

**PERANCANGAN DAN PENGUJIAN KOLEKTOR SURYA PLAT DATAR BERGELOMBANG  
UNTUK PEMANASAN AIR DOMESTIK DI IKLIM TROPIS**

**Baso Alauddin<sup>1\*</sup>, Haslinda HS<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pejuang Republik Indonesia  
Jl. Baruga Raya Antang, Makassar 90234.

\*Email: [basoalauddin84@gmail.com](mailto:basoalauddin84@gmail.com)

**Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi performa termal kolektor surya plat datar dengan absorber bergelombang untuk aplikasi pemanasan air domestik di iklim tropis. Latar belakang penelitian ini didasarkan pada tingginya konsumsi energi rumah tangga untuk pemanasan air serta belum optimalnya pemanfaatan energi surya di Indonesia. Metode yang digunakan adalah pendekatan eksperimental melalui perancangan, fabrikasi, dan pengujian kolektor berukuran 2 m<sup>2</sup> dengan variasi laju aliran fluida sebesar 1,0; 2,0; dan 3,0 L/menit pada kondisi radiasi surya aktual. Parameter performa yang dianalisis meliputi laju panas berguna (Qu) dan efisiensi termal ( $\eta$ ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kolektor dengan absorber bergelombang mampu meningkatkan performa dibandingkan kolektor konvensional. Efisiensi termal maksimum yang dicapai sebesar 75,8% pada laju aliran 3,0 L/menit, dengan peningkatan efisiensi sekitar 25,5% dibandingkan absorber datar. Laju panas berguna meningkat hingga 26,3%, yang menunjukkan efektivitas geometri bergelombang dalam meningkatkan perpindahan panas akibat peningkatan luas permukaan dan turbulensi aliran. Selain itu, sistem mampu menghasilkan energi panas rata-rata sebesar 7,2 kWh/hari, yang cukup untuk memenuhi kebutuhan air panas domestik dan berpotensi menghemat energi listrik hingga 1.898 kWh/tahun. Penelitian ini menunjukkan bahwa kolektor surya plat datar bergelombang merupakan solusi yang efisien, ramah lingkungan, dan aplikatif untuk pemanasan air domestik di wilayah tropis. Hasil ini memberikan kontribusi penting berupa data empiris dan rekomendasi desain yang dapat digunakan dalam pengembangan teknologi energi terbarukan berbasis surya di Indonesia.

*Kata kunci: absorber bergelombang, efisiensi termal, iklim tropis, kolektor surya, pemanasan air.*

**PENDAHULUAN**

Pemanfaatan energi terbarukan menjadi isu strategis global dalam upaya mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil serta menekan emisi gas rumah kaca. Dalam beberapa tahun terakhir (2021–2025), peningkatan konsumsi energi sektor domestik, khususnya untuk pemanasan air, mendorong pengembangan teknologi berbasis energi surya yang lebih efisien dan ekonomis. Energi surya merupakan sumber energi yang melimpah, bersih, dan berkelanjutan, terutama di negara tropis seperti Indonesia yang memiliki intensitas radiasi matahari relatif tinggi sepanjang tahun (Panigrahi et al., 2021).

Indonesia sebagai negara yang terletak di garis khatulistiwa memiliki potensi energi surya yang sangat besar dengan intensitas radiasi harian berkisar antara 4–5,5 kWh/m<sup>2</sup>/hari (Pereira & Sousa, 2023). Namun, performa kolektor surya plat datar konvensional masih terbatas oleh efisiensi penyerapan panas yang relatif rendah serta distribusi aliran fluida yang kurang optimal. Hal ini menyebabkan kehilangan energi panas yang cukup signifikan, terutama pada kondisi radiasi yang fluktuatif (Maddala et al., 2021).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai penelitian dalam empat tahun terakhir telah mengembangkan modifikasi desain absorber, salah satunya dengan menggunakan permukaan bergelombang (corrugated absorber). Struktur bergelombang mampu meningkatkan luas permukaan kontak antara fluida dan absorber, serta menciptakan aliran turbulen yang meningkatkan koefisien perpindahan panas (He et al., 2022). Penelitian eksperimental menunjukkan bahwa desain ini mampu meningkatkan efisiensi termal hingga 15–25% dibandingkan absorber datar konvensional (Roy et al., 2022).

Selain peningkatan efisiensi, desain bergelombang juga berkontribusi dalam meningkatkan distribusi temperatur fluida yang lebih merata. Hal ini sangat penting dalam aplikasi pemanasan air domestik, dimana kestabilan temperatur menjadi parameter utama kenyamanan pengguna. Studi

terbaru menunjukkan bahwa kolektor dengan absorber bergelombang memiliki performa yang lebih stabil pada kondisi radiasi rendah dan variasi beban termal (Kazem et al., 2022).

Namun demikian, peningkatan turbulensi akibat desain bergelombang juga dapat menyebabkan kenaikan kerugian tekanan (pressure drop) dalam sistem aliran fluida. Oleh karena itu, optimasi parameter geometris seperti tinggi gelombang, pitch, dan sudut kemiringan menjadi aspek penting dalam perancangan kolektor (Saha, 2022).

Pengujian performa kolektor surya umumnya mengacu pada parameter efisiensi termal, temperatur keluaran fluida, serta laju aliran massa fluida. Standar internasional seperti ASHRAE 93 dan ISO 9806 digunakan sebagai acuan dalam evaluasi kinerja kolektor (Quitiaquez et al., 2023). Dalam konteks penelitian terbaru, pendekatan eksperimental sering dikombinasikan dengan simulasi numerik (CFD) untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif terhadap fenomena perpindahan panas dalam kolektor (Tsaousoglou et al., 2023).

Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan, masih terdapat kesenjangan (research gap) terkait optimalisasi desain kolektor surya plat datar bergelombang yang secara spesifik diuji pada kondisi iklim tropis. Sebagian besar penelitian sebelumnya dilakukan pada kondisi iklim subtropis atau laboratorium dengan kondisi terkontrol, sehingga hasilnya belum sepenuhnya representatif untuk aplikasi di Indonesia (Chen & Jiang, 2023). Selain itu, kajian yang mengintegrasikan aspek desain, performa termal, dan kelayakan aplikasi domestik masih terbatas.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji kolektor surya plat datar dengan absorber bergelombang guna meningkatkan efisiensi pemanasan air domestik di iklim tropis. Penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh variasi desain geometris terhadap performa termal serta evaluasi kinerja kolektor berdasarkan kondisi operasional nyata. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi kolektor surya yang lebih efisien, adaptif, dan aplikatif di Indonesia (Ogueke et al., 2009).

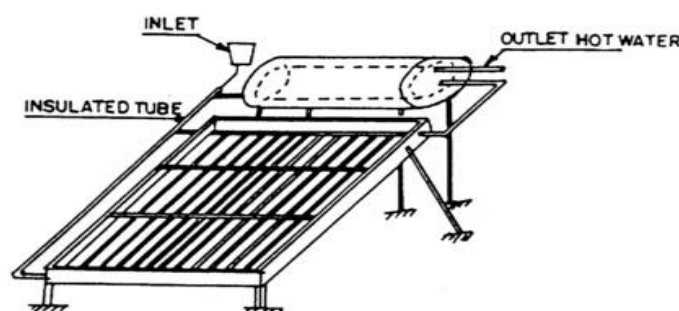
## **METODOLOGI**

### **Rancangan Penelitian**

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengevaluasi performa termal kolektor surya plat datar bergelombang pada kondisi iklim tropis aktual. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, perancangan kolektor, proses fabrikasi, pengujian lapangan, pengolahan data, dan analisis hasil. Pendekatan eksperimental dipilih karena memungkinkan pengamatan langsung terhadap respons sistem terhadap variasi radiasi surya, suhu lingkungan, dan laju aliran fluida, sehingga hasil yang diperoleh lebih representatif untuk kondisi operasi nyata.

### **Rancangan Kolektor Surya Plat Datar Bergelombang**

Kolektor yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki dimensi keseluruhan  $1,0 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$  dengan ketebalan total 100 mm. Absorber dibuat dari pelat aluminium setebal 1,2 mm yang dibentuk menjadi profil gelombang sinusoidal dan dilapisi cat hitam datar untuk memperoleh absorptivitas permukaan tinggi, yaitu  $\alpha \geq 0,95$ . Geometri gelombang dirancang dengan amplitudo 15 mm dan panjang gelombang 40 mm, sehingga rasio  $A/\lambda$  sebesar 0,375. Konfigurasi ini dipilih untuk memperoleh kompromi antara peningkatan luas permukaan perpindahan panas dan keterbatasan manufaktur yang masih realistis untuk aplikasi skala kecil. Kolektor surya plat datar bergelombang ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1. Kolektor Surya Plat datar Bergelombang**

Pipa aliran fluida dipasang pada bagian bawah absorber dalam konfigurasi paralel dengan jarak antar pipa 100 mm. Pipa dibuat dari tembaga berdiameter luar 15,88 mm (5/8 inci) sebanyak 10 buah. Pemilihan tembaga dilakukan karena material ini memiliki konduktivitas termal tinggi sehingga mendukung perpindahan panas dari absorber ke fluida kerja. Penutup kolektor menggunakan kaca bening setebal 4 mm dengan transmitansi radiasi surya  $\tau \geq 0,87$ , sedangkan insulasi termal menggunakan glasswool dengan ketebalan 50 mm pada bagian bawah dan 25 mm pada sisi-sisi kolektor untuk menekan kehilangan panas ke lingkungan. Rangka kolektor dibuat dari profil aluminium guna mengurangi massa sistem sekaligus meningkatkan ketahanan terhadap korosi di lingkungan tropis lembab. Spesifikasi teknis kolektor surya plat datar bergelombang ditunjukkan pada tabel 1

**Tabel 1. Spesifikasi teknis kolektor surya plat datar bergelombang**

Parameter	Nilai / Spesifikasi
Dimensi kolektor (P × L)	2000 mm × 1000 mm
Material absorber	Aluminium (t = 1,2 mm)
Profil absorber	Bergelombang sinusoidal
Amplitudo gelombang (A)	15 mm
Panjang gelombang ( $\lambda$ )	40 mm
Rasio $A/\lambda$	0,375
Pipa fluida	Tembaga, Ø luar 15,88 mm
Jumlah pipa	10 buah
Penutup	Kaca bening 4 mm, $\tau \geq 0,87$
Insulasi	Glasswool 50 mm bawah; 25 mm sisi
Kemiringan kolektor	15° menghadap utara

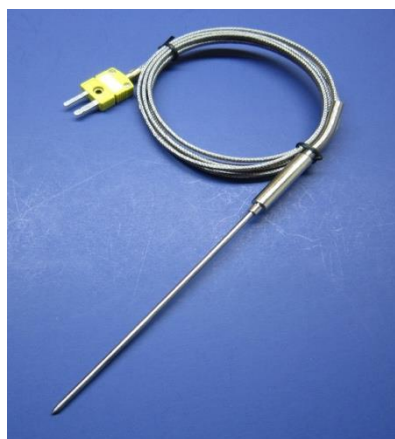
**Alat dan Bahan Pengujian**



**Gambar 2. Pyranometer CM11 (Kipp & Zonen)**



**Gambar 3. Flowmeter Rotameter**



Gambar 4. Termokopel tipe-K



Gambar 5. Data Logger Yokogawa DX1000

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pyranometer CM11 (Kipp & Zonen), flowmeter rotameter, termokopel tipe-K, serta data logger Yokogawa DX1000. Pyranometer CM11 (Kipp & Zonen) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 digunakan untuk mengukur intensitas radiasi surya global dengan tingkat akurasi  $\pm 2\%$ . Selanjutnya, laju aliran fluida diukur menggunakan flowmeter rotameter yang ditampilkan pada Gambar 3 alat ukur tipe variable area yang bekerja berdasarkan posisi pelampung dalam tabung kerucut transparan. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termokopel tipe-K seperti pada Gambar 4 berfungsi sebagai sensor suhu pada berbagai kondisi sistem termal. Sementara itu, seluruh data hasil pengukuran direkam secara kontinu menggunakan data logger Yokogawa DX1000 yang ditunjukkan pada Gambar 5 berfungsi untuk menyimpan dan menampilkan data dari berbagai sensor selama proses pengujian berlangsung.

### Prosedur Pengujian

Pengujian dilaksanakan di Laboratorium Energi Terbarukan, Semarang, pada koordinat  $6^{\circ}59'$  LS dan  $110^{\circ}24'$  BT, selama 30 hari pada bulan Juli-Agustus 2025. Periode ini dipilih untuk merepresentasikan kondisi musim kemarau yang umumnya memiliki intensitas penyinaran lebih stabil (BMKG, 2025). Kolektor dipasang dengan sudut kemiringan  $15^{\circ}$  menghadap ke utara, menyesuaikan lokasi pengujian yang berada di belahan bumi selatan. Pengujian dilakukan pada tiga variasi laju aliran fluida, yaitu 1,0; 2,0; dan 3,0 L/menit.

pengujian dimulai pada pukul 07.00 WIB dan diakhiri pada pukul 17.00 WIB. Kondisi tunak dinyatakan tercapai apabila perubahan suhu outlet tidak melebihi  $0,5^{\circ}\text{C}$  dalam rentang 10 menit berturut-turut. Untuk menjaga konsistensi analisis, data utama hanya diambil pada kondisi cuaca cerah dengan intensitas radiasi surya minimal  $400 \text{ W/m}^2$  selama periode efektif pengamatan. Setiap kondisi pengujian diulang sedikitnya tiga kali agar diperoleh data yang representatif. Untuk kepentingan perbandingan, satu kolektor referensi dengan absorber plat datar konvensional juga diuji secara simultan dalam kondisi yang sama. Kedua kolektor dibuat dengan dimensi, material utama, penutup, dan sistem insulasi yang identik, sehingga perbedaan kinerja terutama merepresentasikan pengaruh geometri absorber.

Metodologi pengujian ini mengacu pada standar internasional ISO 9806 serta didukung oleh pendekatan dalam ASHRAE 93, khususnya dalam penentuan kondisi tunak, variasi laju aliran fluida, serta kriteria intensitas radiasi minimum selama pengambilan data.

### Parameter Performa Termal

Performa termal kolektor dievaluasi melalui laju panas berguna ( $Q_u$ ) dan efisiensi termal sesaat ( $\eta$ ). Laju panas berguna dihitung menggunakan persamaan energi yang diterima fluida kerja, sedangkan efisiensi termal sesaat dihitung sebagai rasio antara panas berguna terhadap radiasi surya yang diterima luas apertur kolektor. Selain itu, karakteristik performa kolektor juga dianalisis melalui

kurva efisiensi sebagai fungsi parameter reduksi suhu  $(T_m - T_a)/GT$ , dengan  $T_m$  sebagai suhu fluida rata-rata dan  $T_a$  sebagai suhu ambien dari acuan persamaan

**Acuan Persamaan (dengan  $T_a$  sebagai suhu ambien)**

Persamaan efisiensi kolektor surya yang umum digunakan adalah:

$$\eta = \frac{\dot{m} c_p (T_o - T_i)}{A_c G} \dots\dots\dots(1)$$

dan sering dikembangkan menjadi bentuk linear:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G} \dots\dots\dots(2)$$

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Kondisi Lingkungan Selama Pengujian**

Pengujian lapangan menunjukkan bahwa kondisi lingkungan selama penelitian cukup representatif untuk evaluasi performa kolektor surya pada iklim tropis. Intensitas radiasi surya harian tertinggi tercatat sebesar 892 W/m<sup>2</sup> pada interval sekitar pukul 11.30–12.30 WIB, sedangkan radiasi harian kumulatif rata-rata mencapai 18,4 MJ/m<sup>2</sup>/hari. Suhu udara ambien berada pada rentang 27,3–34,6°C dengan rata-rata 31,2°C, sementara kelembaban relatif rata-rata mencapai 72,4%. Kecepatan angin yang terukur berkisar 0,4–3,2 m/s. Dalam sistem pemanas air surya, parameter lingkungan seperti radiasi surya, suhu udara, dan kondisi langit sangat menentukan besarnya energi yang dapat dikonversi serta rugi-rugi panas yang terjadi selama operasi.

Dari total 30 hari pengamatan, sebanyak 22 hari memenuhi kriteria cuaca cerah, yaitu radiasi surya minimal 400 W/m<sup>2</sup> selama sedikitnya 6 jam berturut-turut. Delapan hari lainnya tidak digunakan sebagai dasar analisis utama karena dipengaruhi tutupan awan yang signifikan. Fluktuasi radiasi surya akibat tutupan awan dan kemungkinan gangguan bayangan dapat menurunkan penerimaan energi pada permukaan kolektor. Oleh sebab itu, pemilihan hari uji dengan kondisi langit relatif cerah dan radiasi efektif yang cukup menjadi langkah penting untuk memperoleh karakteristik performa termal yang lebih konsisten.

Kondisi lingkungan selama pengujian merupakan faktor penting yang mempengaruhi kinerja sistem kolektor surya. Parameter seperti intensitas radiasi matahari, suhu ambient, kelembaban relatif, serta kecepatan angin diamati untuk memastikan bahwa pengujian dilakukan dalam kondisi yang representatif. Ringkasan kondisi lingkungan rata-rata selama pengujian disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Ringkasan kondisi lingkungan rata-rata selama pengujian**

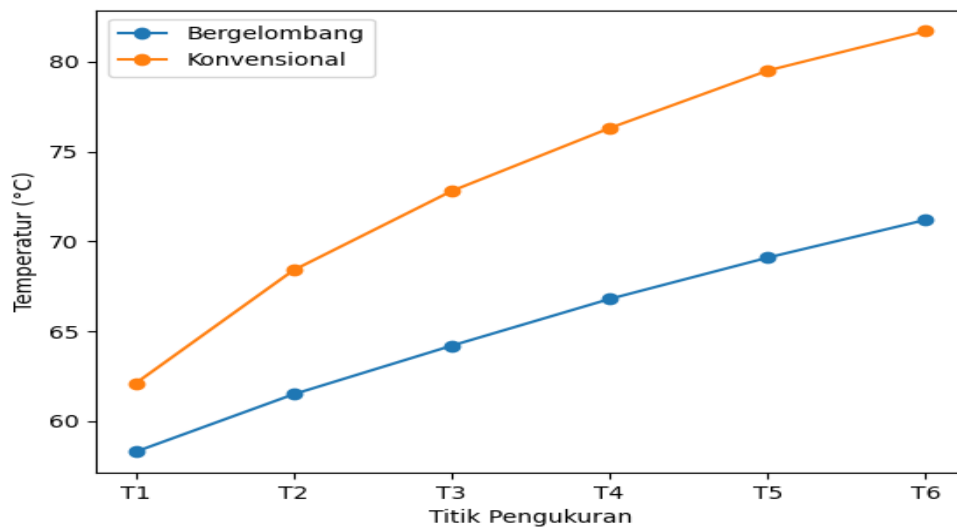
Parameter Lingkungan	Nilai Minimum	Nilai Maksimum
Radiasi surya global (W/m <sup>2</sup> )	312	892
Suhu ambien (°C)	27,3	34,6
Kelembaban relatif (%)	61,2	88,5
Kecepatan angin (m/s)	0,4	3,2
Radiasi harian kumulatif (MJ/m <sup>2</sup> /hari)	14,1	18,4

Berdasarkan Tabel 2, intensitas radiasi surya global selama pengujian berada pada rentang 312–892 W/m<sup>2</sup>, yang menunjukkan variasi kondisi penyinaran dari sedang hingga tinggi. Suhu lingkungan berkisar antara 27,3°C hingga 34,6°C, mencerminkan kondisi iklim tropis yang relatif stabil. Kelembaban relatif tercatat antara 61,2% hingga 88,5%, sedangkan kecepatan angin berada pada kisaran 0,4–3,2 m/s yang berpotensi mempengaruhi kehilangan panas konvektif pada kolektor.

Selain itu, radiasi harian kumulatif berada pada rentang 14,1–18,4 MJ/m<sup>2</sup>/hari yang menunjukkan ketersediaan energi surya yang cukup untuk proses pemanasan.

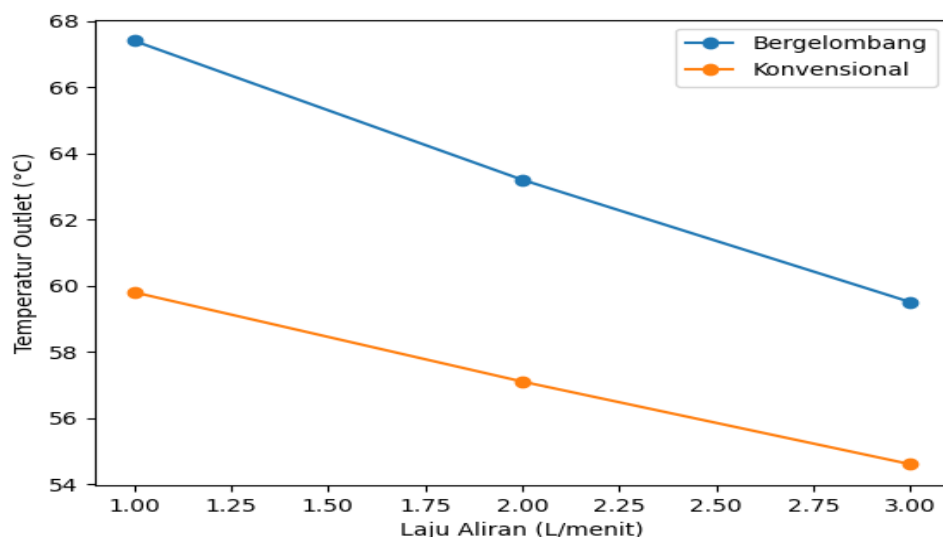
### Distribusi Suhu Absorber dan Suhu Outlet Fluida

Distribusi temperatur pada permukaan absorber merupakan salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kinerja termal kolektor surya. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pola penyebaran panas serta efektivitas perpindahan kalor dari absorber ke fluida kerja. Perbandingan distribusi temperatur antara kolektor bergelombang dan kolektor konvensional pada beberapa titik pengukuran ditampilkan pada Gambar 6



Gambar 6. Distribusi temperatur permukaan absorber

Hasil pengujian menunjukkan gambar 6 bahwa absorber bergelombang menghasilkan distribusi temperatur permukaan yang lebih seragam dibandingkan absorber datar konvensional. Pada kondisi radiasi surya sekitar 800 W/m<sup>2</sup> dan laju aliran 2,0 L/menit, suhu permukaan absorber bergelombang berada pada rentang 58,3–71,2°C, sedangkan pada absorber konvensional suhu permukaan mencapai 62,1–81,7°C. Secara teoritis, geometri bergelombang mampu meningkatkan luas permukaan efektif perpindahan panas, memperbaiki distribusi temperatur pada absorber, dan menghasilkan interaksi termal yang lebih baik antara absorber dan fluida kerja.



Gambar 7. Pengaruh laju aliran terhadap temperatur outlet

Suhu outlet fluida yang lebih tinggi pada kolektor bergelombang dibandingkan kolektor konvensional menunjukkan bahwa modifikasi geometri absorber berkontribusi langsung terhadap peningkatan perpindahan panas yang diserap oleh air. Pada laju aliran 1,0 L/menit dan radiasi surya rata-rata 750 W/m<sup>2</sup>, suhu outlet kolektor bergelombang mencapai 67,4°C, sedangkan kolektor konvensional hanya mencapai 59,8°C. Hasil ini memperkuat temuan studi terdahulu bahwa performa sistem pemanas air surya dapat ditingkatkan melalui rekayasa geometri permukaan absorber, bukan hanya melalui perubahan material atau penambahan komponen eksternal.

### Laju Panas Berguna

Nilai laju panas berguna ( $Q_u$ ) yang lebih tinggi pada kolektor bergelombang dibandingkan kolektor konvensional menunjukkan bahwa profil sinusoidal mampu meningkatkan kapasitas sistem dalam menyalurkan energi panas ke fluida kerja. Pada laju aliran 1,0 L/menit, kolektor bergelombang menghasilkan  $Q_u$  rata-rata sebesar 1.124 W, sedangkan kolektor konvensional sebesar 892 W. Pada laju aliran 2,0 dan 3,0 L/menit, nilai  $Q_u$  kolektor bergelombang masing-masing mencapai 1.387 W dan 1.512 W, atau lebih tinggi sekitar 25,7–26,3% dibandingkan kolektor konvensional. Secara umum, peningkatan  $Q_u$  pada kolektor termal surya berkaitan dengan kemampuan absorber untuk menerima radiasi secara efektif dan mentransfer panas tersebut ke fluida dengan rugi-rugi yang minimal.

Ketika laju aliran fluida dinaikkan, laju panas berguna juga meningkat. Temuan ini sejalan dengan hasil beberapa studi peningkatan performa flat-plate collector yang menunjukkan bahwa penguatan perpindahan panas internal dapat diperoleh melalui pengaturan aliran, modifikasi saluran, atau penambahan elemen peningkat perpindahan panas. Dengan demikian, efek positif absorber bergelombang pada penelitian ini tidak berdiri sendiri, tetapi bekerja bersamaan dengan kondisi operasi fluida yang mendukung proses konveksi internal yang lebih baik. Perbandingan laju panas berguna dan efisiensi termal pada berbagai laju aliran ditunjukkan pada Tabel 3

**Tabel 3. Perbandingan laju panas berguna dan efisiensi termal pada berbagai laju aliran**

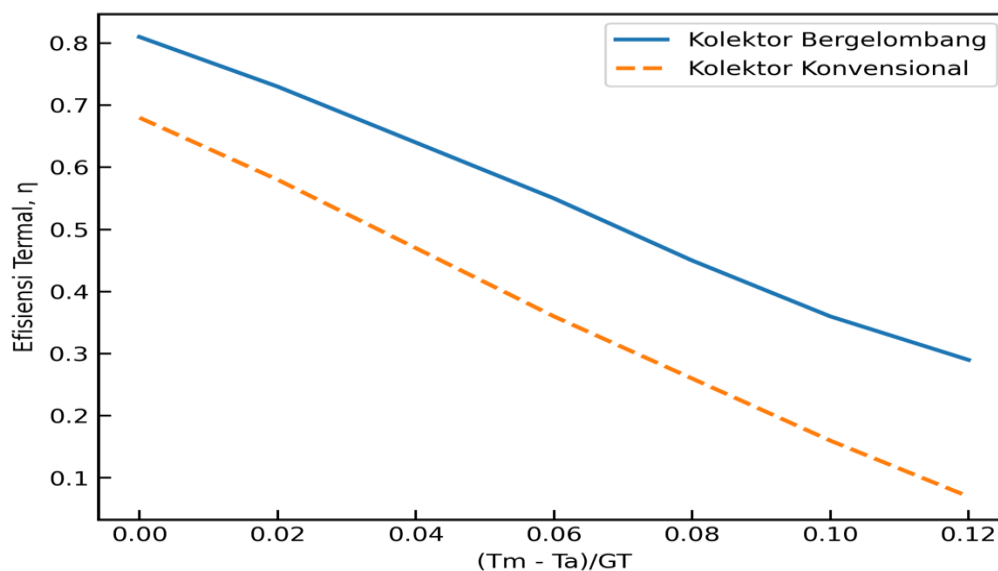
Laju Aliran (L/menit)	$Q_u$ Bergelombang (W)	$Q_u$ Konvensional (W)	Peningkatan $Q_u$ (%)	$\eta$ Bergelombang (%)
1,0	1.124	892	26,0	63,4
2,0	1.387	1.098	26,3	72,1
3,0	1.512	1.203	25,7	75,8

Perbandingan laju panas berguna (*useful heat gain*) dan efisiensi termal pada berbagai variasi laju aliran merupakan indikator penting dalam mengevaluasi kinerja kolektor surya. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh debit aliran fluida terhadap kemampuan sistem dalam menyerap dan mentransfer energi panas. Hasil perbandingan antara kolektor bergelombang dan kolektor konvensional pada berbagai laju aliran ditunjukkan pada Tabel 3.

Efisiensi termal kolektor bergelombang yang lebih tinggi dibandingkan kolektor konvensional menunjukkan bahwa modifikasi geometri absorber memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan kinerja sistem. Efisiensi termal rata-rata tertinggi dicapai pada laju aliran 3,0 L/menit dan kondisi radiasi surya  $\geq 700$  W/m<sup>2</sup>, yaitu sebesar 75,8%, sedangkan kolektor konvensional hanya mencapai 60,4%. Peningkatan efisiensi sebesar 25,5% ini mengindikasikan bahwa kolektor bergelombang tidak hanya lebih efektif dalam memanfaatkan radiasi surya yang diterima, tetapi juga mampu mempertahankan energi termal tersebut dengan lebih baik selama proses penyaluran panas ke fluida.

Kurva efisiensi kolektor bergelombang yang diplot terhadap parameter reduksi suhu menghasilkan persamaan regresi linear  $\eta = 0,812 - 4,37 (T_m - T_a)/GT$ . Nilai intersep yang tinggi menunjukkan karakteristik optis yang baik, sedangkan kemiringan kurva yang merepresentasikan kehilangan panas total masih berada pada tingkat yang dapat diterima. Hasil ini selaras dengan

temuan studi-studi sebelumnya pada absorber bergelombang dan desain absorber termodifikasi lain, yang menunjukkan bahwa rekayasa bentuk permukaan dapat meningkatkan efisiensi kolektor secara signifikan.



**Gambar 8. Perbandingan kurva efisiensi kolektor bergelombang dan kolektor konvensional terhadap parameter reduksi suhu.**

#### Pengaruh Laju Aliran terhadap Performa

Pengaruh laju aliran terhadap efisiensi termal menunjukkan bahwa kenaikan laju aliran cenderung meningkatkan efisiensi kolektor, tetapi pada saat yang sama menurunkan suhu outlet fluida. Ketika laju aliran dinaikkan dari 1,0 menjadi 2,0 L/menit, efisiensi termal meningkat dari 63,4% menjadi 72,1%. Saat laju aliran dinaikkan lagi menjadi 3,0 L/menit, efisiensi termal mencapai 75,8%, namun suhu outlet rata-rata menurun dari 67,4°C menjadi 48,7°C. Fenomena ini umum terjadi pada sistem kolektor air surya, karena peningkatan laju aliran akan memperbesar koefisien perpindahan panas konveksi dan mempercepat ekstraksi energi dari absorber, namun mengurangi waktu tinggal fluida di dalam kolektor.

Kecenderungan peningkatan efisiensi yang semakin kecil pada laju aliran yang lebih tinggi menunjukkan adanya gejala diminishing return. Fenomena ini juga ditemukan pada berbagai strategi peningkatan performa flat-plate collector, termasuk penggunaan flow insert, porous media, thermal performance enhancer, dan optimasi pola aliran. Dengan demikian, meskipun peningkatan laju aliran dapat memperbaiki pengambilan panas, optimasi operasi tetap diperlukan agar sistem tidak hanya efisien dari sisi kolektor, tetapi juga sesuai dengan kebutuhan pengguna akhir.

#### Kehilangan Panas dan Pengaruh Iklim Tropis

Kondisi iklim tropis pada lokasi penelitian memberikan keuntungan termal tertentu bagi kinerja kolektor. Suhu udara ambien yang relatif tinggi cenderung menurunkan beda temperatur antara kolektor dan lingkungan, sehingga rugi-rugi panas konvektif dan radiatif dapat ditekan. Dengan suhu absorber rata-rata sekitar 64,8°C dan suhu ambien rata-rata 31,2°C, estimasi kehilangan panas total pada kolektor bergelombang selama pengujian hanya sekitar 89,3 W, atau setara dengan 5,9% dari total energi surya yang diterima.

Namun demikian, iklim tropis juga menghadirkan tantangan operasional. Kelembaban udara yang tinggi, deposisi debu, dan akumulasi kotoran pada permukaan kaca dapat mengurangi transmitansi optik dan pada akhirnya menurunkan energi yang masuk ke absorber. Berdasarkan pengukuran selama pengujian, penurunan transmitansi kaca setelah 7 hari tanpa pembersihan mencapai rata-rata 3,2% dan berimplikasi pada penurunan efisiensi termal sebesar 2,6%. Faktor-faktor seperti bayangan parsial dan perubahan kondisi permukaan penutup juga telah diketahui berpengaruh terhadap performa kolektor surya.

### Implikasi untuk Pemanasan Air Domestik

Kemampuan satu unit kolektor untuk menyediakan energi panas yang mendekati atau melampaui kebutuhan air panas domestik harian menunjukkan bahwa desain yang dikembangkan memiliki prospek aplikasi yang baik pada sektor rumah tangga. Berdasarkan data eksperimen, satu unit kolektor berukuran 2,0 m<sup>2</sup> mampu menghasilkan energi panas berguna rata-rata sebesar 7,2 kWh/hari. Jika diasumsikan kebutuhan air panas domestik keluarga rata-rata adalah 150 liter/hari dengan kenaikan suhu dari 30°C menjadi 60°C, maka energi yang dibutuhkan sekitar 5,2 kWh/hari. Secara umum, studi-studi terkini menegaskan bahwa solar water heating system merupakan salah satu teknologi yang layak secara teknis dan berpotensi memberikan manfaat ekonomi serta lingkungan dalam jangka panjang.

Dari sisi energi, potensi pengurangan konsumsi listrik tahunan memperlihatkan bahwa kolektor bergelombang dapat menjadi alternatif yang menarik untuk menekan beban energi rumah tangga. Dibandingkan pemanas air listrik konvensional berdaya 1.500 W, penggunaan kolektor surya bergelombang berpotensi menghemat konsumsi listrik hingga 1.898 kWh/tahun per unit. Namun, besarnya manfaat ekonomi akhir tetap dipengaruhi oleh asumsi kebutuhan air panas, tarif listrik, biaya investasi awal, dan pola penggunaan harian. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat diposisikan sebagai bukti kelayakan teknis dan potensi manfaat energi, sementara evaluasi keekonomian rinci masih perlu dilakukan lebih lanjut pada studi lanjutan. Potensi penghematan energi kolektor surya bergelombang vs pemanas listrik konvensional

Analisis potensi penghematan energi dan dampak ekonomi merupakan aspek penting dalam menilai kelayakan penggunaan kolektor surya dibandingkan dengan sistem pemanas konvensional. Parameter yang dibandingkan meliputi energi harian yang dihasilkan, biaya operasi tahunan, emisi karbon, umur pakai, serta periode pengembalian investasi (*payback period*). Perbandingan kinerja antara kolektor surya bergelombang dan pemanas listrik konvensional disajikan pada Tabel 4.

**Tabel 4. Potensi penghematan energi kolektor surya bergelombang vs pemanas listrik konvensional**

Parameter	Kolektor Surya Bergelombang	Pemanas Listrik Konvensional
Energi harian (kWh/hari)	7,2 (surya)	5,2 (listrik)
Biaya operasi per tahun (Rp)	~0 (energi surya)	~2.848.000
Emisi CO <sub>2</sub> per tahun (kg)	0	~1.709
Umur pakai (tahun)	20–25	5–8
Payback period (tahun)	3,5–4,0	-

Hasil yang ditunjukkan pada tabel 4 mengindikasikan bahwa pemanfaatan kolektor surya bergelombang tidak hanya memberikan keuntungan dari sisi efisiensi energi, tetapi juga berdampak signifikan terhadap pengurangan biaya operasional dan emisi lingkungan. Nilai energi harian yang lebih tinggi pada sistem kolektor surya menunjukkan bahwa sistem ini mampu memanfaatkan radiasi matahari secara optimal, terutama pada kondisi iklim tropis dengan intensitas penyinaran yang relatif tinggi dan stabil. Dari perspektif ekonomi, perbedaan biaya operasional yang sangat signifikan antara kedua sistem menjadi faktor utama dalam mempertimbangkan implementasi teknologi ini. Ketergantungan pemanas listrik terhadap energi berbasis jaringan menyebabkan biaya yang terus meningkat seiring penggunaan, sedangkan kolektor surya memanfaatkan sumber energi terbarukan yang tersedia secara gratis. Hal ini menjadikan sistem kolektor surya sebagai solusi yang lebih berkelanjutan dalam jangka panjang. Selain itu, aspek lingkungan menjadi nilai tambah utama dari penggunaan kolektor surya. Emisi CO<sub>2</sub> yang hampir nol menunjukkan bahwa teknologi ini berkontribusi dalam menekan dampak pemanasan global dan mendukung transisi menuju energi bersih. Berbeda dengan sistem pemanas listrik yang masih bergantung pada sumber energi fosil secara tidak langsung, sehingga menghasilkan emisi karbon yang cukup signifikan. Jika ditinjau dari umur pakai, kolektor surya memiliki keunggulan dalam hal durabilitas dan ketahanan terhadap

operasi jangka panjang. Umur pakai yang mencapai 20–25 tahun menunjukkan bahwa sistem ini memiliki tingkat keandalan yang tinggi, sehingga investasi awal yang dikeluarkan dapat terkompensasi melalui masa penggunaan yang lebih lama. Hal ini diperkuat dengan nilai *payback period* yang relatif singkat, yaitu sekitar 3,5–4,0 tahun, yang menunjukkan bahwa investasi pada teknologi ini layak secara finansial.

Dengan demikian, secara keseluruhan, penggunaan kolektor surya bergelombang dapat direkomendasikan sebagai alternatif sistem pemanas air yang lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan dibandingkan dengan pemanas listrik konvensional, khususnya pada wilayah dengan potensi energi surya yang tinggi seperti daerah tropis.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis performa termal kolektor surya plat datar dengan absorber bergelombang, dapat disimpulkan bahwa modifikasi geometri absorber memberikan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan kolektor konvensional. Kolektor bergelombang mampu menghasilkan distribusi temperatur yang lebih seragam pada permukaan absorber serta meningkatkan suhu outlet fluida, yang menunjukkan terjadinya peningkatan efektivitas perpindahan panas antara absorber dan fluida kerja. Secara kuantitatif, efisiensi termal maksimum yang dicapai sebesar 75,8% pada laju aliran 3,0 L/menit, dengan peningkatan efisiensi sekitar 25,5% dibandingkan kolektor datar konvensional. Selain itu, laju panas berguna ( $Q_u$ ) juga meningkat hingga 26,3%, yang menegaskan bahwa profil bergelombang mampu meningkatkan luas permukaan efektif dan menciptakan turbulensi aliran yang mendukung perpindahan panas konvektif. Analisis pengaruh laju aliran menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran fluida berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi termal, namun diikuti oleh penurunan suhu outlet fluida akibat berkurangnya waktu tinggal fluida di dalam kolektor. Hal ini menunjukkan adanya trade-off antara efisiensi sistem dan temperatur keluaran, sehingga diperlukan optimasi kondisi operasi sesuai kebutuhan aplikasi. Dalam konteks aplikasi domestik, kolektor yang dikembangkan mampu menghasilkan energi panas rata-rata sebesar 7,2 kWh/hari, yang cukup untuk memenuhi kebutuhan air panas rumah tangga. Implementasi sistem ini berpotensi menghemat konsumsi energi listrik hingga 1.898 kWh/tahun serta mengurangi emisi karbon, sehingga memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan yang signifikan. Secara keseluruhan, kolektor surya plat datar dengan absorber bergelombang terbukti sebagai teknologi yang efisien, aplikatif, dan sesuai untuk kondisi iklim tropis.

## DAFTAR PUSTAKA

- BMKG. (2025). *Data Klimatologi Indonesia dan Pola Musim Kemarau 2025*.
- Chen, Y., & Jiang, Y. (2023). Interval energy flow calculation method for electricity-heat-hydrogen integrated energy system considering the correlation between variables. *Energy*, 263, 125678. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125678>
- He, S., Wang, M., Tian, W., Qiu, S., & Su, G. H. (2022). Development of an OpenFOAM solver for numerical simulations of shell-and-tube heat exchangers based on porous media model. *Applied Thermal Engineering*, 210, 118389. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118389>
- Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H. A., Al-Badi, R., Fayad, M. A., & Gholami, A. (2022). Dust impact on photovoltaic/thermal system in harsh weather conditions. *Solar Energy*, 245, 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.09.012>
- Maddala, G., Gade, R., Ahemed, J., Kalvapalli, S., Simhachalam, N. B., Chetti, P., Pola, S., & Mitty, R. (2021). Efficient, dopant free phenazine based hole transporting materials for high performance perovskite solar cells. *Solar Energy*, 226, 501–512. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.055>
- Ogueke, N. V., Anyanwu, E. E., & Ekechukwu, O. V. (2009). A review of solar water heating systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1(4). <https://doi.org/10.1063/1.3167285>
- Panigrahi, S., Sharma, H. B., Tiwari, B. R., Krishna, N. V., Ghangrekar, M. M., & Dubey, B. K. (2021). Insight into understanding the performance of electrochemical pretreatment on improving anaerobic biodegradability of yard waste. *Renewable Energy*, 180, 1166–1178. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.123>

- 
- Pereira, A. F. C., & Sousa, J. M. M. (2023). Assisted site-dependent selection of the most suitable Airborne Wind Energy system via Fuzzy Analytic Network Process. *Energy Reports*, 9, 2881–2899. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.045>
- Quitiaquez, W., Estupiñán-Campos, J., Nieto-Londoño, C., & Quitiaquez, P. (2023). CFD Analysis of Heat Transfer Enhancement in a Flat-Plate Solar Collector/Evaporator with Different Geometric Variations in the Cross Section. *Energies*, 16(15), 5755. <https://doi.org/10.3390/en16155755>
- Roy, P., Jahromi, H., Rahman, T., Adhikari, S., Feyzbar-Khalkhali-Nejad, F., Barbary Hassan, E., & Oh, T.-S. (2022). Understanding the effects of feedstock blending and catalyst support on hydrotreatment of algae HTL biocrude with non-edible vegetable oil. *Energy Conversion and Management*, 268, 115998. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115998>
- Saha, S. K. (2022). Dynamics of phase change of gallium under magnetic field and thermocapillary effects under variable gravity conditions. *Thermal Science and Engineering Progress*, 29, 101234. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101234>
- Tsaousoglou, G., Ellinas, P., & Varvarigos, E. (2023). Operating peer-to-peer electricity markets under uncertainty via learning-based, distributed optimal control. *Applied Energy*, 343, 121234. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121234>