



## Analisis Kinerja Termal Sistem Pemanas Air Tenaga Surya Menggunakan Reflektor Cermin Datar dan Pipa Tembaga Ø½ Inch pada Kapasitas Air 25 Liter

Eko Cahyono<sup>1\*</sup>, Lisa Puspita Ariyanto<sup>2</sup>, Dedy Rachman Ardian<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gresik, Indonesia

Email: [ekocah98@gmail.com](mailto:ekocah98@gmail.com)

\*Eko Cahyono

**Abstract.** *The utilization of solar energy as a renewable energy source has become a promising alternative to reduce dependence on fossil fuels and improve energy efficiency in the domestic sector. One potential application is a solar water heating system that employs thermal collectors with optimized solar radiation absorption. This study aimed to design and evaluate the performance of a solar water heating system utilizing a flat mirror reflector and a ½-inch copper pipe integrated with a 25-L Solar Cube storage unit, as well as to investigate the effect of reflector angle variations on water temperature, thermal energy, and collector efficiency. The research employed an engineering-based experimental approach. The system was tested using reflector angles of 20°, 30°, and 40° under both sunny and cloudy weather conditions. Measurements were conducted every 30 minutes from 08:00 to 16:00, including water temperature, temperature rise ( $\Delta T$ ), thermal energy generated, and collector efficiency. The results demonstrated that the designed system operated effectively and successfully utilized solar radiation as the primary heat source. Descriptively, the 30° reflector angle exhibited the best performance, achieving a maximum water temperature of 50.5°C with a temperature increase of 21.4°C under sunny conditions, and a maximum temperature of 40.8°C with a temperature increase of 11.8°C under cloudy conditions. The highest thermal energy obtained was 2,239,510 J, with collector efficiencies of 40.66% under sunny conditions and 38.11% under cloudy conditions. However, the One-Way ANOVA results indicated that differences among reflector angle variations were not statistically significant ( $p > 0.05$ ). The proposed system has considerable potential as an energy-efficient and environmentally friendly alternative water heating technology for household and small-scale business applications.*

**Keywords:** *Collector Efficiency; Copper Pipe; Flat Reflector; Solar Water Heater; Thermal Performance.*

**Abstrak.** Pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi terbarukan menjadi salah satu alternatif untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan meningkatkan efisiensi energi pada sektor domestik. Salah satu aplikasi yang berpotensi dikembangkan adalah sistem pemanas air tenaga surya yang memanfaatkan kolektor termal dengan optimasi penyerapan radiasi. Penelitian ini bertujuan merancang dan menganalisis kinerja sistem pemanas air tenaga surya berbasis reflektor cermin datar dan pipa tembaga Ø½ inch dengan media penyimpanan Solar Cube berkapasitas 25 liter, serta mengevaluasi pengaruh variasi sudut reflektor terhadap temperatur air, energi panas, dan efisiensi kolektor. Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian rekayasa dengan pendekatan eksperimental. Sistem diuji menggunakan variasi sudut reflektor 20°, 30°, dan 40° pada kondisi cuaca cerah dan mendung. Pengukuran dilakukan setiap 30 menit pada rentang waktu 08.00–16.00 WIB dengan parameter meliputi temperatur air, kenaikan temperatur ( $\Delta T$ ), energi panas yang dihasilkan, dan efisiensi kolektor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu beroperasi dengan baik dan memanfaatkan energi radiasi matahari sebagai sumber panas utama. Secara deskriptif, sudut reflektor 30° memberikan performa terbaik dengan temperatur maksimum sebesar 50,5°C dan kenaikan temperatur 21,4°C pada cuaca cerah, serta temperatur maksimum 40,8°C dan kenaikan temperatur 11,8°C pada cuaca mendung. Energi panas tertinggi mencapai 2.239.510 J dengan efisiensi kolektor sebesar 40,66% pada cuaca cerah dan 38,11% pada cuaca mendung. Namun, hasil uji One-Way ANOVA menunjukkan bahwa perbedaan antar variasi sudut reflektor belum signifikan secara statistik ( $p>0,05$ ). Sistem ini berpotensi diterapkan sebagai alternatif pemanas air hemat energi dan ramah lingkungan untuk kebutuhan rumah tangga maupun usaha skala kecil.

**Kata kunci:** Efisiensi Termal; Kolektor Surya; Pipa Tembaga; Reflektor Datar; Solar Water Heater

## 1. LATAR BELAKANG

Peningkatan kebutuhan energi global menjadi salah satu tantangan utama dalam pembangunan berkelanjutan karena masih tingginya ketergantungan terhadap energi fosil. Konsumsi energi berbasis bahan bakar fosil selain menyebabkan penurunan cadangan energi juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon dan perubahan iklim. Oleh karena itu, pengembangan energi terbarukan menjadi strategi yang banyak diterapkan untuk mendukung ketahanan energi sekaligus menekan dampak lingkungan. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah energi surya karena tersedia secara melimpah, dapat diperbarui secara alami, serta mampu dimanfaatkan dalam bentuk energi listrik maupun energi termal (Kalogirou, 2014; Kementerian ESDM, 2023).

Pemanfaatan energi surya dalam bentuk energi termal banyak diterapkan melalui teknologi sistem pemanas air tenaga surya (*solar water heater*). Sistem ini bekerja dengan menyerap radiasi matahari melalui kolektor, kemudian mentransfer energi panas ke fluida kerja sehingga temperatur air meningkat. Dibandingkan pemanas air berbasis listrik atau bahan bakar, sistem pemanas air tenaga surya memiliki keunggulan berupa konsumsi energi operasional yang rendah, biaya penggunaan yang lebih ekonomis dalam jangka panjang, serta emisi yang lebih kecil (Duffie & Beckman, 2013; Kalogirou, 2014). Penerapan teknologi ini semakin relevan untuk sektor domestik dan usaha kecil yang membutuhkan suplai air panas secara berkelanjutan.

Indonesia sebagai negara tropis memiliki potensi pemanfaatan energi surya yang cukup tinggi dengan rata-rata intensitas radiasi harian sekitar 3,6–6,0 kWh/m<sup>2</sup> per hari (Kementerian ESDM, 2023). Potensi tersebut memberikan peluang besar untuk pengembangan teknologi kolektor surya pada berbagai kebutuhan energi rumah tangga. Namun demikian, kinerja sistem pemanas air tenaga surya masih dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti intensitas radiasi matahari, desain kolektor, material penyerap panas (*absorber*), kehilangan panas ke lingkungan, serta konfigurasi sudut penerimaan radiasi (Duffie & Beckman, 2013; Kumar et al., 2021). Oleh sebab itu, peningkatan efisiensi sistem menjadi aspek penting dalam pengembangan teknologi ini.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan performa sistem pemanas air tenaga surya melalui modifikasi desain kolektor dan optimasi penyerapan energi. Sharma et al. (2017) melaporkan bahwa penggunaan reflektor cermin datar dapat

meningkatkan jumlah radiasi yang diterima kolektor sehingga meningkatkan efisiensi termal sistem. Penelitian oleh Kumar et al. (2021) menunjukkan bahwa penambahan reflektor eksternal pada kolektor surya mampu meningkatkan temperatur keluaran air dibandingkan sistem tanpa reflektor. Selain itu, penelitian Kalbande et al. (2016) menyatakan bahwa orientasi dan sudut reflektor berpengaruh terhadap distribusi radiasi yang diterima absorber dan memengaruhi performa pemanasan.

Selain desain reflektor, pemilihan material kolektor juga berperan penting terhadap efektivitas perpindahan panas. Material tembaga banyak digunakan pada sistem kolektor surya karena memiliki konduktivitas termal tinggi sekitar 401 W/m·K sehingga mampu mempercepat transfer panas dari permukaan absorber menuju fluida kerja (Çengel & Ghajar, 2020). Penelitian yang dilakukan oleh Ayompe dan Duffy (2013) menunjukkan bahwa kolektor berbasis pipa tembaga menghasilkan performa termal yang lebih stabil dibandingkan material dengan konduktivitas lebih rendah. Penggunaan sistem sirkulasi alami (*thermosiphon*) juga dinilai mampu menyederhanakan konstruksi serta mengurangi kebutuhan energi tambahan selama operasi.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan keberhasilan peningkatan performa kolektor surya, sebagian besar penelitian masih berfokus pada kolektor pelat datar konvensional dan sistem penyimpanan panas dengan kapasitas besar. Kajian yang secara khusus mengintegrasikan reflektor cermin datar, pipa tembaga Ø½ inch, serta media penyimpanan panas berbasis *Solar Cube* berkapasitas 25 liter masih relatif terbatas. Selain itu, kajian mengenai pengaruh variasi sudut reflektor terhadap kenaikan temperatur air, energi panas yang dihasilkan, dan efisiensi kolektor pada sistem berskala kecil masih belum banyak dilaporkan. Kondisi tersebut menunjukkan adanya celah penelitian (*research gap*) yang membuka peluang pengembangan sistem pemanas air yang lebih sederhana, efisien, dan sesuai untuk aplikasi domestik (Sharma et al., 2017; Kumar et al., 2021).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk merancang dan menganalisis kinerja sistem pemanas air tenaga surya berbasis reflektor cermin datar dan pipa tembaga Ø½ inch dengan media penyimpanan *Solar Cube* berkapasitas 25 liter. Penelitian difokuskan pada evaluasi variasi sudut reflektor 20°, 30°, dan 40° terhadap kenaikan temperatur air, energi panas yang dihasilkan, serta efisiensi kolektor. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi

pemanas air tenaga surya yang lebih hemat energi, ekonomis, dan berpotensi diterapkan pada kebutuhan rumah tangga maupun usaha skala kecil.

## 2. KAJIAN TEORITIS

### **Energi Surya dan Sistem Pemanas Air Tenaga Surya**

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk mendukung transisi energi berkelanjutan karena ketersediaannya melimpah dan dapat dimanfaatkan tanpa menghasilkan emisi langsung selama proses operasional. Pemanfaatan energi surya dapat dilakukan melalui konversi menjadi energi listrik maupun energi termal. Salah satu aplikasi energi termal yang berkembang luas adalah sistem pemanas air tenaga surya (*solar water heater*), yaitu teknologi yang memanfaatkan radiasi matahari untuk meningkatkan temperatur fluida kerja sehingga dapat digunakan untuk kebutuhan domestik maupun industri skala kecil (Duffie & Beckman, 2013).

Sistem pemanas air tenaga surya bekerja melalui mekanisme penyerapan radiasi oleh kolektor, kemudian energi panas yang diterima ditransfer menuju fluida sehingga terjadi peningkatan temperatur. Berdasarkan metode sirkulasinya, sistem dibedakan menjadi sistem aktif dan sistem pasif (*thermosiphon*). Sistem aktif menggunakan pompa untuk mengalirkan fluida, sedangkan sistem pasif memanfaatkan perbedaan massa jenis akibat perubahan temperatur sehingga tidak memerlukan konsumsi energi tambahan selama operasi (Kalogirou, 2014). Sistem pasif menjadi alternatif yang banyak diterapkan karena konstruksinya sederhana dan biaya operasionalnya relatif rendah.

### **Kolektor Surya dan Perpindahan Panas**

Kinerja sistem pemanas air tenaga surya sangat dipengaruhi oleh kemampuan kolektor dalam menyerap dan mentransfer energi panas. Kolektor surya pelat datar (*flat plate collector*) merupakan tipe yang umum digunakan karena memiliki konstruksi sederhana, biaya produksi relatif rendah, serta sesuai untuk kebutuhan temperatur rendah hingga menengah (Saini et al., 2017).

Secara termodinamika, perpindahan panas pada kolektor berlangsung melalui tiga mekanisme utama yaitu radiasi, konduksi, dan konveksi. Energi radiasi yang diterima permukaan absorber dikonversi menjadi energi panas dan ditransfer melalui material

kolektor menuju fluida kerja. Besarnya energi panas yang diserap fluida secara teoritis dapat dihitung menggunakan Persamaan:

$$Q = mc_p\Delta T \quad (1)$$

dengan  $Q$  adalah energi panas (J),  $m$  massa fluida (kg),  $c_p$  kalor jenis fluida (J/kg°C), dan  $\Delta T$  perubahan temperatur (Çengel & Ghajar, 2020). Semakin besar energi panas yang terserap, semakin tinggi kemampuan sistem dalam meningkatkan temperatur air.

### **Pengaruh Reflektor terhadap Kinerja Kolektor**

Salah satu pendekatan yang digunakan untuk meningkatkan performa kolektor surya adalah penambahan reflektor. Reflektor berfungsi memantulkan radiasi matahari tambahan menuju permukaan absorber sehingga meningkatkan intensitas radiasi efektif yang diterima sistem. Penambahan reflektor memungkinkan peningkatan energi yang diterima kolektor tanpa memperbesar luas permukaan kolektor (Sharma et al., 2017). Efektivitas reflektor dipengaruhi oleh konfigurasi geometris dan sudut pemasangan. Perubahan sudut reflektor akan memengaruhi arah pantulan sinar serta distribusi energi yang diterima absorber. Sudut reflektor yang terlalu kecil dapat menyebabkan pantulan kurang optimal, sedangkan sudut yang terlalu besar dapat meningkatkan kehilangan energi akibat penyebaran radiasi. Oleh karena itu, optimasi sudut reflektor menjadi faktor penting dalam meningkatkan temperatur keluaran dan efisiensi sistem pemanas air tenaga surya (Azha et al., 2020).

### **Material Pipa Tembaga sebagai Absorber**

Material absorber merupakan komponen penting yang menentukan laju perpindahan panas pada sistem kolektor surya. Pipa tembaga banyak digunakan karena memiliki konduktivitas termal tinggi, yaitu sekitar 401 W/m·K, sehingga mampu mempercepat transfer panas dari permukaan kolektor menuju fluida kerja (Çengel & Ghajar, 2020). Selain memiliki kemampuan perpindahan panas yang baik, pipa tembaga juga memiliki ketahanan korosi yang tinggi serta stabil terhadap perubahan temperatur selama operasi. Ayompe dan Duffy (2013) menjelaskan bahwa penggunaan pipa tembaga pada sistem pemanas air menghasilkan distribusi temperatur yang lebih seragam dan efisiensi termal yang lebih baik dibandingkan material dengan konduktivitas lebih rendah.

## Efisiensi Kolektor Surya

Efisiensi kolektor digunakan untuk menggambarkan kemampuan sistem dalam mengubah energi radiasi matahari menjadi energi panas yang diserap fluida. Secara umum efisiensi kolektor dihitung menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{mc_p(T_{out}-T_{in})}{AIt} \times 100\% \quad (2)$$

di mana  $\eta$  merupakan efisiensi kolektor (%),  $A$  luas kolektor ( $m^2$ ),  $I$  intensitas radiasi matahari ( $W/m^2$ ), dan  $t$  waktu pemanasan (Duffie & Beckman, 2013).

Nilai efisiensi dipengaruhi oleh intensitas radiasi, karakteristik material absorber, kehilangan panas ke lingkungan, serta konfigurasi sistem yang digunakan. Oleh karena itu, optimasi desain kolektor dan reflektor menjadi pendekatan yang banyak dilakukan untuk meningkatkan performa sistem pemanas air tenaga surya (Kalogirou, 2014). Berdasarkan teori dan penelitian terdahulu tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi sudut reflektor terhadap temperatur air, energi panas yang dihasilkan, dan efisiensi kolektor pada sistem pemanas air tenaga surya berbasis pipa tembaga dan media penyimpanan *Solar Cube* berkapasitas 25 liter.

## Hipotesis

Berdasarkan teori perpindahan panas dan penelitian terdahulu, variasi sudut reflektor diduga memengaruhi jumlah radiasi matahari yang diterima kolektor sehingga berdampak pada temperatur air, energi panas, dan efisiensi sistem pemanas air tenaga surya.

H<sub>0</sub>: Variasi sudut reflektor cermin datar tidak berpengaruh signifikan terhadap temperatur air, energi panas, dan efisiensi kolektor.

H<sub>1</sub>: Variasi sudut reflektor cermin datar berpengaruh terhadap temperatur air, energi panas, dan efisiensi kolektor.

## 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen (*experimental research*) untuk mengevaluasi kinerja sistem pemanas air tenaga surya berbasis reflektor cermin datar dan pipa tembaga terhadap peningkatan temperatur air, energi panas, dan efisiensi kolektor. Sistem pemanas dirancang menggunakan mekanisme sirkulasi alami (thermosiphon system) dengan media penyimpanan berupa *Solar Cube* berkapasitas 25 liter.

Objek penelitian berupa satu unit sistem pemanas air tenaga surya yang terdiri atas kolektor berbahan pipa tembaga berdiameter Ø½ inch, reflektor cermin datar, dan tangki penyimpanan air. Variabel bebas yang digunakan adalah variasi sudut reflektor sebesar 20°, 30°, dan 40°, sedangkan variabel terikat meliputi temperatur air, kenaikan temperatur, energi panas yang dihasilkan, dan efisiensi kolektor. Pengujian dilakukan pada kondisi cuaca cerah dan mendung selama periode pengamatan. Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran langsung menggunakan termometer digital pada interval waktu 30 menit mulai pukul 08.00–16.00 WIB. Parameter yang diamati meliputi temperatur awal air, temperatur selama proses pemanasan, temperatur maksimum, serta kondisi lingkungan selama pengujian. Data temperatur kemudian digunakan untuk menghitung energi panas dan efisiensi kolektor berdasarkan teori perpindahan panas dan sistem termal surya (Duffie & Beckman, 2013). Energi panas dihitung menggunakan persamaan:

$$Q = m \times c_p \times \Delta T \quad (3)$$

dengan  $Q$  adalah energi panas (J),  $m$  adalah massa air (kg),  $c_p$  adalah kalor jenis air (J/kg°C), dan  $\Delta T$  adalah perubahan temperatur (°C).

Efisiensi kolektor dihitung berdasarkan perbandingan antara energi panas yang diserap fluida dengan energi radiasi matahari yang diterima oleh permukaan kolektor selama proses pengujian. Analisis data dilakukan secara deskriptif dan inferensial. Analisis deskriptif digunakan untuk membandingkan perubahan temperatur, energi panas, dan efisiensi pada setiap variasi sudut reflektor. Selanjutnya dilakukan uji statistik menggunakan One-Way Analysis of Variance (One-Way ANOVA) untuk mengevaluasi perbedaan performa antar variasi sudut reflektor dengan tingkat signifikansi 5%. Seluruh pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak statistik untuk memperoleh interpretasi yang komprehensif mengenai kinerja sistem pemanas air tenaga surya yang dirancang.

#### **4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

##### **Perancangan dan Pembuatan Alat**

Hasil perancangan dan pembuatan alat menunjukkan bahwa sistem pemanas air tenaga surya yang dikembangkan telah mampu beroperasi sesuai prinsip konversi energi surya menjadi energi termal. Sistem terdiri atas kolektor surya berbasis pipa tembaga Ø½

inci sebagai absorber, reflektor cermin datar sebagai pemantul radiasi tambahan, serta *Solar Cube* berkapasitas 25 liter sebagai media penyimpanan air panas. Mekanisme pemanasan berlangsung secara alami menggunakan sistem *thermosiphon*, sehingga sirkulasi air terjadi tanpa bantuan pompa. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi sudut reflektor sebagai variabel bebas dengan variasi 20°, 30°, dan 40°, sedangkan parameter pengamatan terdiri atas temperatur awal air, temperatur maksimum air, kenaikan temperatur ( $\Delta T$ ), energi panas yang dihasilkan, dan efisiensi kolektor. Seluruh parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menyerap dan mentransfer energi panas dari radiasi matahari menuju fluida kerja. Gambar rancangan alat dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1. Hasil Pembuatan Alat**

Berdasarkan hasil perakitan dan pengujian awal, seluruh komponen sistem dapat berfungsi dengan baik tanpa ditemukan kebocoran maupun gangguan sirkulasi selama operasi. Penggunaan pipa tembaga yang dilapisi cat hitam doff meningkatkan kemampuan penyerapan radiasi, sementara reflektor cermin datar berperan dalam mengarahkan tambahan energi matahari ke permukaan absorber. Pengamatan terhadap parameter temperatur air, energi panas, dan efisiensi kolektor digunakan sebagai dasar untuk menentukan konfigurasi sudut reflektor yang memberikan performa terbaik. Dengan demikian, alat yang telah dibuat dinyatakan layak digunakan sebagai media pengujian untuk menganalisis pengaruh variasi sudut reflektor terhadap kinerja sistem pemanas air tenaga surya.

### **Hasil Pengujian**

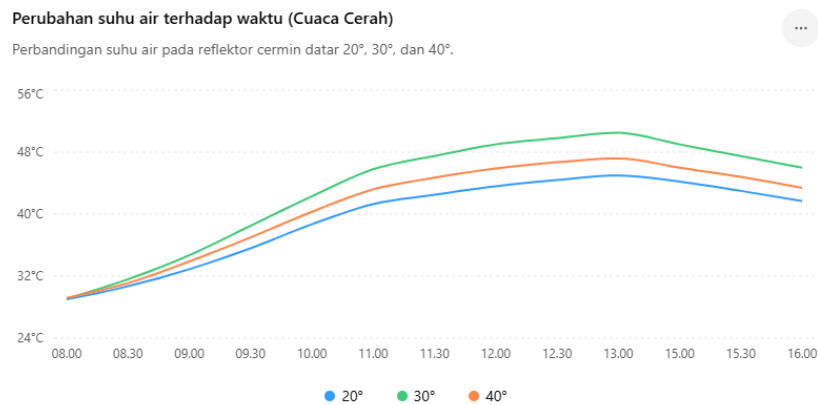
Pengujian dilakukan terhadap sistem pemanas air tenaga surya berbasis reflektor cermin datar dan pipa tembaga  $\text{Ø}\frac{1}{2}$  inch dengan media penyimpanan *Solar Cube*

berkapasitas 25 liter. Variasi sudut reflektor yang digunakan adalah 20°, 30°, dan 40° pada kondisi cuaca cerah dan mendung. Pengukuran temperatur dilakukan setiap 30 menit mulai pukul 08.00–16.00 WIB.

**Tabel 1. Rekapitulasi hasil pengujian sistem pemanas air tenaga surya**

Cuaca	Sudut Reflektor	Suhu Awal (°C)	Suhu Maksimum (°C)	ΔT (°C)
Cerah	20°	29,0	45,0	16,0
Cerah	30°	29,1	50,5	21,4
Cerah	40°	29,2	47,2	18,0
Mendung	20°	28,9	36,8	7,9
Mendung	30°	29,0	40,8	11,8
Mendung	40°	29,1	39,2	10,1

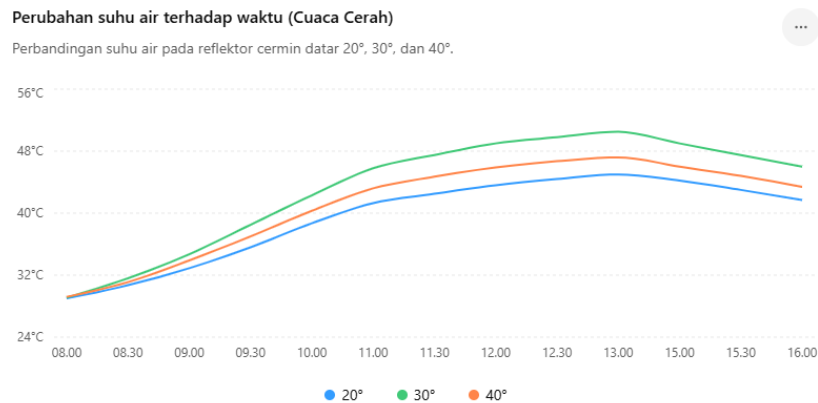
Berdasarkan Tabel 1, seluruh konfigurasi reflektor mampu meningkatkan temperatur air selama proses pemanasan. Kinerja tertinggi diperoleh pada sudut reflektor 30° baik pada cuaca cerah maupun mendung. Pada kondisi cerah temperatur maksimum mencapai 50,5°C dengan kenaikan temperatur sebesar 21,4°C, sedangkan pada kondisi mendung temperatur maksimum mencapai 40,8°C dengan kenaikan temperatur sebesar 11,8°C.



**Gambar 2. Hubungan Waktu Pengujian terhadap Temperatur Air pada Kondisi Cuaca Cerah**

Berdasarkan Gambar 2, temperatur air pada seluruh variasi sudut reflektor mengalami peningkatan secara bertahap sejak awal pengujian pukul 08.00 WIB hingga mencapai temperatur maksimum pada pukul 13.00 WIB, kemudian menurun seiring berkurangnya intensitas radiasi matahari pada sore hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa reflektor dengan sudut 30° menghasilkan temperatur tertinggi sebesar 50,5°C, lebih tinggi dibandingkan sudut 40° sebesar 47,2°C dan sudut 20° sebesar 45,0°C. Selama proses

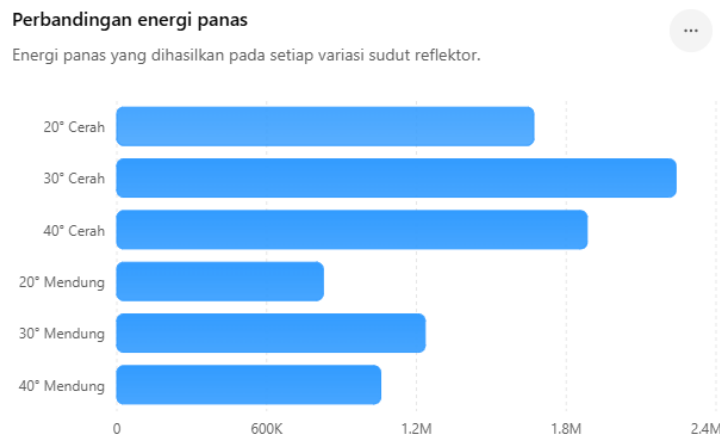
pemanasan, kurva reflektor  $30^\circ$  cenderung berada di atas kurva lainnya yang menunjukkan kemampuan penyerapan dan pemanfaatan energi radiasi matahari yang lebih optimal. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa sudut reflektor  $30^\circ$  mampu menghasilkan distribusi pantulan radiasi yang lebih efektif menuju permukaan absorber sehingga meningkatkan energi panas yang diserap fluida dan menghasilkan performa pemanasan yang lebih baik dibandingkan variasi sudut lainnya.



**Gambar 4.3 Grafik Hubungan Waktu Pengujian terhadap Suhu Air (Cuaca Mendung)**

Berdasarkan Gambar 3, pada kondisi cuaca mendung temperatur air pada seluruh variasi sudut reflektor tetap menunjukkan pola peningkatan selama periode pengujian, namun dengan laju kenaikan yang lebih rendah dibandingkan kondisi cuaca cerah akibat menurunnya intensitas radiasi matahari yang diterima kolektor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa reflektor dengan sudut  $30^\circ$  tetap menghasilkan performa terbaik dengan temperatur maksimum sebesar  $40,8^\circ\text{C}$ , lebih tinggi dibandingkan sudut  $40^\circ$  sebesar  $39,2^\circ\text{C}$  dan sudut  $20^\circ$  sebesar  $36,8^\circ\text{C}$ . Kurva temperatur pada sudut  $30^\circ$  yang cenderung berada di atas variasi lainnya menunjukkan bahwa sudut tersebut masih mampu memantulkan dan mengarahkan radiasi matahari secara lebih efektif menuju permukaan absorber meskipun terjadi hambatan akibat tutupan awan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa konfigurasi reflektor  $30^\circ$  memiliki kemampuan penyerapan energi yang lebih baik sehingga menghasilkan proses pemanasan air yang lebih optimal pada kondisi intensitas radiasi yang rendah.

## Perbandingan Energi Panas



Gambar 4. Perbandingan Energi Panas

Berdasarkan Gambar 4.4, energi panas yang dihasilkan pada setiap variasi sudut reflektor menunjukkan pola yang sejalan dengan kenaikan temperatur air selama proses pemanasan. Nilai energi panas tertinggi diperoleh pada reflektor dengan sudut 30° pada kondisi cuaca cerah sebesar 2.239.510 J, diikuti sudut 40° sebesar 1.883.700 J, dan sudut 20° sebesar 1.674.400 J. Sementara itu, pada kondisi cuaca mendung energi panas yang dihasilkan mengalami penurunan dengan nilai tertinggi tetap diperoleh pada sudut 30° sebesar 1.234.870 J, diikuti sudut 40° sebesar 1.056.965 J, dan nilai terendah pada sudut 20° sebesar 826.735 J. Hasil ini menunjukkan bahwa besarnya energi panas dipengaruhi oleh kemampuan sistem dalam meningkatkan temperatur air yang secara teoritis berbanding lurus terhadap perubahan temperatur pada massa fluida yang dipanaskan (Duffie & Beckman, 2013).

Perolehan energi panas yang lebih tinggi pada sudut reflektor 30° diduga terjadi karena sudut tersebut menghasilkan arah pantulan radiasi matahari yang lebih efektif menuju permukaan absorber sehingga jumlah energi radiasi yang diterima pipa tembaga menjadi lebih besar dibandingkan variasi sudut lainnya. Ketika radiasi yang diterima meningkat, proses perpindahan panas dari absorber ke fluida melalui mekanisme konduksi dan konveksi berlangsung lebih optimal sehingga menghasilkan kenaikan temperatur air yang lebih tinggi dan berdampak langsung pada peningkatan energi panas tersimpan. Sebaliknya, pada sudut 20° sebagian radiasi pantul diduga belum sepenuhnya terfokus ke kolektor, sedangkan pada sudut 40° kemungkinan terjadi penyebaran arah pantulan yang menyebabkan energi yang diterima tidak

maksimal. Pada kondisi mendung, penurunan energi panas terjadi karena keberadaan awan mengurangi intensitas radiasi matahari yang mencapai permukaan kolektor sehingga energi yang dapat dikonversi menjadi panas menjadi lebih rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa selain sudut reflektor, intensitas radiasi matahari merupakan faktor dominan yang menentukan performa sistem pemanas air tenaga surya (Kalogirou, 2014; Sharma et al., 2017).

### Uji Statistik

Uji *One-Way ANOVA* dilakukan untuk mengevaluasi apakah variasi sudut reflektor memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kenaikan temperatur air pada sistem pemanas air tenaga surya. Data yang dianalisis menggunakan nilai kenaikan temperatur ( $\Delta T$ ) dari masing-masing variasi sudut reflektor pada kondisi cuaca cerah dan mendung.

**Tabel 2. Hasil Uji One-Way ANOVA**

Sumber Variasi	df	F hitung	p-value
Antar Kelompok	2	0,296	0,764
Dalam Kelompok	3	–	–
Total	5	–	–

Berdasarkan Tabel 2 diperoleh nilai F hitung sebesar 0,296 dengan p-value sebesar 0,764. Karena nilai p-value lebih besar dari 0,05, maka hipotesis nol ( $H_0$ ) diterima, sehingga variasi sudut reflektor belum menunjukkan pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap kenaikan temperatur air. Meskipun demikian, hasil deskriptif menunjukkan bahwa sudut reflektor 30° menghasilkan rata-rata kenaikan temperatur tertinggi dibandingkan sudut 20° dan 40°. Kondisi ini menunjukkan bahwa secara operasional sudut 30° memiliki kecenderungan menghasilkan distribusi pantulan radiasi yang lebih efektif menuju permukaan absorber, namun perbedaan performa tersebut belum cukup kuat secara statistik. Hasil ini diduga dipengaruhi oleh jumlah pengamatan yang terbatas serta variasi intensitas radiasi matahari selama pengujian sehingga diperlukan pengulangan yang lebih banyak untuk memperoleh tingkat kepercayaan hasil yang lebih tinggi (Field, 2018; Montgomery, 2019).

### Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan reflektor cermin datar mampu meningkatkan kemampuan sistem pemanas air tenaga surya dalam menyerap

dan memanfaatkan energi radiasi matahari. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan temperatur air, energi panas, dan efisiensi kolektor pada seluruh variasi sudut reflektor selama pengujian. Proses pemanasan terjadi melalui mekanisme perpindahan panas yang melibatkan radiasi dari matahari menuju permukaan absorber, dilanjutkan perpindahan secara konduksi melalui pipa tembaga, dan kemudian ditransfer ke fluida melalui konveksi. Menurut Duffie dan Beckman (2013), kinerja kolektor surya sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem menangkap radiasi matahari dan meminimalkan kehilangan panas selama proses transfer energi.

**Tabel 3. Perbandingan Hasil Kinerja Sistem pada Setiap Variasi Sudut Reflektor**

Parameter	20°	30°	40°
Temperatur maksimum cerah (°C)	45,0	50,5	47,2
Temperatur maksimum mendung (°C)	36,8	40,8	39,2
Energi panas maksimum (J)	1.674.400	2.239.510	1.883.700
Efisiensi maksimum (%)	–	40,66	–

Berdasarkan Tabel 3, sudut reflektor 30° menghasilkan performa terbaik pada seluruh parameter pengamatan. Pada kondisi cuaca cerah temperatur maksimum mencapai 50,5°C, lebih tinggi dibandingkan sudut 20° (45,0°C) dan 40° (47,2°C). Pola yang sama juga terlihat pada kondisi mendung, di mana sudut 30° menghasilkan temperatur 40,8°C, sedangkan sudut 20° dan 40° masing-masing sebesar 36,8°C dan 39,2°C. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sudut reflektor memengaruhi arah pantulan radiasi sehingga jumlah energi yang diterima absorber menjadi berbeda. Sudut reflektor yang lebih sesuai memungkinkan energi pantul terkonsentrasi pada permukaan kolektor sehingga kehilangan energi akibat penyebaran sinar dapat dikurangi.

Temuan tersebut semakin diperkuat oleh hasil energi panas yang menunjukkan nilai tertinggi sebesar 2.239.510 J pada sudut 30°, sedangkan sudut 20° dan 40° hanya menghasilkan 1.674.400 J dan 1.883.700 J. Secara teoritis, energi panas berbanding lurus dengan perubahan temperatur fluida sehingga semakin tinggi temperatur yang dicapai maka semakin besar energi yang tersimpan dalam sistem (Çengel & Ghajar, 2020). Nilai efisiensi kolektor tertinggi sebesar 40,66% juga diperoleh pada sudut 30°, yang menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut memiliki kemampuan paling baik dalam mengubah energi radiasi menjadi energi termal yang dapat dimanfaatkan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Abdul-Ghafoor et al. (2024) yang menyatakan bahwa penggunaan reflektor pada sudut sekitar  $30^\circ$  mampu meningkatkan temperatur keluaran dan efisiensi termal karena menghasilkan distribusi radiasi yang lebih efektif menuju absorber. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Mokhlif et al. (2023), yang menunjukkan bahwa penambahan reflektor datar dapat meningkatkan jumlah energi radiasi yang diterima kolektor sehingga memperbaiki performa sistem pemanas air tenaga surya. Selain itu, Reda et al. (2024) menjelaskan bahwa efektivitas reflektor dipengaruhi oleh sudut pemasangan, posisi matahari, dan kondisi lingkungan selama pengujian.

Perbedaan hasil antara kondisi cuaca cerah dan mendung menunjukkan bahwa intensitas radiasi matahari merupakan faktor dominan dalam menentukan kinerja sistem. Pada kondisi mendung, keberadaan awan menyebabkan sebagian energi radiasi terhambat sebelum mencapai permukaan kolektor sehingga temperatur maksimum dan energi panas yang dihasilkan mengalami penurunan. Pada sudut reflektor  $30^\circ$ , terjadi penurunan temperatur maksimum dari  $50,5^\circ\text{C}$  menjadi  $40,8^\circ\text{C}$  atau sekitar 19,2%, sedangkan energi panas menurun dari 2.239.510 J menjadi 1.234.870 J atau sekitar 44,9%. Penurunan ini menunjukkan bahwa meskipun reflektor mampu membantu meningkatkan pemanfaatan radiasi, kinerja sistem tetap sangat dipengaruhi oleh kondisi atmosfer dan ketersediaan energi matahari.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan reflektor cermin datar dengan sudut  $30^\circ$  merupakan konfigurasi paling optimal untuk sistem pemanas air tenaga surya berbasis pipa tembaga dan *Solar Cube* berkapasitas 25 liter. Konfigurasi tersebut menghasilkan temperatur tertinggi, energi panas terbesar, dan efisiensi kolektor paling tinggi sehingga berpotensi digunakan sebagai alternatif pengembangan sistem pemanas air yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem pemanas air tenaga surya (*solar water heater*) berbasis reflektor cermin datar, pipa tembaga  $\varnothing\frac{1}{2}$  inci, dan media penyimpanan *Solar Cube* berkapasitas 25 liter mampu berfungsi dengan baik dalam memanfaatkan energi radiasi matahari sebagai sumber

panas untuk meningkatkan temperatur air. Variasi sudut reflektor memberikan perbedaan performa secara deskriptif terhadap temperatur air, energi panas yang dihasilkan, dan efisiensi kolektor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sudut reflektor 30° menghasilkan kinerja terbaik dibandingkan sudut 20° dan 40°, dengan temperatur maksimum sebesar 50,5°C pada kondisi cuaca cerah dan 40,8°C pada kondisi cuaca mendung. Selain itu, sudut 30° juga menghasilkan energi panas tertinggi sebesar 2.239.510 J serta efisiensi kolektor maksimum sebesar 40,66%, yang menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut lebih efektif dalam memantulkan dan mengarahkan radiasi matahari menuju permukaan absorber.

Meskipun demikian, hasil uji statistik menggunakan *One-Way ANOVA* menunjukkan nilai p-value sebesar 0,764 ( $p > 0,05$ ) sehingga belum dapat dibuktikan adanya pengaruh yang signifikan secara statistik antara variasi sudut reflektor terhadap kenaikan temperatur air. Dengan demikian, peningkatan performa yang diperoleh pada sudut 30° dalam penelitian ini lebih menunjukkan kecenderungan operasional berdasarkan data pengujian yang tersedia dan belum dapat digeneralisasi secara luas. Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kondisi cuaca dan intensitas radiasi matahari menjadi faktor utama yang memengaruhi kinerja sistem pemanas air tenaga surya. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan, antara lain jumlah pengulangan pengujian yang terbatas dan belum dilakukannya pengukuran intensitas radiasi matahari secara langsung selama proses eksperimen. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menambah jumlah sampel pengujian, menggunakan alat ukur radiasi matahari (*solar power meter*), memperluas variasi sudut reflektor, serta mengevaluasi penggunaan material absorber dan media penyimpanan panas yang berbeda untuk memperoleh performa sistem yang lebih optimal dan hasil yang lebih representatif.

**DAFTAR REFERENSI**

- Ayompe, L. M., & Duffy, A. (2013). Analysis of the thermal performance of a solar water heating system with flat plate collectors in a temperate climate. *Applied Thermal Engineering*, 58(1–2), 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.04.062>
- Azha, N. I. S., Hussin, H., Nasif, M. S., & Hussain, T. (2020). Thermal performance enhancement in flat plate solar collector solar water heater: A review. *Processes*, 8(7), 756. <https://doi.org/10.3390/pr8070756>
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley.
- Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (5th ed.). Sage Publications.
- Gaurav, K., & Verma, S. K. (2024). Critical review on thermal performance enhancement techniques for flat plate solar collectors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. <https://doi.org/10.1177/09544089241228105>
- International Energy Agency. (2024). *Solar Heating and Cooling Programme annual report*.
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
- Kalbande, S. R., Bhanarkar, M. R., & Mehta, N. S. (2016). Experimental investigation of reflector angle on solar collector performance. *Energy Procedia*, 90, 684–692.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia*.
- Montgomery, D. C. (2019). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Pandey, A. K., Hossain, M. S., Tyagi, V. V., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Sariyatun, & Madhu, M. (2020). A review on recent development of thermal performance enhancement methods of flat plate solar water heater. *Solar Energy*, 206, 935–961. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.059>
- Rahimi-Ahar, Z., Khiadani, M., Rahimi Ahar, L., & Shafieian, A. (2023). Performance evaluation of single stand and hybrid solar water heaters: A comprehensive review. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25, 2157–2184. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02556-6>
- Saini, R. P., Saini, J. S., & Sharma, A. (2017). A review on analysis and development of solar flat plate collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 641–650. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.078>
- Sharma, R., Sharma, A., & Gupta, A. (2017). Performance enhancement of flat plate solar collector using reflector. *Solar Energy*, 149, 181–190.
- Silva Júnior, O. E., Lima, J. A., Lima, M. H. A., Santos Júnior, E. P., & Coelho Junior, L. M. (2022). Solar heating with flat-plate collectors in residential buildings: A review. *Energies*, 15(17), 6130. <https://doi.org/10.3390/en15176130>
- Singh, A. K., & Verma, S. K. (2024). Passive techniques for the thermal performance enhancement of flat plate solar collector: A comprehensive review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. <https://doi.org/10.1177/09544089241270833>

- Tripathi, S. K., & Aijaz, M. (2016). A review of experimental study and performance of flat plate solar water heater with different flow rates. *International Journal of Research-GRANTHAALAYAH*, 4(11).  
<https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v4.i11.2016.2427>
- Verma, Y., Verma, M., & Ghritlahre, H. K. (2022). Recent developments in the thermal performance of flat plate solar water heaters with reflectors: A review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(4), 9552–9570. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2131940>
- Yadav, A., Singh, V., & Kumar, S. (2020). Experimental performance evaluation of solar water heater under different climatic conditions. *Renewable Energy Focus*, 35, 23–31.