

## Simulasi Numerik Karakterisasi Solar Water Heater Sistem Aktif Dengan Variasi Jumlah Kapsul

<sup>1</sup>Jheri Hermanto, <sup>2\*</sup>Joko Waluyo

<sup>1,2,3</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,  
Jln. Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia

\*) *Corresponding author* : jokowaluyo@ugm.ac.id

### Abstrak

*Phase change material (PCM)* merupakan material yang dapat menyimpan energi termal secara panas laten. Penggunaan PCM berfungsi meningkatkan kapasitas penyimpanan panas serta mendapatkan unjuk kerja yang terbaik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik PCM menggunakan simulasi 3D dengan metode pendekatan *enthalphy-porosity* berupa waktu pelelehan, pola pelehan, *heat transfer*, dan panas kumulatif. Simulasi dilakukan pada laju aliran 1 lpm dan *heat flux* konstan pada 1.000 W/m<sup>2</sup>. Jumlah PCM di dalam tangki penyimpan panas SWH divariasikan menjadi 6, 9 dan 12 kapsul PCM. Hasil simulasi SWH dengan jumlah 12 kapsul memiliki panas kumulatif yang paling besar. SWH dengan jumlah 6 kapsul mencapai fraksi cair 1 setelah 93,7 menit dengan panas kumulatif 701,74 kJ, sedangkan pada 9 kapsul fraksi cair 1 setelah 89,1 menit dengan panas kumulatif 1.322,12 kJ, dan pada 12 PCM fraksi cair 1 setelah 87,5 menit dengan panas kumulatif 1.744,62 kJ.

**Kata Kunci:** Studi numerik, Pelelehan, *Phase Change Materials*, *Solar Water Heater*

### Abstract

*Phase change material (PCM)* is a material that can store thermal energy latently. The use of PCM serves to increase the heat storage capacity and get the best performance. This study aims to determine the characteristics of PCM using 3D simulation with the *enthalphy-porosity* approach in the form of melting time, melting pattern, *heat transfer*, and combined heat. The simulation was carried out at a flow rate of 1 lpm and a constant *heat flux* of 1.000 W/m<sup>2</sup>. The amount of PCM in the SWH heat storage tank was varied to 6, 9 and 12 PCM capsules. SWH simulation results with a total of 12 capsules have the greatest cumulative heat. SWH with 6 capsules reached liquid fraction 1 after 93,7 minutes with a cumulative heat of 701,74 kJ, whereas in 9 capsules liquid fraction 1 after 89,1 minutes with a cumulative heat of 1.322,12 kJ, and in 12 PCM liquid fraction 1 after 87,5 minutes with a cumulative heat of 1.744,62 kJ.

**Keywords:** Numerical study, Melting, *Phase Change Materials*, *Solar Water Heater*

### PENDAHULUAN

Energi matahari merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang jumlahnya tidak terbatas, rata-rata energi matahari rata-rata sebesar 4,8 kW/m<sup>2</sup>/hari (Sugiyono dkk, 2019). Wilayah Indonesia yang terletak di sepanjang garis katulistiwa menjadikan Indonesia mendapat sinar matahari yang banyak. Sehingga Indonesia menjadi salah satu negara yang memiliki potensi yang tinggi untuk dapat memanfaatkan energi matahari. Beberapa keuntungan energi matahari adalah tidak menghasilkan polusi udara dan polusi suara sehingga ramah terhadap lingkungan (Shahsavari dkk, 2018). Salah satu bentuk pemanfaatan energi matahari yaitu pemanas air tenaga surya atau solar water heater (SWH). Ada beberapa macam metode penyimpanan energi yaitu : secara laten, *thermochemical* dan sensible. Metode penyimpan kalor laten (LHS) merupakan salah satu metode yang lebih efektif untuk pengelolaan energi termal. Metode LHS berupa *phase change materials* (PCM).

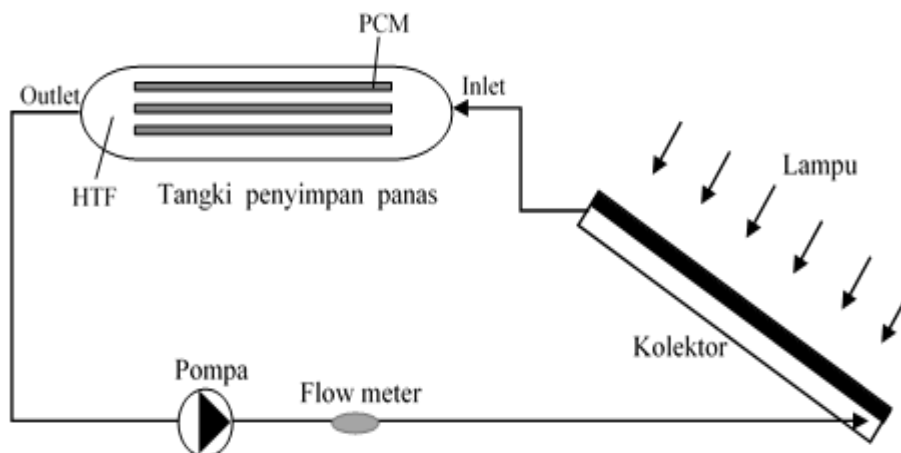
*Latent Heat Thermal Energy Storage* (LHTES) adalah salah satu metode TES yang memanfaatkan sifat laten dari material untuk menyimpan energi termal. Optimasi desain dan analisis sistem LHTES dilakukan dengan analisis numerik oleh (Zalba, 2003). Aplikasi PCM pada sistem SWH dapat meningkatkan kinerja SWH. Hal tersebut dikarenakan adanya PCM dapat mempertahankan temperatur air tetap tinggi pada malam hari (Kee dkk,

2018) mengemukakan bahwa tangki penyimpanan air pada sistem solar water heater (SWH) yang telah dipasang PCM memiliki kinerja yang sangat baik, dikarenakan energi dari sinar matahari yang ditangkap *solar collector* disimpan oleh PCM. Integrasi PCM dan air di dalam tangki mampu mempertahankan temperatur air masuk kolektor yang rendah sehingga mengurangi rugi-rugi di kolektor (Taemah dkk, 2017). Efisiensi energi di kolektor naik sebesar 10,88% karena di dalam tangki dipasang kapsul silindris berisi PCM dibandingkan tanpa ada PCM (Kumar, dan Mylsamy., 2019)

Pada penelitian ini akan dikaji mengenai pengaruh jumlah PCM yang terdapat di dalam tangki penyimpan panas SWH terhadap karakteristik PCM (temperatur, kurva pelelehan, dan pola pelelehan) saat proses *charging*. Pada penelitian ini asumsi yang digunakan *heat flux* merata sepanjang pipa, *heat loss* pada sistem *solar water heater* diabaikan, sudut, konduktivitas *paraffin wax* diasumsikan konstan sepanjang kapsul di dalam tangki penyimpanan, dan pemodelan untuk simulasi pelelehan *paraffin wax* menggunakan *enthalpy-porosity*.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif, dilakukan secara simulasi menggunakan pemodelan 3D. Skema dari SWH terlampir di Gambar 1.



Gambar 1. Skema SWH Sistem Aktif

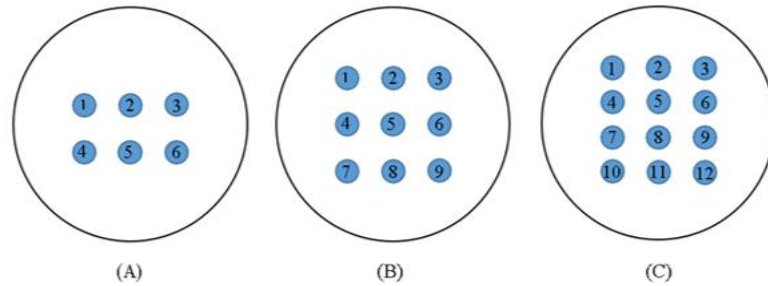
*Solar collector* menerima *heat flux* sebesar  $1000 \text{ W/m}^2$  dan meningkatkan temperatur air sebagai HTF di dalam *solar collector*. Air disirkulasikan menggunakan pompa menuju ke tangki penyimpan kalor terisolasi berdiameter 260 mm dan panjang 1.220 mm yang berisi PCM dengan diameter 25 mm dan panjang 1.000 mm. *Paraffin wax* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *paraffin wax* RT 52 dengan sifat termal terlampir di Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Termal Paraffin Wax

Sifat termal paraffin wax RT 52	Nilai
Temperatur pelelehan, $T_m$ (K)	322-326
Kalor laten peleburan, L (J/kg)	173000
Kalor spesifik, $C_{PL}$ , $C_{PS}$ (J/ K)	2000
Densitas padat, $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	880

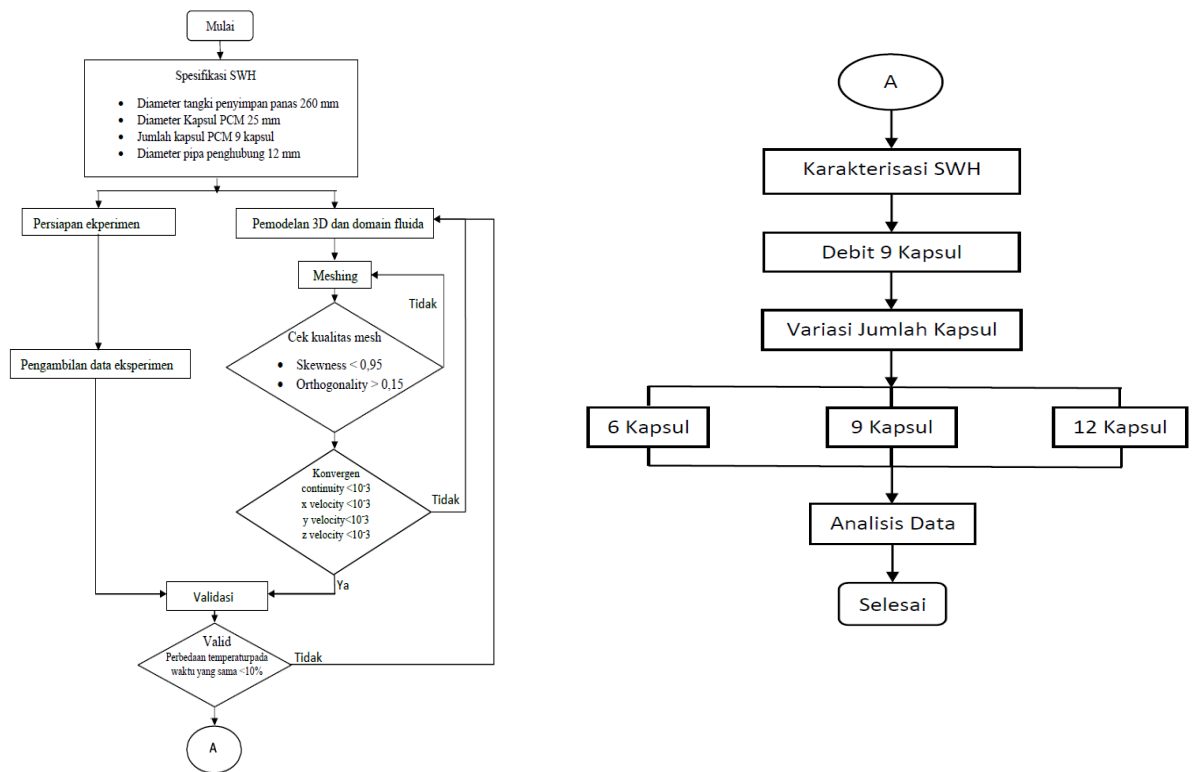
Densitas cair, $\rho_1$ (kg/m <sup>3</sup> )	760
Konduktivitas termal, $k$ (W/m K)	0,2
Viskositas kinematis, $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	31,28 x 10 <sup>-6</sup>

Variasi jumlah kapsul pada penelitian ini yaitu 6 kapsul (A), 9 kapsul (B), dan 12 kapsul (C), terlampir di Gambar 2.



Gambar 2. Variasi Jumlah Kapsul

Diagram alir yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

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

a. Persamaan kontinuitas

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

b. Persamaan momentum

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

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

c. Persamaan energi

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \rho H \vec{V} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4)$$

$$\text{Dimana } H = h + \Delta H \quad (5)$$

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (6)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (7)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_1-T_s} & T_s \leq T \leq T_1 \\ 1 & T > T_1 \end{cases} \quad (8)$$

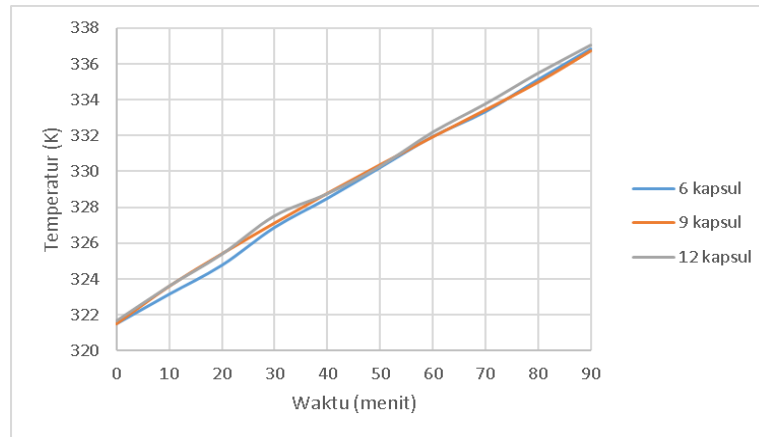
d. Persamaan turbulensi

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot k) + \vec{V} \cdot (\rho \cdot \vec{u} \cdot k) = \vec{V} \cdot \left( \rho \cdot \left\{ \nu_l + \frac{\nu_t}{\sigma_{t,k}} \right\} \cdot \vec{\nabla} k \right) + \rho \cdot (P_k + G_b - \varepsilon) \quad (9)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

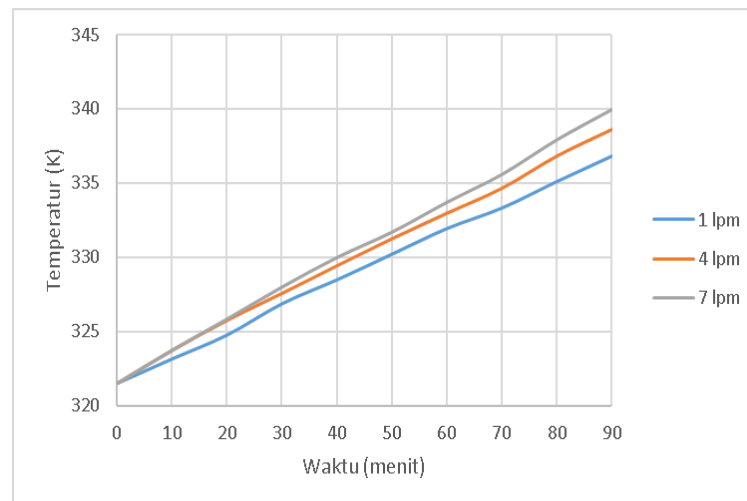
PCM menerima panas dari HTF disekelilingnya dalam bentuk panas sensibel dan panas laten. Panas sensibel digunakan PCM untuk menaikkan temperatur sedangkan panas laten mengubah fase PCM dari padat menjadi cair. Panas yang dibawa HTF akan terbagi kesetiap PCM yang ada didalam tangki penyimpan panas sehingga pada SWH dengan jumlah PCM lebih banyak memiliki temperatur yang lebih rendah.

Dalam hal ini dilakukan pengambilan data dengan variasi jumlah kapsul dan debit terhadap temperatur *inlet* HTF yang bertujuan untuk mengetahui apakah variasi jumlah kapsul dan debit dapat mempengaruhi temperatur *inlet*. Pada Gambar 4, variasi jumlah kapsul yang digunakan yaitu 6, 9 dan 12, dengan interval waktu 10 menit selama 90 menit.



**Gambar 4. Variasi Jumlah Kapsul Terhadap Temperatur *Inlet* HTF**

Pada Gambar 5, variasi jumlah debit yang digunakan yaitu 1, 4 dan 7, dengan interval waktu 10 menit selama 90 menit.

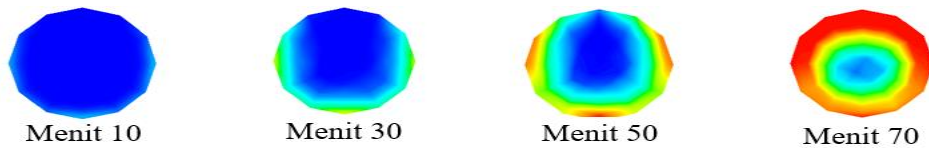


**Gambar 5. Variasi Jumlah Kapsul Terhadap Temperatur *Inlet* HTF**

Berdasarkan data yang didapat pada Gambar 4 dan 5, temperatur *inlet* HTF yang terbesar terjadi pada variasi 12 kapsul dibandingkan dengan yang lainnya, hal ini menunjukkan bahwa dengan banyaknya jumlah kapsul maka nilai *inlet* HTF juga akan semakin besar, hal ini disebabkan karena dengan banyaknya jumlah kapsul maka panas yang diterima juga akan semakin besar. Sedangkan untuk variasi debit temperatur *inlet* HTF yang terbesar terjadi pada 7 lpm, hal ini menunjukkan bahwa dengan semakin besarnya debit aliran yang digunakan maka nilai temperatur *inlet* HTF juga akan semakin meningkat. Sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi jumlah kapsul dan debit berpengaruh terhadap temperatur *inlet* HTF.

Pelelehan PCM terbentuk dimula dari dibagian terluar PCM yang terkena kontak langsung dengan HTF. Perpindahan panas konduksi mendominasi saat PCM masih sebagian besar dalam fase padat. Bagian luar PCM yang telah meleleh akan mentransfer panas kebagian dalam secara konveksi alami. Proses pelelehan akan semakin cepat seiring

dengan semakin banyaknya bagian PCM yang telah mencair. Proses pelelehan PCM terlampir pada Gambar 6.



Gambar 6. Perubahan Kontur Fraksi Cair

Tabel 2. Fraksi Variasi Jumlah Kapsul Tampak Depan

6 Kapsul	9 Kapsul	12 Kapsul	Waktu (menit)
			10
			30
			50
			70
			90

Berdasarkan hasil yang didapat pada Tabel 2, memperlihatkan bahwa pada menit 30 merupakan terjadinya pelelehan, baik pada 6 kapsul maupun 9 kapsul, dan pelelehan pertama terjadinya pada bagian luar permukaan kapsul, karena permukaan luar ini adalah yang pertama bertabrakan dengan *heat input*, seiring berjalannya waktu pelelehanpun mulai menyebar ke bagian tengah kapsul, hingga akhirnya membentuk fraksi cair.

## SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan, yaitu : Jumlah kapsul PCM di dalam tangki penyimpan panas mempengaruhi temperatur dan waktu pelelehan PCM. SWH dengan variasi 9 PCM mencapai fraksi cair 1 setelah 93,7 menit sedangkan pada variasi 6 PCM setelah 89,1 menit. Puncak total perpindahan panas rerata variasi 9 PCM adalah 239,2 W pada perbedaan temperatur HTF dan PCM 7,9 K sedangkan variasi 6 PCM adalah 140 W pada perbedaan temperatur HTF dan PCM 7,7 K

## DAFTAR NOTASI

$\rho$	: densitas, kg/m <sup>3</sup>
$t$	: waktu, detik
$\vec{V}$	: vektor kecepatan fluida, m/s
$H$	: total entalpi, J
$h$	: entalpi sensibel, J
$\Delta H$	: entalpi laten, J
$T$	: Temperatur, K
$\nabla$	: operator nabla,
$S^{\rightarrow}$	:redaman Darcy
$A$ (mush):	konstanta porisitas
$\beta$	: fraksi cair PCM

## DAFTAR PUSTAKA

### Jurnal

- A. Sugiyono, I. F. Anindhita, and L. Wahid, Adiarso, "Outlook Energi Indonesia 2019: Dampak Peningkatan Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan Terhadap Perekonomian Nasional." 2019.
- A. Shahsavari and M. Akbari, "Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, pp. 275–291, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.065.
- 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*, 131, 455-471.
- H. M. Teamah, M. F. Lightstone, and J. S. Cotton, "Potential of cascaded phase change materials in enhancing the performance of solar domestic hot water systems," *Sol. Energy*, vol. 159, no. October 2017, pp. 519–530, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.11.034.
- P. Manoj Kumar and K. Mylsamy, "Experimental investigation of solar water heater integrated with a nanocomposite phase change material: Energetic and exergetic approach," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 136, pp. 121–132, 2019, doi: 10.1007/s10973-018-7937-9.