

PERILAKU TERMAL PEMANAS AIR TENAGA SURYA YANG BERISI PCM PADA UNIT TANGKI

Muhammad Nadjib¹⁾, Tito Hadji Agung Santosa²⁾

¹Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
email: nadjibar@umy.ac.id

²Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
email: titohas@yahoo.com

Abstract

The main disadvantage of solar water heater (SWH) using water as thermal energy storage is the system tends to be weight because it has a low energy density. On the other hand, the phase change material (PCM) is a kind of latent energy storage material which has advantages such as high energy density. One type of PCM from the organic group is a paraffin wax. Based on this advantage, paraffin wax allows to be applied to SWH. The aim of this research is to study experimentally the thermal behavior of SWH involving PCM as thermal energy storage in the tank during the charging process. Research conducted using thermosyphon SWH with main components are solar collector with 2 m² areas and horizontal tank volume of 60 liters and it is tested outdoor. Paraffin wax is inserted into the pipe-capsule and the pipes are arranged in the tank. Parameters measured were water temperature, PCM temperature, outside air temperature and solar radiation intensity. Thermocouples mounted on either the water or the PCM in multiple locations. The data obtained was used to analyze the thermal behavior of heat storage in the tank. This study showed that the rate of temperature rise of the water and PCM was 0.229 °C/min and 0.230 °C/min, respectively. The heat transfer process in the tank is good enough because there is no significant difference between the rate of temperature rise of the water and PCM.

Keywords: SWH, PCM, paraffin wax, thermosyphon, charging process

PENDAHULUAN

Pemanas Air Tenaga Surya (PATS) adalah teknologi pemanasan air menggunakan energi matahari yang telah dikenal masyarakat dan sampai saat ini berkembang cukup baik. PATS konvensional menggunakan air sebagai penyimpan kalor sensibel (*sensible heat storage*, SHS). Penggunaan air ini adalah cara yang umum dan dapat diandalkan karena harganya murah serta mempunyai sifat termal yang baik. Namun demikian, pemakaian air memiliki kekurangan yaitu memerlukan volume penyimpanan yang besar karena nilai densitas energinya rendah [1] dan SHS yang menggunakan air cenderung memiliki karakteristik sistem yang berat [2]. Beratnya sistem PATS membutuhkan perhatian khusus saat pemasangan. Konstruksi di sekitar tempat pemasangan harus diperhitungkan agar kuat menahan beban sistem PATS yaitu beban alat dan beban air di dalamnya.

Penggunaan material penyimpan kalor laten (*latent heat storage*, LHS) berpotensi meminimalkan kekurangan penggunaan SHS pada PATS. Penyimpanan jenis ini berpotensi menghasilkan sistem penyimpan termal dari energi matahari yang *compact* dan efisien [2]. Penyimpanan energi termal (*thermal energy storage*, TES) yang menggunakan *phase change materials* (PCM) sebagai LHS sangat menarik karena mempunyai keuntungan yaitu penyimpanan kalornya tiap unit volume lebih besar daripada SHS dan pelepasan kalornya terjadi pada temperatur yang konstan [3]. Canbazoglu dkk [4] menambahkan bahwa LHS mempunyai keunggulan dalam operasional dibanding SHS karena fluktuasi temperaturnya rendah, ukurannya lebih kecil, dan berat tiap unit lebih rendah.

Paraffin wax sebagai salah satu jenis PCM memiliki karakteristik seperti: harganya murah, densitas energinya cukup tinggi (~ 200 kJ/kg), dan konduktivitas termalnya rendah (~ 0,2

W/m.°C) [5]; temperatur leleh beberapa produk *paraffin wax* bervariasi antara 8 sampai 106°C [6]; tidak berbahaya dan tidak reaktif [7]; sifat termalnya stabil di bawah 500°C [8]. Berdasarkan karakteristik ini maka *paraffin wax* cukup atraktif diaplikasikan pada PATS sebagai media penyimpanan kalor.

Sinergi penggunaan material SHS dan LHS merupakan tantangan untuk pengembangan teknologi PATS konvensional karena LHS berpotensi meningkatkan kapasitas penyimpanan energi termal. Penyimpanan termal untuk sistem PATS skala domestik dapat dilakukan dengan menempatkan PCM pada sistem, memilih titik leburnya di sekitar temperatur yang diperlukan, pengkapsulan dalam tempat tertentu dan direndam di dalam tangki penyimpan [9].

Mengingat rendahnya harga konduktivitas termal dari *paraffin wax* maka perlu dilakukan rekayasa konstruksi di dalam tangki PATS untuk mewartahi PCM. Langkah yang dilakukan adalah menempatkan PCM di dalam susunan kapsul berbentuk pipa sehingga luas permukaan perpindahan kalor meningkat. Makalah ini menyajikan studi eksperimental penggunaan *paraffin wax* bersama air sebagai material penyimpan energi termal di dalam tangki PATS tipe *thermosyphon*. Tujuannya adalah untuk mengetahui perilaku termal sisi *heat transfer fluid* (HTF) yaitu air dan sisi PCM di dalam tangki selama proses *charging*.

1. KAJIAN LITERATUR

Sumber kalor PATS berasal dari energi matahari dimana radiasi matahari dikonversi menjadi energi termal dan ditransmisikan ke HTF seperti air. Sistem PATS dapat dikelompokkan menjadi 2 kategori yaitu sistem aktif dan sistem pasif. Kelompok sistem aktif terdiri atas sistem tertutup (*closed loop*) dan sistem terbuka (*open loop*). Kelompok sistem pasif dibagi menjadi 2 jenis yaitu *thermosyphon* dan *integrated collector storage* (ICS) [10].

Kalor yang tersimpan seketika pada HTF di dalam tangki selama proses *charging* dihitung berdasarkan perbedaan temperatur air masuk sesaat ($T_{w,in}(t)$, °C) dan temperatur air keluar sesaat ($T_{w,out}(t)$, °C) pada tangki air panas [11], yaitu:

$$Q(t) = \dot{m}c_{p,w}\{T_{w,in}(t) - T_{w,out}(t)\} \quad (1)$$

dimana \dot{m} adalah laju aliran massa air panas (kg/detik) dan $c_{p,w}$ kalor jenis air panas (J/kg.°C). Akumulasi energi kalor yang tersimpan di dalam sistem TES berasal dari air panas (kalor sensibel), PCM (kalor sensibel fase padat, kalor laten dan kalor sensibel fase cair) dan dinding kapsul (kalor sensibel). Menurut Nallusamy dkk [11], besarnya akumulasi energi kalor adalah

$$E(t) = m_w c_{p,w}(T_w(t) - T_{w,i}) + m_p \{c_{p,ps}(T_p(t) - T_{p,i}) + L + c_{p,pl}(T_p(t) - T_m)\} + m_d c_d(T_p(t) - T_{p,i}) \quad (2)$$

m_w , m_p , dan m_d berturut-turut adalah massa air, massa PCM, dan massa kapsul (kg). $c_{p,w}$, $c_{p,ps}$, $c_{p,pl}$, dan c_d adalah kalor jenis air, panas jenis PCM fase padat, kalor jenis PCM fase cair, dan kalor jenis dinding kapsul (J/kg.°C). T_w , $T_{w,i}$, T_p , $T_{p,i}$, dan T_m masing-masing adalah temperatur air panas, temperatur awal air, temperatur PCM, temperatur awal PCM, dan temperatur leleh PCM (°C). L adalah kalor laten pelelehan (J/kg). Suku pertama ruas kanan pada persamaan (2) adalah energi yang tersimpan di air, suku kedua adalah energi yang disimpan PCM, sedangkan suku ketiga menggambarkan kandungan kalor pada dinding kapsul.

Kekurangan PCM adalah nilai konduktivitas termalnya rendah. Pengaruh rendahnya konduktivitas termal adalah laju pengambilan dan pelepasan energinya lambat [12]. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan unjuk kerja termal sistem LHS yaitu pemakaian perluasan permukaan (*extended surfaces*), penggunaan beberapa PCM (*multiple PCM*), peningkatan konduktivitas termal, dan pengkapsulan PCM (*PCM encapsulation*) [13].

PCM berupa *sodium thiosulfate pentahydrate* ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) telah digunakan pada sistem PATS *thermosyphon* dimana PCM dimasukkan ke dalam botol-botol berbahan *polyethylene* kemudian disusun di dalam tangki air posisi vertikal. Waktu penyimpanan air panas, produksi air panas, dan jumlah akumulasi kalor untuk PATS yang dikombinasikan dengan PCM meningkat 2,59 – 3,45 kali dibandingkan

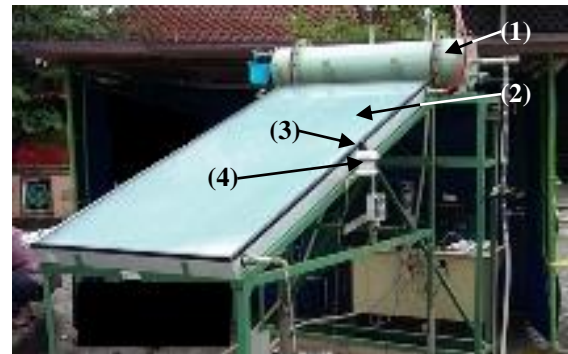
dengan PATS tanpa PCM [14]. *Paraffin wax* dimasukkan ke dalam kapsul dan disusun menjadi alat penukar kalor di dalam tangki PATS *thermosyphon* bervolume 31 liter. Kolektor matahari yang digunakan adalah tipe pelat datar dengan luas 2 m². Integrasi *paraffin wax* dan air sebagai penyimpan kalor ini mampu menyimpan energi termal kumulatif sebesar 3,95 MJ dengan waktu *charging* selama 340 menit. Sistem TES ini menghasilkan temperatur rata-rata HTF tertinggi 65,39 °C dan temperatur rata-rata PCM tertinggi 67,58°C [15]. *Paraffin wax* diintegrasikan pada kolektor matahari di sekitar pipa *riser* untuk menyerap kalor dari energi matahari, sedangkan tangki berisi air sebagai penyimpan kalor. Sistem PATS *thermosyphon* yang dibuat ini terdiri dari kolektor matahari seluas 1,6 m² dan tangki berkapasitas 115 liter. Temperatur air panas maksimum yang dihasilkan kolektor adalah 70 °C dan efisiensi maksimumnya sebesar 36,6% [16].

Berdasarkan kajian literatur di atas, PCM telah berkontribusi terhadap penyimpanan energi termal pada sistem PATS. Penempatan PCM pada kapsul di dalam tangki TES diprediksikan mampu meningkatkan proses transfer kalor.

METODE PENELITIAN

Lingkup penelitian ini adalah PATS tipe *thermosyphon* yang melibatkan PCM sebagai media penyimpan energi termal. PCM ditempatkan di dalam kapsul berbentuk pipa dan diletakkan pada tangki PATS. Bahan yang digunakan adalah air sebagai HTF dan *paraffin wax* sebagai PCM. *Paraffin wax* yang dipakai adalah RT52 dengan sifat termofisis yaitu: daerah temperatur pelelehan 49 – 53 °C; kalor laten peleburan 143 kJ/kg; kalor jenis spesifik 2 kJ/kg.K; massa jenis fasa padat 0,88 kg/liter dan pada fasa cair 0,78 kg/liter; konduktivitas termal fasa padat dan cair 0,2 W/m.K [17].

Peralatan yang dipakai adalah tangki TES yang di dalamnya terdapat kapsul PCM (1), kolektor matahari (2), piranometer (3), sensor temperatur udara luar (4), termokopel tipe K, alat akuisisi data dan katup pengatur. Gambar 1 menunjukkan alat yang digunakan saat pengujian *outdoor*.



Gambar 1. Alat penelitian

Kolektor matahari pelat datar ukuran 1 x 2 m dihubungkan dengan tangki TES berkapasitas 60 liter. Kolektor dipasang dengan *tilt angle* 15°. Tangki terbuat dari plat besi dengan panjang 122 cm dan diameter dalam 25 cm. Tangki dibalut dengan *glass wool* untuk mengurangi rugi-rugi termal ke lingkungan. Di dalam tangki dipasang kapsul yang berisi *paraffin wax* dengan jumlah 24 buah dan berat PCM keseluruhan adalah 8,95 kg. Bahan kapsul dari pipa tembaga dengan diameter luar 1 inci dan panjang 100 cm. Berkas pipa kapsul disusun di dalam tangki TES secara *in-line*. Termokopel dipasang di sisi HTF dan PCM. Posisi piranometer diletakkan di samping kolektor. Alat akuisisi data USB-4718 dipakai untuk merekam data temperatur, sedangkan radiasi matahari direkam dengan HOB0 *micro station*.

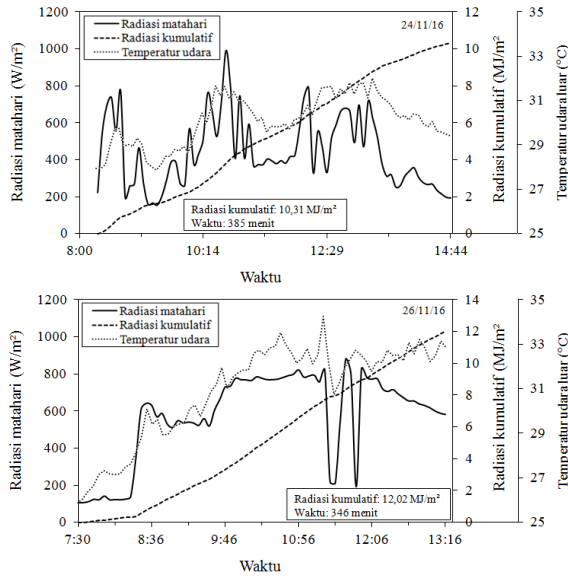
Penelitian dilaksanakan di area laboratorium Konversi Energi Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Penelitian ini dilakukan selama proses *charging* yaitu saat sistem PATS menerima energi dari matahari untuk memanaskan air yang berada di kolektor. Setelah sistem PATS diisi air penuh, sensor temperatur dan radiasi matahari diaktifkan secara bersamaan. Perekaman data temperatur HTF, temperatur PCM, temperatur udara luar dan intensitas radiasi matahari dilakukan setiap 30 detik. Proses *charging* ini diakhiri apabila PCM telah mencapai temperatur leleh.

Berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian, dilakukan analisis data untuk mengetahui perilaku termal sistem TES memakai gabungan air dan PCM sebagai media penyimpan kalor. Selama proses *charging* dapat diperoleh perilaku termal sistem antara lain:

evolusi temperatur HTF; evolusi temperatur PCM; dan proses perpindahan kalor pada HTF serta PCM.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian proses *charging* dipilih selama 2 hari dan disajikan seperti Gambar 1 berikut.



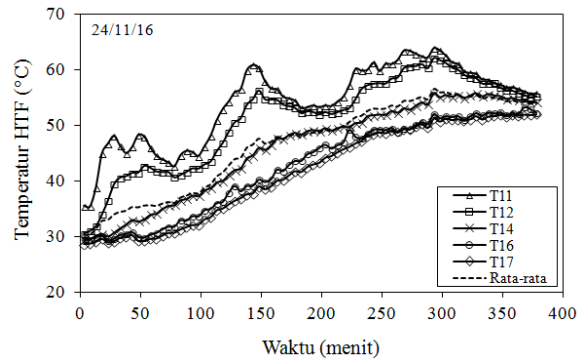
Gambar 1. Radiasi matahari selama pengujian *charging*

Gambar 1 mengilustrasikan intensitas radiasi matahari, radiasi kumulatif dan temperatur udara luar selama pengujian. Pengujian ini terlaksana dalam cuaca *cloudy condition* dimana intensitas radiasi matahari fluktuatif. Radiasi matahari pada tanggal 24 November 2016 berfluktuasi sepanjang hari dengan harga rata-rata intensitasnya 446,708 W/m². Pada tanggal 26 November 2016 radiasi matahari cukup stabil di awal pengujian dan berfluktuasi hebat antara pukul 11.21 sampai 11.56 dimana harga rata-rata intensitas radiasi 578,768 W/m².

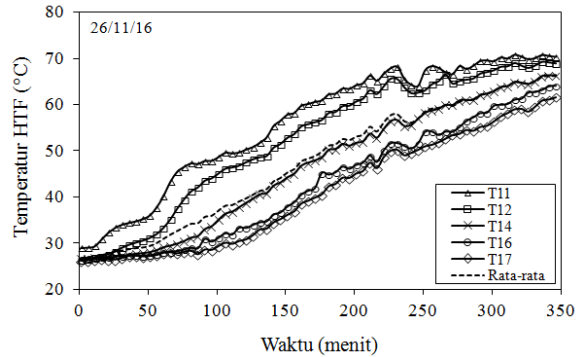
Gambar 1 membuktikan bahwa berubah-ubahnya intensitas radiasi matahari mempengaruhi temperatur udara luar. Grafik temperatur udara luar memiliki profil yang mengikuti intensitas radiasi matahari. Gambar 1 juga menjelaskan perbedaan akumulasi radiasi selama dua hari pengujian. Radiasi kumulatif

hari kedua cukup tinggi karena intensitas radiasinya lebih stabil.

Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan perjalanan temperatur air seiring dengan waktu selama proses *charging* pada lima buah termokopel yang dipasang di dalam tangki selama dua hari pengujian.



Gambar 2. Evolusi temperatur HTF tanggal 24/11/2016



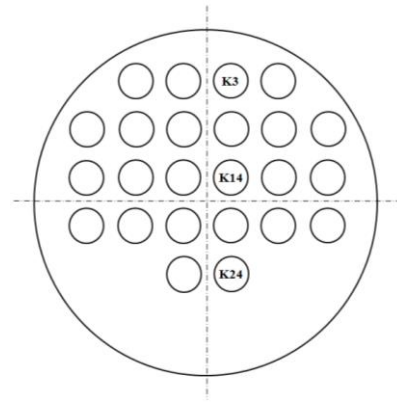
Gambar 3. Evolusi temperatur HTF tanggal 26/11/2016

Kedua grafik pada Gambar 2 dan Gambar 3 mempunyai kecenderungan yang sama yaitu kenaikan temperatur terjadi secara perlahan-lahan dan berfluktuasi. Perlahannya kenaikan temperatur disebabkan oleh rendahnya transfer kalor antara air panas dari kolektor dan air di dalam tangki. Kejadian ini terlihat dari kenaikan temperatur yang rendah selama proses *charging*. Laju transfer kalor dipengaruhi oleh laju aliran massa fluida. Laju aliran massa air pada PATS ini termasuk rendah karena mengandalkan perbedaan densitas air antara saluran keluar dan saluran masuk kolektor. Aliran jenis ini disebut dengan *thermosyphon*. Harga densitas air dipengaruhi oleh temperaturnya. Adanya

intensitas radiasi yang berfluktuasi mengakibatkan temperatur air keluar kolektor tidak stabil sehingga laju aliran massanya juga berubah-ubah. Gambar 3 memperlihatkan kenaikan temperatur tanggal 26 November 2016 lebih cepat daripada tanggal 24 November 2016 yang mengindikasikan laju transfer kalornya lebih besar. Hal ini disebabkan lebih besarnya intensitas radiasi matahari pada tanggal 26 November 2016. Disamping itu, kestabilan radiasi matahari juga mempengaruhi laju transfer kalor. Saat awal proses *charging*, intensitas radiasi pada tanggal 26 November 2016 lebih stabil bila dibandingkan dengan tanggal 24 November 2016. Intensitas radiasi yang besar dan stabil ini menyebabkan tingginya temperatur air keluar dari kolektor. Selisih temperatur antara air keluar dari kolektor dan air di dalam tangki adalah besar sehingga transfer kalornya juga besar.

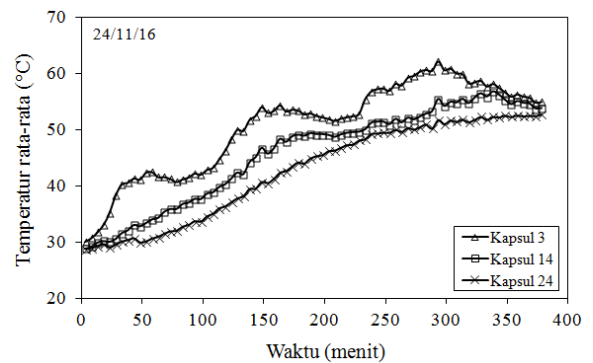
Pada tanggal 24 November 2016, temperatur rata-rata HTF saat awal sebesar 30,32 °C dan temperatur rata-rata akhirnya adalah 54,01°C. Temperatur akhir tercapai setelah pemanasan selama 385 menit dengan kecepatan pemanasan rata-rata 0,126 °C/menit. Temperatur rata-rata HTF saat awal pada tanggal 26 November 2016 adalah 26,85 °C, sedangkan temperatur rata-ratanya di akhir *charging* sebesar 66,28 °C. Temperatur akhir ini dicapai setelah pemanasan selama 346 menit dengan kecepatan pemanasan rata-rata 0,229 °C/menit. Intensitas radiasi pada hari kedua yang tinggi menyebabkan kecepatan pemanasan rata-ratanya lebih besar walaupun waktu *charging* lebih singkat. Kecepatan pemanasan rata-rata merupakan harga rata-rata dari kecepatan pemanasan HTF setiap interval waktu (60 detik) selama proses *charging*.

Tiga di antara 24 kapsul yang tersusun di dalam tangki dipasang termokopel yaitu K3, K14 dan K24 masing-masing 2 buah. Posisi ketiga kapsul tersebut terlihat pada Gambar 4. Pemilihan posisi kapsul dianggap mewakili keseluruhan kapsul yakni berada di bagian atas, tengah dan bawah tangki. Nomenklatur kapsul adalah berurutan dari atas ke kanan.

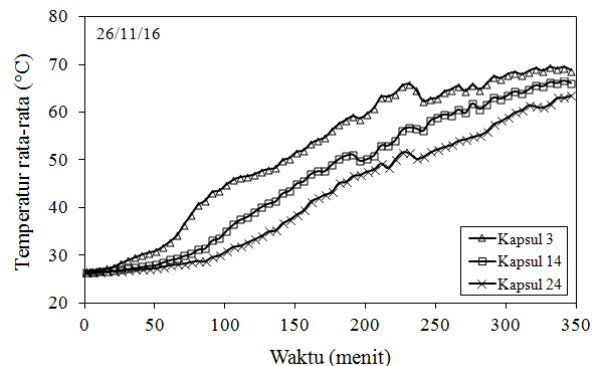


Gambar 4. Posisi pemasangan kapsul K3, K14 dan K24

Evolusi temperatur rata-rata PCM yang terjadi di tiap kapsul diberikan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Evolusi temperatur PCM tanggal 24/11/2016



Gambar 6. Evolusi temperatur PCM tanggal 26/11/2016

Grafik pada tanggal 24 dan 26 November 2016 memiliki pola yang sama sebagaimana halnya grafik evolusi temperatur HTF, yaitu kenaikan temperatur PCM terjadi secara

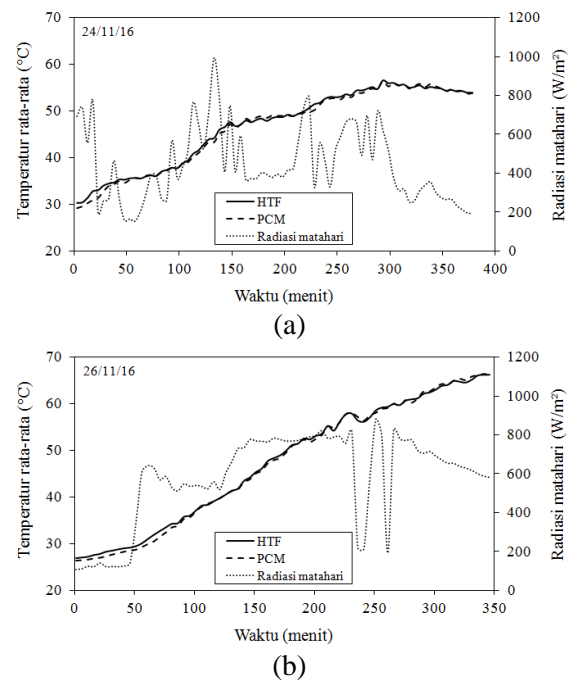
perlahan-lahan dan fluktuatif. Pada awal proses *charging*, kalor sensibel dipindah dari air panas menuju dinding kapsul. Transfer kalor dilanjutkan dari dinding kapsul ke PCM padat. Transfer kalor ini didominasi oleh konduksi yang mengikuti gradien temperatur antara dinding kapsul dan PCM padat [18]. Transfer kalor secara konduksi dimulai sejak awal *charging* sampai terbentuk perubahan fase padat-cair. Secara umum, *paraffin* memiliki karakteristik konduktivitas termal yang rendah [19]. Konduktivitas termal *paraffin wax* RT52 yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,2 W/m.K. Rendahnya konduktivitas termal ini mengakibatkan lambatnya transfer kalor dari air panas ke PCM.

Temperatur rata-rata PCM di awal proses *charging* tanggal 24 November 2016 adalah 29,34 °C dan temperatur di akhir proses sebesar 53,86 °C. Kecepatan pemanasan PCM rata-ratanya adalah 0,13 °C/menit. Pada pengujian tanggal 26 November 2016, temperatur rata-rata PCM saat awal adalah 26,41 °C dan temperatur akhirnya 66,1 °C. Kecepatan pemanasan PCM rata-rata tanggal 26 November 2016 sebesar 0,23 °C/menit. Kecepatan kenaikan temperatur pada hari kedua lebih tinggi daripada hari pertama. Penyebab tingginya kecepatan kenaikan temperatur ini tidak lain karena kolektor matahari menghasilkan air panas dengan temperatur tinggi akibat besarnya dan stabilnya intensitas radiasi matahari. Lebih stabilnya radiasi matahari pengujian hari kedua terlihat dari evolusi temperatur PCM yang lebih mulus di awal proses (Gambar 6).

Memperhatikan Gambar 5 dan Gambar 6, temperatur rata-rata kapsul dari yang tertinggi adalah kapsul 3 (K3) dan kapsul 14 (K14) dan kapsul 24 (K24). Tingginya temperatur rata-rata K3 dibandingkan dengan kapsul yang lain disebabkan kapsul tersebut berada di bagian atas tangki dimana daerah tersebut paling dekat dengan pipa air masuk dari kolektor. Semakin ke arah bawah posisi kapsul, temperatur rata-ratanya semakin rendah. Hal ini disebabkan semakin ke bawah temperatur air semakin rendah (Gambar 2 dan Gambar 3) sehingga transfer kalor ke PCM semakin berkurang. Gambar 5 dan Gambar 6 juga menunjukkan bahwa semakin ke atas letak kapsul, fluktuasi

evolusi temperatur semakin besar. Fenomena ini menjelaskan bahwa kapsul teratas sangat terpengaruh oleh intensitas radiasi matahari yang menyebabkan perubahan produksi air panas di kolektor matahari.

Perpindahan kalor pada tangki penyimpan ada 2 tahap yaitu antara air panas dari kolektor dan air di dalam tangki serta antara air di dalam tangki dan *paraffin wax* yang ada dalam kapsul. Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM yang terjadi pada tangki diberikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM: (a) hari pertama, (b) hari kedua

Menurut Gambar 7, temperatur HTF di dalam tangki mengalami kenaikan secara bertahap dan diikuti dengan kenaikan temperatur PCM yang juga bertahap. Radiasi matahari yang berfluktuasi hebat pada hari pertama menyebabkan kenaikan temperatur rata-rata HTF dan PCM tidak setajam hari kedua. Grafik pada hari kedua menunjukkan kenaikan temperatur rata-rata HTF lebih besar daripada PCM di awal proses *charging*. Intensitas radiasi yang tinggi menyebabkan kolektor mampu mensuplai air panas dengan temperatur yang terus bertambah. Akibatnya temperatur air di dalam tangki naik lebih cepat dibanding kenaikan temperatur PCM. Gambar 7 (b) juga memperlihatkan bahwa mulai menit ke-100

terjadi keseimbangan kenaikan temperatur rata-rata antara HTF dan PCM.

Sepanjang waktu pengujian, tidak terjadi perbedaan temperatur yang signifikan antara temperatur rata-rata HTF dan PCM. Kondisi ini mengindikasikan bahwa laju perpindahan kalor yang diterima air di dalam tangki dari air panas kolektor sebanding dengan laju perpindahan kalor antara air di dalam tangki dan PCM. Hal ini diperjelas pada Tabel 1 dimana kecepatan pemanasan rata-rata antara HTF dan PCM tidak berbeda jauh. Oleh karena itu dapat dinyatakan bahwa alat penukar kalor telah berfungsi dengan baik memindah energi termal dari HTF ke PCM.

Tabel 1. Perbandingan kecepatan pemanasan rata-rata

Tanggal	Kecepatan pemanasan rata-rata (°C/menit)	
	HTF	PCM
24/11/2016	0,126	0,13
26/11/2016	0,229	0,23

Sebagaimana diketahui bahwa harga konduktivitas termal air lebih besar dari *paraffin wax*. Parameter ini menentukan laju transfer kalor yang terjadi pada suatu substansi. Menurut Tabel 1 di atas, kecepatan pemanasan rata-rata HTF justru lebih rendah dibandingkan dengan PCM. Peristiwa ini diduga akibat adanya rugi-rugi termal dari air di dalam tangki ke lingkungan. Disamping itu, volume air di dalam tangki lebih besar daripada volume PCM yang ada di dalamnya sehingga lebih banyak energi termal yang diperlukan untuk memanaskan HTF.

2. KESIMPULAN

Kajian eksperimental perilaku termal sistem PATS yang berisi *paraffin wax* dan air sebagai media penyimpan energi termal selama proses *charging* telah dilakukan. Berdasarkan kajian tersebut diketahui bahwa alat penukar kalor berupa berkas kapsul yang disusun secara *in-line* di dalam tangki TES telah cukup efektif memindah kalor dari HTF ke PCM. Hal ini ditandai dengan tidak adanya perbedaan yang signifikan kecepatan pemanasan rata-rata antara sisi HTF dan sisi PCM.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana atas Hibah Bersaing DRPM Dikti tahun 2016. Ucapan terima kasih disampaikan kepada pihak-pihak yang turut membantu dalam penelitian ini.

REFERENSI

- Hasan, A. 1994. Phase Change Material Energy Storage System Employing Palmatic Acid. *Solar Energy*. 52(2): 143 – 154.
- Buddhi, D., Bansal, N.K. Sawhney, R.L. dan Sodha, M.S. 1988. Solar Thermal Storage Systems Using Phase Change Materials. *International Journal of Energy Research*. 12: 457 – 555.
- Watanabe, T. dan Kanzawa, A. 1995. Second Law Optimization of a Latent Heat Storage System with PCMs Having Different Melting Point. *Heat Recovery Systems & CHP*. 15(7): 641 – 653.
- Canbazoglu, S., Sahinaslan, A., Ekmekya-par, A., Aksoy, Y.G. dan Akarsu, F. 2005. Enhancement of Solar Thermal Energy Storage Performance Using Sodium Thiosulfate Pentahydrate of a Conventional Solar Water-Heating System. *Energy and Buildings*. 37: 235 – 242.
- Farid, M.M., Khudair, A.M., Razack, S.A. K. dan Al-Hallaj, S. 2004. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion & Management*. 45: 1597 – 1615.
- Kenisarin, M. dan Mahkamov, K. 2007. Solar Energy Storage Using Phase Change Materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 11: 1913 – 1965.
- Sharma, S.D. dan Sagara, K. 2005. Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review. *International Journal of Green Energy*. 2: 1 – 56.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R. dan Buddhi, D. 2009. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13: 318 – 345.
- Barba, A. dan Spiga, M. 2003. Discharge Mode for Encapsulated PCMs in Storage Tanks. *Solar Energy*. 74: 141 – 148.
- Jamar, A., Majid, Z.A.A., Azmi, W.A., Norhafana, M. dan Razak, A.A. 2016. A

- review of water heating system for solar energy applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 76: 178–187.
- Nallusamy, N., Sampatha, S. dan Velraj, R. 2007. Experimental Investigation on a Combined Sensible and Latent Heat Storage System Integrated with Constant/Varying (Solar) Heat Sources. *Renewable Energy*. 32: 1206–1227.
- Fan, L. dan Khodadadi, J.M. 2011. Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15: 24 – 46.
- Jegadheeswaran, S. dan Pohekar, S.D. 2009. Performance Enhancement in Latent Heat Thermal Storage Systems: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13: 2225 – 2244.
- Canbazoglu, S., Sahinaslan, A., Ekmek-yapar, A., Aksoy, Y.G. dan Akarsu, F. 2005. Enhancement of Solar Thermal Energy Storage Performance Using Sodium Thiosulfate Pentahydrate of a Conventional Solar Water-Heating System. *Energy and Buildings*. 37: 235 – 242.
- Nadjib, M. dan Suhanan. 2013. Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal Proses *Charging* pada Pemanas Air Tenaga Surya Tipe *Thermosyphon* Menggunakan Air dan *Paraffin Wax* sebagai Material Penyimpan Kalor. *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII*. 23-24 Oktober 2013, Unila, Lampung. Hal. 355 – 359.
- Thaib, R., Hamdani, Irwansyah dan Zaini. 2014. Investigation Performance of Solar Water Heater System Using Paraffin Wax. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 9 (10): 1749 – 1752.
- Anonim. 2013. Data Sheet RT52. *Ru-bitherm Technologies GmbH*. Version 22 April 2013.
- Sari, A. dan Kaygusuz, K. 2002. Thermal and Heat Transfer Characteristics in A Latent Heat Storage System using Lauric Acid. *Energy Conversion and Management*. 43: 2493 – 2507.
- Agyenim, F. Hewitt, N. Eames, P. dan Smyth, M. 2010. A Review of Materials, Heat Transfer and Phase Change problem Formulation for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 615–628.