

Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal Proses *Charging* pada Pemanas Air Tenaga Surya *Thermosyphon* Menggunakan Air dan *Paraffin Wax* sebagai Material Penyimpan Kalor

Muhammad Nadjib¹⁾, Suhanan²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jl. Lingkar Selatan, Tamantirto, Bantul, Yogyakarta 55183

²⁾ Jurusan Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55581
Email: nadjibar@yahoo.com

Abstrak

Air umumnya dipakai sebagai material penyimpan kalor pada pemanas air tenaga surya (PATS). Material penyimpan kalor jenis sensibel (*sensible heat storage*, SHS) ini harganya murah dan memiliki sifat perpindahan kalor yang baik. Namun demikian, pemakaiannya memiliki kekurangan seperti: instalasi sistem relatif berat; pelepasan energinya terjadi pada jangkauan temperatur yang luas; cenderung menimbulkan korosi dan kebocoran. Material penyimpan termal jenis laten (*latent heat storage*, LHS) mempunyai keunggulan antara lain kerapatan energinya tinggi, instalasi sistem ringan, dan fluktuasi temperatur operasionalnya rendah, sedangkan kelemahannya adalah konduktivitas termalnya rendah. Mempertimbangkan keunggulannya, LHS berpotensi diaplikasikan pada PATS. Salah satu jenis material LHS komersial adalah *paraffin wax*. Tujuan penelitian ini adalah untuk menyelidiki secara eksperimental kemampuan penyimpanan energi termal selama proses *charging* pada PATS tipe *thermosyphon* yang mengintegrasikan air dan *paraffin wax* sebagai material penyimpan kalor. Tangki penyimpan energi termal (*thermal energy storage*, TES) berbentuk silinder dengan panjang 1,67 m, diameter luar 0,168 m dan volume 31,27 liter digabung dengan kolektor matahari. *Paraffin wax* (RT 52) sebagai *phase change material* (PCM) diisikan pada 16 kapsul silinder sebanyak 8,95 kg. Kapsul berdiameter luar 2,54 cm dan panjang 1,63 m diletakkan horisontal di dalam tangki. Termokopel dipasang di bagian SHS dan LHS. Piranometer diletakkan di dekat kolektor matahari. Penelitian dilaksanakan pada proses pemanasan (*charging*) hingga PCM mencair. Data temperatur SHS dan LHS digunakan untuk mengetahui evolusi temperatur HTF dan PCM selama proses *charging*. Berdasarkan temperatur masuk dan keluar HTF pada TES setiap waktu, dapat diestimasi kalor yang tersimpan sesaat. Selanjutnya, dilakukan pengintegralan kalor yang tersimpan sesaat terhadap waktu sehingga diketahui energi tersimpan kumulatifnya. Dari penelitian ini diketahui bahwa integrasi HTF dan PCM pada PATS tipe *thermosyphon* mampu menyimpan energi termal kumulatif sebesar 3,95 MJ selama proses *charging* dengan waktu 340 menit. Sistem TES ini menghasilkan temperatur rata-rata tertinggi HTF dan PCM masing-masing sebesar 65,39 °C dan 67,58 °C.

Keywords: kalor sensibel, kalor laten, pemanas air tenaga surya, *phase change material*, penyimpan energi termal

Pendahuluan

Radiasi matahari merupakan sumber energi yang tergantung oleh waktu dengan karakteristik yang sebentar-sebentar. Di lain pihak, kebutuhan pemakaian air panas khususnya pada skala domestik juga tergantung waktu. Radiasi matahari puncak terjadi di siang hari sedangkan puncak kebutuhan air panas pada sore dan malam hari dimana saat itu radiasi matahari tidak tersedia. Dengan demikian, antara ketersediaan sumber energi dan kebutuhan air panas tidak ada kesesuaian waktu. Oleh karena itu, penyimpan energi termal (*thermal energy storage*, TES)

diperlukan untuk menyediakan simpanan energi dan untuk mengatasi ketidaksesuaian tersebut.

Cara yang umum dan dapat diandalkan pada pemanasan air konvensional adalah penggunaan penyimpan kalor sensibel (*sensible heat storage*, SHS). Jenis penyimpan ini telah digunakan secara luas pada sistem PATS. Meskipun air harganya murah dan memiliki karakteristik perpindahan kalor yang baik, namun pemakaiannya membutuhkan volume yang besar karena air mempunyai kerapatan energi yang rendah. Selain itu, kelemahan penyimpanan kalor dengan air adalah pelepasan energinya terjadi pada jangkauan temperatur yang luas (Hasan, 1994). Menurut Buddhi *et al.* (1988), SHS menggunakan air cenderung memiliki karakteristik sistem

yang berat dan dapat menimbulkan masalah seperti korosi dan kebocoran.

Kekurangan penggunaan SHS pada PATS dapat diminimalkan dengan memakai penyimpan kalor laten (LHS). Penyimpanan jenis ini berpotensi menghasilkan sistem penyimpan termal dari energi matahari yang *compact* dan efisien (Buddhi *et al.*, 1988). Penyimpan energi termal dengan kalor laten yang menggunakan PCM sangat menarik karena mempunyai keuntungan yaitu penyimpanan kalornya tiap unit volume lebih besar daripada SHS dan pelepasan kalornya terjadi pada temperatur yang konstan (Watanabe dan Kanzawa, 1995). Canbazoglu *et al.* (2005) menambahkan bahwa LHS mempunyai keunggulan dalam operasional dibanding SHS karena fluktuasi temperaturnya rendah, ukurannya lebih kecil, dan berat tiap unit kapasitas penyimpanan lebih rendah. Namun begitu, aplikasi LHS mempunyai beberapa kelemahan yaitu kecepatan proses pengambilan dan pelepasan kalornya rendah yang disebabkan oleh rendahnya konduktivitas termal dari PCM (Watanabe dan Kanzawa, 1995).

Paraffin wax sebagai salah satu jenis penyimpan kalor laten memiliki karakteristik seperti: harganya murah, densitas energinya cukup tinggi (~ 200 kJ/kg), dan konduktivitas termalnya rendah (~ 0,2 W/m.°C) (Farid *et al.*, 2004); temperatur leleh beberapa produk *paraffin wax* bervariasi antara 8

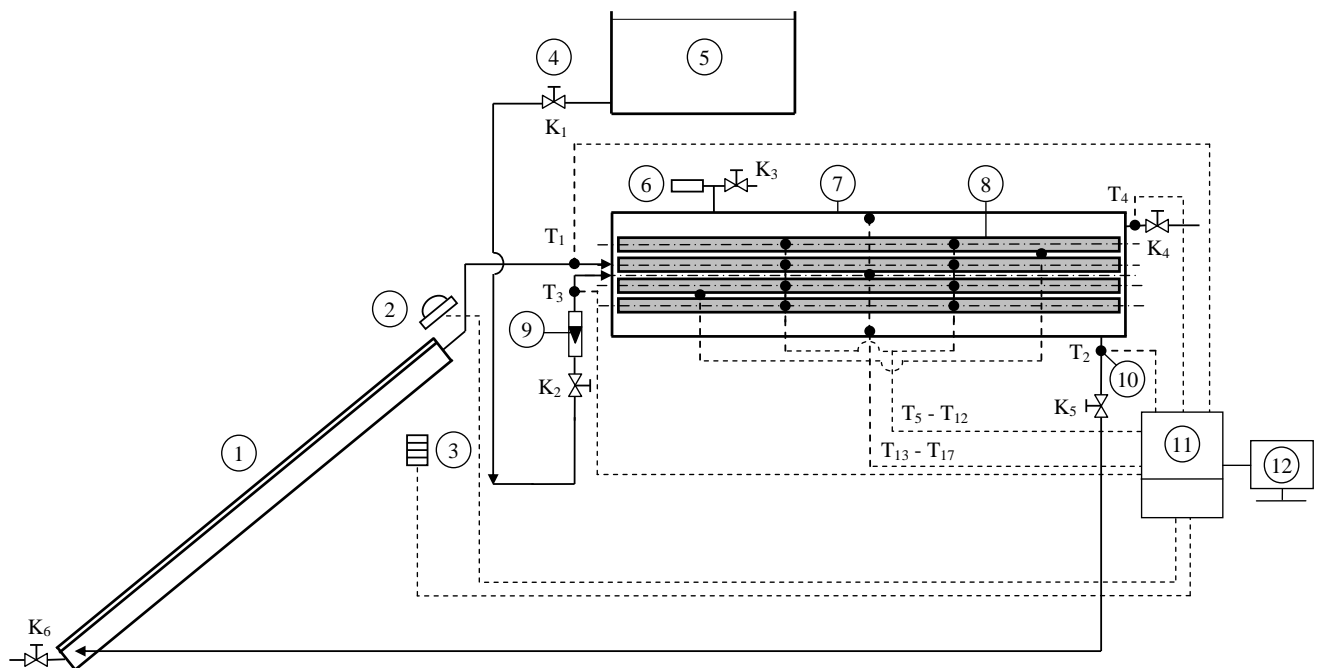
sampai 106 °C (Kenisarin dan Mahkamov, 2007); tidak berbahaya dan tidak reaktif (Sharma dan Sagara, 2005); sifat termalnya stabil di bawah 500 °C (Sharma *et al.*, 2009).

Berdasarkan uraian di atas maka *paraffin wax* memungkinkan diaplikasikan pada PATS konvensional. Untuk itu perlu dikaji secara eksperimental sejauh mana kemampuan penyimpanan energi termal sistem PATS tipe *thermosyphon* yang mengintegrasikan air dan *paraffin wax* sebagai material penyimpan kalor, khususnya selama proses *charging*.

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah air sebagai HTF dan *paraffin wax ex. Rubitherm RT52* sebagai PCM. Sifat termofisis RT52 adalah: temperatur leleh 52 °C (*main peak*); kalor laten peleburan 143 kJ/kg; kalor jenis spesifik 2 kJ/kg.K; massa jenis 0,88 kg/lit (fasa padat) dan 0,76 kg/lit (fasa cair); konduktivitas 0,2 W/m.K (fasa padat dan cair) (Anonim, 2013).

Alat yang dipakai adalah seperti skema pada Gambar 1. Kolektor yang digunakan tipe pelat datar dengan luas 1,9 m². Pengintegrasian air dan *paraffin wax* dilakukan di dalam tangki dimana kapsul-kapsul direndam dalam air. Tangki TES terbuat dari besi galvanis dengan panjang 1,67 m, diameter luar 0,168 m dan volume 31,27 liter. Tangki TES dibalut dengan pita asbes dan pita aluminium.



Gambar 1. Skema alat penelitian: (1) kolektor matahari, (2) piranometer, (3) sensor temperatur udara, (4) katup air ($K_1 - K_6$), (5) tangki air dingin, (6) *safety valve*, (7) tangki TES, (8) kapsul PCM, (9) rotameter air, (10) termokopel, (11) akuisisi data, (12) PC.

Di dalam tangki dipasang kapsul yang berisi PCM dengan jumlah 16 buah. Bahan 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. Air disamping sebagai HTF juga digunakan sebagai material SHS pada tangki TES dengan volume

18 liter. Termokopel dipasang di bagian SHS (di luar dan di dalam tangki TES) dan di bagian LHS (di dalam kapsul). Piranometer dipasang di dekat kolektor matahari untuk mengukur intensitas radiasi matahari.

Alat akuisisi data USB-4718 (Advantech) dipakai untuk merekam temperatur, sedangkan radiasi matahari direkam dengan HOB0 *micro station*.

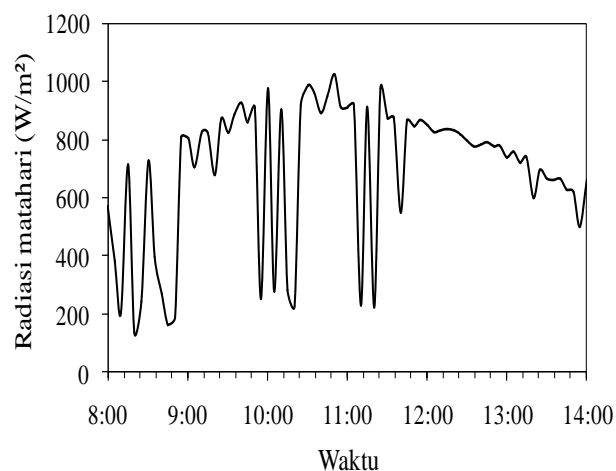
Penelitian diawali dengan melakukan kalibrasi terhadap termokopel. Penelitian ini dilaksanakan selama proses *charging* yaitu pemanasan HTF dan PCM di dalam tangki TES dengan air panas dari kolektor matahari secara *thermosyphon*. Temperatur titik-titik yang ingin diketahui dan radiasi matahari direkam setiap 30 detik. Pengambilan data diakhiri jika temperatur PCM telah melebihi temperatur lelehnya. Menurut Fath (1991), berdasarkan temperatur sesaat HTF masuk dan keluar, laju aliran massa air dan kalor jenis air dapat diestimasi kalor yang tersimpan sesaat (*instantaneous heat stored*).

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

Selanjutnya, persamaan (1) diintegrasikan terhadap waktu sehingga dapat diketahui energi kalor kumulatif yang tersimpan (*cumulative heat stored*) di dalam tangki TES.

Hasil dan Pembahasan

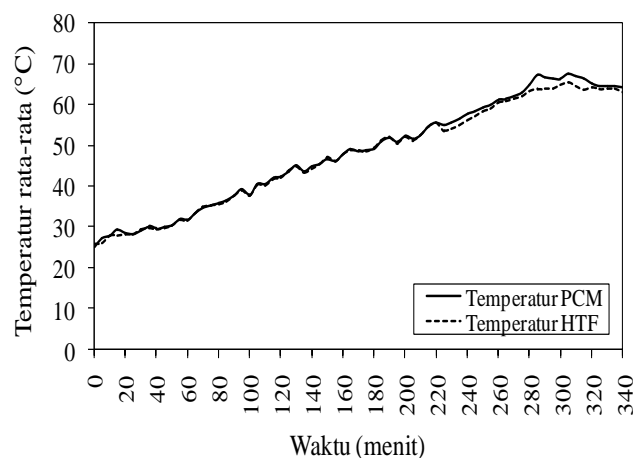
Intensitas radiasi matahari saat penelitian disajikan pada Gambar 2. Pada gambar tersebut diketahui bahwa intensitas radiasi matahari fluktuatif selama waktu penelitian, dengan rata-rata sebesar 642,42 W/m².



Gambar 2. Intensitas radiasi matahari.

Intensitas radiasi matahari yang berfluktuasi mempengaruhi penyerapan kalor pada kolektor matahari yang selanjutnya mengakibatkan pemanasan HTF dan PCM di dalam tangki TES terjadi secara bervariasi.

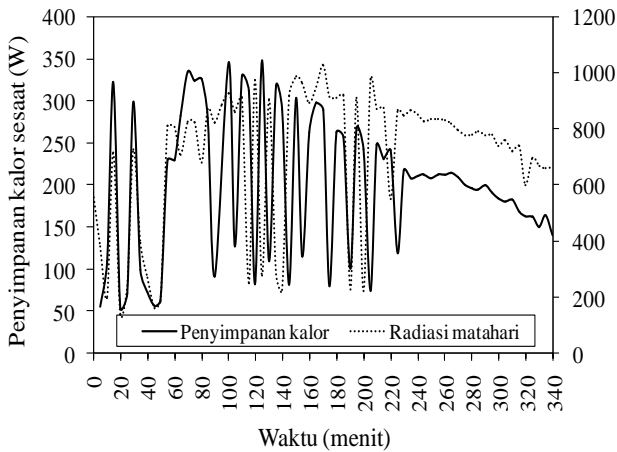
Gambar 3 menunjukkan evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM selama proses *charging*. Temperatur rata-rata HTF dan PCM tertinggi masing-masing adalah 65,39 °C dan 67,58 °C yang dicapai dalam 305 menit. Lamanya waktu pencapaian ini disebabkan oleh aliran air dari kolektor matahari terjadi secara *thermosyphon*.



Gambar 3. Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM selama proses *charging*.

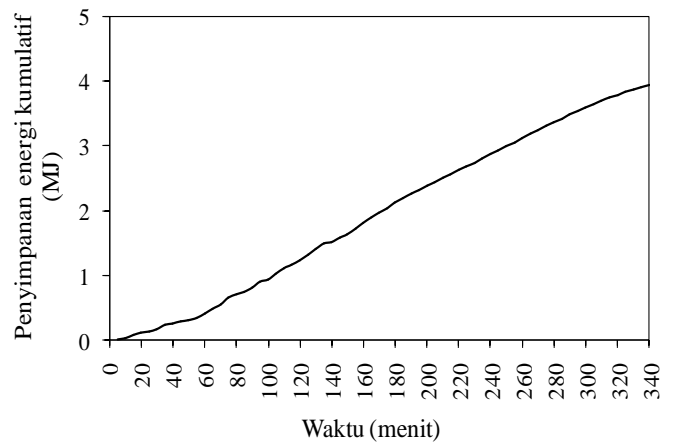
Temperatur HTF di dalam tangki TES berangsur-angsur naik sesuai dengan temperatur air panas dari kolektor matahari. Naiknya temperatur HTF diikuti dengan kenaikan temperatur PCM. Kenaikan temperatur HTF dan PCM terlihat tidak kontinyu. Hal ini disebabkan temperatur air dari kolektor matahari berubah-ubah akibat fluktuasi intensitas radiasi matahari. Menurut Gambar 3, temperatur HTF dan PCM berimpit sampai dengan waktu 220 menit. Kejadian ini disebabkan oleh perbedaan temperatur HTF dan PCM yang rendah di setiap bagian tangki. Hal serupa juga dijumpai pada penelitian Nallusamy *et al.* (2007) dimana perbedaan temperatur

antara HTF dan PCM adalah rendah selama proses pemanasan sensibel dan perubahan fasa. Setelah 220 menit, temperatur rata-rata PCM berada di atas temperatur rata-rata HTF. Pengaruh adanya konveksi pada PCM cair ditengarai menjadi penyebab peristiwa ini terjadi dimana meningkatkan konduktivitas termal dari PCM. Penyimpanan kalor sesaat di dalam tangki TES diberikan pada Gambar 4. Penyimpanan kalor sesaat diestimasi berdasarkan temperatur sesaat dari air masuk dan keluar tangki TES. Memperhatikan gambar tersebut, diketahui bahwa penyimpanan kalor sesaat bervariasi sepanjang waktu. Penyebab dominan keadaan ini adalah berubah-ubahnya intensitas radiasi matahari.



Gambar 4. Penyimpanan kalor sesaat pada tangki TES selama proses *charging*.

Menurut Nallusamy *et al.* (2007), penyimpanan kalor sesaat dipengaruhi oleh laju aliran massa HTF. Semakin besar laju aliran massa HTF, penyimpanan kalor semakin besar karena berhubungan dengan pengangkutan energi. Aliran HTF pada penelitian ini adalah *thermosyphon* sehingga penyimpanan kalor sesaatnya rendah. Penyimpanan kalor sesaat menunjukkan kecepatan perpindahan kalor di dalam tangki TES. Konduktivitas termal PCM yang rendah berkontribusi terhadap rendahnya kecepatan perpindahan kalor sehingga menyebabkan waktu proses pemanasan HTF dan PCM lama (Gambar 3).



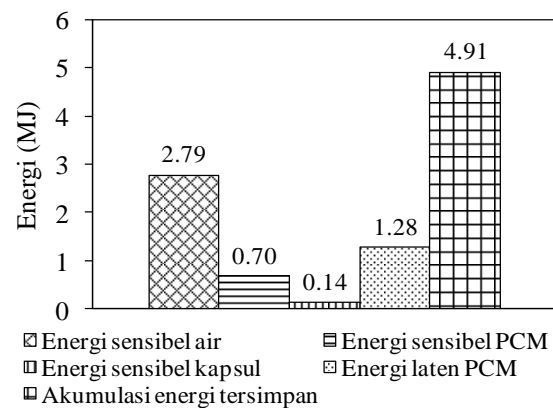
Gambar 5. Penyimpanan energi kumulatif pada tangki TES selama proses *charging*.

Gambar 5 menunjukkan penyimpanan energi kumulatif aktual di dalam tangki TES. Penyimpanan energi kumulatif naik seiring dengan waktu proses *charging*. Penyimpanan energi kumulatif secara teori dapat dicari berdasarkan energi sensibel yang terkandung pada HTF, energi sensibel dan laten yang ada di PCM, dan energi sensibel pada material kapsul (Fath (1991) dan Canbazoglu *et al.* (2005)). Keadaan HTF, PCM dan kapsul dalam penelitian ini diberikan pada Tabel 1 dengan asumsi temperatur kapsul sama dengan HTF.

Tabel 1. Keadaan HTF, PCM dan kapsul pada tangki TES.

Parameter	HTF	PCM	Kapsul
1. Berat (kg)	18	8.95	10,19
2. Temperatur awal (°C)	25,94	25,3	25,94
3. Temperatur akhir (°C)	63	64,26	63

Potensi energi sensibel, energi laten, dan penyimpanan energi kumulatif yang ada di dalam tangki TES ditampilkan seperti Gambar 6 berdasarkan tabel di atas. Gambar 6 dibuat tanpa memperhatikan rugi-rugi kalor selama proses *charging*.



Gambar 6. Energi yang tersimpan teoritis pada tangki TES.

Mengingat penyimpanan energi kumulatif aktual sebesar 3,95 MJ selama proses *charging* 340 menit (Gambar 5) dan energi sensibel air sebanyak 2,79 MJ (Gambar 6) maka PCM telah mampu menyimpan energi termal pada sistem TES. Harga penyimpanan energi kumulatif aktual lebih rendah daripada harga teoritis. Kondisi ini disebabkan antara lain: Gambar 5 mengakomodasi rugi-rugi kalor selama proses *charging*; tingkat fluktuasi intensitas radiasi matahari cukup tinggi selama penelitian; pengangkutan energi termal oleh HTF dari kolektor matahari menuju tangki TES adalah rendah karena mengikuti proses *thermosyphon*.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas disimpulkan bahwa integrasi air dan *paraffin wax* pada PATS tipe *thermosyphon* mampu menyimpan energi termal kumulatif sebesar 3,95 MJ selama proses *charging* dengan waktu 340 menit. Sistem TES ini menghasilkan temperatur rata-rata HTF tertinggi 65,39 °C dan temperatur rata-rata PCM tertinggi 67,58 °C. Dengan demikian, *paraffin wax* RT52 dapat diaplikasikan pada PATS tipe *thermosyphon*.

Ucapan Terima kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Program Casindo-Universitas Muhammadiyah Yogyakarta yang telah membantu penyediaan alat sehingga penelitian ini terlaksana.

Nomenklatur

c	kalor jenis (kJ/kg.K)
Q	kecepatan perpindahan kalor (W)
\dot{m}	laju aliran massa (kg/detik)
T	temperatur (°C)

Subsripts

i input

o output

p tekanan konstan

w water

Referensi

Anonim. Data Sheet RT52, *Rubitherm Technologies GmbH*, Version 22 April (2013)

Buddhi, D., Bansal, N.K., Sawhney, R.L., Sodha, M.S. Solar Thermal Storage Systems Using Phase Change Materials. *International Journal of Energy Research*, Vol. 12, 457 – 555 (1988)

Canbazoglu, S., Sahinaslan, A., Ekmekyapar, A., Aksoy, Y.G., Akarsu, F. Enhancement of Solar Thermal Energy Storage Performance Using Sodium Thiosulfate Pentahydrate of a Conventional Solar Water-Heating System. *Energy and Buildings*, Vol. 37, 235 – 242 (2005)

Farid, M.M., Khudair, A.M., Razack, S.A.K., Al-Hallaj, S. A review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, 1597 – 1615 (2004)

Fath, H.E.S. Heat Exchanger Performance for Latent Heat Thermal Energy Storage System. *Energy Conversion and Management*, Vol. 31, No. 2, 149 – 155 (1991)

Hasan, A. Phase Change Material Energy Storage System Employing Palmatic Acid. *Solar Energy*, Vol. 52(2), 143 – 154 (1994)

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

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

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

Sharma, A, Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Appliations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 318 – 345 (2009)

Watanabe, T., Kanzawa, A. Second Law Optimization of a Latent Heat Storage System with PCMs Having Different Melting Point. *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 15(7), 641 – 653 (1995)