

Studi Pelelehan PCM di Dalam Tabung Penyimpanan Kalor Pada *Solar Water Heater* Sistem Aktif

G. Marausna^{1,*}, J. Waluyo¹

¹Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia.
e-mail: *1 marausna@gmail.com

Abstrak

Phase change materials (PCM) mendapat banyak perhatian dalam penggunaannya sebagai penyimpan energi termal karena densitas energi per unit massa/volume yang tinggi. Pemanfaatan PCM sebagai penyimpan energi termal dapat diterapkan pada tangki penyimpan air, *solar collector* dan *pipework* terisolasi. Di dalam studi ini parameter pelelehan paraffin wax RT52 yang merupakan salah satu jenis PCM diprediksi menggunakan sebuah model simulasi solar water heater sistem aktif yang berisi susunan kapsul PCM berbentuk silinder banyak. Pemodelan simulasi pelelehan PCM menggunakan metode *enthalpy-porosity*. Laju aliran heat transfer fluid (HTF) divariasikan dan fluks kalor dijaga konstan 1000 W/m². Hasil simulasi menunjukkan bahwa laju aliran HTF 4 lpm, 3 lpm, dan 2 lpm memiliki perbedaan waktu pelelehan yang tidak terlalu signifikan yaitu 10,3% dan 5,7%. Perbedaan temperatur antara HTF dan PCM sebesar 7,5 K menjadi titik puncak bagi fluks kalor permukaan yaitu 433,7 W/m².

Kata kunci: *Phase Change Materials, Solar Water Heater, Paraffin Wax, Energi Terbarukan.*

Abstract

Phase change materials (PCM) gets a lot of attention in its use as a thermal energy store because of its high energy density per unit mass / volume. The use of PCM as a thermal energy storage can be applied to water storage tanks, solar collectors and isolated pipeworks. In this study the melting parameters of paraffin wax RT52, which is one type of PCM, are predicted to use an active model of solar water heater system which contains many cylindrical PCM capsules. Simulation modeling of PCM melting using the *enthalpy-porosity* method. Heat transfer fluid (HTF) flow rates were varied and heat flux was kept constant at 1000 W / m². The simulation results show that HTF 4 lpm, 3 lpm and 2 lpm flow rates have not significantly significant melting times, namely 10.3% and 5.7%. The temperature difference between HTF and PCM of 7.5 K becomes the peak point for surface heat flux of 433.7 W / m².

Keywords: *Phase Change Materials, Solar Water Heater, Paraffin Wax, Renewable energy.*

1. PENDAHULUAN

Emisi gas rumah kaca menjadi isu lingkungan yang mendapat perhatian global. Emisi gas rumah kaca terdiri dari karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), *nitrous oxide*, CFC-12, dan HCFC-22 yang berkontribusi menyebabkan pemanasan global dan perubahan iklim (Jin dkk., 2018). Strategi energi berkelanjutan yang akan mengatasi permasalahan kekurangan energi dan memperlambat laju pemanasan global dengan mengurangi CO₂ adalah melalui pemanfaatan energi surya (Shahsavari dkk., 2018).

Letak geografis negara Indonesia memiliki potensi yang tinggi untuk menerima radiasi surya yang secara kuantitas radiasi surya yang mencapai daratan mencukupi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. *Global horizontal irradiant* (GHI) harian di Indonesia mencapai 6 kWh/m² dan GHI tahunan mencapai 2191 kWh/m². *Direct normal irradiant* (DNI) harian di Indonesia mencapai 5,6 kWh/m² dan DNI tahunan mencapai 2045 kWh/m² (Solargis, 2017). Energi surya dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk memanaskan air yang dikenal dengan nama pemanas air tenaga surya (PATS) atau *solar water heater* (SWH).

Beberapa peneliti memanfaatkan *phase change materials* (PCM) untuk diterapkan pada sistem SWH dengan berbagai tujuan di antaranya sebagai penyimpan energi untuk kestabilan *flat plate collector* (Kurklu, dkk., 2001). PCM menurunkan kerugian kalor dan meningkatkan jumlah kalor yang dimanfaatkan dari energi surya pada *evacuated tube collector* (Felinski dkk., 2016). PCM meningkatkan densitas energi dari sistem dengan mengkapsulkan PCM di dalam tangki penyimpanan yang berisi air dengan proses *charging* tidak langsung menggunakan *coil heat exchanger* (Abdelsalam dkk., 2017). PCM meningkatkan efisiensi penyimpanan kalor dan kalor yang dilepas sehingga dapat mengurangi penggunaan sistem pemanas listrik yang digunakan pada sistem SWH (Lu dkk., 2018).

Di dalam penelitian ini digunakan *paraffin wax* yang terdiri dari rantai alkali CH₃-CH₂-CH₃ merupakan salah satu jenis PCM yang dapat digunakan pada sistem SWH dengan mempertimbangkan bahwa peningkatan kalor peleburan, titik pelelehan, dan kalor laten yang dilepaskan oleh kristalisasi rantai CH₃ akan meningkat dengan meningkatnya panjang rantai yang dimiliki *paraffin wax*. *Paraffin wax* memiliki jangkauan temperatur yang besar, aman, handal, dapat diprediksi, harga yang lebih murah, dan tidak korosif menjadikannya tergolong dalam material penyimpan kalor peleburan yang banyak digunakan dalam berbagai bidang (Sharma dkk., 2009).

Desain dan kinerja berbagai PCM yang terintegrasi dengan SWH ditinjau dan dikategorikan ke dalam 3 kategori yaitu tangki penyimpanan air, *solar collector* dan *pipenork* terisolasi. PCM yang dipasang pada tangki penyimpanan air memiliki kinerja yang sangat baik karena jumlah massa PCM pada tangki penyimpanan air dapat menyimpan kalor yang lebih banyak selama *solar collector* terpapar sinar matahari (Kee dkk., 2018).

Penelitian pemodelan *latent heat thermal energy storage* (LHTES) menggunakan *paraffin wax* telah sejak lama dilakukan dengan berbagai fokus penelitian seperti pengaruh bilangan *Rayleigh* pada pelelehan PCM (Ng dkk., 1998). Bilangan *Stefan* dan ukuran jari-jari kapsul mempengaruhi perubahan fasa PCM (Regin dkk., 2006). Proses pelelehan *paraffin wax* dianalisa menggunakan metode *enthalpy-porosity* dan fungsi fraksi cairan tak henti (Rosler dkk., 2011). *Heat transfer fluid* (HTF) mempengaruhi perubahan fasa PCM selama *charging* dan *discharging* (Longeon dkk., 2013). Jumlah *tube* mempengaruhi perubahan fasa PCM selama proses *charging* (Esapour dkk., 2016). Distribusi massa PCM di dalam *multi-tube heat exchanger* mempengaruhi perubahan fasa PCM selama proses *charging* (Gorzin dkk., 2018).

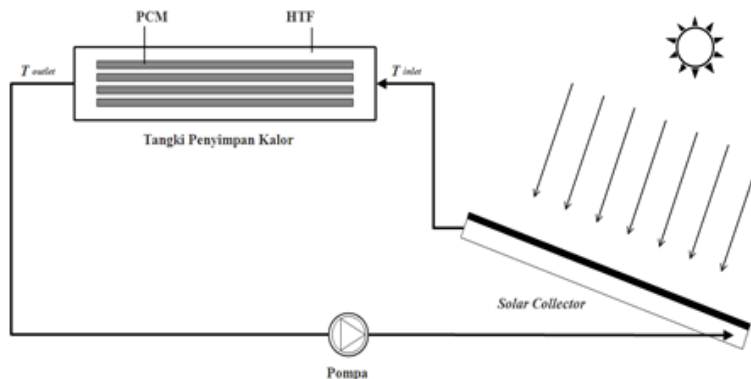
Di dalam studi ini parameter pelelehan *paraffin wax* RT52 diprediksi menggunakan sebuah model simulasi *solar water heater* sistem aktif dengan metode *enthalpy-porosity*. Pengamatan dilakukan ketika proses pengisian (*charging*) pada SWH sistem aktif dengan *heat loss* pada sistem SWH diabaikan, *heat flux* diasumsikan merata sepanjang pipa tembaga *solar collector* dan konduktivitas termal PCM diasumsikan konstan.

2. METODE PENELITIAN

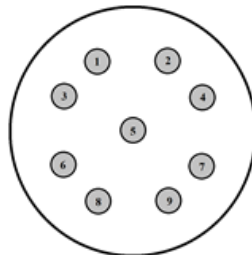
Skema SWH sistem aktif terintegrasi dengan PCM ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. *Solar collector* menerima radiasi dari matahari dan meningkatkan temperatur air sebagai HTF di dalam *solar collector*. Air disirkulasikan menggunakan pompa menuju ke tangki penyimpanan kalor terisolasi berdiameter 250 mm dan panjang 1220 mm yang berisi PCM dengan diameter kapsul 25,4 mm dan panjang 1000 mm memiliki sifat termal ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat termal paraffin wax RT 52.

No.	Sifat termal <i>paraffin wax</i> RT 52	Nilai
1	Temperatur pelelehan, T_m (K)	322-326
2	Kalor laten peleburan, L (J/kg)	173000
3	Kalor spesifik, C_{pl} , C_{ps} (J/kg K)	2000
4	Massa jenis padat, ρ_s (kg/m ³)	880
5	Massa jenis cair ρ_l (kg/m ³)	760
6	Konduktivitas termal, k (W/m K)	0,2
7	Viskositas kinematik, ν (m ² /s)	$31,28 \times 10^{-6}$



Gambar 1. Skema *solar water heater* sistem aktif terintegrasi dengan PCM.



Gambar 2. Susunan kapsul PCM di dalam tangki penyimpanan.

Kalor yang diterima HTF di dalam *solar collector* dimodelkan dengan memberikan fluks kalor konstan pada dinding pipa tembaga sebesar 1000 W/m². Sirkulasi HTF di dalam sistem SWH dijaga konstan dengan variasi laju aliran 2 liter per menit (lpm), 3 lpm, dan 4 lpm.

Temperatur awal HTF dan PCM diatur pada temperatur 321,9 K (48,75 °C) mendekati temperatur pelelehan PCM 322-326 K (49-50 °C).

Untuk mensimulasikan fenomena perubahan fasa PCM digunakan persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad 1$$

Persamaan momentum:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g}) + \vec{S} \quad 2$$

Persamaan redaman Darcy sebagai *source term* pada persamaan (2):

$$\vec{S} = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^2+0,001)} A_{mush} \vec{V} \quad 3$$

Konstanta porositas A_{mush} yang digunakan sebesar 10^7 untuk PCM jenis *paraffin wax* RT 52 (Anggara, 2017). Persamaan fraksi cair β dari PCM:

$$\beta = 0 \text{ untuk } T < T_s \quad 4$$

$$\beta = 1 \text{ untuk } T > T_l \quad 5$$

$$\beta = \frac{T-T_s}{T_l-T_s} \text{ untuk } T_s < T < T_l \quad 6$$

Persamaan energi:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho c_p} \nabla h \right) \quad 7$$

Total entalpi material:

$$H = h + \Delta H \quad 8$$

Entalpi sensibel:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad 9$$

Entalpi laten:

$$\Delta H = \beta L \quad 10$$

Massa jenis PCM menggunakan asumsi *phase-dependent* mengadopsi pemodelan *weight function*

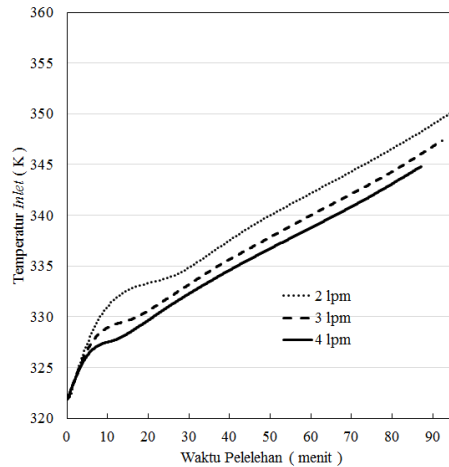
Rosler:

$$\rho = \beta \rho_l + (1 - \beta) \rho_s \quad 11$$

Persamaan atur diselesaikan menggunakan metode *pressure-velocity coupling* dengan skema PRESTO untuk menyelesaikan persamaan *pressure correction*. Nilai *under-relaxation factors* (URF) diatur untuk *momentum* 0,6; *pressure* 0,6; *density* 0,5; *liquid fraction update* 0,8; dan *energy* 0,8.

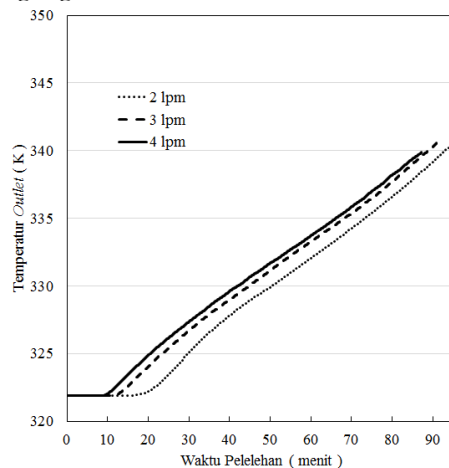
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Selama 20 menit proses *charging* terbentuk lapisan tipis pelelehan PCM di dalam kapsul dimana pada awal proses pelelehan sebagian besar kalor HTF ditransfer ke PCM melalui perpindahan kalor konduksi. Temperatur HTF yang masuk ke tangki penyimpanan kalor melebihi temperatur pelelehan PCM yaitu 330 K untuk aliran 4 lpm, 331 K untuk aliran 3 lpm, dan 333 K untuk aliran 2 lpm. Perbedaan laju aliran HTF mempengaruhi durasi HTF menerima kalor dari dinding pipa *solar collector*. HTF dengan durasi penerimaan kalor yang panjang akan memiliki temperatur lebih tinggi dibandingkan dengan HTF dengan durasi penerimaan kalor yang pendek ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Temperatur *inlet* HTF menuju ke tangki penyimpanan kalor.

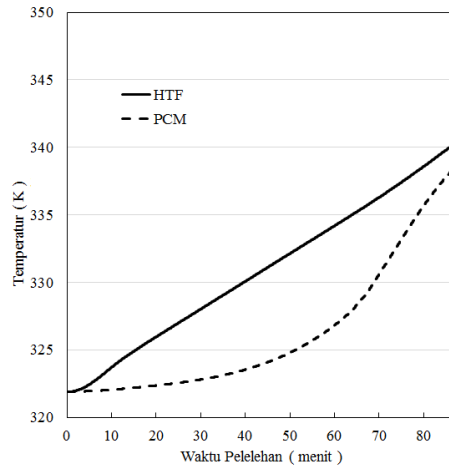
Temperatur HTF yang keluar dari tangki penyimpanan kalor pada menit ke 20 adalah 325 K untuk aliran 4 lpm, 324 K untuk aliran 3 lpm, dan 322 K untuk aliran 2 lpm ditunjukkan pada Gambar 4. Perbedaan temperatur *inlet* dan *outlet* terjadi akibat perpindahan kalor dari HTF ke PCM yang digunakan untuk merubah fasa PCM dari padat ke fasa cair.



Gambar 4. Temperatur *outlet* HTF keluar dari tangki penyimpanan kalor.

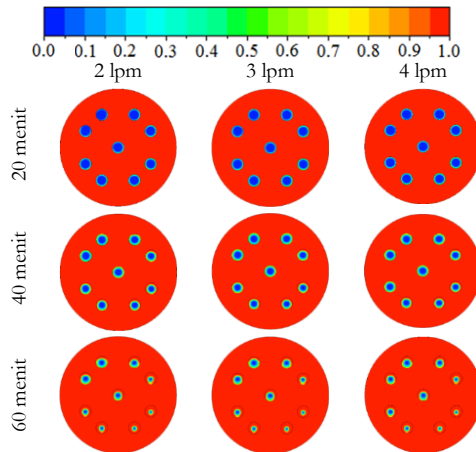
Setelah 40 menit lapisan tipis fraksi cair PCM menyebar dengan hampir merata pada dinding dalam kapsul. Kenaikan temperatur rerata HTF di dalam tangki terbentuk hampir linier terhadap waktu pelelehan PCM. Kenaikan temperatur rerata PCM tidak terbentuk linier dengan beda temperatur HTF dan PCM yang terbesar yaitu 7,5 K terjadi pada menit ke 56. Fraksi cair PCM berada di nilai 0,72 dan nilai total fluks kalor permukaan di titik tertinggi yaitu 433,7 W/m². Total fluks kalor permukaan kemudian turun mengikuti penurunan perbedaan antara rerata temperatur HTF dan PCM yang semakin mengecil sebagaimana terlihat pada Gambar 5.

Pada laju aliran HTF 3 lpm memiliki nilai total fluks kalor permukaan $427,3 \text{ W/m}^2$ pada menit ke 55 ketika fraksi cair lpm 0,70. Laju aliran HTF 2 lpm memiliki nilai total fluks kalor permukaan $422,7 \text{ W/m}^2$ pada menit ke 54 ketika fraksi PCM 0,66.



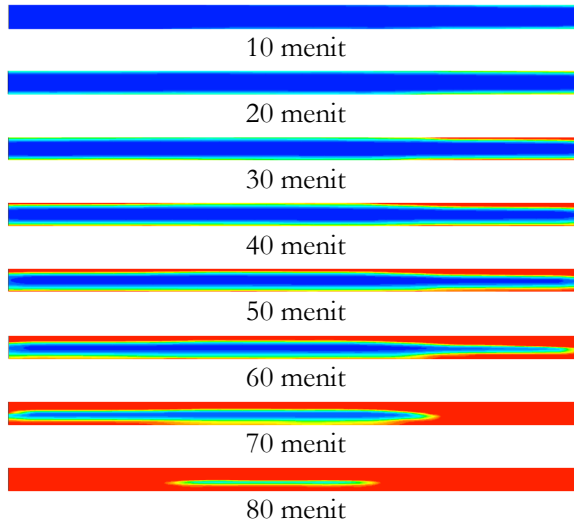
Gambar 5. Perbandingan temperatur PCM dan HTF pada laju aliran 4 lpm.

Pengaruh *buoyancy* terlihat pada menit ke 60 ditunjukkan pada Gambar 6. Peningkatan temperatur PCM menyebabkan perubahan massa jenis PCM dan perubahan fasanya. Massa jenis PCM yang rendah bergerak naik ke atas sehingga pada kapsul berisi PCM area pelelehan yang lebih banyak terjadi pada kapsul bagian atas.

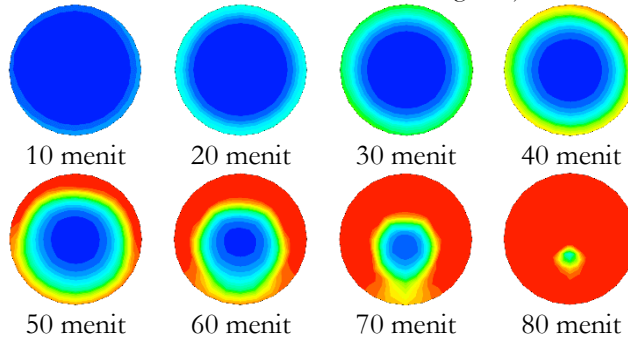


Gambar 6. Kontur fraksi cair HTF dan PCM pada bagian tengah tangki.

Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan perpindahan kalor konveksi mendominasi perpindahan kalor dari HTF ke PCM pada menit ke 70 dan 80. HTF memberikan kalor ke PCM untuk mengubah fasa PCM di daerah dengan fraksi cair kurang dari satu dalam bentuk kalor laten. HTF memberikan kalor ke PCM untuk menaikkan temperatur PCM di daerah dengan fraksi cair lebih dari satu dalam bentuk kalor sensibel.

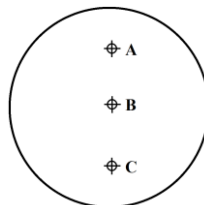


Gambar 7. Kontur fraksi cair PCM nomor 5 arah radial dengan laju aliran HTF sebesar 4 lpm.

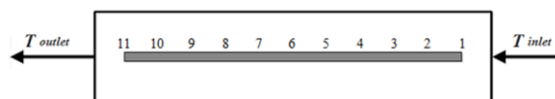


Gambar 8. Kontur fraksi cair PCM nomor 5 arah aksial dengan laju aliran HTF sebesar 4 lpm.

Pengamatan dilakukan terhadap titik A pada posisi 1 yaitu posisi PCM terdekat dari *inlet* hingga titik A pada posisi 11 yaitu posisi PCM terdekat dari *outlet* ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10. Distribusi temperatur aksial PCM nomor 5 menunjukkan di posisi 1-11 temperatur PCM secara berturut-turut adalah 338,6; 335,5; 335,0; 332,6; 329,3; 329,3; 328,8; 329,4; 330,0; 330,1; dan 335,6 K.



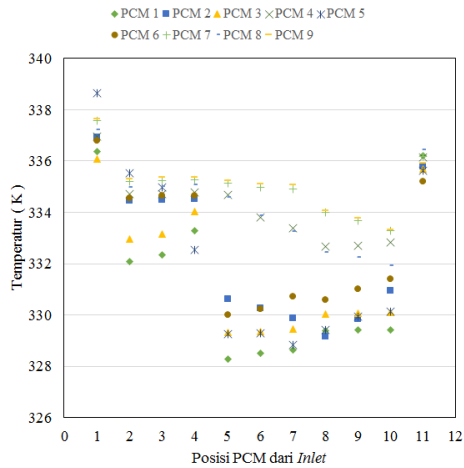
Gambar 9. Titik pengamatan arah radial pada kapsul PCM



Tangki Penyimpan Kalor

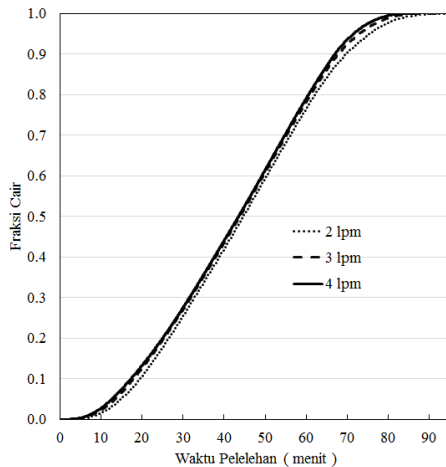
Gambar 10. Titik pengamatan arah aksial pada kapsul PCM.

Distribusi temperatur tersebut mempengaruhi terbentuknya kontur pelelehan PCM. Pada menit ke 60 terlihat bahwa area pelelehan terluas berada pada posisi 1-4 dimana temperatur PCM berada di atas temperatur pelelehannya ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Distribusi temperatur di titik.

PCM dengan laju aliran HTF 4 lpm, 3 lpm dan 2 lpm seluruhnya berubah fasa ke cair pada menit 87, 92, dan 96. Kurva fraksi PCM yang memiliki waktu pelelehan terpendek berada di atas kurva pelelehan PCM yang memiliki waktu pelelehan terpanjang ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Kurva fraksi cair dari PCM

Laju aliran HTF 4 lpm diturunkan sebesar 1 lpm hanya memperpanjang waktu pelelehan sebesar 5,7%, sedangkan menurunkan aliran HTF sebesar 2 lpm hanya memperpanjang waktu pelelehan sebesar 10,3%. Hal ini menunjukkan tidak terjadi perbedaan yang sangat signifikan antara ketiga variasi laju aliran HTF tersebut terhadap waktu pelelehan PCM.

4. KESIMPULAN

Di dalam studi ini karakteristik pelelehan PCM di dalam tangki penyimpanan kalor SWH sistem aktif diamati dengan memberikan variasi laju aliran HTF dan fluks kalor konstan pada *solar collector* sehingga meningkatnya temperatur HTF sebanding dengan lama waktu *charging*. Dari studi karakteristik pelelehan PCM ini disimpulkan:

1. Menurunkan laju aliran HTF dari 4 lpm ke 2 lpm dapat meningkatkan temperatur HTF menuju ke tangki penyimpanan kalor namun memperpanjang waktu pelelehan PCM dari 87 menit menjadi 96 menit dengan perbedaan yang tidak terlalu signifikan yaitu 10,3%.
2. Perbedaan temperatur antara HTF dan PCM di dalam tangki penyimpanan kalor dengan perbedaan sebesar 7,5 K menjadi titik puncak bagi fluks kalor permukaan yaitu 433,7 W/m² selama proses perpindahan kalor dari HTF ke PCM pada proses *charging*.

NOMENKLATUR

C_p	kalor spesifik (J/kg K)
H	total entalpi (J)
h	entalpi sensibel (J)
k	konduktivitas termal (W/m K)
L	kalor laten (J/kg)
P	tekanan (Pa)
\vec{V}	vektor kecepatan (m/s)
ν	viskositas kinematik (m ² /s)
\vec{S}	<i>source term</i>
T	temperatur (K)
t	waktu (s)

Greek symbols

β	fraksi cair
ρ	massa jenis (kg/m ³)

Subscripts

l	fasa cair
$mush$	<i>mush zone</i>
m	pelelehan
ref	referensi
s	fasa padat

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abdelsalam, M.Y., Sarafraz, P., Catton, J.S. dan Lightstone, M.F., 2017, Heat Transfer Characteristics of A Hybrid Thermal Energy Storage Tank with Phase Change Materials (PCMs) During Indirect Charging Using Isothermal Coil Heat Exchanger, *Solar Energy*, Vol. 157, pp. 462-476.
- Anggara, F., 2017, Simulasi Pelelehan Paraffin Wax RT52 pada Tabung Silinder, Tesis, Universitas Gadjah Mada.
- Anonim, Data Sheet RT52, Rubitherm Technologies GmbH, Version 22 April (2013)
- Esapour, M., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A., Pahamli, Y. dan Bahrampoury, R., 2016, Phase Change in Multi-tube Heat Exchangers, *Renewable Energy*, Vol. 85, pp. 1017-1025.
- Felinski, P. dan Sekret, R., 2016, Experimental Study of Evacuated Tube Collector/Storage System Containing Paraffin as A PCM, *Energy*, Vol. 114, pp. 1063-1072.
- Gorzin, M., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A. dan Bahrampoury, R., 2018, Investigation of PCM Charging for The Energy Saving of Domestic Hot Water System, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 137, pp. 659-668.
- Jin, T dan Kim J., 2018, What is better for mitigating carbon emissions – Renewable energy or nuclear energy? A panel data analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, pp. 464-471.
- Kee, A.Y., Munusamy, Y. dan Ong, K.S., 2018, Review of Solar Water Heaters Incorporating Solid-liquid Organic Phase Change Materials as Thermal Storage, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 131, pp. 455-471.
- Kurklu, A., Ozmerzi, A. dan Bilgin, S., 2002, Thermal Performance of a water-Phase Change Material Solar Collector, *Renewable Energy*, Vol. 26, pp. 391-399.
- Longeon, M., Soupert, A., Fourmigue, J.F., Bruch, A. dan Marty, P., 2013, Experimental and Numerical Study of Annular PCM Storage in The Presence of Natural Convection, *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 175-184.
- Lu, S., Zhang, T. dan Chen, Y., 2018, Study on The Performance of Heat Storage and Heat Release of Water Storage Tank with PCMs, *Energy and Buildings*, Vol. 158, pp. 1770-1780.
- Ng, K.W., Gong, Z.X. dan Mujumdar, A.S., 1998, Heat Transfer in Free Convection-Dominated Melting of A Phase Change Material in A Horizontal Annulus, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 25 (5), pp. 631-640.
- Regin, A.F., Solanki, S.C. dan Saini, J.S., 2006, Latent Heat Thermal Energy Storage using Cylindrical Capsule: Numerical and Experimental Investigations, *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 2025-2041.
- Rosler, F. dan Bruggemann, D., 2011, Shell-and-tube Type Latent Heat Thermal Energy Storage: Numerical Analysis and Comparison with Experiments, *Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 1027-1033.
- Shahsavari, A. dan Akbari, M., 2018, Potential of Solar Energy in Developing Countries for Reducing Energy-Related Emissions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 90, pp. 275-291.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R. Buddhi, D., 2009, Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 318-345.
- Solargis, 2017, Global Horizontal Irradiation (GHI), akses online 14 July 2018, URL: <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/world>.