

Analisis Pengaruh Variasi Massa Phase Change Material terhadap Kinerja Sistem Photovoltaic Thermal Berbasis Pendingin Udara

Muhammad Alvan Fadillah^{1*}, Udin Komarudin², Ahmad Rajani³

*Email corresponding author: alvano0424@gmail.com

^{1,2}Mechanical Engineering, Widyatama University Bandung, Jl. Cikutra No. 204A Bandung, 40126, West Java, Indonesia

³National Research and Innovation Agency (BRIN) Jl. Sangkuriang, Dago, Bandung, 40135, West Java, Indonesia

Article history: Received: 23 Juni 2026 | Revised: 11 Juli 2026 | Accepted: 17 Juli 2026

Abstract. *This study evaluates an air-based photovoltaic thermal (PV/T) double-pass system integrated with paraffin wax phase change material (PCM). Three PCM masses, namely 1000 g, 2000 g, and 3000 g, were tested and compared under equal solar irradiance so that the thermal response could be evaluated under comparable radiation conditions. The apparatus consists of a PV module, 6 mm glass cover, air duct, reflector/absorber plate, PCM containers, type-K thermocouples, DHT22 sensors, solar power meter, anemometer, Testo 405i probe, and data logger. The results show that the average air temperature difference was 6.74°C, 6.72°C, and 6.91°C for PCM 1000 g, 2000 g, and 3000 g, respectively. The average reflector temperature decreased from 44.97°C at PCM 1000 g to 43.45°C at PCM 3000 g, indicating better heat buffering with larger PCM mass levels.*

Keywords - Air cooling; data logger; phase change material; photovoltaic thermal; solar irradiance

Abstrak. *Penelitian ini menganalisis sistem photovoltaic thermal (PV/T) double pass berbasis pendingin udara yang diintegrasikan dengan phase change material (PCM) jenis paraffin wax. Variasi massa PCM yang digunakan adalah 1000 g, 2000 g, dan 3000 g. Pengujian dilakukan selama tiga hari, kemudian data setiap variasi dibandingkan pada intensitas radiasi yang sama sehingga perbedaan jam pengukuran tidak menjadi dasar utama pembandingan. Alat penelitian terdiri atas modul PV, kaca 6 mm, saluran udara, pelat reflektor/absorber, wadah PCM, thermocouple tipe-K, sensor DHT22, solar power meter, anemometer, Testo 405i, dan data logger. Hasil menunjukkan rata-rata ΔT udara sebesar 6,74°C pada PCM 1000 g, 6,72°C pada PCM 2000 g, dan 6,91°C pada PCM 3000 g. Rata-rata temperatur reflektor menurun dari 44,97°C pada PCM 1000 g menjadi 43,45°C pada PCM 3000 g, sehingga penambahan massa PCM cenderung membantu menahan fluktuasi panas pada sistem.*

Kata Kunci - Pendingin udara; data logger; phase change material; photovoltaic thermal; radiasi matahari

PENDAHULUAN

Photovoltaic thermal (PV/T) merupakan sistem yang menggabungkan proses konversi listrik pada panel fotovoltaik dengan pemanfaatan panas yang terbentuk pada permukaan panel. Pada sistem ini, energi matahari tidak hanya dimanfaatkan sebagai energi listrik, tetapi juga sebagai sumber panas yang dapat dialirkan dan digunakan kembali melalui fluida kerja. Sistem PV/T berbasis udara banyak dikaji karena konstruksinya relatif sederhana, risiko kebocoran rendah, dan lebih mudah diterapkan pada kolektor datar dibandingkan sistem berbasis cairan [1].

Kenaikan temperatur panel menjadi salah satu permasalahan utama dalam pengoperasian PV/T karena sebagian radiasi matahari yang tidak dikonversi menjadi listrik berubah menjadi panas. Jika panas tersebut tertahan terlalu lama pada permukaan atau bagian belakang panel, temperatur kerja panel meningkat dan kinerja sistem dapat menurun. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme pemindahan panas agar energi panas yang terkumpul dapat dikendalikan dan tidak hanya menjadi beban termal pada panel [2].

Pada sistem PV/T berbasis pendingin udara, panas dari bagian bawah panel dipindahkan melalui aliran udara yang melewati saluran kolektor. Aliran udara berfungsi membawa panas dari ruang bawah panel menuju outlet sehingga temperatur operasi sistem menjadi lebih terkendali. Prinsip dasar perpindahan panas pada kolektor surya menunjukkan bahwa efektivitas sistem dipengaruhi oleh intensitas radiasi, luas bidang kolektor, kecepatan aliran udara, serta perbedaan temperatur antara udara masuk dan udara keluar [3].

Selain pendinginan aktif dengan aliran udara, pendekatan pendinginan pasif dapat dilakukan dengan menambahkan phase change material (PCM). PCM bekerja dengan menyerap panas laten saat mengalami perubahan fase sehingga kenaikan temperatur sistem dapat diperlambat. Pada sistem PV/T, PCM dapat ditempatkan di bagian bawah panel atau pada area yang berdekatan dengan absorber agar panas yang belum terbawa aliran udara dapat disimpan sementara sebelum dilepaskan kembali [4], [5].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa integrasi PCM pada sistem PV/T mampu membantu pengelolaan panas dan menjaga temperatur komponen lebih stabil. Penggunaan PCM juga dapat dikombinasikan dengan metode

pendinginan lain, termasuk aliran udara paksa dan konfigurasi kolektor double pass. Namun, besarnya massa PCM tetap perlu dianalisis karena massa yang berbeda dapat menghasilkan kemampuan penyimpanan panas dan dinamika pelepasan panas yang berbeda pula [6].

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan bahwa penggunaan PCM mampu meningkatkan karakteristik termal sistem PV/T, sebagian besar penelitian lebih berfokus pada pengaruh jenis PCM, konfigurasi kolektor, atau metode pendinginan yang digunakan. Kajian yang secara khusus membandingkan pengaruh variasi massa PCM pada sistem PV/T double-pass berbasis pendingin udara dengan kondisi intensitas radiasi matahari yang disetarakan masih terbatas. Oleh karena itu, pengaruh massa PCM terhadap respons termal sistem masih memerlukan kajian lebih lanjut agar dapat menjadi dasar dalam menentukan massa PCM yang sesuai untuk aplikasi PV/T berbasis udara [7].

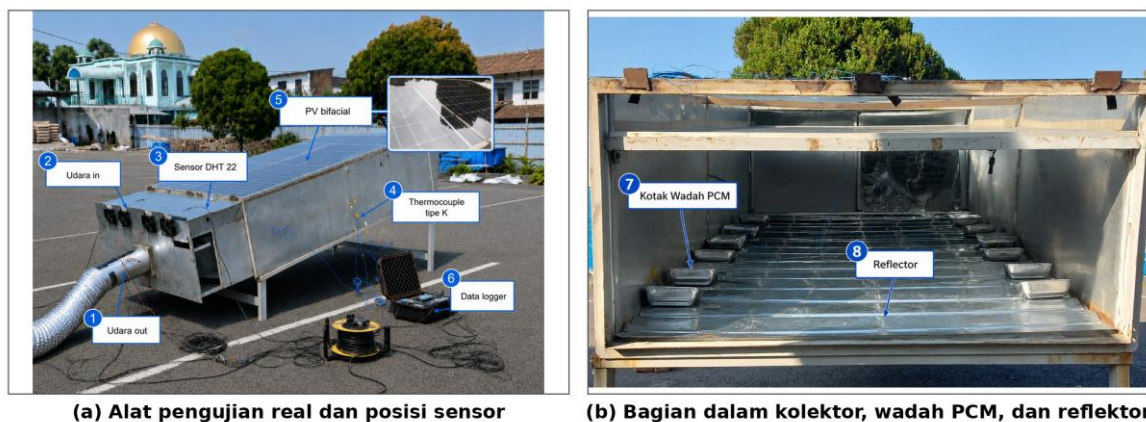
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi massa phase change material (PCM) terhadap kinerja termal sistem photovoltaic thermal (PV/T) double pass berbasis pendingin udara. Variasi massa PCM yang digunakan adalah 1000 g, 2000 g, dan 3000 g dengan jenis material berupa paraffin wax. PCM ditempatkan pada bagian bawah panel bersama pelat reflektor/absorber agar panas yang terbentuk di ruang bawah panel dapat diserap dan disimpan sementara sebelum dilepaskan kembali ke aliran udara. Sistem double pass dipilih karena lintasan aliran udara yang lebih panjang memungkinkan proses perpindahan panas berlangsung lebih optimal dibandingkan aliran satu lintasan. Melalui variasi massa PCM tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana penambahan massa PCM memengaruhi kemampuan sistem dalam menahan kenaikan temperatur, menyimpan panas laten, serta membantu pelepasan panas ke udara pendingin. Analisis dilakukan dengan membandingkan respons termal setiap variasi massa PCM pada kondisi intensitas radiasi matahari yang setara. Pendekatan ini digunakan agar evaluasi pengaruh variasi massa PCM dilakukan pada kondisi pengujian yang sebanding, sehingga perbedaan respons termal lebih merepresentasikan pengaruh massa PCM dibandingkan fluktuasi radiasi matahari selama pengujian. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem PV/T berbasis pendingin udara melalui penyediaan informasi mengenai pengaruh variasi massa PCM terhadap karakteristik termal sistem serta menjadi dasar dalam menentukan massa PCM yang sesuai untuk aplikasi serupa.

METODE

A. Konfigurasi alat dan rancangan pengujian

Sistem yang digunakan merupakan PV/T-PCM double pass berbasis pendingin udara. Modul PV diletakkan pada bagian atas dengan kaca 6 mm sebagai pelindung dan pembentuk ruang termal. Di bagian bawah panel terdapat saluran udara, pelat reflektor/absorber, dan wadah penyimpanan PCM. Udara masuk melalui kipas inlet, melewati lintasan pertama pada ruang saluran di bawah panel, kemudian dibelokkan menuju lintasan kedua yang melewati area reflektor/absorber dan wadah PCM sebelum keluar melalui duct outlet. Konfigurasi double pass dipilih karena lintasan aliran udara yang lebih panjang dapat meningkatkan peluang perpindahan panas antara permukaan kolektor dan udara kerja [9], [10].

Gambar 1 menampilkan dokumentasi alat PV/T-PCM double pass yang telah diperbarui. Gambar 1(a) menunjukkan alat pengujian real beserta posisi aliran udara, sensor DHT22, thermocouple tipe-K, PV bifacial, dan data logger. Gambar 1(b) menunjukkan bagian dalam kolektor yang berisi kotak wadah PCM dan reflektor. Posisi sensor ditunjukkan agar pembaca dapat memahami jalur pengambilan data temperatur udara, temperatur permukaan, serta temperatur area PCM.



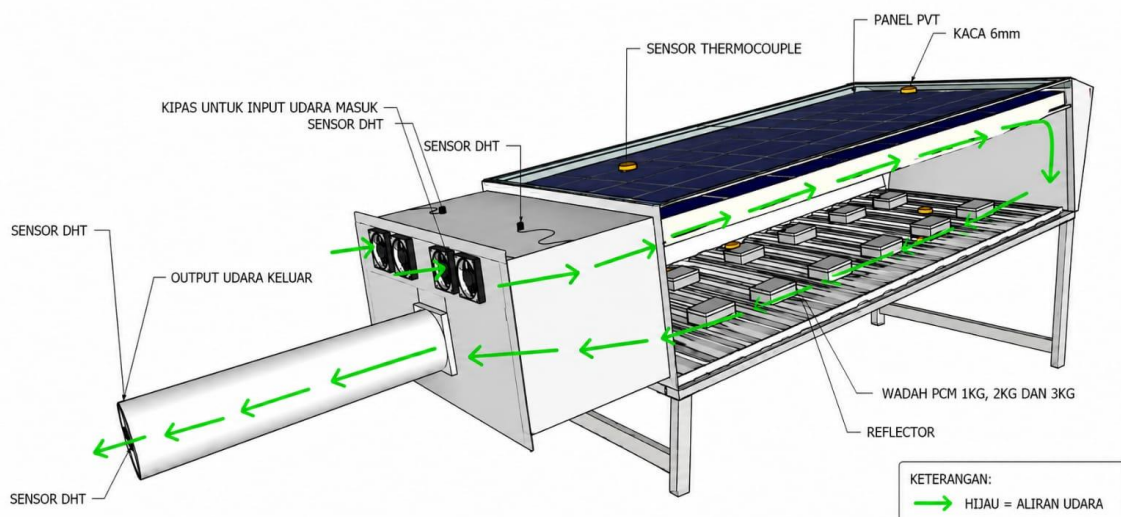
Gambar 1. Konfigurasi alat PV/T-PCM double pass: (a) alat pengujian real dan posisi sensor, (b) bagian dalam kolektor, wadah PCM, dan reflektor.

Tabel 1. Spesifikasi sensor

No	Alat/sensor	Spesifikasi/keterangan
1	DHT22	-40–80°C
2	Thermocouple tipe-K	Hingga 250°C
3	Data logger	Sistem akuisisi data
4	Wadah PCM	Stainless steel, 13,5 × 10,5 × 5 cm
5	Testo 405i	Probe kecepatan udara
6	Solar power meter	0–1800 W/m ²
7	Anemometer	0–30 m/s

Instrumen pada Tabel 1 disusun untuk memastikan seluruh parameter termal dan lingkungan tercatat secara konsisten. DHT22 digunakan untuk membaca temperatur udara pada sisi inlet dan outlet, sedangkan thermocouple tipe-K ditempatkan pada kaca, backsheet PV, reflektor/absorber, dan area PCM. Solar power meter digunakan sebagai dasar penyamaan intensitas radiasi, sementara anemometer dan Testo 405i mendukung pembacaan kondisi aliran udara.

Pada Gambar 2 ditunjukkan model sistem PV/T-PCM double pass yang digunakan pada penelitian. Panel PV bifacial ditempatkan di antara kaca penutup 6 mm dan reflektor, sehingga udara yang didorong oleh kipas inlet mula-mula mengalir pada saluran atas di bawah kaca dan di atas panel PV. Di ujung kolektor, aliran udara dibelokkan membentuk lintasan U-turn, kemudian bergerak kembali melalui saluran bawah melewati area reflektor dan wadah PCM sebelum keluar melalui saluran outlet.



Gambar 2. Model PV/T-PCM double pass dan arah aliran udara pada sistem. Sumber: dokumentasi dan model peneliti.

Tabel 2. Spesifikasi alat PV/T-PCM

No	Material	Spesifikasi/keterangan
1	Modul PV	PV bifacial monokristalin 540 Wp
2	Rangka penyangga	Baja ringan/aluminium
3	PCM	Paraffin wax (1000 g, 2000 g, 3000 g)
4	Wadah PCM	Stainless steel
5	Pelat absorber/reflektor	Seng gelombang dan aluminium foil
6	Saluran udara (air duct)	Pelat galvanis
7	Kipas inlet	Kipas DC
	Aluminium foil	Foil reflektif

Tabel 2 menjelaskan material utama yang membentuk sistem PV/T-PCM. Modul PV berperan sebagai penerima radiasi dan penghasil listrik, saluran udara berfungsi sebagai jalur perpindahan panas, sedangkan pelat reflektor/absorber membantu memperluas area kontak termal pada ruang bawah panel. Wadah PCM ditempatkan

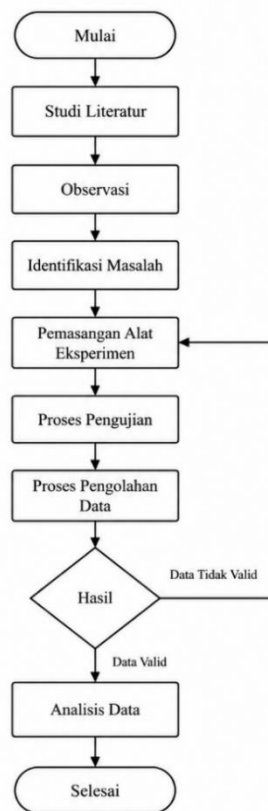
berjarak agar panas dari ruang bawah panel dapat diserap dan dilepaskan kembali secara bertahap. Wadah berbentuk kotak atau rectangular enclosure dipilih karena sederhana, mudah difabrikasi, dan umum digunakan pada sistem penyimpanan panas laten berbasis kolektor datar [11]-[14].

B. Sistem akuisisi data dan instrumen pengukuran

Sistem akuisisi data disusun agar temperatur permukaan, temperatur PCM, dan temperatur udara dapat direkam secara kontinu. Thermocouple tipe-K merekam temperatur kaca, backsheet PV, reflektor/absorber, dan PCM. Sensor DHT22 membaca temperatur udara pada inlet dan outlet. Seluruh pembacaan sensor diteruskan ke data logger sehingga proses pencatatan data tidak dilakukan secara manual dan dapat ditelusuri kembali saat pengolahan data.

C. Diagram alir penelitian

Diagram alir penelitian pada Gambar 3 memuat seluruh tahapan utama mulai dari persiapan, pemasangan sensor, variasi PCM, pengujian, pencatatan data, validasi data, pengolahan, pembahasan, kesimpulan, hingga selesai. Jika data belum lengkap atau belum valid, proses kembali ke pengecekan sensor/data sebelum pencatatan dilanjutkan.



Gambar 3. Diagram alir penelitian PV/T-PCM

D. Prosedur pengujian dan penyamaan intensitas radiasi

Pengujian dilakukan selama tiga hari dengan variasi massa PCM berbeda, yaitu PCM 1000 g, PCM 2000 g, dan PCM 3000 g. Data eksperimen asli pada file Excel digunakan pada rentang 09.00–15.00 WIB. Parameter yang dicatat meliputi intensitas radiasi matahari, temperatur kaca, temperatur backsheet PV, temperatur PCM, temperatur reflektor/absorber, temperatur udara inlet, temperatur udara outlet, kecepatan angin lingkungan, dan kecepatan aliran udara outlet.

Perbandingan tiga variasi PCM tidak didasarkan pada jam yang harus sama, tetapi pada intensitas radiasi yang dibuat sama atau sebanding. Dengan cara ini, data dari tiga hari berbeda dapat dibandingkan pada kondisi radiasi yang setara. Penyamaan intensitas dilakukan agar perbedaan respons temperatur lebih tepat dikaitkan dengan variasi massa PCM, bukan hanya akibat perubahan cuaca harian.

E. Persamaan analisis yang digunakan

Bagian persamaan disederhanakan menjadi parameter inti yang langsung digunakan untuk membaca hasil pengujian. Persamaan yang dipakai difokuskan pada selisih temperatur udara, selisih temperatur PCM terhadap temperatur awal, laju panas berguna, dan efisiensi termal berdasarkan prinsip dasar perpindahan panas serta analisis kolektor surya [17], [19].

Selain analisis termal, dilakukan uji statistik menggunakan One-Way Analysis of Variance (One-Way ANOVA) dengan tingkat signifikansi 5% untuk mengevaluasi apakah variasi massa PCM menghasilkan perbedaan yang signifikan terhadap temperatur PCM dan ΔT udara.

$$\begin{aligned}\Delta T_{air} &= T_{out} - T_{in} & 1 \\ \Delta T_{PCM} &= T_{PCM,t} - T_{PCM,0} & 2 \\ Q_{useful} &= T_{PCM,t} - T_{PCM,0} & 3 \\ n_{th} &= \frac{Q_{useful}}{GAc} \times 100 & 4\end{aligned}$$

Gambar 4. Persamaan dasar analisis kinerja termal sistem PV/T-PCM. Persamaan (1)–(4) merujuk pada formulasi dasar kolektor surya, analisis PV/T berbasis udara, dan perpindahan panas [1]–[3], [17], [19].

Persamaan (1)–(4) pada Gambar 4 digunakan sebagai dasar analisis kinerja termal sistem photovoltaic thermal (PV/T) berbasis PCM. Persamaan (1) menyatakan selisih temperatur udara, ΔT_{air} , yang dihitung dari perbedaan antara temperatur udara keluar (T_{out}) dan temperatur udara masuk (T_{in}). Nilai ini digunakan untuk menunjukkan kemampuan sistem dalam meningkatkan temperatur udara akibat proses penyerapan panas dari modul PV dan wadah PCM.

Persamaan (2) mendefinisikan perubahan temperatur PCM, ΔT_{PCM} , yang diperoleh dari selisih antara temperatur PCM pada waktu pengamatan ($T_{PCM,t}$) dan temperatur awal PCM ($T_{PCM,0}$). Parameter ini menggambarkan kemampuan PCM dalam menyerap energi panas selama proses pengujian, di mana peningkatan nilai ΔT menunjukkan semakin besar energi yang disimpan dalam bentuk panas sensibel maupun laten.

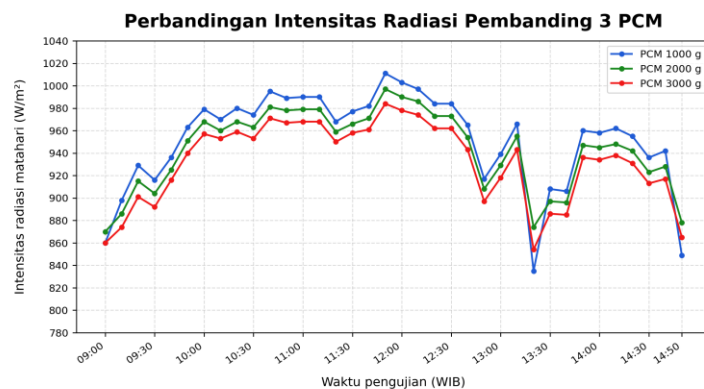
Selanjutnya, persamaan (3) menunjukkan energi panas berguna (Q_{useful}) yang dihasilkan oleh sistem, yang secara praktis merepresentasikan energi panas yang berhasil dipindahkan ke aliran udara melalui proses konveksi. Besaran ini sangat penting untuk menilai efektivitas sistem PV/T dalam mengonversi radiasi matahari menjadi energi termal yang dapat dimanfaatkan.

Persamaan (4) digunakan untuk menghitung efisiensi termal (η_{th}) sistem PV/T-PCM, yaitu perbandingan antara energi panas berguna (Q_{useful}) terhadap energi radiasi matahari yang diterima kolektor (G).

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi radiasi matahari pembeding

Gambar 5 menunjukkan perbandingan intensitas radiasi yang digunakan sebagai dasar pembeding pada tiga variasi massa PCM. Grafik pada bagian ini menggunakan bentuk grafik garis sesuai data pembacaan radiasi, sehingga perubahan intensitas dari awal sampai akhir pengujian dapat terlihat lebih jelas. Label waktu pada sumbu bawah dan label intensitas pada sumbu kiri dibuat lebih besar serta diberi ruang margin agar tidak terpotong.

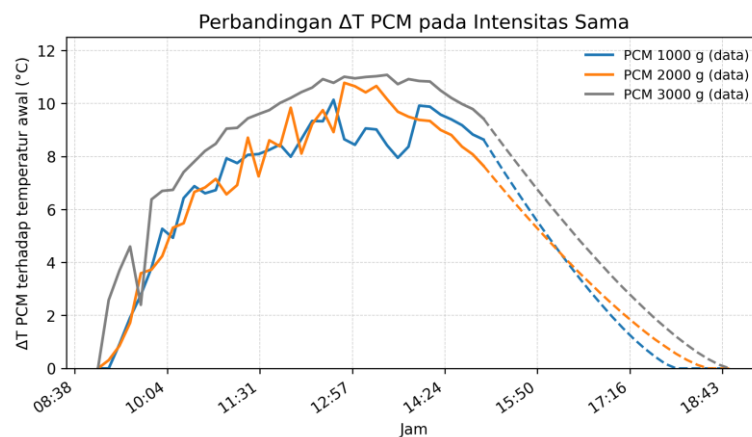


Gambar 5. Perbandingan intensitas radiasi pembeding pada PCM 1000 g, 2000 g, dan 3000 g dalam bentuk grafik garis.

Berdasarkan Gambar 5, pembacaan radiasi pada ketiga variasi berada pada rentang intensitas yang relatif sebanding. Format grafik garis memudahkan pembacaan tren karena setiap waktu pengujian memiliki tiga nilai PCM yang dapat dibandingkan langsung. Pendekatan ini membantu mengurangi bias akibat perbedaan cuaca harian dan memperjelas dasar penyamaan radiasi sebelum analisis temperatur dilakukan.

B. Perbandingan ΔT PCM pada intensitas yang sama

Gambar 6 menjadi grafik utama karena membandingkan respons tiga massa PCM dalam satu grafik. Pada data eksperimen, rata-rata ΔT PCM sebesar $7,18^{\circ}\text{C}$ untuk PCM 1000 g, $7,31^{\circ}\text{C}$ untuk PCM 2000 g, dan $8,73^{\circ}\text{C}$ untuk PCM 3000 g. Nilai ini menunjukkan bahwa peningkatan massa PCM cenderung meningkatkan kemampuan penyimpanan panas. Hasil ini sejalan dengan Hasan dan Farzan, yang melaporkan bahwa peningkatan massa PCM memperbesar kapasitas penyimpanan energi termal sehingga proses kenaikan temperatur berlangsung lebih lambat. Dengan kapasitas penyimpanan panas yang lebih besar, PCM 3000 g mampu menyerap energi panas lebih lama sebelum seluruh material mengalami kenaikan temperatur yang cepat [8].

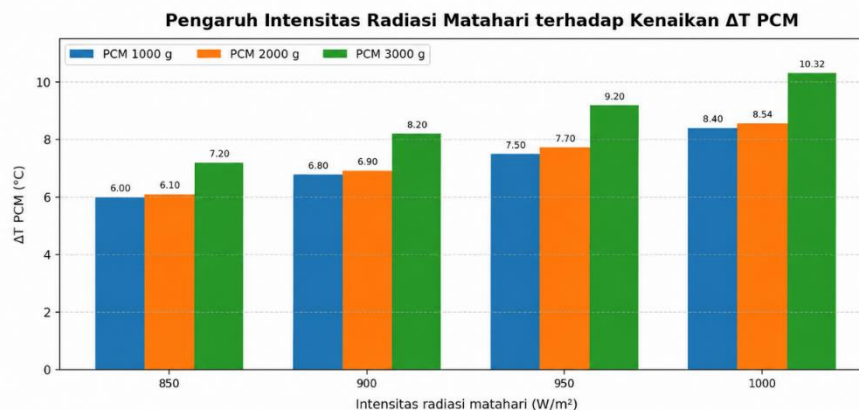


Gambar 6. Perbandingan ΔT PCM pada intensitas radiasi yang sama. Garis putus-putus menunjukkan simulasi pelepasan panas setelah data eksperimen asli.

Bagian garis putus-putus pada Gambar 6 digunakan sebagai ilustrasi proses pelepasan panas setelah pengujian lapangan, bukan sebagai data eksperimen utama. Kurva PCM 3000 g masih menunjukkan pelepasan panas yang lebih bertahap dibandingkan PCM 2000 g dan PCM 1000 g. Secara estimatif dari kurva pendinginan, waktu yang diperlukan hingga ΔT PCM mendekati 0°C adalah sekitar 180 menit pada PCM 1000 g, sekitar 200 menit pada PCM 2000 g, dan sekitar 225 menit pada PCM 3000 g.

C. Hubungan ΔT PCM dengan intensitas radiasi matahari

Gambar 7 ditambahkan untuk memperlihatkan hubungan ΔT PCM terhadap intensitas radiasi matahari dengan cara yang lebih tepat. Pada versi revisi, sumbu-X dibuat menggunakan intensitas radiasi yang sama, yaitu 850, 900, 950, dan 1000 W/m^2 . Pada setiap intensitas terdapat tiga batang yang mewakili PCM 1000 g, PCM 2000 g, dan PCM 3000 g, sehingga perbandingan tidak lagi menggunakan radiasi rata-rata yang berbeda untuk masing-masing PCM.



Gambar 7. Pengaruh intensitas radiasi matahari terhadap kenaikan ΔT PCM pada variasi massa PCM 1000 g, 2000 g, dan 3000 g.

Berdasarkan Gambar 7, nilai ΔT PCM meningkat ketika intensitas radiasi dinaikkan dari 850 W/m^2 hingga 1000 W/m^2 . Pada setiap tingkat intensitas, PCM 3000 g menghasilkan ΔT PCM paling tinggi dibandingkan PCM 1000 g dan PCM 2000 g. Hasil ini menunjukkan bahwa massa PCM yang lebih besar memiliki kapasitas penyerapan panas lebih besar, sehingga mampu menahan dan menyimpan energi termal lebih kuat pada kondisi radiasi yang sama dan sejalan dengan konsep peningkatan kemampuan penyimpanan panas pada PCM.

Fenomena tersebut juga konsisten dengan ulasan Khodadadi dan Fan, yang menjelaskan bahwa peningkatan kapasitas penyimpanan energi termal pada PCM memungkinkan lebih banyak panas diserap selama proses pemanasan. Oleh karena itu, pada intensitas radiasi yang sama, massa PCM yang lebih besar cenderung memberikan respons termal yang lebih stabil dibandingkan massa yang lebih kecil [20].

D. Ringkasan hasil utama

Ringkasan hasil menunjukkan bahwa rata-rata ΔT udara pada tiga variasi relatif berdekatan, yaitu $6,74^\circ\text{C}$ pada PCM 1000 g, $6,72^\circ\text{C}$ pada PCM 2000 g, dan $6,91^\circ\text{C}$ pada PCM 3000 g. Kondisi ini menandakan bahwa aliran udara tetap mampu mengambil panas dari ruang bawah panel pada seluruh variasi massa PCM. Nilai ΔT udara tertinggi pada PCM 3000 g menunjukkan bahwa panas yang tersimpan pada PCM masih dapat dilepaskan ke aliran udara secara bertahap.

Meskipun peningkatan ΔT udara relatif kecil, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan massa PCM lebih berperan sebagai media penyimpanan panas dibandingkan sebagai faktor yang secara langsung meningkatkan temperatur udara keluar. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa energi panas terlebih dahulu diserap oleh PCM sebelum dilepaskan secara bertahap ke aliran udara.

E. Analisis Statistik

Tabel 3. Hasil uji One-Way ANOVA pada parameter utama

Parameter	F-value	p-value
Temperatur PCM	0.699	0.499
ΔT Udara	0.425	0.655

Untuk mengevaluasi apakah variasi massa PCM memberikan pengaruh yang signifikan terhadap parameter termal, dilakukan uji One-Way ANOVA dengan tingkat signifikansi 5%. Hasil analisis menunjukkan bahwa temperatur PCM memiliki nilai F sebesar 0.699 dengan p-value sebesar 0.499, sedangkan ΔT udara memiliki nilai F sebesar 0.425 dengan p-value sebesar 0.655. Kedua parameter menunjukkan nilai p lebih besar dari 0.05, sehingga perbedaan yang diamati antar variasi massa PCM tidak signifikan secara statistik. Dengan demikian, hasil uji statistik menunjukkan bahwa meskipun terdapat kecenderungan peningkatan respons termal pada penggunaan PCM 3000g, perbedaan tersebut masih berada dalam rentang variasi data hasil eksperimen sehingga belum dapat dinyatakan signifikan secara statistik.

KESIMPULAN

Sistem PV/T-PCM terdiri atas modul PV, kaca 6 mm, saluran udara double pass, kipas inlet, duct outlet, pelat reflektor/absorber, wadah PCM, thermocouple tipe-K, sensor DHT22, instrumen lingkungan, dan data logger. Thermocouple tipe-K dipasang pada kaca, backsheet PV, reflektor/absorber, dan area PCM, sedangkan DHT22 dipasang pada inlet dan outlet udara. Rata-rata ΔT udara yang diperoleh adalah $6,74^\circ\text{C}$ pada PCM 1000 g, $6,72^\circ\text{C}$ pada PCM 2000 g, dan $6,91^\circ\text{C}$ pada PCM 3000 g. Hasil ini menunjukkan bahwa aliran udara mampu membawa panas keluar dari sistem pada seluruh variasi massa PCM. PCM 3000 g menghasilkan rata-rata ΔT PCM tertinggi sebesar $8,73^\circ\text{C}$ serta menunjukkan kecenderungan pelepasan panas yang lebih bertahap dibandingkan PCM 1000 g dan PCM 2000 g. Namun, hasil uji statistik menunjukkan bahwa perbedaan tersebut belum signifikan secara statistik. Penambahan massa PCM menurunkan temperatur rata-rata reflektor dari $44,97^\circ\text{C}$ pada PCM 1000 g menjadi $43,45^\circ\text{C}$ pada PCM 3000 g. Hasil ini menunjukkan bahwa PCM 3000 g memberikan efek penyangga panas paling baik pada bagian bawah panel.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Widyatama, Badan Riset dan Inovasi Nasional serta seluruh pihak yang membantu perancangan alat, pemasangan sensor, pengambilan data, dan penyusunan artikel ini.

REFERENSI

- [1] H. Farzan, M. Maghsoudizadeh, and A. Motamed Sadr, "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*, vol. 12, no. 2, pp. 104-114, 2025, doi: 10.30501/jree.2025.496684.2213.
- [2] J. A. Duffie, W. A. Beckman, and N. Blair, *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2020, doi: 10.1002/9781119540328.
- [3] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Elsevier, 2023.
- [4] L. Boutina et al., "Experimental performance analysis of photovoltaic/thermal hybrid system cooled by forced ventilation," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 43, no. 3, e14328, 2024, doi: 10.1002/ep.14328.
- [5] M. Dayer et al., "Experimental and numerical assessments of a photovoltaic thermal collector equipped with newly configured cooling methods using PCM/CFM," *Solar Energy*, vol. 276, 112659, 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112659.
- [6] A. Hassan et al., "Thermal management and uniform temperature regulation of photovoltaic modules using hybrid phase change materials-nanofluids system," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 282-293, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.130.
- [7] R. K. Rajamony et al., "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, 2024, doi: 10.1016/j.susmat.2024.e00921.
- [8] E. Hasan Zaim and H. Farzan, "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*, vol. 8, no. 3, pp. 45-53, 2021, doi: 10.30501/jree.2021.259570.1169.
- [9] M. Y. Othman, B. Yatim, K. Sopian, and M. N. Abu Bakar, "Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins," *Renewable Energy*, vol. 30, no. 13, pp. 2005-2017, 2005, doi: 10.1016/j.renene.2004.10.007.
- [10] M. Y. Othman, B. Yatim, K. Sopian, and M. N. Abu Bakar, "Double-Pass Photovoltaic-Thermal Solar Air Collector with Compound Parabolic Concentrator and Fins," *Journal of Energy Engineering*, vol. 132, no. 3, pp. 116-120, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9402(2006)132:3(116).
- [11] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318-345, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [12] M. M. Kenisarin and K. M. Mahkamov, "Solar energy storage using phase change materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 9, pp. 1913-1965, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2006.05.005.
- [13] M. J. Huang, P. C. Eames, and B. Norton, "Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, no. 12-13, pp. 2715-2733, 2004, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.11.015.
- [14] A. Hasan, S. J. McCormack, M. J. Huang, and B. Norton, "Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics," *Solar Energy*, vol. 84, no. 9, pp. 1601-1612, 2010, doi: 10.1016/j.solener.2010.05.010.
- [15] I. Ata and Y. E. Ozselcuk, "Experimental analysis of a phase change material (PCM) enhanced solar air heater for thermal energy storage," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 70, 102163, 2025, doi: 10.1016/j.jestech.2025.102163.
- [16] H. Farzan, E. H. Zaim, and T. Amiri, "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*, vol. 47, 103602, 2022, doi: 10.1016/j.est.2021.103602.
- [17] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.
- [18] S. Kline and F. McClintock, "Describing uncertainties in single-sample experiments," *Mechanical Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 3-8, 1953.
- [19] N. Aste, C. Del Pero, and F. Leonforte, "Water flat plate PV-thermal collectors: a review," *Solar Energy*, vol. 102, pp. 98-115, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.01.025.
- [20] M. A. Khodadadi and L. Fan, "Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 418-444, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.031.