

Simulasi Karakterisasi Solar Water Heater Sistem Aktif dengan Variasi Bentuk Pipa Kapsul PCM

M.F. Sidiq dan J. Waluyo*

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia
*E-mail: jokowaluyo@ugm.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan teknologi panel surya salah satunya *solar water heater (SWH)* yaitu alat pemanas air dengan menggunakan energi matahari sebagai sumber pemanas dalam sistemnya. *Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES)* adalah salah satu metode penyimpanan energi termal (*TES*) yang memanfaatkan sifat laten dari material untuk menyimpan energi termal. Pada penelitian ini dilakukan pengkajian mengenai pengaruh bentuk pipa *PCM* pada tangki penyimpanan panas *SWH* terhadap karakterisasi *PCM* (temperatur, grafik pelelehan, dan kurva pelelehan) pada proses pembebanan panas. Penelitian ini memodelkan *SWH* dengan spesifikasi diameter tangki 260 mm serta diameter pipa penghubung 12 mm. Kapsul *PCM* divariasikan dengan bentuk konsentris dan tabung dan variasi debit yaitu 1 Lpm, 4 Lpm dan 7 Lpm. *Solar collector* menerima fluks panas 1000 W/m^2 , dan air disirkulasikan menggunakan pompa menuju tangki penyimpan kalor berisi paraffin wax RT 52. Hasil menunjukkan bahwa bentuk kapsul konsentris lebih efektif dalam penyerapan panas dari *hot transfer fluid HTF* dibandingkan bentuk tabung, terutama pada debit aliran 7 lpm. *PCM* bentuk konsentris mencapai fase pelelehan cair seutuhnya pada menit 70 sedangkan pada *PCM* berbentuk silinder waktu pelelehan fase cair terjadi pada menit ke 80 pada debit 7 LPM. Perbedaan debit aliran juga mempengaruhi waktu pelelehan *PCM* secara signifikan. Dengan demikian, bentuk kapsul konsentris dapat mengoptimalkan kinerja *SWH* dalam penyimpanan dan pelepasan energi termal.

Kata kunci: *solar water heater, phase change material, pelelehan.*

Abstract

The utilization of solar panel technology includes the solar water heater (SWH), a device that heats water using solar energy as the heat source in its system. Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES) is a method of thermal energy storage (TES) that utilizes the latent properties of materials to store thermal energy. This study examines the effect of the PCM pipe shape in the SWH heat storage tank on the characterization of PCM during the heat load process. The study models an SWH with specifications: a tank diameter of 260 mm, and a connector pipe diameter of 12 mm. PCM capsules are varied with concentric and tubular shapes and flow rates of 1 lpm, 4 lpm, and 7 lpm. The solar collector receives a heat flux of 1000 W/m^2 , and water is circulated using a pump to the heat storage tank containing RT 52 paraffin wax. The results show that the concentric capsule shape is more effective in absorbing heat from the HTF compared to the tubular shape, especially at a flow rate of 7 lpm. PCM in a concentric shape reached a fully liquid melting phase at 70 minutes, whereas the PCM in a cylindrical shape experienced liquid phase melting at 80 minutes with a flow rate of 7 LPM. Differences in flow rates also significantly affect the melting time of the PCM. Thus, concentric shape optimize the performance of SWHs in thermal energy storage and release.

Keywords: *Solar water heater, Phase change material, Melting*

1. PENDAHULUAN

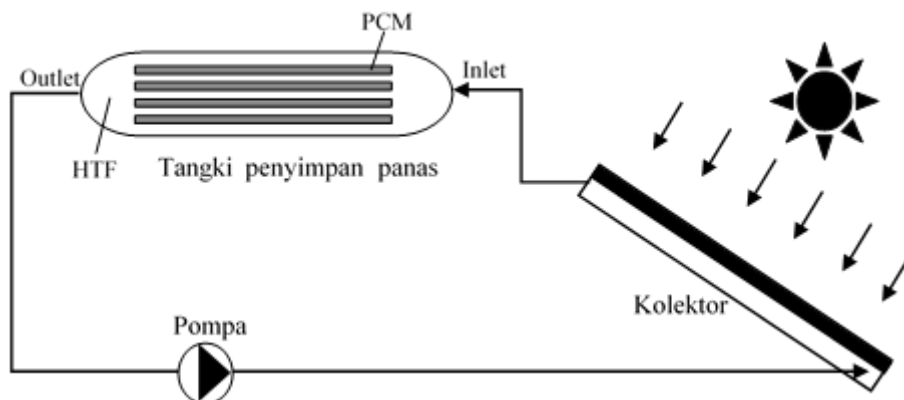
Salah satu energi terbarukan yang potensial di Indonesia adalah energi panas matahari. Menurut kementerian ESDM total potensi energi surya total Indonesia adalah mencapai 3249,36 gigawatt peak yang tersebar merata di kepulauan Indonesia. Potensi besar ini didukung oleh letak geografis Indonesia yang terbentang di sepanjang garis katulistiwa dan didukung oleh radiasi matahari yang mencapai 3,75 kWh per meter persegi per hari sehingga Indonesia memiliki kesempatan untuk memaksimalkan pembuatan panel panel surya secara maksimal untuk menghasilkan energi listrik. Salah satu pemanfaatan teknologi panel surya adalah *solar water heater* yaitu alat pemanas air dengan menggunakan energi panas matahari sebagai sumber pemanas dalam sistemnya. *Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES)* adalah salah satu metode penyimpanan energi termal (TES) yang memanfaatkan sifat laten dari material untuk menyimpan energi termal. Optimasi desain dan analisis sistem LHTES dilakukan dengan analisis numerik oleh Zalba dkk. (2003).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Anggara dkk. (2019) yaitu studi numerik pada pelelehan paraffin wax RT 52 diberikan beberapa asumsi yaitu; simulasi dilakukan dengan tiga dimensi, sifat termofisik pada PCM tidak tergantung suhu namun berbeda pada fase padat dan cairnya dan *heat loss* diabaikan. Pathur dkk. (2018) telah melakukan penelitian studi eksperimental terhadap perilaku termal proses peleburan lilin paraffin di kapsul silinder dengan menggunakan studi eksperimental. Penelitian ini untuk mengungkapkan perilaku lelehan dalam kapsul serta analisis visual dan thermal pada paraffin wax RT 52 di dalam kapsul tunggal secara horizontal. Pada penelitian selanjutnya Nadjib dkk., (2017) telah melakukan penelitian terhadap perilaku termal pemanas air tenaga surya (PATS) yang berisi PCM pada unit tangki. Penelitian menggunakan PATS sistem thermosyphon dilakukan pada saat proses *charging*. Perilaku termal yang diamati adalah temperatur *heat transfer fluid* (HTF), temperatur PCM, dan proses perpindahan panas pada HTF serta PCM.

Pada penelitian ini dilakukan pengkajian mengenai pengaruh bentuk pipa PCM pada tangki penyimpanan panas SWH terhadap karakterisasi PCM (temperatur, grafik pelelehan, dan kurva pelelehan) pada proses pembebanan panas. Saat penelitian dilakukan diasumsikan bahwa aliran *heat flux* pada sepanjang pipa terjadi secara merata. *Heat loss* pada sistem SWH diabaikan, derajat dan konduktifitas thermal paraffin wax diasumsikan konstan pada sistem.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan metode simulasi. Persamaan kontinuitas, persamaan momentum dan persamaan energi pada penelitian ini diselesaikan menggunakan metode *enthalpy-porosity* dan densitas PCM didefinisikan dengan pendekatan *phase dependent*. Diagram alir dari SWH ditunjukkan pada Gambar 1.



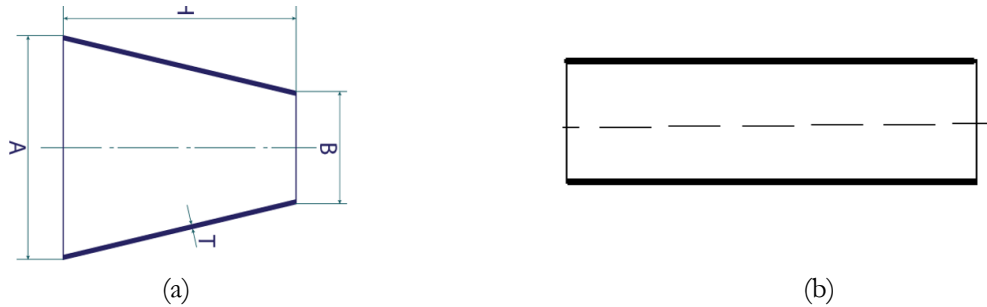
Gambar 1. Diagram Alir Sistem SWH Aktif

Spesifikasi SWH dimodelkan dengan diameter tangki yaitu 260 mm diameter PCM kapsul tabung 25,4 mm dan diameter pipa penghubung sebesar 12 mm. *Solar collector* menerima *heat flux* sebesar 1000 W/m² dan meningkatkan temperatur air sebagai HTF di dalam *solar collector*. Air disirkulasikan menggunakan pompa menuju ke tangki penyimpanan kalor terisolasi berdiameter 260 mm dan panjang 1.220 mm yang berisi PCM dengan diameter 25 mm dan panjang 1.000 mm. Paraffin wax yang digunakan dalam penelitian ini adalah paraffin wax RT 52 dengan sifat termal ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat termal paraffin wax RT 52

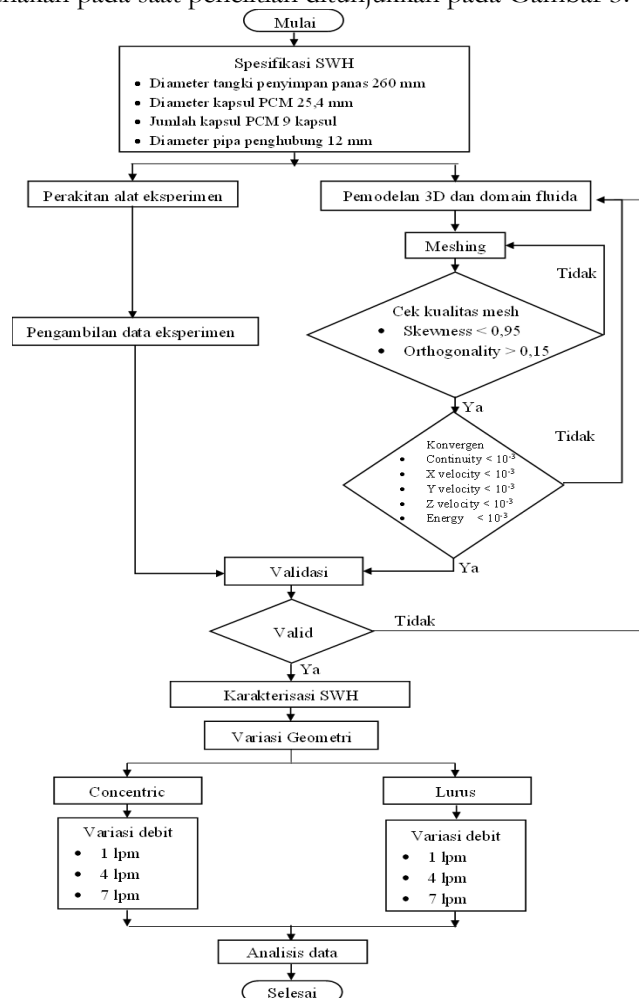
No	Sifat termal	Nilai
1	Temperatur pelelehan, T_m (K)	322-326
2	Kalor laten peleburan, L (J/kg)	173000
3	Kalor spesifik, C_{PL} , C_{PS} (J/kg K)	2000
4	Densitas padat, ρ_s (kg/m ³)	880
5	Densitas cair, ρ_l (kg/m ³)	760
6	Konduktivitas termal, k (W/m K)	0,2
7	Viskositas kinematis, ν (m ² /s)	31,28 x 10 ⁻⁶

Variasi bentuk kapsul pada penelitian yaitu dengan jumlah 9 kapsul berbentuk (A) konsentris dan (B) tabung ditunjukkan pada Gambar 2:



Gambar 2. (a) Kapsul PCM Konsentris, (b) Kapsul PCM Silinder

Algoritma yang digunakan pada saat penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Algoritma Penelitian

Persamaan Atur

Sirkulasi *HTF* di dalam sistem *SWH* dijaga konstan dengan variasi laju aliran 1 lpm. Fenomena perubahan fase yang terjadi disimulasikan dengan menggunakan persamaan atur berikut:

Persamaan kontinuitas

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

Persamaan momentum

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

Dengan

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

Persamaan Energi

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho H \vec{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

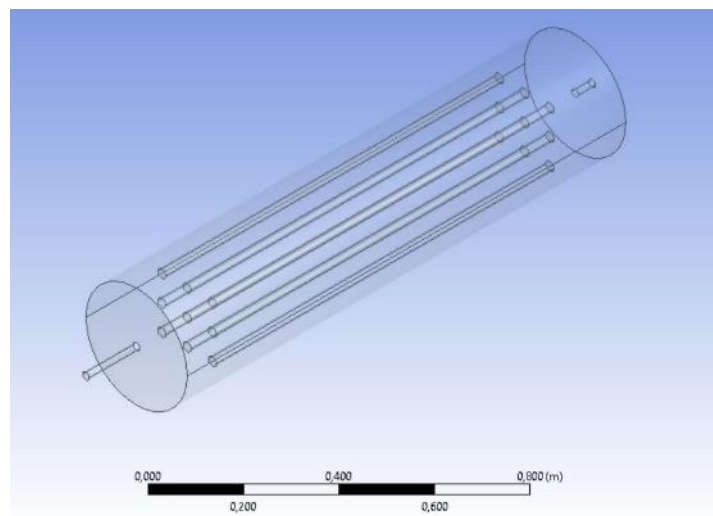
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model numerikal dan validasi dilakukan dengan cara membandingkan prediksi numerik dari temperatur *PCM* saat pelelehan *PCM* dengan hasil studi eksperimental yang telah dilakukan. Eksperimen ini akan mempelajari perilaku termal pemanas air tenaga surya yang diamati adalah temperatur dari *heat transfer fluid* dan *PCM*. Jumlah kapsul *PCM* yang ada pada dalam tangki berjumlah 9 kapsul berbentuk kapsul silindris, Tempat yang diambil pada satu titik, yaitu titik outlet (termokopel pada outlet). Perbandingan ini ditunjukkan di Tabel 2.

Tabel 2. Validasi studi eksperimental sistem *SWH PCM* 9 kapsul

Waktu (menit)	Temperatur (K)		Deviasi (%)
	Eksperimen	Simulasi	
10	322,8	323,4	1,2
20	324,3	325,2	1,7
30	325,8	326,9	2,1
40	327,3	328,6	2,3
50	328,8	330,2	2,4
60	330,2	331,7	2,6
70	331,7	333,2	2,5
80	333,2	334,7	2,5
90	335	336,5	2,4

Pemodelan gambar alat *SWH* menggunakan software solidwork. Proses dimulai dengan membuat sketsa 2D kemudian mengubah bagian sketsa menjadi Part 3D. Part-part tersebut lalu disatukan ke dalam satu file *assembly* menjadi sebuah model sistem *SWH*. Model simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Model Geometri Simulasi

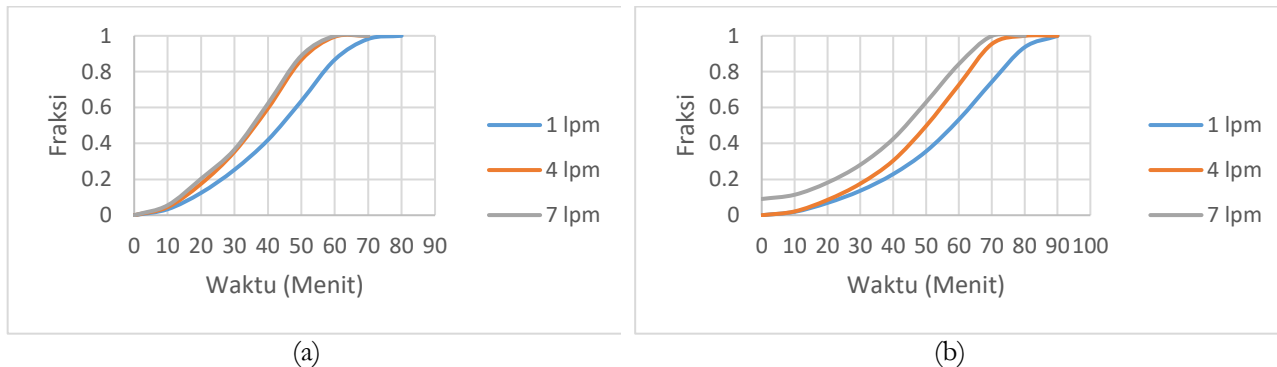
Selanjutnya file dari solidwork diekspor ke aplikasi ansys fluent dan dilakukan proses *meshing*. Proses *meshing* menggunakan proses *meshing* otomatis dengan metode *tetrahedral* pada dan metode *hexahedral* pada bagian kapsul dengan *hex meshing*, *sweep meshing*, *multizone meshing*. Standar kualitas *mesh* yang digunakan adalah *skewness* $< 0,94$ dan *orthogonality* $> 0,15$. Standar *mesh* yang baik adalah *skewness equiangle* dengan nilai 0,50-0,80. Pemeriksaan pada proses *meshing* ANSYS Fluent menunjukkan *orthogonal quality* minimal sebesar 0,5 juga memenuhi kriteria kualitas *mesh* yang baik. Standar *mesh* yang baik adalah *orthogonal quality* 0,20-0,69. Pengaturan pada *solution methods* yang digunakan adalah *pressure-velocity coupling* dengan skema *coupled*. *Spatial discretization* untuk *pressure* adalah PRESTO dan momentum adalah QUICK.

Kualitas *mesh* yang digunakan pada model solar water heater untuk tangki penyimpanan kalor dan kapsul PCM ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 spesifikasi *mesh* untuk simulasi

No	Parameter	Nilai
1	Jenis Mesh	Hexahedral
2	Skewness equiangle	0,5
3	Minimum orthogonality Quality	0,53
4	Cells	308268
5	Faces	593560

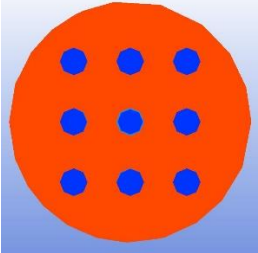
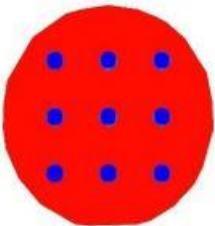
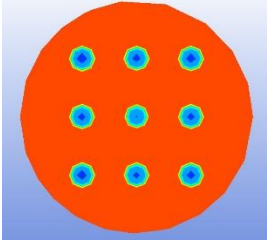
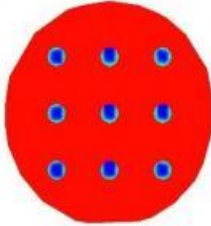
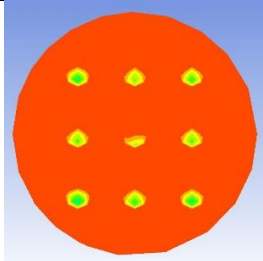
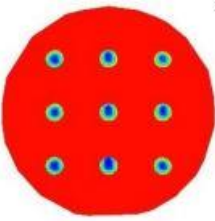
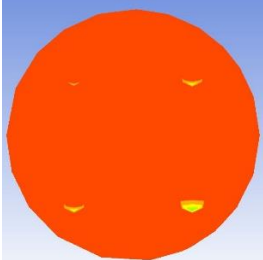
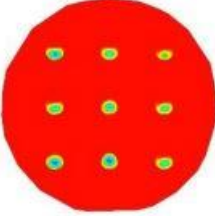
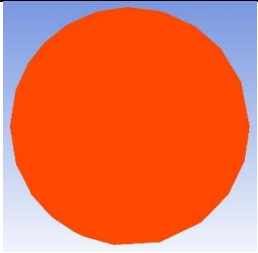
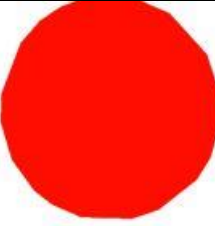
PCM menerima panas dari HTF di sekelilingnya dalam bentuk panas sensibel dan panas laten. Panas digunakan PCM untuk menaikkan temperatur sedangkan panas laten mengubah fase PCM dari padat menjadi cair. Panas yang dibawa HTF akan terbagi ke setiap PCM yang ada di dalam tangki penyimpan panas sehingga pada SWH dengan jumlah PCM lebih banyak memiliki temperatur yang lebih rendah. Dalam hal ini dilakukan pengambilan data dengan variasi jumlah bentuk kapsul dan debit terhadap fraksi pelelehan PCM yang bertujuan untuk mengetahui apakah variasi jumlah kapsul dan debit dapat mempengaruhi Pola Fraksi pelelehan PCM seperti tampak pada Gambar 5.



Gambar 5. (a) Grafik Fraksi PCM vs Waktu pelelehan konsentris, (b) Grafik Fraksi PCM vs Waktu pelelehan Silinder

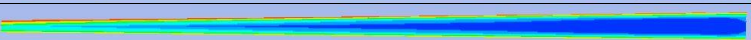
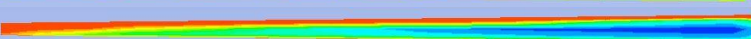
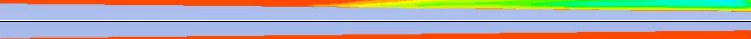
Dari Gambar 5 terlihat bahwa fraksi pelelehan tercepat adalah pada saat debit 7 lpm dikarenakan besarnya kenaikan kalor pada HTF pada debit yang lebih tinggi dan penyerapan kalor yang diserap oleh PCM semakin tinggi sehingga mempercepat proses pelelehan dari PCM. Sedangkan pada jenis kapsul yang digunakan terlihat bahwa jenis kapsul konsentris lebih cepat dalam menyerap dan melakukan proses pelelehan pada saat *charging* dikarenakan bentuk aerodinamis dan tubular dengan diameter yang lebih besar dekat dengan inlet yang memiliki suhu persebaran HTF lebih tinggi sebelum diserap oleh PCM. Sedangkan tubular dengan diameter relatif kecil berada pada dekat outlet yang memiliki waktu pelelehan relatif lebih sedikit dibandingkan dengan tubular dengan diameter yang lebih besar. Perbandingan proses pelelehan konsentris dengan debit 7 lpm dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kontur pelelehan *PCM* bentuk konsentris vs *PCM* bentuk Tabung

Konsentris	Tabung	Waktu (menit)
		10
		30
		50
		70
		90

Kontur pelelehan dari tabung konsentris dengan debit 4 lpm bisa dilihat pada Tabel 4 dan 5

Tabel 4. Fraksi pelelehan *PCM* debit 4 LPM bentuk konsentris

Kontur	Waktu (menit)
	10
	20
	30
	40
	50
	60
	70

Tabel 5. Fraksi pelelehan *PCM* debit 4 LPM bentuk silinder

Kontur	Waktu (menit)
	10
	20
	30
	40
	50
	60
	70

Kalor laten dari *HTF* pada menit 20 diserap oleh dinding *PCM* menyebabkan perubahan fase awal pada permukaan dinding *PCM*, pada menit 30 *PCM* sudah mengalami pelelehan awal pada dinding dekat outlet tangki, hal pelelehan awal terjadi karena efek dari bentuk diantara *PCM* dan volume *PCM* di dekat outlet relatif lebih kecil dari pada volume *PCM* dekat inlet. Pada menit 50 *PCM* menerima energi kalor yang lebih besar karena naiknya temperature *HTF* sehingga kecepatan pelelehan menjadi lebih cepat. Pada menit 70 *PCM* sudah meleleh sepenuhnya menjadi fase cair yang nantinya dapat digunakan sebagai penyimpan kalor sementara.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian tersebut dapat disimpulkan, bahwa bentuk *PCM* konsentris memiliki kemampuan penyerapan panas dari *HTF* yang lebih baik dikarenakan bentuk aliran di dalam tanki dan kontur *PCM*. Debit aliran mempengaruhi waktu pelelehan dari *PCM*, didapatkan pada debit 7 LPM proses pelelehan *PCM* bentuk konsentris dan tabung lebih cepat dibandingkan dengan debit di bawahnya. Perbedaan proses pelelehan *PCM* pada bentuk konsentris mengalami proses pelelehan yang lebih cepat dari pada bentuk *PCM* silinder. Dengan menaikkan debit berarti juga menambahkan daya pada sistem aktif *SWH* sehingga daya listrik untuk pemakaian pompa juga naik.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abhat, A., "Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage," *Solar Energy*, 10(4), pp.313–332, 1983.
- Anggara, dkk., "Studi Numerik: Pengaruh Debit Inlet Terhadap Karakteristik Pelelehan Paraffin Wax Pada Tabung Silinder," *Sjme Kinematika*, Vol.4 No.1, pp 15-26, 2019.
- Aris, dkk., "Studi Numerik Pelelehan Phase Change Material dalam Tangki Penyimpan Kalor Solar Water Heater Sistem Aktif dengan Variasi Konfigurasi Kapsul," Seminar nasional MIPA Universitas Tidar, Yogyakarta, 2018.
- Marausna, G. dan Waluyo, J., "Studi Pelelehan *PCM* di Dalam Tabung Penyimpanan Kalor pada Solar Water Heater Sistem Aktif," *Journal of Mechanical Design and Testing* 1, pp.47 – 56, 2019.
- Marausna, G., "Simulasi Pelelehan Paraffin Wax RT 52 pada *Solar Water Heater* (SWH) Sistem Aktif dengan Variasi *Heat Flux* dan Debit," Tesis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2019.

- Nadjib, M. dan Santosa, T.H.A, “Perilaku Termal Pemanas Air Tenaga Surya yang Berisi PCM pada Unit Tangki,” Prosiding ke-5, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, 2017.
- Suhanan, dkk., “Simulasi Numerik Proses Pelelehan Paraffin Wax pada Unit Penyimpan Energi Termal Tipe Pipa Ganda Konsentrik,” rotasi, Vol. 19, No. 1, pp. 36–44, 2017.