

Evaluasi Kinerja Termal Kolektor Surya dengan *Phase Change Material* (PCM) dan Tanpa Integrasi *Phase Change Material* (PCM) dalam Pengeringan Produk Pertanian

Agung Saputra^{1*}, Evi Sofia², Dalmasius Ganjar Subagio³, Yadi Radiansah⁴

^{1,2}Department of Mechanical Engineering, Widyatama University, Bandung 40125, Indonesia

^{3,4}Research Center for Energy Conversion and Conservation, BRIN, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : agung.saputra@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: 2798-2813

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i7.3031>

Article History:

Received: Mei 06, 2026

Revised: Juni 23, 2026

Accepted: Juli 19, 2026

Abstract : The integration of Phase Change Material (PCM) into solar collectors is one approach to enhancing thermal energy utilization in solar drying systems. This study aims to evaluate the thermal performance of a flat-plate solar collector with and without PCM integration through experimental testing. The analyzed parameters include temperature rise (ΔT), useful heat gain (Q_u), and collector thermal efficiency. The results show that the collector without PCM produced higher ΔT , Q_u , and thermal efficiency values, with efficiencies of 80.92% and 39.09% for the systems without and with PCM, respectively. Nevertheless, PCM was able to store thermal energy during periods of high solar radiation and release it when solar intensity decreased through thermal energy storage and release processes. These results indicate that the thermal performance of solar collectors is determined not only by thermal efficiency but also by the system's ability to store, retain, and utilize thermal energy to support a sustainable drying process.

Keywords : Solar Collector, Phase Change Material, Thermal Performance, Useful Heat Gain, Thermal Efficiency.

Abstrak : Integrasi Phase Change Material (PCM) pada kolektor surya merupakan salah satu metode untuk meningkatkan pemanfaatan energi termal pada sistem pengering tenaga surya. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja termal kolektor surya pelat datar dengan dan tanpa PCM melalui pengujian eksperimental. Parameter yang dianalisis meliputi kenaikan temperatur udara (ΔT), energi panas berguna (useful heat gain, Q_u), dan efisiensi termal kolektor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kolektor tanpa PCM menghasilkan nilai ΔT , Q_u , dan efisiensi termal yang lebih tinggi, dengan efisiensi mencapai 80,92%, sedangkan kolektor dengan PCM sebesar 39,09%. Meskipun demikian, PCM mampu menyimpan energi panas selama periode radiasi tinggi dan melepaskannya kembali ketika intensitas radiasi menurun melalui proses penyimpanan dan pelepasan energi termal. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kinerja termal kolektor surya tidak hanya ditentukan oleh efisiensi termal, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam menyimpan, mempertahankan, dan memanfaatkan energi panas untuk mendukung keberlanjutan proses pengeringan.

Kata Kunci : Kolektor Surya, PCM, Kinerja Termal, Energi Panas Berguna, Efisiensi Termal.

PENDAHULUAN

Pengeringan produk pertanian merupakan salah satu tahapan penting dalam proses pascapanen yang bertujuan untuk menurunkan kadar air sehingga dapat memperpanjang umur simpan dan menjaga kualitas produk (Latief et al., 2023). Produk pertanian umumnya memiliki kadar air yang relatif tinggi setelah proses panen sehingga memerlukan proses pengeringan sebelum disimpan atau dipasarkan. Kadar air awal bahan pertanian pascapanen umumnya berada pada kisaran 20–35% basis basah (Al Kindi et al., 2023). Sedangkan kadar air yang aman untuk penyimpanan jangka panjang berada pada kisaran 12–14% (Pongsapan et al., 2024). Apabila kadar air tidak segera diturunkan hingga mencapai batas aman tersebut, bahan pertanian berisiko mengalami kerusakan akibat aktivitas mikroorganisme, peningkatan respirasi bahan, serta penurunan kualitas selama proses penyimpanan (Sianturi et al., 2025).

Proses pengeringan umumnya berlangsung pada temperatur udara pengering berkisar antara 40–70°C (Ranasingha et al., 2026). tergantung pada jenis produk yang dikeringkan. Metode pengeringan konvensional yang banyak digunakan saat ini masih mengandalkan penjemuran langsung di bawah sinar matahari atau menggunakan energi fosil (Mamulkar et al., 2024). Metode tersebut memiliki beberapa kelemahan, seperti ketergantungan terhadap kondisi cuaca, waktu pengeringan yang relatif lama, serta kurangnya kontrol terhadap temperatur dan kualitas produk akhir (Mamulkar et al., 2024). Sebagai alternatif, sistem pengering tenaga surya menjadi solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan (Poonia et al., 2022). Sistem ini memanfaatkan radiasi matahari sebagai sumber energi utama dengan menggunakan kolektor surya untuk mengubah energi radiasi menjadi energi panas. Pada kondisi tertentu, kolektor surya mampu menghasilkan temperatur udara keluar berkisar antara 50–80°C (Venkatesh et al., 2025), yang sesuai untuk proses pengeringan produk pertanian. Namun demikian, kinerja kolektor surya sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari yang tidak stabil, sehingga menyebabkan fluktuasi temperatur udara pengering (Antu, 2016).

Pengering tenaga surya merupakan sistem pengeringan yang memanfaatkan radiasi matahari sebagai sumber energi untuk memanaskan udara pengering. Pada sistem pengering tidak langsung (*indirect solar dryer*), radiasi matahari diserap oleh kolektor surya dan dikonversi menjadi energi panas untuk meningkatkan temperatur udara sebelum dialirkan ke ruang pengering sehingga kualitas produk relatif lebih terjaga (Rulazi, Marwa, Kichonge, & Kiveve, 2023). Kolektor surya pelat datar merupakan komponen utama dalam sistem pengering tenaga surya yang berfungsi menyerap radiasi matahari dan mengonversinya menjadi energi panas untuk memanaskan udara pengering. Dalam aplikasi pengeringan pertanian, kolektor surya umumnya menghasilkan temperatur udara keluaran pada kisaran 35–60 °C, tergantung pada intensitas radiasi matahari dan kondisi operasional sistem (Sidabutar et al., 2024). Dibandingkan penjemuran konvensional dengan temperatur sekitar 30–38 °C, sistem pengering tenaga surya mampu meningkatkan temperatur udara hingga 40–55 °C pada kondisi radiasi maksimum (Model, 2020).

Pada sistem pengering tenaga surya konvensional tanpa integrasi *Phase Change Material* (PCM), temperatur udara pengering sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari. Pada saat radiasi maksimum, temperatur udara pengering umumnya berada pada kisaran 40–55°C, sedangkan ketika intensitas radiasi menurun temperatur dapat turun hingga 30–35°C, dengan fluktuasi temperatur berkisar antara $\pm 8^{\circ}\text{C}$ hingga $\pm 15^{\circ}\text{C}$ (Suvanjumrat et al., 2024). Kondisi ini menyebabkan proses pengeringan menjadi kurang stabil dan berpotensi menurunkan kualitas produk yang dikeringkan. Suhu operasional merupakan parameter penting dalam proses pengeringan karena memengaruhi perpindahan panas dari udara pengering ke bahan serta perpindahan massa air dari dalam bahan menuju permukaan. Interaksi kedua proses tersebut menentukan laju penurunan kadar air bahan (Salve & Fulambarkar, 2022). Pada sistem pengering tenaga surya, suhu operasional umumnya berada pada kisaran 40–60 °C, sehingga PCM dipilih memiliki titik lebur yang sesuai dengan rentang tersebut. Beberapa penelitian melaporkan bahwa parafin memiliki titik lebur sekitar 45–55 °C, sehingga sesuai digunakan pada sistem pengering

tenaga surya (NematpourKeshteli, Iasiello, Langella, & Bianco, 2023). Pada sistem pengering tenaga surya, udara dipanaskan oleh kolektor sebelum dialirkan ke ruang pengering sehingga dapat mempercepat proses penguapan air dari bahan. Sistem pengering dengan kolektor pelat datar umumnya menghasilkan temperatur udara pengering sekitar 40–60 °C, tergantung pada intensitas radiasi matahari dan kondisi operasi sistem (Kindi, et al., 2023).

PCM menyerap energi panas melalui pemanasan sensibel hingga mencapai titik lebur dan kemudian menyerap panas laten selama proses perubahan fase (Diana, et al., 2021). Untuk meningkatkan kinerja sistem, digunakan *Phase Change Material* (PCM) sebagai media penyimpan energi panas (Nabnean & Nimnuan, 2020). PCM berbasis parafin memiliki nilai panas laten yang relatif tinggi, yaitu berkisar antara 150–250 kJ/kg (Zhang & Zhu, 2022), serta mampu menyimpan dan melepaskan energi panas secara efektif pada rentang temperatur kerja pengeringan, yaitu sekitar 45–65°C (Pandey & Chaurasiya, 2017). Dalam sistem pengering tenaga surya, energi panas berlebih dari kolektor surya pada saat radiasi maksimum dapat diserap dan disimpan oleh PCM, kemudian dilepaskan kembali ketika intensitas radiasi menurun. Mekanisme ini membantu menjaga kontinuitas suplai panas serta meningkatkan kestabilan temperatur pada sistem pengering tenaga surya (Ramadhan, Abdullah, Rahman, & Amir, 2023).

Beberapa penelitian melaporkan bahwa penggunaan PCM pada sistem pengering tenaga surya mampu mempertahankan pelepasan panas selama 1–4 jam setelah intensitas radiasi matahari menurun (Imam et al., 2023). Integrasi PCM juga mampu mengurangi fluktuasi temperatur melalui mekanisme penyimpanan panas laten, di mana energi panas berlebih saat radiasi tinggi disimpan dan dilepaskan kembali saat radiasi menurun, sehingga temperatur udara pengering dapat dipertahankan lebih stabil pada kisaran 45–60°C dengan fluktuasi sekitar $\pm 2^{\circ}\text{C}$ hingga $\pm 5^{\circ}\text{C}$ (Imam et al., 2023). Meskipun demikian, kajian yang membandingkan secara langsung kinerja termal kolektor surya dengan dan tanpa integrasi PCM pada sistem pengering produk pertanian masih terbatas (Thaker et al., 2023). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja termal kolektor surya dengan dan tanpa integrasi PCM pada sistem pengering produk pertanian. Parameter yang dianalisis meliputi temperatur udara masuk dan keluar kolektor, kestabilan temperatur selama proses pengeringan, serta efisiensi termal sistem. Dengan demikian, integrasi Phase Change Material (PCM) berperan dalam meningkatkan kestabilan temperatur operasional dan kinerja termal sistem pengering tenaga surya (Apriandi, et al., 2024).

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan peningkatan stabilitas temperatur melalui integrasi Phase Change Material (PCM) pada sistem pengering surya, sebagian besar penelitian dilakukan menggunakan konfigurasi kolektor, jenis PCM, serta kondisi iklim yang berbeda-beda sehingga hasilnya belum dapat digeneralisasi. Penelitian mengenai kolektor surya pelat datar dengan konfigurasi penyimpanan PCM parafin pada tujuh tabung penyimpanan yang dioperasikan pada kondisi iklim tropis lembap di Indonesia masih sangat terbatas. Variasi intensitas radiasi matahari dan kondisi cuaca lokal yang berubah secara cepat berpotensi memengaruhi proses penyimpanan (charging) dan pelepasan (discharging) energi termal oleh PCM sehingga menghasilkan karakteristik kinerja yang berbeda dibandingkan penelitian pada wilayah subtropis maupun gurun.

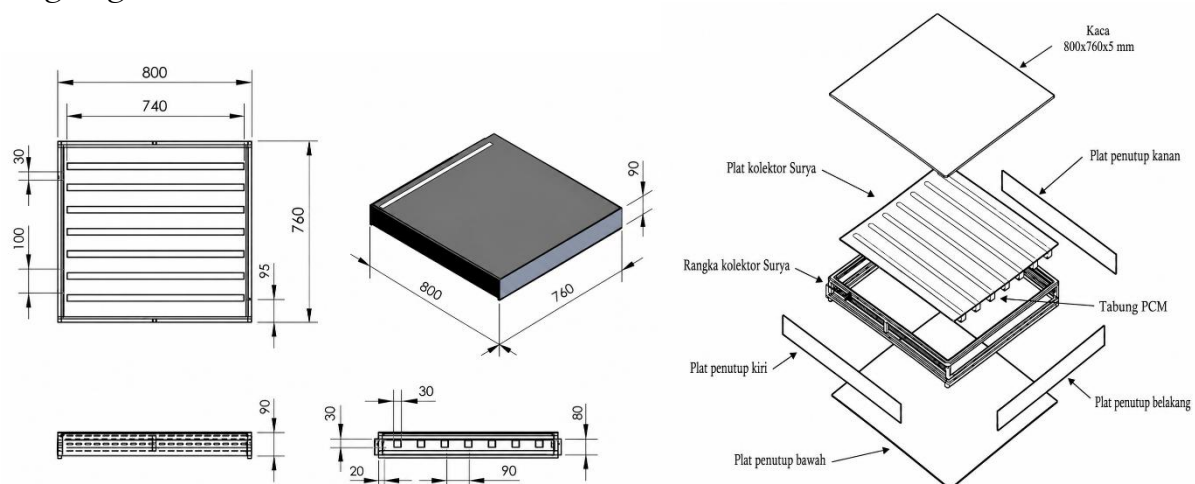
Selain itu, evaluasi kinerja sistem dengan PCM tidak dapat hanya didasarkan pada efisiensi termal sesaat (instantaneous thermal efficiency). Selama periode radiasi tinggi, sebagian energi yang diserap kolektor digunakan untuk proses perubahan fasa parafin dan disimpan sebagai panas laten sehingga energi tersebut belum seluruhnya dikonversi menjadi energi panas berguna (useful heat gain) pada saat pengukuran. Kondisi ini dapat menyebabkan efisiensi sesaat tampak lebih rendah dibandingkan kolektor tanpa PCM. Namun demikian, energi yang tersimpan akan dilepaskan kembali ketika intensitas radiasi matahari menurun sehingga dapat mempertahankan temperatur udara pengering lebih lama dan berpotensi meningkatkan pemanfaatan energi secara keseluruhan selama satu siklus pengeringan harian. Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi tidak hanya efisiensi termal kolektor, tetapi juga kemampuan sistem dalam menyimpan dan memanfaatkan energi termal melalui integrasi PCM. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja termal kolektor surya pelat datar dengan konfigurasi

tujuh tabung PCM berbasis parafin dibandingkan kolektor tanpa PCM pada kondisi iklim tropis Indonesia. Evaluasi dilakukan melalui analisis temperatur udara, energi panas berguna (useful heat gain), dan efisiensi termal untuk menjelaskan hubungan antara penyimpanan panas laten oleh PCM dengan performa sistem pengering surya secara keseluruhan.

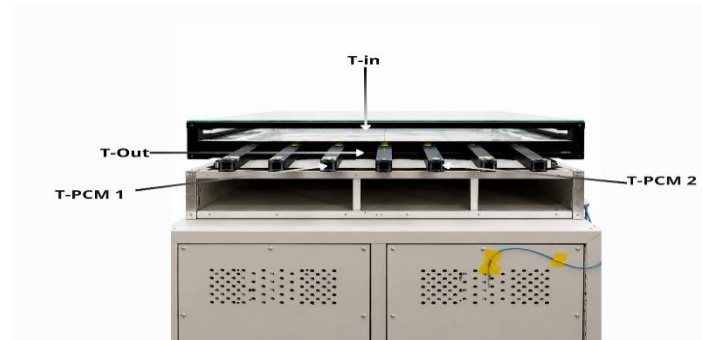
METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengevaluasi kinerja termal kolektor surya pada sistem pengering produk pertanian dengan dua kondisi perlakuan, yaitu kolektor surya tanpa integrasi *Phase Change Material* (PCM) dan kolektor surya dengan integrasi PCM. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan PCM terhadap peningkatan efisiensi termal serta kestabilan temperatur udara pengering. Penelitian dilaksanakan di Universitas Widyatama pada kondisi lingkungan terbuka dengan paparan radiasi matahari langsung. Pengambilan data dilakukan pada bulan April - Mei dengan rentang waktu pukul 08.00–16.00 WIB untuk memperoleh variasi intensitas radiasi matahari harian.

Peralatan utama yang digunakan meliputi kolektor surya pelat datar (*flat plate solar collector*), blower sebagai penggerak aliran udara, saluran udara (*ducting system*), ruang pengering (*drying chamber*), wadah penyimpanan PCM, termokopel tipe (T), data logger, anemometer, serta solar power meter. Bahan yang digunakan adalah *Phase Change Material* (PCM) berbasis parafin yang ditempatkan pada tujuh tabung penyimpanan PCM. Berdasarkan penelitian sebelumnya, PCM berbasis parafin banyak digunakan pada sistem pengering surya karena memiliki karakteristik termal yang sesuai untuk proses penyimpanan energi panas. Sistem yang digunakan memiliki luas kolektor sebesar $(800 \times 760 \times 90)$ mm, dengan PCM parafin dengan panas laten 150–220 kJ/kg serta rentang temperatur kerja 45–65°C (Venkatesh *et al.*, 2025). Berdasarkan total massa PCM dan nilai panas laten parafin sebesar 150–220 kJ/kg, kapasitas penyimpanan energi laten teoritis sistem dapat diperkirakan sebesar $m \times L$, sehingga durasi proses charging dan discharging yang diamati selama pengujian dapat dijelaskan berdasarkan kapasitas penyimpanan energi tersebut. Dalam penelitian ini diasumsikan bahwa sifat termofisik udara seperti massa jenis dan kalor jenis berada dalam kondisi konstan selama proses pengujian berlangsung.



Gambar 1. Rancangan Kolektor Surya dengan Integrasi Phase Change Material (PCM)



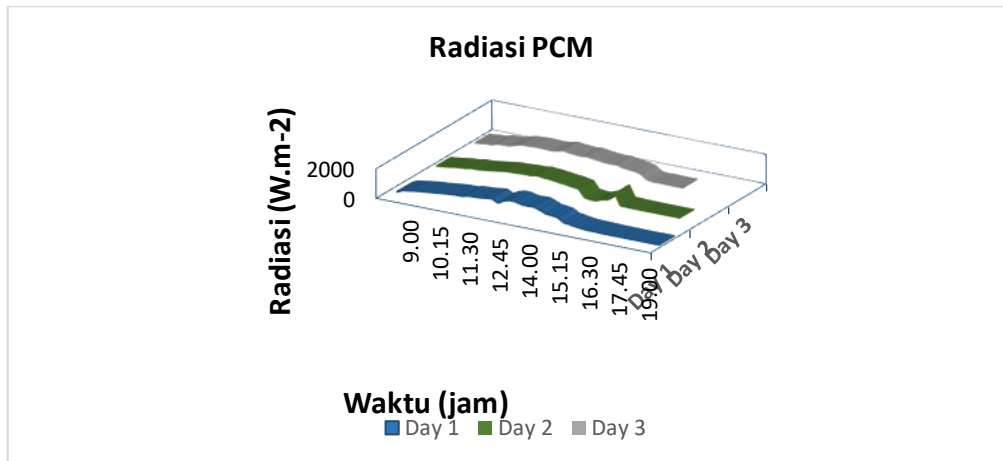
Gambar 2. Prototipe Kolektor Surya dengan Integrasi Phase Change Material (PCM)

Prosedur penelitian diawali dengan persiapan alat, bahan, dan kalibrasi instrumen, kemudian pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu tanpa PCM dan dengan PCM, menggunakan parameter operasi yang sama. Variabel yang diukur meliputi temperatur udara masuk kolektor (T_{in}), temperatur udara keluar kolektor (T_{out}), temperatur lingkungan (T_{amb}), intensitas radiasi matahari (I), dan kecepatan aliran udara (v); data dicatat setiap 15 menit dan pengujian diulang untuk memperoleh hasil yang representatif serta meminimalkan kesalahan pengukuran. Kinerja termal kolektor dianalisis menggunakan pendekatan keseimbangan energi, dengan laju aliran massa udara dihitung melalui $\dot{m} = \rho A v$, di mana $\dot{m}$ adalah laju aliran massa udara, ρ massa jenis udara, A luas penampang aliran, dan v kecepatan udara (Antu, 2016). Energi panas berguna dihitung menggunakan $Q_u = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})$, dengan c_p sebagai kalor jenis udara (Suvanjumrat *et al.*, 2024), sedangkan energi radiasi matahari yang diterima kolektor dihitung melalui $Q_{in} = I A_c$, dengan A_c sebagai luas kolektor (Nabnean & Nimnuan, 2020). Efisiensi termal kolektor ditentukan menggunakan $\eta = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})}{I A_c}$ (Zhang & Zhu, 2022), sementara kestabilan temperatur udara pengering dianalisis berdasarkan fluktuasi temperatur $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ (Pandey & Chaurasiya, 2017) untuk membandingkan kestabilan sistem dengan PCM dan tanpa PCM (Imam *et al.*, 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

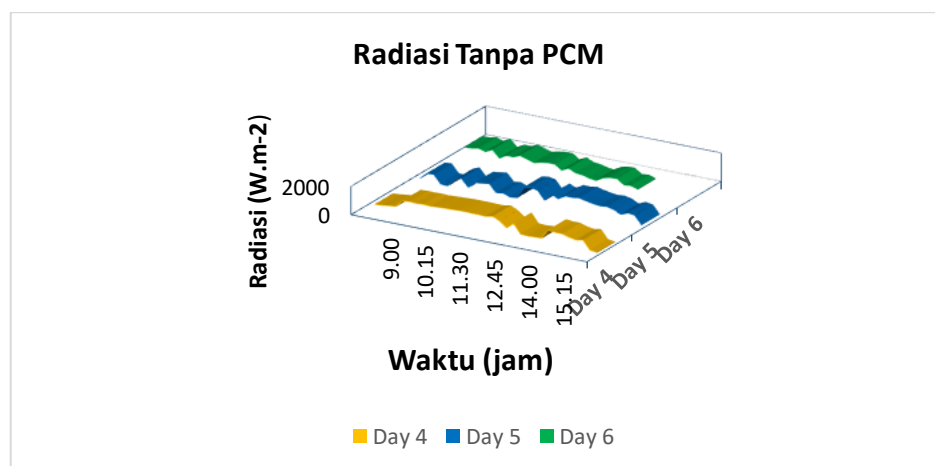
Hasil penelitian ini disajikan untuk mengevaluasi pengaruh integrasi Phase Change Material (PCM) terhadap kinerja termal kolektor surya berdasarkan data intensitas radiasi matahari, temperatur udara masuk kolektor (T_{in}), temperatur udara keluar kolektor (T_{out}), temperatur PCM, serta efisiensi termal kolektor yang diperoleh selama pengujian. Pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu kolektor surya tanpa PCM dan dengan PCM, sehingga pembahasan difokuskan pada pengaruh radiasi matahari terhadap karakteristik termal kolektor, kemampuan PCM dalam menyimpan dan melepaskan energi panas, serta perbandingan kinerja termal kedua sistem untuk mengetahui efektivitas PCM dalam meningkatkan performa kolektor surya.

Gambar 3 menunjukkan intensitas radiasi matahari selama tiga hari pengujian kolektor surya dengan PCM. Secara umum, radiasi matahari meningkat dari pagi hingga siang hari dan mencapai nilai maksimum pada rentang pukul 11.45–12.45 WIB, kemudian menurun secara bertahap pada sore hari. Nilai radiasi maksimum yang diperoleh pada hari pertama, kedua, dan ketiga masing-masing sebesar 1032 W/m², 971 W/m², dan 946 W/m², sedangkan rata-rata radiasi berturut-turut sebesar 434,02 W/m², 448,62 W/m², dan 538,08 W/m². Perbedaan intensitas radiasi pada setiap hari dipengaruhi oleh kondisi cuaca selama pengujian. Tingginya radiasi matahari yang diterima kolektor menyebabkan peningkatan energi panas yang diserap sistem dan mendukung proses penyimpanan energi termal oleh PCM.



Gambar 3. Grafik Radiasi matahari pengujian PCM

Gambar 3 menunjukkan intensitas radiasi matahari selama tiga hari pengujian kolektor surya tanpa PCM. Secara umum, intensitas radiasi mengalami peningkatan dari pagi hingga siang hari dan mencapai nilai maksimum pada rentang pukul 12.00–13.00 WIB sebelum menurun pada sore hari. Nilai radiasi maksimum yang diperoleh pada hari pertama, kedua, dan ketiga masing-masing sebesar 1111 W/m², 1155 W/m², dan 778 W/m², dengan rata-rata radiasi berturut-turut sebesar 716,91 W/m², 672,12 W/m², dan 434,88 W/m². Hasil tersebut menunjukkan bahwa hari pertama dan kedua memiliki tingkat penerimaan energi surya yang lebih tinggi dibandingkan hari ketiga. Perbedaan intensitas radiasi pada setiap hari pengujian dipengaruhi oleh kondisi cuaca yang berubah-ubah, terutama adanya tutupan awan yang menyebabkan fluktuasi radiasi pada beberapa waktu pengamatan. Tingginya radiasi matahari yang diterima kolektor meningkatkan jumlah energi panas yang diserap sehingga temperatur kolektor cenderung meningkat selama periode radiasi tinggi.

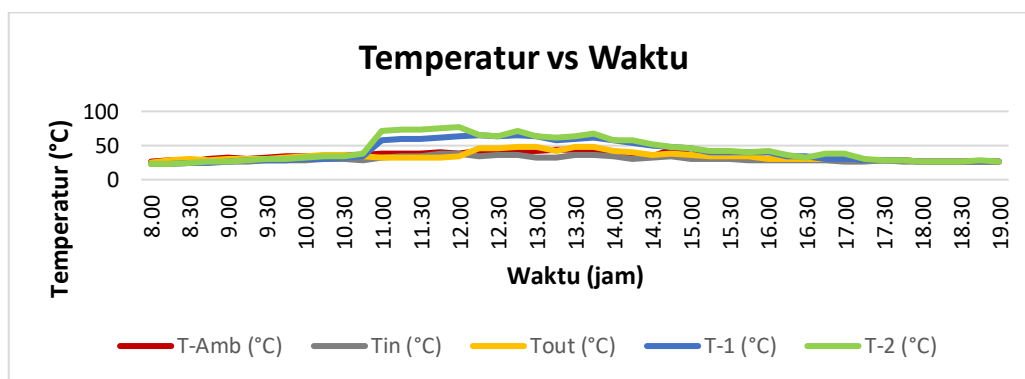


Gambar 4. Grafik Radiasi matahari Tanpa PCM

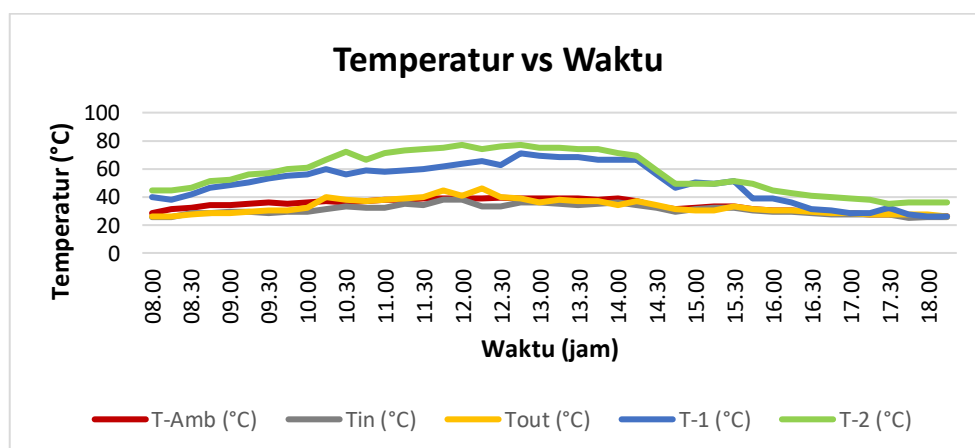
Gambar 4. menunjukkan distribusi temperatur pada pengujian kolektor surya dengan PCM selama tiga hari pengamatan. Secara umum, temperatur PCM pada tabung T1 dan T2 meningkat seiring bertambahnya intensitas radiasi matahari dan mencapai nilai maksimum pada periode siang hari, dengan temperatur maksimum T1 berturut-turut sebesar 65°C, 71°C, dan 76°C, sedangkan temperatur maksimum T2 mencapai 77°C, 77°C, dan 80°C. Temperatur T2 yang lebih tinggi dibandingkan T1 menunjukkan bahwa penyerapan energi panas pada PCM berlangsung secara efektif selama periode radiasi tinggi. Peningkatan temperatur yang signifikan mulai terjadi pada rentang pukul 10.00–11.00 WIB yang mengindikasikan proses penyimpanan energi panas

(charging), dimana PCM menyerap energi panas yang diterima kolektor dan menyimpannya dalam bentuk panas laten. Setelah intensitas radiasi matahari menurun, temperatur PCM tidak mengalami penurunan secara drastis, melainkan menurun secara bertahap akibat proses pelepasan energi panas yang tersimpan (discharging).

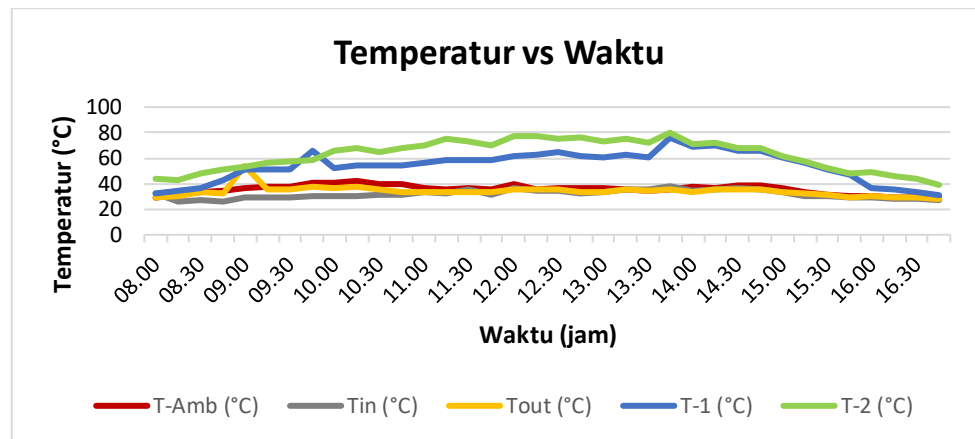
Kondisi tersebut menunjukkan bahwa PCM mampu mempertahankan energi termal lebih lama dibandingkan karakteristik pemanasan kolektor yang hanya bergantung pada radiasi matahari secara langsung. Perbedaan karakteristik temperatur pada setiap hari pengujian dipengaruhi oleh variasi intensitas radiasi matahari dan kondisi cuaca selama pengambilan data. Pada hari pertama dan kedua, PCM masih mampu mempertahankan temperatur hingga sekitar pukul 19.00 WIB dan 18.15 WIB, sedangkan pada hari ketiga penurunan temperatur terjadi lebih cepat akibat kondisi cuaca yang kurang stabil serta kebocoran pada salah satu tabung PCM selama pengujian. Selain itu, rata-rata temperatur T1 dan T2 juga menunjukkan kecenderungan meningkat dari hari pertama hingga hari ketiga, yang mengindikasikan kemampuan PCM dalam menyerap dan menyimpan energi panas secara efektif selama periode pengujian. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa integrasi PCM pada kolektor surya mampu meningkatkan kemampuan penyimpanan energi termal, menjaga kestabilan temperatur sistem, serta memperpanjang periode pemanfaatan panas setelah intensitas radiasi matahari menurun.



Gambar 5. Grafik Distribusi Temperatur Pada Pengujian Kolektor Surya Dengan PCM Hari Pertama

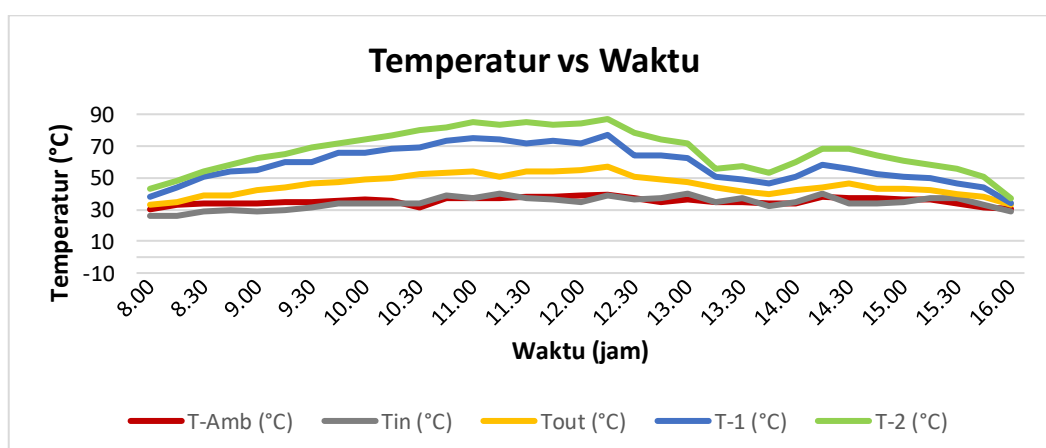


Gambar 6. Grafik Distribusi Temperatur Pada Pengujian Kolektor Surya Dengan PCM Hari 2

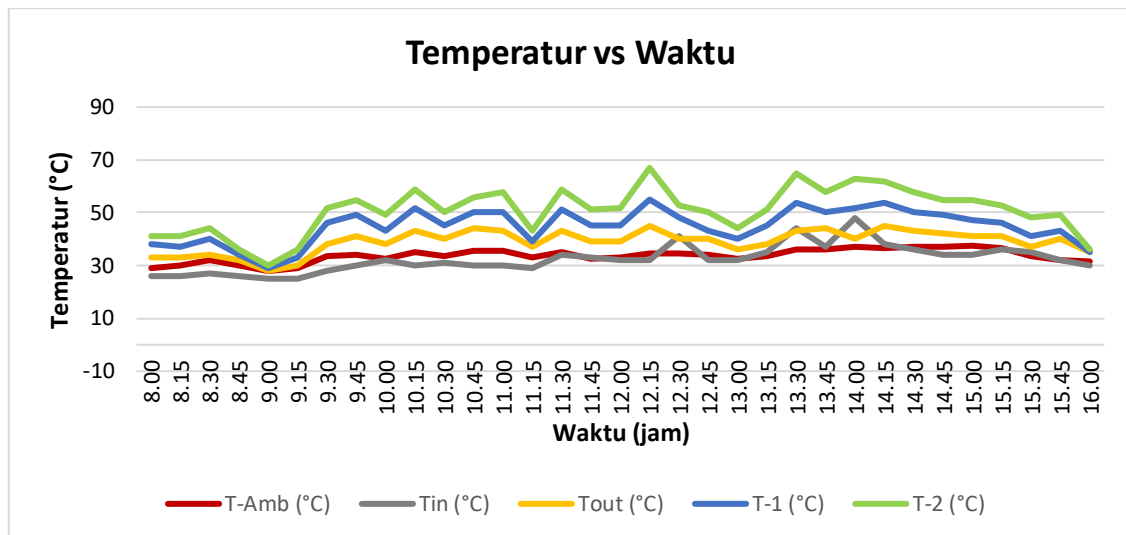


Gambar 7. Grafik Distribusi Temperatur Pada Pengujian Kolektor Surya Dengan PCM Hari 3

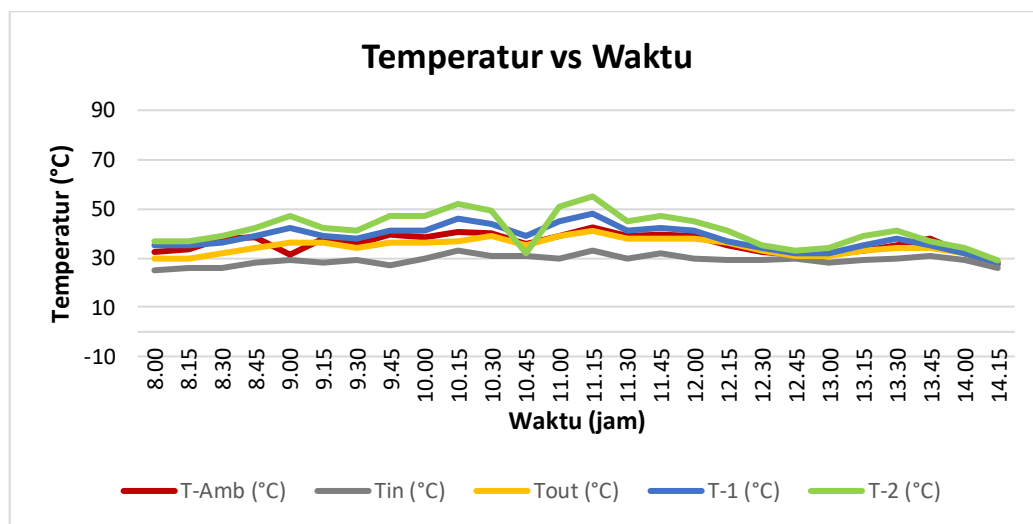
Pada Hari ke-3 terjadi kebocoran pada salah satu tabung PCM sehingga sebagian material tidak mampu menyimpan energi panas secara optimal. Kondisi ini menyebabkan karakteristik temperatur dan pelepasan panas berbeda dibandingkan dua hari pengujian sebelumnya. Oleh karena itu, hasil Hari ke-3 diinterpretasikan sebagai pengaruh kegagalan mekanis komponen (mechanical failure) dan tidak sepenuhnya merepresentasikan performa normal sistem. Gambar 8-10 menunjukkan distribusi temperatur pada pengujian kolektor surya tanpa PCM selama tiga hari pengamatan. Temperatur sistem mengalami peningkatan seiring bertambahnya intensitas radiasi matahari dan mencapai nilai maksimum pada periode siang hari. Temperatur maksimum T1 yang diperoleh berturut-turut sebesar 77°C, 55°C, dan 48°C, sedangkan temperatur maksimum T2 mencapai 87°C, 67°C, dan 55°C. Perbedaan temperatur yang cukup signifikan antar hari menunjukkan bahwa kinerja termal kolektor sangat dipengaruhi oleh kondisi radiasi matahari yang diterima selama pengujian. Pada kondisi tanpa PCM, energi panas yang diserap kolektor dimanfaatkan secara langsung sehingga temperatur sistem cenderung mengikuti perubahan intensitas radiasi matahari. Akibatnya, ketika radiasi mulai menurun, temperatur sistem juga mengalami penurunan yang relatif cepat karena tidak terdapat media penyimpan energi termal yang dapat mempertahankan panas setelah periode radiasi tinggi berakhir. Selanjutnya, evaluasi kinerja termal kolektor dilakukan melalui analisis energi panas berguna (*useful heat gain*, Q_u) yang dihasilkan pada masing-masing kondisi pengujian.



Gambar 8. Grafik Distribusi Temperatur Pada Pengujian Kolektor Surya Tanpa PCM Hari Pertama

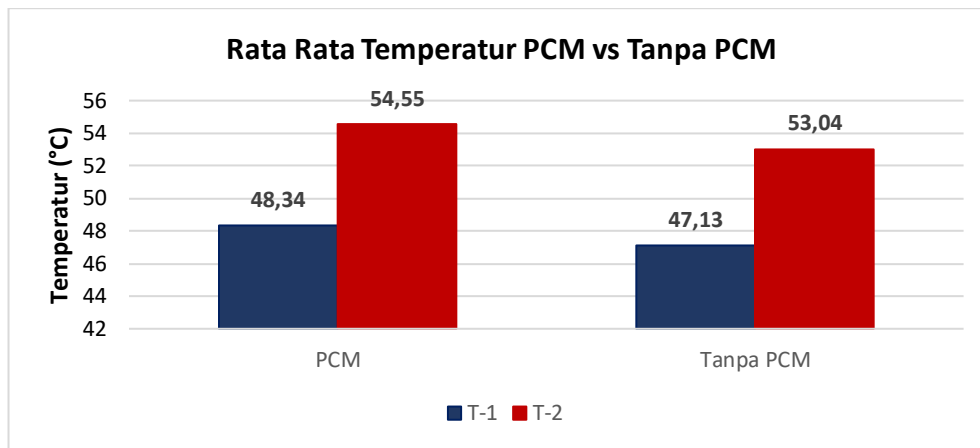


Gambar 9. Grafik Distribusi Temperatur Pada Pengujian Kolektor Surya Tanpa PCM Hari ke Dua



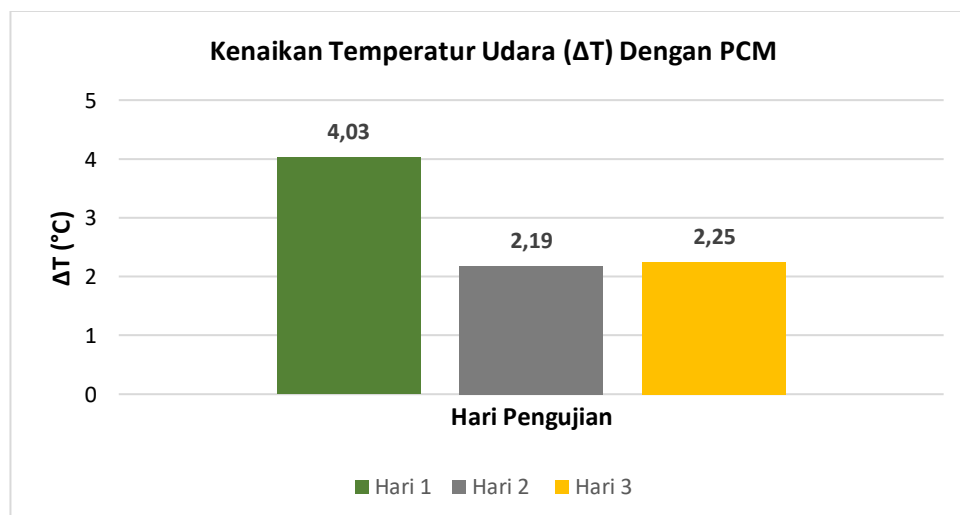
Gambar 10. Grafik Distribusi Temperatur Pada Pengujian Kolektor Surya Tanpa PCM Hari ke Tiga

Gambar 10 menunjukkan perbandingan rata-rata temperatur sistem pada pengujian dengan PCM dan tanpa PCM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata temperatur T1 dan T2 pada sistem dengan PCM masing-masing sebesar 48,34°C dan 54,55°C, sedangkan pada sistem tanpa PCM sebesar 47,13°C dan 53,04°C. Meskipun perbedaan temperatur yang diperoleh relatif kecil, sistem dengan PCM tetap menghasilkan temperatur rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa PCM. Hasil ini menunjukkan bahwa PCM mampu menyerap, menyimpan, dan melepaskan energi panas secara efektif selama proses pengujian. Kemampuan penyimpanan energi termal tersebut menyebabkan panas yang diterima kolektor tidak langsung hilang ketika intensitas radiasi matahari menurun, tetapi dilepaskan kembali secara bertahap sehingga temperatur sistem dapat dipertahankan lebih stabil. Selain itu, hasil ini menjadi indikasi bahwa integrasi PCM memberikan kontribusi positif terhadap kinerja termal kolektor surya melalui peningkatan kapasitas penyimpanan energi panas dan perpanjangan periode pemanfaatan energi termal setelah periode radiasi maksimum berakhir.



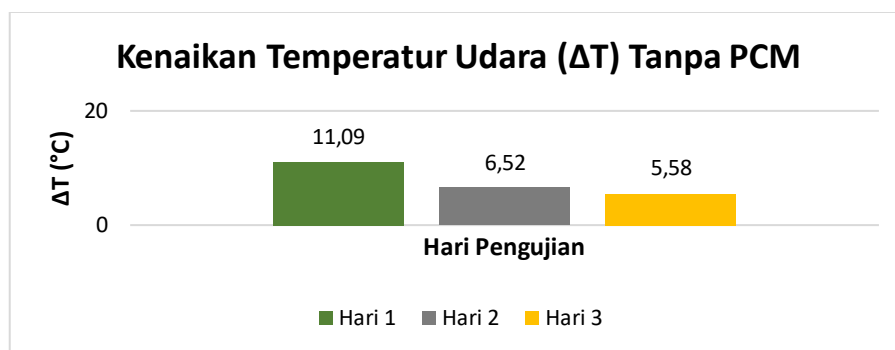
Gambar 11. Grafik Perbandingan Rata-Rata Temperatur Sistem Dengan PCM dan Tanpa PCM

Berdasarkan Gambar 11, nilai kenaikan temperatur udara (ΔT) pada pengujian kolektor surya dengan PCM menunjukkan variasi pada setiap hari pengujian. Nilai ΔT tertinggi diperoleh pada Hari 1 sebesar 4,03°C, sedangkan pada Hari 2 dan Hari 3 masing-masing sebesar 2,19°C dan 2,25°C. Hasil ini menunjukkan bahwa kolektor surya mampu meningkatkan temperatur udara setelah melewati kolektor, meskipun besarnya kenaikan temperatur dipengaruhi oleh kondisi radiasi matahari selama pengujian. Nilai ΔT merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja termal kolektor surya, dimana semakin besar nilai ΔT yang dihasilkan maka semakin baik kemampuan kolektor dalam menyerap dan mentransfer energi panas ke udara pengering. Nilai ΔT tertinggi pada Hari 1 menunjukkan bahwa proses perpindahan panas dari absorber ke udara berlangsung lebih efektif dibandingkan Hari 2 dan Hari 3. Perbedaan nilai ΔT pada setiap hari pengujian dipengaruhi oleh variasi intensitas radiasi matahari dan kondisi cuaca, dimana intensitas radiasi yang lebih tinggi menghasilkan temperatur absorber yang lebih besar sehingga meningkatkan temperatur udara keluar kolektor. Selain itu, penggunaan Phase Change Material (PCM) berperan dalam menyimpan energi panas saat radiasi tinggi dan melepaskannya kembali ketika radiasi menurun, sehingga membantu menjaga kestabilan temperatur udara keluaran dan mendukung kinerja termal kolektor surya dalam proses pengeringan produk pertanian.



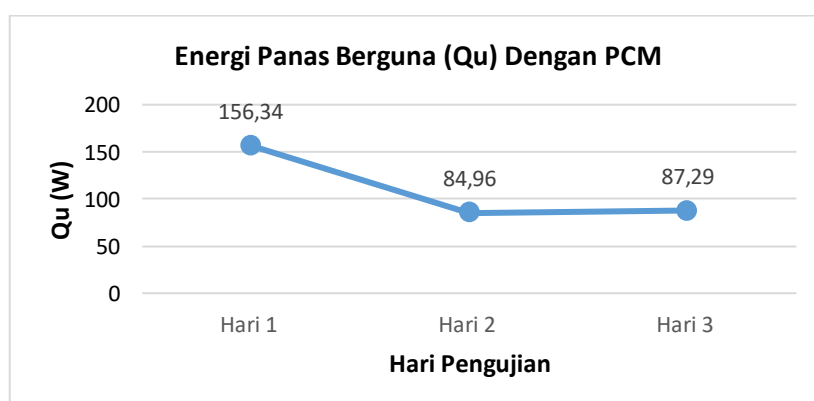
Gambar 12. Grafik Kenaikan Temperatur Udara (ΔT) Dengan PCM

Berdasarkan Gambar 12, nilai kenaikan temperatur udara (ΔT) pada pengujian tanpa PCM berkisar antara 5,58–11,09°C, dengan nilai tertinggi sebesar 11,09°C pada Hari 1 dan nilai terendah sebesar 5,58°C pada Hari 3. Secara umum, nilai ΔT pada pengujian tanpa PCM lebih tinggi dibandingkan pengujian dengan PCM, yang menunjukkan kemampuan kolektor dalam mentransfer energi panas ke udara pengering berlangsung lebih efektif. Nilai ΔT yang tinggi mengindikasikan kinerja termal kolektor yang lebih baik karena energi panas yang diserap absorber dapat ditransfer ke udara secara lebih optimal. Tingginya nilai ΔT pada pengujian tanpa PCM dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari yang lebih tinggi dan kondisi cuaca yang lebih cerah dibandingkan saat pengujian dengan PCM. Oleh karena itu, kinerja kolektor tanpa PCM dalam meningkatkan temperatur udara pada penelitian ini lebih baik, meskipun hasil yang diperoleh juga dipengaruhi oleh perbedaan kondisi radiasi matahari selama pengujian.



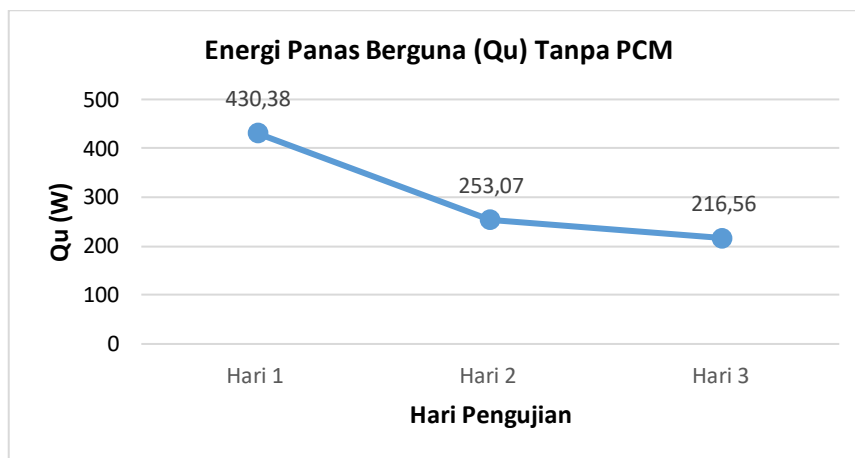
Gambar 13. Grafik Kenaikan Temperatur Udara (ΔT) Tanpa PCM

Berdasarkan Gambar 13, nilai energi panas berguna (Q_u) pada pengujian dengan PCM berkisar antara 84,96–156,34 W, dengan nilai tertinggi diperoleh pada Hari 1 sebesar 156,34 W dan nilai terendah pada Hari 2 sebesar 84,96 W. Variasi nilai Q_u menunjukkan perbedaan jumlah energi panas yang berhasil dimanfaatkan oleh kolektor selama periode pengujian. Nilai Q_u yang lebih tinggi mengindikasikan bahwa energi radiasi matahari yang diserap kolektor dapat dikonversi dan dimanfaatkan secara lebih efektif untuk mendukung proses pengeringan. Pada Hari 1, kolektor menghasilkan nilai Q_u tertinggi yang menunjukkan kemampuan pemanfaatan energi surya yang lebih baik dibandingkan Hari 2 dan Hari 3. Meskipun terjadi penurunan nilai Q_u pada hari berikutnya, keberadaan PCM tetap berperan dalam menyimpan dan melepaskan energi panas sehingga membantu menjaga ketersediaan energi termal pada sistem. Dengan demikian, nilai Q_u dapat digunakan sebagai salah satu indikator kinerja kolektor surya, dimana semakin besar energi panas berguna yang dihasilkan maka semakin baik kemampuan kolektor dalam memanfaatkan energi radiasi matahari untuk mendukung proses pengeringan.



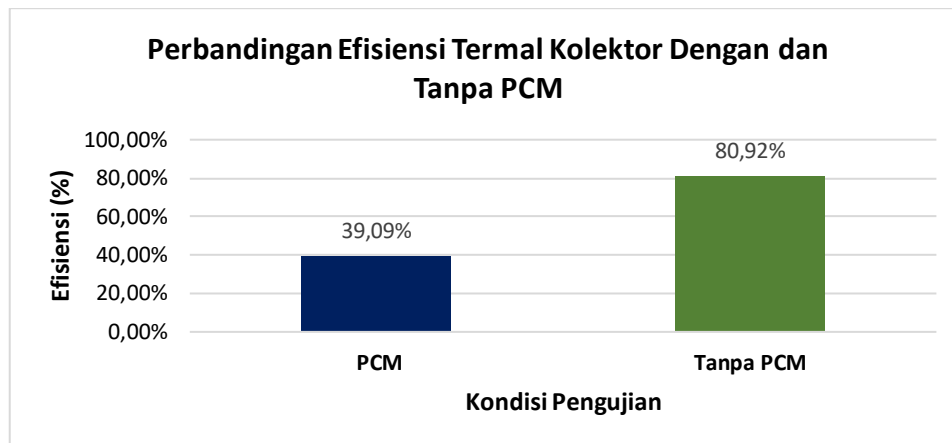
Gambar 14. Grafik Energi Panas Berguna (Q_u) Dengan PCM

Berdasarkan Gambar 14, nilai energi panas berguna (Q_u) pada pengujian tanpa PCM berkisar antara 216,56–430,38 W. Nilai tertinggi diperoleh pada Hari 1 sebesar 430,38 W, sedangkan nilai terendah terjadi pada Hari 3 sebesar 216,56 W. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kolektor mampu memanfaatkan energi radiasi matahari secara langsung untuk menghasilkan energi panas yang digunakan dalam proses pengeringan. Penurunan nilai Q_u dari Hari 1 hingga Hari 3 menunjukkan adanya pengaruh perubahan intensitas radiasi matahari terhadap kemampuan kolektor dalam menghasilkan energi termal. Semakin besar radiasi yang diterima permukaan absorber, semakin besar pula energi panas yang dapat diserap dan ditransfer ke aliran udara. Oleh karena itu, nilai Q_u dapat digunakan untuk menggambarkan kemampuan kolektor dalam menyediakan energi panas selama pengujian. Meskipun nilai Q_u yang diperoleh pada pengujian tanpa PCM cenderung lebih tinggi, hasil tersebut juga dipengaruhi oleh kondisi radiasi matahari yang berbeda pada setiap hari pengujian, sehingga evaluasi kinerja kolektor perlu mempertimbangkan kondisi lingkungan yang menyertai proses pengambilan data.



Gambar 15. Grafik Energi Panas Berguna (Q_u) Tanpa PCM

Berdasarkan Gambar 15, efisiensi termal kolektor surya pada pengujian dengan PCM dan tanpa PCM masing-masing sebesar 39,09% dan 80,92%. Perbedaan efisiensi menunjukkan bahwa pemanfaatan energi radiasi matahari pada kedua kondisi pengujian berlangsung dengan karakteristik yang berbeda. Efisiensi yang lebih tinggi pada pengujian tanpa PCM menunjukkan bahwa sebagian besar energi yang diterima kolektor langsung dikonversi menjadi energi panas berguna. Sebaliknya, pada sistem dengan PCM, sebagian energi termal dimanfaatkan untuk proses penyimpanan panas (*charging*) sehingga tidak seluruh energi yang diserap kolektor secara langsung terukur sebagai energi panas berguna selama periode pengujian. Oleh karena itu, nilai efisiensi yang lebih rendah pada sistem dengan PCM tidak serta-merta menunjukkan penurunan kinerja kolektor, melainkan mencerminkan adanya mekanisme penyimpanan energi termal yang berpotensi menjaga ketersediaan panas ketika intensitas radiasi matahari menurun. Hasil ini menunjukkan bahwa evaluasi kinerja kolektor surya tidak hanya ditinjau dari nilai efisiensi termal, tetapi juga dari kemampuan sistem dalam mengelola dan memanfaatkan energi panas selama proses pengeringan.



Gambar 16. Grafik Perbandingan Efisiensi Termal Kolektor Surya Dengan dan Tanpa PCM

Tabel 1 menyajikan ringkasan parameter kinerja termal kolektor surya pada kondisi dengan dan tanpa PCM. Berdasarkan hasil pengujian, kolektor tanpa PCM menunjukkan nilai intensitas radiasi rata-rata, kenaikan temperatur udara (ΔT), energi panas berguna (Q_u), dan efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan kolektor dengan PCM. Nilai efisiensi termal yang diperoleh masing-masing sebesar 80,92% untuk kolektor tanpa PCM dan 39,09% untuk kolektor dengan PCM. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa pada sistem dengan PCM sebagian energi termal yang diterima kolektor dimanfaatkan untuk proses penyimpanan energi panas sebelum dilepaskan kembali ketika intensitas radiasi menurun. Secara keseluruhan, parameter ΔT , Q_u , dan efisiensi termal menunjukkan bahwa kolektor tanpa PCM memiliki performa termal yang lebih tinggi selama periode pengujian, sedangkan integrasi PCM berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan penyimpanan energi termal pada sistem pengering tenaga surya.

Tabel 1. Ringkasan Parameter Kinerja Termal Kolektor Surya Dengan dan Tanpa Phase Change Material (PCM)

Kondisi	I rata-rata (W/m ²)	T-in (°C)	T-out (°C)	ΔT (°C)	Q_u (W)	η (%)
PCM	473.57	30.84	33.66	2.82	109.53	39.09%
Tanpa PCM	607.97	31.96	39.69	7.73	300.00	80.92%

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kolektor tanpa PCM menghasilkan kenaikan temperatur udara, energi panas berguna, dan efisiensi termal lebih tinggi, masing-masing sebesar 7,73°C, 300,00 W, dan 80,92%, dibandingkan sistem dengan PCM yang menghasilkan 2,82°C, 109,53 W, dan 39,09%. Namun, sistem dengan PCM mampu mempertahankan temperatur rata-rata T1 dan T2 sedikit lebih tinggi serta memperpanjang pelepasan panas hingga sore hari. Temuan ini menunjukkan bahwa kolektor tanpa PCM lebih efektif dalam menghasilkan panas secara langsung, sedangkan PCM berfungsi utama sebagai media penyimpan dan pelepas energi termal secara bertahap.

Perbedaan kinerja kedua sistem juga dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari. Pengujian tanpa PCM menerima radiasi rata-rata 607,97 W/m², lebih tinggi dibandingkan sistem dengan PCM sebesar 473,57 W/m². Selain itu, sebagian energi pada sistem PCM digunakan selama proses *charging*, sehingga belum langsung terukur sebagai energi panas berguna pada aliran udara. Hasil ini sejalan dengan Palacio *et al.* (2022), yang menunjukkan bahwa PCM dapat mempertahankan temperatur setelah radiasi menurun, serta Ebrahimi *et al.* (2021), yang menegaskan bahwa posisi dan konfigurasi PCM sangat menentukan peningkatan kinerja kolektor. Farzan *et al.* (2022) juga

melaporkan bahwa penambahan media penghantar panas dapat mempercepat proses penyimpanan dan pelepasan energi.

Temperatur PCM yang menurun secara bertahap setelah radiasi melemah membuktikan terjadinya proses *discharging*. Meskipun sistem dengan PCM memiliki efisiensi sesaat lebih rendah, kemampuan mempertahankan panas lebih lama dapat mendukung proses pengeringan yang membutuhkan temperatur stabil. Sebaliknya, sistem tanpa PCM lebih sesuai untuk kebutuhan pemanasan cepat selama radiasi matahari tinggi. Kebocoran tabung PCM pada hari ketiga turut memengaruhi proses penyimpanan panas dan menunjukkan pentingnya desain enkapsulasi yang kuat serta tahan terhadap ekspansi termal.

Secara praktis, penggunaan PCM direkomendasikan untuk sistem pengering yang memerlukan kestabilan temperatur dan perpanjangan waktu operasi, sedangkan kolektor tanpa PCM lebih sesuai ketika keluaran panas tinggi menjadi prioritas. Penelitian ini masih dilakukan pada hari pengujian dengan kondisi radiasi yang berbeda dan durasi terbatas. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu melakukan pengujian kedua sistem secara bersamaan, menggunakan periode pengamatan lebih panjang, serta mengevaluasi energi tersimpan dan energi yang dilepaskan agar kontribusi PCM dapat diukur secara lebih menyeluruh.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah mengevaluasi kinerja termal kolektor surya pelat datar dengan dan tanpa integrasi Phase Change Material (PCM) pada sistem pengering produk pertanian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kolektor tanpa PCM menghasilkan nilai kenaikan temperatur udara (ΔT), energi panas berguna (Q_u), dan efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan kolektor dengan PCM, dengan efisiensi masing-masing sebesar 80,92% dan 39,09%. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa energi radiasi matahari pada kolektor tanpa PCM lebih banyak dikonversi secara langsung menjadi energi panas berguna. Sebaliknya, pada kolektor dengan PCM, sebagian energi termal dimanfaatkan untuk proses penyimpanan panas sehingga tidak seluruh energi yang diserap langsung terukur sebagai energi panas berguna selama periode pengujian. Meskipun demikian, integrasi PCM memberikan kemampuan penyimpanan energi termal yang berpotensi mempertahankan ketersediaan panas ketika intensitas radiasi matahari menurun. Oleh karena itu, evaluasi kinerja termal kolektor surya tidak hanya ditentukan oleh besarnya efisiensi termal, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam menyimpan, mengelola, dan memanfaatkan energi panas untuk mendukung keberlanjutan proses pengeringan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Widyatama atas dukungan akademik yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), khususnya Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, atas dukungan fasilitas penelitian, bantuan teknis, serta kesempatan yang diberikan selama proses pengambilan data. Penghargaan turut disampaikan kepada dosen pembimbing atas arahan, masukan, dan bimbingan yang konstruktif sehingga penelitian dan penyusunan artikel ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Kindi, F., Al-Shukaili, T., Pathare, P. B., Al Jahwari, F., Al-Azri, N., & Al Ghadani, O. (2023). Thermal Performance of a Flat-Plate Solar Collector for Drying Agricultural Crops. *AgriEngineering*, 5(4), 2349–2365. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040144>
- Antu, E. S. (2016). Analisa Sistem Pengering Biji Jagung Dengan Metode Natural Convection. *Jtech*, 4(1), 24–27.
- Apriandi, N., Herlambang, Y. D., Metty, K., Negara, T., & Raharjanti, R. (2024). PEMBUATAN DAN UJI PERFORMA TERMAL ALAT PENDINGIN SKALA LABORATORIUM DENGAN PENAMBAHAN THERMAL ENERGY STORAGE (TES) BERBASIS PHASE CHANGE MATERIAL (PCM). *vol. 2, no. 1*, 1-8.

- Diana, L., Safitra, A. G., Sholihah, F. H., & Andariesta. (2021). ANALISA PENGARUH MATERIAL PCM DAN SiO₂ PADA LEMARI PENGERING TENAGA SURYA. *ANALISA PENGARUH MATERIAL PCM DAN SiO₂ PADA* doi: e-XX E-ISSN: 2621-9794, P-ISSN: 2477-2097., 224–231.
- Imam, M. F. I. Al, Beg, R. A., Haque, M. J., & Rahman, M. S. (2023). Results in Materials Effect of novel phase change material (PCM) encapsulated design on thermal performance of solar collector. *Results in Materials*, 18(November 2022), 100388. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100388>
- Kindi, F. A., Shukaili, A., Pathare, P. B., Jahwari, F. A., Al-Azri, N., & Al Ghadani, O. (2023). Thermal Performance of a Flat-Plate Solar Collector for Drying Agricultural Crops. *AgriEngineering*, 2349–2365, vol. 5, no. 4, doi: 10.3390/agriengineering5040144.
- Latief, M. F., Amal, I., & Aini, F. N. (2023). Perubahan Nutrisi dan Kualitas Fisik Jagung Akibat Pengeringan pada Vertical Corn Dryer. *Jurnal Peternakan Lokal*, 5(2), 135–142. <https://doi.org/10.46918/peternakan.v5i2.1962>
- Mafazi, H., Septianissa, S., & Rajani, A. (2025). Experimental Study on Solar Drying of Arabica Coffee Beans: Achieving Standard Moisture Content Using a Drying Chamber Collector. *LOGIC: Jurnal Rancang Bangun Dan Teknologi*, 25(2), 107–116. <https://doi.org/10.31940/logic.v25i2.107-116>
- Mamulkar, C., Ikhar, S., & Katekar, V. (2024). Computational Fluid Dynamics Analysis of a Solar Dryer with Various Phase Change Materials. *International Journal of Thermodynamics*, 27(1), 35–42. <https://doi.org/10.5541/ijot.1324341>
- Model, R. (2020). *Reduced Model and Comparative Analysis of the Thermal Performance of Indirect Solar Dryer with and without PCM*.
- Nabnean, S., & Nimnuan, P. (2020). Experimental performance of direct forced convection household solar dryer for drying banana. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22(July), 100787. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100787>
- NematpourKeshтели, A., Iasiello, M., Langella, G., & Bianco, N. (2023). *Using metal foam and nanoparticle additives with different fin shapes for PCM-based thermal storage in flat plate solar collectors*. doi: 10.1016/j.tsep.2024.102690: Therm. Sci. Eng. Prog.
- Pandey, K. M., & Chaurasiya, R. (2017). A review on analysis and development of solar flat plate collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 641–650. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.078>
- Pongsapan, A. S., Allo, R., & ... (2024). Penerapan Pengering Surya (Solar Dryer) Dengan Turbin Ventilator Pada Kelompok Tani Jagung Di Kampung Bibiosi Distrik Arso *Journal: Jurnal ...*, 5(1), 1053–1056.
- Poonia, S., Singh, A. K., & Jain, D. (2022). Performance evaluation of phase change material (PCM) based hybrid photovoltaic/thermal solar dryer for drying arid fruits. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1302–1308. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.058>
- Ramadhan, I. A., Abdullah, N. A., Rahman, N. A., & Amir, F. (2023). *ADVANCING ENERGY-EFFICIENT DRYING : INTEGRATION OF PHASE CHANGE MATERIAL (PCM) AND HEAT PIPE FOR TEMPERATURE CONTROL IN DRYERS*.
- Ranasingha, D., Chatterjee, S., & Bandara, P. (2026). Applications of phase-change materials in solar drying technology: A review. *Solar Compass*, 17(August 2025), 100155. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2025.100155>
- Rulazi, E. L., Marwa, J., Kichonge, B., & Kiveve, T. (2023). *Development and Performance Evaluation of a Novel Solar Dryer Integrated with Thermal Energy Storage System for Drying of Agricultural Products*. doi: 10.1021/acsomega.3c07314.
- Salve, S., & Fulambarkar, A. (2022). *Performance investigation of solar air dryer with and without PCM based heat storage material for agricultural products drying Performance Investigation of Solar Air Dryer with and Without PCM Based Heat Storage Material for Agricultural Products Drying*. vol. 040003, no. October.
- Sianturi, R. L., Nababan, W. S., & Sihombing, S. (2025). Evaluasi Kinerja Mesin Pengering Surya Type Kolektor Pelat Datar Sebagai Pengering Cabai yang Efektif. *SJoME: Sprocket Journal of*

Mechanical Engineering, 6(2), 20–29.

- Sidabutar, B. S., Abdullah, N. A., Rahman, N. A., & Amir, F. (2024). THERMAL PERFORMANCE ENHANCEMENT OF SOLAR WATER HEATERS USING PHASE CHANGE MATERIALS IN FLAT PLATE COLLECTORS.
- Suvanjumrat, C., Chuckpaiwong, I., Chookaew, W., & Priyadumkol, J. (2024). Assessment of the pineapple drying with a forced convection solar-electrohydrodynamic dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*, 59(May), 104582. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104582>
- Thaker, A. S., Hussien, F. M., & Faraj, J. J. (2023). Numerical Simulation of an Indirect Solar Dryer Equipped with Thermal Conduction Enhancer Augmented Phase Change Materials (PCMs) for Banana Drying. *International Journal of Heat and Technology*, 41(5), 1158–1166. <https://doi.org/10.18280/ijht.410506>
- Venkatesh, R., Sharma, P., & Mohanavel, V. (2025). *Enhancement solar dryer performance and collector efficiency of paraffin PCM / copper fin featured solar dryer*. 1–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-025-01555-5> 2
- Zhang, J., & Zhu, T. (2022). Systematic review of solar air collector technologies: Performance evaluation, structure design and application analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54(409), 102885. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102885>