

# Pengaruh Variasi Debit Air terhadap Unjuk Kerja Termal Tangki Pemanas Air Tenaga Surya yang Berisi *Phase-Change Material*

Muhammad Nadjib<sup>a</sup>, Tito Hadji Agung Santosa<sup>a</sup>, Angga Dwi Sentosa<sup>a</sup>, Darmawan Mukhlisin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan Brawijaya, Tamantirta, Bantul, Yogyakarta 55163, Indonesia  
e-mail: [nadjibar@umy.ac.id](mailto:nadjibar@umy.ac.id)

## Kata kunci:

*Charging; kapsul; paraffin wax; pemanas air tenaga surya; phase-change material*

## ABSTRAK

Integrasi air dan *phase-change material* (PCM) menarik diterapkan pada pemanas air tenaga surya (PATS) sebagai material penyimpan energi termal. Teknik enkapsulasi PCM menggunakan kapsul dapat dilakukan di dalam tangki PATS. Sejauh ini, karakteristik termal di dalam tangki PATS posisi horisontal berisi PCM yang berkaitan dengan variasi debit air belum pernah diungkap. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki karakteristik termal tangki PATS yang melibatkan PCM dengan variasi debit air. Eksperimen menggunakan PATS sistem aktif dengan volume tangki 60 liter. Kapsul silinder berjumlah 24 buah diisi *paraffin wax* dan dimasukkan ke dalam tangki PATS. Termokopel sebanyak 20 buah dipasang di sisi air dan *paraffin wax*. Proses *charging* dilakukan selama 160 menit. Variasi debit air yang digunakan adalah 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm. Data temperatur air dan *paraffin wax* digunakan untuk menganalisis kinerja termal PATS. Hasil karakteristik termal dari tiga eksperimen dibandingkan. Energi termal akumulatif yang diperoleh untuk debit aliran 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm masing-masing adalah 12,09 MJ, 14,08 MJ dan 16,59 MJ. Penambahan debit aliran air mampu meningkatkan unjuk kerja termal sistem PATS yang melibatkan PCM.

## Keyword:

*Capsule; charging; paraffin wax; phase change material; solar water heater*

## ABSTRACT

*The integration of water and phase-change materials (PCM) is interestingly applied to solar water heaters (SWH) as thermal energy storage material. PCM encapsulation technique using capsules can be carried out in an SWH tank. So far, the thermal characteristics in the horizontal position of the SWH tank containing PCM related to variations in water flow have not been revealed. This study investigates the thermal characteristics of SWH tanks involving PCM with variations in water discharge. This experiment uses an active SWH system with a tank volume of 60 liters. The 24 cylindrical capsules were filled with paraffin wax and put into the SWH tank. There were twenty thermocouples installed on the waterside and paraffin wax. The charging process is carried out for 160 minutes. Variations of water discharge used are 1 lpm, 2 lpm, and 3 lpm. Water temperature data and paraffin wax were used to analyze the thermal performance of SWH. The results of the thermal characteristics of the three experiments were then compared. The accumulative thermal energy obtained for flow rates of 1 lpm, 2 lpm, and 3 lpm was 12.09 MJ, 14.08 MJ, and 16.59 MJ, respectively. The addition of the water flow rate can increase the thermal performance of the SWH system involving PCM.*

## 1. PENDAHULUAN

Energi matahari adalah sumber energi terbarukan yang paling dominan memengaruhi semua sumber energi terbarukan lainnya. Energi matahari menyediakan fluks matahari yang cukup untuk memenuhi permintaan energi di seluruh dunia [1]. Insolasi energi matahari rata-rata sebesar 4,8 kW/m<sup>2</sup>/hari [2], menjadikan Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang melimpah. Keuntungan lain dari energi matahari adalah tidak menghasilkan polusi udara dan polusi suara sehingga ramah terhadap lingkungan [3] dan tetap tersedia sepanjang ada kehidupan. Oleh karena itu, energi matahari adalah salah satu bentuk

energi terbarukan yang dapat dikembangkan untuk program diversifikasi energi, khususnya dalam rangka menghadapi semakin menipisnya energi fosil.

Energi matahari dapat dimanfaatkan dalam dua kategori yaitu menghasilkan energi listrik dan energi termal. Aplikasi energi matahari yang diubah menjadi energi listrik dikenal dengan teknologi fotovoltaik menggunakan modul surya. Alat yang menghasilkan energi termal dari energi matahari salah satunya adalah pemanas air tenaga surya (PATS). Teknologi PATS telah dikenal dan digunakan oleh masyarakat baik untuk skala industri maupun rumah tangga. Pemakaian PATS dapat memberi pengaruh yang besar terhadap aspek ekonomi, lingkungan dan konservasi energi [4]. Menurut Ibrahim dkk. [5] dan Uctug dkk. [6], penggunaan PATS dapat menekan konsumsi energi yang berasal dari energi fosil. Walaupun demikian, PATS konvensional yang menggunakan air sebagai material penyimpan energi termal memiliki kekurangan yaitu densitas energinya rendah. Densitas energi adalah jumlah energi termal yang dimiliki substansi tiap satuan volume. Densitas energi yang rendah mengakibatkan penyimpanan energi termal (*thermal energy storage*, TES) PATS cenderung memiliki karakteristik sistem yang berat [7] karena memerlukan volume yang besar. Ukuran tangki TES harus cukup besar untuk menyimpan jumlah kalor karena sifat pemakaian PATS yang *intermittent* dan adanya ketidakpastian intensitas radiasi matahari setiap saat [8].

Usaha untuk memperbaiki kekurangan PATS konvensional adalah dengan meningkatkan densitas energi di dalam tangki TES. *Phase-change material* (PCM) dianggap sebagai material yang efektif untuk menyimpan energi termal, terutama untuk pemanas air tenaga surya [9]. *Paraffin wax* adalah salah satu tipe PCM dari golongan organik. *Paraffin wax* dipilih sebagai PCM untuk PATS karena beberapa keunggulan seperti proses perubahan fasenya reversibel [10], kalor laten tinggi, dan memiliki temperatur perubahan fase yang tepat untuk aplikasi penyimpanan panas matahari [11]. Meskipun demikian, *paraffin wax* memiliki kekurangan yaitu konduktivitas termalnya rendah yang menyebabkan tingkat *charging* dan *discharging* sistem juga rendah. Fukahori dkk. [12], Salunkhe dan Shembekar [13] mengusulkan beberapa metode untuk meningkatkan transfer kalor, di antaranya adalah dengan pengkapsulan PCM. PCM diwadahi dalam kapsul dengan berbagai bentuk kemudian ditempatkan pada tangki PATS. Metode ini secara khusus dimaksudkan untuk meningkatkan luas permukaan perpindahan kalor yang menjadi salah satu faktor untuk memperbesar transfer kalor.

Penelitian tentang pengkapsulan PCM di tangki PATS sistem aktif telah dilakukan oleh peneliti terdahulu. Pengkapsulan PCM memakai aluminium silindris mampu meningkatkan fraksi matahari sekitar 4–8% dibandingkan dengan PATS tanpa PCM [14]. Laju aliran massa dan temperatur air masuk tangki yang berisi PCM dengan kapsul aluminium silindris berpengaruh besar pada saat *charging* [15]. Kapsul silindris aluminium diisi *paraffin wax* dan diletakkan di dalam tangki PATS vertikal. Air di tangki penyimpanan tidak turun di bawah 45 °C selama 24 jam pengujian [16]. Kanimozzi & Bapu [17] memasukkan kapsul silinder tembaga berisi *paraffin* ke dalam tangki PATS dan menyimpulkan bahwa PCM mampu meningkatkan penyimpanan energi sistem. Tangki yang berisi 26% PCM dari volumenya dan memakai kapsul bola berbahan *high density polyethylene* mampu meningkatkan penyimpanan energi termal lebih besar 21,9% dibandingkan tangki tanpa PCM [18]. Integrasi PCM dan air di dalam tangki mampu mempertahankan temperatur air masuk kolektor yang rendah sehingga mengurangi rugi-rugi di kolektor [19]. Efisiensi energi di kolektor naik sebesar 10,88% karena di dalam tangki dipasang kapsul silindris berisi PCM dibandingkan tanpa ada PCM [20]. Penambahan kapsul berisi PCM di tangki vertikal bagian atas dapat meningkatkan unjuk kerja termal tangki dalam kondisi penurunan temperatur airnya lebih lama 8,5% dibanding tangki tanpa PCM [21]. Jumlah kalor yang dapat diserap oleh tangki air yang diisi dengan PCM adalah jauh lebih tinggi daripada tangki air biasa yang hanya diisi air [22]. Penurunan temperatur air pada tangki PATS yang mengandung PCM lebih lama dibandingkan PATS tanpa PCM [23].

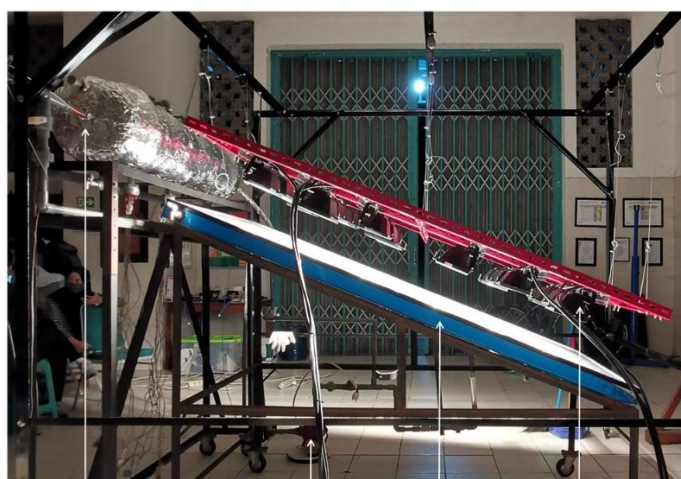
Berdasarkan studi yang dilakukan oleh peneliti terdahulu, pengkapsulan PCM di dalam tangki TES adalah teknik yang mampu meningkatkan unjuk kerja termal sistem PATS. Namun demikian, penelitian sebelumnya belum mengungkap unjuk kerja termal tangki TES dengan posisi horisontal yang di dalamnya terdapat susunan kapsul PCM jenis silinder dan dikaitkan dengan variasi debit *heat transfer fluid* (HTF). Tujuan penelitian ini adalah untuk menyelidiki karakteristik termal tangki PATS yang mengintegrasikan air dan PCM sebagai material penyimpan kalor dengan variasi debit air.

## 2. BAHAN DAN METODE

Penelitian ini menggunakan air sebagai HTF dan *paraffin wax* jenis RT52 sebagai PCM. HTF berfungsi sebagai sumber energi termal bagi PCM pada proses *charging*, sedangkan PCM digunakan untuk menyimpan energi termal dan dapat dimanfaatkan pada proses *discharging*.

Alat penelitian memakai satu unit PATS sistem aktif yang melibatkan PCM (PATS-PCM) seperti ditunjukkan di Gambar 1. Komponen utama PATS terdiri dari tangki TES, kolektor, alat penukar kalor, *solar simulator* dan pompa. Volume tangki yang digunakan adalah 60 liter. Tangki dihubungkan dengan kolektor jenis pelat datar dan membentuk sudut kemiringan  $20^\circ$ . Ukuran kolektor adalah  $1 \text{ m} \times 1,9 \text{ m}$ . Alat penukar kalor berupa susunan kapsul silinder berjumlah 24 buah dipasang di dalam tangki. Kapsul yang dipakai adalah pipa tembaga berdiameter  $\frac{3}{4}$  inchi dan panjangnya 1 m. Setiap kapsul diisi *paraffin wax* sebanyak 331,84 gr. Kapsul-kapsul disusun mengikuti tipe nontumbuk yaitu sumbu saluran masuk air panas berada di tengah tangki dan tidak berimpit dengan sumbu kapsul. Pompa dipasang di jalur perpipaan sisi masuk kolektor. Fungsi pompa adalah untuk mensirkulasikan air di sistem PATS-PCM.

Eksperimen ini dilaksanakan secara *indoor* sehingga sumber energi termal sistem PATS-PCM menggunakan *solar simulator*. Pemakaian *solar simulator* ini dengan maksud agar nilai *heat flux* yang mengenai kolektor adalah konstan sehingga dapat mengevaluasi unjuk kerja termal sistem PATS memakai variasi debit aliran HTF. Lampu yang dipakai pada *solar simulator* adalah jenis halogen dengan jumlah 24 buah dan daya tiap lampu sebesar 300 watt. Alat yang dipakai untuk mengatur nilai *heat flux* adalah *voltage regulator*. Selain itu, besarnya *heat flux* juga diatur dengan pengaturan jarak antara *solar simulator* dan kolektor.



Tangki TES                      Pompa                      Kolektor                      Solar simulator

Gambar 1. Alat penelitian

Termokopel jenis K dipakai untuk merekam temperatur HTF dan PCM. Eksperimen ini menggunakan 14 buah termokopel untuk sisi HTF dan 15 buah di sisi PCM. Termokopel dihubungkan dengan alat akuisisi data dan komputer. Rotameter dipasang di saluran pipa masuk ke kolektor setelah pompa.

Parameter yang divariasikan dalam penelitian ini adalah debit air yaitu 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm. *Heat flux* dari *solar simulator* diatur konstan pada  $1000 \text{ W/m}^2$ . Penelitian dimulai dengan mengisi air pada sistem PATS-PCM hingga penuh. Pompa air diaktifkan dan debit aliran air diatur sampai stabil di harga 1 lpm. Eksperimen proses *charging* dilaksanakan selama 160 menit. Temperatur HTF dan PCM direkam setiap menit. Selama eksperimen, *heat flux* dan debit aliran HTF dijaga konstan. Data temperatur HTF yang diperoleh, digunakan untuk mengevaluasi unjuk kerja termal yang meliputi evolusi temperatur HTF sisi masuk dan keluar tangki, evolusi temperatur HTF dan PCM di dalam tangki, kalor yang tersimpan sesaat (*instantaneous heat stored*), dan energi termal akumulatif (*cumulative heat stored*).

Kalor tersimpan sesaat ( $Q$ , kW) selama proses *charging*, dihitung berdasarkan perbedaan temperatur air masuk sesaat dan temperatur air keluar sesaat pada tangki TES seperti diberikan di persamaan (1) [24].

$$Q = \dot{m}c_p(T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

dengan

- $\dot{m}$  : laju aliran massa HTF (kg/detik)
- $c_p$  : kalor jenis rata-rata HTF (kJ/kg.°C)
- $T_{in}$  : temperatur HTF masuk sesaat (°C)
- $T_{out}$  : temperatur HTF keluar sesaat (°C)

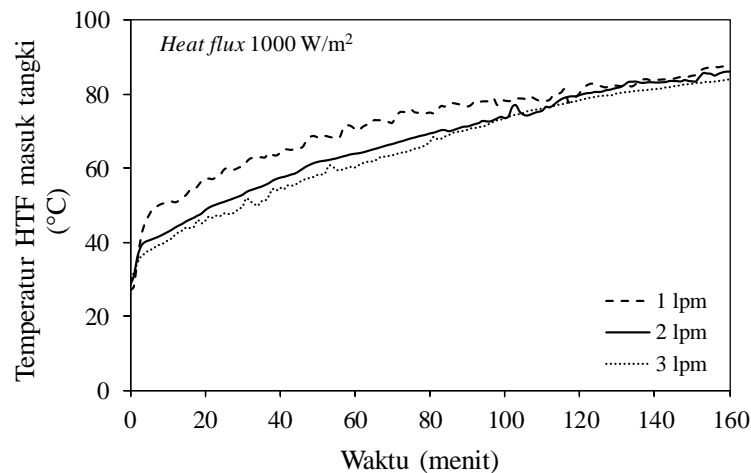
Data temperatur sesaat tersebut diperoleh dari termokopel yang dipasang di sisi masuk dan keluar tangki TES. Energi termal akumulatif adalah jumlah total energi termal yang tersimpan di dalam tangki selama proses *charging*. Energi termal akumulatif diperoleh dengan cara menjumlahkan harga kalor tersimpan sesaat secara akumulatif.

Eksperimen tahap selanjutnya dilakukan dengan metode yang sama namun digunakan debit aliran HTF yang berbeda yaitu 2 lpm dan 3 lpm. Berdasarkan hasil pengolahan data, dilakukan perbandingan dan analisis terhadap grafik yang diperoleh dari variasi debit tersebut.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

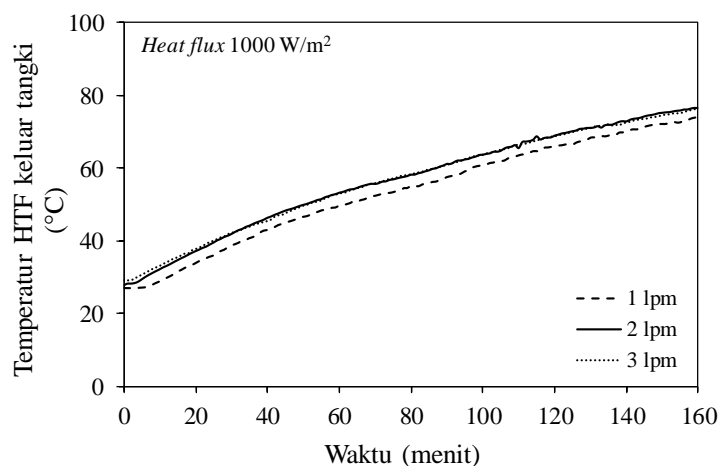
#### 3.1 Evolusi Temperatur HTF Sisi Masuk dan Keluar Tangki

Perubahan temperatur HTF di sisi masuk tangki selama proses *charging* disajikan pada Gambar 2. Grafik di Gambar 2 menunjukkan bahwa urutan perolehan temperatur HTF dari yang tertinggi adalah debit 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm. Variasi debit 1 lpm memiliki kecepatan paling rendah ketika melewati pipa *riser* di kolektor. Keuntungan kecepatan rendah adalah ekstraksi energi termal di kolektor semakin besar. Oleh karena itu, temperatur HTF saat masuk tangki adalah paling tinggi.



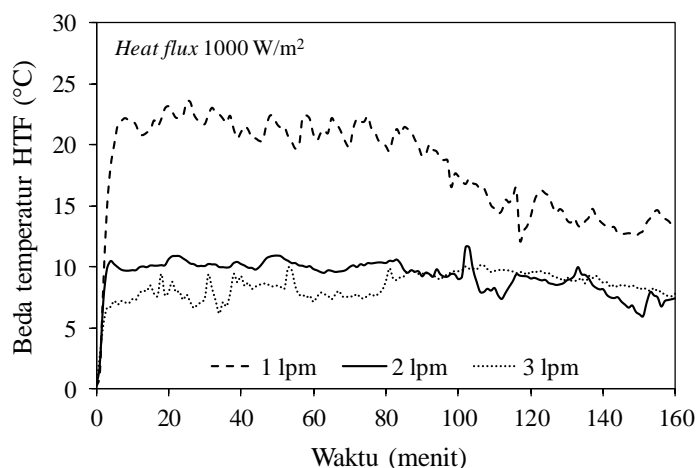
Gambar 2. Evolusi temperatur HTF masuk tangki

Gambar 3 menunjukkan perjalanan temperatur HTF saat keluar tangki. Grafik untuk debit air 1 lpm memiliki temperatur paling rendah. Aliran air panas di dalam tangki lebih lambat sehingga menyebabkan transfer kalor terjadi dengan optimal. Oleh karena itu, temperatur air keluar tangki paling rendah. Semakin besar kecepatan aliran air, semakin cepat air panas mencapai saluran keluar. Proses transfer kalor tidak terjadi dengan optimal sehingga energi termal yang terkandung di air keluar kolektor tidak terserap banyak oleh HTF di dalam tangki. Dampak yang terjadi adalah temperatur air keluar tangki untuk debit air 3 lpm lebih tinggi jika dibandingkan dengan variasi debit 1 lpm dan 2 lpm.



Gambar 3. Evolusi temperatur HTF keluar tangki

Perbedaan temperatur HTF masuk dan keluar ditampilkan di Gambar 4. Besaran ini merupakan selisih temperatur HTF yang terdapat pada Gambar 2 dan Gambar 3. Perbedaan temperatur HTF untuk variasi debit 1 lpm memiliki harga yang paling tinggi. Menurut Gambar 2, temperatur HTF masuk untuk debit 1 lpm paling tinggi. Berdasarkan Gambar 3, temperatur HTF keluar untuk debit 1 lpm paling rendah. Oleh karena itu, perbedaan temperatur HTF masuk dan keluar untuk debit 1 lpm paling besar sebagaimana ditunjukkan di Gambar 4.



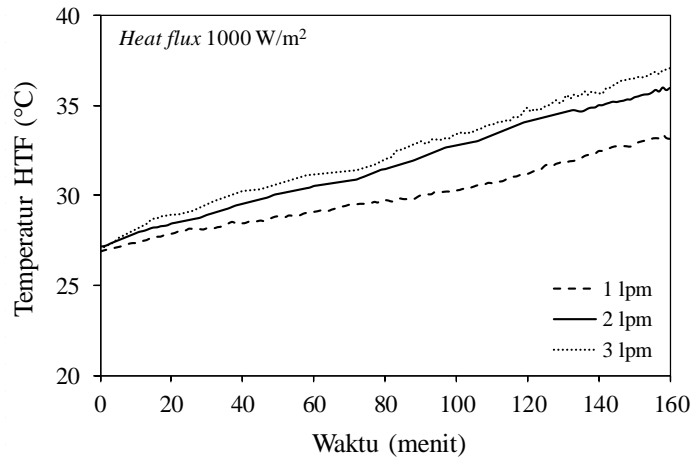
Gambar 4. Perbedaan temperatur HTF masuk dan keluar tangki

### 3.2 Evolusi Temperatur HTF Rata-Rata

Gambar 5 menunjukkan evolusi temperatur HTF rata-rata selama proses *charging* untuk ketiga variasi debit air. Temperatur HTF rata-rata diperoleh berdasarkan termokopel yang dipasang di sisi HTF di dalam tangki yaitu sejumlah 14 buah. Temperatur termokopel dikonversi terlebih dahulu menjadi temperatur aktual sesuai hasil kalibrasi. Grafik yang diperoleh menunjukkan bahwa untuk ketiga variasi debit memiliki pola yang sama yaitu terjadi kenaikan secara perlahan dan sedikit berfluktuasi. Perolehan temperatur di setiap titik termokopel untuk HTF yang tidak sama dan penyebaran air panas yang tidak seragam menyebabkan terjadinya fluktuasi walaupun tingkatnya rendah.

Grafik untuk debit aliran 3 lpm memiliki temperatur tertinggi. Kecepatan pemanasan HTF rata-rata untuk debit aliran 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm masing-masing adalah 0,039 °C/menit, 0,055 °C/menit dan 0,063 °C/menit. Debit aliran yang tinggi cenderung membentuk olakan sehingga proses pencampuran air panas dan HTF di dalam tangki semakin baik. Olakan tersebut dapat terbentuk karena pengaruh tumbukan yang menimpa kapsul.

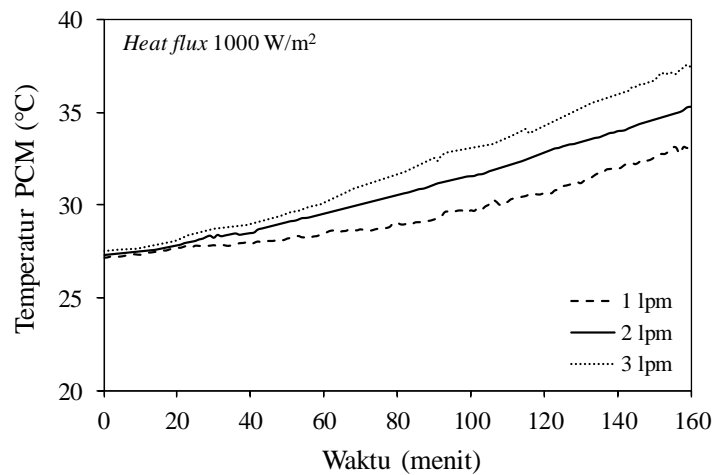




Gambar 5. Evolusi temperatur HTF rata-rata

### 3.3 Evolusi Temperatur PCM Rata-Rata

Evolusi temperatur PCM rata-rata diperoleh berdasarkan temperatur termokopel yang dipasang di dalam kapsul dan diubah menjadi temperatur aktual mengikuti hasil kalibrasi. Temperatur PCM ini merupakan rata-rata dari 15 buah termokopel PCM. Gambar 6 menyajikan evolusi temperatur PCM rata-rata untuk ketiga variasi debit aliran.



Gambar 6. Evolusi temperatur PCM rata-rata

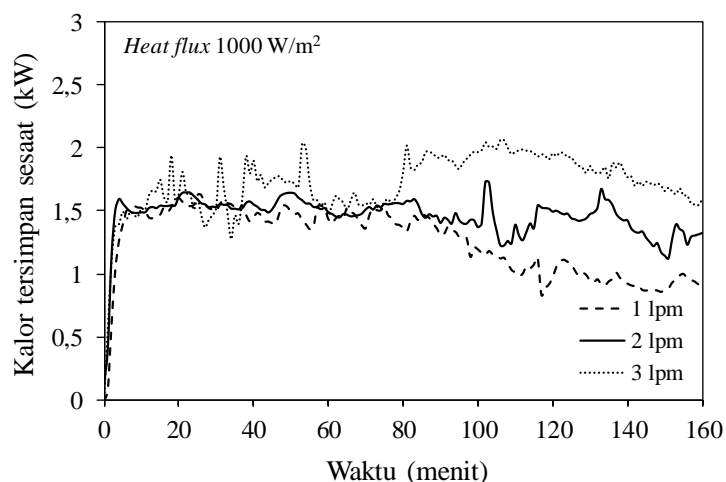
Menurut Gambar 6, evolusi temperatur di awal proses *charging* berjalan lambat yang ditandai dengan kemiringan yang landai. Proses transfer kalor dari HTF ke PCM diawali secara konduksi. Apabila ketersediaan energi termal yang dimiliki HTF meningkat maka transfer kalor berubah dengan mode konveksi yang berjalan lebih cepat. Peristiwa ini terlihat di Gambar 6 yaitu semakin ke kanan maka kemiringan grafik semakin besar yang disebabkan semakin besar penambahan temperaturnya.

Gambar 6 menginformasikan bahwa semakin besar debit aliran air maka temperatur PCM semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan Gambar 5 yaitu debit air tinggi menghasilkan temperatur HTF di dalam tangki yang lebih besar sehingga transfer kalor ke PCM semakin cepat. Kecepatan pemanasan rata-rata yang diperoleh PCM untuk debit aliran 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm masing-masing adalah 0,037 °C/menit, 0,05 °C/menit dan 0,062 °C/menit. Variasi debit air 3 lpm memiliki harga kecepatan pemanasan rata-rata yang terbesar. Kapsul PCM dilingkupi dengan HTF bertemperatur tinggi pada variasi debit 3 lpm. Perbedaan temperatur antara HTF dan PCM lebih tinggi sehingga transfer kalor yang terjadi lebih besar. Kecepatan kenaikan temperatur PCM setiap menit lebih tinggi daripada variasi lainnya.

### 3.4 Kalor Tersimpan Sesaat

Kalor tersimpan sesaat menggambarkan besarnya transfer kalor yang terjadi di dalam tangki berdasarkan selisih temperatur HTF masuk dan keluar tangki. Gambar 7 menunjukkan kalor tersimpan sesaat untuk debit aliran 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm.

Debit aliran air 3 lpm memiliki kalor tersimpan sesaat terbesar. Rata-rata kalor tersimpan sesaat selama proses *charging* untuk debit aliran 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm masing-masing adalah 1,26 kW, 1,47 kW dan 1,73 kW. Walaupun temperatur HTF masuk tangki untuk debit aliran 3 lpm adalah yang terendah (Gambar 2), namun debit yang tinggi berkontribusi terhadap penyebaran air panas di dalam tangki (Gambar 3). Fenomena ini menunjukkan bahwa debit aliran air berperan secara signifikan terhadap transfer kalor yang terjadi.

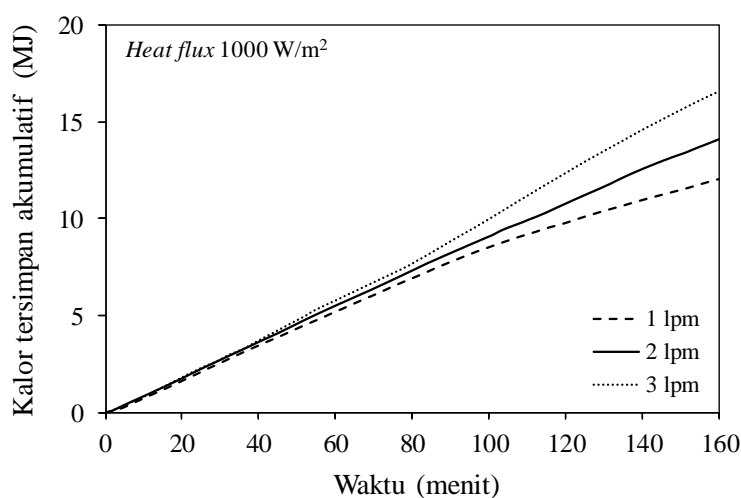


Gambar 7. Kalor tersimpan sesaat

Gambar 7 juga menunjukkan bahwa evolusi kalor tersimpan sesaat sangat berfluktuasi. Semakin besar debit aliran air maka tingkat fluktuasinya semakin tinggi. Fluktuasi kalor tersimpan sesaat dipengaruhi oleh adanya olakan aliran air di dalam tangki.

### 3.5 Energi Termal Akumulatif

Gambar 8 menunjukkan energi termal akumulatif untuk semua variasi debit aliran air. Energi termal akumulatif diperoleh dengan menjumlahkan kalor tersimpan sesaat dikalikan dengan setiap tahap pengambilan data mulai dari awal sampai akhir proses *charging* secara akumulasi.



Gambar 8. Energi termal akumulatif

Grafik di Gambar 8 menjelaskan bahwa penambahan energi termal terjadi secara kontinyu seiring dengan waktu *charging*. Hasil ini serupa dengan penelitian Ezan dkk [25], yaitu semakin lama waktu pada proses *melting* maka total energi yang tersimpan adalah semakin besar dengan kenaikan yang kontinyu. Gambar 8 juga menunjukkan bahwa energi termal akumulatif paling besar adalah pada debit aliran air 3 lpm. Besarnya energi termal akumulatif untuk debit aliran 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm masing-masing adalah 12,09 MJ, 14,08 MJ dan 16,59 MJ. Penambahan debit air dari 1 lpm ke 2 lpm dan 3 lpm mampu meningkatkan energi termal akumulatif di tangki masing-masing sebesar 16,49% dan 37,25%. Semakin tinggi debit aliran air maka perolehan energi termal akumulatif semakin besar.

Hasil yang diperoleh dalam eksperimen ini sesuai dengan penelitian terdahulu. Nallusamy dkk. [24] menyimpulkan bahwa debit aliran air berpengaruh besar terhadap perolehan energi termal akumulatif pada tangki PATS vertikal yang di dalamnya terdapat kapsul bola berisi PCM. Pengangkutan energi termal di kolektor oleh HTF dipengaruhi oleh besarnya koefisien perpindahan kalor konveksi. Harga bilangan Reynolds adalah berbanding lurus dengan kecepatan aliran fluida, sedangkan bilangan Reynolds berkontribusi langsung terhadap bilangan Nusselt. Semakin tinggi bilangan Nusselt maka harga koefisien perpindahan kalor konveksi semakin besar. Energi termal akumulatif yang besar menandakan efisiensi sistem PATS tinggi. Semakin besar debit HTF, efisiensi energi semakin tinggi [26]. Di sisi perpindahan kalor, semakin tinggi debit air maka laju transfer kalor dan perolehan energi yang tersimpan besar [27], [28]. Pengaruh besarnya debit HTF juga dijelaskan oleh Lin dkk [29] yaitu dapat mempercepat proses perubahan fasa PCM sehingga sistem memiliki akumulasi energi termal yang tinggi.

Energi termal akumulatif menggambarkan kemampuan sistem PATS-PCM dalam menyimpan energi termal sesuai kondisi yang diberikan yaitu *heat flux*, laju aliran massa, volume tangka, dan jumlah kapsul. Grafik di Gambar 8 dapat digunakan untuk memprediksi waktu *charging* yang diperlukan apabila sistem PATS-PCM diinginkan memiliki energi termal akumulatif tertentu.

#### 4. KESIMPULAN

Studi eksperimental tentang pengaruh debit aliran air terhadap unjuk kerja termal di dalam tangki PATS yang melibatkan PCM sebagai material penyimpan energi termal telah dilakukan. Semakin tinggi debit aliran air maka evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM, kalor tersimpan sesaat dan energi termal akumulatif di dalam tangki PATS semakin besar. Peningkatan debit aliran air dari 1 lpm ke 2 lpm dan 3 lpm menghasilkan kenaikan energi termal akumulatif sebesar 16,49% dan 37,25%. Dalam penelitian ini, debit aliran air memiliki kontribusi yang cukup besar terhadap kenaikan unjuk kerja termal sistem PATS.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Kalidasan, A. K. Pandey, S. Shahabuddin, M. Samykano, M. Thirugnanasambandam, and R. Saidur, "Phase change materials integrated solar thermal energy systems: Global trends and current practices in experimental approaches," *J. Energy Storage*, vol. 27, 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101118.
- [2] A. Sugiyono, I. F. Anindhita, and L. Wahid, Adiarso, "Outlook Energi Indonesia 2019: Dampak Peningkatan Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan Terhadap Perekonomian Nasional." 2019.
- [3] A. Shahsavari and M. Akbari, "Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, pp. 275–291, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.065.
- [4] M. Raisul Islam, K. Sumathy, and S. Ullah Khan, "Solar water heating systems and their market trends," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 17, pp. 1–25, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.09.011.
- [5] O. Ibrahim, F. Fardoun, R. Younes, and H. Louahlia-Gualous, "Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects," *Build. Environ.*, vol. 72, pp. 259–286, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.09.006.
- [6] F. G. Uctug and A. Azapagic, "Life cycle environmental impacts of domestic solar water heaters in Turkey: The effect of different climatic regions," *Sci. Total Environ.*, vol. 622–623, pp. 1202–1216, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.057.
- [7] M. A. Fazilati and A. A. Alemrajabi, "Phase change material for enhancing solar water heater, an experimental approach," *Energy Convers. Manag.*, vol. 71, pp. 138–145, 2013, doi:



- 10.1016/j.enconman.2013.03.034.
- [8] S. Y. Kee, Y. Munusamy, and K. S. Ong, "Review of solar water heaters incorporating solid-liquid organic phase change materials as thermal storage," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 131, pp. 455–471, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.032.
- [9] C. Cárdenas-Ramírez, F. Jaramillo, and M. Gómez, "Systematic review of encapsulation and shape-stabilization of phase change materials," *J. Energy Storage*, vol. 30, p. 101495, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101495.
- [10] T. Nomura, M. Tsubota, T. Oya, N. Okinaka, and T. Akiyama, "Heat storage in direct-contact heat exchanger with phase change material," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 50, pp. 26–34, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.04.062.
- [11] S. Bouadila, M. Fteïti, M. M. Oueslati, A. Guizani, and A. Farhat, "Enhancement of latent heat storage in a rectangular cavity: Solar water heater case study," *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 904–912, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.07.094.
- [12] R. Fukahori, T. Nomura, C. Zhu, N. Sheng, N. Okinaka, and T. Akiyama, "Macro-encapsulation of metallic phase change material using cylindrical-type ceramic containers for high-temperature thermal energy storage," *Appl. Energy*, vol. 170, pp. 324–328, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.02.106.
- [13] P. B. Salunkhe and P. S. Shembekar, "A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, pp. 5603–5616, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.05.037.
- [14] M. Ibáñez, L. F. Cabeza, C. Solé, J. Roca, and M. Nogués, "Modelization of a water tank including a PCM module," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 11–12, pp. 1328–1333, 2006, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.10.022.
- [15] S. A. Vijay Padmaraju, M. Vignesh, and N. Nallusamy, "Comparitive study of sensible and latent heat storage systems integrated with solar water heating unit," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, pp. 55–60, 2008, doi: 10.24084/repqj06.218.
- [16] I. Al-Hinti, A. Al-Ghandoor, A. Maaly, I. Abu Naqeera, Z. Al-Khateeb, and O. Al-Sheikh, "Experimental investigation on the use of water-phase change material storage in conventional solar water heating systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, pp. 1735–1740, 2010, doi: 10.1016/j.enconman.2009.08.038.
- [17] B. Kanimozhi and B. R. R. Bapu, "Experimental study of thermal energy storage in solar system using PCM," *Adv. Mater. Res.*, vol. 433–440, pp. 1027–1032, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.1027.
- [18] S. A. Khot, "Enhancement of thermal storage system using phase change material," *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 142–151, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.257.
- [19] H. M. Teamah, M. F. Lightstone, and J. S. Cotton, "Potential of cascaded phase change materials in enhancing the performance of solar domestic hot water systems," *Sol. Energy*, vol. 159, no. October 2017, pp. 519–530, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.11.034.
- [20] P. Manoj Kumar and K. Mylsamy, "Experimental investigation of solar water heater integrated with a nanocomposite phase change material: Energetic and exergetic approach," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 136, pp. 121–132, 2019, doi: 10.1007/s10973-018-7937-9.
- [21] D. Qin, Z. J. Yu, T. Yang, S. Li, and G. Zhang, "Thermal performance evaluation of a new structure hot water tank integrated with phase change materials," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 5034–5040, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.659.
- [22] H. Nazir et al., "Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 129, pp. 491–523, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126.
- [23] R. Chatgui and B. Tashtoush, "Thermoeconomic Analysis of Solar Water Heaters Integrating Phase Change Material Modules and Mounted in Football Pitches in Tunisia," *J. Energy Storage*, vol. 33, p. 102129, 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102129.
- [24] N. Nallusamy, S. Sampath, and R. Velraj, "Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources," *Renew. Energy*,

- vol. 32, pp. 1206–1227, 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.04.015.
- [25] M. A. Ezan, M. Ozdogan, and A. Erek, "Experimental study on charging and discharging periods of water in a latent heat storage unit," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 50, pp. 2205–2219, 2011, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.06.010.
- [26] M. H. Mahfuz, M. R. Anisur, M. A. Kibria, R. Saidur, and I. H. S. C. Metselaar, "Performance investigation of thermal energy storage system with Phase Change Material (PCM) for solar water heating application," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 57, pp. 132–139, 2014, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.022.
- [27] X. Xiao and P. Zhang, "Numerical and experimental study of heat transfer characteristics of a shell-tube latent heat storage system: Part I - Charging process," *Energy*, vol. 79, no. C, pp. 337–350, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2014.11.020.
- [28] G. Li, "Energy and exergy performance assessments for latent heat thermal energy storage systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 926–954, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.052.
- [29] W. Lin, Z. Ling, X. Fang, and Z. Zhang, "Experimental and numerical research on thermal performance of a novel thermal energy storage unit with phase change material," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 186, no. August 2020, p. 116493, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116493.