

ANALISIS KOMPARASI PENDINGINAN PASIF PANEL SURYA MENGGUNAKAN PELAT ALUMINIUM DENGAN KONFIGURASI LUBANG *INLINE* DAN *STAGGERED*

P.Subing¹, I.Bizzy^{1*}

¹Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya, Palembang

*Corresponding author e-mail: irwin@unsri.ac.id

ABSTRAK: Menghadapi tantangan energi global dan perubahan iklim, pengembangan energi surya menjadi krusial, terutama di Indonesia yang beriklim tropis. Namun, tingginya radiasi matahari meningkatkan temperatur operasional panel surya, sehingga dapat menurunkan efisiensi hingga 0,5% per kenaikan 1 °C di atas temperatur standar (25 °C). Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas sistem pendinginan pasif menggunakan pelat aluminium berlubang untuk menurunkan temperatur serta meningkatkan efisiensi panel polikristalin 8 Wp. Penelitian ini menggunakan dua panel, satu sebagai kontrol tanpa pendingin dan satu dipasangkan pelat aluminium berlubang berdimensi 380 mm × 180 mm × 17 mm dengan tebal 1,5 mm. Dua variasi desain pelat diuji, yaitu pola *inline* (2.499 lubang) dan pola *staggered* (2.635 lubang), dengan pengujian dilakukan di Palembang pada kemiringan panel 15° menghadap utara. Hasil penelitian menunjukkan pola *staggered* terbukti efektif dengan memberikan penurunan temperatur rata-rata sebesar 1,87 °C, yang berdampak pada kenaikan daya keluaran rata-rata sebesar 0,17 W dan efisiensi 0,31%. Sementara itu, pola *inline* menurunkan temperatur rata-rata sebesar 1,51 °C, meningkatkan daya sebesar 0,14 W, dan efisiensi 0,27%. Analisis kesetimbangan energi memvalidasi kemampuan pelat membuang kerugian energi kalor secara efektif, di mana pola *staggered* mampu mendisipasikan panas hingga 40,26 W (lebih tinggi dari 35,50 W pada panel tanpa pendingin) pada kondisi optimal. Disimpulkan, pelat aluminium berlubang terbukti efektif menurunkan temperatur dan meningkatkan kinerja panel surya, terutama dengan pola *staggered*.

Kata Kunci: Panel surya, pelat berlubang, pendingin pasif, efisiensi

ABSTRACT: In response to global energy challenges and climate change, the development of solar energy has become crucial, particularly in tropical climates like Indonesia. However, high solar radiation increases the operational temperature of solar panels, which can reduce efficiency by up to 0.5 % for every 1 °C rise above the standard temperature (25 °C). This study aims to analyze the effectiveness of a passive cooling system using perforated aluminum plates to lower the temperature and increase the efficiency of 8 Wp polycrystalline panels. The research utilized two panels, one served as a control without cooling, while the other was fitted with a perforated aluminum plate measuring 380 × 180 × 17 mm with a thickness of 1.5 mm. Two design variations were tested, an inline pattern (2,499 holes) and a staggered pattern (2,635 holes), with experiments conducted in Palembang at a tilt angle of 15° facing north. The results showed that the staggered pattern proved most effective, providing an average temperature reduction of 1.87 °C, which resulted in an average power output increase of 0.17 W and efficiency increase of 0.31%. Meanwhile, the inline pattern reduced the average temperature by 1.51 °C, increasing power by 0.14 W and efficiency by 0.27%. Energy balance analysis validated the plates's capability to dissipate heat loss effectively, with the staggered pattern dissipating up to 40.26 W (higher than the 35.50 W of the uncooled panel) under optimal conditions. It is concluded that the perforated aluminum plate is effective in lowering temperatures and enhancing solar panel performance, particularly with the staggered pattern.

Keywords: Solar panel, perforated plate, passive cooling, efficiency

1 Pendahuluan

Dalam menghadapi tantangan energi global dan perubahan iklim, pengembangan energi terbarukan menjadi solusi yang krusial. Indonesia sebagai negara

tropis memiliki potensi energi surya yang sangat besar mencapai sekitar 3.294,4 GW, namun pemanfaatannya baru sekitar 0,05% dengan kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) baru mencapai 100 MW [1]. Angka ini masih jauh dari target pemerintah sebesar 3,6

GW pada tahun 2025, yang menunjukkan adanya urgensi untuk mengoptimalkan teknologi panel surya.

Secara umum, panel surya hanya mampu mengonversi sekitar 15% dari radiasi matahari menjadi energi listrik [2], sementara sisa energi yang tidak terkonversi berubah menjadi kalor. Akumulasi kalor ini menyebabkan peningkatan temperatur operasional panel, yang dapat menurunkan efisiensinya hingga 0,5% untuk setiap kenaikan 1 °C di atas temperatur standar [3]. Oleh karena itu, diperlukan sebuah sistem pendingin untuk menjaga temperatur panel tetap optimal dan memaksimalkan produksi energinya.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengatasi masalah penurunan efisiensi ini. Studi mengenai pendinginan aktif, seperti yang menggunakan *blower*, telah terbukti berhasil meningkatkan efisiensi panel secara eksperimental [2]. Sebagai alternatif, metode pendinginan pasif terus dikembangkan karena tidak memerlukan energi eksternal. Penggunaan pelat aluminium berlubang telah terbukti efektif menurunkan suhu operasi panel secara signifikan dan meningkatkan daya keluaran [4], sementara metode pasif lainnya seperti penggunaan *heatsink* juga menunjukkan peningkatan efisiensi yang menjanjikan pada panel surya tipe polikristalin [5].

Berdasarkan kajian-kajian tersebut, penelitian ini berfokus pada studi eksperimental mengenai sistem pendinginan pasif menggunakan pelat aluminium berlubang, dengan kebaruan penelitian terletak pada analisis pengaruh variasi pola lubang (*inline* dan *staggered*). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh sistem pendingin terhadap penurunan temperatur operasional, peningkatan efisiensi serta daya keluaran, dan mengevaluasi kesetimbangan energi sistem. Diharapkan sistem pendinginan ini dapat menjadi solusi efektif untuk mengoptimalkan efisiensi panel surya, yang sejalan dengan kebijakan dan potensi besar pemanfaatan energi surya di Indonesia.

2 Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode kaji eksperimen untuk menganalisis pengaruh sistem pendingin pasif, berupa pelat aluminium berlubang, terhadap performa termal dan elektrik panel surya tipe polikristalin 8 WP. Pendekatan ini mencakup perancangan dan pembuatan alat uji, pelaksanaan eksperimen dalam kondisi lingkungan sesungguhnya, serta analisis data performa yang terkumpul. Eksperimen dirancang untuk membandingkan secara langsung dua unit panel surya polikristalin 8 WP

(model SGP-8W-5,5) yang identik, untuk spesifikasi teknisnya dirinci pada Tabel 1. Satu panel berfungsi sebagai kontrol tanpa modifikasi, sementara panel kedua dilengkapi pelat pendingin aluminium berlubang yang terpasang di bagian belakangnya.

Tabel 1. Spesifikasi Panel Surya

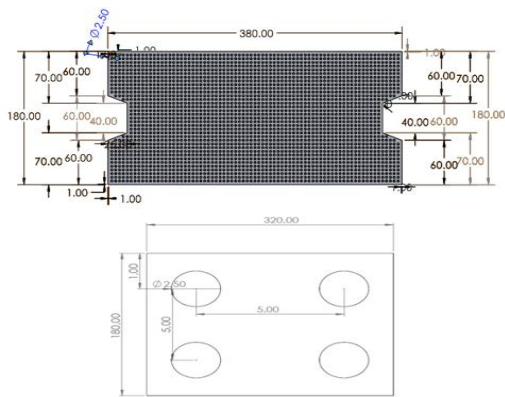
No	Item	Satuan
1	Model	SGP-8W-5,5
2	Dimensi	185 × 380 mm
3	Tipe Sel	Polikristalin
4	Pmax	8 WP
5	Voc	6,6 V
6	Vmp	5,5 V
7	Isc	1,57 A
8	Imp	1,45 A
9	Tegangan Sistem	600V DC
10	Toleransi Daya	±3%

Pengujian dilakukan dengan menempatkan kedua panel pada sebuah penyangga di atas atap beton. Lokasi pengujian ini berada pada ketinggian 8 meter di Palembang, Sumatera Selatan, dengan koordinat 2°57'53.0"S 104°48'23.7"BT. Sudut kemiringan panel diatur sebesar 15° menghadap ke utara, karena sudut ini terbukti menghasilkan daya listrik yang optimal, dengan daya keluaran lebih tinggi tercatat pada kemiringan 15° [6]. Pengambilan data dilakukan selama total 6 hari, terbagi menjadi 3 hari pengujian untuk pelat dengan pola lubang *inline* dan 3 hari untuk pola lubang *staggered*, dalam rentang waktu pukul 10.00 hingga 16.00 WIB setiap harinya.

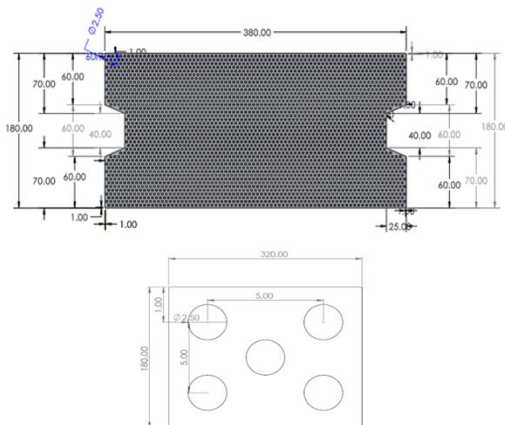
Material utama yang digunakan untuk sistem pendingin pasif adalah pelat aluminium dengan ketebalan 1,5 mm dan dimensi keseluruhan 380 mm × 180 mm × 17 mm. Aluminium dipilih sebagai material karena memiliki beberapa keunggulan signifikan, termasuk konduktivitas termal yang tinggi sebesar 222,706 W/m·K, densitas yang rendah (2700 kg/m³), ketahanan korosi yang baik, serta kemudahan dalam proses fabrikasi. Pada desain ini, sistem pendingin dirancang dengan bagian atas dan tengah dikosongkan, menyisakan hanya pelat bagian bawah yang berlubang (perforasi). Pengaturan ini dirancang untuk memaksimalkan pembuangan panas melalui prinsip konveksi. Ruang terbuka yang tercipta memungkinkan udara panas yang naik dari panel surya (konveksi alami) mengalir bebas tanpa hambatan. Sementara itu, pelat bawah yang berlubang berfungsi memaksimalkan luas permukaan kontak dengan udara, sehingga pelepasan

panas kelingkungan menjadi lebih efisien dan laju perpindahan kalor konvektif meningkat.

Untuk mengevaluasi efektivitas disipasi panas, pengujian dilakukan menggunakan dua variasi desain pola lubang yang berbeda. Variasi pertama adalah pola *inline*, di mana 2.499 lubang disusun dalam barisan dan kolom yang sejajar untuk menciptakan jalur aliran udara yang teratur. Variasi kedua adalah pola *staggered*, di mana 2.635 lubang disusun secara berselang-seling antarbaris. Desain *staggered* ini bertujuan untuk menciptakan turbulensi aliran udara yang lebih intensif, yang diharapkan dapat memecah lapisan batas termal dan meningkatkan koefisien perpindahan panas dari permukaan pelat ke udara sekitar. Untuk kedua pola, seluruh lubang dibuat dengan diameter seragam 2,5 mm dan jarak antar pusat 5 mm. Desain rinci dari kedua pola ini diilustrasikan pada Gambar 1.



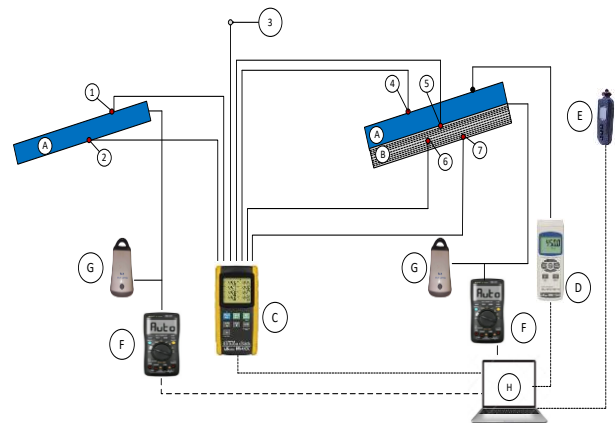
(a)



(b)

Gambar 1. Desain pelat pendingin aluminium yang diuji, menunjukkan (a) pola lubang *inline* dengan 2.499 lubang dan (b) pola lubang *staggered* dengan 2.635 lubang.

Variabel penelitian diukur menggunakan serangkaian instrumen yang skema pemasangannya ditunjukkan pada Gambar 2. Temperatur diukur pada tujuh titik strategis menggunakan termokopel tipe-K yang terhubung ke Temperatur Recorder (Lutron BTM-4208SD). Titik-titik pengukuran tersebut adalah permukaan atas (T_1, T_4) dan bawah (T_2, T_5) kedua panel, temperatur ambien (T_3), bagian dalam pelat (T_6), serta permukaan bawah pelat (T_7). Intensitas radiasi matahari ($I(t)$) diukur menggunakan Solar Power Meter, sementara tegangan (V) dan arus (I) keluaran panel menggunakan Multimeter Digital yang terhubung ke beban. Kecepatan udara di sekitar lokasi diukur menggunakan anemometer digital (velometer) setiap 10 menit, sedangkan data tegangan dan arus dicatat setiap 10 menit.



Gambar 2. Skema Pengujian Eksperimental

Daftar lengkap variabel pengukuran disajikan pada Tabel 2, yang mencakup parameter lingkungan, data elektrik (tegangan dan arus), serta distribusi temperatur pada tujuh titik strategis (T_1 hingga T_7) mulai dari permukaan panel hingga pelat pendingin berikut ini.

Tabel 2. Variabel yang Diukur Selama Pengujian

No	Variabel	Satuan
1	Intensitas matahari	W/m^2
2	Temp. permukaan panel	$^{\circ}C$
3	Temp. belakang panel	$^{\circ}C$
4	Temp. dalam pelat	$^{\circ}C$
5	Temp. ambien	$^{\circ}C$
6	Temp. permukaan pelat	$^{\circ}C$
7	Temp. belakang pelat	$^{\circ}C$
8	Tegangan keluaran panel	V
9	Arus keluaran panel	A
10	Kecepatan angin	m/s

Setelah proses pengumpulan data selesai, data mentah yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis secara kuantitatif untuk mengevaluasi efektivitas sistem pendinginan. Tahap analisis ini merupakan inti dari penelitian, di mana performa panel surya dengan pelat pendingin dibandingkan secara langsung dengan panel kontrol tanpa pendingin. Analisis data difokuskan pada beberapa aspek utama. Pertama, dilakukan analisis perbandingan temperatur untuk melihat sejauh mana pelat berlubang mampu menurunkan suhu operasional panel, terutama dengan membandingkan profil temperatur permukaan atas kedua panel (T_1 vs T_4).

Kedua, kinerja elektrik panel dianalisis dengan menghitung daya keluaran sesaat (P) menggunakan Persamaan (1), yaitu hasil perkalian antara tegangan (V) dan arus (I) yang terukur. Selanjutnya, efisiensi konversi energi (η_{ec}) dari setiap panel dihitung menggunakan Persamaan (2), dengan A_c adalah luas permukaan panel ($0,0703 \text{ m}^2$). Penting untuk dicatat bahwa perhitungan efisiensi hanya dilakukan pada segmen data yang memenuhi standar ASHRAE 93-77, yaitu ketika intensitas radiasi matahari ($I(t)$) tercatat stabil di atas 650 W/m^2 selama periode minimal 15 menit.

Terakhir, untuk memvalidasi akurasi pengukuran dan menguantifikasi jumlah panas yang berhasil didisipasikan, dilakukan analisis kesetimbangan energi. Skema aliran energi untuk analisis ini diilustrasikan pada Gambar 3. Kerugian kalor total ($\dot{Q}_{kerugian}$) yang dilepaskan ke lingkungan dihitung untuk panel tanpa pelat dan dengan pelat, masing-masing menggunakan Persamaan (3) dan (4). Koefisien perpindahan kalor konveksi (h) yang digunakan dalam persamaan ini diestimasi berdasarkan data temperatur dan kecepatan udara yang terukur.

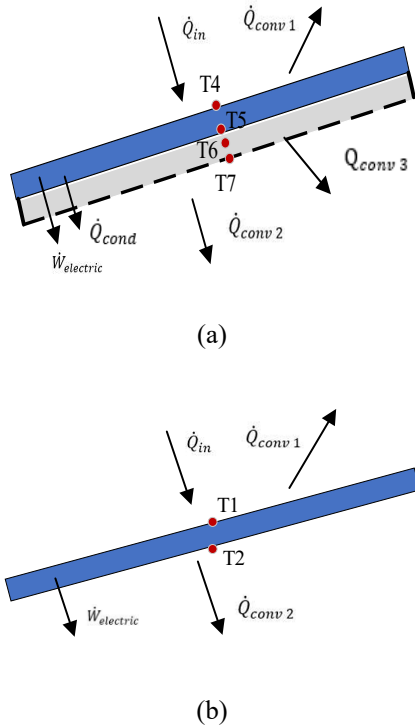
$$P = V \times I \quad (1)$$

$$\eta_{ec} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I(t) \times A_c} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{kerugian} = I(t) \times A_c - (V \times I) - h_1 A (T_1 - T_{\infty}) - h_2 A (T_2 - T_{\infty}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{kerugian} = I(t) \times A_c - (V \times I) - h_1 A_1 (T_4 - T_{\infty}) - h_2 A_2 (T_7 - T_{\infty}) - h_3 A_3 (T_6 - T_{\infty}) \quad (4)$$

Evaluasi kinerja panel surya dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu analisis elektrik dan termal. Parameter elektrik dihitung menggunakan Persamaan (1) untuk menentukan daya keluaran aktual (P) yang merupakan hasil kali antara tegangan (V) dan arus (I). Nilai ini kemudian digunakan dalam Persamaan (2) untuk mendapatkan efisiensi konversi energi (η_{ec}) dengan membandingkan daya maksimum terhadap intensitas radiasi matahari ($I(t)$) yang diterima oleh luas permukaan panel (A_c). Selanjutnya, analisis termal difokuskan pada perhitungan laju pembuangan panas ($\dot{Q}_{kerugian}$) ke lingkungan sekitar. Persamaan (3) merepresentasikan kerugian kalor pada panel kontrol tanpa pendingin yang hanya melibatkan konveksi dari permukaan atas (T_1) dan bawah (T_2). Sedangkan Persamaan (4) memformulasikan neraca energi untuk panel dengan pendingin pelat berlubang yang memperhitungkan tiga jalur pelepasan kalor konvektif, yaitu dari permukaan atas panel (T_4), permukaan bawah pelat (T_7), serta area internal dinding lubang perforasi (T_6). Perhitungan ini menggunakan koefisien perpindahan panas konveksi (h) dan luas penampang masing-masing bagian (A) untuk membuktikan efektivitas perluasan area perpindahan panas oleh sistem pendingin.



Gambar 3. Skema Kesetimbangan Energi untuk Analisis Perpindahan Panas pada (a) Panel dengan Pelat Berlubang (b) Panel Tanpa Pelat Berlubang.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Penurunan Temperatur

Hasil pengujian temperatur operasional panel surya disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4. Tabel ini menyajikan perbandingan data rata-rata harian antara panel surya standar atau panel kontrol dan panel surya yang dilengkapi dengan pelat berlubang. Fokus utama analisis adalah perbandingan antara temperatur permukaan atas panel tanpa pelat T_1 dan temperatur permukaan atas panel dengan pelat berlubang T_4 .

Tabel 3. Rata-Rata Temperatur Dalam Tiga Hari Pola *Inline*

Temperatur	Hari 1	Hari 2	Hari 3
T1: Atas panel tanpa pelat	46,30 °C	46,85 °C	52,02 °C
T2: Bawah panel tanpa pelat	45,94 °C	45,90 °C	51,46 °C
T3: Ambien	34,49 °C	34,00 °C	36,60 °C
T4: Atas panel dengan pelat berlubang	44,82 °C	45,34 °C	50,60 °C
T5: Bawah panel dengan pelat berlubang	44,43 °C	44,12 °C	49,44 °C
T6: Bagian dalam pelat berlubang	39,78 °C	39,35 °C	43,06 °C
T7: Permukaan bawah pelat berlubang	38,79 °C	37,72 °C	41,59 °C

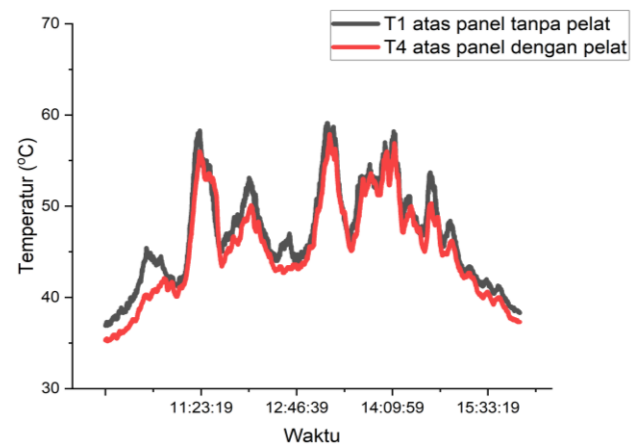
Tabel 4. Rata-Rata Temperatur Dalam Tiga Hari Pola *Staggered*

Temperatur	Hari 1	Hari 2	Hari 3
T1: Atas panel tanpa pelat	47,59 °C	51,58 °C	44,50 °C
T2: Bawah panel tanpa pelat	47,49 °C	51,15 °C	44,26 °C
T3: Ambien	35,17 °C	36,70 °C	36,82 °C
T4: Atas panel dengan pelat berlubang	45,97 °C	49,71 °C	42,90 °C
T5: Bawah panel dengan pelat berlubang	44,92 °C	48,66 °C	42,51 °C
T6: Bagian dalam pelat berlubang	39,34 °C	42,27 °C	39,92 °C
T7: Permukaan bawah pelat berlubang	37,93 °C	41,05 °C	39,08 °C

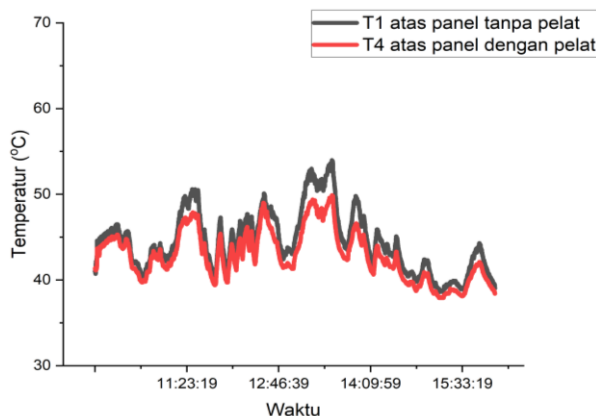
Berdasarkan Tabel 3 untuk Pola *Inline*, terlihat bahwa pemasangan pelat berlubang secara konsisten berhasil menurunkan temperatur operasional panel. Pada hari pertama, temperatur panel turun sebesar 1,48 °C. Temperatur turun dari 46,30 °C menjadi 44,82 °C. Efektivitas ini berlanjut pada hari kedua, yang mencatat penurunan temperatur paling signifikan untuk pola ini, yaitu sebesar 1,51 °C. Pada hari tersebut, temperatur panel kontrol T_1 46,85 °C berhasil diturunkan menjadi 45,34 °C pada T_4 . Bahkan pada hari ketiga, saat kondisi ambien T_3 dan temperatur operasional panel paling tinggi yaitu T_1 sebesar 52,02 °C, sistem pendingin tetap mampu memberikan reduksi temperatur sebesar 1,42 °C.

Analisis pada Tabel 4 untuk pola *Staggered* menunjukkan efektivitas pendinginan yang lebih unggul dibandingkan pola *inline*. Pada hari kedua, yang merupakan kondisi pengujian terpanas untuk seri ini, tercatat penurunan temperatur rata-rata tertinggi di seluruh penelitian, yaitu sebesar 1,87 °C. Pada hari itu, panel kontrol T_1 beroperasi pada suhu 51,58 °C, sementara panel dengan pendingin *staggered* T_4 berhasil ditekan suhunya hingga 49,71 °C. Pola *staggered* juga konsisten menunjukkan penurunan suhu yang signifikan pada hari lainnya. Penurunan tersebut adalah 1,62 °C pada hari pertama dan 1,60 °C pada hari ketiga.

Dinamika fluktuasi temperatur sepanjang hari pengujian untuk hari-hari dengan penurunan paling representatif dapat diamati secara visual pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Perbandingan Temperatur Permukaan Atas Panel Tanpa Pelat dan dengan Pelat Pola *Inline* pada Hari Kedua Pengujian



Gambar 5. Perbandingan Temperatur Permukaan Atas Panel Tanpa Pelat dan dengan Pelat Pola *Staggered* pada Hari Kedua Pengujian

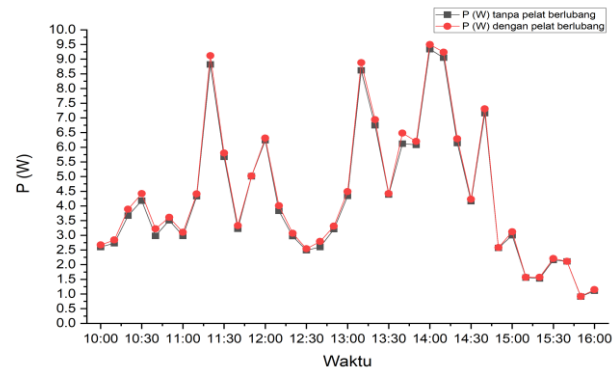
Kedua gambar ini secara jelas mengonfirmasi temuan dari rata-rata. Kurva temperatur panel yang didinginkan T₄ (garis merah) konsisten berada dibawah kurva panel kontrol T₁ (garis hitam). Perbedaan ini paling jelas terlihat selama periode intensitas radiasi matahari puncak, yang umumnya terjadi antara pukul 11:00 hingga 14:00 WIB. Pembahasan dari data ini mengindikasikan bahwa kedua desain pelat berlubang efektif sebagai sistem pendingin pasif, namun pola *staggered*. Susunan ini menciptakan turbulensi aliran udara lebih baik di bagian belakang panel sehingga meningkatkan laju perpindahan konveksi.

Lebih lanjut, data temperatur T₄, T₆ atau bagian dalam pelat, dan T₇ atau permukaan bawah pelat mengonfirmasi mekanisme perpindahan panas. Sebagai contoh, pada pola *staggered* hari kedua di Tabel 4, terdapat gradien temperatur yang jelas. T₄ sebesar 49,71 °C lebih tinggi dari T₆ sebesar 42,27 °C, yang juga lebih tinggi dari T₇ sebesar 41,05 °C. Ini membuktikan bahwa kalor atau panas berhasil ditarik melalui konduksi dari permukaan panel T₄ ke badan pelat T₆ dan T₇. Kalor tersebut kemudian secara efektif dilepaskan ke lingkungan sekitar melalui konveksi.

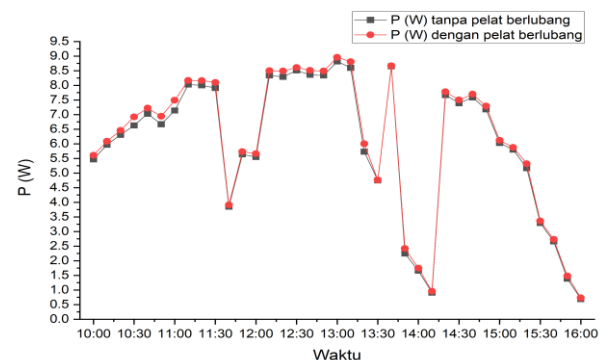
3.2 Peningkatan Daya dan Efisiensi

Penurunan temperatur operasional yang berhasil dicapai memberikan dampak langsung dan positif terhadap peningkatan daya keluaran serta efisiensi konversi energi panel surya. Panel yang beroperasi pada suhu lebih rendah diketahui memiliki efisiensi konversi yang lebih baik, karena dapat mengurangi kehilangan energi akibat panas.

Peningkatan daya keluaran (Watt) secara *real-time* dapat dilihat pada grafik perbandingan daya pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Perbandingan Daya Keluaran Panel Tanpa Pelat dan dengan Pelat Pola *Inline* pada Hari Kedua Pengujian



Gambar 7. Perbandingan Daya Keluaran Panel Tanpa Pelat dan dengan Pelat Pola *Staggered* pada Hari Kedua Pengujian

Grafik pada Gambar 6 dan 7 mengilustrasikan perbandingan daya keluaran (P) secara *real-time* antara panel kontrol, yang ditunjukkan oleh garis hitam, dan panel dengan pendingin yang ditunjukkan oleh garis merah. Pada kedua pola, garis merah panel berpendingin secara konsisten berada di garis hitam panel kontrol, yang mengindikasikan peningkatan produksi daya berkat efek pendinginan.

Untuk pola *inline*, seperti yang terlihat pada Gambar 6, data skripsi menunjukkan bahwa daya keluaran rata-rata harian pada pengujian ini meningkat dari 4,27 W menjadi 4,40 W. Peningkatan ini terlihat jelas pada kondisi puncak

pukul dua siang, di mana panel berpendinginan menghasilkan 9,50 W dibandingkan 9,34 W pada panel kontrol.

Pola *staggered*, yang diilustrasikan pada Gambar 7, menunjukkan peningkatan yang lebih baik. Pada hari pengujian kedua ini, daya rata-rata harian tercatat meningkat dari 6,01 W menjadi 6,14 W. Peningkatan performa ini terkuantifikasi secara lebih jelas dalam analisis efisien rata-rata seperti yang terlihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Efisiensi Rata-Rata Panel Kontrol dan Panel Berpendingin

Pola Pendingin	Hari	Kondisi Panel	Efisiensi Rata-Rata (%)	Peningkatan Efisiensi (%)
Inline	1	Tanpa Pendingin	11,76	0,27
		Dengan Pendingin	12,03	
Inline	2	Tanpa Pendingin	11,28	0,22
		Dengan Pendingin	11,50	
Inline	3	Tanpa Pendingin	10,88	0,23
		Dengan Pendingin	11,11	
Staggered	1	Tanpa Pendingin	11,25	0,31%
		Dengan Pendingin	11,56	
Staggered	2	Tanpa Pendingin	11,33	0,27%
		Dengan Pendingin	11,60	
Staggered	3	Tanpa Pendingin	10,49	0,18%
		Dengan Pendingin	10,67	

Tabel 5 secara kuantitatif merangkum dampak langsung dari penurunan temperatur terhadap performa panel. Data ini secara jelas menunjukkan bahwa panel yang dilengkapi sistem pendingin secara konsisten menghasilkan efisiensi rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan panel kontrol pada setiap hari pengujian.

Untuk Pola *Inline*, tercatat peningkatan efisiensi yang stabil di ketiga hari pengujian, dengan kenaikan absolut sebesar 0,27% pada hari pertama, 0,22% pada hari kedua, dan 0,23% pada hari ketiga. Ini membuktikan bahwa pendinginan pasif memberikan manfaat yang konsisten.

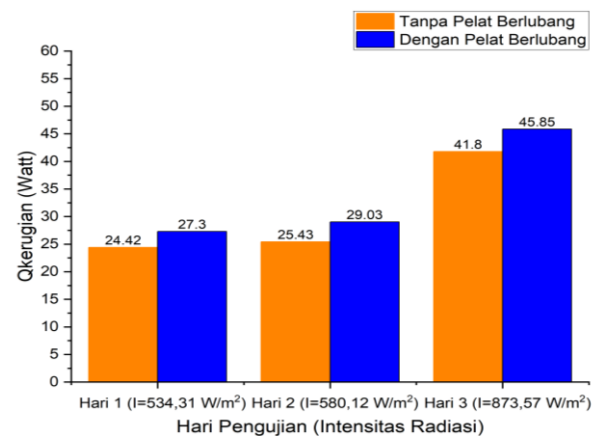
Pola *staggered* menunjukkan hasil yang lebih unggul, mencatatkan peningkatan efisiensi tertinggi dalam

penelitian ini sebesar 0,31% pada hari pertama. Pola ini juga mempertahankan performa positif pada hari-hari berikutnya dengan peningkatan 0,27% dan 0,18%.

Pembahasan dari data ini mengonfirmasi temuan dari analisis temperatur sebelumnya. Terdapat korelasi langsung antara penurunan temperatur dan peningkatan efisiensi. Pola *staggered*, yang terbukti paling efektif dalam menurunkan suhu operasional panel, juga menghasilkan peningkatan efisiensi puncak yang paling signifikan. Ini membuktikan bahwa intervensi pendinginan pasif, terutama dengan desain *staggered*, merupakan metode yang efektif untuk meningkatkan hasil konversi energi panel surya.

3.3 Analisis Kerugian Kalor dan Balans Energi

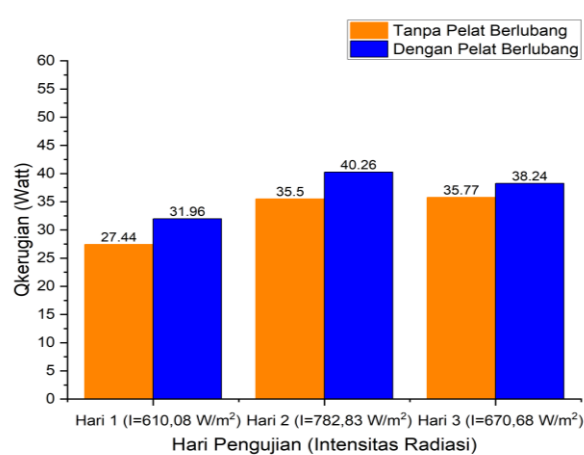
Pada analisis ini mengapa panel yang didinginkan memiliki performa lebih baik. Mekanisme utamanya adalah peningkatan disipasi (pembuangan) panas. Energi matahari yang tidak terkonversi menjadi listrik akan menjadi termal (kalor), yang merupakan bentuk kerugian energi utama. Sistem pendingin yang efektif, seperti pelat berlubang ini, berfungsi sebagai *heat sink* pasif yang memfasilitasi pembuangan kalor ini ke lingkungan sekitar. Keberhasilan mekanisme ini diukur melalui analisis $\dot{Q}_{\text{kerugian}}$ (Kerugian Kalor).



Gambar 8. Perbandingan Kerugian Kalor Panel Tanpa Pelat dan dengan Pelat Pola *Inline*

Seperti terlihat pada Gambar 8, bilah biru dengan pelat berlubang secara konsisten lebih tinggi daripada bila oranye tanpa pelat berlubang. Pada hari pertama, panel berpendingin 27,3 W kalor dibandingkan 24,42 W pada panel kontrol. Tren ini berlanjut pada hari kedua, dengan perbandingan 29,03 W berbanding 25,43 W, dan mencapai

puncaknya pada hari ketiga. Pada hari tersebut, panel berpendingin membuang 45,85 W kalor, sementara panel kontrol hanya membuang 41,8 W. Hasil yang sama ditunjukkan oleh pola *staggered*, yang perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan Kerugian Kalor Panel Tanpa Pelat dan dengan Pelat Pola *Staggered*

Penting untuk dipahami bahwa dalam konteks ini, nilai $\dot{Q}_{kerugian}$ berwarna biru yang lebih tinggi pada panel berpendingin adalah indikator keberhasilan. Ini membuktikan bahwa pelat berlubang secara aktif membuang lebih banyak kalor dari sistem panel surya. Panel kontrol berwarna oranye hanya mengandalkan konveksi alami dari permukaan belakangnya yang datar. Pada pola *staggered* yang ditunjukkan pada Gambar 9, panel berpendingin secara konsisten membuang lebih banyak kalor setiap hari. Sebagai contoh, pada hari pertama panel berpendingin membuang 31,96 W dibandingkan 27,44 W pada panel kontrol. Demikian pula pada hari kedua, perbandingannya adalah 40,26 W berbanding 35,5 W dan pada hari ketiga 38,24 W berbanding 35,77 W, dibandingkan dengan panel kontrol berwarna oranye yang hanya mengandalkan konveksi alami dari permukaan belakangnya yang datar.

Secara kuantitatif, pelat *inline* berhasil membuang kalor hingga 45,85 W pada kondisi puncaknya. Sementara itu, pelat *staggered* berhasil membuang kalor hingga 40,26 W pada hari pengujian puncaknya. Kemampuan disipasi panas yang lebih baik inilah yang menjaga suhu panel tetap rendah dan, sebagai hasilnya menjaga efisiensi tetap tinggi.

Terakhir, untuk memvalidasi akurasi seluruh data dan perhitungan, dilakukan analisis balans energi. Hasil

perbandingan kesetimbangan energi untuk kedua sistem disajikan pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6. Perbandingan Kesetimbangan Energi Panel Surya Tanpa dan Dengan Pelat Berlubang Pola *Inline*

Panel Tanpa Pelat Berlubang			
Parameter	Hari 1	Hari 2	Hari 3
Q _{in} (W)	37,56	40,78	61,41
Listrik (W)	3,60	4,08	6,42
Konveksi Atas (W)	4,84	5,85	6,72
Konveksi Bawah (W)	4,70	5,42	6,47
Q _{kerugian} (W)	24,42	25,43	41,80
Total Out (W)	37,56	40,78	61,41
Panel Dengan Pelat Berlubang			
Parameter	Hari 1	Hari 2	Hari 3
Q _{in} (W)	37,56	40,78	61,41
Listrik (W)	3,70	4,22	6,54
Konveksi Atas (W)	4,24	5,17	6,10
Konveksi Bawah (W)	1,41	1,35	1,74
Konveksi Lubang (W)	0,91	1,02	1,18
Q _{kerugian} (W)	27,30	29,02	45,85
Total Out (W)	37,56	40,78	61,41

Tabel 7. Perbandingan Kesetimbangan Energi Panel Surya Tanpa dan Dengan Pelat Berlubang Pola *Staggered*

Panel Tanpa Pelat Berlubang			
Parameter	Hari 1	Hari 2	Hari 3
Q _{in} (W)	42,89	55,03	47,15
Listrik (W)	4,34	5,79	4,73
Konveksi Atas (W)	5,58	6,97	3,38
Konveksi Bawah (W)	5,53	6,77	3,27
Q _{kerugian} (W)	27,44	35,50	35,77
Total Out (W)	42,89	55,03	47,15
Panel Dengan Pelat Berlubang			
Parameter	Hari 1	Hari 2	Hari 3
Q _{in} (W)	42,89	55,03	47,15
Listrik (W)	4,46	5,92	4,84
Konveksi Atas (W)	5,49	6,09	2,68
Konveksi Bawah (W)	0,98	1,61	0,79
Konveksi Lubang (W)	0,83	1,15	0,60
Q _{kerugian} (W)	31,96	40,26	38,24
Total Out (W)	42,89	55,03	47,15

Analisis pada Tabel 6 dan Tabel 7 memvalidasi akurasi perhitungan. Pada kedua tabel tersebut, nilai untuk energi masuk ke sistem selalu sama dengan nilai total energi yang keluar dari sistem. Hal ini menunjukkan bahwa prinsip kesetimbangan energi terpenuhi. Sebagai contoh, pada hari ketiga seperti yang terlihat di Tabel 6, total energi

masuk sebesar 61,41 W sama persis dengan total energi yang keluar juga 61,41 W.

Tabel ini juga secara jelas membedah bagaimana energi didistribusikan. Pada panel tanpa pelat berlubang, energi keluar hanya terbagi menjadi listrik, konveksi atas, konveksi bawah, dan $\dot{Q}_{\text{kerugian}}$. Namun, pada panel dengan pelat berlubang, muncul satu jalur disipasi panas baru, yaitu konveksi lubang. Adanya nilai pada parameter ini, seperti 0,91 W pada hari pertama, 1,02 W pada hari kedua, dan 1,18 W pada hari 3, secara kuantitatif membuktikan bahwa lubang-lubang pada pelat secara efektif berkontribusi dalam membuang kalor ke lingkungan. Ini merupakan mekanisme kunci dari keberhasilan pendinginan.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan analisis yang telah dilakukan terhadap sistem pendinginan pasif panel surya polikristalin 8 Wp menggunakan pelat aluminium berlubang, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting:

1. Pemasangan pelat berlubang berhasil menurunkan temperatur operasional permukaan panel surya. Penurunan temperatur rata-rata paling signifikan dicapai oleh pola staggered, yang mencatatkan penurunan sebesar 1,87 °C. Hasil ini didapat dari perbandingan suhu panel kontrol 51,58 °C yang berhasil ditekan menjadi 49,71 °C pada panel berpendingin. Pola *inline* juga menunjukkan hasil positif dengan penurunan rata-rata tertinggi sebesar 1,51 °C, di mana temperatur turun dari 46,85 °C menjadi 45,34 °C.
2. Penurunan temperatur ini berdampak langsung pada peningkatan efisiensi konversi energi. Peningkatan efisiensi rata-rata absolut tertinggi dicapai oleh pola *staggered*, dengan kenaikan sebesar 0,31%. Peningkatan ini teramati pada hari pertama, di mana efisiensi naik dari 11,25% pada panel kontrol menjadi 11,56% pada panel berpendingin. Pola *inline* mencatatkan peningkatan efisiensi rata-rata absolut tertinggi sebesar 0,27%, dengan kenaikan dari 11,76% menjadi 12,03%.
3. Analisis kesetimbangan energi memvalidasi bahwa mekanisme pendinginan ini bekerja dengan meningkatkan disipasi kalor atau kerugian kalor dari panel ke lingkungan. Pelat *inline* tercatat mampu membuang kalor puncak hingga 40,26 W. Nilai-nilai ini lebih tinggi daripada kalor yang

dibuang oleh panel kontrol pada kondisi yang sama, membuktikan efektivitas pelat berlubang sebagai *heat sink* pasif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, khususnya Program Studi Teknik Mesin, atas dukungan fasilitas laboratorium. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing, serta rekan-rekan mahasiswa atas bantuan dalam perakitan alat, pengambilan data, dan diskusi teknis selama penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] S. J. DEN, "Outlook Energi Indonesia 2023," *Jakarta*, hal. 1–85, 2023.
- [2] S. B. Widodo, Z. Arif, dan S. Royadi, "Kaji Eksperimental Pengaruh Temperatur Permukaan Panel Surya Terhadap Keluaran Daya," *JURUTERA-Jurnal Umum Tek. Terap.*, vol. 2, no. 02, hal. 38–48, 2015.
- [3] M. S. Loegimin, B. Sumantri, M. A. B. Nugroho, H. Hasnira, dan N. A. Windarko, "Sistem pendinginan air untuk panel surya dengan metode fuzzy logic," *J. Integr.*, vol. 12, no. 1, hal. 21–30, 2020.
- [4] A. as Sofijan, "Desain passive cooling menggunakan perforated aluminum plate pada fotovoltaik monokristalin," *J. Surya Energy*, vol. 5, no. 1, hal. 23–30, 2021.
- [5] C. Sjahrudin dan I. Bizzy, "Pengaruh Peningkatan Efisiensi Pemasangan Heatsink pada Panel Photovoltaic Tipe Polycrystalline," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 20, no. 2, hal. 1–4, 2020.
- [6] M. Khodphan, "The tilt angle of the solar panels has the highest power," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 548, hal. 612–616, 2014.