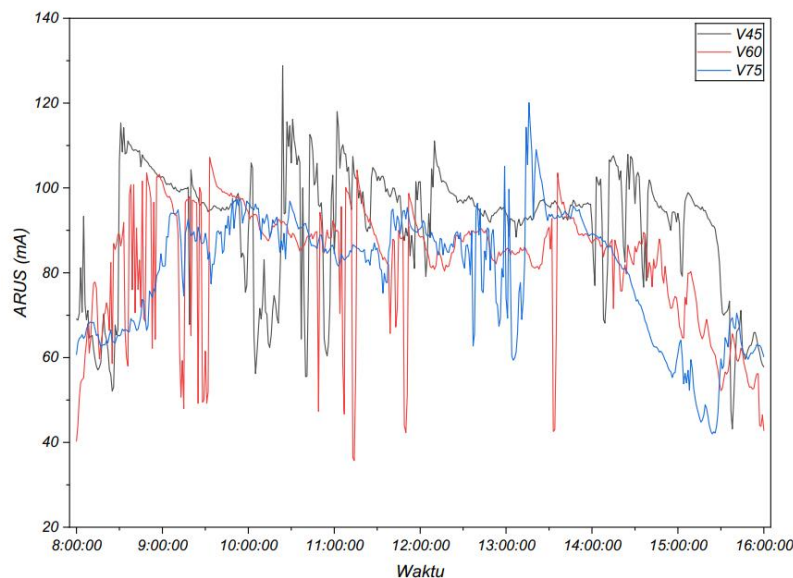
Kecenderungan tersebut mengindikasikan adanya hubungan terbalik antara suhu permukaan panel dan tegangan keluaran. Peningkatan suhu akibat refleksi cahaya yang berlebihan menyebabkan penurunan tegangan karena kenaikan suhu mengurangi energi celah pita (*band gap energy*) material semikonduktor silikon (**Rathinavelu, dkk, 2025**). Fenomena ini sesuai dengan karakteristik termal sel surya, di mana tegangan keluaran menurun sekitar 0,3–0,5% untuk setiap kenaikan suhu  $1^\circ\text{C}$  di atas kondisi standar. Dengan demikian, meskipun reflektor pada sudut besar meningkatkan intensitas cahaya yang diterima, kelebihan energi panas yang dihasilkan justru berdampak negatif terhadap tegangan keluaran.

Selain itu, variasi fluktuasi tegangan pada masing-masing sudut juga dipengaruhi oleh kestabilan intensitas radiasi dan posisi sudut reflektor terhadap arah datangnya cahaya (**Saura, dkk, 2021**). Pada sudut  $45^\circ$ , reflektor mampu memantulkan cahaya dengan distribusi yang lebih merata sepanjang hari, sehingga tegangan keluaran cenderung stabil. Sebaliknya, pada sudut yang lebih curam seperti  $75^\circ$ , pantulan sinar lebih terkonsentrasi pada periode waktu tertentu, menyebabkan tegangan mengalami puncak singkat dan kemudian menurun tajam akibat peningkatan suhu (**Kolamroudi, dkk, 2022**).

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa reflektor pada sudut  $45^\circ$  memberikan performa tegangan terbaik dan paling stabil dibandingkan sudut lainnya. Sudut tersebut menghasilkan keseimbangan antara tambahan radiasi pantulan dan kestabilan termal panel surya (**Zhang, dkk, 2022**). Temuan ini memperkuat hasil analisis sebelumnya pada subbagian suhu, bahwa pengaturan reflektor dengan sudut sedang mampu memberikan peningkatan performa listrik tanpa menimbulkan efek termal yang berlebihan. Dengan demikian, penggunaan reflektor pada sudut  $45^\circ$  dapat dianggap sebagai konfigurasi yang optimal dalam meningkatkan tegangan keluaran panel surya pada kondisi iklim tropis.

### 3.3 Pengaruh Reflektor terhadap Kuat Arus Keluaran Panel Surya

Hasil pengukuran arus keluaran panel surya pada berbagai variasi sudut reflektor ditunjukkan pada Gambar 5. Grafik tersebut menggambarkan perubahan nilai arus selama periode pengamatan harian untuk sudut reflektor 45°, 60°, dan 75°. Secara umum, karakteristik arus mengikuti pola intensitas radiasi matahari harian, di mana arus meningkat sejak pagi hari, mencapai nilai maksimum di sekitar tengah hari, kemudian menurun secara bertahap pada sore hari seiring dengan berkurangnya intensitas radiasi matahari.



**Gambar 5. Kurva kuat arus keluaran panel surya pada berbagai sudut reflektor**

Hasil pengukuran kuat arus keluaran panel surya dengan variasi sudut reflektor ditampilkan pada Gambar 5. Grafik tersebut menunjukkan perubahan nilai arus selama periode pengamatan harian untuk sudut reflektor 45°, 60°, dan 75°. Secara umum, pola perubahan arus mengikuti tren intensitas radiasi matahari sepanjang hari, di mana nilai arus meningkat sejak pagi hari, kemudian mencapai puncak pada periode tengah hari sekitar pukul 11:00–13:00 WIB, ketika intensitas radiasi berada pada titik maksimum. Setelah periode tersebut, nilai arus menurun secara bertahap sepanjang sore hari seiring berkurangnya sudut datang cahaya matahari dan menurunnya intensitas radiasi.

Dari hasil pengamatan terlihat bahwa panel dengan reflektor pada sudut 45° menghasilkan arus keluaran tertinggi dan paling stabil di antara ketiga sudut pengujian. Nilai arus maksimumnya mencapai 120 mA, dengan fluktuasi yang relatif kecil di sepanjang periode pengukuran. Pada sudut 60°, nilai arus rata-rata sedikit lebih rendah, berkisar antara 90–105 mA, dengan beberapa penurunan tajam pada interval tertentu akibat ketidakstabilan intensitas pantulan cahaya. Sedangkan pada sudut 75°, arus keluaran menunjukkan nilai terendah, dengan kisaran 80–95 mA, serta variasi yang lebih besar terutama pada saat suhu panel meningkat secara signifikan.

Hasil ini mengindikasikan bahwa peningkatan sudut reflektor memang dapat memperbesar jumlah radiasi pantulan yang diterima panel, namun pada sudut tertentu efek peningkatan suhu yang dihasilkan lebih dominan sehingga menurunkan kemampuan panel dalam menghasilkan arus listrik (**Maqsood, dkk, 2023**). Hal ini disebabkan oleh sifat material semikonduktor pada sel surya yang mengalami peningkatan *recombination rate* elektron-hole saat suhu meningkat, sehingga arus keluaran menurun meskipun intensitas cahaya relatif



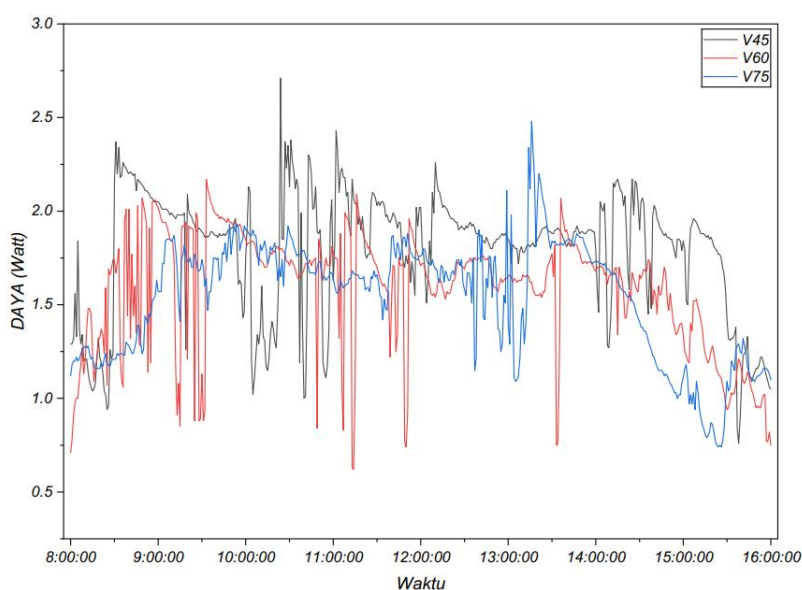
tinggi (**Chuchvaga, dkk, 2024**). Dengan demikian, terdapat hubungan kompleks antara peningkatan radiasi pantulan dan efek termal yang dihasilkan pada permukaan panel.

Selain itu, pola fluktuasi yang terlihat pada Gambar 5 menunjukkan bahwa kestabilan arus keluaran juga sangat dipengaruhi oleh distribusi cahaya yang diterima panel. Reflektor dengan sudut  $45^\circ$  mampu memantulkan cahaya secara lebih merata ke permukaan panel sepanjang hari, menghasilkan arus yang relatif stabil. Sebaliknya, reflektor pada sudut  $75^\circ$  menghasilkan pantulan yang lebih tajam dan terfokus pada waktu tertentu, menyebabkan peningkatan sesaat diikuti penurunan cepat akibat suhu berlebih.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa reflektor dengan sudut  $45^\circ$  memberikan hasil paling optimal dalam meningkatkan arus keluaran panel surya tanpa menyebabkan kenaikan suhu berlebih. Sudut ini mampu menyeimbangkan efek peningkatan intensitas cahaya dengan kestabilan termal panel, sehingga berkontribusi positif terhadap peningkatan daya keluaran total (**Choubani, dkk, 2025**). Temuan ini sejalan dengan hasil pada sub-bagian tegangan dan suhu, yang menunjukkan bahwa konfigurasi reflektor  $45^\circ$  memberikan performa paling efisien pada kondisi iklim tropis seperti di Tanjungpinang. Perbedaan karakteristik kurva arus pada setiap sudut reflektor menegaskan bahwa kestabilan distribusi cahaya pantulan lebih berpengaruh terhadap arus keluaran dibandingkan peningkatan intensitas radiasi semata.

### 3.4 Daya Keluaran Panel Surya

Hasil pengukuran daya keluaran panel surya pada variasi sudut reflektor disajikan pada Gambar 6. Grafik tersebut memperlihatkan perubahan daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya monokristalin berkapasitas 10 Wp selama periode pengujian harian untuk sudut reflektor  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $75^\circ$ . Secara umum, karakteristik daya mengikuti kombinasi respons tegangan dan arus keluaran, di mana daya meningkat sejak pagi hari, mencapai nilai maksimum pada rentang waktu sekitar pukul 11:00–13:00 WIB, kemudian menurun secara bertahap pada sore hari seiring dengan berkurangnya intensitas radiasi matahari.



**Gambar 6. Kurva daya keluaran panel surya pada berbagai sudut reflektor**

Dari hasil pengamatan, panel dengan reflektor pada sudut  $45^\circ$  menghasilkan daya tertinggi dan paling stabil. Daya maksimumnya mencapai 2,6 W, dengan daya rata-rata harian sebesar

2,0 W. Pada sudut 60°, daya maksimum berada pada angka 2,3 W, sedangkan daya rata-ratanya 1,7 W. Adapun reflektor pada sudut 75° menghasilkan daya yang lebih rendah, dengan daya maksimum 2,2 W dan daya rata-rata 1,5 W. Distribusi data pada Gambar 6 juga menunjukkan bahwa reflektor sudut 45° memberikan kestabilan daya yang lebih baik dibandingkan dua sudut lainnya. Pantulan cahaya yang diterima panel pada sudut ini lebih optimal di seluruh rentang waktu siang hari, sehingga fluktuasi daya tidak terlalu tajam. Sebaliknya, sudut 60° dan 75° menunjukkan variasi yang lebih besar akibat perubahan intensitas radiasi matahari dan sudut pantulan cahaya yang kurang optimum sepanjang hari.

Jika dibandingkan secara kuantitatif, reflektor sudut 45° mampu meningkatkan daya maksimum sekitar 13 % dibandingkan sudut 60° dan sekitar 18 % dibandingkan sudut 75°. Hasil ini menegaskan bahwa sudut reflektor yang terlalu besar tidak selalu menghasilkan daya tertinggi karena efek termal yang dominan.

#### **4. KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa variasi sudut reflektor cermin datar berpengaruh signifikan terhadap kinerja termal dan listrik panel surya monokristalin 10 Wp di iklim tropis. Sudut reflektor 45° menghasilkan performa paling optimal dengan suhu maksimum sekitar 60 °C, tegangan rata-rata 19,7–20,0 V, arus maksimum 120 mA, serta daya puncak sebesar 2,6 W. Dibandingkan sudut 60° dan 75°, konfigurasi 45° mampu meningkatkan daya keluaran hingga sekitar 18–25 % sekaligus menjaga kestabilan suhu operasi panel. Kebaruan penelitian ini terletak pada penentuan sudut reflektor optimal berbasis keseimbangan antara peningkatan radiasi pantulan dan pengendalian suhu modul pada panel berdaya rendah. Temuan ini memberikan kontribusi praktis bagi pengembangan sistem panel surya statis skala kecil yang efisien dan aplikatif di wilayah tropis panas dan lembap.

#### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Maritim Raja Ali Haji karena penelitian ini didanai melalui Program Pendanaan Internal Universitas Maritim Raja Ali Haji 2025 Skema Penelitian Dosen Pemula dengan Nomor Kontrak Penelitian 040/UN53.0004/Kontrak – PDP/2025.

#### **DAFTAR RUJUKAN**

- Ahmed, T., & Das, M. K. (2024). Enhanced efficiency in thin film solar cells: optimized design with front nanotextured and rear nanowire-based light trapping structure. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 23, 456–466.
- Choubani, K., Zouari, Y., El Haj, A., Mannai, A., Almeshaal, M. A., Dimassi, W., & Ben Rabha, M. (2025). Enhancing Optoelectronic Properties of Multicrystalline Silicon Using Dual Treatments for Solar Cell Applications. *Inorganics*, 13(5), 142.
- Chuchvaga, N., Aubakirova, N., Tokmoldin, N., Klimenov, V., & Boukhvalov, D. W. (2024). A Comprehensive Approach to Optimization of Silicon-Based Solar Cells. *Surfaces*, 7(4), 951–968.
- Ismail, B., Abdallah, L., & Elhachemi, K. (2025). Experimental comparison of planar and

- parabolic reflectors for improved photovoltaic output. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics (EPSTEM)*, 34, 369–376.
- Kim, M. K., Abdulkadir, K. O., Liu, J., Choi, J.-H., & Wen, H. (2021). Optimal Design Strategy of a Solar Reflector Combining Photovoltaic Panels to Improve Electricity Output: A Case Study in Calgary, Canada. *Sustainability*, 13(11), 6115. <https://doi.org/10.3390/su13116115>
- Kolamroudi, M. K., Ilkan, M., Egelioglu, F., & Safaei, B. (2022). Maximization of the output power of low concentrating photovoltaic systems by the application of reflecting mirrors. *Renewable Energy*, 189, 822–835.
- Maqsood, S., Ali, Z., Ali, K., Ishaq, M., Sajid, M., Farhan, A., Rahdar, A., & Pandey, S. (2023). Assessment of different optimized anti-reflection coatings for ZnO/Si heterojunction solar cells. *Ceramics International*, 49(23), 37118–37126.
- Meng, Q., Chen, Y., Xiao, Y. Y., Sun, J., Zhang, X., Han, C. B., Gao, H., Zhang, Y., & Yan, H. (2021). Effect of temperature on the performance of perovskite solar cells. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(10), 12784–12792.
- Mutlak, F. A. H., Ahmed, A. F., Nayef, U. M., Al-zaidi, Q., & Abdulridha, S. K. (2021). Improvement of absorption light of laser texturing on silicon surface for optoelectronic application. *Optik*, 237, 166755.
- Rathinavelu, V., Upadhyay, V. V., Prabakaran, S., Govindarajan, S., Verma, A., Soudagar, M. E. M., Vinayagam, M., Alotaibi, M. A., & Seikh, A. H. (2025). Texturing of silicon nitride passivation layers on functional behaviour study of polycrystalline silicon (p-Si) made with plasma enhanced chemical vapour deposition. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36(1), 73.
- Sakti, A. D., Ihsan, K. T. N., Anggraini, T. S., Shabrina, Z., Sasongko, N. A., Fachrizal, R., Aziz, M., Aryal, J., Yuliarto, B., & Hadi, P. O. (2022). Multi-criteria assessment for city-wide rooftop solar PV deployment: a case study of Bandung, Indonesia. *Remote Sensing*, 14(12), 2796.
- Saura, J. M., Rodrigo, P. M., Almonacid, F. M., Chemisana, D., & Fernández, E. F. (2021). Experimental characterisation of irradiance and spectral non-uniformity and its impact on multi-junction solar cells: Refractive vs. reflective optics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 225, 111061.
- Silalahi, D. F., Blakers, A., Stocks, M., Lu, B., Cheng, C., & Hayes, L. (2021). Indonesia's Vast Solar Energy Potential. *Energies*, 14(17), 5424. <https://doi.org/10.3390/en14175424>
- Sun, C., Zou, Y., Qin, C., Zhang, B., & Wu, X. (2022). Temperature effect of photovoltaic cells:

- a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5(4), 2675–2699.
- Suryo, T. H., Rhakasywi, D., & Fahrudin, F. (2023). The Effect of Solar Panel Output Power Analysis with Reflector Angle Optimization and Addition of Heatsink-Fan Cooling System. *Journal of Applied Science, Engineering, Technology, and Education*, 5(1), 93–122.
- Thadani, H. L., & Go, Y. I. (2021). Integration of solar energy into low-cost housing for sustainable development: case study in developing countries. *Heliyon*, 7(12).
- Zhang, Y., Gao, J. Q., Yu, Y., Shi, Q., & Liu, Z. (2022). Influence of incidence angle effects on the performance of bifacial photovoltaic modules considering rear-side reflection. *Solar Energy*, 245, 404–409.