

Pengaruh Massa Phase Change Material Terhadap Kinerja Termal Kolektor Udara PVT Konveksi Paksa

Fachir Ezekiel Qahar^{1*}, Martoni², Ahmad Rajani³

^{1,2}Mechanical Engineering, Widyatama University Bandung, West Java, Indonesia

³Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN), West Java, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : fachir.ezekiel@widyatama.ac.id

ARMADA
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 07 Juli, 2026

Page: 2828-2839

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i7.3095>

Article History:

Received: Mei 08, 2026

Revised: Juni 28, 2026

Accepted: Juli 17, 2026

Abstract : This study analyzes the thermal performance of an air-based photovoltaic thermal (PVT) collector integrated with paraffin wax phase change material (PCM). The PCM was placed in five vertical aluminium tubes located in the lower chamber of the collector, where the upper part of the tube was tied to the panel support and the lower part touched the corrugated zinc absorber. Three PCM mass variations were tested, namely H1 = 100 g/tube, H2 = 200 g/tube, and H3 = 300 g/tube, under outdoor conditions from 09:00 to 15:00 WIB. The apparatus consisted of a bifacial PV module, 6 mm glass cover, corrugated zinc absorber, aluminium PCM tubes, four DC axial inlet fans, outlet duct, type-K thermocouples, DHT22 sensors, solar power meter, anemometer, and data logger. The results show that the average useful heat gain (Q_{useful}) for H1, H2, and H3 are 920.61 W, 849.59 W, and 857.39 W, respectively. Although H1 recorded the highest absolute useful heat gain due to higher daily solar radiation, data normalization and latent thermal response analysis revealed that H2 (200 g/tube) is the most optimal configuration for maintaining thermal equilibrium.

Keywords : Air Collector; Forced Convection; Paraffin Wax; Phase Change Material; Useful Heat Gain

Abstrak : Penelitian ini menganalisis kinerja termal kolektor photovoltaic thermal (PVT) berbasis udara yang diintegrasikan dengan phase change material (PCM) jenis paraffin wax. PCM ditempatkan pada lima pipa aluminium vertikal di ruang bawah kolektor, dengan bagian atas pipa diikat pada penyangga panel dan bagian bawah pipa menyentuh seng absorber bergelombang. Variasi massa PCM yang digunakan adalah H1 = 100 g/pipa, H2 = 200 g/pipa, dan H3 = 300 g/pipa. Pengujian dilakukan pada kondisi luar ruang pukul 09.00-15.00 WIB. Alat penelitian terdiri atas modul PV bifacial, kaca 6 mm, seng absorber, pipa aluminium PCM, empat kipas aksial DC pada sisi inlet, outlet duct, thermocouple tipe-K, sensor DHT22, solar power meter, anemometer, dan data logger. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata laju panas berguna (Q_{useful}) untuk variasi H1, H2, dan H3 berturut-turut adalah sebesar 920,61 W; 849,59 W; dan 857,39 W. Meskipun variasi H1 mencatatkan energi berguna absolut terbesar akibat tingginya radiasi harian, hasil normalisasi data dan analisis respons termal laten menunjukkan bahwa variasi H2 (200 g/pipa) merupakan konfigurasi paling optimal dalam menjaga keseimbangan termal.

Kata Kunci : Laju Panas Berguna; Kolektor Udara; Konveksi Paksa; Paraffin Wax; Phase Change Material

PENDAHULUAN

Kinerja kelistrikan dari modul surya fotovoltaik (PV) sangat dipengaruhi oleh temperatur operasinya. Berdasarkan prinsip dasar termodinamika dan sifat semikonduktor, sebagian besar energi radiasi matahari yang diserap oleh modul PV tidak dapat dikonversi seluruhnya menjadi energi listrik, melainkan terakumulasi sebagai panas buangan (*waste heat*) di dalam sel (Kalogirou, 2023). Akumulasi panas ini secara langsung menyebabkan peningkatan temperatur sel surya yang berdampak pada penurunan tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*) dan pada akhirnya menurunkan efisiensi konversi listrik secara keseluruhan (Duffie et al., 2020). Untuk mengatasi degradasi efisiensi termal dan elektrik tersebut, teknologi *photovoltaic thermal* (PVT) dikembangkan sebagai solusi hibrida. Sistem PVT, khususnya yang berbasis udara (*air-based PVT collector*), memanfaatkan aliran udara sebagai fluida kerja untuk mengekstraksi panas berlebih dari bagian belakang panel, sehingga temperatur panel dapat diturunkan sekaligus menghasilkan luaran udara panas yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan termal lainnya (Farzan et al., 2025).

Meskipun sistem PVT udara dengan konveksi paksa (*forced convection*) mampu meningkatkan laju perpindahan panas dibandingkan sistem konveksi alamiah, metode pendinginan aktif ini masih memiliki keterbatasan yang signifikan. Pada kondisi fluktuasi radiasi matahari yang tinggi, udara memiliki kapasitas panas spesifik (*specific heat capacity*) yang relatif rendah dibandingkan fluida cair. Akibatnya, udara tidak mampu menyerap dan menyimpan panas dalam jumlah besar untuk waktu yang lama (Boutina et al., 2024). Hal ini menyebabkan profil temperatur pada ruang bawah panel cenderung tidak stabil dan sangat bergantung pada kondisi cuaca sesaat. Oleh karena itu, diperlukan sebuah sistem penyangga termal (*thermal buffer*) tambahan yang terintegrasi di dalam kolektor untuk menstabilkan dinamika perpindahan panas (Hakimi, Baniasadi, & Afshari, 2024).

Integrasi *Phase Change Material* (PCM) menjadi salah satu metode paling menjanjikan dalam manajemen termal PVT. PCM jenis *paraffin wax* memiliki panas laten fusi yang tinggi, memungkinkannya untuk menyerap sejumlah besar energi termal pada suhu yang relatif konstan selama proses transisi fase dari padat ke cair (Kecebas et al., 2025). Secara konvensional, mayoritas penelitian terdahulu mengintegrasikan PCM dengan cara menempelkan wadah pelat datar (*flat container*) secara langsung menempel pada lapisan belakang (*backsheet*) modul PV (Elavarasan et al., 2024). Pendekatan kontak langsung ini memang efektif untuk respons pendinginan seketika, namun menimbulkan berbagai masalah struktural dan termal jangka panjang. Penambahan beban statis yang berat pada bagian belakang panel rentan memicu delaminasi lapisan EVA, meningkatkan risiko kebocoran PCM yang mencair akibat gravitasi, serta memberikan tambahan tegangan mekanis (*mechanical stress*) yang berisiko merusak struktur sel surya mikroskopis (Rajamony et al., 2024).

Selain masalah struktural, wadah pelat datar konvensional seringkali membatasi luas permukaan perpindahan panas konvektif antara PCM dan aliran udara fluida kerja. Padahal, konduktivitas termal murni dari material *paraffin wax* sangat rendah, yakni berada di kisaran 0,2 W/m·K. Rendahnya konduktivitas ini menyebabkan proses pelelehan dan pembekuan (pengisian dan pelepasan panas) berlangsung sangat lambat jika tidak didukung oleh desain geometri wadah yang mampu mengoptimalkan luas area perpindahan panas (Mahdavi et al., 2024). Berdasarkan tinjauan komprehensif terhadap literatur terkini, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) yang mendalam terkait eksplorasi bentuk geometris wadah PCM yang terlepas dari kontak mekanis langsung dengan panel PV, namun tetap mampu berfungsi sebagai absorber panas laten yang efektif di dalam jalur aliran udara. Sebagai contoh, mayoritas desain *absorber* bergelombang pada PVT udara tidak dikombinasikan secara spesifik dengan media penyimpanan laten berbentuk silinder vertikal yang dihembus oleh konveksi paksa secara melintang (*cross-flow*) (Biswas & Tripathy, 2024).

Lebih lanjut, celah penelitian juga ditemukan pada dinamika penentuan massa optimal PCM di dalam ruang kolektor termal. Beberapa studi rekayasa termal sebelumnya sering berasumsi

bahwa peningkatan jumlah massa PCM akan selalu berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi sistem karena kapasitas penyimpanan energi yang ikut bertambah (Dev et al., 2022). Akan tetapi, analisis spesifik mengenai dinamika termal laten menunjukkan bahwa penambahan massa PCM yang berlebihan justru dapat menciptakan efek resistansi termal yang merugikan (*thermal resistance effect*). Massa PCM yang terlalu padat dan besar di bagian tengah wadah mungkin tidak akan pernah mencapai suhu titik leburnya secara penuh selama siklus pemanasan harian. Kondisi ini mengakibatkan massa di pusat wadah hanya berfungsi sebagai penyimpan panas sensibel yang tidak efisien dan menghamburkan potensi material (Hasan Zaim & Farzan, 2021). Sebaliknya, massa PCM yang terlalu sedikit akan meleleh terlalu cepat pada fase awal pemanasan radiasi dan kehilangan kemampuannya untuk bertindak sebagai penyangga termal (*buffer*) pada saat cuaca mencapai suhu puncak di siang hari (Cengiz et al., 2024).

Untuk menjembatani celah penelitian tersebut, penelitian ini mengajukan desain inovatif yang secara tegas memisahkan wadah PCM dari modul PV dan memposisikannya sebagai hambatan termal vertikal di dalam saluran udara bawah panel. Kebaruan (*novelty*) utama dari studi ini terletak pada penggunaan lima buah pipa aluminium silinder vertikal sebagai wadah *paraffin wax*, di mana bagian atasnya diikat pada kerangka dan bagian bawahnya bersentuhan langsung dengan pelat seng absorber bergelombang. Argumen ilmiah yang mendasari penggunaan konfigurasi ini bersandar pada tiga keunggulan mekanis dan perpindahan panas. Pertama, susunan silinder vertikal berfungsi untuk memecah aliran udara konveksi paksa yang dihembuskan oleh deretan kipas aksial DC dari sisi *inlet*. Hal ini menciptakan turbulensi lokal (*wake region*) di belakang pipa yang secara signifikan meningkatkan koefisien perpindahan panas konvektif antara udara turbulen dan dinding silinder aluminium dibandingkan jika menggunakan penampang pelat datar (Dayer et al., 2024).

Kedua, penempatan dasar pipa aluminium yang bersentuhan fisik langsung dengan seng absorber bergelombang menciptakan sebuah jalur perpindahan panas konduksi sekunder yang sangat efektif. Pelat seng penyerap panas tidak hanya mentransfer radiasi ke aliran udara secara konveksi, melainkan juga berfungsi layaknya sistem sirip dasar (*base fin*) yang mengkonduksikan panas langsung ke dasar pipa aluminium. Melalui konfigurasi ini, massa PCM menerima masukan panas secara simultan dari dua jalur: konveksi udara panas di dinding vertikal silinder dan konduksi dari *absorber* di penampang bawahnya. Ketiga, ditinjau dari perspektif integritas struktural mekanis, desain konfigurasi ini memberikan tingkat keamanan yang absolut bagi modul PV *bifacial* di atasnya. Seluruh beban statis dari kumpulan pipa aluminium beserta massa PCM di dalamnya (yang dapat mencapai total bobot 1,5 kg) sepenuhnya ditopang oleh kerangka penyangga bawah dan profil seng bergelombang, bukan oleh *backsheets* panel surya (Hassan et al., 2020). Desain ini mengeliminasi risiko kerusakan mikroskopis (seperti *microcracks*) dan delaminasi yang menjadi isu utama pada sistem PVT-PCM terintegrasi konvensional.

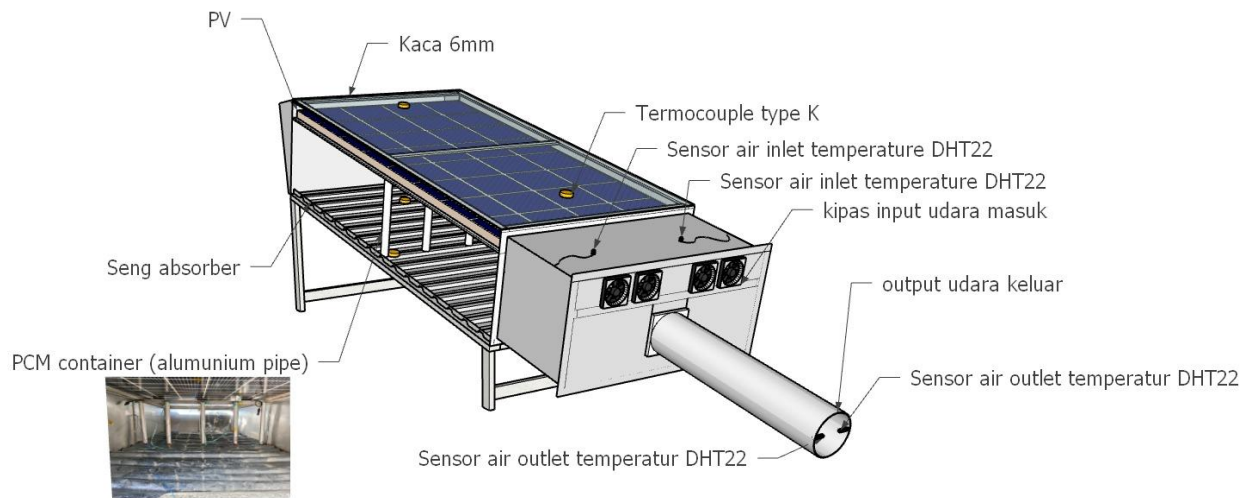
Terakhir, untuk memberikan solusi komprehensif terhadap celah penelitian terkait optimasi dinamika fluida dan kapasitas termal, penelitian ini melakukan evaluasi ketat terhadap variasi massa spesifik PCM di dalam wadah pipa vertikal tersebut (yakni $H1 = 100$ g/pipa, $H2 = 200$ g/pipa, dan $H3 = 300$ g/pipa). Evaluasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi titik keseimbangan termal (*thermal equilibrium*) yang krusial, di mana PCM memiliki massa yang cukup untuk meredam fluktuasi panas lingkungan pada siang hari, namun tidak terlalu besar sehingga menghindari kegagalan pencairan total yang disebabkan oleh pembentukan resistansi termal berlapis. Penentuan massa optimal ini sangat krusial untuk menentukan spesifikasi desain kapasitas penyimpanan pasif yang paling ideal dan aplikatif untuk kondisi radiasi profil cuaca tropis luar ruang.

METODE PENELITIAN

Pengujian eksperimental ini dilaksanakan secara luar ruang (*outdoor*) di area Universitas Widyatama, Bandung, dengan kondisi cuaca umum tropis yang bervariasi dari cerah hingga berawan sebagian selama periode pengujian. Untuk memaksimalkan penyerapan energi radiasi

matahari harian, modul PVT-PCM dipasang pada struktur penyangga dengan sudut kemiringan sebesar 15° dan diorientasikan menghadap ke arah Utara. Sistem yang digunakan merupakan kolektor udara PVT-PCM berbasis konveksi paksa. Modul PV bifacial dan kaca penutup 6 mm berada pada bagian atas, sedangkan ruang bawah kolektor berisi seng absorber bergelombang dan pipa aluminium sebagai wadah PCM. Udara masuk didorong oleh empat kipas aksial DC pada sisi inlet, kemudian melewati ruang bawah panel, menyapu area absorber serta permukaan luar pipa PCM, dan keluar melalui outlet duct.

Gambar 1 menampilkan desain konfigurasi alat pada sistem kolektor PVT-PCM. Udara lingkungan mula-mula dihisap masuk secara paksa oleh deretan kipas DC *inlet*, lalu dialirkan melewati celah udara bagian atas panel surya. Sesampainya di ujung panel, aliran udara berputar menuju saluran bagian bawah untuk menyapu dan menyerap energi panas dari permukaan pelat seng absorber serta wadah pipa aluminium berisi PCM. Setelah mengalami pemanasan dua tahap tersebut, udara panas kemudian dilepaskan keluar melalui pipa saluran *outlet*.



Gambar 1. konfigurasi alat pada sistem kolektor PVT-PCM. Sumber: desain dan dokumentasi peneliti.

Tabel 1. Spesifikasi sensor

No	Komponen	Spesifikasi	Keterangan
1	Thermocouple tipe-K	T1-T8	Mengukur temperatur permukaan dan komponen kolektor, termasuk panel, absorber, dan area PCM.
2	Sensor DHT22	DHT inlet dan DHT outlet	Mengukur temperatur dan kelembapan udara pada sisi masuk dan keluar.
3	Solar power meter	Tenmars TM-750	Mengukur intensitas radiasi matahari G (W/m^2).
4	Anemometer	Rentang pengukuran kecepatan udara lingkungan 0–30 m/s; akurasi $\pm 0,1$ m/s	Mengukur kecepatan udara lingkungan.
5	Testo 405i	Pengukur kecepatan aliran udara, digunakan pada outlet duct	Mengukur kecepatan aliran udara pada saluran outlet selama pengujian.
6	Data logger	Pencatatan multi-sensor dengan interval 10 menit	Merekam data pengujian dari pukul 09.00 sampai 15.00 WIB.

Tabel 2. Spesifikasi PVT/kolektor

No	Komponen	Spesifikasi	Keterangan
----	----------	-------------	------------

1	PVT	2,285 m × 1,135 m; luas bidang kolektor $A_c = 2,76 \text{ m}^2$	Bidang utama penerima radiasi matahari dan acuan perhitungan energi radiasi masuk.
2	Penutup atas	Kaca 6mm	Bidang utama penerima radiasi matahari dan acuan perhitungan energi radiasi masuk.
3	Seng absorber	Seng absorber bergelombang	Menerima dan menyebarkan panas ke udara serta meneruskan panas ke pipa PCM.
4	Kipas aksial DC	4 unit pada sisi inlet	Mendorong udara masuk sehingga perpindahan panas berlangsung secara konveksi paksa.
5	Jenis PCM	Paraffin wax	Material penyimpan panas
6	Wadah PCM	Pipa aluminium	Jumlah 5 pipa pada ruang bawah panel
7	Diameter pipa PCM	40 mm	Diameter luar wadah PCM
8	Panjang pipa PCM	400 mm	Pipa dipasang vertical pada penyangga panel
9	Tebal pipa PCM	1 mm	Tebal dinding pipa aluminium
10	Variasi massa	H1 = 100 g/pipa; H2 = 200 g/pipa; H3 = 300 g/pipa	Massa total 0,5 kg; 1,0 kg; 1,5 kg

Sistem akuisisi data disusun agar temperatur kaca, panel, absorber, PCM, serta udara inlet dan outlet dapat direkam secara kontinu. Thermocouple tipe-K dipasang pada titik-titik permukaan atau komponen kolektor, sedangkan DHT22 dipasang pada sisi masuk dan keluar udara. Intensitas radiasi matahari diukur menggunakan Tenmars TM-750, kecepatan angin lingkungan diukur menggunakan anemometer untuk memantau kondisi eksternal di sekitar lokasi, sementara kecepatan udara pada saluran *outlet* diukur menggunakan thermal anemometer Testo 405i untuk menghitung laju aliran massa udara. Seluruh data dicatat dengan interval 10 menit sehingga perubahan temperatur dan performa termal selama pengujian dapat dianalisis secara runtut. Tahapan validasi keandalan sensor bersandar pada kalibrasi standar bawaan pabrik (*factory calibration*) untuk setiap instrumen. Sebelum perekaman data utama ditarik untuk analisis, dilakukan pengujian fungsional awal pada sistem akuisisi data untuk memastikan seluruh *thermocouple* tipe-K dan sensor DHT22 merespons pembacaan secara logis dan tidak menampilkan anomali atau galat pembacaan ekstrem. Pembacaan awal sensor dipantau kesesuaian trennya terhadap kondisi suhu lingkungan luar ruang pada pagi hari, sehingga kelayakan operasional seluruh instrumen dapat dipastikan dan dipertanggungjawabkan.

Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur dan observasi, dilanjutkan dengan persiapan alat PVT-PCM, pemasangan sensor, pengujian setiap variasi massa PCM, pengolahan data, pemeriksaan kelengkapan data, analisis hasil, dan penyusunan kesimpulan. Apabila data belum lengkap atau pembacaan sensor belum stabil, proses pengujian perlu diperbaiki atau diulang sebelum masuk ke tahap analisis.



Gambar 2. Diagram alir penelitian kolektor udara PVT-PCM.

Pengujian dilakukan pada tiga variasi massa PCM, yaitu H1 = 100 g/pipa, H2 = 200 g/pipa, dan H3 = 300 g/pipa. Karena jumlah pipa adalah lima unit, massa total PCM masing-masing variasi adalah 0,5 kg, 1,0 kg, dan 1,5 kg. Setiap variasi diuji pada kondisi luar ruang dari pukul 09.00 sampai 15.00 WIB dengan interval pencatatan 10 menit. Parameter yang dicatat meliputi intensitas radiasi matahari, temperatur panel, temperatur seng absorber, temperatur PCM, temperatur udara inlet, temperatur udara outlet, kecepatan udara lingkungan dan kecepatan udara outlet. Karena pengujian dilakukan pada hari berbeda, perbandingan hasil tidak cukup hanya dibaca dari energi berguna absolut. Sebagai strategi normalisasi untuk menghindari bias kesimpulan, analisis kinerja termal dievaluasi dengan menyandingkan nilai laju panas berguna rata-rata (Q_{useful}) secara proporsional terhadap nilai rata-rata intensitas radiasi matahari (G) aktual yang diterima sistem pada masing-masing hari. Selain itu, parameter performa juga dinilai melalui indikator kenaikan temperatur PCM (ΔT_{PCM}) dari garis dasar awal (*baseline*) suhu pengujian, bukan dari temperatur absolutnya. Pendekatan analisis silang ini memungkinkan perbandingan respons termal laten yang lebih obyektif antar variasi massa, sehingga simpulan efektivitas PCM tetap valid dan rasional meskipun kondisi cuaca luar ruang pada ketiga hari pengujian tersebut tidak identik.

Bagian persamaan analisis disederhanakan menjadi parameter utama yang langsung digunakan untuk membaca performa termal kolektor udara PVT-PCM. Parameter tersebut meliputi selisih temperatur udara, temperatur rata-rata PCM dari sensor T5 dan T6, kenaikan temperatur PCM terhadap temperatur awal, dan laju panas berguna yang dibawa oleh aliran udara. Persamaan dasar ini umum digunakan dalam analisis kolektor surya dan sistem PVT berbasis udara karena dapat menunjukkan hubungan antara radiasi matahari, aliran udara, dan panas yang berhasil dimanfaatkan oleh sistem (Duffie et al., 2020; Farzan et al., 2025).

$$\Delta T_{air} = T_{out} - T_{in} \quad (1)$$

$$T_{pcm} = \frac{(T_5 + T_6)}{2} \quad (2)$$

$$\Delta T_{PCM} = T_{PCM,t} - T_{PCM,0} \quad (3)$$

$$Q_{useful} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

ΔT_{air} adalah selisih temperatur udara *outlet* dan *inlet* (°C); T_{out} adalah temperatur udara keluar (°C); T_{in} adalah temperatur udara masuk (°C), T_{PCM} adalah temperatur rata-rata wadah PCM (°C); $T_{PCM,t}$ adalah temperatur PCM pada waktu tertentu (°C), $T_{PCM,0}$ adalah temperatur awal PCM (°C), ΔT_{PCM} adalah kenaikan temperatur PCM terhadap temperatur awal (°C), Q_{useful} adalah laju panas berguna yang dibawa udara (W), $\dot{m}$ adalah laju aliran massa udara (kg/s), dan C_p adalah kalor jenis udara (J/kg·K). Dengan demikian, ΔT_{PCM} tidak dibaca sebagai temperatur absolut PCM, melainkan sebagai kenaikan temperatur dari kondisi awal pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

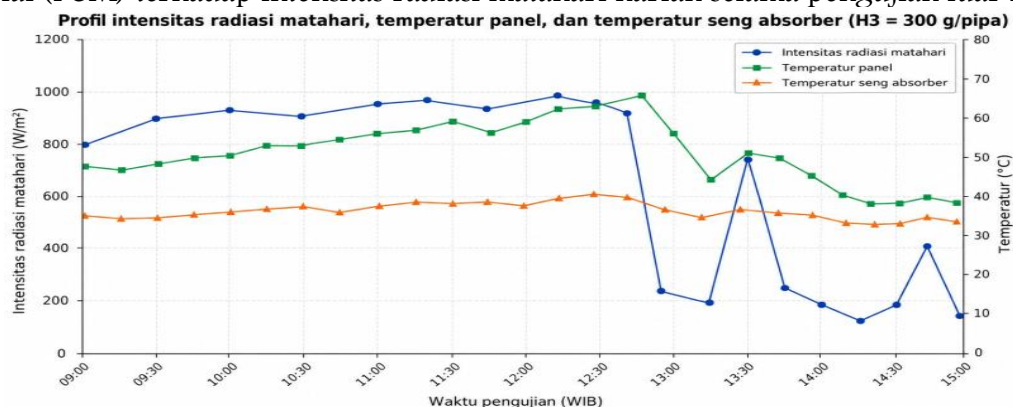
Kondisi radiasi matahari, temperatur panel, dan temperatur absorber

Tabel 3 dan Gambar 3 menyajikan data waktu, intensitas matahari, temperatur panel, dan temperatur seng absorber pada variasi H3 300 g/pipa dari pukul 09.00 sampai 15.00 WIB. Tabel ditempatkan sebelum grafik agar nilai pembentuk kurva dapat dibaca secara langsung, sedangkan grafik digunakan untuk memperlihatkan kecenderungan perubahan intensitas matahari dan respons temperatur komponen selama pengujian.

Tabel 3. Data waktu, intensitas matahari, temperatur panel, dan temperatur seng absorber pada variasi H3 300 g/pipa.

Waktu	Intensitas matahari (W/m ²)	T panel (°C)	T seng absorber (°C)
09:00	787	51,71	34,44
09:30	900	53,13	34,94
10:00	949	55,72	37,09
10:30	875	59,74	39,23
11:00	975	62,12	39,92
11:30	835	65,32	40,95
12:00	989	67,65	42,95
12:30	965	69,42	45,76
13:00	184	49,81	39,54
13:30	757	54,62	41,05
14:00	175	47,12	38,48
14:30	158	39,24	35,33
15:00	143	39,98	35,64

Gambar 3. Profil distribusi temperatur pada modul surya, pelat *absorber*, dan *phase change material* (PCM) terhadap intensitas radiasi matahari harian selama pengujian luar ruang.



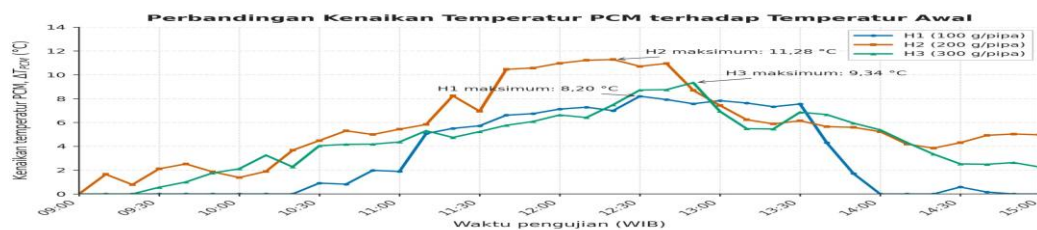
Berdasarkan Gambar 3, intensitas matahari relatif tinggi pada pagi hingga mendekati tengah hari, kemudian menurun setelah sekitar pukul 13.00. Temperatur panel mengikuti kecenderungan peningkatan radiasi dengan temperatur maksimum sekitar 69,42 °C, sedangkan temperatur seng absorber berada pada nilai yang lebih rendah, yaitu sekitar 45,76 °C. Perbedaan respons antara penurunan radiasi matahari dan temperatur komponen yang tampak pada bagian akhir grafik menunjukkan adanya keterlambatan respons termal atau thermal lag, bukan gap kesalahan data. Thermal lag terjadi karena seng absorber, pipa aluminium, dan PCM masih menyimpan panas sehingga temperatur komponen tidak langsung turun pada saat radiasi matahari menurun akibat perubahan cuaca sesaat, awan, atau bayangan selama pengujian luar ruang (Farzan et al., 2025; Farzan et al., 2022; Hassan et al., 2020). Secara termodinamika, fenomena ini menunjukkan sebab-akibat yang jelas: sebagian besar fluks panas radiasi diabsorpsi langsung oleh modul PV, menjadikannya titik terpanas (Duffie et al., 2020; Kalogirou, 2023). Temperatur seng absorber yang secara konsisten berada di bawah temperatur panel membuktikan tingginya laju ekstraksi panas oleh aliran udara paksa, serta efektifnya konduksi termal dari pelat absorber ke dasar pipa aluminium PCM. Kehadiran *thermal lag* pada sore hari (saat radiasi drop) membuktikan bahwa sistem mulai memasuki fase *discharging*, di mana panas laten yang sebelumnya tersimpan di dalam PCM mulai dilepaskan kembali secara perlahan ke aliran udara, sehingga kolektor tetap mampu memanaskan udara meskipun paparan matahari sudah menurun drastis (Farzan et al., 2022; Marudapillai et al., 2023).

Perbandingan ΔT PCM pada variasi massa

Tabel 4 dan Gambar 4 menjadi data utama untuk membandingkan respons tiga variasi massa PCM dari pukul 09.00 sampai 15.00 WIB. Tabel ditempatkan sebelum grafik agar nilai ΔT_{PCM} yang diplot dapat ditelusuri dengan jelas. Grafik dibuat dari baseline 0 °C sehingga nilai yang ditampilkan dibaca sebagai kenaikan temperatur PCM terhadap temperatur awal pengujian, bukan sebagai temperatur absolut sensor T5 dan T6.

Tabel 4. Data ΔT_{PCM} pada variasi massa H1, H2, dan H3 dengan baseline 0 °C.

Waktu	ΔT PCM H1 100 g/pipa (°C)	ΔT PCM H2 200 g/pipa (°C)	ΔT PCM H3 300 g/pipa (°C)
09:00	0,00	0,00	0,00
09:30	0,00	2,16	0,59
10:00	0,00	1,38	2,14
10:30	0,94	4,50	4,12
11:00	1,83	5,44	4,37
11:30	5,72	6,86	5,25
12:00	7,14	10,95	6,67
12:30	8,20	10,69	8,77
13:00	7,83	7,41	6,90
13:30	7,61	6,16	6,90
14:00	0,00	5,28	5,41
14:30	0,60	4,31	2,52
15:00	0,00	4,96	2,26



Gambar 4. Perbandingan fluktuasi kenaikan temperatur (ΔT) *phase change material* (PCM) pada variasi massa spesifik H1 (100 g/pipa), H2 (200 g/pipa), dan H3 (300 g/pipa).

H1 100 g/pipa menunjukkan ΔT_{PCM} maksimum sekitar 8,20 °C, H2 200 g/pipa sekitar 11,28 °C, dan H3 300 g/pipa sekitar 9,34 °C. Nilai tersebut tidak berarti bahwa temperatur wadah PCM hanya 8,20 °C pada H1, melainkan menunjukkan kenaikan temperatur dari temperatur awal. Berdasarkan catatan sensor T5 dan T6, temperatur maksimal wadah PCM H1 mencapai sekitar 45,77 °C. Jika ΔT_{PCM} maksimum H1 sebesar 8,20 °C, maka temperatur awal PCM berada sekitar 37,57 °C. Prinsip yang sama berlaku pada H2 dan H3, karena ΔT_{PCM} dihitung dari selisih $T_{PCM, t}$ terhadap $T_{PCM, 0}$. Oleh karena itu, pembahasan grafik perlu membedakan temperatur absolut PCM dan kenaikan temperatur PCM agar tidak terjadi salah baca hasil.

Secara fisik, H1 dengan massa PCM lebih kecil cenderung lebih cepat merespons pemanasan karena inersia termalnya lebih rendah, tetapi kapasitas penyimpanan panasnya lebih terbatas. Massa PCM yang lebih besar mempunyai kapasitas termal lebih tinggi sehingga dapat menahan pelepasan panas lebih lama, walaupun kenaikan temperatur puncaknya tidak selalu paling besar. Kecenderungan ini sesuai dengan karakter PCM sebagai media penyimpan panas laten yang dapat menyerap dan melepaskan panas secara bertahap untuk meredam fluktuasi temperatur sistem (Farzan et al., 2022; Hasan Zaim & Farzan, 2021). Dari perspektif perpindahan panas, fenomena di mana variasi H3 (massa terbesar 300 g/pipa) tidak menghasilkan ΔT_{PCM} tertinggi disebabkan oleh efek resistansi termal internal.

Material *paraffin wax* memiliki sifat bawaan konduktivitas termal yang sangat rendah (Mahdavi et al., 2024). Ketika massa PCM di dalam silinder terlalu besar (seperti pada H3), lapisan *wax* yang lebih dulu mencair di area dinding dalam pipa justru membentuk lapisan insulasi (*thermal resistance*) bagi sisa PCM padat yang berada di inti tengah pipa. Akibatnya, laju penetrasi panas melambat dan sebagian PCM di bagian tengah gagal merespons kenaikan suhu secara maksimal (Hasan Zaim & Farzan, 2021). Sebaliknya, pada H2 (200 g/pipa), keseimbangan antara kapasitas penyimpanan laten dan rasio area penetrasi panas lebih tercapai, sehingga mampu mencatatkan lonjakan ΔT_{PCM} tertinggi. Hal ini membuktikan bahwa penambahan massa PCM tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kinerja jika resistansi termalnya tidak diatasi (Hasan Zaim & Farzan, 2021; Rajamony et al., 2024).

Ringkasan perbandingan performa termal

Tabel 5. Ringkasan hasil perhitungan laju panas berguna (Q_{useful}) rata-rata dan koreksi pembacaan ΔT_{PCM}

Variasi	Massa total (kg)	G rata rata (W/m ²)	T maks. T5-T6 (°C)	PCM ΔT maks. (°C)	PCM Q rata-rata (W)	Keterangan
H1 100 g/pipa	0,50	768,59	45,77	8,20	920,61	$\Delta T = 45,77 - 8,20 = 37,57$
H2 200 g/pipa	1,00	711,30	43,17	11,28	849,59	$\Delta T = 43,17 - 11,28 = 31,89$
H3 300 g/pipa	1,50	676,84	43,16	9,34	857,39	$\Delta T = 43,16 - 9,34 = 33,82$

Tabel 5 menunjukkan bahwa hasil performa termal perlu dibaca dengan dua indikator berbeda, yaitu temperatur absolut PCM dan kenaikan temperatur PCM. Temperatur absolut PCM diperoleh dari sensor T5 dan T6, sedangkan ΔT_{PCM} dihitung dari selisih temperatur PCM terhadap temperatur awal. Pada H1 100 g/pipa, temperatur wadah PCM maksimal T5-T6 mencapai sekitar 45,77 °C, tetapi ΔT_{PCM} maksimum hanya 8,20 °C karena temperatur awal PCM berada sekitar 37,57 °C. Dengan demikian, angka 8,20 °C bukan suhu maksimum PCM, melainkan kenaikan suhu dari kondisi awal.

Secara fisik, massa PCM 100 g/pipa lebih cepat merespons pemanasan, sedangkan massa PCM 300 g/pipa memiliki kapasitas penyimpanan panas lebih besar sehingga lebih mampu meredam temperatur komponen bawah kolektor. Kondisi tersebut sejalan dengan fungsi PCM

sebagai thermal buffer pada sistem PVT dan kolektor udara surya (Farzan et al., 2022; Hasan Zaim & Farzan, 2021; Hassan et al., 2020; Marudaipillai et al., 2023).

Perbandingan dengan literatur

Hasil penelitian ini masih berada dalam jalur pengembangan PVT-PCM berbasis udara. Perbedaanannya terletak pada penggunaan pipa aluminium vertikal sebagai wadah PCM yang lebih sederhana dan mudah dibongkar-pasang. Dibandingkan PCM yang ditempel langsung di belakang panel, konfigurasi ini mengurangi kontak langsung dengan panel tetapi tetap menyediakan jalur perpindahan panas melalui seng absorber dan aliran udara paksa.

Tabel 6. Perbandingan hasil dan fokus penelitian dengan literatur

Referensi	Strategi	Temuan utama	Relevansi dengan studi ini
Farzan et al. (2025)	PCM, forced convection, dan pendinginan hibrida	Pendinginan hibrida memberi performa keseluruhan terbaik	Menjadi dasar analisis energi pada kolektor udara PVT.
Hassan et al. (2020)	Hybrid PCM-nanofluid	Regulasi temperatur PV menjadi lebih seragam	Mendukung fungsi PCM sebagai thermal buffer.
Farzan et al. (2022)	PCM/expanded metal mesh pada solar air heater	PCM meningkatkan penyimpanan panas	Relevan dengan penggunaan wadah aluminium sebagai media penyimpanan panas.
Hasan Zaim & Farzan (2021)	Variasi massa PCM	Massa PCM memengaruhi dinamika panas sistem	Mendukung fokus optimasi massa 100-300 g/pipa.
Boutina et al. (2024)	PVT dengan forced ventilation	Ventilasi paksa meningkatkan ekstraksi panas	Relevan dengan penggunaan empat kipas DC pada sisi inlet.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan menguji performa termal kolektor udara PVT yang diintegrasikan dengan PCM jenis *paraffin wax* dalam pipa silinder vertikal. Berdasarkan hasil analisis, sistem menunjukkan kemampuan adaptasi termal yang signifikan melalui mekanisme *thermal buffering*. Namun, pengujian variasi massa PCM dalam penelitian ini memiliki keterbatasan karena dilakukan pada hari yang berbeda dengan profil radiasi matahari yang tidak identik. Hal ini menyebabkan nilai laju panas berguna (*useful heat gain*) absolut tidak dapat dijadikan indikator tunggal penentu performa.

Setelah dilakukan normalisasi data terhadap radiasi aktual dan evaluasi resistansi termalnya, variasi massa H2 (200 g/pipa) terbukti sebagai konfigurasi paling optimal. Massa H2 mampu mencapai keseimbangan ideal antara kapasitas penyimpanan panas laten dan laju penetrasi panas, dibandingkan dengan H1 yang angkanya bias oleh tingginya radiasi, serta H3 yang mengalami penurunan performa akibat resistansi termal internal. Meskipun sistem kolektor ini menunjukkan peningkatan performa termal yang baik, pengukuran dalam penelitian ini belum mencakup kinerja kelistrikan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan pengujian komprehensif yang mencakup efisiensi elektrik dan efisiensi keseluruhan (*overall efficiency*) modul, serta direkomendasikan menggunakan *solar simulator* di dalam ruangan (kondisi terkontrol) guna menyetarakan variabel radiasi secara presisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Widyatama serta Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah memberikan bimbingan,

arahan, serta dukungan selama proses perancangan alat, pelaksanaan pengujian, hingga penyelesaian penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu proses pengambilan data dan pelaksanaan penelitian sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Biswas, R., & Tripathy, P. P. (2024). Thermal and electrical performance evaluation of single and double pass photovoltaic-thermal solar collector with cross-flow baffles and varying transparency: A computational analysis. *Energy*, 308, 132701. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132701>
- Boutina, L., et al. (2024). Experimental performance analysis of photovoltaic/thermal hybrid system cooled by forced ventilation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 43(3), e14328. <https://doi.org/10.1002/ep.14328>
- Cengiz, M., Kayri, I., & Aydin, H. (2024). A collated overview on the evaporative cooling applications for photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 197, 114393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114393>
- Dayer, M., et al. (2024). Experimental and numerical assessments of a photovoltaic thermal collector equipped with newly configured cooling methods using PCM/CFM. *Solar Energy*, 276, 112659. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112659>
- Dev, A., Kumar, R., & Saini, R. (2022). Experimental evaluation of performance of a hybrid solar photovoltaic (PV/T) panel integrated with effective cooling solutions with water base nanofluids and phase change materials. *Energy Sources, Part A*, 44(3), 7287-7302. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2107732>
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119540328>
- Elamin, A. E. A. (2024). Thermal management of photovoltaic thermal (PVT) system for improving electrical performance. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13516-7>
- Elavarasan, R. M., Nadarajah, M., Pugazhendhi, R., & Gangatharan, S. (2024). An experimental investigation on coalescing the potentiality of PCM, fins and water to achieve sturdy cooling effect on PV panels. *Applied Energy*, 356, 122371. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122371>
- Farzan, H., Maghsoudizadeh, M., & Motamed Sadr, A. (2025). A comparative energy and exergy study on the performance of passive, active, and hybrid cooling methods for air-based photovoltaic-thermal collectors: An experimental study. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 12(2), 104-114. <https://doi.org/10.30501/jree.2025.496684.2213>
- Farzan, H., Zaim, E. H., & Amiri, T. (2022). Performance investigation on a new solar air heater using phase change material/expanded metal mesh composite as heat storage unit: An experimental study. *Journal of Energy Storage*, 47, 103602. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103602>
- Hakimi, M., Baniasadi, E., & Afshari, E. (2024). A comparative study on novel active cooling and heat recovery techniques for photovoltaic-thermal collectors. *Process Safety and Environmental Protection*, 190, 1233-1252. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.07.109>
- Hasan Zaim, E., & Farzan, H. (2021). Effects of PCM mass on heat dynamics and thermal performance of solar air heaters: A numerical and analytical study. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 8(3), 45-53. <https://doi.org/10.30501/jree.2021.259570.1169>
- Hassan, A., et al. (2020). Thermal management and uniform temperature regulation of photovoltaic modules using hybrid phase change materials-nanofluids system. *Renewable Energy*, 145, 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.130>
- Kalogirou, S. A. (2023). *Solar energy engineering: Processes and systems*. Elsevier.
- Kecebas, A., et al. (2025). Thermodynamic analysis and efficiency enhancement of PV/T systems using ethanol-based phase change material. *Energy*, 135165. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135165>

- Kumar, R., et al. (2023). Radiative cooling system integrated with heat sink for the thermal management of photovoltaic modules under extreme climate conditions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(17), 9099-9112. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12291-1>
- Mahdavi, A., Farhadi, M., Gorji-Bandpy, M., & Mahmoudi, A. (2024). A comprehensive study on passive cooling of a PV device using PCM and various fin configurations: Pin, spring, and Y-shaped fins. *Applied Thermal Engineering*, 123519. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123519>
- Marudaipillai, S. K., Karuppudayar Ramaraj, B., Kottala, R. K., & Lakshmanan, M. (2023). Experimental study on thermal management and performance improvement of solar PV panel cooling using form stable phase change material. *Energy Sources, Part A*, 45(1), 160-177. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1806409>
- Rajamony, R. K., et al. (2024). Progress in research and technological developments of phase change materials integrated photovoltaic thermal systems: The allied problems and their mitigation strategies. *Sustainable Materials and Technologies*, e00921. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00921>
- Shahsavari, A., & Ameri, M. (2010). Experimental investigation and modeling of a direct-coupled PV/T air collector. *Solar Energy*, 84(11), 1938-1958. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.07.010>