

## Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal pada Tangki

### Pemanas Air Tenaga Surya yang Berisi PCM

Muhammad Nadjib<sup>1, a \*</sup>, Sukamta<sup>1, b</sup>, Novi Caroko<sup>1, c</sup> dan Tito Hadji A.S.<sup>1, d</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

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

<sup>a</sup>nadjibar@yahoo.com, <sup>b</sup>msukamta@gmail.com, <sup>c</sup>novicaroko@gmail.com, <sup>d</sup>titohas@yahoo.com

#### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara eksperimental penyimpanan energi termal pada tangki Pemanas Air Tenaga Surya (PATS) yang di dalamnya berisi *phase change material* (PCM). Air sebagai fluida pemindah kalor (*heat transfer fluid*, HTF) dan *paraffin wax* digunakan bersama-sama untuk menyimpan kalor di dalam tangki. *Paraffin wax* dimasukkan ke dalam sekumpulan kapsul berbentuk silinder dan disusun secara horisontal serta segaris. Kolektor sebagai pengumpul energi matahari dihubungkan dengan tangki PATS. Sistem PATS dihadapkan dengan matahari sehingga terjadi proses pemanasan (*charging*) dimana HTF dan PCM akan bertambah temperaturnya akibat transfer kalor dari air kolektor. Temperatur HTF dan PCM direkam selama proses *charging*. Data temperatur digunakan untuk menyelidiki penyimpanan energi termal di dalam tangki. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas penyimpanan energi termal total PATS terbesar adalah 4,8 MJ dan kontribusi dari penggunaan PCM adalah 44,28% selama waktu *charging* 340 menit. Selain itu, energi tersimpan kumulatif terbesar yang diperoleh selama proses *charging* adalah 3,97 MJ. Perbedaan antara kapasitas penyimpanan energi dan energi tersimpan kumulatif merupakan energi yang terbuang ke lingkungan. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa PCM telah berfungsi menyimpan energi termal di dalam tangki. Desain sistem isolasi TES perlu mendapat perhatian untuk meminimalisir rugi-rugi termal ke lingkungan.

**Kata kunci** : PATS, PCM, TES, HTF, *paraffin wax*, proses *charging*

#### Latar belakang

Kebanyakan sistem termal yang menggunakan energi matahari memerlukan *thermal energy storage* (TES). TES dipakai untuk mengeliminasi ketidaksesuaian antara waktu suplai energi dan penggunaannya [1]. PATS adalah salah satu contoh aplikasi sistem energi matahari yang menghasilkan energi termal. Air sebagai penyimpan kalor sensibel adalah fluida yang umum digunakan pada PATS konvensional jenis *thermosyphon*. PATS tipe ini telah digunakan oleh masyarakat seperti di rumah tangga, restoran, rumah sakit dan hotel.

Penggunaan air pada PATS konvensional adalah metode yang dapat diandalkan karena harganya murah dan mempunyai sifat perpindahan kalor yang baik. Namun begitu, pemakaian air pada PATS mempunyai beberapa kelemahan, diantaranya adalah

densitas energinya rendah dan pelepasan energinya terjadi pada kisaran temperatur yang luas [2]. Rendahnya densitas air mengakibatkan kebutuhan volume TES yang besar untuk dapat menampung energi termal yang banyak.

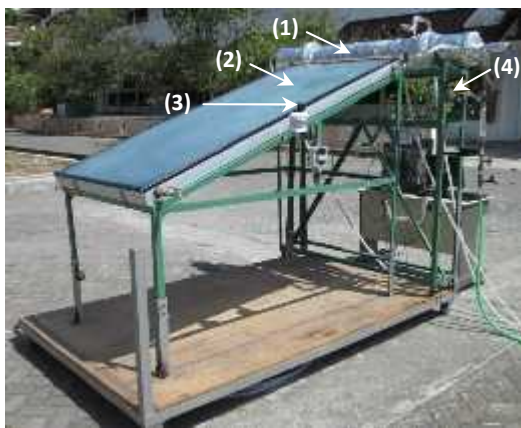
PCM adalah jenis penyimpan kalor laten yang telah dikembangkan sebagai material TES pada sistem pemanasan [3]. *Paraffin wax* merupakan salah satu PCM yang memiliki sifat antara lain: densitas energinya cukup tinggi (~ 200 kJ/kg) dan konduktivitas termalnya rendah (~ 0,2 W/m.°C) [4]; sifat termalnya stabil di bawah 500°C [5]; tidak berbahaya dan tidak reaktif [6] dan temperatur leleh beberapa produk *paraffin wax* bervariasi antara 8 sampai 106°C [7].

Berdasarkan sifat tersebut, *paraffin wax* menarik untuk diaplikasikan sistem PATS. Untuk itu perlu dilakukan studi eksperimental

pemakaian *paraffin wax* pada sistem PATS. Penelitian ini bertujuan melakukan investigasi kemampuan penyimpanan energi termal tangki PATS yang menggunakan air dan *paraffin wax* sebagai penyimpan energi termal.

**Metode**

Penelitian ini menggunakan bahan berupa air dan *paraffin wax* (RT52). Alat utama yang dipakai adalah seperti pada Gambar 1 yaitu tangki TES (1), kolektor matahari (2), piranometer (3) dan termokopel (4).



Gambar 1. Alat penelitian

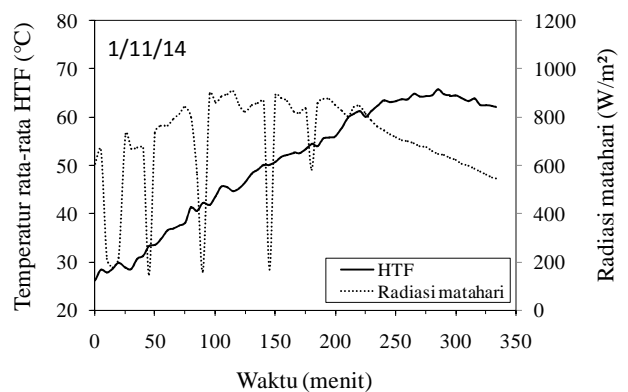
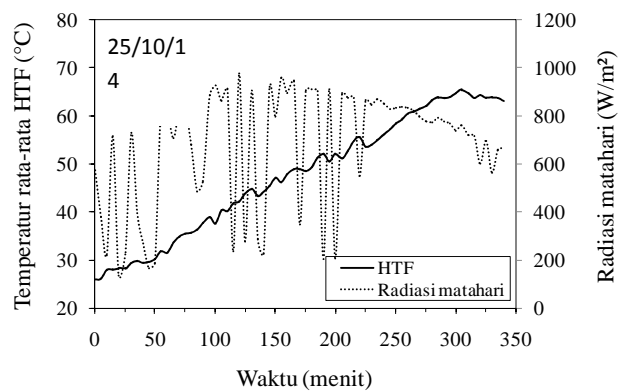
Kolektor matahari jenis plat datar seluas 1,9 m<sup>2</sup> dihubungkan dengan tangki bervolume 31,37 liter dimana posisi tangki berada di atas kolektor. Kolektor dipasang dengan *tilt angle* 15°. Di dalam tangki terdapat kapsul yang berisi PCM dengan jumlah 16 buah dan disusun secara segaris. Material kapsul adalah pipa tembaga dengan panjang 1,63 m dan diameter luar 2,54 cm. Massa total PCM adalah 8,95 kg. Termokopel dipasang di sisi HTF sejumlah 9 titik dan di sisi PCM sebanyak 8 titik. Alat akuisisi data USB-4718 digunakan untuk merekam data temperatur sedangkan intensitas radiasi matahari diukur dengan piranometer yang diletakkan di samping kolektor matahari.

Pengujian dilakukan selama proses pemanasan air di dalam kolektor yang selanjutnya memanaskan HTF dan PCM di tangki (proses *charging*). Pengujian dimulai dengan mengisi air di dalam sistem PATS hingga penuh kemudian membuka penutup

kolektor sehingga radiasi matahari mengenai permukaan kolektor. Setelah itu dilakukan perekaman data temperatur HTF dan PCM serta intensitas radiasi matahari setiap 30 detik. Pengambilan data diakhiri jika temperatur PCM telah melebihi titik lelehnya. Data yang diperoleh digunakan untuk menganalisis kemampuan penyimpanan energi termal di dalam tangki PATS.

**Hasil**

Evolusi temperatur rata-rata HTF di dalam tangki dan intensitas radiasi matahari selama dua hari pengujian (hari pertama tanggal 25 Oktober 2014 dan hari kedua tanggal 1 November 2014) disajikan pada Gambar 2.



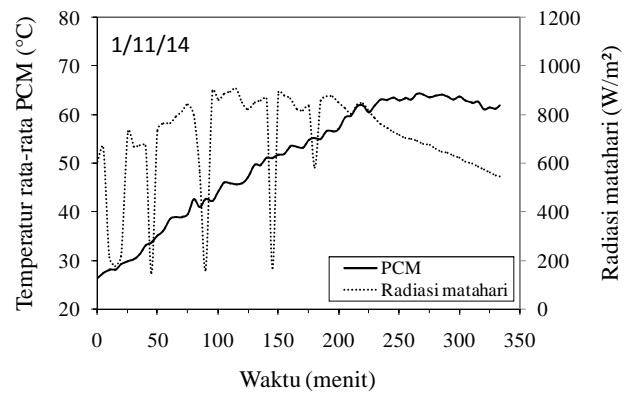
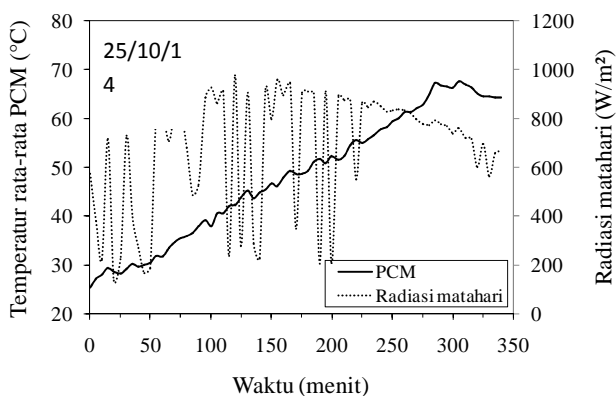
Gambar 2. Evolusi temperatur rata-rata HTF

Kedua grafik pada Gambar 2 membuktikan karakteristik yang khas pada PATS *thermosyphon* yaitu kenaikan temperatur

terjadi secara lambat yang disebabkan oleh rendahnya laju aliran massa air. Kondisi ini mempengaruhi laju perpindahan kalor yang terjadi. Oleh karena itu kenaikan temperatur HTF di dalam tangki menjadi rendah. Naik-turunnya evolusi temperatur rata-rata HTF utamanya disebabkan oleh berfluktuasinya intensitas radiasi matahari. Radiasi yang berubah-ubah menyebabkan energi termal yang diserap kolektor juga naik-turun, akibatnya temperatur HTF di tangki berfluktuasi.

Menurut Gambar 2, temperatur rata-rata HTF tertinggi pada pengujian hari kedua mencapai  $65,7^{\circ}\text{C}$  (menit ke-285) dimana lebih besar daripada pengujian hari pertama yaitu  $65,39^{\circ}\text{C}$  (menit ke-305). Setelah itu temperatur HTF berangsur-angsur turun. Penyebab turunnya temperatur ini adalah berkurangnya energi matahari yang diterima kolektor sehingga tidak mampu mengimbangi rugi-rugi energi ke lingkungan. Intensitas radiasi matahari rata-rata selama pengujian hari pertama sebesar  $676,2 \text{ W/m}^2$  sedangkan pada pengujian hari kedua adalah  $698,74 \text{ W/m}^2$ . Intensitas radiasi yang besar menyebabkan tingginya temperatur air keluar dari kolektor sehingga selisih temperatur dengan air di dalam tangki adalah besar. Hal ini mengakibatkan perpindahan kalornya juga besar.

Evolusi temperatur rata-rata PCM di dalam kapsul dan intensitas radiasi matahari selama dua hari pengujian diberikan pada Gambar 3.



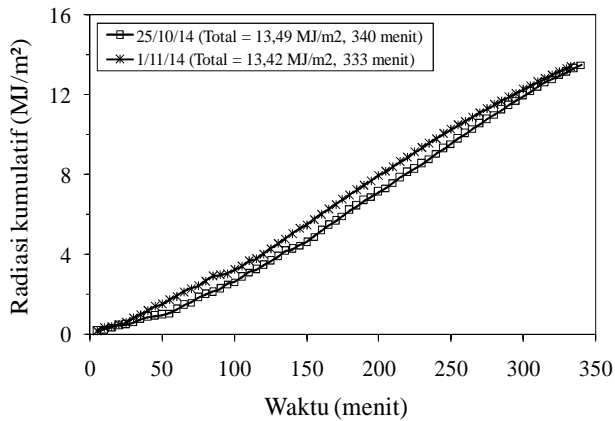
Gambar 3. Evolusi temperatur rata-rata PCM

Pola evolusi temperatur rata-rata PCM pada Gambar 3 hampir sama dengan temperatur HTF. Semakin lama temperatur PCM semakin naik secara lambat dan berfluktuasi. Semakin lama waktu berjalan, semakin besar energi termal yang diserap dari energi matahari dan dipindah ke HTF. Bertambah besarnya temperatur HTF mengakibatkan terjadinya proses perpindahan kalor dari HTF di dalam tangki TES ke PCM melalui kapsul. Lambatnya kenaikan temperatur PCM disebabkan oleh rendahnya konduktivitas termal PCM. Seperti halnya evolusi temperatur HTF, kenaikan temperatur PCM juga naik-turun yang disebabkan oleh berubah-ubahnya intensitas radiasi matahari.

Berdasarkan Gambar 3 diketahui bahwa temperatur PCM tertinggi pada pengujian hari pertama mencapai  $67,58^{\circ}\text{C}$  yang terjadi di menit ke-305, sedangkan pada pengujian hari kedua adalah  $64,25^{\circ}\text{C}$  yang terjadi di menit ke-265. Walaupun rata-rata intensitas radiasi matahari saat pengujian hari pertama lebih rendah namun temperatur PCM lebih tinggi daripada pengujian hari kedua. Kondisi ini disebabkan oleh penurunan radiasi matahari lebih cepat pada pengujian hari kedua setelah menit ke-200.

Radiasi matahari kumulatif selama dua hari pengambilan data ditampilkan pada

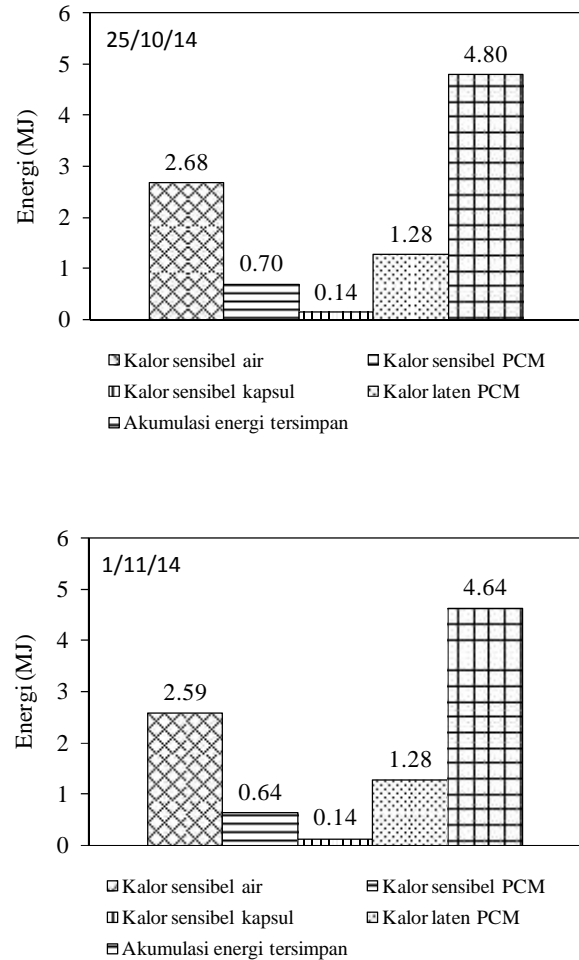
Gambar 4. Radiasi matahari kumulatif menggambarkan jumlah energi radiasi tiap satuan luasan yang mengenai kolektor secara kumulatif pada kurun waktu tertentu.



Gambar 4. Radiasi matahari kumulatif

Gambar 4 menunjukkan bahwa radiasi matahari kumulatif pada hari kedua lebih besar daripada hari pertama. Pada Gambar 2 dan Gambar 3 terlihat jelas bahwa intensitas radiasi matahari saat pengujian hari pertama sangat fluktuatif. Besarnya radiasi matahari kumulatif ini mengindikasikan bahwa jumlah energi matahari yang menimpa kolektor pada hari kedua lebih besar. Lama proses *charging* adalah 340 menit untuk hari pertama dan 333 menit pada hari kedua.

Kapasitas energi tersimpan adalah jumlah energi termal yang dapat disimpan di dalam tangki TES yang berasal dari kalor sensibel HTF, kalor sensibel kapsul dan kalor sensibel serta kalor laten PCM [8]. Perhitungan kapasitas energi ini dilakukan berdasarkan temperatur awal dan akhir selama proses *charging* baik untuk HTF maupun PCM. Kapasitas energi tersimpan di dalam tangki selama dua hari pengujian disajikan pada Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5. Kapasitas penyimpanan energi termal

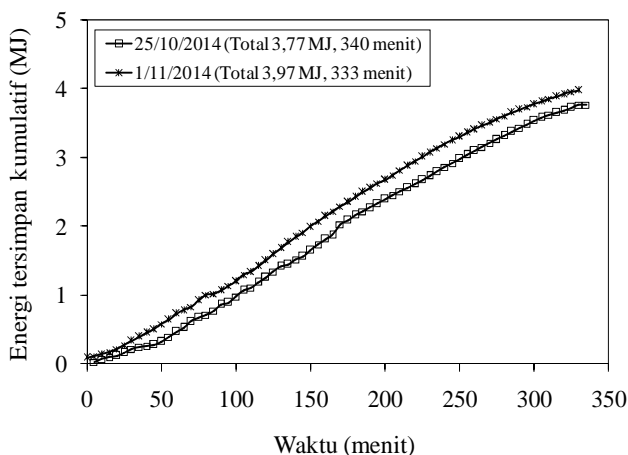
Temperatur awal dan akhir HTF masing-masing adalah 25,94°C dan 62,99°C serta temperatur awal dan akhir PCM masing-masing adalah 25,3°C dan 64,26°C untuk pengujian hari pertama. Pada pengujian hari kedua, temperatur awal HTF 26,2°C, temperatur akhir HTF 61,98°C, temperatur awal PCM 26,3°C dan temperatur akhir PCM adalah 61,92°C. Menurut Gambar 5, persentase penyimpanan energi oleh PCM dan kapsul terhadap penyimpanan total energi kalor selama proses *charging* adalah 44,28% untuk hari pertama dan 44,18% untuk hari kedua. Tingginya persentase penyimpanan energi pada pengujian hari pertama disebabkan oleh selisih antara temperatur akhir dan awal baik HTF maupun PCM yang lebih besar. Kapasitas energi total yang

tersimpan dengan adanya PCM pada pengujian hari pertama adalah 2,12 MJ, sementara kapasitas energi tersimpan pada hari kedua sebesar 2,06 MJ. Walaupun kapasitas energi tersimpan selama dua hari pengujian masih di bawah harga kalor sensibel air masing-masing, PCM telah berfungsi menyimpan energi termal di dalam tangki.

Energi tersimpan kumulatif (*cumulative heat stored*) diperoleh dari perkalian antara kalor tersimpan sesaat dengan waktu dan dijumlahkan secara kumulatif selama pengujian. Energi tersimpan kumulatif dalam dua hari pengujian ditunjukkan pada Gambar

Tangga l	Kapasitas penyimpanan energi (MJ)	Energi tersimpan kumulatif (MJ)	Selisih energi (MJ)
25/10/14	4,8	3,77	1,03
1/11/14	4,64	3,97	0,67

6.



Gambar 6. Energi tersimpan kumulatif

Energi ini menggambarkan akumulasi energi yang tersimpan nyata di dalam tangki TES. Rata-rata kecepatan perolehan energi saat *charging* pada pengujian hari pertama

adalah 0,185 kJ/detik, sedangkan pada pengujian hari kedua sebesar 0,199 kJ/detik. Rata-rata kecepatan perolehan energi saat *charging* pada pengujian ini termasuk rendah akibat kecilnya laju aliran massa air dari kolektor (proses *thermosyphon*). Laju aliran massa yang rendah menyebabkan kecilnya laju perolehan kalor dari kolektor matahari. Penelitian serupa menggunakan *paraffin wax* pada tangki yang dihubungkan dengan kolektor matahari diperoleh hasil bahwa rata-rata kecepatan perolehan energi saat *charging* adalah 0,855 kJ/detik untuk energi kumulatif 10 MJ dengan laju aliran massa HTF sebesar 2 liter/menit [8].

Apabila Gambar 6 dihubungkan dengan Gambar 4 maka dapat dipahami bahwa tingginya radiasi kumulatif pada pengujian hari kedua berkorelasi dengan besarnya energi tersimpan kumulatif. Intensitas radiasi yang tinggi menyebabkan kecepatan kenaikan temperatur air di dalam kolektor lebih besar yang pada akhirnya meningkatkan kecepatan kenaikan temperatur air di dalam tangki.

Harga penyimpanan energi menurut Gambar 5 dan Gambar 6 adalah berbeda. Perbedaan ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbedaan kapasitas penyimpanan energi dan energi kumulatif

Selisih energi pada tabel tersebut diduga merupakan kehilangan energi termal selama pengujian. Temperatur rata-rata udara luar pada pengujian hari pertama adalah 30,96°C, sedangkan pada pengujian hari kedua sebesar 32,41°C. Walaupun energi tersimpan kumulatif pada pengujian hari kedua lebih tinggi, namun karena temperatur rata-rata udara luar lebih tinggi maka kehilangan energi termalnya lebih rendah daripada pengujian hari pertama.

Kehilangan energi termal pada tangki PATS disebabkan oleh adanya perpindahan kalor konduksi dan konveksi. Laju perpindahan kalor konduksi dipengaruhi oleh perbedaan temperatur antara permukaan dalam tangki dan permukaan luar isolator serta tahanan termal tangki dan isolator. Laju perpindahan kalor konveksi tergantung oleh

perbedaan temperatur antara permukaan luar isolator dan udara luar serta luas permukaan isolator. Mempertimbangkan faktor yang mempengaruhi kehilangan energi termal tersebut, sistem isolasi memegang peranan yang penting. Untuk meminimalkan rugi-rugi energi termal ke lingkungan maka desain sistem isolasi pada tangki perlu diperhitungkan secara cermat baik bahan isolator maupun ketebalannya.

### Kesimpulan

*Paraffin wax* dapat diintegrasikan dengan air sebagai material penyimpan energi termal di dalam tangki PATS. Rugi-rugi termal dari tangki ke lingkungan tidak dapat dihindari, oleh karena itu desain sistem isolasi pada PATS memegang peranan penting.

### Ucapan Terima kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada LP3M UMY yang telah menyediakan fasilitas penelitian melalui Program Penelitian Unggulan Prodi dengan No. Kontrak 865/SP2-PL/LP3M-UMY/VI/2014.

### Referensi

- [1] L.A. Chidambaram, A.S. Ramana, G. Kamaraj, R. Velraj, Review of solar cooling methods and thermal storage options, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 3220 – 3228.
- [2] A. Hasan, Optimization of Domestic Solar Water Heating System, *International Journal of Solar Energy* 17 (1995) 135 – 144.
- [3] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza dan H. Mehling, Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications, *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 251 – 283.
- [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] A. Sharma, V.V.Tyagi, C.R. Chen dan D. Buddhi, Review on Thermal Energy Storage With Phase Change Materials and Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 318 – 345.

[6] S.D. Sharma dan K. Sagara, 2005, Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review, *International Journal of Green Energy* 2 (2005) 1 – 56.

[7] M. Kenisarin dan K. Mahkamov, Solar Energy Storage Using Phase Change Materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 1913 – 1965.

[8] N. Nallusamy, S. Sampatha dan R. Velraj, Experimental Investigation on a Combined Sensible and Latent Heat Storage System Integrated with Constant/Varying (Solar) Heat Sources, *Renewable Energy* 32 (2007) 1206–1227.