

Kajian Unjuk Kerja Termal Susunan Kapsul *Phase-Change Material* Non-Tumbuk di dalam Tangki Pemanas Air Tenaga Surya Sistem Aktif

Muhammad Nadjib ^{1*}, Tito Hadji Agung Santosa ¹, Gaguk Marausna ²

¹ Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, Indonesia 55183

² Program Studi Teknik Dirgantara, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan Yogyakarta, Jl. Parangtritis KM 4,5, Druwo, Sewon, Bantul, Yogyakarta, Indonesia 55187

Abstrak

Penggabungan *phase-change material* (PCM) dan air sebagai media penyimpan kalor pada tangki pemanas air tenaga surya (PATS) mendapat perhatian para peneliti karena PCM memiliki densitas energi yang tinggi. Salah satu cara penempatan PCM di dalam tangki PATS adalah metode enkapsulasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji unjuk kerja termal pemasangan kapsul tipe non-tumbuk yang berisi PCM di dalam tangki PATS. Alat penelitian memakai sistem PATS aktif dengan kapasitas tangki 60 liter. Paraffin wax dimasukkan ke dalam kapsul tipe silinder. Kemudian, kapsul berjumlah 24 buah dipasang di dalam tangki yang membentuk susunan non-tumbuk. 20 buah termokopel diletakkan di dalam tangki baik di sisi air maupun PCM. Proses pemanasan sistem PATS memakai solar simulator dengan waktu 160 menit. Data temperatur air dan paraffin wax dipakai untuk menganalisis kinerja termal PATS. Skenario diulangi dengan langkah yang sama tetapi di saluran masuk tangki dipasang penyebar aliran. Hasil unjuk kerja termal dari dua skenario dibandingkan. Susunan kapsul tipe non-tumbuk memiliki unjuk kerja termal yang kurang memuaskan. Penambahan penyebar aliran mampu meningkatkan penyimpanan energi termal kumulatif dan efisiensi pengumpulan kumulatif masing-masing sebesar 46,78% dan 49,52%.

Kata kunci: energi termal kumulatif; kapsul; paraffin wax; pemanas air tenaga surya; *phase-change material*

Abstract

[Title: Thermal Performance of Non-Collision Type Phase-Change Material Capsule Arrangement in a Tank of Active System Solar Water Heater] Combination of *phase-change material* (PCM) and water as a heat storage medium in solar water heating tanks (SWH) has received the attention of researchers because of the high energy density of PCM. The encapsulation method is one way to place PCM in SWH's tank. This study investigates the thermal performance of installing a non-collision type capsule containing PCM in an SWH tank. The research uses an active SWH with a tank capacity of 60 liters. Paraffin wax is put into 24 cylindrical capsules; then, the capsules are installed in the tank, which forms a non-collision arrangement. Twenty pieces of thermocouples are placed both on the waterside and the PCM. The heating process uses a solar simulator for 160 minutes. The temperature data are used to analyze the SWH's thermal performance. The scenario is repeated with the same steps but using the flow spreader at the tank's inlet. The thermal performance results of the two methods are compared. The non-collision arrangement has unsatisfactory thermal performance. Adding a flow spreader increases the cumulative heat storage and collection efficiency by 46.78% and 49.52%, respectively.

Keywords: capsule; cumulative heat storage; paraffin wax; *phase-change material*; solar water heater

*) Penulis Korespondensi.
E-mail: nadjibar@umy.ac.id

1. Pendahuluan

Matahari merupakan asal muasal energi terbarukan yang tersedia di alam yaitu energi air, energi

biomassa, energi angin dan energi panas bumi. Energi yang dihasilkan oleh matahari cukup untuk menyediakan energi bagi dunia (Kalidasan dkk., 2020). Indonesia memiliki insolasi energi matahari yang besar yaitu 4,8 kW/m²/hari (Sugiyono dkk., 2019). Oleh karena itu, potensi penggunaan energi matahari di Indonesia sangat tinggi. Energi matahari memiliki keuntungan, diantaranya: tidak menghasilkan polusi sehingga aman terhadap lingkungan (Bazri dkk., 2019; Shamsavari & Akbari, 2014) dan terus tersedia selama masih ada kehidupan di alam. Dengan demikian, energi matahari dapat dikembangkan untuk penganekaragaman energi seperti yang sedang digalakkan oleh pemerintah.

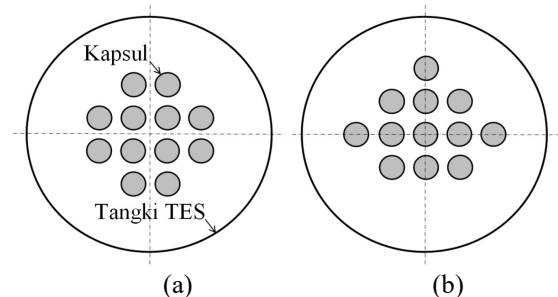
Contoh aplikasi energi matahari yang menghasilkan energi termal adalah pemanas air tenaga surya (PATS). Teknologi ini telah dikenal oleh masyarakat. PATS memiliki peran yang strategis dalam bidang ekonomi dan penghematan energi (Islam dkk., 2013). Penggunaan PATS dapat menghemat bahan bakar dari energi fosil (Ibrahim dkk., 2014; Uctug & Azapagic, 2018). PATS yang beroperasi memakai air sebagai media penyimpan kalor disebut sistem konvensional. Sistem PATS mempunyai kelemahan yaitu rendahnya densitas energi. Densitas energi adalah kapasitas energi termal yang dapat disimpan oleh substansi setiap satuan massa. Pengaruh rendahnya densitas energi adalah sistem memerlukan volume penyimpanan energi termal (*thermal energy storage/TES*) besar sehingga konstruksinya berat (Fazilati & Alemrajabi, 2013). Besarnya kebutuhan volume penyimpanan ini juga dipengaruhi oleh karakteristik PATS yaitu pemakaian energinya tidak bersamaan dengan tersedianya energi matahari dan sifat iradiasi matahari yang berfluktuasi setiap saat (Kee dkk., 2018).

Peningkatan densitas energi di tangki TES adalah salah satu cara untuk memperbaiki kinerja termal PATS. Material yang efektif digunakan sebagai penyimpan energi termal khususnya untuk PATS adalah *phase change material* (PCM) (Ramirez dkk., 2020). Dari berbagai jenis PCM, *paraffin wax* menarik diaplikasikan pada PATS karena perubahan fasenya mampu balik (Nomura dkk., 2013) yaitu dalam proses *charging* dan *discharging*. Selain itu, *paraffin wax* memiliki kalor laten tinggi dan cocok untuk aplikasi *solar thermal storage* (Bouadila dkk., 2012). Akan tetapi, *paraffin wax* memiliki kelemahan. Konduktivitas termal *paraffin wax* rendah sehingga transfer kalor saat proses pengambilan dan pelepasan energi termal juga rendah. Metode yang dapat diterapkan untuk menanggulangi rendahnya transfer kalor adalah dengan teknik pengkapsulan (Fukahori dkk., 2016; Salunkhe & Shembekar, 2012).

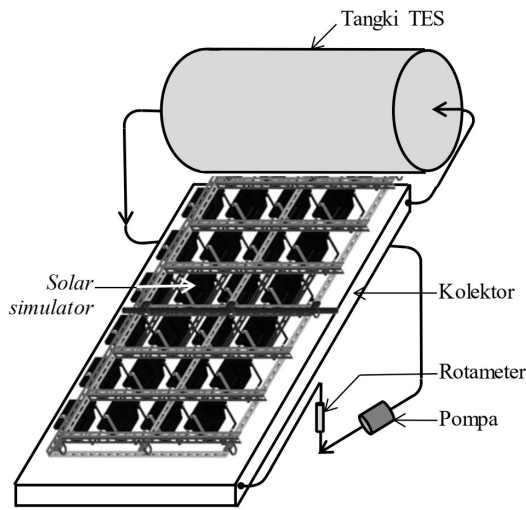
Studi aplikasi pengkapsulan PCM di dalam tangki PATS telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Kapsul silinder dari aluminium dipakai untuk mewadahi PCM di dalam PATS. Eksperimen dilakukan dengan

membandingkan antara PATS dengan PCM dan tanpa PCM. PATS yang berisi PCM memiliki fraksi energi yang diserap lebih besar daripada PATS tanpa PCM (Ibáñez dkk., 2006). Tangki PATS diisi dengan PCM memakai kapsul silinder berbahan aluminium. Penggunaan PCM meningkatkan temperatur air masuk tangki pada saat *charging* (Padmaraju dkk., 2008). Penambahan *paraffin wax* di dalam tangki PATS vertikal mampu mempertahankan temperatur air di atas 45°C (Al-Hinti dkk., 2010). Penggunaan *paraffin wax* pada tangki mampu meningkatkan penyimpanan energi sistem (Kanimozi & Bapu, 2012). Penyimpanan energi termal PATS yang berisi PCM lebih besar daripada tanpa PCM (Khot, 2014). PATS yang mengintegrasikan air dan PCM sebagai material penyimpan kalor mampu mengurangi rugi-rugi termal di kolektor (Teamah dkk., 2018). Perbandingan kinerja termal antara PATS yang memakai PCM dan tanpa PCM adalah meningkatkan efisiensi kolektor (Kumar & Mylsamy, 2019) dan dapat mencegah *overheating* di kolektor (Wang dkk., 2019). Penurunan temperatur air panas lebih lama untuk tangki PATS vertikal yang disisipi kapsul PCM di bagian atasnya (Chargui & Tashtoush, 2021; Qin dkk., 2019). Keuntungan penambahan PCM di tangki PATS adalah penyerapan energi termalnya lebih tinggi bila dibandingkan dengan tangki tanpa PCM (Nazir dkk., 2019).

Memperhatikan hasil penelitian sebelumnya, teknik pengkapsulan PCM pada tangki PATS mampu memberikan kontribusi terhadap peningkatan unjuk kerja termal. Faktor yang mempengaruhi pertambahan unjuk kerja adalah luas permukaan perpindahan kalor yang besar sehingga meningkatkan transfer kalor dari *heat transfer fluid* (HTF) ke PCM. Namun begitu, penelitian terdahulu belum membahas secara khusus tentang perilaku termal di tangki PATS horisontal yang menggunakan susunan kapsul silinder tipe non-tumbuk. Untuk pemasangan kapsul PCM yang sejajar sumbu tangki, ada dua jenis konstruksi yaitu tipe tumbuk dan non-tumbuk seperti ditunjukkan di Gambar 1. Maksud



Gambar 1. Ilustrasi konstruksi susunan kapsul di dalam tangki TES: (a) tipe non-tumbuk, (b) tipe tumbuk



Gambar 2. Susunan alat penelitian

konstruksi kapsul tumbuk adalah sumbu saluran air masuk tangki berimpit dengan salah satu sumbu kapsul sehingga aliran air panas langsung menumbuk kapsul. Sedangkan untuk kapsul non-tumbuk, saluran air masuk tangki mengenai salah satu kapsul secara langsung sehingga aliran air panas masuk melewati celah-celah di antara susunan kapsul. Tujuan penelitian ini adalah untuk menyelidiki unjuk kerja termal susunan kapsul tipe non-tumbuk di dalam tangki PATS yang terpasang secara horisontal.

2. Bahan dan Metode

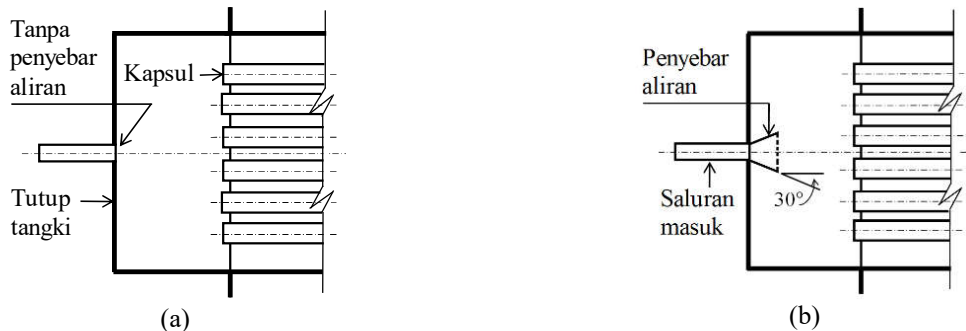
Eksperimen memakai air sebagai HTF. PCM yang digunakan adalah *paraffin wax* tipe RT55. Pada saat pemanasan, air merupakan sumber kalor PCM. PCM diletakkan di tangki TES yang diwadahi dalam kapsul-kapsul. Air di tangki berada di luar susunan kapsul.

Alat eksperimen menggunakan PATS sistem aktif sebagaimana diilustrasikan di Gambar 2. PATS terdiri dari komponen tangki, kolektor matahari, rangkaian kapsul, pompa dan *solar simulator*. Kapasitas tangki yang dipakai adalah 60 liter. Pemasangan tangki dilakukan

secara horisontal. Tangki dihubungkan dengan kolektor jenis pelat datar (*Wika Solar Water Heater*). Kolektor memiliki luas 1,9 m² dan dipasang dengan *tilt angle* 20° terhadap horisontal. Kapsul silinder dari tembaga dengan diameter nominal 1 inchi dan panjang 1 m digunakan untuk mewardahi PCM. *Paraffin wax* dari Rubitherm sebanyak 331 gram diisikan di setiap kapsul. Jumlah kapsul yang dipakai adalah 24 buah. Kapsul dirangkai dengan susunan non-tumbuk (lihat Gambar 1(a)). Kemudian susunan kapsul dimasukkan di dalam tangki PATS. Sistem perpipaan PATS dilengkapi dengan pompa Sharp di sisi keluar tangki untuk mensirkulasikan air. Oleh karena itu, instalasi PATS ini disebut sistem aktif. Eksperimen memerlukan *solar simulator* sebagai sumber kalor bagi kolektor. *Solar simulator* ini dibutuhkan karena eksperimen dilakukan di dalam ruangan (*indoor*). *Solar simulator* memakai lampu jenis halogen (Philips) sebanyak 24 buah, masing-masing dayanya 300 watt. Pengaturan *heat flux* dilakukan dengan mengatur ketinggian *solar simulator* terhadap kolektor dan tegangan listrik yang masuk ke sistem elektrikal yaitu menggunakan *voltage regulator*.

Temperatur HTF dan PCM di dalam tangki direkam dengan termokopel jenis K tipe FT-K-M6. Jumlah termokopel yang dipasang adalah 14 buah di HTF dan 15 buah di PCM. Applent AT4532 *Multi-Channel Temperature Meter* digunakan sebagai alat akuisisi data. Alat ukur debit air memakai rotameter Omega dan dipasang setelah pompa. Pengaturan debit air dilakukan dengan *gate valve*. Eksperimen ini menggunakan debit air dan *heat flux* yang ditetapkan konstan. Debit aliran air yang dipakai adalah 2 liter per menit, sedangkan *heat flux* yang dihasilkan *solar simulator* adalah 1000 W/m².

Eksperimen tahap pertama dilakukan memakai tutup tangki dengan saluran masuk air panas tanpa diberi penyebar aliran seperti ditunjukkan pada Gambar 3a. Tangki PATS diisi air sampai penuh, kemudian pompa air dinyalakan. Beberapa saat kemudian, debit air diatur pada 2 liter per menit. Proses pemanasan sistem PATS dilaksanakan selama 160 menit. Perekaman temperatur HTF dan PCM dilakukan setiap menit. Data temperatur



Gambar 3. Variasi saluran masuk tangki: (a) tanpa penyebar aliran, (b) dengan penyebar aliran

yang didapatkan, dipakai untuk mengevaluasi perilaku termal PATS.

Perbedaan temperatur sesaat air masuk dan air keluar tangki digunakan untuk mencari kalor tersimpan sesaat (Q , kW) selama proses pemanasan seperti ditunjukkan di Persamaan 1 (Nallusamy dkk., 2007).

$$Q = mc_p(T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

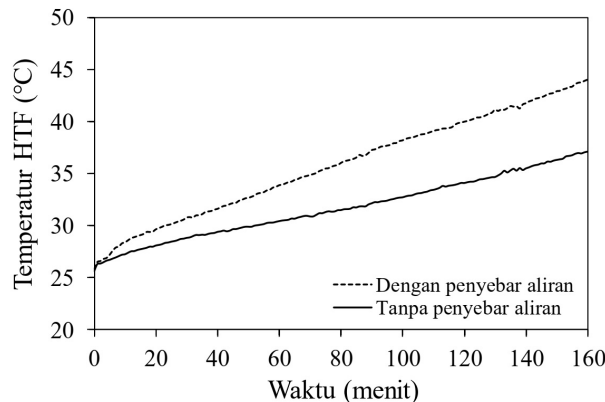
dengan m adalah laju aliran massa HTF (kg/detik), c_p yaitu kalor jenis HTF (kJ/kg.°C), T_{in} adalah temperatur HTF masuk sesaat (°C) dan T_{out} merupakan temperatur HTF keluar sesaat (°C).

Efisiensi pengumpulan kumulatif (η , %) adalah rasio antara jumlah energi termal yang tersimpan di tangki dan jumlah energi radiasi yang diterima kolektor pada waktu yang sama. Efisiensi pengumpulan kumulatif dihitung selama proses pemanasan berlangsung menggunakan Persamaan 2 (Esen & Esen, 2005).

$$\eta = \frac{mc_p(T_2 - T_1)}{AI} \quad (2)$$

dengan m adalah laju aliran massa HTF (kg/detik), c_p adalah kalor jenis HTF (J/kg.°C), T_2 yaitu temperatur HTF akhir sesaat (°C), T_1 adalah temperatur HTF awal sesaat (°C), A merupakan luas permukaan kolektor (m²) dan I adalah *heat flux* dari *solar simulator* (W/m²).

Energi termal kumulatif sistem PATS ditentukan dengan menjumlahkan nilai kalor tersimpan sesaat selama proses pemanasan. Eksperimen berikutnya adalah menambahkan penyebar aliran di saluran masuk air panas (Gambar 3b). Langkah yang sama dilaksanakan seperti pada tahap pertama. Langkah selanjutnya adalah melakukan perbandingan dan analisis antara dua tahap eksperimen.



Gambar 4. Evolusi temperatur rata-rata HTF

3. Hasil dan Pembahasan

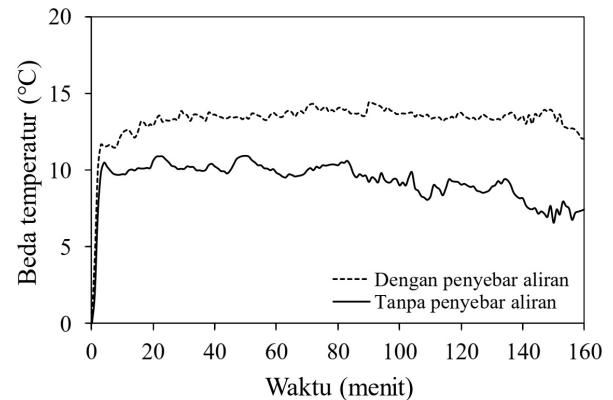
3.1 Evolusi Temperatur Rata-rata HTF

Evolusi temperatur rata-rata HTF di tangki ditunjukkan di Gambar 4. Nilai ini adalah rata-rata dari semua termokopel HTF yang terpasang. Kedua grafik tersebut menunjukkan kenaikan temperatur seiring dengan waktu pemanasan. Kenaikan temperatur HTF cukup konstan akibat energi termal yang diterima kolektor adalah relatif sama.

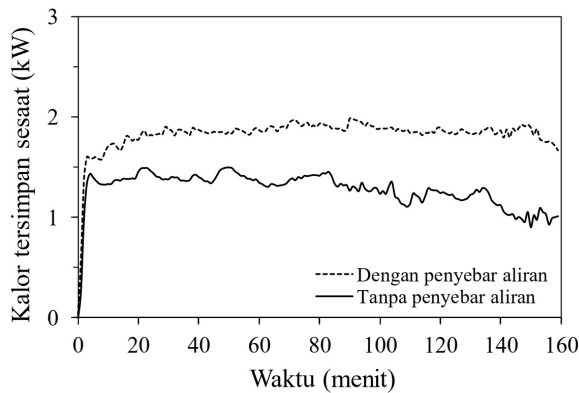
Menurut Gambar 4, kenaikan temperatur HTF yang menggunakan penyebar aliran lebih tinggi daripada tanpa penyebar aliran. Temperatur awal dan akhir HTF untuk konstruksi tanpa penyebar aliran adalah 25,64°C dan 37,15°C dengan selisih temperatur 11,51°C. Untuk konstruksi menggunakan penyebar aliran, temperatur awal dan akhirnya adalah 25,85°C dan 44,05°C dengan perbedaan temperatur sebesar 18,2°C. Penambahan penyebar aliran dapat meningkatkan transfer kalor antara air panas dan HTF di dalam tangki.

Kecepatan pemanasan HTF rata-rata untuk saluran masuk tanpa penyebar dan dengan penyebar aliran masing-masing adalah 0,07 °C/menit dan 0,11 °C/menit. Pemasangan penyebar aliran di saluran masuk air panas dapat meningkatkan kecepatan pemanasan sebesar 58,04%.

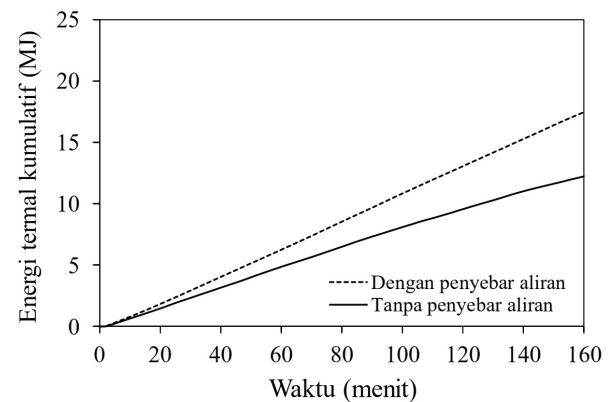
Rendahnya kenaikan temperatur tanpa penyebar aliran diduga karena aliran air panas dari saluran masuk tidak menumbuk kapsul melainkan langsung menuju saluran keluar. Aliran air panas yang tidak menumbuk kapsul menyebabkan penyebaran ke semua bagian tangki terhambat sehingga perolehan energi termalnya rendah. Penelitian tentang penggunaan susunan kapsul tumbuk menghasilkan kecepatan pemanasan rata-rata yang tinggi yaitu 0,23 °C/menit (Nadjib dkk., 2020). Hasil ini menguatkan dugaan di atas tentang pengaruh tumbukan kapsul terhadap penyebaran air panas.



Gambar 5. Beda temperatur HTF masuk dan keluar tangki



Gambar 6. Kalor tersimpan sesaat



Gambar 7. Energi termal kumulatif

3.2 Beda Temperatur Sisi Masuk dan Keluar Tangki

Sisi masuk dan keluar air di tangki direkam temperaturnya selama proses *charging*. Hasil perbedaan temperatur yang diperoleh disajikan di Gambar 5. Beda temperatur HTF pada Gambar 5 terjadi karena ada transfer kalor dari air panas masuk ke HTF di dalam tangki. Profil grafik di Gambar 5 antara kedua parameter hampir sama. Grafik meningkat drastis di awal pemanasan yang disebabkan adanya beda temperatur yang signifikan antara HTF di sisi masuk dan keluar tangki. Mulai menit ke-3, grafik melandai dan cenderung berfluktuasi. Selisih temperatur HTF masuk dan keluar tangki relatif stabil akibat adanya transfer kalor antara HTF dan PCM. Peristiwa ini mengakibatkan grafik di Gambar 5 tidak terjadi kenaikan yang tajam. Transfer kalor terjadi selama HTF mengalir di dalam tangki. Kondisi ini mengakibatkan besarnya transfer kalor tidak seragam di setiap bagian tangki dan setiap waktu. Oleh karena itu perbedaan temperaturnya juga berubah-ubah.

Beda temperatur rata-rata untuk konstruksi tanpa menggunakan penyebar dan memakai penyebar aliran masing-masing yaitu $9,29^{\circ}\text{C}$ dan $13,26^{\circ}\text{C}$. Persentase kenaikan beda temperatur rata-rata yang terjadi adalah 42,7%. Meningkatnya beda temperatur rata-rata ini disebabkan oleh tingkat penyebaran air panas lebih merata di sepanjang tangki. Transfer kalor menjadi meningkat sehingga beda temperatur antara sisi masuk dan sisi keluar tangki semakin besar.

3.3 Kalor Tersimpan Sesaat

Kalor tersimpan sesaat menggambarkan perolehan energi termal media penyimpan kalor di dalam tangki TES di setiap waktu pengambilan data. Gambar 6 menunjukkan hasil perhitungan kalor tersimpan sesaat. Grafik kalor tersimpan sesaat memiliki pola yang sama dengan beda temperatur HTF sisi masuk dan keluar tangki. Beda temperatur tersebut merupakan *driving force* untuk kalor tersimpan sesaat sebagaimana yang ditunjukkan di ruas kanan suku ketiga persamaan (1).

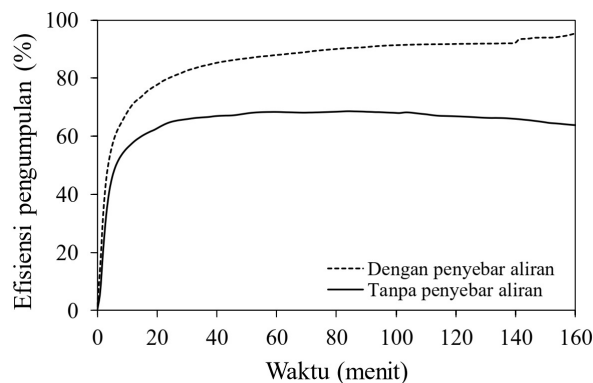
Kalor tersimpan sesaat rata-rata untuk saluran masuk tanpa dipasang penyebar aliran dan yang terdapat penyebar aliran masing-masing adalah 1,28 kW dan 1,82 kW. Besarnya persentase kenaikan kalor tersimpan sesaat yaitu 42,77%. Penggunaan penyebar aliran menyebabkan distribusi air panas merata di tangki. Fenomena ini menyebabkan selisih temperatur HTF sesaat di dalam tangki meningkat.

Kalor tersimpan sesaat yang ditunjukkan di Gambar 6 memiliki pola yang mirip dengan hasil penelitian sebelumnya. Kalor tersimpan sesaat melandai dengan fluktuasi yang ringan (Nallusamy dkk., 2007). Saat proses *charging* berlangsung, PCM mulai mencair dan kalor yang tersimpan sesaat hampir seragam karena perbedaan temperatur antara HTF masuk dan keluar yang tidak terlalu jauh.

3.4 Energi Termal Kumulatif

Energi termal kumulatif suatu sistem PATS menggambarkan kemampuan dalam menghasilkan energi termal selama proses pemanasan. Gambar 7 menunjukkan energi termal kumulatif untuk kedua kondisi saluran masuk tangki. Grafik di Gambar 7 menjelaskan bahwa energi termal bertambah secara kontinyu dari awal sampai akhir proses pemanasan. Energi termal kumulatif untuk konstruksi saluran masuk tanpa penyebar aliran adalah 12,09 MJ, sedangkan harga untuk penambahan penyebar aliran yaitu sebesar 17,75 MJ. Penambahan penyebar aliran dapat meningkatkan energi termal kumulatif sebesar 46,78%. Peningkatan ini disebabkan penyebaran aliran air panas lebih merata di sepanjang penampang tangki. Pengaruhnya adalah dapat menambah transfer kalor dari air panas ke HTF.

Gambar 7 bermanfaat untuk memperkirakan waktu pemanasan sistem PATS bila ditargetkan mempunyai energi termal akumulatif tertentu. Misalnya sistem dengan penyebar aliran direncanakan memiliki akumulasi energi termal sebesar 20 MJ, waktu pemanasan diprediksikan 185 menit. Dengan akumulasi



Gambar 8. Efisiensi pengumpulan kumulatif

energi termal yang sama maka sistem tanpa penyebar aliran memerlukan waktu pemanasan selama 253 menit.

Hasil penelitian ini sesuai dengan peneliti terdahulu yaitu semakin lama proses *charging* maka jumlah energi termal yang tersimpan semakin tinggi dan kenaikannya terjadi secara kontinyu (Ezan dkk., 2011). Hasil penelitian yang disajikan di Gambar 7 juga sesuai dengan kesimpulan peneliti sebelumnya yaitu semakin tinggi temperatur HTF di tangki TES maka energi termal kumulatifnya semakin tinggi (Hosseini dkk., 2014). Di samping itu, temperatur HTF di tangki yang tinggi menyebabkan PCM cepat mengalami perubahan fase. Semakin cepat PCM mengalami perubahan fase maka sistem memiliki energi termal kumulatif yang tinggi (Zhang dkk., 2021).

3.5 Efisiensi Pengumpulan Kumulatif

Parameter ini diperoleh dengan menggunakan persamaan (2) yang hasilnya disajikan di Gambar 8. Efisiensi pengumpulan kumulatif memiliki pola kenaikan nilai yang tinggi di permulaan proses pemanasan dan setelah itu melandai sampai akhir proses. Kenaikan efisiensi pengumpulan kumulatif yang tinggi di awal proses disebabkan oleh perbedaan temperatur HTF sesaat yang besar di tangki TES. Semakin lama proses *charging* berlangsung, perbedaan temperatur tersebut semakin rendah dan menuju kondisi stabil. Oleh karena itu, grafik yang terjadi adalah cenderung mendatar.

Harga efisiensi pengumpulan kumulatif rata-rata untuk saluran masuk tanpa penyebar aliran dan dengan penyebar aliran masing-masing adalah 63,85% dan 95,47%. Pengubahan konstruksi saluran masuk air panas dapat meningkatkan perolehan efisiensi pengumpulan kumulatif sebesar 49,52%. Penyebab terjadinya peningkatan efisiensi ini adalah temperatur HTF yang tinggi pada penambahan penyebar aliran sebagaimana ditunjukkan di Gambar 4. Tingginya temperatur HTF menyebabkan perbedaan temperatur sesaat di setiap data lebih besar. Menurut persamaan (2), kondisi ini

menyebabkan efisiensi pengumpulan akumulatif meningkat.

Berdasarkan hasil yang diperoleh di atas maka konstruksi susunan kapsul tipe non-tumbuk dapat ditingkatkan unjuk kerja termalnya dengan memasang penyebar aliran di saluran masuk tangki. Penambahan penyebar aliran mampu meningkatkan performansi termal sistem PATS-PCM dalam hal evolusi temperatur HTF, beda temperatur HTF di sisi masuk dan keluar tangki, kalor tersimpan sesaat, energi termal kumulatif dan efisiensi pengumpulan kumulatif secara signifikan.

Penggunaan susunan kapsul tipe non-tumbuk biasanya dipilih apabila diinginkan pengukuran temperatur HTF tepat di sumbu tangki. Pengukuran ini dilakukan dengan memasang termokopel di sepanjang sumbu aksial tangki. Konstruksi tersebut dipilih oleh peneliti terdahulu tentang PATS-PCM tipe pasif (*thermosyphon*) tanpa memakai penyebar aliran (Nadjib, 2016). Sistem PATS-PCM dilakukan *charging* dengan waktu 252 menit dan diperoleh laju pemanasan rata-rata HTF sebesar 0,109 °C/menit. Debit aliran HTF pada sistem PATS *thermosyphon* adalah rendah yaitu sekitar 0,6 liter/menit dan tergantung oleh radiasi matahari (Dehghan & Barzegar, 2011). Rendahnya debit HTF ini tidak menjadi persoalan pada susunan kapsul tipe non-tumbuk karena tersedia waktu yang cukup bagi air panas untuk bercampur dengan HTF di dalam tangki TES. Untuk aplikasi PATS tipe aktif dan susunan kapsulnya non-tumbuk, air panas mempunyai kecenderungan menerobos sela-sela kapsul sehingga kurang terjadi penyebaran di sepanjang penampang tangki. Fenomena ini berbeda dengan susunan kapsul tumbuk dimana aliran HTF menumbuk kapsul sehingga membantu penyebaran air panas.

4. Kesimpulan

Kajian unjuk kerja termal susunan kapsul non-tumbuk di dalam tangki PATS-PCM telah dilakukan secara eksperimental. Susunan kapsul non-tumbuk memiliki unjuk kerja termal yang rendah karena energi termal dari air panas yang masuk tidak dapat tersimpan secara optimal di dalam tangki TES. Penambahan penyebar aliran di saluran masuk air panas mampu meningkatkan unjuk kerja termal cukup signifikan. Peningkatan kecepatan pemanasan rata-rata HTF, beda temperatur sisi masuk dan keluar tangki, energi tersimpan sesaat, energi termal kumulatif dan efisiensi pengumpulan kumulatif pada konstruksi dengan penyebar aliran masing-masing adalah 58,04%, 42,7%, 42,77%, 46,78% dan 49,52% dibandingkan dengan konstruksi tanpa penyebar aliran. Penelitian lanjutan tentang pemakaian kapsul silinder yang berisi PCM pada PATS direkomendasikan tidak memakai susunan tipe non-tumbuk.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini terlaksana berkat dukungan LP3M Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dengan Kontrak No. 550/PEN-LP3M/II/2020. Terima kasih kepada LP3M dan pihak-pihak yang membantu penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Al-Hinti, I., Al-Ghandoor, A., Maaly, A., Abu Naqera, I., 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(8), 1735–1740. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.038>
- Bazri, S., Badruddin, I. A., Naghavi, M. S., Seng, O. K., & Wongwises, S. (2019). An analytical and comparative study of the charging and discharging processes in a latent heat thermal storage tank for solar water heater system. *Solar Energy*, 185(June), 424–438. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.046>
- Bouadila, S., Fteiti, M., Mehdi, M., Guizani, A., & Farhat, A. (2012). *The Fourth International Renewable Energy Congress Experimental and numerical investigation of a solar water heater with latent storage cavity Enhancement of latent heat storage in a rectangular cavity: Solar water heater case study. December 2018.*
- Chargui, R., & Tashtoush, B. (2021). Thermo-economic Analysis of Solar Water Heaters Integrating Phase Change Material Modules and Mounted in Football Pitches in Tunisia. *Journal of Energy Storage*, 33(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102129>
- Dehghan, A. A., & Barzegar, A. (2011). Thermal performance behavior of a domestic hot water solar storage tank during consumption operation. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.075>
- Esen, M., & Esen, H. (2005). Experimental investigation of a two-phase closed thermosiphon solar water heater. *Solar Energy*, 79(5), 459–468. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.01.001>
- Ezan, M. A., Ozdogan, M., & Erek, A. (2011). Experimental study on charging and discharging periods of water in a latent heat storage unit. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(11), 2205–2219. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.06.010>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.034>
- Fukahori, R., Nomura, T., Zhu, C., Sheng, N., Okinaka, N., & Akiyama, T. (2016). Macro-encapsulation of metallic phase change material using cylindrical-type ceramic containers for high-temperature thermal energy storage. *Applied Energy*, 170, 324–328. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.106>
- Hosseini, M. J., Rahimi, M., & Bahrapoury, R. (2014). Experimental and computational evolution of a shell and tube heat exchanger as a PCM thermal storage system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 50, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.11.008>
- Ibáñez, M., Cabeza, L. F., Solé, C., Roca, J., & Nogués, M. (2006). Modelization of a water tank including a PCM module. *Applied Thermal Engineering*, 26(11–12), 1328–1333. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.10.022>
- Ibrahim, O., Fardoun, F., Younes, R., & Louahli-Gualous, H. (2014). Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects. *Building and Environment*, 72, 259–286. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.006>
- Islam, M. R., Sumathy, K., & Ullah Khan, S. (2013). Solar water heating systems and their market trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.011>
- Kalidasan, B., Pandey, A. K., Shahabuddin, S., Samyano, M., Thirugnanasambandam, M., & Saidur, R. (2020). Phase change materials integrated solar thermal energy systems: Global trends and current practices in experimental approaches. *Journal of Energy Storage*, 27(November 2019). <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101118>
- Kanimozhi, B., & Babu, B. R. R. (2012). Experimental study of thermal energy storage in solar system using PCM. *Advanced Materials Research*, 433–440(July 2015), 1027–1032. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.1027>
- Kee, S. Y., Munusamy, Y., & Ong, K. S. (2018). Review of solar water heaters incorporating solid-liquid organic phase change materials as thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 131, 455–471. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.032>
- Khot, S. A. (2014). Enhancement of thermal storage system using phase change material. *Energy Procedia*, 54, 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.257>

- Kumar, P. M., & Mysamy, K. (2019). Experimental investigation of solar water heater integrated with a nanocomposite phase change material: Energetic and exergetic approach. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(1), 121–132. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7937-9>
- Nadjib, M. (2016). Penggunaan Paraffin Wax Sebagai Penyimpan Kalor Pada Pemanas Air Tenaga Matahari Thermosyphon. *Rotasi*, 18(3), 76. <https://doi.org/10.14710/rotasi.18.3.76-85>
- Nadjib, M., Suhanan, & Waluyo, J. (2020). Experimental investigation of thermal behavior in an active type solar water heater based on phase change material using solar simulator. *AIP Conference Proceedings*, 2296. <https://doi.org/10.1063/5.0030475>
- Nallusamy, N., Sampath, 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(7), 1206–1227. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.015>
- Nazir, H., Batool, M., Bolivar Osorio, F. J., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P., Inamuddin, & Kannan, A. M. (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 491–523. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126>
- Nomura, T., Tsubota, M., Oya, T., Okinaka, N., & Akiyama, T. (2013). Heat storage in direct-contact heat exchanger with phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.04.062>
- Padmaraju, S. A. V., Viginesh, M., & Nallusamy, N. (2008). Comparative study of sensible and latent heat storage systems integrated with solar water heating unit. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(6), 55–60. <https://doi.org/10.24084/repqj06.218>
- Qin, D., Yu, Z. J., Yang, T., Li, S., & Zhang, G. (2019). Thermal performance evaluation of a new structure hot water tank integrated with phase change materials. *Energy Procedia*, 158, 5034–5040. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.659>
- Ramírez, C. C., Jaramillo, F., & Gómez, M. (2020). Systematic review of encapsulation and shape-stabilization of phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 30(52). <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101495>
- Salunkhe, P. B., & Shembekar, P. S. (2012). A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5603–5616. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.037>
- Shahsavari, A., & Akbari, M. (2014). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *ScienceDirect*, 41(October), 1277–1287. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114007898>
- Sugiyono, A., Anindhita, I. F., Wahid, L., & Adiarso. (2019). “Outlook Energi Indonesia 2019: Dampak Peningkatan Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan Terhadap Perekonomian Nasional.” In *Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi*.
- Teamah, H. M., Lightstone, M. F., & Cotton, J. S. (2018). Potential of cascaded phase change materials in enhancing the performance of solar domestic hot water systems. *Solar Energy*, 159(November 2017), 519–530. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.034>
- Uctug, F. G., & Azapagic, A. (2018). Life cycle environmental impacts of domestic solar water heaters in Turkey: The effect of different climatic regions. *Science of the Total Environment*, 622–623, 1202–1216. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.057>
- Wang, D., Wang, X., Chen, Y., Kang, W., & Liu, Y. (2019). Experimental study on performance test of serpentine flat plate collector with different pipe parameters and a new phase change collector. *Energy Procedia*, 158, 738–743. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.197>
- Zhang, T., Lu, G., & Zhai, X. (2021). Design and experimental investigation of a novel thermal energy storage unit with phase change material. *Energy Reports*, 7(December 2020), 1818–1827. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2021.03.029>