

Investigasi Kapasitas Energi Termal pada *Solar Water Heater* Berbasis Kalor Laten dengan Variasi Debit Air

Investigation of Thermal Energy Capacity in Latent Heat-Based Solar Water Heater with Water Discharge Variations

Muhammad Nadjib*, Novi Caroko, Thoharudin, Hanifan Darmawan
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Jalan Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding author email: nadjibar@umy.ac.id



Kata Kunci:

Debit; densitas energi; energi termal; *paraffin wax*; *solar water heater*.

Keywords:

Energy density; flow rate; *paraffin wax*; *solar water heater*; thermal energy.

Abstrak

Material penyimpan kalor pada *solar water heater* adalah air sebagai kalor sensibel. Kekurangan air adalah densitas energinya rendah. Material lain adalah dari golongan kalor laten (*phase change material*, PCM) yang memiliki densitas energi tinggi. Unjuk kerja termal SWH tipe aktif dengan tangki horizontal dan memakai PCM jenis *paraffin wax* terhadap perubahan debit aliran air belum pernah diungkap. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan karakteristik pengaruh perubahan debit air terhadap kapasitas penyimpanan energi termal di tangki. Penelitian menggunakan SWH dengan tangki yang di dalamnya diletakkan kapsul silinder berisi *paraffin wax* RT55. Termokopel dipasang di sisi air dan PCM. Eksperimen dilakukan secara *indoor* memakai *solar simulator*. Debit aliran air yang digunakan adalah 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm. Penelitian ini mendapatkan hasil yaitu kapasitas energi termal untuk debit aliran tersebut masing-masing adalah 10,45 MJ, 10,59 MJ dan 10,71 MJ. Semakin besar debit air maka kapasitas penyimpanan energi termal semakin tinggi.

Abstract

The heat storage material in a *solar water heater* is water as sensible heat. The disadvantage of water is its low energy density. Other materials are of the latent heat type (*phase change materials*, PCM) with high energy density. The thermal performance of an active type of SWH with a horizontal tank and using *paraffin wax* as PCM in the changes of water flow rate has never been revealed. This study aimed to obtain the characteristics of the water flow rate effect on the storage capacity of thermal energy in the tank. This study used SWH, which contains a cylindrical capsule inside the tank. Each capsule was filled with RT55 *paraffin wax*. On the water and PCM sides, thermocouples were installed. Experiments were carried out indoors using a *solar simulator*. The water flow rates used were one LPM, two LPM, and three LPM. This study found that the thermal energy capacity for the flow discharge used was 10.45 MJ, 10.59 MJ, and 10.71 MJ, respectively. The greater the flow rate, the higher the thermal energy storage capacity.

PENDAHULUAN

Konsumsi energi final Indonesia pada tahun 2019 didominasi oleh jenis bahan bakar minyak yaitu sebesar 42% (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2021). Kondisi ini berdampak langsung terhadap lingkungan karena munculnya emisi gas rumah kaca (GRK). Di sisi lain, Indonesia memiliki sumber daya energi terbarukan yang besar. Insolasi matahari di Indonesia adalah 4,8 kWh/m²/hari (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2019). Potensi sumber daya energi yang besar ini dapat dimanfaatkan untuk mengurangi pengaruh GRK. Oleh karena itu, gerakan pemerintah melalui program dekarbonisasi dengan penggunaan energi terbarukan merupakan langkah yang tepat dan selayaknya didukung masyarakat.

Aplikasi dari energi matahari yang memerlukan campur tangan manusia dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu konversi ke energi listrik dan energi termal (Sen, 2008). Teknologi fotovoltaik merupakan konversi energi

matahari menjadi energi listrik, sedangkan salah satu contoh alat konversi energi matahari ke energi termal yang menghasilkan air panas adalah *solar water heater* (SWH). Berdasarkan aliran *heat transfer fluid* (HTF), SWH dikelompokkan menjadi dua tipe yaitu pasif dan aktif (Jamar dkk., 2016). Perbedaan kedua tipe ini adalah pada sirkulasi HTF. SWH tipe aktif menggunakan pompa untuk mensirkulasikan HTF, sedangkan HTF bersirkulasi secara natural pada tipe pasif. SWH cukup populer di masyarakat karena teknologinya sederhana. Air panas dibutuhkan oleh berbagai kalangan seperti untuk tempat tinggal (Yao & Steemers, 2005), hotel dan penginapan (Deng, 2003), rumah sakit (Bujak, 2010), tempat pendidikan (Oduro-Kwarteng dkk., 2009), gedung komersial (Murakawa dkk., 2005) dan perkantoran (Koiv, Voll & Haniv, 2010). Di antara teknologi penghasil air panas berbasis energi terbarukan, energi matahari lebih banyak digunakan karena penyebarannya yang luas. Menurut Ibrahim dkk (2014) dan Uctug & Azapagic (2018), penggunaan SWH dapat menekan konsumsi energi yang berasal dari energi fosil. Namun demikian, masalah utama SWH adalah investasi tinggi dan memerlukan volume penyimpanan energi termal (*thermal energy storage*, TES) yang besar (Fazilati & Alemrajabi, 2013). Kebutuhan TES yang besar disebabkan air sebagai material penyimpan kalor memiliki densitas energi yang rendah (Regin, Solanki & Saini, 2008). Air dikategorikan sebagai penyimpan energi termal jenis sensibel karena beroperasi dengan perubahan temperatur.

Material penyimpan energi termal kategori lain adalah jenis kalor laten yang bekerja dengan perubahan fasa (*phase change material*, PCM). *Paraffin wax* sebagai salah satu golongan PCM, memiliki sifat antara lain: proses perubahan fasanya reversibel (Nomura dkk., 2013); kalor latennya tinggi sehingga baik untuk aplikasi penyimpanan kalor dari energi matahari (Bouadila dkk., 2014; Cárdenas-Ramírez dkk., 2020); densitas energinya tinggi (Facci dkk., 2021) sehingga tidak memerlukan volume TES besar; konduktivitas termalnya rendah sehingga proses transfer kalor lambat (Tian & Zhao, 2013). Berdasarkan sifat-sifat tersebut maka *paraffin wax* cukup atraktif diaplikasikan pada SWH. Penggunaan PCM pada SWH dapat diletakkan di sistem perpipaan (Mahfuz dkk., 2014), di kolektor (Xue, 2016) dan di tangki TES (Naghavi dkk., 2017). Untuk meminimalkan kekurangan PCM yaitu rendahnya konduktivitas termal, Salunkhe & Shembekar (2012) dan Fukahori dkk. (2016) mengusulkan metode peningkatan transfer kalor dengan pengkapsulan PCM. PCM diwadahi pada kapsul dengan konstruksi berbagai bentuk kemudian dimasukkan di tangki SWH.

Penelitian pemakaian kapsul PCM di tangki SWH sistem aktif telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Perbandingan antara SWH berisikan PCM di dalam kapsul silindris berbahan aluminium dengan tanpa PCM adalah fraksi matahari yang diterima meningkat lebih kurang 4–8% (Ibáñez dkk., 2006). Laju aliran massa memberi kontribusi positif terhadap perolehan kalor pada saat *charging* untuk tangki yang berisi PCM dengan wadah berupa kapsul aluminium silindris (Padmaraju, Viginesh & Nallusamy, 2008). Pemakaian PCM dari tiga jenis campuran yaitu *paraffin* dan *stearic acid*, *paraffin* dan *palmitic acid* serta *stearic acid* dan *myristic acid* mampu meningkatkan performansi termal pada tangki SWH (Mazman dkk., 2009). Pengaruh penggunaan *paraffin wax* yang diwadahi kapsul aluminium silindris di dalam tangki SWH dengan posisi vertikal adalah air di tangki TES tetap bertahan pada temperatur 45°C selama eksperimen 24 jam (Al-Hinti dkk., 2010). Tangki SWH berisi PCM memakai kapsul bola memiliki penyimpanan kalor lebih besar 21,9% dibandingkan dengan tanpa PCM (Khot, 2014). Rugi-rugi kolektor dapat ditekan pada sistem SWH yang mengintegrasikan PCM dan air di dalam tangki karena menjamin temperatur air keluar tangki lebih rendah (Teamah dkk., 2018). Tangki air berisi PCM dapat menyerap kalor lebih tinggi daripada tangki yang hanya berisi air saja (Nazir dkk., 2019). Penggunaan PCM pada sistem SWH dapat mencegah *overheating* di kolektor (Wang dkk., 2019). Tangki SWH yang mengandung PCM dapat mempertahankan temperatur air lebih lama daripada SWH konvensional (Chargui & Tashtoush, 2021). Sistem tangki SWH berisi PCM dan diberi alat pengaduk dapat meningkatkan waktu *charging* sebesar 12,5% dibandingkan tanpa pengaduk (Dhaou dkk., 2022).

Secara umum, penelitian terdahulu memberikan hasil bahwa integrasi PCM pada tangki SWH mampu meningkatkan unjuk kerja termal sistem. Penelitian-penelitian yang sudah dilakukan lebih banyak menggunakan tangki SWH dengan posisi vertikal. Posisi ini banyak diaplikasikan di daerah dengan cuaca dingin, sedangkan untuk daerah panas cocok dengan tangki horizontal. Pengkajian tentang SWH yang mengintegrasikan PCM dengan air sebagai media penyimpan energi termal untuk posisi tangki horizontal belum banyak dilakukan. Begitu pula, penelitian yang membahas pengaruh debit HTF terhadap kapasitas penyimpanan energi termal pada SWH dengan tangki horizontal untuk konstruksi kapsul tumbuk belum pernah diungkap. Kapasitas penyimpanan energi termal adalah jumlah energi yang dapat disimpan di dalam tangki

TES yang berasal dari komponen-komponennya (Nallusamy, Sampath & Velraj, 2007). Kapasitas energi ini terdiri dari kalor sensibel HTF, kalor sensibel PCM, kalor sensibel kapsul, kalor sensibel tangki dan kalor laten PCM. Konstruksi kapsul tumbuk adakah posisi susunan kapsul di tangki SWH yang salah satu sumbunya berimpit dengan sumbu saluran masuk tangki (Nadjib, Santosa & Marausna, 2022). Paper ini bertujuan untuk menyelidiki perolehan kapasitas penyimpanan energi termal di tangki SWH yang berisi PCM dengan perubahan debit aliran HTF.

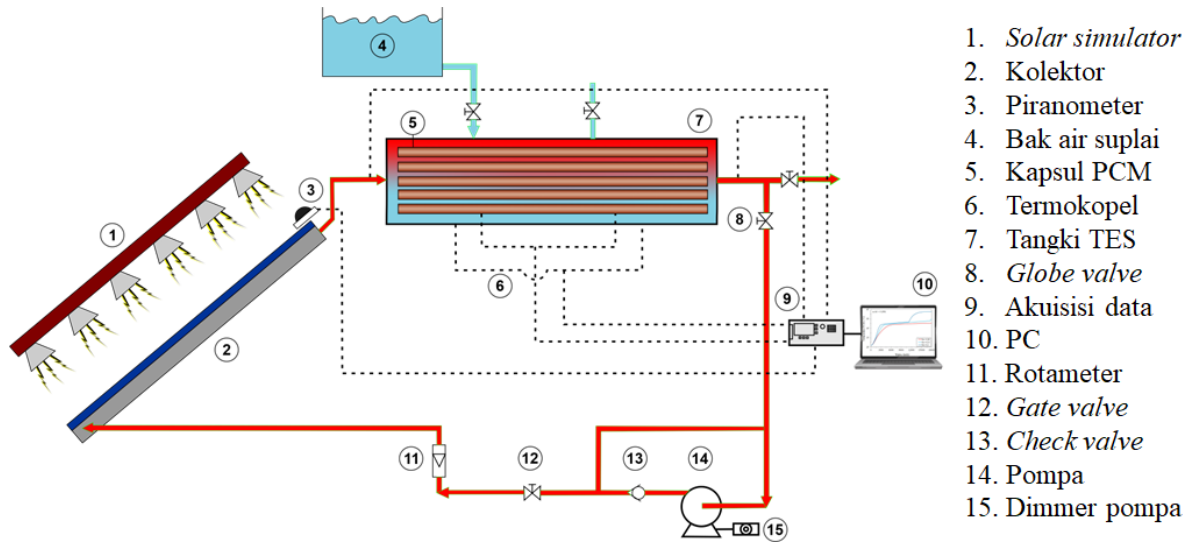
METODE PENELITIAN

Penelitian eksperimental ini memakai bahan air sebagai HTF dan *paraffin wax* RT55 sebagai PCM. HTF bersirkulasi pada sistem SWH dan kapsul PCM berada di dalam tangki dengan posisi terendam. Sifat termofisis *paraffin wax* RT55 ditunjukkan di Tabel 1.

Tabel 1. Sifat termofisis *paraffin wax* RT55 (Rubitherm Technologies GmbH, 2020)

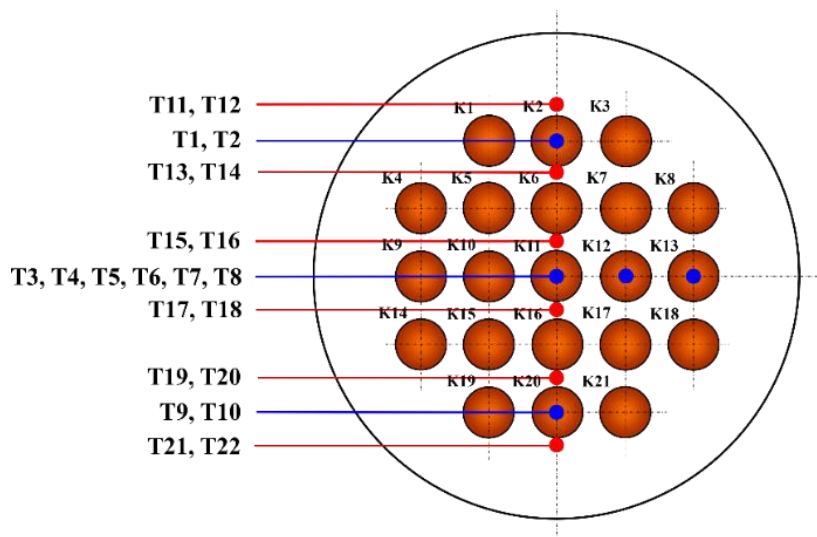
Sifat termofisis	Nilai
Area pelelehan	51-57°C
Kalor laten	170 kJ/kg
Kalor spesifik	2 kJ/kg.K
Konduktivitas termal	0,2 W/m.K
Densitas fasa padat	0,88 kg/l
Densitas fasa cair	0,77 kg/l

Alat yang digunakan adalah satu unit SWH dengan komponen utama tangki TES, alat penukar kalor, kolektor, sistem perpipaan dan *solar simulator*. Volume tangki adalah 60 liter. Tangki dibalut dengan *glasswool* sebagai isolator. Susunan kapsul PCM dengan jumlah 21 buah diletakkan di dalam tangki membentuk alat penukar kalor. Kapsul yang dipakai adalah pipa tembaga berdiameter 1” dengan panjang 1 m. PCM dimasukkan ke tiap kapsul sebanyak 327 gram. Kolektor tipe *flat plate* dipasang di bawah tangki dan memiliki luas 1,9 m². Kolektor dipasang dengan *tilt angle* 20° terhadap horizontal. Tangki dan kolektor dihubungkan dengan pipa plastik tahan panas berdiameter ¾”. Pompa air dipasang di antara tangki dan sisi masuk kolektor. Pengatur aliran pada sistem perpipaan terdiri dari *globe valve*, *gate valve* dan *check valve*. Rotameter sebagai pengatur debit aliran HTF diletakkan sebelum sisi masuk kolektor. Eksperimen dilakukan secara *indoor* sehingga memerlukan *solar simulator* sebagai sumber energi termal. *Solar simulator* terdiri dari susunan lampu halogen dengan jumlah 24 buah dan daya tiap lampu adalah 300 watt. Susunan alat eksperimen ditunjukkan di Gambar 1.



Gambar 1. Skema alat eksperimen

Eksperimen ini memakai *heat flux* yang konstan yaitu 1000 W/m^2 . Pengaturan *heat flux* dari *solar simulator* menggunakan *voltage regulator*. Piranometer diletakkan di dekat kolektor untuk mengetahui *heat flux* yang dihasilkan oleh *solar simulator*. Variabel bebas dalam eksperimen adalah debit HTF. Variasi yang dipakai adalah 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm. Pengaturan debit HTF memakai *gate valve* dan *dimmer* pompa. Jumlah termokopel yang digunakan adalah 24 buah dengan perincian dua buah di sisi masuk dan keluar tangki, 12 buah di sisi HTF dan 10 buah di sisi PCM. Jumlah termokopel tersebut diasumsikan telah mewakili kondisi temperatur HTF dan PCM di dalam tangki. Rotameter dan termokopel dilakukan kalibrasi terlebih dahulu untuk mendapatkan debit aliran dan temperatur aktual. Termokopel disambungkan dengan data akuisisi dan dihubungkan dengan komputer. Susunan kapsul di dalam tangki TES dan peletakan termokopel disajikan di Gambar 2.



Gambar 2. Susunan kapsul dan letak termokopel

Eksperimen dimulai dengan mengisi air pada sistem SWH hingga penuh. Pompa diaktifkan untuk mensirkulasikan HTF sambil diatur debitnya pada 1 lpm. Selama pompa aktif, kebocoran air di setiap sambungan dan di sekitar keluaran termokopel dipantau. Apabila masih ada kebocoran air maka pengambilan data belum dapat dilaksanakan. *Solar simulator* dinyalakan bila tidak terjadi kebocoran air dan aliran di

rotameter telah stabil yang ditandai dengan tidak munculnya gelembung udara. Bersamaan dengan ini, data akuisisi dan komputer diaktifkan. Eksperimen yang dilakukan adalah proses *charging* dengan waktu 160 menit. Data temperatur HTF dan PCM direkam setiap menit. Jika proses *charging* selesai, eksperimen dilanjutkan hari berikutnya dengan cara yang sama tetapi diubah debit HTF menjadi 2 lpm dan 3 lpm.

Data temperatur hasil eksperimen dikonversi menjadi temperatur aktual berdasarkan hasil kalibrasi. Data tersebut digunakan untuk membuat evolusi temperatur HTF dan PCM selama waktu *charging*. Langkah selanjutnya adalah menganalisis kapasitas penyimpanan energi termal untuk tiap variasi menggunakan persamaan (1).

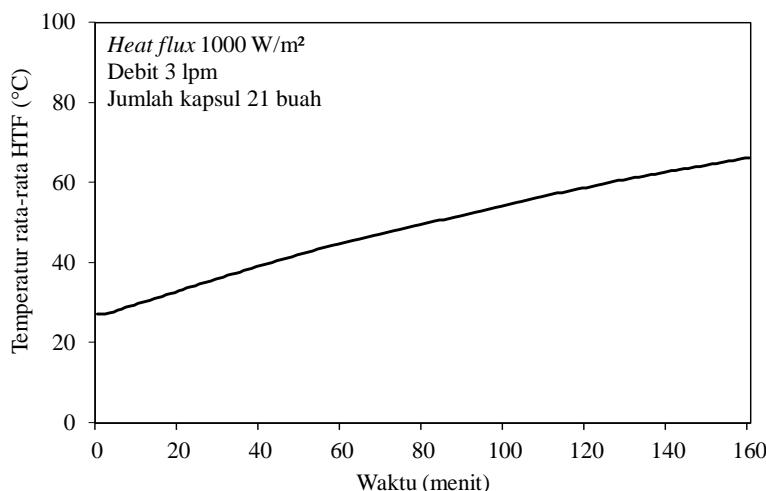
$$E(t) = m_a c_{p,a} (T_a(t) - T_{a,i}) + m_p \{ c_{p,p} (T_m(t) - T_{p,i}) + L + c_{p,c} (T_{p,f}(t) - T_m(t)) \} + m_k c_{p,k} (T_k(t) - T_{k,i}) + m_t c_{p,t} (T_t(t) - T_{t,i}) \quad (1)$$

dengan E = kapasitas energi termal (kJ); m_a , m_p , m_k dan m_t masing-masing adalah massa air, massa PCM, massa kapsul dan massa tangki (kg); $c_{p,a}$, $c_{p,p}$, $c_{p,c}$, $c_{p,k}$ dan $c_{p,t}$ berturut-turut adalah kalor jenis air, kalor jenis PCM, kalor jenis material kapsul dan kalor jenis material tangki (kJ/kg.°C); T_a = temperatur air sesaat (°C), $T_{a,i}$ = temperatur awal air (°C), T_m = temperatur PCM saat meleleh (°C), $T_{p,i}$ = temperatur awal PCM (°C), $T_{p,f}$ = temperatur akhir PCM (°C), T_k = temperatur kapsul sesaat (°C), $T_{k,i}$ = temperatur awal kapsul (°C), T_t = temperatur tangki sesaat (°C), $T_{t,i}$ = temperatur akhir tangki (°C) dan L = kalor laten PCM (kJ/kg). Hasil yang diperoleh kemudian ditampilkan dalam diagram batang yang menunjukkan jumlah penyimpanan energi termal tiap komponen selama waktu *charging*. Analisis berikutnya adalah membuat persentase penyimpanan tiap komponen terhadap energi termal total yang ditampilkan pada diagram *pie*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evolusi temperatur rata-rata HTF

Temperatur rata-rata HTF diperoleh dengan merata-rata hasil temperatur 12 buah termokopel yang ada di dalam tangki sisi HTF. Temperatur rata-rata ini dianggap mewakili kondisi energi termal HTF di tangki. Evolusi temperatur rata-rata HTF selama *charging* 160 menit ditunjukkan di Gambar 3. Grafik di Gambar 3 diperoleh pada saat *heat flux* sebesar 1000 W/m² dan debit HTF 3 lpm.



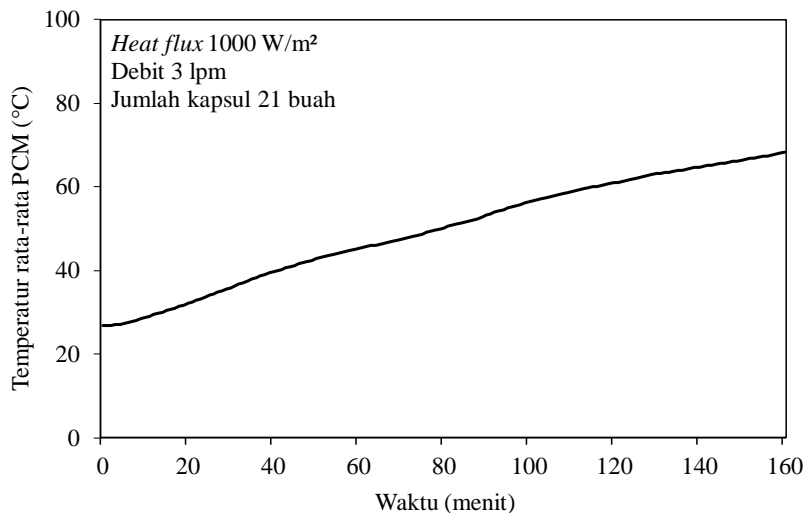
Gambar 3. Evolusi temperatur rata-rata HTF

Temperatur HTF saat awal proses *charging* adalah $27,10^{\circ}\text{C}$ dan temperatur akhirnya $66,24^{\circ}\text{C}$. Kenaikan temperatur yang diperoleh selama *charging* adalah $39,14^{\circ}\text{C}$. Kenaikan temperatur HTF disebabkan semakin lama waktu *charging* semakin besar akumulasi energi termal yang diperoleh kolektor. Akibatnya adalah produksi air panas di kolektor meningkat karena transfer kalor secara konduksi dan konveksi semakin besar. Sirkulasi HTF menyebabkan air panas sampai ke tangki TES sehingga temperatur HTF di dalam tangki meningkat. Grafik yang diperoleh di Gambar 3 menunjukkan kenaikan temperatur secara kontinyu. Kondisi ini terjadi akibat *heat flux* dari *solar simulator* adalah relatif konstan.

Menurut Gambar 3, laju pemanasan rata-rata yang terjadi adalah $0,245^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Laju pemanasan rata-rata diperoleh dengan merata-rata kenaikan temperatur HTF di setiap pengambilan data selama *charging*. Nilai laju pemanasan rata-rata ini lebih tinggi daripada penelitian sebelumnya yaitu sebesar $0,063^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ (Nadjib dkk., 2022). Nilai laju pemanasan rata-rata penelitian ini lebih besar karena susunan kapsulnya adalah tipe tumbuk, sedangkan di penelitian terdahulu susunannya non-tumbuk. Air panas masuk tangki yang menumbuk kapsul membantu penyebaran air panas di sepanjang penampang tangki. Untuk susunan kapsul non-tumbuk, air panas yang berasal dari saluran masuk tidak ada yang menyebarkan aliran sehingga sebagian besar menuju ke saluran keluar tangki. Akibatnya adalah transfer kalor dari air panas ke HTF di dalam tangki lebih rendah karena tidak ada efek olakan di dalamnya.

Evolusi temperatur rata-rata PCM

Gambar 4 menunjukkan evolusi temperatur rata-rata PCM selama *charging*. Perolehan 10 termokopel PCM dari lima kapsul (Gambar 2) dirata-rata untuk menghasilkan temperatur rata-rata PCM. Evolusi di Gambar 4 dimulai dari temperatur PCM $26,88^{\circ}\text{C}$ sampai dengan $68,18^{\circ}\text{C}$, atau terjadi kenaikan temperatur sebesar $41,3^{\circ}\text{C}$. Hasil kenaikan temperatur ini lebih tinggi sedikit daripada HTF seperti yang ada di Gambar 3.

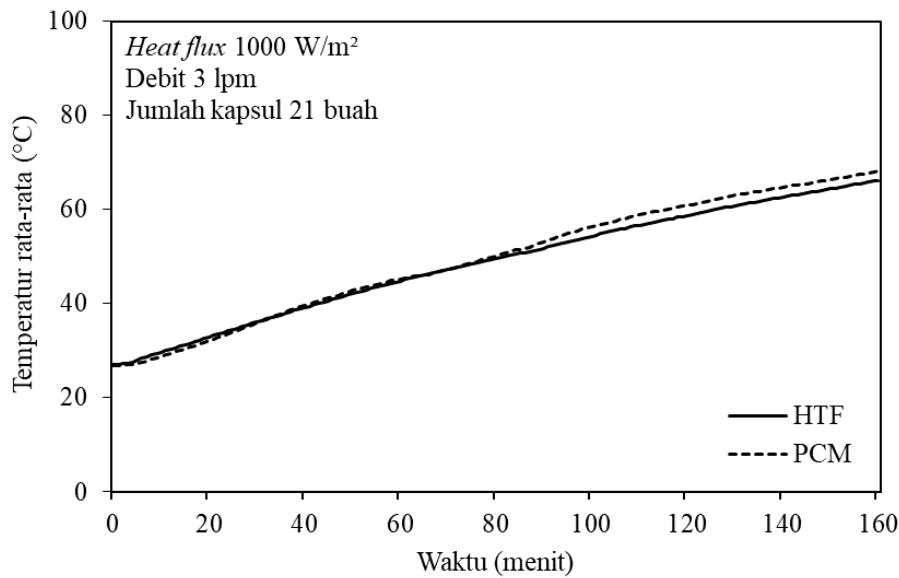


Gambar 4. Evolusi temperatur rata-rata PCM

Berdasarkan Gambar 4, laju pemanasan rata-rata PCM selama *charging* adalah $0,257^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Nilai ini juga lebih tinggi dari penelitian Nadjib dkk. (2022) yaitu $0,062^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Profil kenaikan temperatur PCM hampir sama dengan HTF. Perbedaan yang jelas terlihat adalah ada penurunan *slope* grafik mulai menit ke-63 sampai menit ke-88. Fenomena ini terjadi diduga karena pengaruh pelelehan PCM di dalam kapsul. Ciri dari *paraffin* jenis *technical grade* adalah proses pelelehannya tidak menunjukkan temperatur yang konstan (Trp, 2005). Pelelehan *paraffin* tidak terjadi secara isothermal karena transisi fasenya tidak stabil yang menyebabkan pembentukan *mushy* (Rahmalina & Rahman, 2022).

Perbandingan evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM

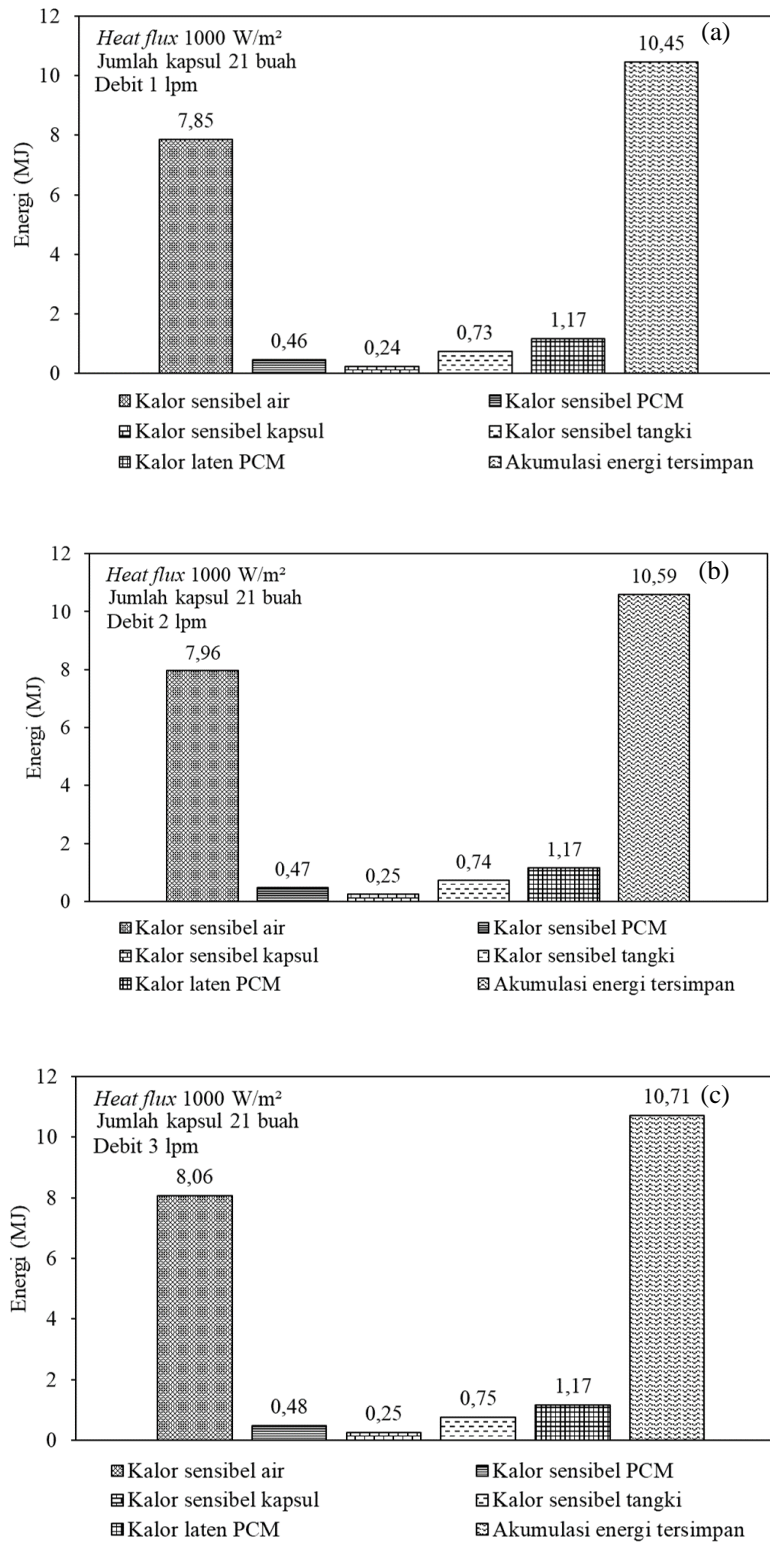
Gambar 5 menjelaskan perbandingan proses *charging* antara HTF dan PCM. Temperatur HTF lebih tinggi daripada PCM di awal proses. Air panas dari kolektor masuk ke tangki dan terjadi perpindahan kalor ke HTF. Setelah energi termal HTF meningkat, perpindahan kalor berlangsung dari HTF ke PCM karena ada perbedaan temperatur. Perpindahan kalor didominasi oleh konduksi dari awal proses sampai mulai terjadi perubahan fase PCM dari padat ke cair. Selama perubahan fase, proses perpindahan kalornya adalah konduksi dan konveksi alami. Proses konveksi alami meningkat pada saat pelelehan berlangsung sampai PCM meleleh sempurna (Trp, 2005). Peningkatan konveksi alami membutuhkan energi termal yang tinggi. Proses ini terkonfirmasi di Gambar 5 yaitu temperatur PCM mulai lebih besar daripada temperatur HTF setelah menit ke-33.



Gambar 5. Perbandingan evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM

Kapasitas penyimpanan energi termal

Energi termal yang dihasilkan SWH terdiri dari kalor sensibel dan kalor laten pada tangki TES. Kedua jenis kalor tersebut memberikan informasi besarnya kapasitas penyimpanan energi termal pada tangki SWH. Komponen tangki TES yang memberi kontribusi terhadap penyimpanan energi termal adalah air sebagai HTF, PCM, kapsul dan tangki. Gambar 6 menunjukkan hasil perhitungan kapasitas penyimpanan energi termal setiap komponen berdasarkan persamaan (1) untuk debit HTF 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm. Perolehan penyimpanan energi termal tiap komponen dan tiap variasi debit HTF dirangkum di Tabel 2.



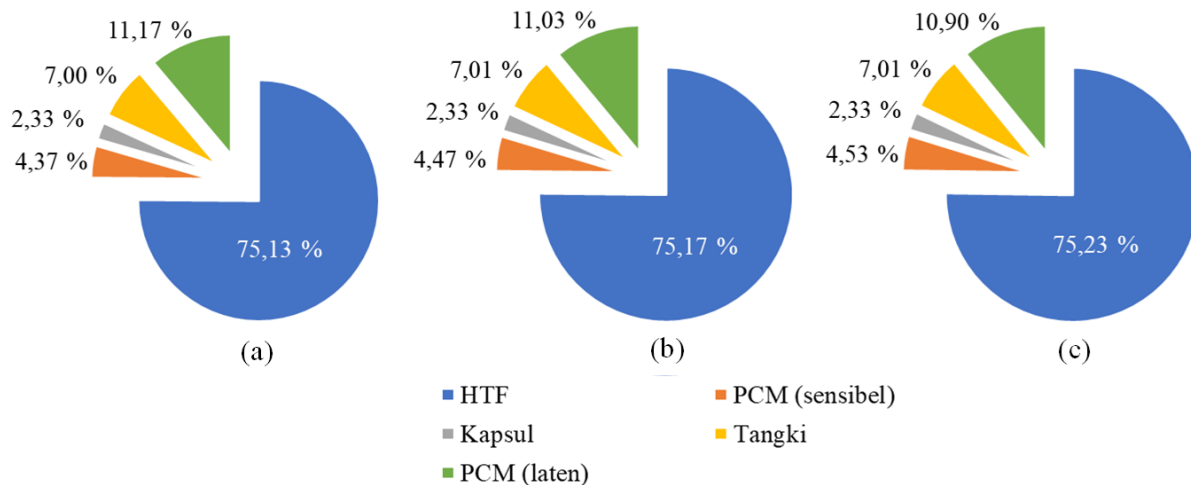
Gambar 6. Kapasitas penyimpanan energi termal, (a) 1 lpm, (b) 2 lpm, (c) 3 lpm

Tabel 2. Perbandingan kapasitas penyimpanan energi termal

Komponen	1 lpm	2 lpm	3 lpm
Air (HTF, sensibel)	7,85 MJ	7,96 MJ	8,06 MJ
Kapsul (sensibel)	0,24 MJ	0,25 MJ	0,25 MJ
Tangki (sensibel)	0,73 MJ	0,74 MJ	0,75 MJ
PCM (sensibel dan laten)	1,63 MJ	1,64 MJ	1,65 MJ
Energi total	10,45 MJ	10,59 MJ	10,71 MJ

Kenaikan penyimpanan energi termal dari 1 lpm ke 2 lpm dan dari 1 lpm ke 3 lpm masing-masing adalah 1,34% dan 2,49%. Semakin besar debit HTF maka kapasitas penyimpanan energi termal semakin tinggi. Pengambilan energi termal yang ada di kolektor semakin banyak bila debitnya besar sehingga temperatur air panas masuk ke tangki lebih tinggi. Laju perpindahan kalor sebanding dengan laju aliran massa fluida (Koestoer, 2002), sedangkan laju aliran massa jika dikalikan dengan volume spesifik menghasilkan debit aliran. Dengan demikian jelas bahwa debit aliran mempengaruhi pengangkutan kalor. Hasil yang diperoleh di penelitian ini sesuai dengan temuan Nallusamy, Sampath & Velraj (2007) yaitu laju aliran massa yang tinggi mendapatkan energi termal kumulatif besar. Demikian juga menurut pernyataan Padmaraju, Vignesesh & Nallusamy (2008) bahwa proses *charging* lebih cepat bila laju aliran massa HTF tinggi.

Hasil yang diperoleh di Tabel 2 dapat digunakan untuk menganalisis kontribusi tiap komponen dalam perolehan kapasitas penyimpanan energi termal. Gambar 7 menyajikan persentase tiap komponen untuk setiap variasi debit HTF di dalam tangki TES terhadap penyimpanan energi termal total. Tabel 3 memberikan ringkasan kontribusi tersebut selama proses *charging*.



Gambar 7. Persentase penyimpanan energi termal komponen, (a) 1 lpm, (b) 2 lpm, (c) 3 lpm

Tabel 3. Perbandingan kapasitas penyimpanan energi termal

Komponen	1 lpm	2 lpm	3 lpm
Air (HTF, sensibel)	75,13%	75,17%	75,23%
PCM (sensibel)	4,37%	4,47%	4,53%
Kapsul (sensibel)	2,33%	2,33%	2,33%
Tangki (sensibel)	7%	7,01%	7,01%
PCM (laten)	11,17%	11,03%	10,9%

Tabel 3 menunjukkan bahwa urutan komponen pemberi kontribusi terhadap kapasitas penyimpanan energi termal dari yang tertinggi untuk semua variasi adalah HTF, PCM, tangki dan kapsul. Menurut Tabel 3, HTF mendominasi perolehan kapasitas penyimpanan energi termal dengan nilai yang sangat signifikan. Penelitian ini menggunakan 21 buah kapsul di dalam tangki. Porositas tangki pada kondisi ini adalah 82,23%. Porositas tangki menunjukkan perbandingan antara volume air saat tangki dipasang kapsul dan volume air tangki tanpa kapsul (Ma, Glatzmaier & Mehos, 2014). Volume air di tangki dengan porositas tersebut adalah 49,34 liter. Volume sejumlah ini memberi pengaruh sangat besar kepada penyimpanan energi termal selama proses *charging* khususnya dengan adanya perubahan temperatur yang terjadi (proses sensibel). Semakin besar debit HTF maka persentase kapasitas energi termal yang dikumpulkan semakin tinggi karena pengambilan kalor di kolektor semakin banyak.

Tabel 3 juga menginformasikan bahwa persentase kapasitas penyimpanan energi termal dari PCM untuk debit 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm masing-masing adalah 15,54%, 15,5% dan 15,43%. Semakin tinggi debit HTF memberi pengaruh besar kepada HTF di dalam tangki karena media yang pertama kali menerima kalor dari air panas keluar kolektor adalah HTF. Oleh karena itu semakin besar debit maka kontribusi PCM semakin rendah. Komponen yang di luar dugaan menyimpan energi termal cukup berarti adalah tangki. Tangki yang digunakan berbahan *mild steel* dengan massa 40,82 kg. Massa yang besar ini sangat berarti dalam menyimpan energi termal.

KESIMPULAN

Paper ini telah melakukan investigasi pengaruh debit air terhadap kapasitas penyimpanan energi termal pada SWH tipe aktif yang melibatkan PCM sebagai media penyimpan kalor. Perolehan kapasitas penyimpanan energi termal untuk debit HTF 1 lpm, 2 lpm dan 3 lpm masing-masing adalah 10,45 MJ, 10,59 MJ dan 10,71 MJ. Semakin tinggi debit HTF, kapasitas penyimpanan energi termal semakin tinggi. Penyimpanan kalor ini didominasi oleh HTF sebesar 75,23% kemudian disusul PCM sebanyak 15,43% pada debit HTF 3 lpm. Penelitian ke depan perlu dilakukan optimalisasi pemakaian komponen-komponen dalam penyimpanan energi termal untuk menghasilkan kontribusi yang efektif. Porositas tangki dapat dikurangi untuk memperbesar peran PCM dalam penyimpanan kalor. Tangki TES yang dipakai berbahan lebih ringan sehingga mengurangi rugi-rugi kalor ke lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Riset dan Inovasi Universitas Muhammadiyah Yogyakarta yang mendukung penelitian ini dengan Kontrak Nomor: 56/R-LRI/XII/2022.

REFERENSI

- Al-Hinti, I., Al-Ghandoor, A., Maaly, A., Naqeer, I. 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(8), 1735-1740. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.038>
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. (2021, Agustus). *Outlook energi Indonesia 2021 perspektif teknologi energi indonesia: tenaga surya untuk penyediaan energi charging station*. <https://www.bppt.go.id/dokumen/outlook-energi>

- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. (2019, November). *Outlook energi Indonesia 2019: dampak peningkatan pemanfaatan energi baru terbarukan terhadap perekonomian nasional*. <https://www.bppt.go.id/dokumen/outlook-energi>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.094>
- Bujak, J. (2010). Heat consumption for preparing domestic hot water in hospitals. *Energy and Buildings*, 42(7), 1047-1055. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.017>
- Cárdenas-Ramírez, C., Jaramillo, F., & Gómez, M. (2020). Systematic review of encapsulation and shape-stabilization of phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 30, 101495. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101495>
- 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, 102129. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102129>
- Deng, S. (2003). Energy and water uses and their performance explanatory indicators in hotels in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 35(8), 775-784. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00238-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00238-4)
- Dhaou, M. H., Mellouli, S., Alresheedi, F., & El-Ghoul, Y. (2022). Experimental assessment of a solar water tank integrated with nano-enhanced PCM and a stirrer. *Alexandria Engineering Journal*, 61(10), 8113-8122. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.040>
- Facci, A. L., Lauricella, M., Succi, S., Villani, V., & Falcucci, G. (2021). Optimized modeling and design of a PCM-enhanced H₂ storage. *Energies*, 14(6), 1554. <https://doi.org/10.3390/en14061554>
- 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>
- Ibanez, 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., & Louahlia-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>
- Jamar, A. M. Z. A. A., Majid, Z. A. A., Azmi, W. H., Norhafana, M., & Razak, A. A. (2016). A review of water heating system for solar energy applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.028>
- Koestoer, R. A. (2022). *Perpindahan kalor untuk mahasiswa teknik*. Salemba Teknika.
- 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>
- Koiv, T. A., Voll, H., & Haniv, A. (2010). Domestic hot water consumption in educational premises, apartment and office buildings. *WSEAS TRANSACTIONS on Environment and Development*, (1), 54-63.
- Ma, Z., Glatzmaier, G., & Mehos, M. (2014). Fluidized bed technology for concentrating solar power with thermal energy storage. *Journal of solar energy engineering*, 136(3). <https://doi.org/10.1115/1.4027262>

- Mahfuz, M. H., Anisur, M. R., Kibria, M. A., Saidur, R., & Metselaar, I. 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. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.022>
- Mazman, M., Cabeza, L. F., Mehling, H., Noguees, M., Evliya, H., & Paksoy, H. Ö. (2009). Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems. *Renewable energy*, 34(6), 1639-1643. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.016>
- Murakawa, S., Nishina, D., Takata, H., & Tanaka, A. (2005, September). An analysis on the loads of hot water consumption in the restaurants. In *Proceedings of the 31st W062 International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings, Brussels, Belgium* (pp. 14-16). <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Analysis-on-the-Loads-of-Hot-Water-Consumption-Murakawa-Nishina/35d59cb39f81943098faa08f3d3bd46e9cd24359>
- Nadjib, M., Santosa, T. H. A., & Marausna, G. (2022). Kajian unjuk kerja termal susunan kapsul phase-change material non-tumbuk di dalam tangki pemanas air tenaga surya sistem aktif. *TEKNIK*, 43(3), 227-235. <https://doi.org/10.14710/teknik.v43i3.42149>
- Nadjib, M., Santosa, T. H. A., Sentosa, A. D., & Mukhlisin, D. (2022). Pengaruh variasi debit air terhadap unjuk kerja termal tangki pemanas air tenaga surya yang berisi phase-change material. *JMPM (Jurnal Material dan Proses Manufaktur)*, 6(1). <https://doi.org/10.18196/jmpm.v6i1.14795>
- Naghavi, M. S., Ong, K. S., Badruddin, I. A., Mehrali, M., & Metselaar, H. S. C. (2017). Thermal performance of a compact design heat pipe solar collector with latent heat storage in charging/discharging modes. *Energy*, 127, 101-115. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.097>
- Nallusamy, N., Sampath, S., & Velraj, R. J. R. E. (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., Osorio, F. J. B., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., ... & 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>
- Oduro-Kwarteng, S., Nyarko, K. B., Odai, S. N., & Aboagye-Sarfo, P. (2009). Water conservation potential in educational institutions in developing countries: case study of a university campus in Ghana. *Urban water journal*, 6(6), 449-455. <https://doi.org/10.1080/15730620903108975>
- Padmaraju, S. V., Vignes, M., & Nallusamy, N. (2008). Comparative study of sensible and latent heat storage systems integrated with solar water heating unit. *Renewable Energy & Power Quality Journal*, 1(6), 55-60. <https://www.icrepq.com/icrepq-08/218-vijay.pdf>
- Rahmalina, D., & Rahman, R. A. (2022). Improving the phase transition characteristic and latent heat storage efficiency by forming polymer-based shape-stabilized PCM for active latent storage system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 31, 101840. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101840>
- Regin, A. F., Solanki, S. C., & Saini, J. S. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438-2458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009>
- Rubitherm Technologies GmbH. (2020, October 9). *Technisches Datenblatt RT55*. https://www.rubitherm.com/media/products/datasheets/Techdata_-RT55_DE_09102020.PDF

- 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>
- Sen, Z. (2008). *Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy*. Springer Science & Business Media.
- 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, 519-530. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.034>
- Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied energy*, 104, 538-553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>
- Trp, A. (2005). An experimental and numerical investigation of heat transfer during technical grade paraffin melting and solidification in a shell-and-tube latent thermal energy storage unit. *Solar energy*, 79(6), 648-660. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.03.006>
- 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, 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>
- Xue, H. S. (2016). Experimental investigation of a domestic solar water heater with solar collector coupled phase-change energy storage. *Renewable Energy*, 86, 257-261. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.017>
- Yao, R., & Steemers, K. (2005). A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. *Energy and buildings*, 37(6), 663-671. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.007>