

SIMULASI COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS PELELEHAN DAN PEMBEKUAN PADA TANGKI THERMAL ENERGY STORAGE DENGAN KAPSUL BERISI CAMPURAN PARAFFIN WAX DAN SERBUK TEMBAGA FRAKSI MASSA 10 % DENGAN VARIASI FLUKS KALOR PADA CHARGING DAN VARIASI DEBIT AIR PADA DISCHARGING SECARA BERTAHAP

Riecky Yudha Dhiemas I.N.^a, Tito Hadji Agung S.^b, Teddy Nurcahyadi^c
 Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
 Jalan Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183
^arieckyudha@gmail.com, ^btitoahas@yahoo.com, ^cnurcahyadi@gmail.com

Abstrak

Metode yang tepat untuk mengatasi kekurangan SWH konvensional yaitu dengan menggunakan metode *Latent Heat Storage* (LHS) sebagai *Thermal Energy Storage* (TES). Pemberian serbuk tembaga pada *Phase Change Material* (PCM) dapat meningkatkan konduktivitas termalnya. Pada penelitian ini campuran PCM yang digunakan yaitu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi massa 10%. Akan tetapi pengujian TES secara eksperimen membutuhkan biaya yang mahal, oleh karena itu diperlukan studi simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Salah satu tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui waktu proses terjadinya pelelehan dan pembekuan campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi massa 10%.

Simulasi ini dilakukan menggunakan ANSYS Fluent 18.0 yang terdiri dari proses *charging* dan *discharging* secara bertahap. Pada proses *charging* memiliki debit air 0,9 LPM dan variasi fluks kalor 900 W dan 1100 W. Sementara pada *discharging* secara bertahap dengan jeda 5 menit memiliki temperatur inlet 27 °C dan debit air 1,5 LPM dan 2,5 LPM.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin besar nilai fluks kalor maka semakin cepat waktu pelelehannya serta semakin besar debit alirannya maka semakin cepat waktu pembekuannya. Hal ini dibuktikan dengan waktu pelelehan sempurna pada proses *charging* variasi 900 W yaitu 4,2 jam dan 1100 W yaitu waktu 2,94 jam. Sementara waktu mencapai pembekuan sempurna pada proses *discharging* secara bertahap pada variasi 1,5 LPM yaitu 0,76 jam dan 2,5 LPM yaitu 0,5875 jam.

Kata Kunci : Fluent, TES, fluks kalor, *discharging* secara bertahap.

Abstract

The right method for overcoming the lack of conventional SWH is to use the *Latent Heat Storage* (LHS) method as *Thermal Energy Storage* (TES). Provision of copper powder on *Phase Change Material* (PCM) can increase its thermal conductivity. In this study the PCM used was a mixture of *paraffin wax* with copper 10% mass fraction. However, the experimental TES research is expensive, therefore a *Computational Fluid Dynamics* (CFD) simulation study is needed. One of the objectives of this research is to determine the time of the melting and freezing of the *paraffin wax* mixture with copper 10% fraction mass

This simulation is carried out using ANSYS Fluent 18.0 which consists of a *charging* and *discharging* discontinue. In the *charging* process has a water discharge of 0.9 LPM and a variation of heat flux 900 W and 1100 W. While the *discharging* discontinue with a 5 minute interval has an inlet temperature of 27 °C and a water discharge of 1.5 LPM and 2.5 LPM.

The simulation results show that the greater the value of the heat flux, the faster the melting time and the greater the flowrate, the faster the solidification time. This is evidenced by the melting time in the 900 W *charging* process that is 4.2 hours and 1100 W which is 2.94 hours. While the time of solidification in the process of *discharging* discontinue in a variation of 1.5 LPM is 0.76 hours and 2.5 LPM is 0.5875 hours.

Keywords : Fluent, TES, heat flux, *discharging* discontinue.

1. Pendahuluan

Solar Water Heater (SWH) merupakan aplikasi teknologi yang memanfaatkan energi radiasi matahari yang cukup populer di masyarakat [1]. Tetapi, SWH konvensional memiliki kekurangan yaitu memiliki densitas HTF yang besar sehingga memerlukan volume tangki yang besar dan SWH masih menggunakan pemanas listrik pada tangki untuk menjaga temperatur air sehingga mengakibatkan biaya operasionalnya bertambah [2]. Metode yang tepat untuk digunakan dalam mengatasi kekurangan SWH yaitu dengan menggunakan *Thermal Energy Storage* (TES) sebagai penyimpan energi termal [3]. Klasifikasi TES dibagi tiga macam metode yaitu *Latent Heat Storage* (LHS), *Sensible Heat Storage* (SHS) dan *Thermochemical* [4]. Metode LHS merupakan metode yang paling efektif dan menarik digunakan untuk TES dari ketiga metode yang ada, dikarenakan menggunakan *Phase Change Material* (PCM) sebagai media penyimpanan energi termal [5].

Paraffin wax merupakan salah satu jenis material PCM yang sering digunakan untuk penyimpanan energi termal dengan metode LHS karena memiliki densitas energi tinggi (~200 kJ/kg) [6], *melting point*-nya antara 8 °C sampai dengan 106 °C [7], dan sifat kimianya dapat bertahan selama 1500 siklus termal [8]. Referensi [6] kembali menyatakan bahwa *paraffin wax* memiliki kekurangan yaitu konduktivitas termal yang rendah (~0,2 W/m.°C) [6]. Oleh karena itu dilakukan pencampuran antara *paraffin wax* dengan serbuk tembaga yang mempunyai nilai konduktivitas yang tinggi (401 W/m.K) sehingga mampu meningkatkan konduktivitas termalnya serta dapat meningkatkan perpindahan panasnya. [9].

Sementara, pada pengujian TES secara eksperimen memiliki berbagai batasan yaitu, biaya yang mahal untuk penelitannya dan memiliki kesulitan ketika memprediksi waktu proses terjadinya pelelehan dan pembekuan pada campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi massa 10%. Oleh karena itu diperlukan studi simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan *software ANSYS Fluent* untuk mengetahui waktu proses terjadinya pelelehan dan pembekuan pada campuran PCM. Geometri TES memiliki 32 pipa tembaga dimana campuran PCM berada di pipa bagian dalam.

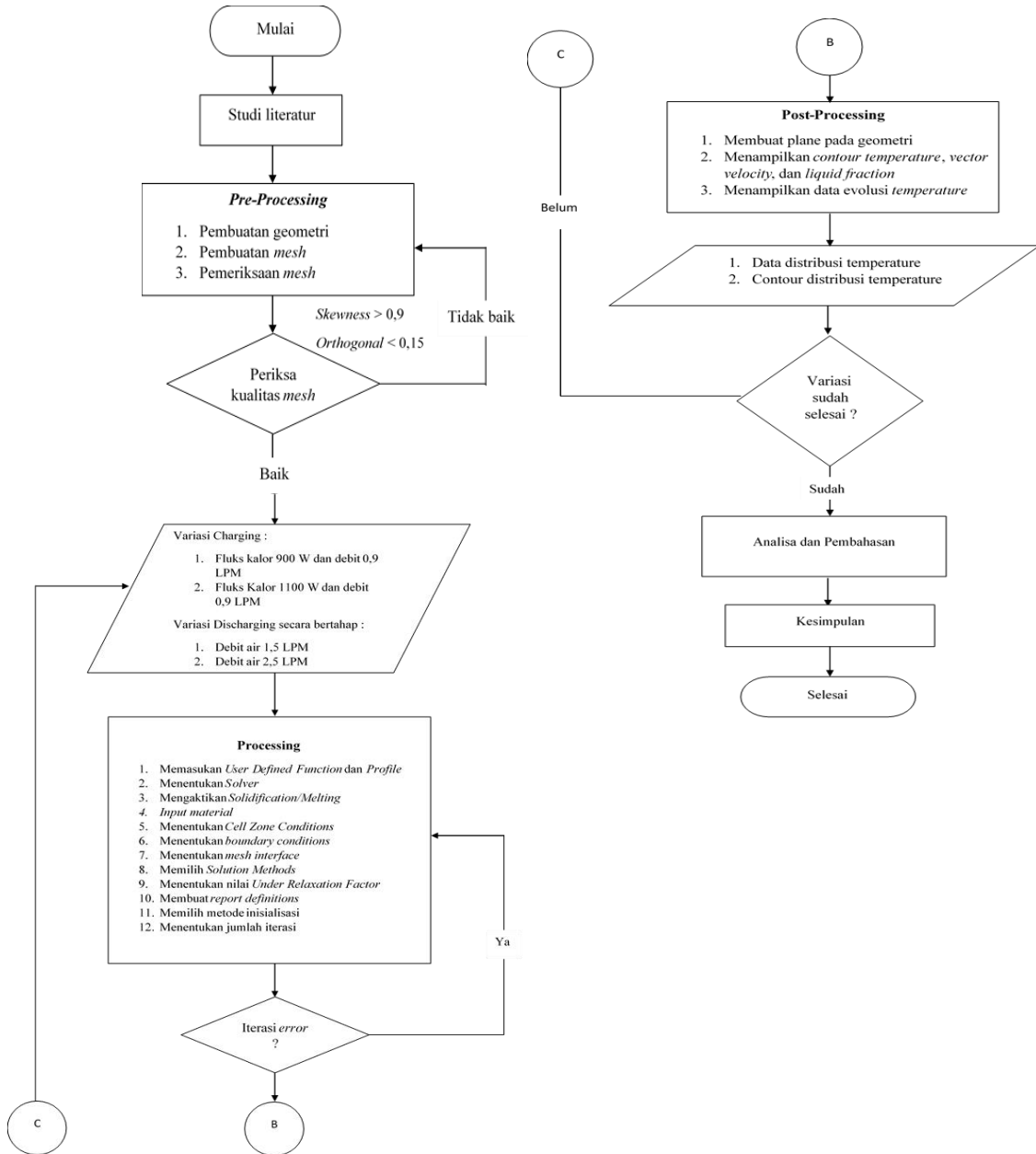
Nadjib dkk (2015) [10] melakukan penelitian tentang *paraffin wax* yang digunakan sebagai PCM. Pada pengujian tersebut *paraffin wax* dimasukkan pada pipa tembaga dan disusun secara horizontal. Lalu dipanaskan melalui kolektor yang dihadapkan secara langsung ke arah matahari selama 340 menit. Hasil dari penelitian tersebut yaitu *paraffin wax* dapat menyimpan kalor dengan baik, karena dapat mengurangi rugi-rugi termal yang terbuang.

Proses pelelehan *paraffin wax* juga pernah disimulasikan oleh Anggara (2017) [11]. *paraffin wax* yang digunakan berjenis Rubitherm 52 (RT-52). Pada pengujian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik pelelehan pada PCM yang diterapkan pada *heat-exchanger* berbentuk silinder. Konfigurasi geometri ini terdiri dari dua tabung. Tabung dalam berisi PCM sementara tabung luar sebagai HTF. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *software ANSYS Fluent* yang bervariasi temperatur (60°C, 75°C, dan 90°C) dan debit HTF (4 LPM, 8 LPM, dan 12 LPM). Kesimpulan yang didapatkan dari pengujian tersebut yaitu pengaruh temperatur lebih besar dibandingkan pengaruh debit terhadap karakteristik pelelehan.

Lin dkk (2016), melakukan penelitian tentang campuran *paraffin wax* dengan nanopartikel tembaga dengan variasi fraksi massa 0,5 %, 1 %, 1,5 % dan 2 %. Tujuan dari penelitian tersebut yaitu mengetahui sifat termal dan karakteristik pada campuran *paraffin wax* dengan nanopartikel tembaga. Pengujiannya terdiri dari *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) untuk mengetahui sifat termal, *Thermogravimetric Analysis* (TGA) untuk mengetahui trend degradasi termal, *Field Emission Scanning Electron Microscope* (FESEM) untuk mengetahui struktur *morphology* dan *microstructure*, *Fourier Transform Infrared Spectrometer* (FT-IR) untuk mengetahui ikatan kimia, struktur molekul dan efek dari degradasi, *Transient hot disk thermal constant analyzer* untuk mengukur nilai konduktivitas termal dan difusivitas termal, dan *Particles Size Analyzer* (PSA) untuk mengetahui rentang distribusi ukuran nanopartikel. Hasil dari penelitian tersebut yaitu nanopartikel tembaga memiliki bentuk hexagon dengan distribusi rentang ukuran sebesar 15 nm – 130 nm. Pada konduktivitas termal mengalami peningkatan 14 % untuk fraksi massa 0,5 %, 23,9 % untuk fraksi massa 1 %, 42,5 % untuk fraksi massa 1,5 %, dan 46,3 % untuk fraksi massa 2 %. *Latent heat* pada fase cair untuk *paraffin wax*, 0,5% Nano Cu-PCM, 1% Nano Cu-PCM, 1,5% Nano Cu-PCM, dan 2% Nano Cu-PCM secara berurutan 184,2 kJ/kg, 172,2 kJ/kg, 166,7 kJ/kg, 160,3 kJ/kg,

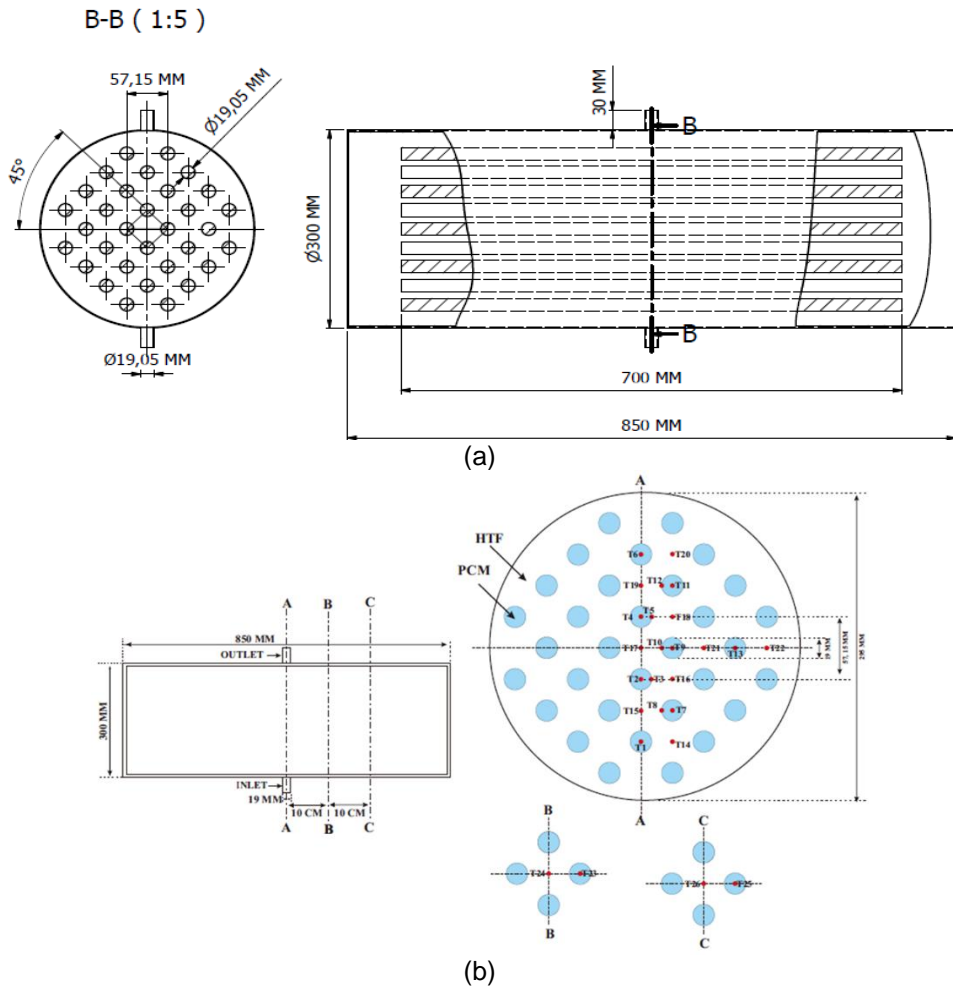
157,3 kJ/kg. Sedangkan *latent heat* pada fase padat secara berurutan 179,3 kJ/kg, 170,6 kJ/kg, 164,3 kJ/kg, 159,6 kJ/kg, 155,5 kJ/kg.

2. Metode Penelitian.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Parameter yang digunakan pada penelitian ini yaitu pada proses *charging* menggunakan variasi fluks kalor dengan daya heater 900 W dan 1100 W. Sementara, pada proses *discharging* secara bertahap dengan jeda waktu lima menit menggunakan variasi debit air 1,5 LPM dan 2,5 LPM. Ukuran geometri dan posisi termokopel dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. (a) Geometri Tangki berisi 32 Pipa Tembaga (b) Posisi Termokopel pada Tangki

Penelitian ini menggunakan material berupa air sebagai HTF dan *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi massa 10% sebagai Campuran PCM. Campuran PCM yang dipakai memiliki nilai properti yang diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai properti campuran PCM

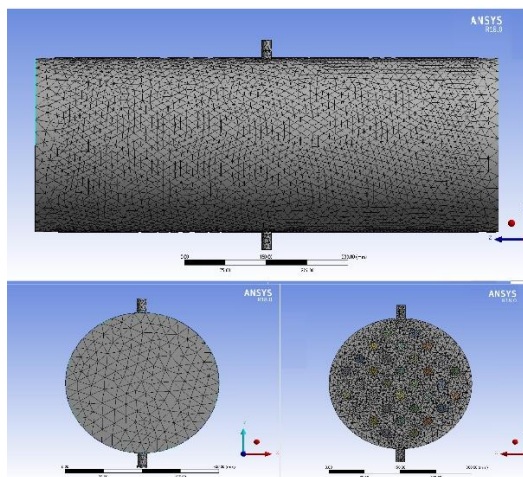
Kriteria	Satuan	Nilai
Densitas fase padat (T = 28 °C)	kg/m ³	934
Densitas fase cair (T = 68 °C)	kg/m ³	823,5
Konduktivitas termal	W/m.K	40,28
Kalor lebur	J/kg	127.660
Viskositas	Pa.s	0,100653
Titik beku	°C	56,65
Titik leleh	°C	61,52
Kalor jenis	J/kg.K	1839

Asumsi yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut :

- Perpindahan panas radiasi tidak ada.
- Heatloss pada sistem diabaikan.

- c. HTF dan campuran PCM memiliki temperatur awal yang sama.
- d. Campuran PCM bersifat homogen.
- e. Kapasitas kalor jenis (CP) dan konduktivitas termal (k) pada campuran PCM ditentukan dengan secara proporsional dengan memperhatikan sifat-sifat individunya dan fraksi massanya.

Meshing dilakukan dengan nilai rata-rata *skewness* 0,22065 dan nilai rata-rata *orthogonal* 0,87725. Hasil *meshing* TES disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Pembuatan *Mesh*

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Evolusi Temperatur HTF

Hasil evolusi temperatur HTF yang didapatkan berasal dari 11 titik temperatur yang tersebar dengan posisi pada Gambar 2(b). Kemudian titik temperatur dibagi menjadi empat segmen sesuai dengan posisinya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Evolusi temperatur HTF pada penelitian ini terbagi menjadi dua proses yaitu *charging* dan *discharging* secara bertahap. Penyanjian data tersebut menggunakan kurva dan *contour*.

Tabel 2. Pembagian Kelompok pada Termokopel di HTF

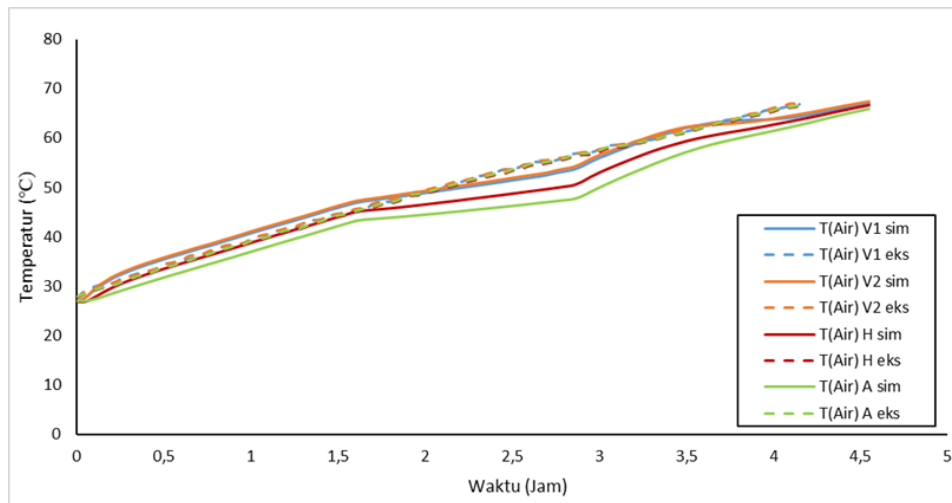
Nama	Posisi	Termokopel
T(Air) V1	Baris Vertikal 1	T19, T17, dan T15
T(Air) V2	Baris Vertikal 2	T20, T18, dan T16
T(Air) H	Baris Horizontal	T17, T24, dan T22
T(Air) A	Baris Aksial	T17, T24 dan T26

Gambar 4. menunjukkan perbandingan evolusi temperatur HTF proses *charging* pada simulasi dan eksperimen. Temperatur pada arah vertikal yang ditunjukkan oleh T(Air) V1 dan T(Air) V2 mengalami kenaikan temperatur yang lebih cepat. Hal ini disebabkan karenakan posisinya paling dekat dengan inlet. Sedangkan kenaikan temperatur yang lama terjadi pada arah aksial yang ditunjukkan oleh T(Air) A. Posisi T(Air) A yang jauh dari inlet mempengaruhi lamanya kenaikan temperatur. Pada Grafik (a) simulasi saat waktu 1,6 jam – 2,9 jam mengalami perubahan kurva kenaikan temperatur dikarenakan perhitungannya yang konvergen. Variasi fluks kalor 1100 W memiliki kurva kenaikan temperatur yang lebih tinggi daripada variasi fluks kalor 900 W. Evolusi temperatur HTF pada waktu simulasi lebih lama daripada waktu eksperimen hal ini dipengaruhi oleh perbedaan volume pada PCM. Yang dimana pada simulasi volume PCM terisi 100%, sementara pada eksperimen volume PCM terisi 70% dari total volume pipa tembaga. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu 65 °C dapat dilihat pada Tabel 3. Perbedaan waktu simulasi yang mendekati dengan eksperimen

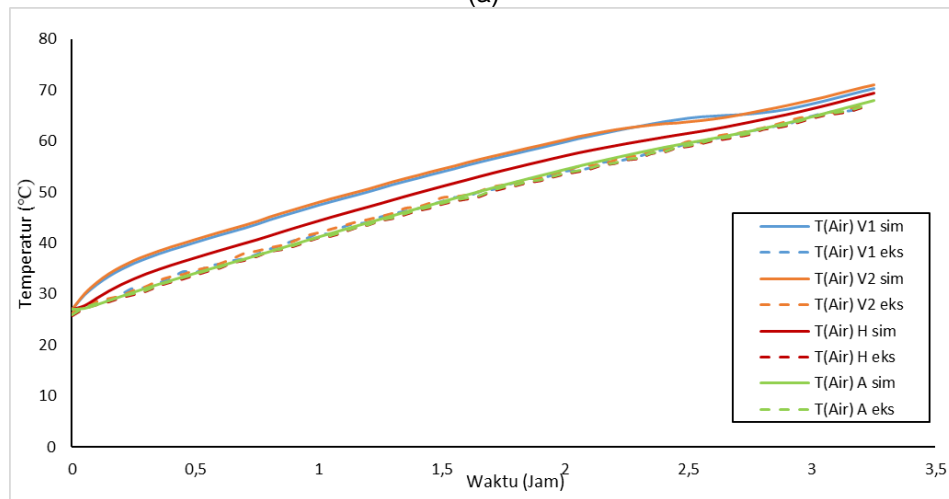
dikarenakan adanya input data eksperimen dilibatkan dalam simulasi. Masih adanya deviasi tersebut juga diduga karena perbedaan volume campuran PCM antara simulasi dengan eksperimen. Volume campuran PCM pada simulasi 100% sedangkan pada eksperimen volume campuran PCM-nya 70%. Selain itu, pendekatan nilai sifat-sifat termal seperti konduktivitas termal dan kalor jenis pada pengujian simulasi berbeda dengan pengujian eksperimen.

Tabel 3. Hasil Perbandingan Pengujian *Charging*

Variasi	Waktu		Deviasi
	Simulasi	Eksperimen	
900 W	4,55 jam	4,15 jam	8,79 %
1100 W	3,25 jam	3,2 jam	1,53 %



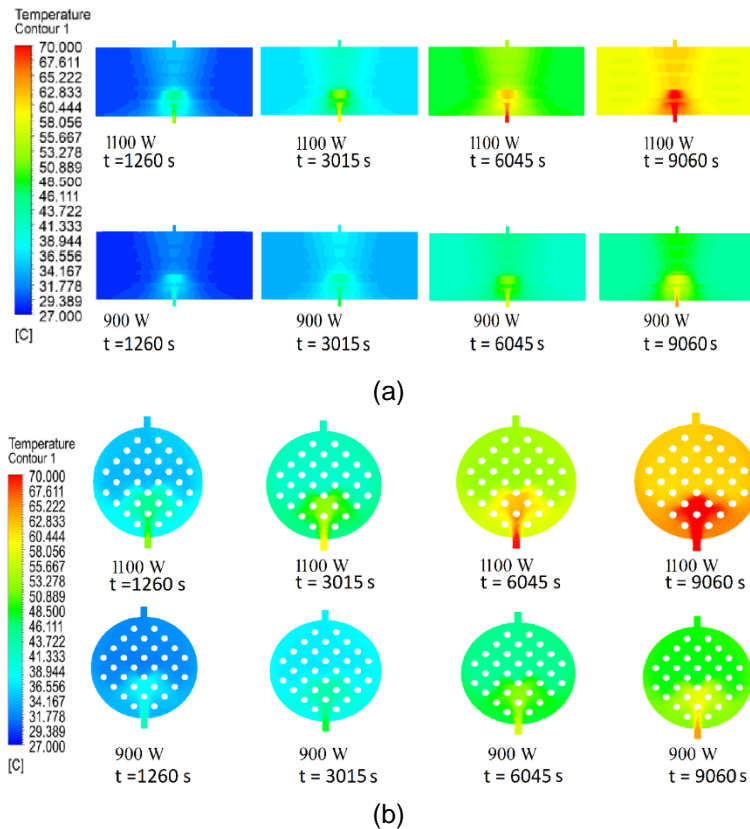
(a)



(b)

Gambar 4. Grafik Evolusi Temperatur HTF pada Proses *Charging* (a) Variasi 900 W (b) Variasi 1100 W

Gambar 5 terlihat bahwa perubahan temperatur pada arah radial lebih cepat dibandingkan arah aksial. Hal ini dipengaruhi oleh posisi *inlet* dan *outlet* yang sejajar. Sementara pada variasi 1100 W mengalami perubahan temperatur yang lebih cepat daripada variasi 900 W. Hal ini dibuktikan dengan *contour* pada detik 9060 yang dimana variasi 1100 W *contour*-nya berwarna kuning, sementara variasi 900 W *contour*-nya berwarna hijau.

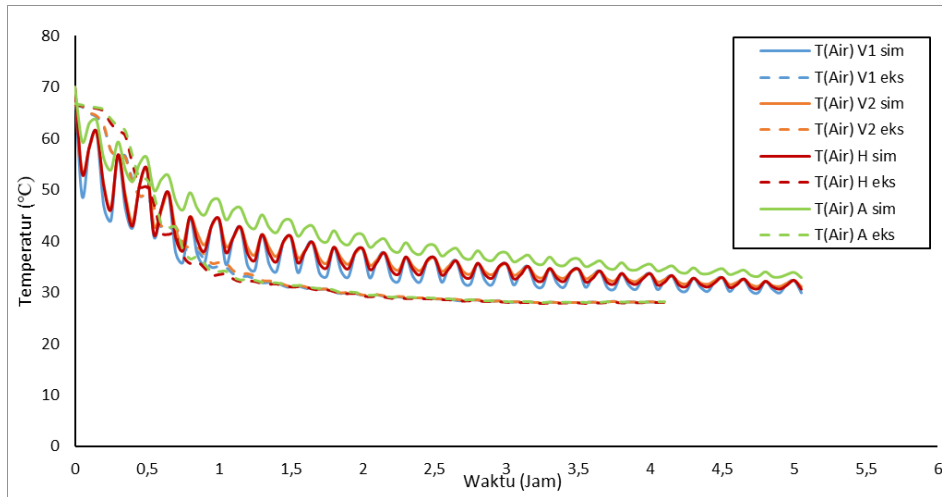


Gambar 5. Contour HTF pada Proses Charging Variasi 1100 W dan 900 W
 (a) Arah Aksial (b) Arah Radial

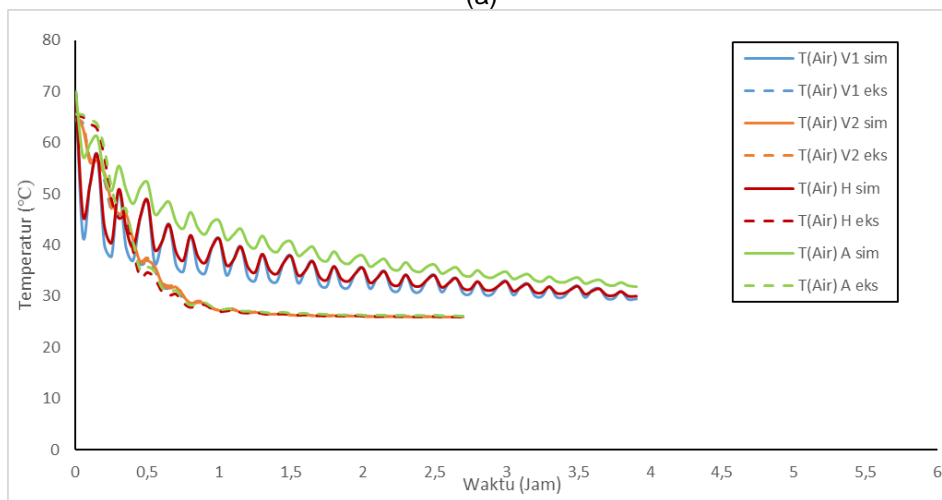
Gambar 6. memperlihatkan bahwa kurva temperatur pada simulasi mengalami naik turun. Hal ini terjadi karena adanya pemanasan kembali oleh PCM ketika debit air dimatikan dan ketika debit air dihidupkan kembali HTF mengalami penurunan temperatur. Temperatur pada arah vertikal yang ditunjukkan pada T(Air) V1 dan T(Air) V2 mengalami penurunan temperatur yang lebih cepat daripada arah posisi lain. Hal ini dipengaruhi oleh posisi *inlet* yang dekat dengan arah vertikal. Sementara penurunan temperatur yang lama terjadi pada T(Air) A atau posisi arah aksial. Letaknya yang jauh dari *inlet* menyebabkan penurunan temperatur lama. Besarnya variasi debit mempengaruhi waktu penurunan temperatur, hal ini dibuktikan pada Grafik (b) yang lebih cepat mengalami penurunan temperatur daripada Grafik (a). Selain itu didapatkan bahwa kurva eksperimen lebih cepat mengalami penurunan temperatur daripada simulasi. Hal ini disebabkan oleh kondisi temperatur *inlet* tidak konstan. Sementara besarnya nilai deviasi yang ditunjukkan pada Tabel 4, diduga karena acuan temperatur akhir 35 °C yang berbeda untuk pengujian eksperimen acuannya di bak penampung, sedangkan pada pengujian simulasi acuannya di tangki. Hal ini mengakibatkan adanya *heatloss* yang terjadi pada pengujian eksperimen. Selain itu pendekatan sifat-sifat termal dan volume campuran PCM yang berbeda antara simulasi dengan eksperimen juga mempengaruhi.

Tabel 4. Hasil Perbandingan Pengujian Discharging Secara Bertahap

Variasi	Waktu		Deviasi
	Simulasi	Eksperimen	
1,5 LPM	5,05 jam	4,1 jam	18,81 %
2,5 LPM	3,9 jam	2,7 jam	30,77 %



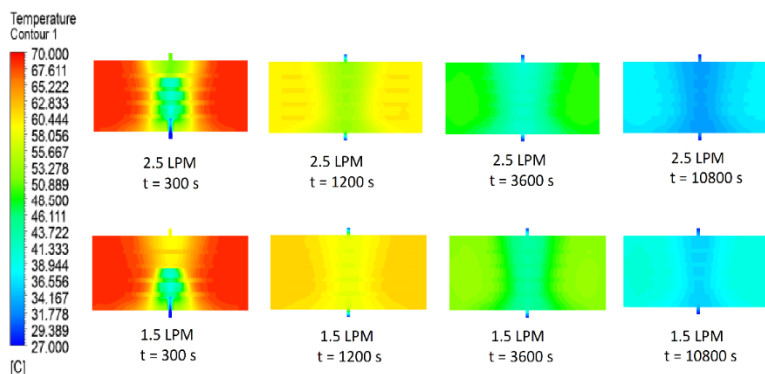
(a)



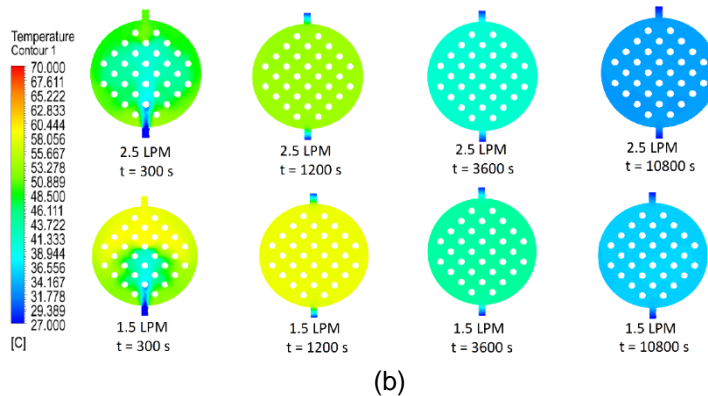
(b)

Gambar 6. Grafik Evolusi Temperatur HTF pada Proses *Discharging* secara Bertahap
 (a) Variasi 1,5 LPM (b) Variasi 2,5 LPM

Penurunan suhu pada variasi 2,5 LPM lebih cepat daripada 1,5 LPM juga dibuktikan pada Gambar 7. Pada detik ke 10800 *contour* variasi 2,5 LPM di dominasikan warna biru tua, sedangkan pada detik yang sama *contour* 1,5 LPM di dominasikan warna biru muda. Terlihat juga bahwa perubahan temperatur pada arah radial lebih cepat dibandingkan arah aksial. Hal ini dipengaruhi oleh posisi inlet dan outlet yang sejajar.



(a)



Gambar 7. Contour HTF pada Proses *Discharging* secara Bertahap variasi 2,5 LPM dan 1,5 LPM (a) Arah Aksial (b) Arah Radial

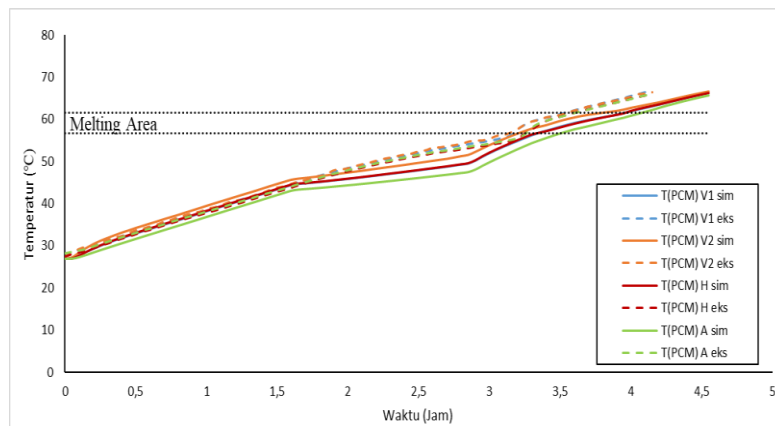
3.2. Evolusi Temperatur Campuran PCM

Hasil evolusi temperatur PCM yang didapatkan berasal dari 10 titik temperatur yang tersebar dengan posisi pada Gambar 2. Kemudian titik temperatur dibagi menjadi empat segmen sesuai dengan posisinya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Evolusi temperatur PCM penelitian ini terbagi menjadi dua proses yaitu *charging* dan *discharging* secara bertahap. Penyajian data tersebut menggunakan kurva dan *contour*.

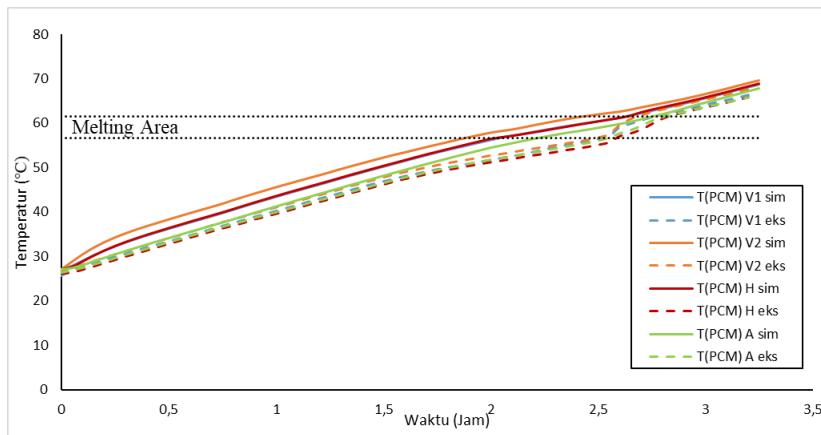
Tabel 5. Pembagian kelompok pada Termokopel di PCM

Nama	Posisi	Termokopel
T(PCM) V1	Baris Vertikal 1	T1, T2, T4 dan T6
T(PCM) V2	Baris Vertikal 2	T7, T9, dan T11
T(PCM) H	Baris Horizontal	T9 dan T13
T(PCM) A	Baris Aksial	T9, T23 dan T25

Gambar 8 memperlihatkan perbandingan grafik evolusi temperatur PCM. Kenaikan kurva temperatur yang lebih cepat ditunjukkan pada T(PCM) V1 dan T(PCM) V2. Hal ini disebabkan karena letaknya yang dekat dengan posisi air masuk. Sementara, kenaikan kurva temperatur yang lama ditunjukkan pada T(PCM) A. Pada grafik (a) mengalami awal titik leleh pada waktu 3,25 jam, sedangkan pada grafik (b) awal titik leleh terjadi pada waktu 2 jam. Hal tersebut dipengaruhi karena perbedaan nilai fluks kalor, semakin besar nilai fluks kalor maka semakin cepat waktu titik lelehnya. Pada variasi 1100 W, pengujian secara simulasi mengalami pelelehan terlebih dahulu daripada pengujian secara eksperimen. Sedangkan pada variasi 900 W, pengujian eksperimen lebih dahulu mengalami pelelehan daripada pengujian secara simulasi.



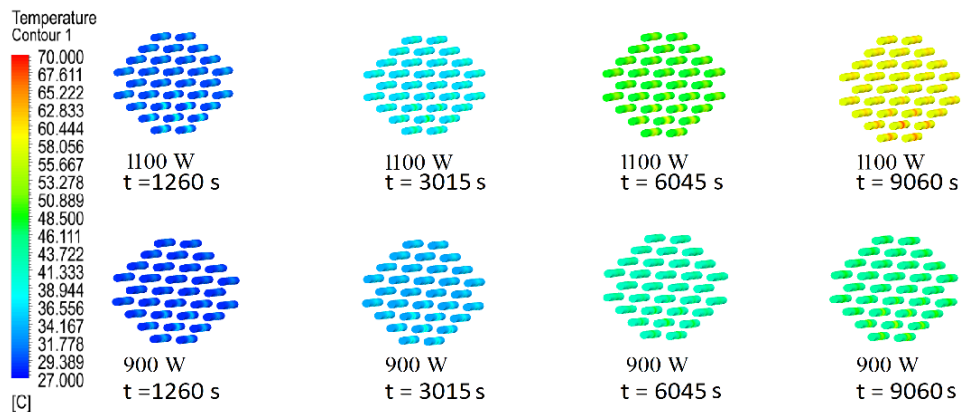
(a)



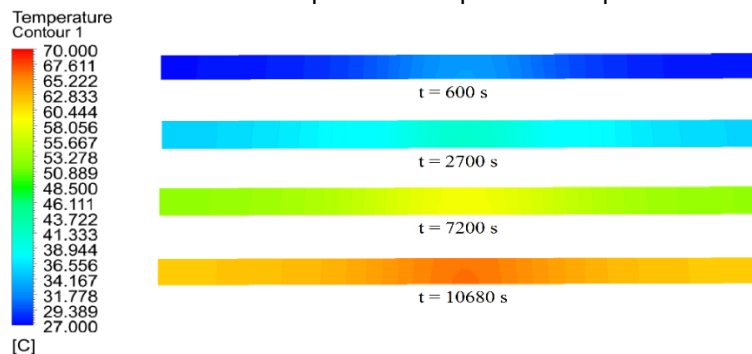
(b)
Gambar 8. Grafik Evolusi Temperatur Campuran PCM pada Proses *Charging* (a) 900 W (b) 1100 W

Pada Gambar 9, 10, dan 11 menunjukkan perbandingan *contour* evolusi temperatur antara variasi 900 W dengan 1100 W. Pada gambar tersebut terlihat bahwa kenaikan temperatur pada 1100 W lebih cepat dibanding 900 W. Hal ini dapat dibuktikan dengan perbedaan warna *contour* pada waktu yang sama. Evolusi temperatur campuran PCM yang tercepat berada di posisi tengah bawah, sedangkan yang terlama berada di bagian atas. Hal tersebut diduga karena aliran HTF-nya menabrak pipa, sehingga PCM yang bagian atas mengalami kenaikan suhu yang lama.

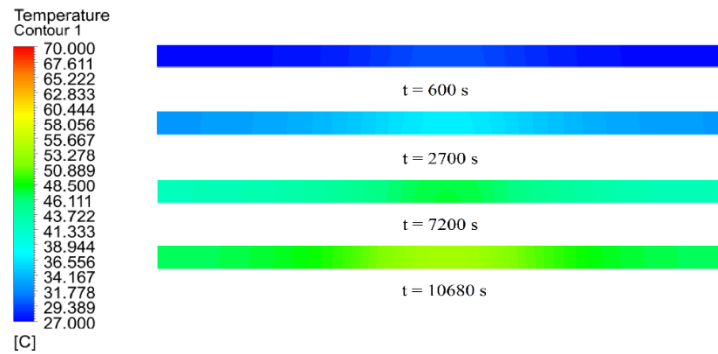
Pada Gambar 4.7 terlihat bahwa evolusi temperatur campuran PCM dimulai dari tengah lalu menyebar ke bagian sampingnya. Hal tersebut terjadi karena terkena aliran *inlet* yang menyebabkan bagian tengahnya mengalami panas terlebih dahulu.



Gambar 9. *Contour* Evolusi Temperatur Campuran PCM pada Proses *Charging*

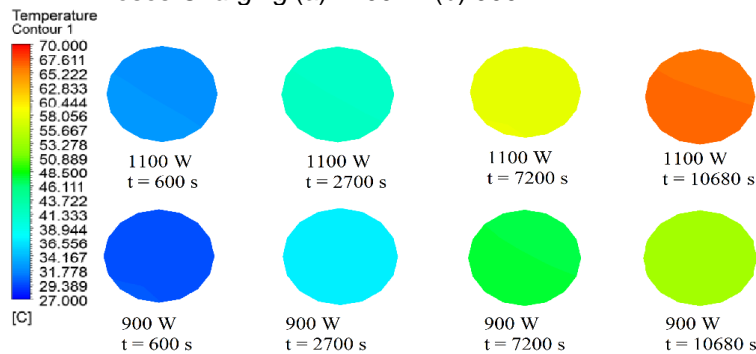


(a)



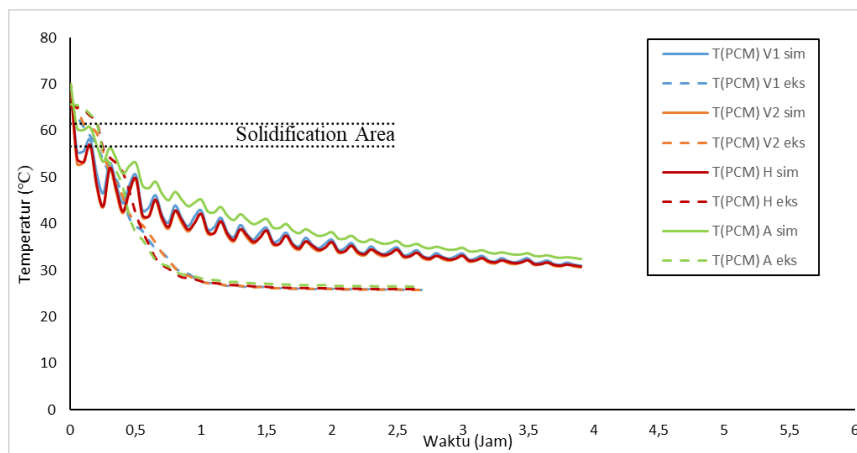
(b)

Gambar 10. Contour Evolusi Temperatur Campuran PCM No. 27 Arah Aksial pada Proses Charging (a) 1100 W (b) 900 W

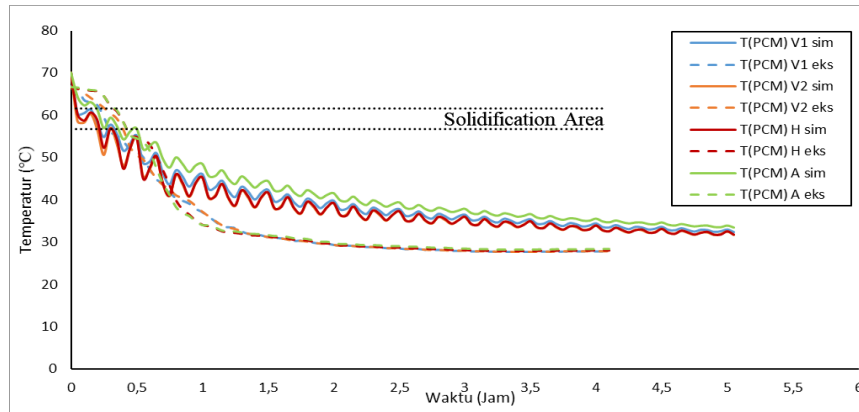


Gambar 11. Contour Evolusi Temperatur Campuran PCM No. 27 Arah Radial No. 27 pada Proses Charging

Gambar 12. menunjukkan grafik evolusi temperatur PCM pada proses *discharging* secara bertahap. Pada grafik tersebut dapat dilihat perbedaan waktu antara pengujian simulasi dengan eksperimen. Hal tersebut dipengaruhi oleh perbedaan temperatur air yang masuk ke tangki. Kecepatan penurunan kurva yang tertinggi terjadi pada arah termokopel posisi vertikal (T(PCM) V1). Sementara kecepatan penurunan kurva yang terendah terjadi pada arah termokopel posisi aksial (T(PCM) A). Waktu proses pembekuan campuran PCM pada simulasi lebih cepat daripada eksperimen. Hal ini dikarenakan nilai konduktivitas termal dan kalor jenis pada simulasi menggunakan perhitungan asumsi.



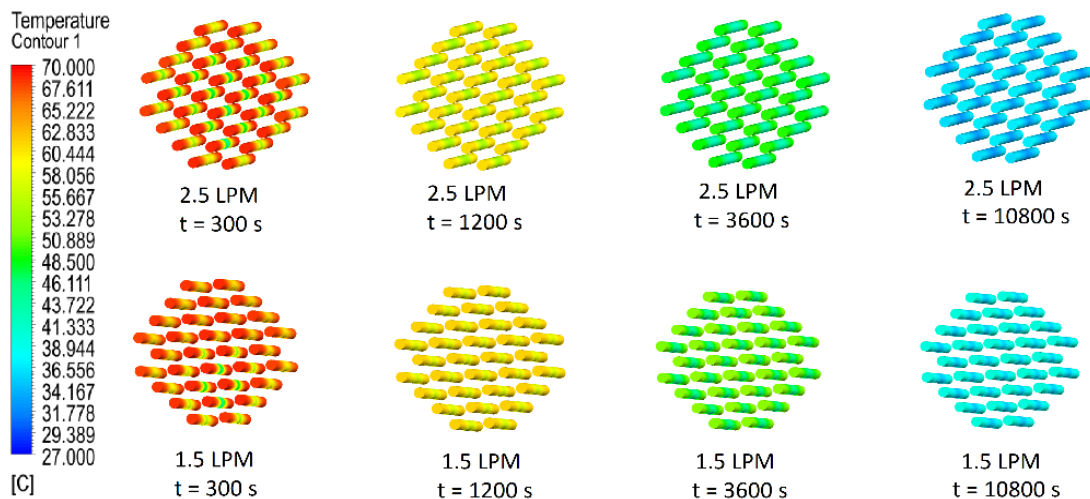
(a)



(b)

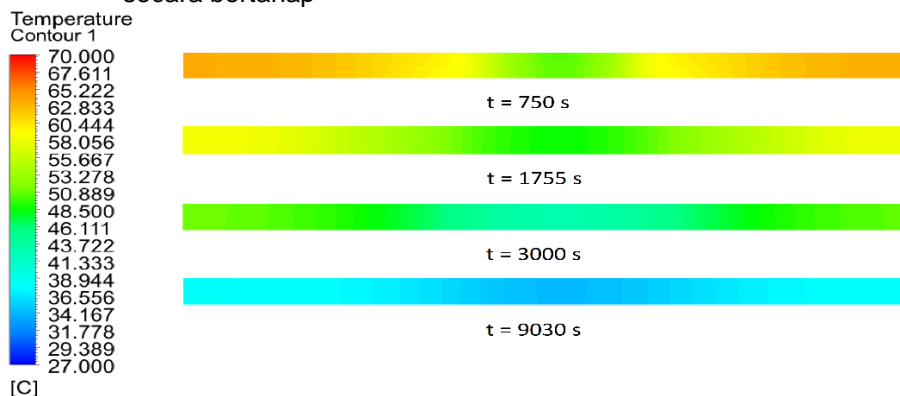
Gambar 12. Grafik Evolusi Temperatur Campuran PCM pada Proses *Discharging* secara bertahap (a) 2,5 LPM (b) 1,5 LPM

Pada Gambar 13, 14, dan 15 menunjukkan perbandingan *contour* evolusi temperatur antara variasi 1,5 LPM dengan 2,5 LPM. Pada gambar tersebut terlihat bahwa penurunan temperatur pada 2,5 LPM lebih cepat dibanding 1,5 LPM. Hal ini dapat dibuktikan dengan perbedaan warna *contour* pada waktu yang sama.



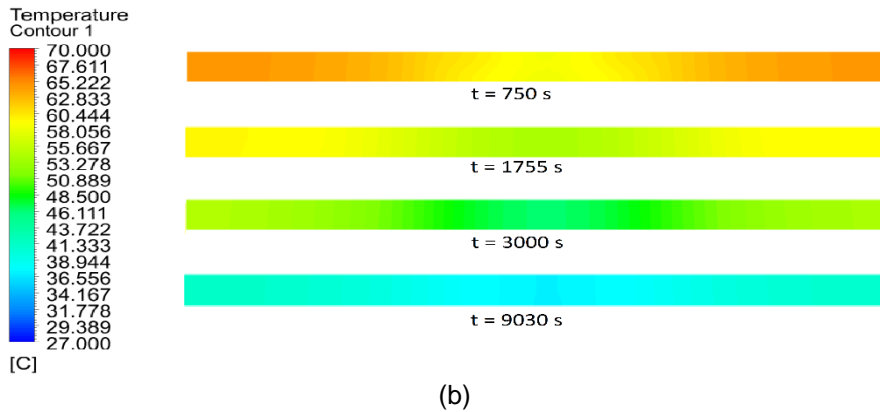
[C]

Gambar 13. *Contour* Evolusi Temperatur Campuran PCM pada Proses *Discharging* secara bertahap

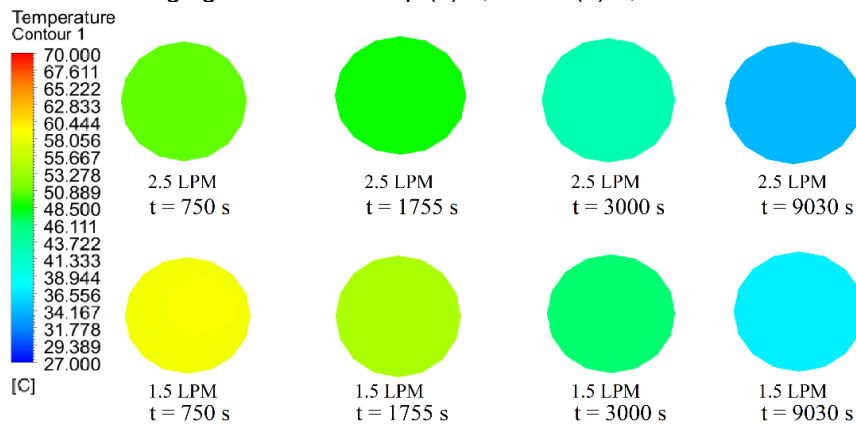


[C]

(a)



Gambar 14. *Contour* Evolusi Temperatur Campuran PCM No. 27 Arah Aksial pada Proses *Discharging* secara Bertahap (a) 2,5 LPM (b) 1,5 LPM

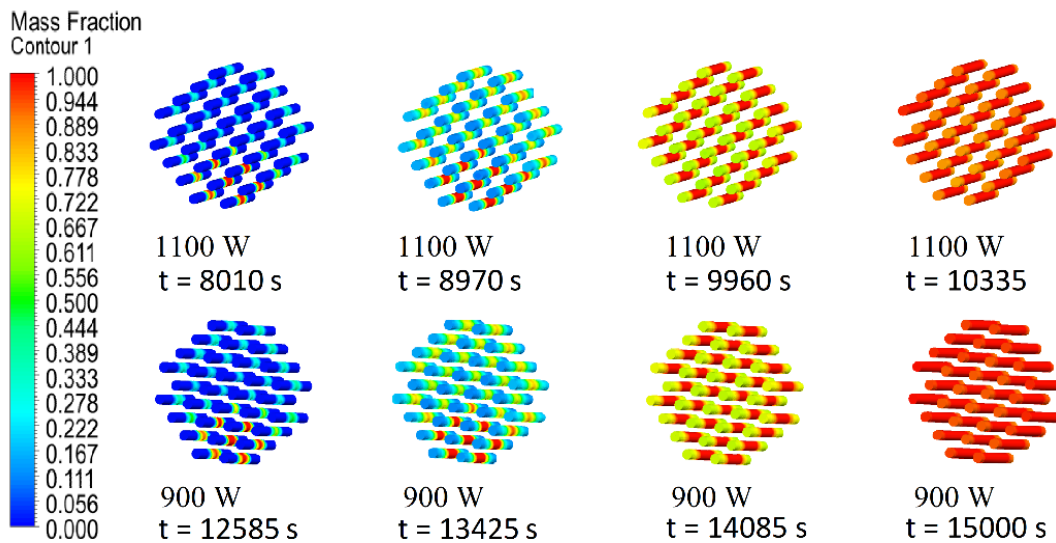


Gambar 15. *Contour* Evolusi Temperatur Campuran PCM No. 27 Arah Radial pada Proses *Discharging* secara Bertahap

3.3. Pelelehan dan Pembekuan Campuran PCM

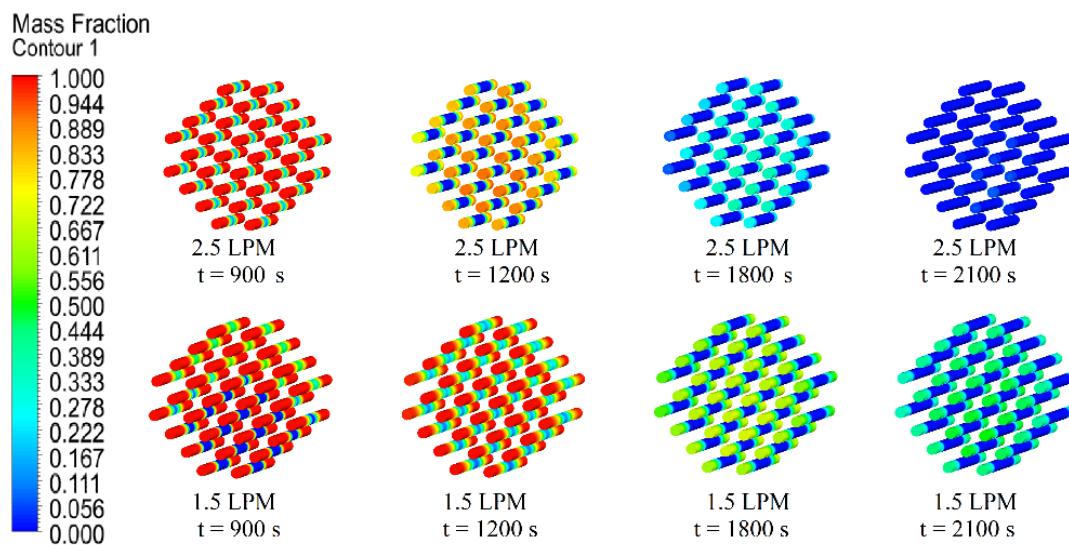
Hasil pelelehan dan pembekuan pada Campuran PCM dengan serbuk tembaga disajikan dalam bentuk *contour*. *Contour* yang diambil meliputi *contour* keseluruhan campuran PCM, *contour* campuran PCM no.27 arah radial, dan *contour* campuran PCM no. 27 arah aksial.

Pada Gambar 16 menyajikan *contour* pelelehan keseluruhan campuran PCM pada dua variasi fluks kalor (900 W dan 1100 W). Dari *contour* tersebut terlihat bahwa pelelehan awal terjadi pada campuran PCM yang dekat dengan posisi *inlet*. Pelelehan awal pada 900 W terjadi pada waktu 2,79 jam dan variasi 1100 W terjadi pada waktu 1,47 jam. Pelelehan sempurna terjadi pada variasi 1100 W pada waktu 2,94 jam dan pada variasi 900 W terjadi pada waktu 4,2 jam.



Gambar 16. Contour Liquid Fraction pada proses Charging

Pada Gambar 17 menunjukkan *contour* pembekuan dari *discharging* secara bertahap dengan jeda 5 menit. Memiliki temperatur *inlet* 27 °C, kondisi temperatur awal 70 °C dan variasi debit air 1,5 LPM dan 2,5 LPM. Dari *contour* tersebut terlihat pembekuan awal terjadi pada campuran PCM yang dekat dengan posisi *inlet*. Pembekuan awal pada debit 2,5 LPM dan 1,5 LPM terjadi pada detik ke-15. Variasi debit 2,5 LPM mengalami pembekuan sempurna yang lebih cepat dengan waktu 0,5875 jam. Sedangkan pada variasi debit 1,5 LPM mengalami pembekuan sempurna terjadi pada waktu 0,76 jam.



Gambar 17. Contour Liquid Fraction pada Proses Discharging secara Bertahap

4. Kesimpulan

Simulasi *Computational Fluid Dynamics* pelelehan dan pembekuan pada tangki *Thermal Energy Storage* dengan kapsul berisi campuran *paraffin wax* dan serbuk tembaga fraksi massa 10 % dengan variasi fluks kalor pada *charging* dan variasi debit air pada *discharging* secara bertahap telah dilakukan. Kesimpulan dari penelitian ini adalah :

- a. Nilai fluks kalor mempengaruhi waktu pelelehannya, semakin besar nilai fluks kalornya maka waktu pelelehannya semakin cepat. Waktu yang dibutuhkan untuk memperoleh pelelehan sempurna pada variasi 1100 W yaitu 2,94 jam dan pada variasi 900 W membutuhkan waktu 4,2 jam.

- b. Debit aliran HTF mempengaruhi waktu pembekuannya, semakin besar debit alirannya maka waktu pembekuannya semakin cepat. Waktu yang dibutuhkan untuk memperoleh pembekuan sempurna pada variasi 1,5 LPM yaitu 0,76 jam dan pada variasi 2,5 LPM membutuhkan waktu 0,5875 jam.
- c. Total durasi pengujian simulasi lebih lama daripada durasi pengujian eksperimen dalam mencapai hasil yang ditentukan. Nilai deviasi dari pengujian *charging* variasi 900 W yaitu 8,79 % dan pada variasi 1100 W yaitu 1,53 %. Sementara Nilai deviasi dari pengujian *discharging* secara bertahap variasi 1,5 LPM yaitu 18,81 % dan pada variasi 2,5 LPM yaitu 30,77 %

Daftar Pustaka

Journal:

- [1] Nadjib, M., & Suhanan. 2014. Kajian Perpindahan Kalor pada Pemanas Air Tenaga Surya Menggunakan Kapsul PCM Pipa-banyak Susunan Segaris. Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII, ISBN 978 602 98412 31 7, 430 - 435.
- [2] Abdullah, Ilmi., Jufrizal., Zulkifli., Sianturi, Rikson M., dan Paulus, Arun. 2014. Perancangan *Thermal Energy Storage* pada Kolektor Surya Berbentuk Tabung Silinder. Prosiding Seminar Nasional PB3I ITM, ISBN 978 602 96473 2 7, 83-89.
- [3] Cabeza, L. 2015. *"Advances in Thermal Energy Storage Systems"*. UK: Woodhead Publishing.
- [4] Akgun, M., Aydin, O. dan Kaygusuz, K. 2007. *Experimental Study on Melting/Solidification Characteristics of A Paraffin as PCM. Energy Conversion and Management*, 48, 669-678.
- [5] Zhong, Y., Li, S., Wei, X., Liu, Z., Guo, Q., Shi, J., dan Liu, L. 2010. *Heat Transfer Enhancement of Paraffin Wax using Compressed Expanded Natural Graphit for Thermal Energy Storage*. Carbon, 48: 300-304.
- [6] Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack, S.A.K. dan Al-Hallaj, S. 2004. *A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Application. Energy Conversion and Management*, pp. 1597-1615.
- [7] Kenisarin, M. dan Mahkamov, K. 2007. *Solar Energy Storage Using Phase Change Materials. Renewable and Sustainable Energy reviews*, pp. 1913-1965.
- [8] Sharma dkk, 2009 Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C., & Buddhi, D. 2009. *Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 318 - 345
- [9] Choi, Stephen U. S., dan Eastman, Jeffrey A., 1995. *Enhancing Thermal Conductivity of Fluids With Nanoparticles. Argonne National Laboratory*.
- [10] Nadjib, Muhammad., Sukamta., Caroko, Novi., dan S. Tito Hadji A. 2015. Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal pada Tangki Pemanas Air Tenaga Surya yang Berisi PCM. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV*.
- [11] Anggara, Fajar. 2017. Simulasi Pelelehan *Paraffin Wax* RT52 pada Tabung Silinder. Universitas Gadjah Mada.