

**STUDI NUMERIK: PENGARUH DEBIT INLET TERHADAP KARAKTERISTIK
PELELEHAN PARAFFIN WAX PADA TABUNG SILINDER**

**(NUMERICAL STUDY: THE EFFECT OF FLOWRATE ON PCM MELTING
CHARACTERISTIC IN CYLINDER TUBE)**

Fajar Anggara¹, Henry Carles¹, Pathur Razi Ansyah²

¹Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Mercu Buana
Jalan Meruya Selatan No.1, (021) 5840816

³Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Lambung Mangkurat
JL. Akhmad Yani Km.36 Banjarbaru, Kalimantan Selatan

fajar.anggara@mercubuana.ac.id

Abstract

Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES) is the method to store thermal energy by changing the phase of Phase Change Material (PCM). This method is being developed to store heat loss for increasing energy efficiency. In this paper, the effect of variation flow rate on the melting characteristics PCM was investigated by three-dimensional numerical simulation using ANSYS FLUENT 17. The set-up of this research was carried out on concentrically two cylindrical tubes with diameter outer tube 10 cm and length 60 cm while diameter inner tube 5 cm and length 50 cm. The inner tube is used as a PCM container and the outer tube which has bottom and top hole is used as Heat Transfer Fluid (HTF) circulation. Variation HTF or hot water flowrate was carried out by 4L / min, 8L / min and 12 L / min while the temperature is kept at 75°C, then flowed through bottom hole and out to top hole. From this study it was found that the variation flow rate did not have significant effect on the melting pattern, only the greater flow rate, the smaller melting time. Natural convection is the main role of heat transfer when melting.

Keywords: PCM, LHTES, FLUENT, melting, natural convection

PENDAHULUAN

Kecendrungan dalam upaya melakukan efisiensi energi dan pemanfaatan energi terbarukan sudah mulai meningkat. *Latent heat thermal energy storage* (LHTES) merupakan salah bentuk upaya dalam meningkatkan efisiensi energi termal/panas.

Panas buang yang berlebih bisa disimpan dalam wujud perubahan fase dari material penyimpannya atau sering disebut *phase change material* (PCM). Karakteristik pelelehan pada PCM menjadi kunci pembahasan yang menarik untuk diteliti karena karakteristik pelelehan PCM berhubungan erat dengan energi termal yang disimpan.

Pengamatan karakteristik pelelehan pada PCM secara eksperimen dan simulasi numerik sudah banyak dilakukan (Anggara et al., 2018; Ansyah, Waluyo, Suhanan, Najib, & Anggara, 2018; Bechiri & Mansouri, 2019; Motahar & Khodabandeh, 2016; Pahamli, Hosseini, Ranjbar, & Bahrampoury, 2018). Beberapa keuntungan dari simulasi numerik antara lain sebagai berikut: menghemat waktu dan biaya, bisa dimanfaatkan untuk

melakukan optimasi model LHTES (Al-Abidi, Bin Mat, Sopian, Sulaiman, & Mohammed, 2013). Pengaruh konveksi natural berperan penting terhadap transfer kalor didalam wadah PCM (Motahar & Khodabandeh, 2016) dan semakin dominan ketika fase dari PCM semakin cair (Ansyah et al., 2018).

Beberapa penulis membagi arah orientasi inlet HTF dan wadah PCM sebagai berikut: wadah PCM vertikal dan HTF mengalir dari bagian atas menuju ke bagian bawah, wadah PCM vertikal dan HTF mengalir dari bawah menuju ke atas, dan yang terakhir wadah PCM horizontal (Agyenim, Hewitt, Eames, & Smyth, 2010).

Penelitian berupa eksperimen sudah dilakukan dengan orientasi pipa horizontal pada model *heat pipe* (Yusuf Yazici, Avci, Aydin, & Akgun, 2014). Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa pergerakan pipa pemanas HTF menuju bagian bawah dari wadah PCM maka *melting time* semakin kecil. Hasil eksperimen ini juga didukung dengan simulasi numerik yang sudah dilakukan oleh (Pahamli et al., 2018).

Pada paper ini dilakukan investigasi dengan jenis PCM RT 52 dengan orientasi wadah PCM horizontal dengan model silinder. Validasi mengenai simulasi numerik ini sudah dilakukan dan konfigurasi yang digunakan sama persis dengan pada penelitian sebelumnya (Anggara et al., 2018).

Model Numerik

Terdapat beberapa macam pemodelan yang sudah digunakan oleh beberapa penulis seperti yang sudah dilakukan oleh (Al-Abidi et al., 2013) yang menggunakan hukum termodinamika satu dan dua sebagai konsep penghitungan.

Bentuk pemodelan pada penelitian ini menggunakan enthalpy-porosity, dengan persamaan energinya berbentuk entalpi dan terdapat *source porosity* pada persamaan momentumnya (Anggara et al., 2018).

Bentuk persamaan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

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

Persamaan kekekalan momentum:

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

Bentuk *source*, S, dapat didefinisikan oleh (Brent, Voller, & Reid, 1988) sebagai berikut :

$$S = \frac{(1-f)^2}{f^3 + \varepsilon} A_{mush} \vec{V} \quad (3)$$

Pengaruh nilai *mushy-zone*, A_{mush} menurut beberapa penulis dapat mempengaruhi karakteristik pelelehan pada simulasi numerik antara lain: *melting time* dan *melting contour* (Anggara et al., 2018).

Nilai yang digunakan adalah 1.4×10^7 , adapun bentuk mesh adalah heksahedral dan jumlah mesh yang digunakan adalah 144.000 sesuai Anggara et al., 2018. Nilai ε adalah 0.001 agar nilai S tidak tak hingga ketika f atau *liquid fraction* adalah 0.

Bentuk persamaan f dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$f = \begin{cases} 0 & T < T_{Solidus} \\ \frac{T - T_{Solidus}}{T_{Liquidus} - T_{Solidus}} & T_{Solidus} \leq T \leq T_{Liquidus} \\ 1 & T > T_{Liquidus} \end{cases} \quad (4)$$

$T_{solidus}$ dan $T_{liquidus}$ suhu pembekuan dan suhu pelelehan pada PCM.

Persamaan kekekalan energi:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \rho H V = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (5)$$

$$H = h + fL \quad (6)$$

H merupakan enthalpi yang dimiliki pada PCM. Sedangkan L merupakan kalor laten dari PCM.

Sifat karakteristik dari PCM yaitu densitas yang dimiliki ketika berwujud cair dan padat berbeda, sehingga untuk mengakomodasi nilai ini dibuatlah persamaan *weight* yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$\alpha = f\alpha_l + (1 - f)\alpha_s \quad (7)$$

Dengan mendefinisikan α_l dan α_s adalah densitas saat berwujud cair dan padat. Persamaan ini juga sudah banyak digunakan untuk memodelkan karakteristik termal PCM (Rösler & Brüggemann, 2011).

Metode Penelitian

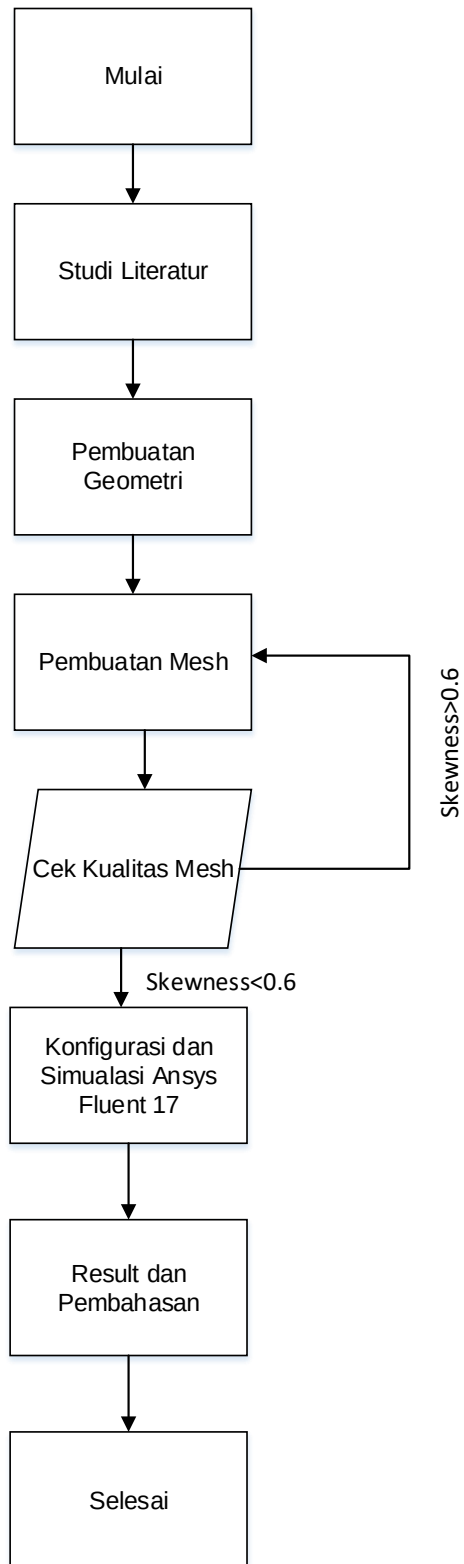
Penelitian ini dalam skala besarnya dibagi menjadi dua yaitu eksperimen dan simulasi. Adapun fokus pada jurnal ini hanya pada bagian simulasi. Hasil dari simulasi perlu dilakukan validasi agar hasilnya tidak menyimpang dengan eksperimen. Namun pembahasan mengenai validasi sudah dipublikasikan pada jurnal sebelumnya (Anggara et al., 2018).

Penjelasan mengenai tahapan metode penelitian ini dapat dijelaskan secara detail pada Gambar 1. Terlihat pada Gambar 1 urutan tahapan-tahapan yang dilakukan adalah studi literatur, pembuatan geometri, pembuatan *mesh*, pengecekan *mesh*, konfigurasi dan simulasi *Ansys Fluent 17*, yang terakhir adalah pembahasan.

Studi literatur merupakan tahapan awal yang perlu dilakukan dengan tujuan untuk memfokuskan skope penelitian. Dengan membandingkan dan mengumpulkan data dari penelitian-penelitian sebelumnya diharapkan dapat memperjelas skope penelitian ini. Setelah selesai dengan tahapan ini, dilanjutkan dengan pembuatan geometri yang menggunakan *software solidwork*. Ukuran dari geometri tabung dalam dan luar harus disesuaikan dengan ukuran yang sama pada eksperimen sesuai dengan Gambar 2.

Tahapan selanjutnya adalah pembuatan mesh, untuk memastikan mesh yang dibuat bagus sehingga menghasilkan simulasi yang baik perlu dipastikan kembali nilai-nilai parameter yang ada. Salah satu parameter nya adalah *skewness*. Nilai *skewness* yang baik umumnya berada pada rentang 0.9 sampai 1, namun untuk penelitian ini *skewness* yang dihasilkan adalah kurang dari 0.6. Dengan melihat nilai dari parameter ini bisa dipastikan bahwa kualitas mesh yang dihasilkan pada penelitian ini sudah sangat baik.

Hasil pembuatan *mesh* yang sudah baik ini diekspor ke *Ansys Fluent 17* untuk kemudian dilakukan simulasi komputasi numerik. Hasil dari simulasi ini diolah datanya pada tahapan result. Data yang sudah didapat kemudian dibahas dengan detil mengenai *temperature contour*, *melting contour*, *melting time*, dan suhu. Posisi pengambilan suhu pada simulasi sama dengan posisi *thermocouple* pada eksperimen sesuai dengan Gambar 3. Pembahasan mengenai set-up pada *software Ansys Fluent* dibahas dengan detil pada bab setelah ini.

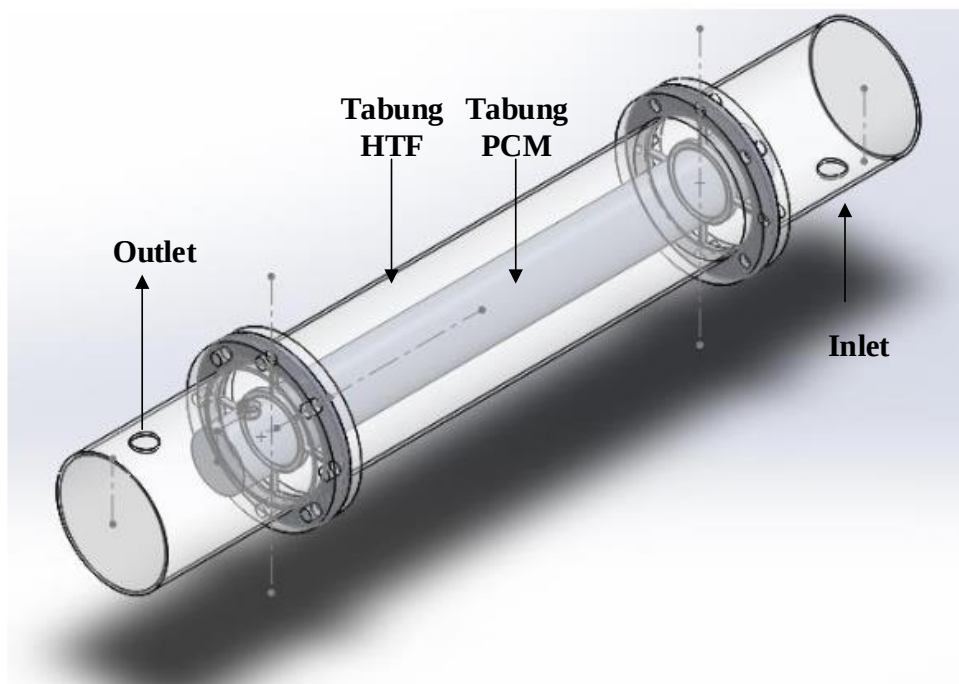


Gambar 1 Metode Penelitian

Seting ANSYS Fluent 17

Cara penyetingan pada simulasi ANSYS Fluent 17 dibahas detil pada bab ini. Penelitian ini difokuskan kan untuk melihat pengaruh variasi debit HTF terhadap karakteristik pelelehan PCM pada pipa silinder. Secara umum bentuk geometri bisa dilihat pada Gambar 2. Penyederhanaan geometri pada ANSYS dilakukan dengan menghilangkan penyangga atauudukan tabung silinder dalam. Penyederhanaan ini dilakukan bertujuan untuk menghasilkan *mesh* yang sangat baik dengan asumsi bahwa menghilangkan komponen tersebut tidak mempengaruhi pola aliran HTF pada eksperimen.

Mula-mula keadaan awal dari PCM diberikan asumsi dengan suhu $T_0=28^{\circ}\text{C}$, suhu HTF dijaga konstan $T_{HTF}=75^{\circ}\text{C}$ dan variasi debit HTF (4L/min, 8L/min dan 12 L/min). Asumsi lain yang perlu ditambahkan bahwa tabung HTF dianggap sebagai isolator sempurna. Sifat properti termal dari PCM yang digunakan dapat ditabelkan pada Tabel 1.

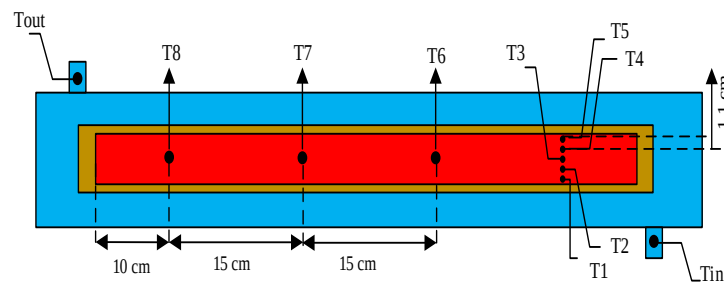


Gambar 2. Bentuk Geometri Tabung PCM

Tabel 1
Sifat Properties PCM

Properti	Satuan	Nilai
Rentang Pelelehan	°C	49 – 53
Kapasitas Penyimpanan Panas	kJ/kg	173
Densitas Fase Padat *T= 15°C	kg/m ³	880
Massa Jenis Fase Cair *T= 80°C	kg/m ³	760
Volume Ekspansi	%	16
Konduktivitas Termal	W/(mK)	0,2
Viskositas Kinematik	m ² /s	31,28 x 10 ⁻⁶
Konduktivitas Termal (Akrilik)	W/(mK)	0,17-0,21

Peletakan pengambilan data suhu bisa dilihat pada Gambar 3. Pengambilan data T1-T5 ditujukan untuk melihat distribusi suhu arah radial pada penampang radial. Untuk melihat distribusi suhu aksial dapat dilihat pada pengambilan data suhu T6-T8.



Gambar 3. Posisi Pengambilan Data Suhu

Prosedur Simulasi

Pada penelitian ini menggunakan simulasi *transient* tiga dimensi untuk melihat pola pelelehan dan *melting time* dari PCM. *Pressure discretitation* yang digunakan adalah *couple* dan skema yang digunakan untuk *pressure-velocity coupling* adalah *coupled*.

Untuk diskretisasi persamaan momentum menggunakan *second order upwind* sedangkan untuk persamaan turbulent menggunakan *first order upwind*. Untuk inisialisasi menggunakan *hybrid inisialization*.

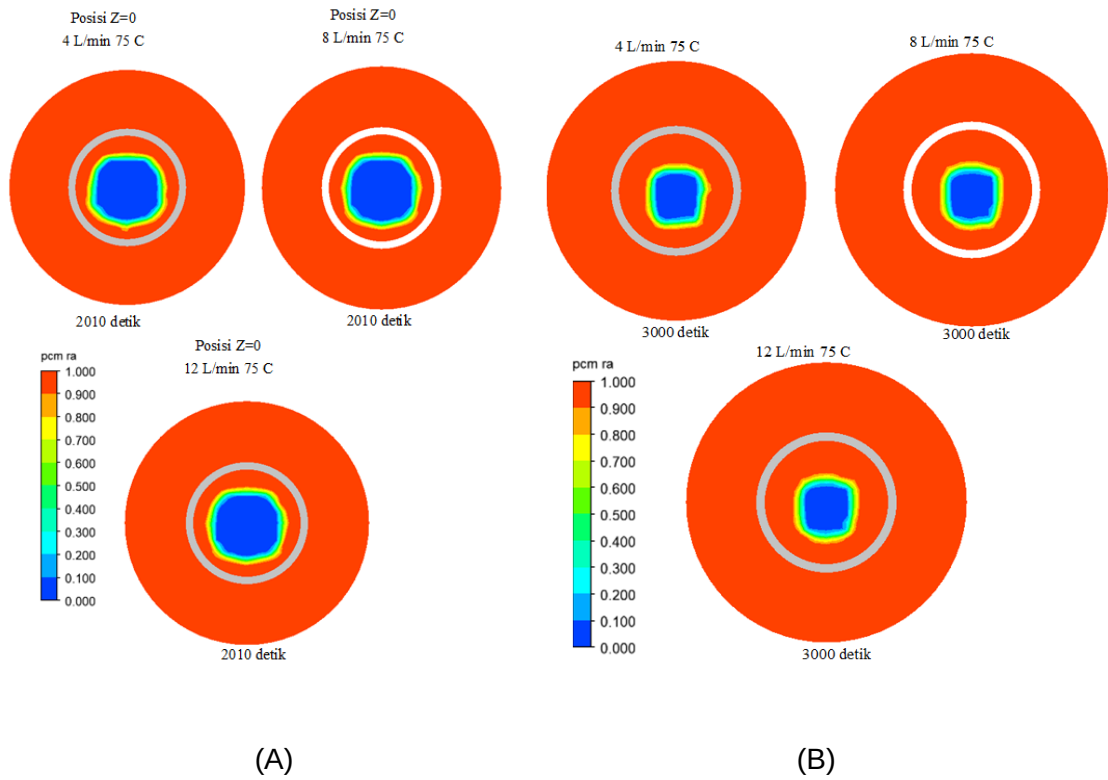
Delta time step yang digunakan sebanyak 0.1 dengan total *time step*-nya 95000. Untuk *max iteration* nya adalah 10 iterasi. Semua setingan yang digunakan sesuai dengan penelitian sebelumnya (Anggara et al., 2018).

Hasil Penelitian dan Pembahasan

Beberapa topik uraian yang dibahas antara lain: karakteristik pelelehan PCM, kontur pelelehan, distribusi suhu dan *melting time*. Pengamatan kontur pelelehan dilakukan pada waktu 2010 detik, 3000 detik, dan 4020 detik dengan posisi penampang radial dan aksial seperti pada Gambar 3(A,B,C). Kontur pelelehan bisa diamati dengan jelas pada Gambar 3(A,B,C). Pada awal mula pelelehan proses transfer kalor dominan terjadi secara konduksi hal ini bisa dilihat pada Gambar 3(A) yang menunjukkan pola pelelehan masih simetris.

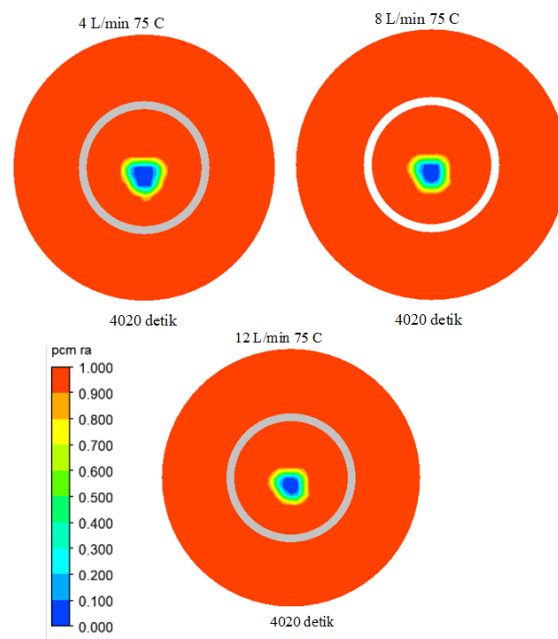
Namun semakin banyak lapisan PCM yang bewujud cair di dalam wadah, pengaruh konveksi natural semakin besar. Peran dari konveksi natural ini mengakibatkan sirkulasi flow yang terjadi didalam wadah PCM sangat dipengaruhi oleh densitas lapisan PCM. Semakin ringan densitas lapisan PCM maka lapisan ini bergerak menuju bagian sisi atas wadah PCM. Karena pergerakan inilah transfer kalor lebih mudah ke bagian atas wadah PCM. Sehingga menyebabkan bagian atas lebih banyak mengalami pelelehan dibandingkan sisi bagian bawah tabung seperti pada Gambar 3(B) dan Gambar 3(C), meskipun HTF memanasi PCM lebih dulu pada bagian bawah wadah PCM.

Pengaruh variasi debit pada kontur pelelehan untuk debit 4 L/min, 8 L/min dan 12 L/min pada Gambar 3(A,B,C) tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan pada masing-masing kontur pelelehan. Untuk melihat distribusi suhu ke arah radial dan aksial pengambilan data suhu berupa grafik dapat ditampilkan pada Gambar 6 (A,B,C) dan Gambar 7(A,B,C). Dari Gambar 6(A,B,C) bahwa untuk variasi debit (4-12 L/min) terlihat memiliki pola yang serupa untuk sesama kurva suhu pada posisi aksial. Pola yang terbentuk pada suhu aksial di Gambar 6, pada awal mula pemanasan semua garis suhu berimpit dalam hal ini T3, T6, T7 dan T8. Namun pada detik diatas 4000 terdapat urutan kurva suhu yang mengalami kenaikan lebih dulu. Hal ini disebabkan karena posisi yang lebih dekat dengan lubang inlet HTF mengalami transfer kalor lebih lama.



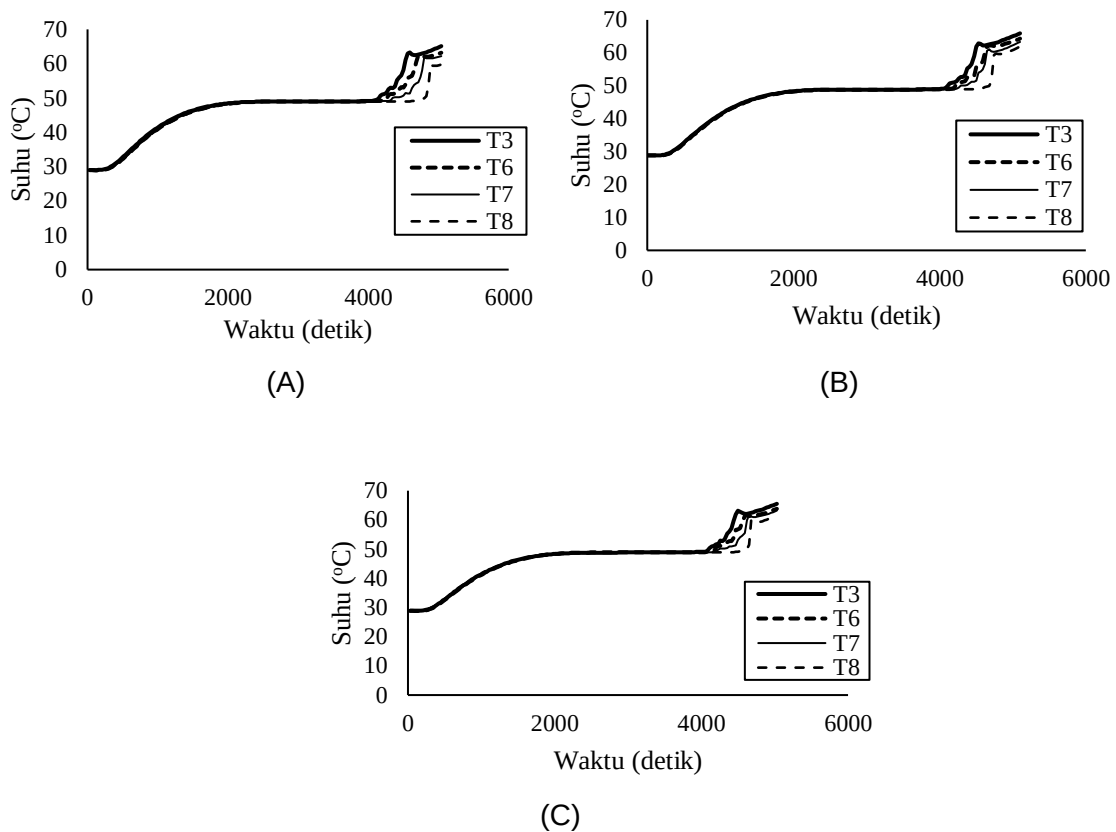
(A)

(B)



(C)

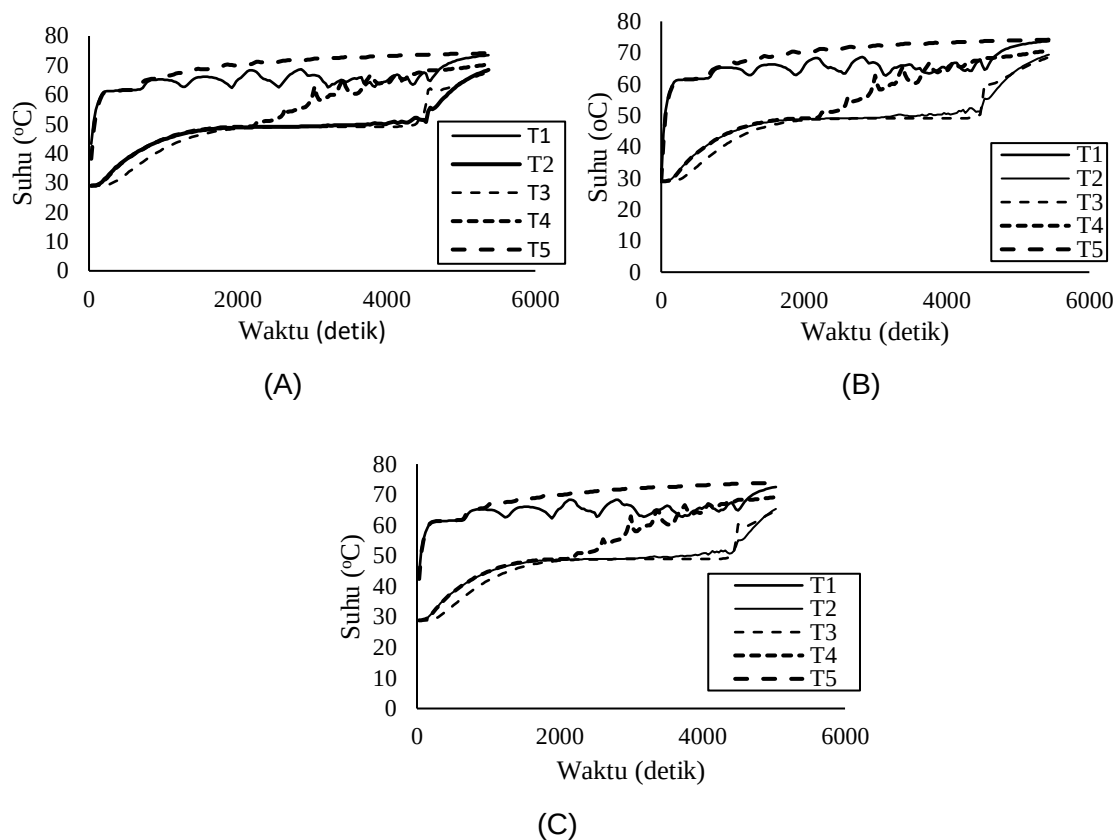
Gambar 3. Kontur Pelelehan Radial (A) Detik ke 2010, (B) Detik ke 3000, (C) Detik ke 4020



Gambar 6 Kurva Suhu Aksial (A) 4 L/min 75 °C, (B) 8 L/min 75 °C, (C) 12 L/min 75 °C

Urutan kenaikan suhu dimulai dari suhu yang posisinya paling dekat dengan lubang inlet HTF kemudian disusul dengan garis suhu yang letaknya semakin jauh dari HTF. Urutan kenaikan suhu tersebut adalah T3, T6, T7 dan terakhir T8.

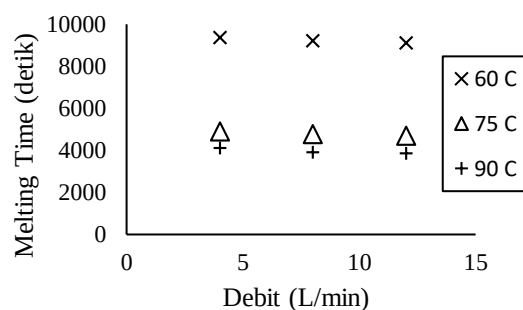
Pada Gambar 7 terlihat pola kurva suhu T1, T2, T3, T4 dan T5 posisi radial ketika awal mula pemanasan hingga mencair PCM sempurna. Pada awal mula pemanasan kurva T1 dan T5 berhimpit sangat dekat dengan menunjukkan nilai suhu yang hampir sama. Hal ini disebabkan karena posisi T1 dan T5 sangat dekat dengan dinding wadah PCM dan juga peran konduksi pada transfer kalor didalam wadah PCM masih besar. Namun setelah semakin tebalnya lapisan lilin yang meleleh, peran konveksi natural untuk transfer kalor menjadi lebih dominan. Sehingga menyebabkan bagian atas wadah PCM mengalami pelelehan terlebih dahulu. Hal ini pun juga menyebabkan T1 dan T5 tidak lagi berhimpit. Selain itu pengaruh konveksi natural juga dirasakan suhu T4 yang menyebabkan peningkatan pada bagian pertengahan kurva suhu radial.



Gambar 7 Kurva Suhu Radial (A) 4 L/min 75 °C, (B) 8 L/min 75 °C, (C) 12 L/min 75 °C

Sehingga seperti yang sudah disebutkan sebelumnya efek dari konveksi natural menyebabkan pelelehan terjadi lebih dulu pada bagian atas wadah PCM dan urutan kenaikan suhu nya adalah T4,T3 dan T2 seperti terlihat pada Gambar 7.

Melting time merupakan salah satu dari karakteristik pelelehan sebagaimana yang sudah disebutkan sebelumnya. Pengaruh variasi debit memang tidak signifikan terhadap kontur pelelehan namun hal ini pun juga tidak terlihat perbedaannya pada *melting time*. Pada Gambar 8 menunjukan pengaruh variasi debit terhadap *melting time*.



Gambar 8. Pengaruh Variasi Debit Inlet HTF Terhadap *Melting Time*.

Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa secara umum variasi debit tidak mempengaruhi karakteristik pelelehan. Distribusi suhu aksial dan radial pada penelitian ini juga tidak memberikan dampak yang begitu signifikan hanya saja suhu yang paling dekat dengan dinding mengalami kenaikan terlebih dahulu. Proses perpindahan kalor yang terjadi pada wadah PCM mula-mula adalah konduksi. Seiring dengan semakin menebalnya lapisan lapisan PCM berbentuk cair, konveksi natural menjadi semakin dominan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTES). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 615–628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.015>
- Al-Abidi, A. A., Bin Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., & Mohammed, A. T. (2013). CFD applications for latent heat thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 353–363. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.079>
- Anggara, F., Waluyo, J., Rohmat, T. A., Fauzun, Pranoto, I., Suhanan, ... Ansyah, P. R. (2018). Simulation and validation of PCM melting in concentric double pipe heat exchanger. *AIP Conference Proceedings*, 2001. <https://doi.org/10.1063/1.5049967>
- Ansyah, P. R., Waluyo, J., Suhanan, Najib, M., & Anggara, F. (2018). Thermal behavior of melting paraffin wax process in cylindrical capsule by experimental study, 020008, 020008. <https://doi.org/10.1063/1.5049968>
- Bechiri, M., & Mansouri, K. (2019). Study of heat and fluid flow during melting of PCM inside vertical cylindrical tube. *International Journal of Thermal Sciences*, 135(September 2018), 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.09.017>
- Brent, A. D., Voller, V. R., & Reid, K. J. (1988). Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal. *Numerical Heat Transfer*, 13(3), 297–318. <https://doi.org/10.1080/10407788808913615>
- Motahar, S., & Khodabandeh, R. (2016). Experimental study on the melting and solidification of a phase change material enhanced by heat pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 73, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.02.012>
- Pahamli, Y., Hosseini, M. J., Ranjbar, A. A., & Bahrampoury, R. (2018). Inner pipe downward movement effect on melting of PCM in a double pipe heat exchanger. *Applied Mathematics and Computation*, 316, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.07.066>
- Rösler, F., & Brüggemann, D. (2011). Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage: Numerical analysis and comparison with experiments. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 47(8), 1027–1033. <https://doi.org/10.1007/s00231-011-0866-9>
- Yusuf Yazici, M., Avci, M., Aydin, O., & Akgun, M. (2014). Effect of eccentricity on melting behavior of paraffin in a horizontal tube-in-shell storage unit: An experimental study. *Solar Energy*, 101, 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.007>