

Kajian Perpindahan Kalor Pada Tangki Pemanas Air Tenaga Surya Menggunakan Kapsul PCM Pipa-banyak Susunan Segaris

Muhammad Nadjib^{1,a*} dan Suhanan^{2,b}

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Jl. Lingkar Selatan, Tamantirto, Bantul, Yogyakarta 55183, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55581, Indonesia

email: nadjibar@yahoo.com, suhanan@ugm.ac.id

Abstrak

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji secara eksperimental perpindahan kalor pada tangki Pemanas Air Tenaga Surya (PATS) menggunakan kapsul pipa-banyak (*multitubes*) yang berisi *phase change material* (PCM). Disamping sebagai *heat transfer fluid* (HTF), air digunakan sebagai material *thermal energy storage* (TES) bersama *paraffin wax* di dalam tangki PATS. *Paraffin wax* diisikan ke dalam kapsul-kapsul berbentuk silinder dan disusun secara segaris (*inline*) di dalam tangki. Tangki PATS dihubungkan dengan kolektor matahari yang menjadi sumber kalor. Pengujian *charging* dilakukan pada sistem PATS untuk mengetahui proses pemanasan yang terjadi pada HTF dan PCM. Temperatur air dalam tangki dan temperatur PCM dalam kapsul direkam selama pemanasan. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sepanjang proses pemanasan tidak terjadi perbedaan temperatur yang signifikan antara HTF dan PCM. Rata-rata kecepatan pemanasan selama pengujian untuk HTF dan PCM masing-masing adalah 0,109 °C/menit dan 0,108 °C/menit. Pengamatan juga memberi hasil bahwa temperatur rata-rata kapsul yang berada di bagian bawah tangki lebih rendah daripada temperatur rata-rata HTF dengan selisih rata-rata 2,57°C selama tiga hari pengujian. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa proses perpindahan kalor dari air panas kolektor ke HTF dan dari HTF ke PCM berlangsung efektif. Penyimpanan kalor pada kapsul yang terpasang di bagian bawah tangki PATS kurang optimal.

Kata kunci : PATS, PCM, HTF, TES, SHS, LHS, kapsul silinder, proses *charging*

Latar belakang

PATS merupakan aplikasi teknologi energi matahari yang cukup populer di masyarakat. Kepopuleran ini berdasarkan kenyataan bahwa sistemnya sederhana dan sampai sekarang produknya banyak dijumpai. Komponen PATS umumnya terdiri dari kolektor matahari, tangki air panas, alat penukar kalor, pompa, sistem perpipaan, pemanas tambahan, dan panel kontrol pemanas. Berdasarkan jenis aliran HTF yang bersirkulasi, sistem PATS dikelompokkan dalam sistem aktif dan sistem pasif [1]. HTF bersirkulasi secara paksa pada sistem aktif menggunakan pompa, sedangkan pada sistem pasif tidak memerlukan pompa. Sirkulasi HTF pada sistem pasif terjadi secara alamiah yaitu aliran yang timbul akibat perbedaan densitas HTF di saluran masuk dan saluran keluar kolektor matahari. Aliran HTF pada sistem pasif ini dikenal sebagai

thermosyphon. PATS sistem pasif banyak diaplikasikan pada skala domestik.

Pemakaian air sebagai penyimpan kalor sensibel (*sensible heat storage*, SHS) pada sistem PATS domestik dapat diandalkan karena sifat perpindahan kalornya baik. Meskipun begitu, SHS ini cenderung memiliki karakteristik sistem yang berat karena densitas penyimpanannya rendah dan dapat menimbulkan masalah korosi serta kebocoran [2]. Di sisi lain, PCM sebagai penyimpan kalor laten (*latent heat storage*, LHS) mempunyai keunggulan khas yaitu fluktuasi temperatur selama *charging* dan *discharging* tidak tinggi, densitas penyimpanannya tinggi dan memiliki temperatur yang fleksibel dalam aplikasinya [3].

Paraffin wax sebagai salah satu jenis LHS berpotensi diaplikasikan pada PATS karena memiliki sifat seperti: densitas energinya cukup tinggi (~ 200 kJ/kg) [4]; kisaran temperatur leleh

produk *paraffin wax* antara 8 sampai 106°C [5]; tidak berbahaya dan tidak reaktif [6]; sifat termalnya stabil di bawah 500°C [7]; titik lelehnya tidak mengalami penurunan secara tetap selama pengulangan 1500 siklus termal [8].

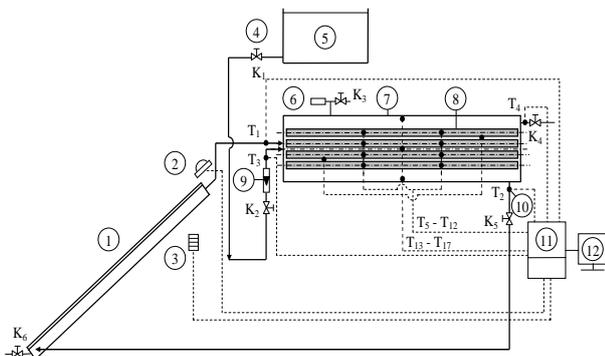
Aplikasi LHS mempunyai kelemahan yaitu rendahnya konduktivitas termal sehingga unjuk kerja termalnya juga rendah. Metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan unjuk kerja sistem LHS yaitu penggunaan perluasan permukaan (*extended surfaces*), pemakaian beberapa PCM (*multiple PCM*), peningkatan konduktivitas termal PCM dengan menambahkan material berkonduktivitas termal tinggi, dan pengkapsulan PCM (*PCM encapsulation*) [9].

Pada penelitian ini, metode peningkatan unjuk kerja sistem LHS yang dilakukan adalah dengan memperbesar luas permukaan perpindahan kalor menggunakan kapsul pipa-banyak yang di dalamnya berisi PCM. Tujuan penelitian adalah untuk mengkaji secara eksperimental perpindahan kalor pada tangki PATS sistem *thermosyphon* yang menggunakan kapsul PCM pipa-banyak.

Metodologi

Bahan yang digunakan adalah air dan *paraffin wax* sebagai PCM. *Paraffin wax* yang dipakai adalah RT52 produksi dari *Rubitherm Technologies GmbH* dengan kisaran temperatur pelelehan 49 – 53°C dan kalor laten peleburan 143 kJ/kg [10].

Peralatan yang dipakai adalah kolektor matahari (1), piranometer (2), sensor temperatur udara luar (3), katup (4), bak air (5), katup pengaman (6), tangki TES (7), kapsul PCM (8), rotameter (9), termokopel (10), *data logger* (11), dan PC (12). Sistem perpipaan alat ini terdiri dari 2 jalur, yaitu jalur tertutup antara kolektor matahari dan tangki serta jalur terbuka dari air sumber ke air panas pemakaian. Skema peralatan adalah seperti pada Gambar 1.



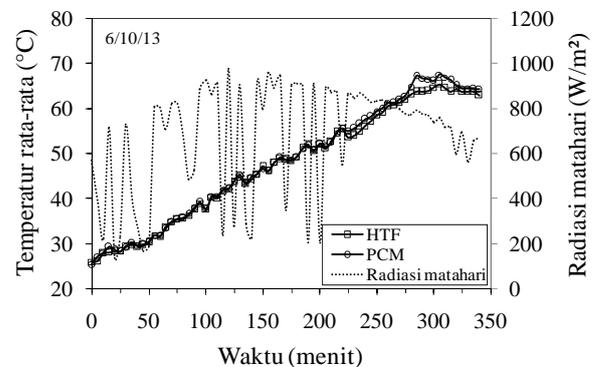
Gambar 1. Skema alat penelitian

Tangki horisontal volume 31,37 liter dihubungkan dengan kolektor matahari plat datar seluas 1,9 m² dimana tangki dipasang di sebelah atas kolektor. Di dalam tangki terdapat kapsul berisi PCM dengan jumlah 16 buah yang disusun segaris. Material kapsul adalah pipa tembaga berdiameter luar 2,54 cm dan panjang 1,63 m. Massa total PCM padat di dalam kapsul adalah 8,95 kg. Tangki dibalut dengan *glass wool* untuk mengurangi rugi-rugi termal ke lingkungan. Termokopel dipasang di sisi HTF (T₁ – T₄ dan T₁₃ – T₁₇) dan PCM (T₅ – T₁₂). Posisi piranometer diletakkan di samping kolektor. Alat akuisisi data USB-4718 dipakai untuk merekam data temperatur, sedangkan radiasi matahari direkam dengan *HOBO micro station*.

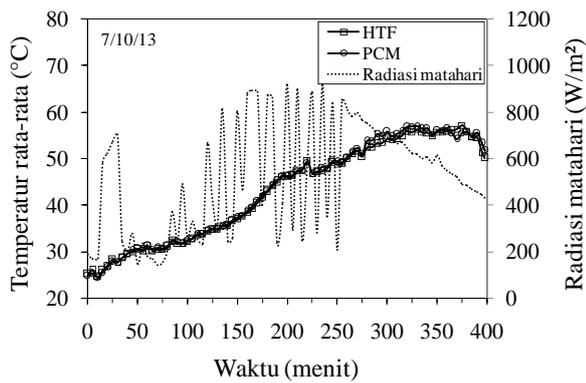
Penelitian dilakukan selama proses *charging* yaitu saat sistem PATS menerima energi dari matahari untuk memanaskan air yang berada di kolektor. Kolektor matahari dihadapkan ke utara dengan *tilt angle* 15°. Sistem PATS diisi air dengan membuka katup K₁, K₂, K₃, dan K₅, sedangkan K₄ dan K₆ ditutup. Katup K₂ dan K₃ ditutup apabila air telah memenuhi sistem PATS. Setelah itu sensor temperatur dan radiasi matahari diaktifkan secara bersamaan. Perekaman data temperatur HTF, PCM dan intensitas radiasi matahari dilakukan setiap 30 detik. Pengambilan data diakhiri jika temperatur PCM telah melebihi titik lelehnya. Pengujian dilaksanakan selama 3 hari dan dipilih yang mempunyai beda intensitas radiasi matahari rata-rata cukup jauh.

Hasil

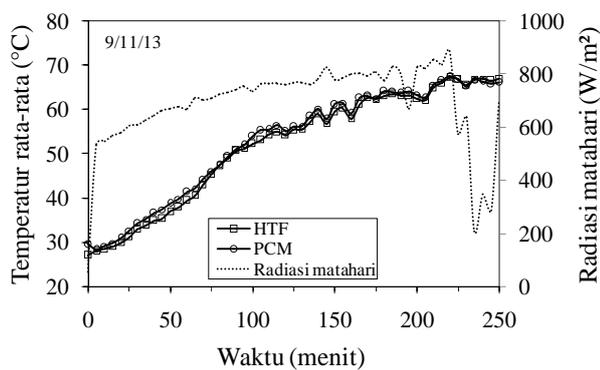
Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM diberikan pada Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4.



Gambar 2. Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM tanggal 6 Oktober 2013



Gambar 3. Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM tanggal 7 Oktober 2013



Gambar 4. Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM tanggal 9 Nopember 2013

Ketiga grafik di atas mempunyai kecenderungan yang sama yaitu kenaikan temperatur HTF dan PCM terjadi secara perlahan-lahan dan berfluktuasi. Perlahannya kenaikan temperatur disebabkan oleh rendahnya transfer kalor dari air panas kolektor ke air di dalam tangki dan dari air panas tangki menuju PCM. Kenaikan temperatur yang fluktuatif adalah akibat dari berubah-ubahnya intensitas radiasi matahari 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, dimana harga densitas air dipengaruhi oleh temperaturnya. Adanya intensitas radiasi matahari yang berfluktuasi mengakibatkan temperatur air keluar kolektor tidak stabil sehingga laju aliran massanya juga berubah-ubah. Dari sisi PCM, rendahnya transfer kalor dipengaruhi oleh harga konduktivitas termal yang rendah sehingga pengangkutan kalornya lambat.

Menurut Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4, temperatur HTF di dalam tangki mengalami kenaikan secara bertahap dan diikuti dengan kenaikan temperatur PCM yang juga bertahap. Selama proses *charging* tidak terjadi perbedaan

temperatur yang signifikan antara temperatur rata-rata HTF dan PCM. Kondisi ini menandakan 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. Kesebandingan tersebut ditunjukkan dengan besarnya kecepatan pemanasan rata-rata yang tidak berbeda jauh antara HTF dan PCM sebagaimana tertera pada Tabel 1. Rata-rata kecepatan pemanasan selama tiga hari pengujian adalah 0,109 °C/menit untuk HTF dan sebesar 0,108 °C/menit untuk PCM.

Tabel 1. Kecepatan pemanasan rata-rata HTF dan PCM

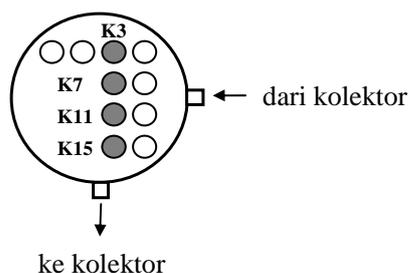
Rendahnya kecepatan pemanasan rata-rata pada Tabel 1 menunjukkan transfer kalor yang rendah baik di sisi HTF maupun PCM. Besarnya kecepatan pemanasan rata-rata HTF dan PCM dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari. Semakin besar intensitas radiasi matahari semakin besar pula laju transfer kalor yang terjadi sehingga temperatur air di dalam tangki dan temperatur PCM naik lebih cepat.

Saat intensitas radiasi matahari cukup stabil (mulai menit ke-217 sampai akhir *charging* pada Gambar 2 dan dari awal proses sampai menit ke-225 pada Gambar 4), terlihat temperatur PCM lebih tinggi daripada temperatur HTF. Hal ini mengindikasikan bahwa laju transfer kalor dari HTF ke PCM di dalam tangki lebih besar daripada laju kalor yang diterima HTF dari kolektor matahari.

Di antara 16 kapsul yang terpasang, dipilih empat kapsul untuk diketahui temperaturnya yaitu kapsul 3 (K3), kapsul 7 (K7), kapsul 11 (K11) dan

Tanggal	Kecepatan pemanasan rata-rata [°C/menit]		Intensitas radiasi matahari rata-rata [W/m ²]
	HTF	PCM	
6 Oktober 2013	0,114	0,118	661,45
7 Oktober 2013	0,061	0,064	519,02
9 November 2013	0,159	0,146	699,92

kapsul 15 (K15). Urutan kapsul tersebut menunjukkan posisi letak kapsul di dalam tangki dari atas ke bawah seperti gambar di bawah ini.



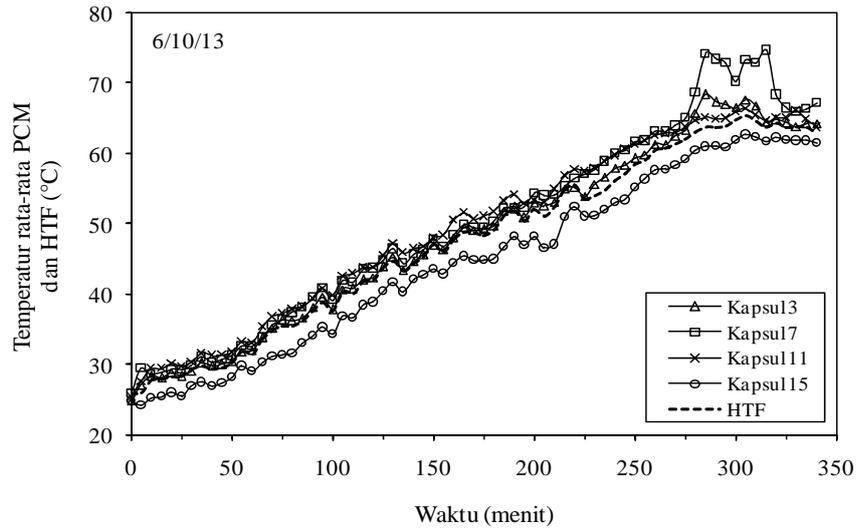
Gambar 5. Posisi pemasangan kapsul di dalam tangki

Evolusi temperatur rata-rata PCM di tiap kapsul dan temperatur rata-rata HTF disajikan pada Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8. Memperhatikan Gambar 6 dan Gambar 7, temperatur rata-rata PCM di dalam kapsul dari yang tertinggi berturut-turut adalah K7, K11, K3 dan K15. Sedangkan menurut Gambar 8, temperatur rata-rata PCM di dalam kapsul dari yang tertinggi adalah K11 kemudian disusul oleh K7, K3 dan K15. Seperti terlihat pada Gambar 5, posisi K7 sama dengan K11 terhadap pipa masuk air panas dari kolektor. Namun karena faktor pabrikan, letak K11 lebih dekat dengan pipa masuk air panas dibanding K7. Oleh karena itu temperatur rata-rata K11 lebih tinggi daripada K7 saat intensitas radiasi matahari tinggi sebagaimana terjadi pada pengujian tanggal 9 November 2013 (Gambar 8). Berbeda dengan Gambar 6 dan Gambar 7, pada Gambar 8 tampak jelas bahwa mulai dari awal sampai dengan hampir berakhirnya proses *charging*, K11 mempunyai temperatur rata-rata lebih tinggi daripada K7. Hal ini terjadi karena pengaruh intensitas radiasi matahari yang tinggi dan stabil selama pengujian. Intensitas radiasi matahari yang tinggi dan stabil menyebabkan temperatur air keluar dari kolektor juga tinggi sehingga kalor yang diserap air tangki di daerah tersebut meningkat. Akibat tingginya kalor yang diserap maka temperatur air tangki di sekitar K11 tinggi. Karena ada perbedaan

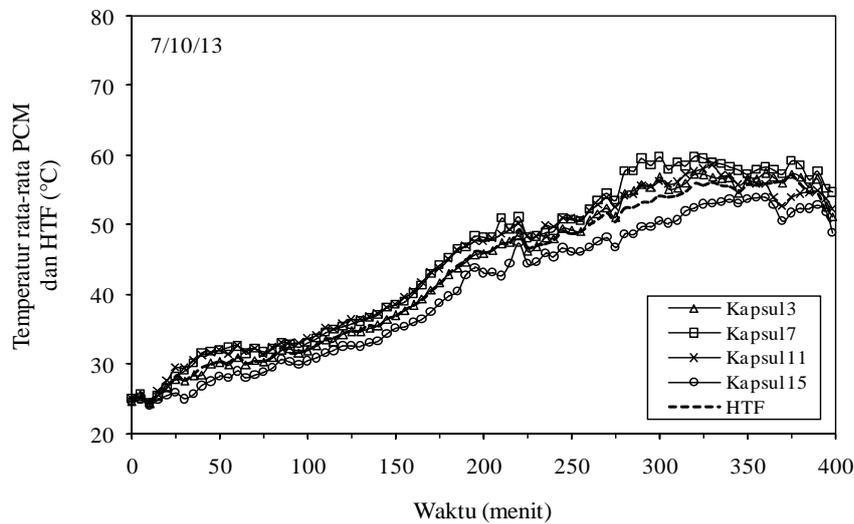
temperatur yang besar antara air di sekitar K11 dan PCM di dalam K11 maka terjadi transfer kalor yang tinggi menuju PCM K11. Kalor yang diterima PCM K11 di dekat pipa masuk ini kemudian mengalir ke sepanjang kapsul sehingga menyebabkan temperatur rata-rata PCM di dalam K11 tinggi.

Setelah proses *charging* berjalan 256 menit pada Gambar 6, 251 menit pada Gambar 7 dan 222 menit pada Gambar 8, temperatur rata-rata PCM K7 lebih tinggi daripada K3 dan K11. Sejak saat itu intensitas radiasi matahari mulai berkurang sehingga temperatur air keluar kolektor menurun. Menurunnya temperatur air dari kolektor menyebabkan beda temperaturnya dengan PCM K11 berkurang sehingga laju transfer kalor ke K11 rendah. Temperatur rata-rata K3 dipengaruhi oleh temperatur air di sekitarnya. Semestinya temperatur air di bagian atas tangki tinggi karena merupakan akumulasi air panas. Namun tingginya temperatur air ini mengakibatkan terjadinya rugi-rugi energi termal ke lingkungan yang cukup besar. Adanya rugi-rugi energi tersebut dan berkurangnya suplai energi termal ke K3 akibat rendahnya intensitas radiasi matahari maka temperatur rata-rata K3 lebih rendah dibanding K7 yang berada di bawahnya. Pada sistem tangki TES, insulasi termal memegang peranan penting untuk mengurangi rugi-rugi energi termal sehingga temperatur HTF di dalamnya dapat lebih dipertahankan.

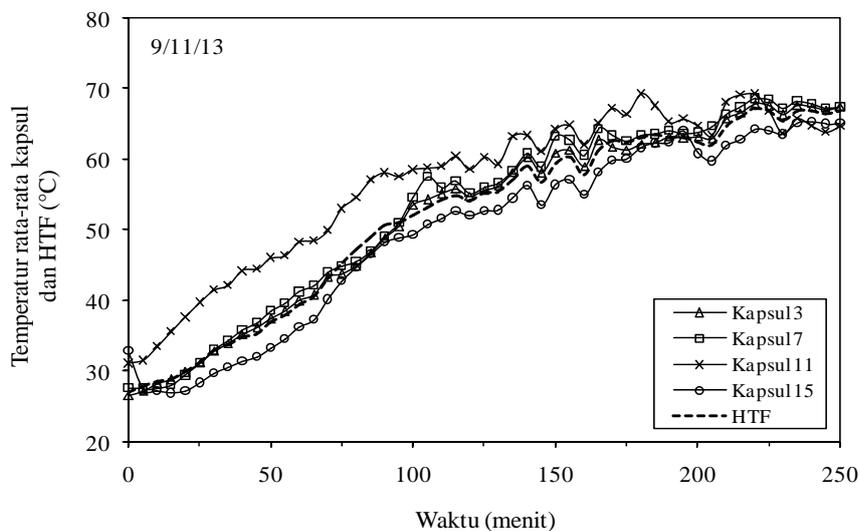
Berdasarkan Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8, dapat diketahui selisih temperatur rata-rata antara HTF dan tiap kapsul sepanjang pengujian *charging* seperti ditampilkan pada Tabel 2. Tabel 2 menunjukkan bahwa temperatur rata-rata HTF berada di atas temperatur rata-rata PCM K15 dan di bawah kapsul lainnya. Letak K15 adalah di tangki bagian bawah. Di daerah tersebut temperatur airnya rendah karena jauh



Gambar 6. Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM tanggal 6 Oktober 2013



Gambar 7. Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM tanggal 7 Oktober 2013



Gambar 8. Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM tanggal 9 November 2013

Tabel 2. Selisih temperatur rata-rata HTF dan kapsul

Tanggal	Selisih temperatur rata-rata [°C]			
	HTF-K3	HTF-K7	HTF-K11	HTF-K15
6 Oktober 2013	- 0,797	- 2,559	- 1,958	2,962
7 Oktober 2013	- 0,328	- 2,116	- 1,339	2,477
9 November 2013	- 0,217	- 1,001	- 4,736	2,276

Catatan:

Tanda minus menunjukkan temperatur HTF di bawah temperatur kapsul

dari pipa masuk air panas kolektor. Perbedaan temperatur antara air di sekitar K15 dan PCM di dalamnya tidak terlalu besar sehingga laju transfer kalornya rendah. Hal ini mengakibatkan temperatur rata-rata K15 rendah. Adanya selisih temperatur rata-rata antara HTF dan K15 tersebut menandakan bahwa kandungan energi termal pada K15 lebih rendah daripada energi termal yang dimiliki HTF.

Fungsi PCM adalah menyimpan energi termal dari air panas dan mensuplai energi saat HTF digunakan. Agar pemanfaatan energi tersebut optimal maka idealnya temperatur PCM mendekati atau lebih tinggi dari temperatur HTF. Mempertimbangkan hal tersebut dan berdasarkan kenyataan bahwa temperatur rata-rata K15 lebih rendah dari temperatur rata-rata HTF maka pemasangan kapsul di bagian bawah tangki kurang berfungsi optimal dalam menyimpan energi termal.

Kesimpulan

Alat penukar kalor berupa sekumpulan pipa kapsul PCM yang tersusun segaris di dalam tangki PATS telah berfungsi dengan baik memindah kalor dari HTF ke PCM. Kecepatan pemanasan rata-rata yang tidak jauh berbeda antara HTF dan PCM mengindikasikan bahwa proses transfer kalor berlangsung efektif. Penyimpanan kalor pada kapsul PCM di bagian bawah tangki kurang optimal sehingga sebaiknya dihindari pemasangan kapsul di daerah tersebut.

Referensi

- [1] V. Dwivedi, Thermal Modeling and Control of Domestic Hot Water Tank, University of Strathclyde, UK, 2009.
[2] D. Buddhi, N.K. Bansal, R.L. Sawhney, M.S. Sodha, Solar Thermal Storage Systems Using Phase Change Materials, Int. J. En. Res. 12 (1988) 457 – 555.

- [3] J.N.W. Chiu, Heat Transfer Aspects of Using Phase Change Material in Thermal Energy Storage Applications, KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, 2011.
[4] M.M. Farid, A.M. Khudair, S.A.K. Razack, S. Al-Hallaj, A review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications, En. Conv. and Mngt. 45 (2004) 1597 – 1615.
[5] M. Kenisarin, K. Mahkamov, Solar Energy Storage Using Phase Change Materials, Ren. and Sus. En. Rev. 11 (2007) 1913 – 1965.
[6] S.D. Sharma, K. Sagara, Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review, Int. J. Green En. 2 (2005) 1 – 56.
[7] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications, Ren. and Sus. En. Rev. 13 (2009) 318 – 345.
[8] A. Sharma, S.D. Sharma, D. Buddhi, Accelerated Thermal Cycle Test of Acetamide, Stearic Acid and Paraffin Wax for Solar Thermal Latent Heat Storage Applications, En. Conv. and Mngt. 43 (2002) 1923 – 1930.
[9] S. Jegadheeswaran, S.D. Pohekar, Performance Enhancement in Latent Heat Thermal Storage Systems: A Review, Ren. and Sus. En. Rev. 13 (2009) 2225 – 2244.
[10] Information on <http://www.rubitherm.com>