

PENGUNAAN *PARAFFIN WAX* SEBAGAI PENYIMPAN KALOR PADA PEMANAS AIR TENAGA MATAHARI *THERMOSYPHON*

Muhammad Nadjib

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jl. Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta
E-mail: nadjibar@umy.ac.id

ABSTRAK

Pemanas Air Tenaga Matahari (PATM) konvensional umumnya menggunakan air sebagai penyimpan energi termal. Pemakaian *sensible heat storage* (SHS) ini memiliki kekurangan, diantaranya adalah densitas energinya rendah. Di sisi lain, *latent heat storage* (LHS) mempunyai sifat khas yaitu densitas energinya tinggi karena melibatkan perubahan fasa dalam penyerapan atau pelepasan kalor. Material LHS sering disebut *phase change material* (PCM). Penggunaan PCM pada PATM menarik dilakukan untuk meningkatkan densitas energi sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki perilaku termal penggunaan *paraffin wax* di dalam tangki PATM jenis *thermosyphon*. Penelitian menggunakan kolektor matahari pelat datar dan tangki *thermal energy storage* (TES) yang dipasang secara horisontal di sisi atas kolektor. Di dalam tangki terdapat alat penukar kalor yang terdiri dari sekumpulan pipa kapsul dimana di dalamnya berisi *paraffin wax*. Air digunakan sebagai SHS dan *heat transfer fluid* (HTF). Termokopel dipasang di sisi HTF dan sisi PCM. Piranometer dan sensor temperatur udara luar diletakkan di dekat kolektor matahari. Pengambilan data dilakukan selama proses *charging*. Temperatur HTF, PCM dan intensitas radiasi matahari direkam setiap 30 detik. Data ini digunakan untuk mengetahui evolusi temperatur HTF dan PCM. Berdasarkan evolusi temperatur ini kemudian dianalisis perilaku termal PATM. Hasil dari penelitian ini adalah bahwa *paraffin wax* telah berfungsi sebagai penyimpan energi termal bersama air di dalam tangki PATM jenis *thermosyphon*. PCM memberi kontribusi yang cukup signifikan terhadap kapasitas penyimpanan energi sistem. Efisiensi kolektor lebih optimal karena PCM dapat mempertahankan stratifikasi termal sampai akhir *charging*. Adanya PCM mampu mengendalikan penurunan efisiensi pengumpulan energi saat intensitas radiasi matahari menurun. Alat penukar kalor yang digunakan cukup efektif yang ditandai dengan kecepatan pemanasan rata-rata antara HTF dan PCM yang tidak berbeda jauh.

Kata kunci: *Paraffin wax*, Pemanas air tenaga matahari, *Phase change material*, Proses *Charging Thermal energy storage*

1. PENDAHULUAN

PATM termasuk teknologi pemanasan air yang cukup sukses dimana sampai saat ini banyak digunakan oleh masyarakat. Pemakaian PATS dapat memberi pengaruh yang besar terhadap aspek ekonomi, lingkungan dan konservasi energi [1]. Pendapat tersebut beralasan sebab pemanasan air memberi andil cukup besar terhadap konsumsi energi rumah tangga [2]. Energi utama PATM berasal dari matahari. Penggunaan energi ini dapat meminimalkan konsumsi energi fosil.

Karakteristik ketersediaan sumber energi PATM adalah tergantung oleh waktu dan kondisi cuaca. Di lain pihak, puncak kebutuhan air panas di rumah tangga terjadi 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 sebab itu, TES diperlukan untuk mengatasi ketidaksesuaian tersebut [3]. TES pada PATM konvensional adalah berupa tangki untuk menyimpan air panas.

SHS berupa air biasa digunakan pada PATM konvensional dan terbukti handal. Hal ini disebabkan air harganya murah dan memiliki karakteristik perpindahan kalor yang baik. Namun begitu, penggunaan air ini memiliki kekurangan, antara lain: berpotensi menimbulkan masalah seperti korosi dan kebocoran [4]; mempunyai kerapatan energi yang rendah dan pelepasan energinya terjadi pada kisaran temperatur yang lebar [5]; dan cenderung memiliki karakteristik sistem yang berat [6]. Kekurangan penggunaan SHS pada PATS dapat diminimalkan dengan memakai LHS. TES yang menggunakan PCM sebagai LHS sangat menarik karena mempunyai keuntungan seperti: berpotensi menghasilkan sistem penyimpan termal yang *compact* dan efisien [4]; penyimpanan kalornya tiap unit volume lebih besar daripada SHS dan pelepasan kalornya terjadi pada temperatur yang konstan [7]; dan fluktuasi temperatur operasional LHS rendah, ukurannya lebih kecil, dan berat tiap unit lebih rendah [8]. Namun demikian, aplikasi LHS mempunyai kelemahan yaitu kecepatan proses pengambilan dan pelepasan kalornya rendah yang disebabkan oleh rendahnya konduktivitas termal dari PCM [7].

Penggunaan PCM pada PATM sistem aktif secara eksperimental telah dilakukan oleh peneliti terdahulu [9-13]. PCM berupa *sodium acetate trihydrate* dimasukkan pada kapsul botol aluminium dan dipasang di dalam tangki TES

vertikal 146 liter [9]. Kapsul bola berbahan *high-density polyethylene* dan berisi *paraffin* diisikan ke dalam tangki TES vertikal 47 liter [10]. Campuran *paraffin*, *stearic acid*, *palmitic acid* dan *myristic acid* digunakan sebagai PCM dan ditempatkan pada kapsul silinder dari alumunium serta diletakkan di dalam tangki TES vertikal 150 liter [11]. Kapsul silinder alumunium berisi *paraffin wax* disusun di dalam tangki TES vertikal 107,4 liter [12]. Penambahan alat penukar kalor posisi vertikal pada HTF *loop* sistem PATM menggunakan pipa konsentrik dimana *paraffin wax* diisikan di dalam *annular space* [13]. Penelitian yang melibatkan PCM pada PATM sistem aktif menggunakan metode numerik dilaporkan oleh peneliti sebelumnya [14-17]. Simulasi matematik dilakukan terhadap PATM dengan tangki TES vertikal volume 150 liter baik yang berisi PCM maupun tanpa PCM dimana kapsul berupa tabung serta PCM yang digunakan adalah $\text{NaOAc} \cdot 3\text{H}_2\text{O} - \text{graphite}$ dan $\text{RT42} - \text{graphite}$ [14]. Wu dkk [15] melakukan studi numerik penambahan *paraffin* di dalam tangki vertikal 1000 liter memakai kapsul bola *packed bed*. Kousksou dkk [16] melanjutkan penelitian Talmatsky dan Kribus [14] dengan studi numerik tentang operasional PATM secara tahunan. Haillot dkk [17] menyelidiki efisiensi sistem PATM dengan tangki TES vertikal yang ditambahkan alat penukar kalor pada HTF *loop* melalui studi parametrik. Alat penukar kalor berupa *shell-pipe* dimana *compressed expanded graphite* digunakan sebagai PCM dan diisikan di dalam *shell*, sementara itu HTF mengalir di dalam pipa-pipa. Bouadila dkk [18] meneliti secara numerik dan eksperimental penambahan lempengan berisi *paraffin* di bawah kolektor matahari.

Penelitian PATM sistem pasif yang melibatkan PCM tidak banyak dijumpai dalam literatur. PATM sistem pasif dengan tangki vertikal volume 190 liter dan di dalamnya terdapat botol *polyethylene* berisi PCM, diuji secara eksperimental dengan sumber kalor dari kolektor matahari [19]. Volume PCM dan air di dalam tangki masing-masing adalah 107,8 dan 82,2 liter. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini yaitu waktu penyimpanan air panas, massa air panas yang dihasilkan dan akumulasi kalor total sistem yang dikombinasikan dengan PCM lebih besar 2,59 – 3,45 kali dibanding sistem konvensional. Tarhan dkk [20] membuat dan menguji PATM pasif berpenampang trapesiodal dimana penyimpanan HTF dijadikan satu dengan kolektor matahari. Unit dibuat 3 buah yaitu unit kontrol tanpa PCM, unit *storage* yang berisi PCM *lauric acid*, dan unit *insulation* berisi *myristic acid* sebagai PCM. Volume total unit adalah 100 liter. Bagian atas unit dipasang penutup kaca setebal 3 mm. Pengujian dilakukan secara *outdoor*. Hasil penelitiannya menyebutkan bahwa penambahan PCM memberikan pengaruh yang berbeda terhadap unjuk kerja termal unit. *Lauric acid* berpengaruh positif terhadap kestabilan temperatur dan mampu mengurangi volume tangki air pada penggunaan siang hari. Sementara itu, *myristic acid* lebih efektif untuk mempertahankan temperatur air di malam hari. Analisis matematik telah dilakukan pada suatu PATM yang melibatkan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sebagai PCM dimana TES terintegrasi dengan kolektor [21]. PCM diisikan dalam sebuah kotak dan diletakkan di bawah alat penukar kalor. Penelitian ini menyimpulkan bahwa efisiensi energi bersih sistem lebih tinggi daripada efisiensi eksergi. Kapsul berupa lembaran berisi campuran antara *paraffin* dan busa aluminium dipasang di bawah kolektor matahari dan dihubungkan dengan tangki TES [22]. Studi numerik dilakukan pada unit tersebut dimana algoritma SIMPLEC dipakai untuk memecahkan persamaan kontinuitas dan momentum. Studi ini hanya dilaksanakan pada saat proses *charging* secara *outdoor*. Hasil penelitiannya adalah bahwa penggunaan busa aluminium di dalam *paraffin* memiliki pengaruh yang besar pada transfer kalor dan laju pelelehan *paraffin*.

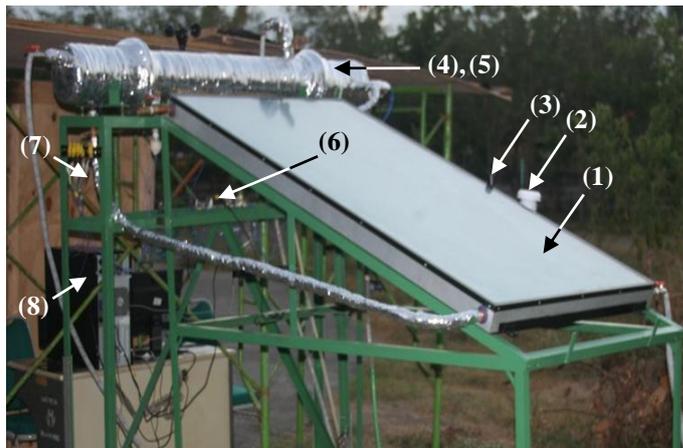
Penelitian tentang PATM sistem pasif lebih banyak dilakukan terhadap tipe *integrated collector storage* sebagaimana uraian di atas. Fokus penelitian ini adalah PATM jenis *thermosyphon* dimana kolektor matahari terpisah dengan unit penyimpan energi (tangki TES). Adapun tujuan penelitian adalah menyelidiki perilaku termal PATM jenis *thermosyphon* yang berisi *paraffin wax* di dalam tangki TES saat pengujian *charging* secara *outdoor*. Sistem ini mengkombinasikan *paraffin wax* dan air sebagai material penyimpan energi termal. Hasil penelitian diharapkan dapat *data base* penelitian serupa berikutnya dengan hilirisasi berupa produk baru PATM.

2. MATERIAL DAN METODOLOGI

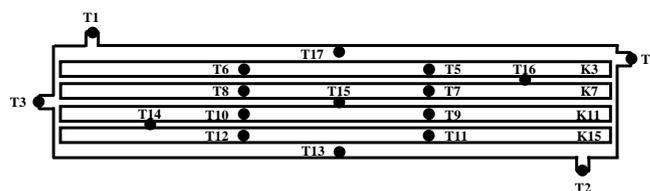
Penelitian ini menggunakan material berupa air sebagai HTF dan *paraffin wax* sebagai PCM. *Paraffin wax* yang dipakai adalah RT52 dengan sifat termofisik seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat termofisik *paraffin wax* RT52 [23].

Sifat-sifat	Harga			
	Minimum	Main peak	Maksimum	Rata-rata
Pelelehan	49 °C	52 °C	53 °C	
Pembekuan	48 °C	52 °C	52 °C	
Kalor laten peleburan				143 kJ/kg
Kalor jenis spesifik				2 kJ/kg.K
Massa jenis:				
- Cair				0,88 kg/liter
- Padat				0,76 kg/liter
Konduktivitas termal (padat dan cair)				0,2 W/m.K



Gambar 1. Alat penelitian.



Gambar 2. Posisi penempatan termokopel.

PATM sistem pasif pada penelitian ini menggunakan jenis *thermosyphon*. Instalasi alat penelitian adalah seperti pada Gambar 1 dengan komponen utama yaitu kolektor matahari (1), sensor temperatur udara luar (2), piranometer (3), tangki TES (4), kapsul berisi PCM di dalam tangki (5), alat akuisisi data (6), termokopel (7) dan PC (8).

Kolektor matahari disambungkan dengan tangki TES dimana tangki diletakkan di sisi atasnya secara horisontal. Kolektor matahari yang digunakan adalah tipe pelat datar dengan luas 1,9 m². Pemasangan kolektor matahari diarahkan ke utara dengan *tilt angle* 15°. Volume tangki adalah 31 liter dengan panjang 1,67 m dan diameter luar 0,168 m. Di dalam tangki dipasang alat penukar kalor berupa berkas kapsul berisi PCM yang tersusun secara horisontal dan *in-line*. Jumlah kapsul yang dipakai adalah 16 buah. Kapsul terbuat dari pipa tembaga berdiameter luar 2,54 cm dan panjang 1,63 m. Massa total PCM padat yang ada di dalam kapsul adalah 8,95 kg. Air disamping sebagai HTF juga digunakan sebagai material SHS pada tangki TES. Volume air yang terdapat di dalam tangki adalah 18 liter. Tangki TES diberi insulasi dari pita asbes dan pita alumunium untuk mengurangi rugi-rugi kalor ke lingkungan. Termokopel dipasang di sisi HTF (di luar dan di dalam tangki TES) dan di sisi PCM (di dalam kapsul). Dari ke-16 kapsul tersebut, hanya 4 buah kapsul yang dipasang termokopel yaitu K3, K7, K11 dan K15 serta tiap kapsul terdapat 2 buah termokopel. Penempatan termokopel dan susunan kapsul di dalam tangki TES diilustrasikan pada Gambar 2.

Piranometer dipasang di dekat kolektor matahari untuk mengukur intensitas radiasi matahari dengan kemiringan mengikuti kolektor. Sensor temperatur udara luar dipasang di dekat piranometer. Alat akuisisi data HOB0 *micro station* digunakan untuk merekam intensitas radiasi matahari dan temperatur udara luar, sedangkan USB-4718 dipakai untuk merekam temperatur HTF dan PCM. Instalasi perpipaan alat terdiri dari dua jalur. Pertama adalah jalur tertutup yaitu antara tangki TES dan kolektor matahari, sedangkan kedua adalah jalur terbuka dari air sumber ke air panas pemakaian.

Penelitian dilaksanakan saat proses *charging* yaitu selama pemanasan HTF oleh energi matahari dan mengikuti proses *thermosyphon* dimana aliran air panas dari kolektor menuju tangki TES terjadi berdasarkan perbedaan densitas air. Dengan kata lain, pada pengujian ini laju aliran massa air yang melewati kolektor tidak diatur. Langkah pertama yang dilakukan adalah pengecekan kebocoran air di beberapa sambungan dan *outlet* termokopel. Pengecekan dilaksanakan secara *outdoor* dengan terlebih dahulu sistem diisi air. Setelah tidak terjadi kebocoran maka proses pengambilan data dimulai. Sistem PATM diisi air lagi hingga penuh. Selama pengisian ini, kolektor matahari harus ditutup agar tidak terjadi proses pemanasan air. Setelah air penuh maka pengujian dilakukan dengan diawali membuka penutup kolektor. Parameter yang direkam adalah intensitas radiasi matahari, temperatur HTF, temperatur PCM, dan temperatur udara luar. Selama proses *charging*, temperatur HTF dan PCM direkam dengan interval waktu 30 detik. Temperatur HTF yang direkam adalah T1 dan T2 untuk lokasi di luar tangki TES dan T13 sampai T17 untuk lokasi di dalam tangki. Temperatur PCM yang diambil adalah T5 sampai dengan T12. Pada saat yang bersamaan, intensitas radiasi matahari yang menimpa kolektor dan temperatur udara luar juga direkam. Proses *charging* ini dilakukan hingga temperatur PCM yang ada di kapsul terbawah sedikit melampaui temperatur lelehnya. Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium Konversi Energi Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

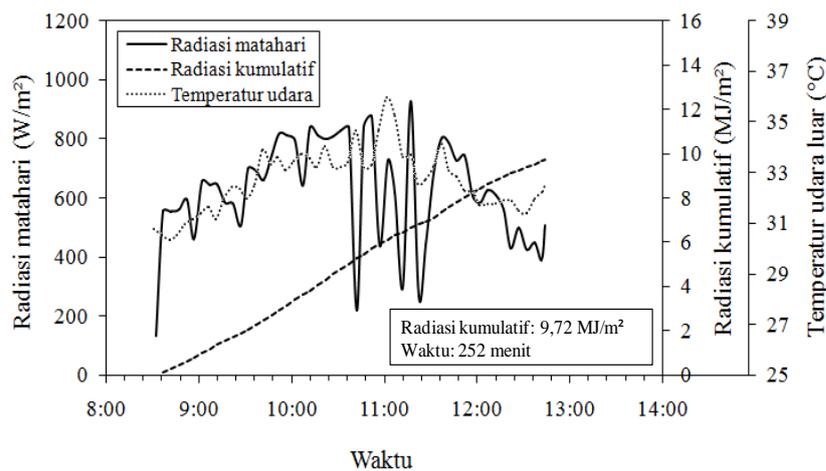
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Radiasi matahari

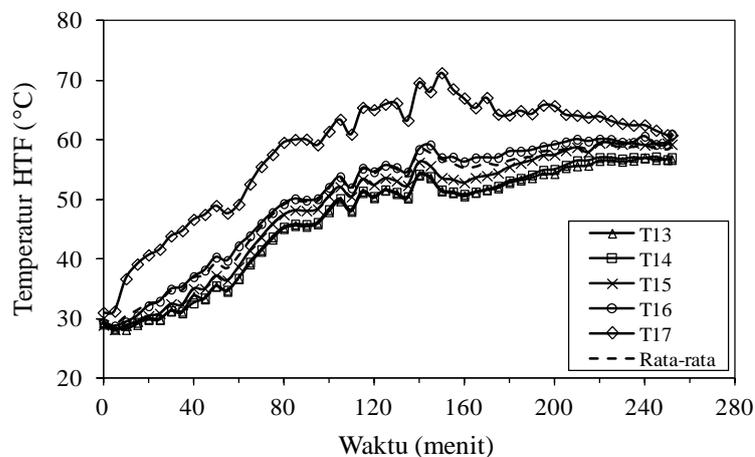
Radiasi matahari yang menimpa kolektor dan temperatur udara luar sejak awal sampai akhir proses *charging* disajikan pada Gambar 3. Pengujian dilakukan dari pukul 08:32 sampai 12:44. Berdasarkan Gambar 3 diketahui bahwa pengujian ini terlaksana dalam cuaca *cloudy condition* dimana intensitas radiasi matahari cukup fluktuatif. Intensitas radiasi matahari naik berfluktuasi ringan sampai pukul 10:37 kemudian berfluktuasi sangat hebat hingga pukul 11:37 dan setelah itu menurun sampai dengan pukul 12:44. Rata-rata intensitas radiasi matahari selama pengujian adalah $642,03 \text{ W/m}^2$. Gambar 3 menginformasikan bahwa berubah-ubahnya intensitas radiasi matahari mempengaruhi temperatur udara luar dengan pola grafik mengikuti radiasi matahari. Gambar 3 juga menunjukkan radiasi kumulatif yaitu jumlah radiasi matahari yang menimpa kolektor selama proses *charging*. Radiasi kumulatif ini dapat digunakan untuk mengetahui energi matahari rata-rata yang mengenai kolektor matahari. Besarnya energi matahari rata-rata dalam penelitian ini adalah sebesar $1,22 \text{ kJ/detik}$.

3.2. Evolusi temperatur HTF

Gambar 4 menunjukkan perubahan temperatur air di dalam tangki TES seiring dengan waktu selama proses *charging* pada 5 buah termokopel. Kenaikan temperatur HTF terjadi secara perlahan-lahan dan berfluktuasi. Temperatur air di dalam tangki TES tergantung oleh temperatur air keluar kolektor. Duffie dan Beckman [24] menyatakan bahwa intensitas radiasi matahari mempengaruhi energi yang diserap oleh kolektor dan selanjutnya juga berpengaruh terhadap energi berguna yang dihasilkan kolektor. Energi berguna ini berkontribusi langsung terhadap temperatur air keluar kolektor. Oleh karena itu berfluktuasinya intensitas radiasi matahari menyebabkan temperatur air di dalam tangki juga berubah-ubah. Perlahannya kenaikan temperatur pada grafik tersebut disebabkan oleh kenaikan temperatur air keluar kolektor yang terjadi secara berangsur-angsur. Karakteristik evolusi temperatur pada Gambar 4 tidak jauh berbeda dengan hasil penelitian yang pernah dilakukan oleh Nallusamy dkk [10].



Gambar 3. Radiasi matahari dan temperatur udara luar.



Gambar 4. Evolusi temperatur HTF.

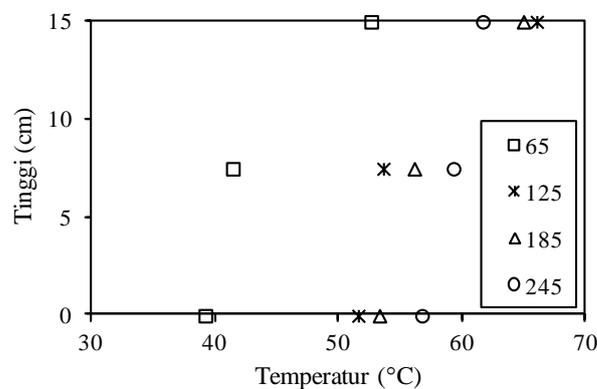
Memperhatikan Gambar 4, kenaikan temperatur dari awal proses sampai dengan menit ke-135 lebih cepat daripada proses berikutnya. Cepatnya kenaikan temperatur ini mengindikasikan bahwa laju transfer kalornya lebih besar. Hal ini disebabkan oleh besarnya intensitas radiasi matahari di awal proses. Intensitas radiasi yang besar 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.

Temperatur rata-rata HTF di dalam tangki saat awal *charging* adalah 29,55 °C, sedangkan temperatur rata-ratanya di akhir *charging* sebesar 58,68 °C. Temperatur akhir ini dicapai setelah melalui proses pemanasan selama 252 menit dengan kecepatan pemanasan rata-rata 0,109 °C/menit. Kecepatan pemanasan rata-rata merupakan harga rata-rata dari kecepatan pemanasan HTF setiap interval waktu (30 detik) selama proses *charging*. Rendahnya kecepatan pemanasan ini disebabkan oleh rendahnya intensitas radiasi matahari ditambah dengan adanya fluktuasi sepanjang pengujian. Penyebab yang lain adalah rendahnya laju aliran massa HTF yang hanya mengandalkan efek *thermosyphon*.

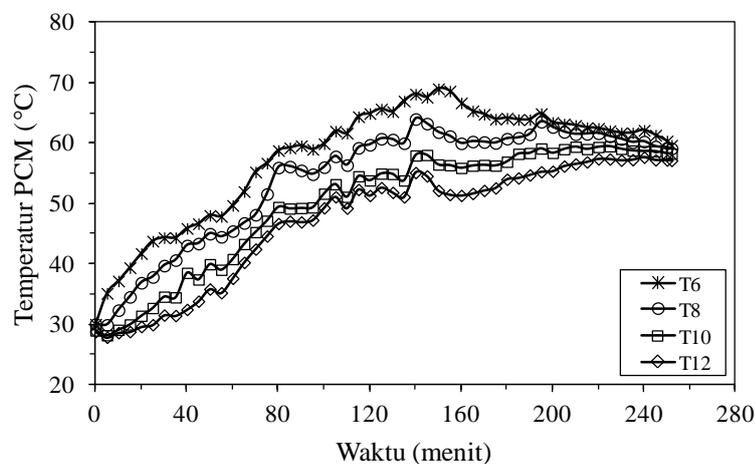
Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 bahwa di bagian tengah tangki dipasang termokopel dengan urutan dari bawah adalah T13, T15 dan T17. Menurut Gambar 4, urutan temperatur HTF dari yang tertinggi adalah T17, T15 dan T13. Tingginya temperatur T17 disebabkan oleh saluran masuk air dari kolektor berada di bagian atas tangki. Adanya perbedaan temperatur di ketiga lokasi tersebut menunjukkan bahwa di dalam tangki telah terbentuk stratifikasi termal. Gambar 5 mengilustrasikan kondisi temperatur air sesuai ketinggian termokopel dari dasar tangki untuk waktu *charging* 65, 125, 185, dan 245 menit. Absis tinggi pada Gambar 5 menunjukkan ketinggian termokopel dari dasar tangki. Stratifikasi termal yang terjadi mendekati *highly stratified* dimana *thermocline zone* cukup sempit [25] karena perbedaan temperatur T17 dan T15 yang cukup besar sedangkan antara T15 dan T13 selisih temperaturnya rendah. Perbedaan yang cukup besar tersebut diduga akibat pengaruh adanya PCM. Saat energi termal dari kolektor besar maka terjadi transfer kalor dari HTF ke PCM. Sebaliknya bila suplai energi termal dari kolektor menurun maka transfer kalor terjadi dari PCM ke HTF. Mengingat saluran masuk air dari kolektor berada di tangki bagian atas maka energi yang tersimpan oleh PCM di kapsul bagian atas adalah besar. PATM yang terbentuk stratifikasi termal di dalam tangki TES mengakibatkan efisiensi kolektornya meningkat [3].

3.3. Evolusi temperatur PCM

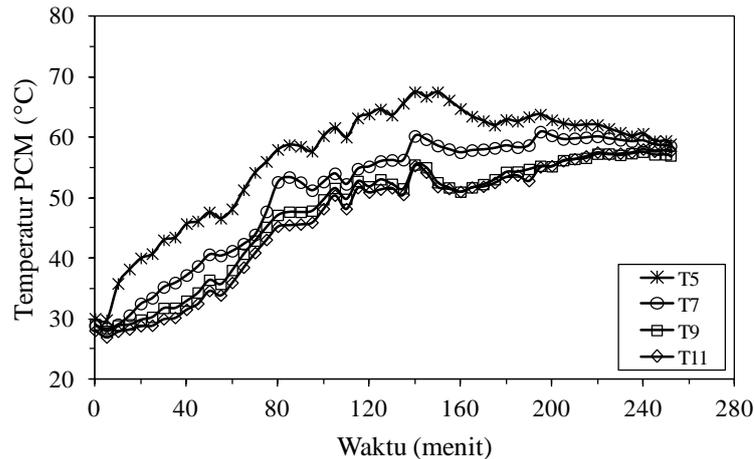
Kenaikan temperatur PCM sepanjang waktu *charging* untuk 4 buah kapsul dan di 2 lokasi penempatan termokopel setiap kapsul diberikan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Evolusi temperatur PCM untuk kapsul sisi depan



Gambar 5. Perbedaan temperatur HTF di dalam tangki.



Gambar 6. Evolusi temperatur PCM kapsul sisi depan.



Gambar 7. Evolusi temperatur PCM kapsul sisi belakang.

yaitu di dekat saluran masuk air dari kolektor disajikan pada Gambar 6, sedangkan untuk kapsul sisi belakang diberikan pada Gambar 7. Memperhatikan kedua gambar tersebut dan menurut sifat termofisik RT52 maka proses *charging* ini telah terjadi pelelehan PCM. Namun demikian, proses pelelehan PCM tidak jelas terlihat pada kedua grafik di atas karena berfluktuasinya energi termal yang diterima PCM.

Gambar 6 dan Gambar 7 memiliki pola yang sama dengan grafik evolusi temperatur HTF, yaitu kenaikan temperatur PCM terjadi secara perlahan-lahan dan fluktuatif. Saat 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 [26]. Transfer kalor secara konduksi dimulai sejak awal *charging* sampai terbentuk perubahan fase padat-cair. Secara umum, *paraffin* memiliki karakteristik konduktivitas termal yang rendah [27]. 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. Berfluktuasinya grafik pada Gambar 6 dan Gambar 7 disebabkan oleh berubah-ubahnya temperatur air keluar dari kolektor. Berdasarkan Gambar 6 dan Gambar 7 diketahui bahwa temperatur PCM pada kapsul yang berada di atas lebih besar. Kondisi ini dipengaruhi oleh temperatur air yang berada di sekitar kapsul sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4 di atas. Temperatur air tinggi menyebabkan transfer kalor yang besar pada PCM sehingga temperaturnya juga besar.

Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan bahwa setelah intensitas radiasi matahari menurun, kapsul yang berada di atas cenderung berkurang temperaturnya. Berkurangnya intensitas radiasi matahari menyebabkan temperatur air masuk ke tangki menurun. Namun yang terjadi justru temperatur rata-rata air di dalam tangki mengalami kenaikan walaupun sangat pelan. Kenaikan temperatur ini mengindikasikan terjadi transfer kalor dari PCM ke air di sekitarnya sehingga temperatur PCM berkurang. Temperatur akhir PCM untuk kapsul sisi depan di tiap posisi termokopel (T6, T8, T10 dan T12) masing-masing adalah 59,1 °C, 58,25 °C, 59,65 °C, dan 57,13 °C (Gambar 6). Sementara itu temperatur akhir PCM untuk kapsul sisi belakang di tiap posisi termokopel (T5, T7, T9 dan T11) masing-masing bernilai 57,74 °C, 58,61 °C, 58,95 °C, dan 57,02 °C (Gambar 7). Menurut Gambar 4, temperatur akhir rata-rata air di dalam tangki TES adalah 58,68 °C. Temperatur akhir PCM di Gambar 6 dan Gambar 7 tidak jauh berbeda dengan temperatur akhir rata-rata air. Hal ini menunjukkan bahwa di dalam tangki TES terjadi kesetimbangan termal. PCM telah berfungsi sebagai penyimpan kalor dan mensuplai energi ke air sekitarnya. Gambar 4 jelas membuktikan fenomena tersebut dimana lapisan air bagian atas berkurang temperaturnya sedangkan lapisan air bagian bawah naik temperaturnya.

Kecepatan pemanasan rata-rata PCM adalah harga rata-rata dari kenaikan temperatur PCM setiap interval waktu (30 detik) selama proses *charging*. Kecepatan pemanasan rata-rata PCM tiap posisi termokopel disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kecepatan pemanasan rata-rata PCM.

Posisi termokopel		Kecepatan pemanasan rata-rata (°C)
Sisi depan	Sisi belakang	
T6		0,114
T8		0,115
T10		0,116
T12		0,111
	T5	0,116
	T7	0,116
	T9	0,115
	T11	0,110

Harga kecepatan pemanasan rata-rata pada Tabel 2 tidak terlalu jauh bila dibandingkan dengan kecepatan pemanasan rata-rata air di dalam tangki (= 0,109 °C/menit). Hasil ini mengindikasikan bahwa terjadi keseimbangan transfer kalor antara sisi HTF dan sisi PCM. Dengan demikian alat penukar kalor telah berfungsi dengan baik. Lebih rendahnya kecepatan pemanasan rata-rata air diduga karena adanya rugi-rugi kalor ke lingkungan.

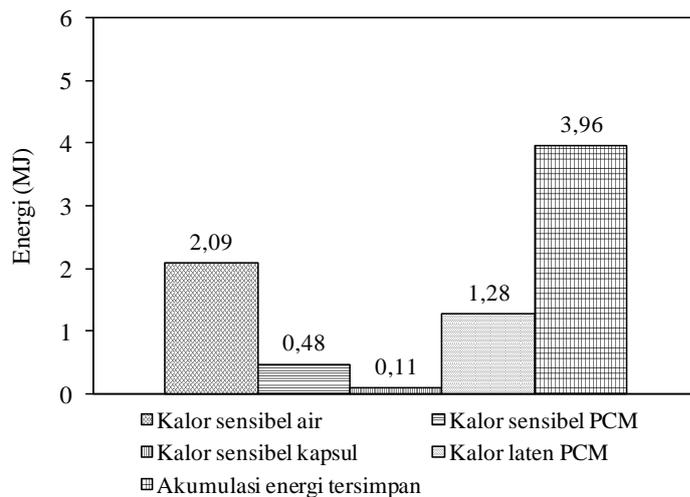
3.4. Kapasitas penyimpanan energi

Kapasitas penyimpanan energi adalah jumlah energi yang dapat disimpan secara teoritis di dalam tangki TES yang bersumber dari HTF, PCM, dan kapsul. Kapasitas energi yang tersimpan tersebut terdiri dari kalor sensibel HTF, kalor sensibel PCM, kalor laten PCM dan kalor sensibel dari kapsul. Perhitungan kapasitas penyimpanan energi berdasarkan temperatur awal dan temperatur akhir baik HTF, PCM maupun kapsul. Kapasitas penyimpanan energi ditampilkan pada Gambar 8.

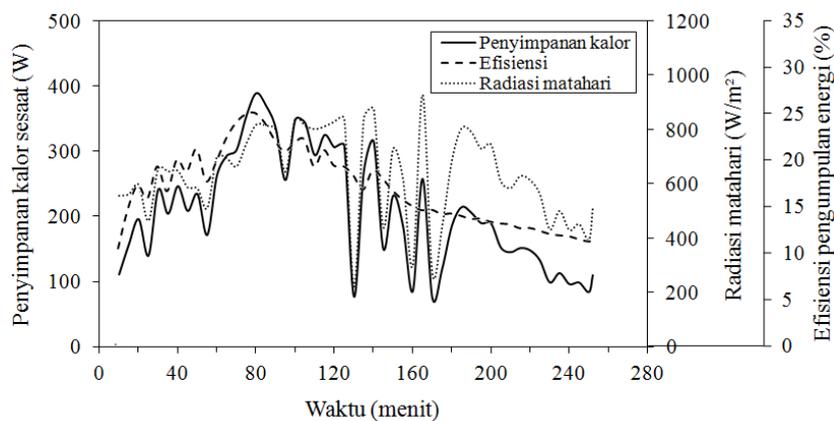
Gambar 8 menunjukkan bahwa kapasitas penyimpanan energi yang berasal dari PCM dan kapsul adalah 1,87 MJ. Persentase penyimpanan energi oleh PCM dan kapsul terhadap penyimpanan total energi kalor selama proses *charging* adalah 47,22%. Dengan demikian PCM telah berfungsi menyimpan energi termal di dalam tangki TES. Parameter penting dalam menghitung kapasitas penyimpanan energi diantaranya adalah temperatur pelelehan dan kalor peleburan. Oleh karena itu pemilihan PCM yang tepat akan menghasilkan kapasitas penyimpanan energi yang optimal.

3.5. Penyimpanan kalor sesaat dan efisiensi pengumpulan kumulatif

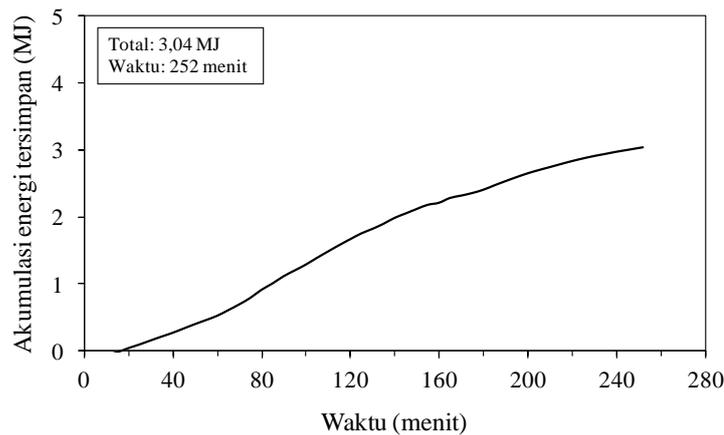
Penyimpanan kalor sesaat (*instantaneous heat stored*) diestimasi berdasarkan temperatur air masuk dan temperatur air keluar sesaat pada tangki TES [10]. Penyimpanan kalor ini menggambarkan kondisi energi yang tersimpan oleh HTF di dalam tangki TES setiap waktu selama proses *charging*. Efisiensi pengumpulan kumulatif (*cumulative collection efficiency*) adalah perbandingan jumlah kalor yang tersimpan dalam tangki terhadap jumlah total energi radiasi matahari yang menimpa kolektor pada periode waktu yang sama [28]. Efisiensi pengumpulan kumulatif dihitung sejak awal sampai berakhirnya proses *charging*. Penyimpanan kalor sesaat serta efisiensi pengumpulan kumulatif selama pengujian diberikan pada Gambar 9.



Gambar 8. Kapasitas penyimpanan energi.



Gambar 9. Penyimpanan kalor sesaat dan efisiensi pengumpulan energi.



Gambar 10. Energi tersimpan kumulatif.

Gambar 9 menunjukkan bahwa penyimpanan kalor sesaat dipengaruhi oleh tingkat intensitas radiasi matahari. Berfluktuasinya intensitas radiasi matahari mengakibatkan temperatur air keluar dan masuk kolektor berubah-ubah sehingga menyebabkan berubah-ubahnya penyimpanan kalor sesaat. Penyimpanan kalor sesaat mempunyai kecenderungan meningkat di awal *charging* kemudian menurun seiring dengan waktu. Saat awal *charging*, temperatur air panas dari kolektor naik secara perlahan sehingga perolehan kalor air di dalam tangki masih rendah. Seiring dengan bertambahnya radiasi kumulatif yang mengenai kolektor maka temperatur air keluar kolektor meningkat. Hal ini berkontribusi terhadap penambahan perbedaan temperatur antara air keluar kolektor dan air di dalam tangki. Meningkatnya perbedaan temperatur inilah yang menyebabkan perolehan kalor sesaat air di dalam tangki meningkat sehingga efisiensi pengumpulan kumulatifnya bertambah besar. Perbedaan temperatur yang tinggi tersebut disebabkan oleh penyerapan energi kalor dari air yang ada di dalam tangki ke PCM melalui kapsul. Gambar 9 memperlihatkan bahwa penyimpanan kalor sesaat menurun mulai menit ke-80. Walaupun temperatur air panas dari kolektor naik namun temperatur air di dalam tangki semakin lama semakin meningkat sehingga terjadi penurunan perbedaan temperatur yang menyebabkan berkurangnya penyimpanan kalor sesaat. Efisiensi pengumpulan energi rata-rata menurut Gambar 9 adalah 16,88%. Angka ini menunjukkan rata-rata jumlah energi matahari yang diterima oleh air di dalam tangki TES dan disimpan sebagai energi termal. Gambar 9 juga memperlihatkan bahwa meskipun mulai menit ke-185 intensitas radiasi matahari menurun drastis namun penurunan efisiensinya tidak tajam. Fenomena ini terjadi karena adanya suplai energi termal yang tersimpan di PCM ke air di dalam tangki sehingga penurunan jumlah kalor tidak berjalan cepat.

3.6. Energi tersimpan kumulatif

Energi tersimpan kumulatif (*cumulative heat stored*) diperoleh dari perkalian antara kalor tersimpan sesaat di dalam tangki dengan waktu dan dijumlahkan secara kumulatif. Energi tersimpan kumulatif selama penelitian ditunjukkan pada Gambar 10. Energi ini menggambarkan akumulasi energi yang tersimpan nyata di dalam tangki TES. Gambar 10 memberi informasi bahwa laju *charging* rata-rata adalah 0,2 kJ/detik. Harga laju *charging* rata-rata ini termasuk rendah akibat kecilnya laju aliran massa air yang hanya mengandalkan efek *thermosyphon*. Laju aliran massa yang rendah menyebabkan kecilnya laju perolehan kalor dari kolektor matahari. Nallusamy dkk [10] membuktikan bahwa penambahan laju aliran massa dapat meningkatkan energi tersimpan kumulatif.

Kapasitas penyimpanan energi selama proses *charging* adalah 3,96 MJ (Gambar 8). Sementara itu energi tersimpan kumulatifnya sebesar 3,04 MJ. Selisih energi tersebut diduga merupakan kehilangan energi dari tangki TES ke lingkungan selama pengujian. Oleh karena itu, desain sistem insulasi pada tangki PATM perlu mendapat perhatian khusus.

4. KESIMPULAN

Pengintegrasian *paraffin wax* dan air sebagai material penyimpan kalor telah dilakukan secara eksperimental pada PATM jenis *thermosyphon*. *Paraffin wax* dimasukkan dalam kapsul-kapsul yang disusun secara *in-line* yang berfungsi sebagai alat penukar kalor. Berkas kapsul diletakkan di dalam tangki TES posisi horisontal. Perilaku termal PATM yang melibatkan PCM diuji saat proses *charging*.

Karakteristik khas saat *charging* dari PATM yang berisi PCM adalah kenaikan temperatur HTF dan PCM di dalam tangki terjadi secara perlahan-lahan dan berfluktuasi seiring dengan waktu. Untuk mengimbangi karakteristik tersebut, densitas energi di dalam tangki TES harus dioptimalkan. PCM yang digunakan telah berfungsi menyimpan energi termal yang ditandai dengan: tetap terbentuknya stratifikasi termal sampai akhir proses *charging*; kontribusi sebesar 47,33% terhadap kapasitas penyimpanan energi total; dan penurunan efisiensi pengumpulan energi yang tidak tajam saat intensitas radiasi matahari menurun cepat. Selama 252 menit proses *charging* dengan intensitas radiasi matahari rata-rata sebesar 642,03 W/m², temperatur air panas rata-rata yang dihasilkan adalah 58,68 °C dengan temperatur maksimalnya 71,29 °C.

Harga kecepatan pemanasan rata-rata sisi HTF dan sisi PCM tidak berbeda jauh yang mengindikasikan bahwa alat penukar kalor cukup efektif. Penggunaan PCM memberi keuntungan secara termal pada PATM jenis *thermosyphon*. Kontribusi penyimpanan energi termal oleh PCM dapat ditingkatkan dengan pemilihan PCM yang tepat.

Penelitian ini dapat dilanjutkan di masa mendatang dengan menggunakan PCM yang lain, desain alat penukar kalor yang berbeda dan volume tangki TES yang lebih besar. Waktu pengujian dapat dipilih saat *clear sky condition* untuk meminimalkan tingkat fluktuasi intensitas radiasi matahari.

5. REFERENSI

- [1] Islam, M.R., Sumathy, K., Khan, S.U., 2013, "Solar water heating systems and their market trends", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17: 1-25.
- [2] Ibrahim, O., Fardoun, F., Younes, R., Gualous, H.L., 2014, "Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects", *Building and Environment*, 72: 259-286.
- [3] Chidambaram, L.A., Ramana, A.S., Kamaraj, G., Velraj, R., 2011, "Review of solar cooling methods and thermal storage options", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 3220-3228.
- [4] Buddhi, D., Bansal, N.K., Sawhney, R.L., Sodha, M.S., 1988, "Solar Thermal Storage Systems Using Phase Change Materials", *International Journal of Energy Research*, 12: 457-555.
- [5] Hasan, A., 1994, "Phase Change Material Energy Storage System Employing Palmatic Acid", *Solar Energy*, 52(2): 143-154.
- [6] Fazilati, M.A., Alemrajabi, A.A., 2013, "Phase change material for enhancing solar water heater, an experimental approach", *Energy Conversion and Management*, 71: 138-145.
- [7] Watanabe, T., 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.
- [8] Canbazoglu, S., Sahinaslan, A., Ekmekyapar, A., Aksoy, Y.G., 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.
- [9] Cabeza, L.F., Ibanez, M., Sole, C., Roca, J., Nogues, M., 2006, "Experimentation with a Water Tank Including a PCM Module", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90: 1273-1282.
- [10] Nallusamy, N., Sampatha, S., 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.
- [11] Mazman, M., Cabeza, L.F., Mehling, H., Nogues, M., Evliya, H., Paksoy, H.O., 2009, "Utilization of Phase Change Materials in Solar Domestic Hot Water Systems", *Renewable Energy*, 34: 1639-1643.
- [12] Al-Hinti, I., Al-Ghandoor, A., Maaly, A., Naqera, A., Al-Khateeb, Z., Al-Sheikh, O., 2010, "Experimental Investigation on The Use of Water-Phase Change Material Storage in Conventional Solar Water Heating Systems", *Energy Conversion and Management*, 51: 1735-1740.
- [13] Mahfuz, M.H., Anisur, M.R., Kibria, M.A., Saidur, R.I., Metselaar, H.S.C., 2014, "Performance investigation of thermal energy storage system with Phase Change Material (PCM) for solar water heating application", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57: 132-139.
- [14] Talmatsky, E., Kribus, A., 2008, "PCM Storage for Solar DHW: an Unfulfilled Promise?", *Solar Energy*, 82: 861-869.
- [15] Wu, S., Fang, G., Liu, X., 2011, "Dynamic Discharging Characteristics Simulation on Solar Heat Storage System with Spherical Capsules using Paraffin as Heat Storage Material", *Renewable Energy*, 36: 1190-1195.
- [16] Kousksou, T., Bruel, P., Cherreau, G., Leousoff, V., Rhafiki, T.E., 2011, "PCM Storage for Solar DHW: From an Unfulfilled Promise to a Real Benefit", *Solar Energy*, 85: 2033-2040.
- [17] Hailot, D., Franquet, E., Gibout, S., Bédécarrats, J.P., 2013, "Optimization of solar DHW system including PCM media", *Applied Energy*, 109: 470-475.
- [18] Bouadila, S., Fteiti, M., Oueslati, M.M., Guizani, A., Farhat, A., 2014, "Enhancement of latent heat storage in a rectangular cavity: Solar water heater case study", *Energy Conversion and Management*, 78: 904-912.
- [19] Canbazoglu, S., Sahinaslan, A., Ekmekyapar, A., Aksoy, Y.G., 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.
- [20] Tarhan, S., Sari, A., Yardim, M.H., 2006, "Temperature distributions in trapezoidal built in storage solar water heaters with/without phase change materials", *Energy Conversion and Management*, 47: 2143-2154.
- [21] Koca, A., Oztop, H.F., Koyun, T., Varol, Y., 2008, "Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector", *Renewable Energy*, 33: 567-574.
- [22] Chen, Z., Gu, M., Peng, D., 2010, "Heat transfer performance analysis of a solar flat-plate collector with an integrated metal foam porous structure filled with paraffin", *Applied Thermal Engineering*, 30: 1967-1973.
- [23] Anonymous, 2013, "Data Sheet RT52", Rubitherm Technologies GmbH, Version 22 April.

- [24] Duffie, J.A., Beckman, W.A., 2013, “*Solar Engineering of Thermal Processes*”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- [25] Pinel, P., Cruickshank, C.A., Morrison, I.B., Wills, A., 2011, “A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 3341-3359.
- [26] Sari, A., Kaygusuz, K., 2002, ”Thermal and Heat Transfer Characteristics in A Latent Heat Storage System using Lauric Acid”, *Energy Conversion and Management*, 43: 2493-2507.
- [27] Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., 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.
- [28] Esen, M., Esen, H., 2005, “Experimental investigation of a two-phase closed thermosyphon solar water heater”, *Solar Energy*, 79: 459-468.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LP3M Universitas Muhammadiyah Yogyakarta atas tersedianya fasilitas sehingga penelitian ini terlaksana.