

## BAB IV PEMBAHASAN

### 4.1. Perbandingan Hasil Simulasi dan Ekperimen

Secara umum hasil simulasi memiliki sifat kebenaran yang abstrak. Disebut demikian karena hasil dari simulasi tidak menggambarkan dengan kejadian yang sebenarnya. Maka dari itu diperlukan perbandingan hasil simulasi dengan hasil eksperimen untuk mengetahui apakah hasil simulasi sudah sesuai dengan hasil eksperimen. Besaran yang dijadikan sebagai validasi adalah waktu evolusi temperatur, laju kenaikan temperatur, dan laju penurunan temperatur.

### 4.2. Evolusi Temperatur HTF

Hasil evolusi temperatur HTF yang didapatkan berasal dari 11 titik temperatur yang tersebar dengan posisi pada Gambar 4.1. Kemudian titik temperatur dibagi menjadi empat segmen sesuai dengan posisinya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Evolusi temperatur HTF pada penelitian ini terbagi menjadi dua proses yaitu *charging* dan *discharging* secara bertahap. Penyanjian data tersebut menggunakan kurva dan *contour*.

Tabel 4.1. 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



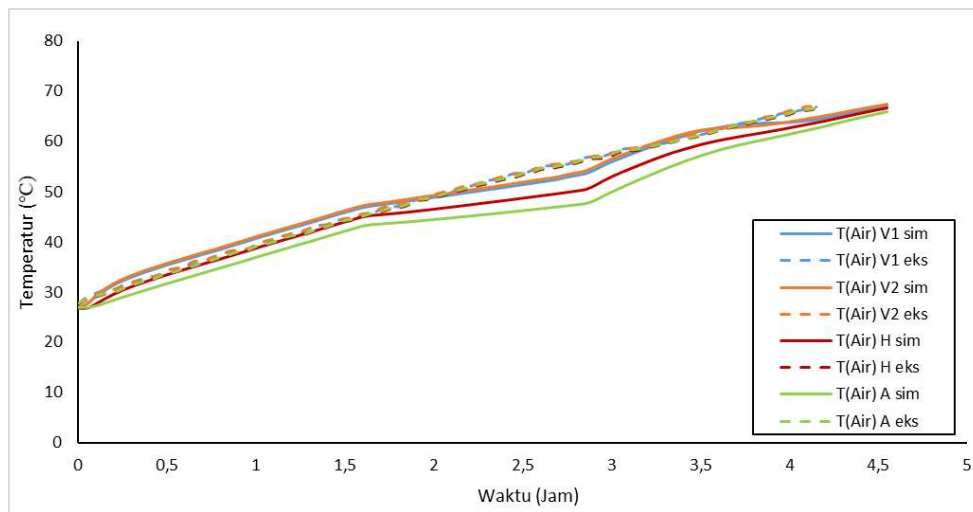
#### 4.2.1. Proses *Charging*

Evolusi temperatur HTF pada proses *charging* memiliki dua variasi fluks kalor yaitu 900 W dan 1100 W dengan debit 0,9 LPM. Kondisi temperatur awal pada kasus ini sebesar 27 °C dan temperatur *inlet*-nya menggunakan data eksperimen yang sesuai dengan variasi fluks kalornya. Pada proses *charging* HTF berperan penting sebagai media penyalur panas untuk penyerapan kalor pada PCM.

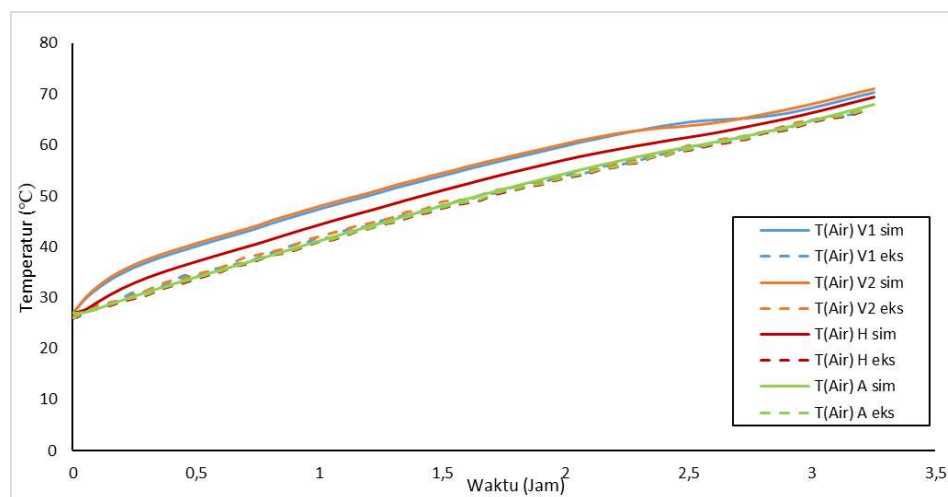
Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan evolusi temperatur HTF pada simulasi dan eksperimen. Temperatur pada arah vertikal yang ditunjukkan oleh T(Air) V1 dan T(Air) V2 mengalami kenaikan temperatur yang lebih cepat. Hal ini disebabkan karenakan posisinya paling dekat dengan *inlet*. Sedangkan kenaikan temperatur 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 4.2. 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 4.2. 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)

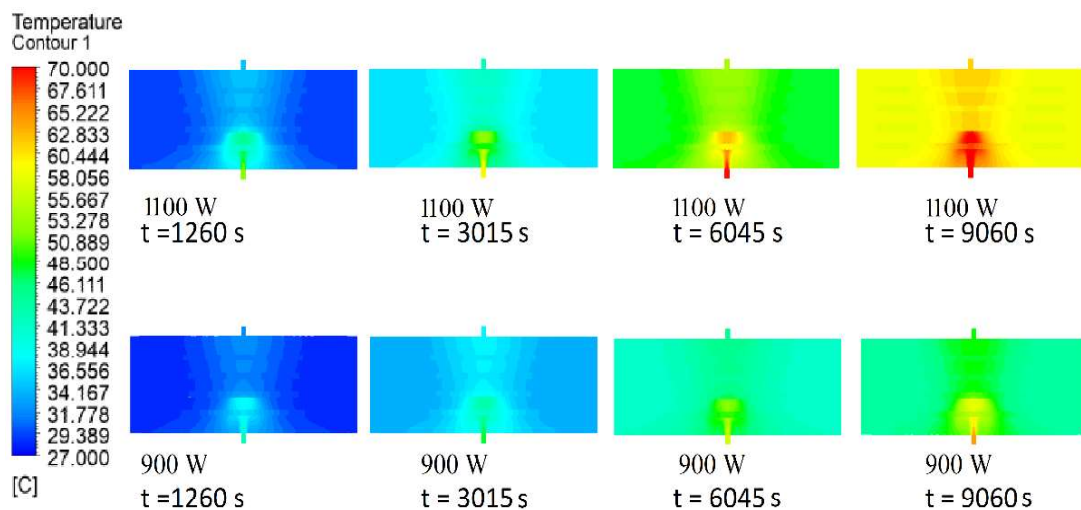
Gambar 4.2. Grafik Evolusi Temperatur HTF pada Proses *Charging* (a) Variasi 900 W (b) Variasi 1100 W

Tabel 4.3. menunjukkan laju kenaikan temperatur air proses *charging* pada pengujian simulasi dan eksperimen variasi 900 W dan 1100 W. Nilai laju kenaikan temperatur pengujian simulasi yang tertinggi terjadi pada T(Air) V2, lalu diikuti oleh T(Air) V1, T(Air) H dan T(Air) A. Sementara nilai deviasi yang terkecil pada variasi 900 W yaitu T(Air) V2, dan pada variasi 1100 W yaitu T(Air) A.

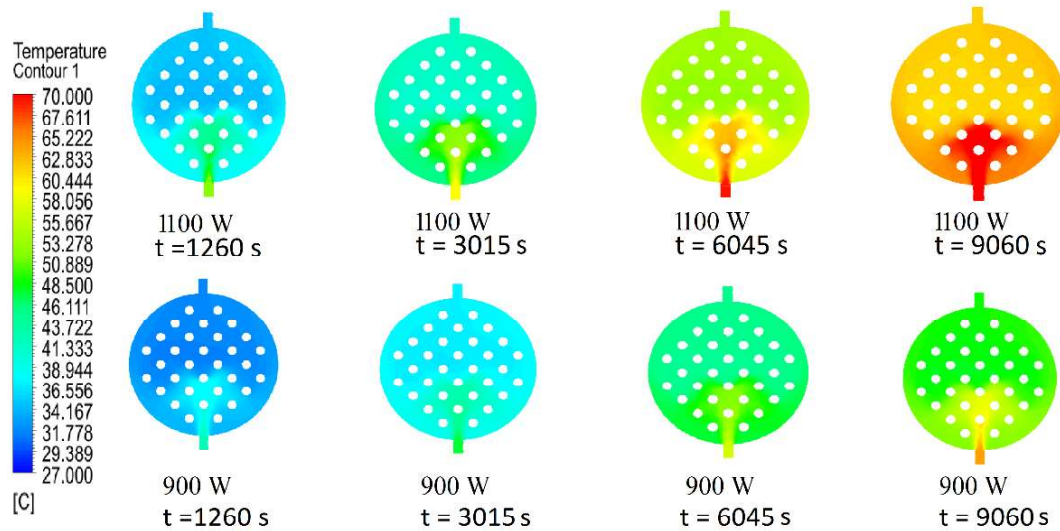
Tabel 4.3. Perbandingan Laju Kenaikan Temperatur Air pada Proses *Charging*

Posisi	Laju Kenaikan Temperatur 900 W (°C/jam)			Laju Kenaikan Temperatur 1100 W (°C/jam)		
	Simulasi	Eksperimen	Deviasi	Simulasi	Eksperimen	Deviasi
T(Air) V1	8,823	9,428	6,41 %	13,344	12,617	5,76 %
T(Air) V2	8,904	9,447	5,74 %	13,568	12,685	6,96%
T(Air) H	8,717	9,363	6,9 %	13,05	12,742	2,41 %
T(Air) A	8,556	9,301	8 %	12,604	12,695	0,71 %

Gambar 4.3 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.



(a)



(b)

Gambar 4.3. *Contour* HTF pada Proses *Charging* Variasi 1100 W dan 900 W

(a) Arah Aksial (b) Arah Radial

#### 4.2.2. Proses *Discharging* Secara Bertahap

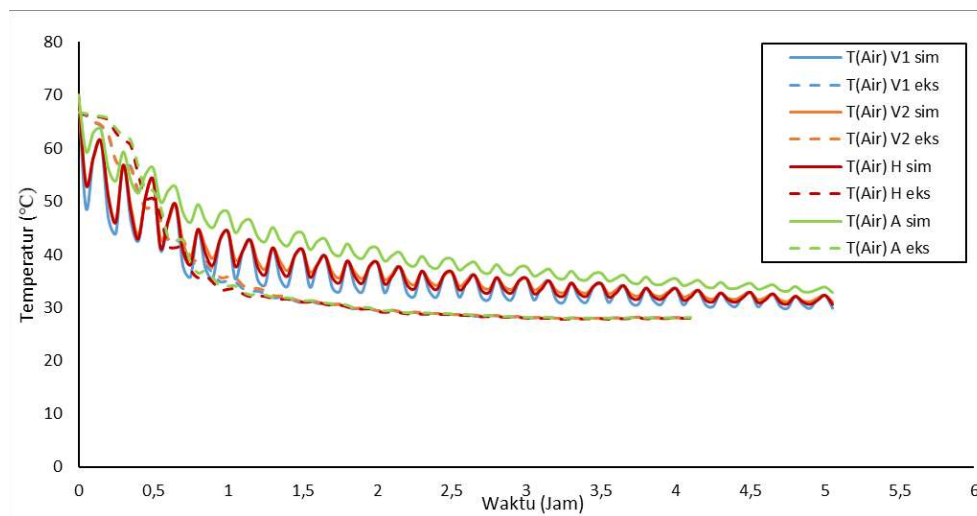
Proses *discharging* merupakan proses pelepasan kalor yang ditandai dengan penurunan temperatur. Evolusi temperatur HTF pada proses *discharging* secara bertahap memiliki dua variasi debit yaitu 1,5 LPM dan 2,5 LPM dengan temperatur inlet 27 °C. Kondisi awal HTF sebesar 70 °C. *Discharging* secara bertahap memiliki jeda waktu 5 menit, yang dimana setiap 5 menit debit air dihidupkan dan 5 menit kemudian dimatikan seterusnya sampai temperatur mencapai 35°C.

Gambar 4.4. 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

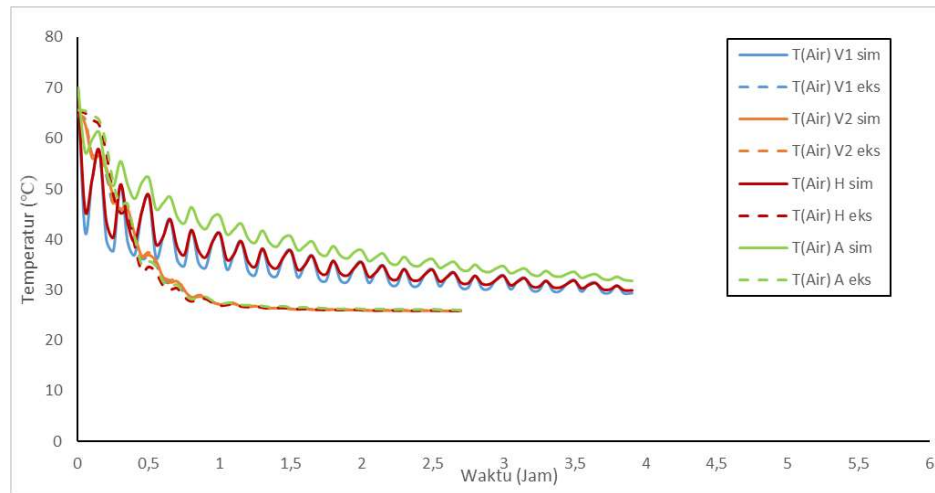
penurunan temperatur lama. Besarnya variasi debit mempengaruhi waktu penurunan temperatur, hal ini dibuktikan pada Grafik (b) yang lebih cepat mengalami penurunan temperatur daripada Grafik (a). Selain itu didapatkan bahwa kurva eksperimen lebih cepat mengalami penurunan temperatur daripada simulasi. Hal ini disebabkan oleh kondisi temperatur *inlet* tidak konstan. Sementara besarnya nilai deviasi yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. 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 4.4. 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 4.4. Grafik Evolusi Temperatur HTF pada Proses *Discharging* secara Bertahap (a) Variasi 1,5 LPM (b) Variasi 2,5 LPM

Tabel 4.5. menunjukkan laju penurunan temperatur air proses *discharging* secara bertahap pada pengujian simulasi dan eksperimen variasi 1,5 LPM dan 2,5 LPM. Nilai laju penurunan temperatur pada simulasi yang tertinggi terjadi pada T(Air) V1, lalu diikuti oleh T(Air) H, T(Air) V2 dan T(Air) A. Sementara nilai deviasi yang terkecil pada variasi 1,5 LPM yaitu T(Air) V1, dan pada variasi 2,5 LPM yaitu T(Air) V1.

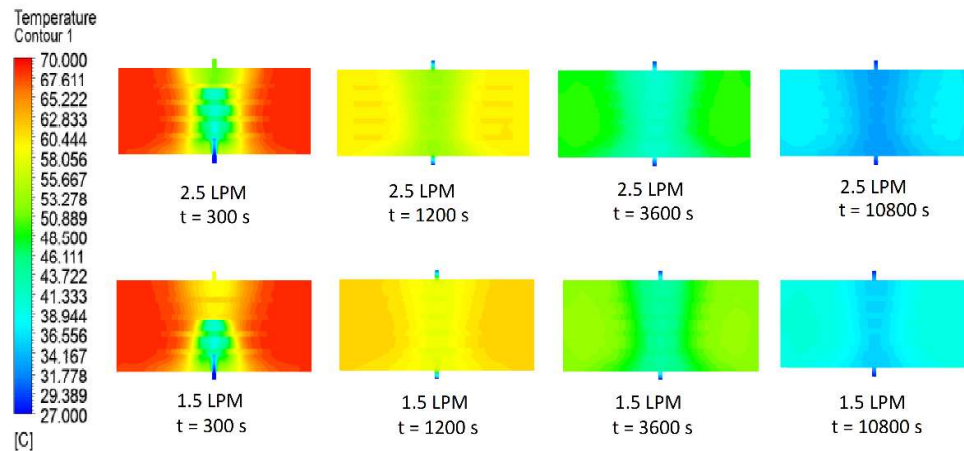
Tabel 4.5. Perbandingan Laju Penurunan Temperatur Air pada Proses *Discharging* secara Bertahap

Posisi	Laju Penurunan Temperatur 1,5 LPM (°C/jam)			Laju Penurunan Temperatur 2,5 LPM (°C/jam)		
	Simulasi	Eksperimen	Deviasi	Simulasi	Eksperimen	Deviasi
T(Air) V1	7,943	9,328	14,85 %	10,392	14,2	26,81 %
T(Air) V2	7,69	9,381	18,02 %	9,993	14,408	30,64 %
T(Air) H	7,8	9,406	17,07 %	10,228	14,51	29,51 %
T(Air) A	7,355	9,416	21,88 %	9,772	14,603	33,08 %

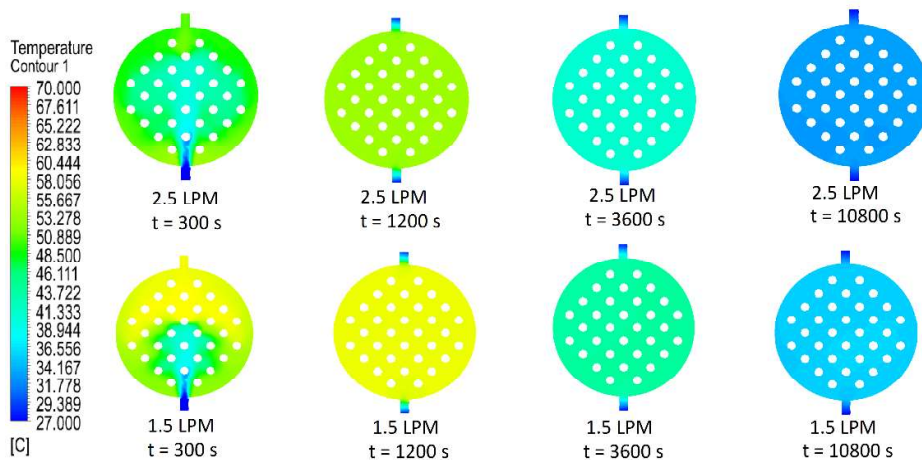
Penurunan suhu pada variasi 2,5 LPM lebih cepat daripada 1,5 LPM juga dibuktikan pada Gambar 4.5. Pada detik ke 10800 *contour* variasi 2,5 LPM didominasi warna biru tua, sedangkan pada detik yang sama *contour* 1,5 LPM



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)



(b)

Gambar 4.5. *Contour* HTF pada Proses *Discharging* secara Bertahap variasi 2,5 LPM dan 1,5 LPM (a) Arah Aksial (b) Arah Radial

### 4.3. Evolusi Temperatur Campuran PCM

Hasil evolusi temperatur PCM yang didapatkan berasal dari 10 titik temperatur yang tersebar dengan posisi pada Gambar 4.1. Kemudian titik

temperatur dibagi menjadi empat segmen sesuai dengan posisinya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.6. Evolusi temperatur PCM penelitian ini terbagi menjadi dua proses yaitu *charging* dan *discharging* secara bertahap. Penyajian data tersebut menggunakan kurva dan *contour*.

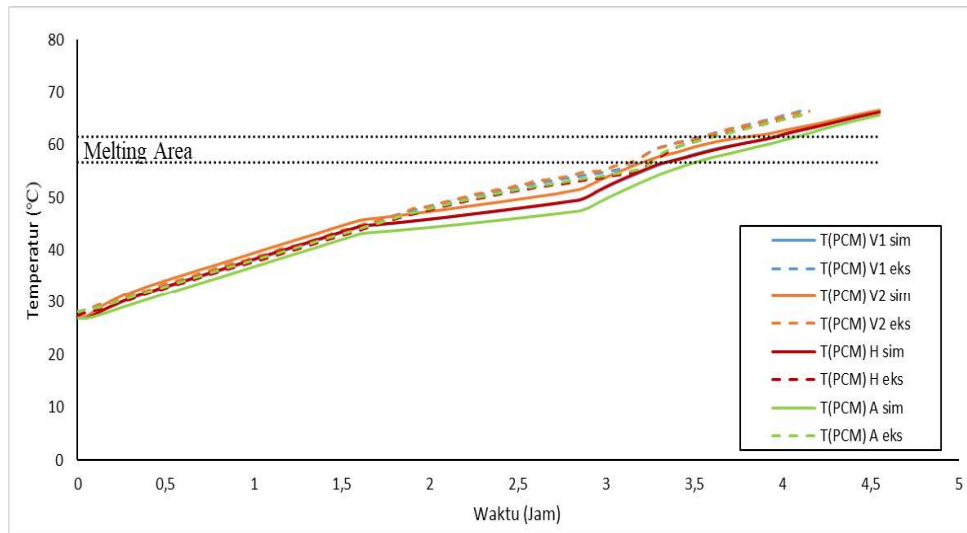
Tabel 4.6. Pembagian kelompok pada Termokopel di PCM

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

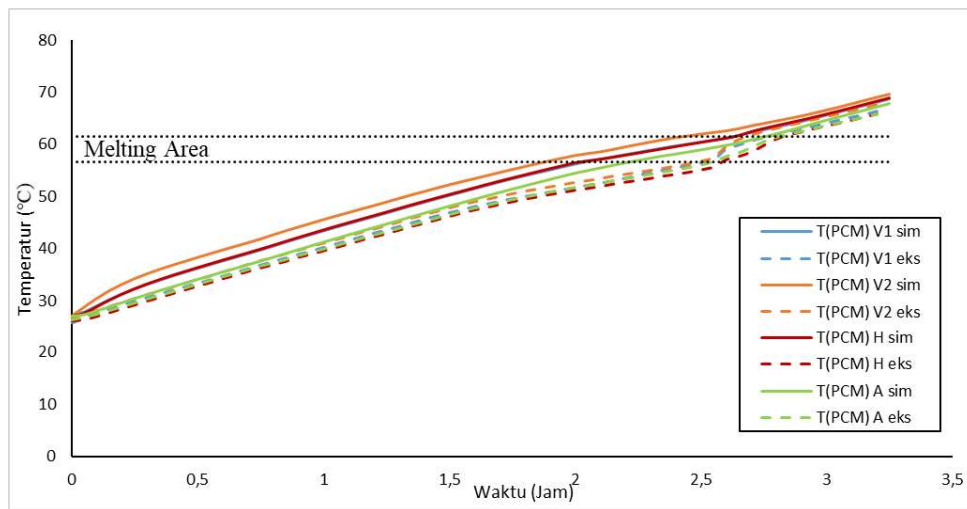
#### 4.3.1. Proses *Charging*

Evolusi temperatur PCM pada proses *charging* berguna untuk mengetahui kecepatan penyerapan PCM dari HTF. Hasil dari evolusi temperatur PCM disajikan dengan kurva dan *contour*.

Gambar 4.5. 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 4.5. Grafik Evolusi Temperatur Campuran PCM pada Proses Charging (a) 900 W (b) 1100 W

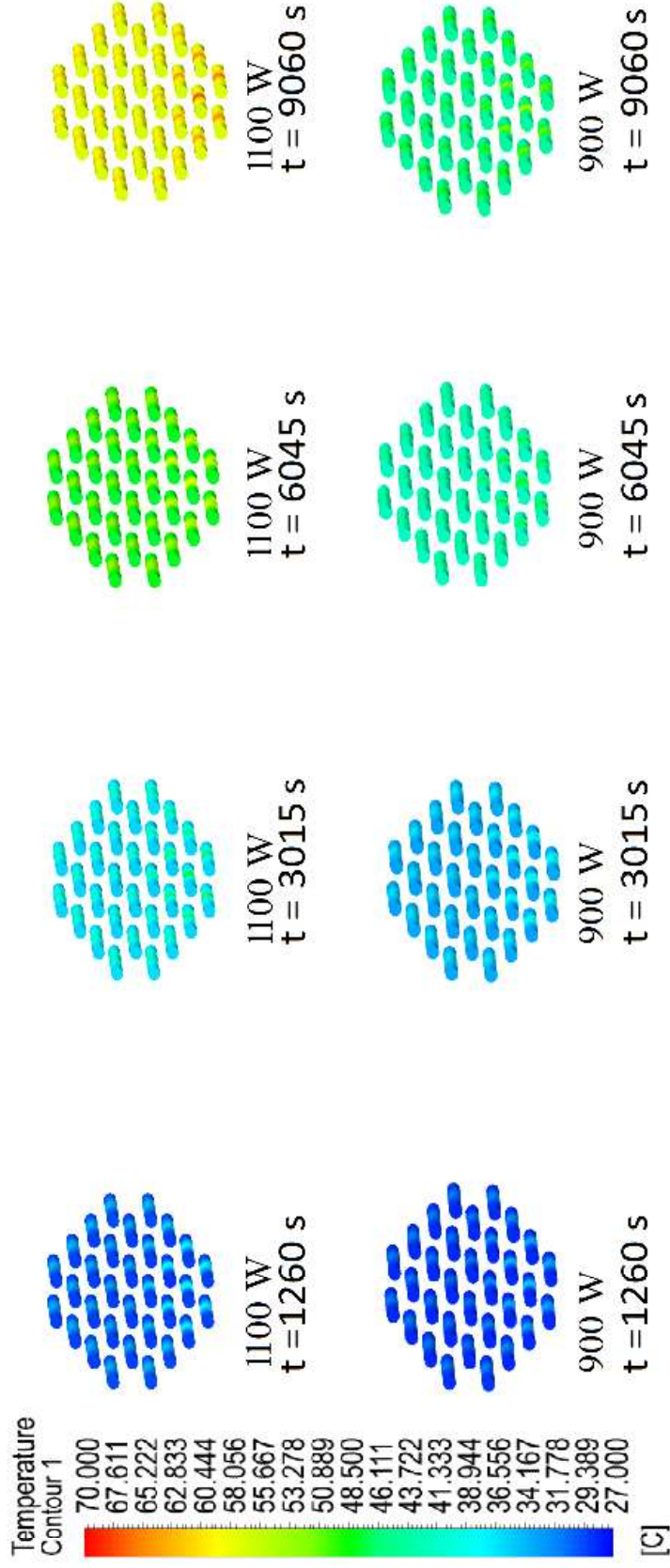
Tabel 4.7. menunjukkan laju kenaikan temperatur campuran PCM proses *charging* pada pengujian simulasi dan eksperimen variasi 900 W dan 1100 W. Nilai laju kenaikan temperatur pengujian simulasi yang tertinggi terjadi pada T(PCM) V2, lalu diikuti oleh T(PCM) H, T(PCM) V1 dan T(PCM) A. Sementara nilai deviasi yang terkecil pada variasi 900 W yaitu T(PCM) A, dan pada variasi 1100 W yaitu T(PCM) V1.

Tabel 4.7. Perbandingan Laju Kenaikan Temperatur Campuran PCM pada Proses *Charging*

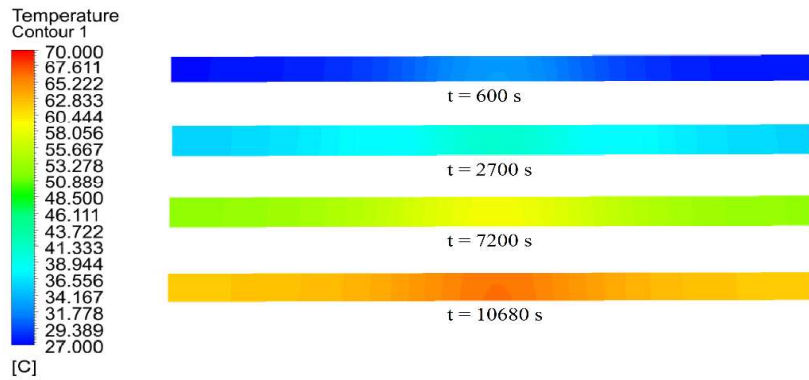
Posisi	Laju Kenaikan Temperatur 900 W (°C/jam)			Laju Kenaikan Temperatur 1100 W (°C/jam)		
	Simulasi	Eksperimen	Deviasi	Simulasi	Eksperimen	Deviasi
T(PCM) V1	8,631	9,441	8,58 %	12,814	12,757	0,44 %
T(PCM) V2	8,734	9,38	6,88 %	13,1	12,766	2,61 %
T(PCM) H	8,652	9,25	6,46 %	12,873	12,389	3,9 %
T(PCM) A	8,532	9,065	5,88 %	12,539	12,353	1,5 %

Pada Gambar 4.6, 4.7, dan 4.8 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.

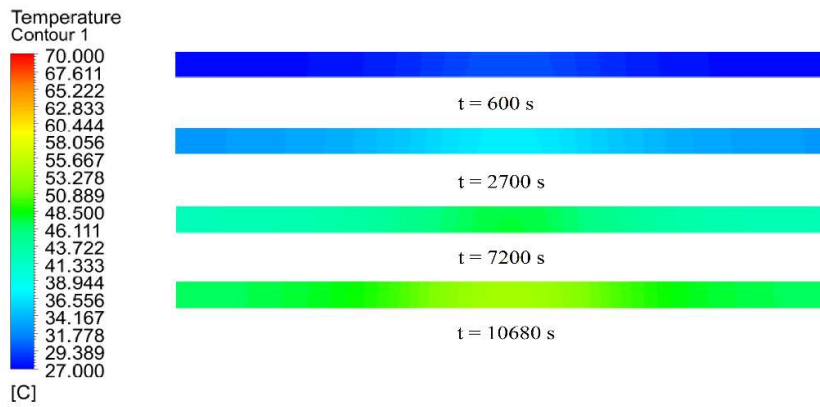
Pada Gambar 4.7 terlihat bahwa evolusi temperatur campuran PCM dimulai dari tengah lalu menyebar ke bagian sampingnya. Hal tersebut terjadi karena terkena aliran *inlet* yang menyebabkan bagian tengahnya mengalami panas terlebih dahulu.



Gambar 4.6. *Contour* Evolusi Temperatur Campuran PCM pada Proses *Charging*

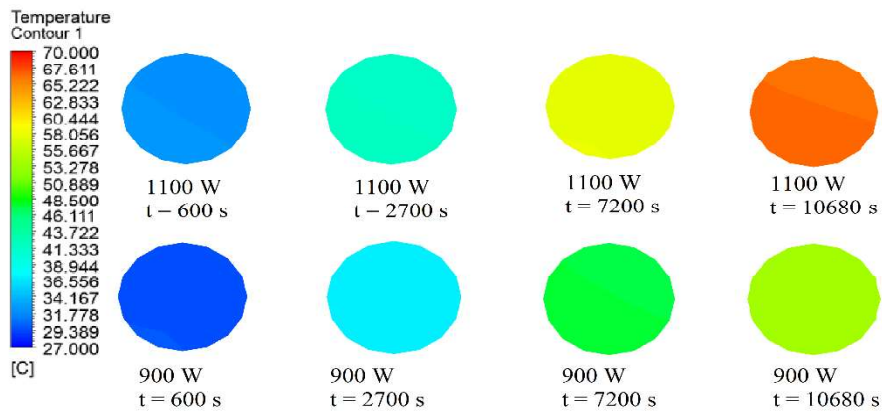


(a)



(b)

Gambar 4.7. *Contour* Evolusi Temperatur Campuran PCM No. 27 Arah Aksial pada Proses *Charging* (a) 1100 W (b) 900 W

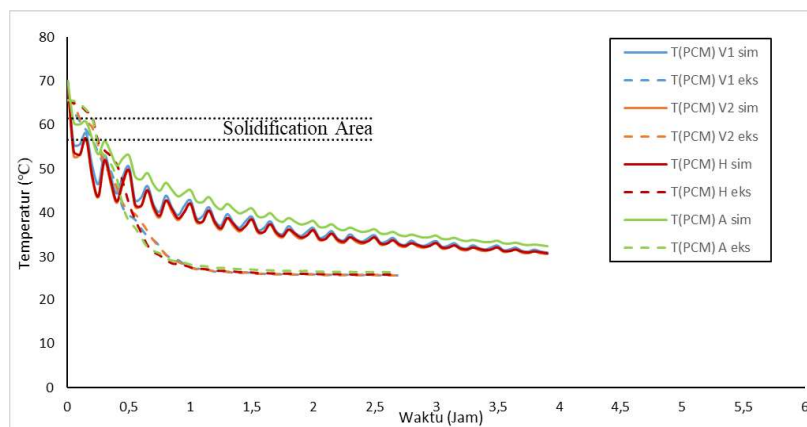


Gambar 4.8. *Contour* Evolusi Temperatur Campuran PCM No. 27 Arah Radial No. 27 pada Proses *Charging*

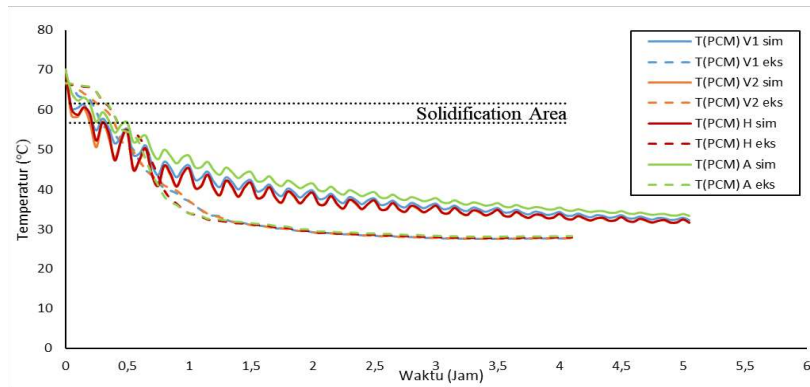
#### 4.3.2. Proses *Discharging* Secara Bertahap

Proses *discharging* diawali dengan transfer kalor secara *sensible* pada *liquid*, dimana kalor pada campuran PCM ditransfer keluar melalui dinding pipa secara konduksi sehingga mengakibatkan temperatur PCM turun dengan cepat sampai pada titik tertentu. Penurunan cepat *sensible liquid* terjadi di semua variasi akibat adanya pengaruh gradien temperatur yang cukup besar antara HTF dan PCM sehingga transfer kalor dari PCM ke HTF tinggi. Proses *sensible liquid* akan terus berlangsung sampai temperatur PCM mendekati daerah *Solidification*. Evolusi temperatur PCM pada proses *discharging* berguna untuk mengetahui kecepatan pelepasan kalor PCM ke HTF. Hasil dari evolusi temperatur PCM disajikan dengan kurva dan *contour*.

Gambar 4.9. 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 4.9. Grafik Evolusi Temperatur Campuran PCM pada Proses *Discharging* secara bertahap (a) 2,5 LPM (b) 1,5 LPM

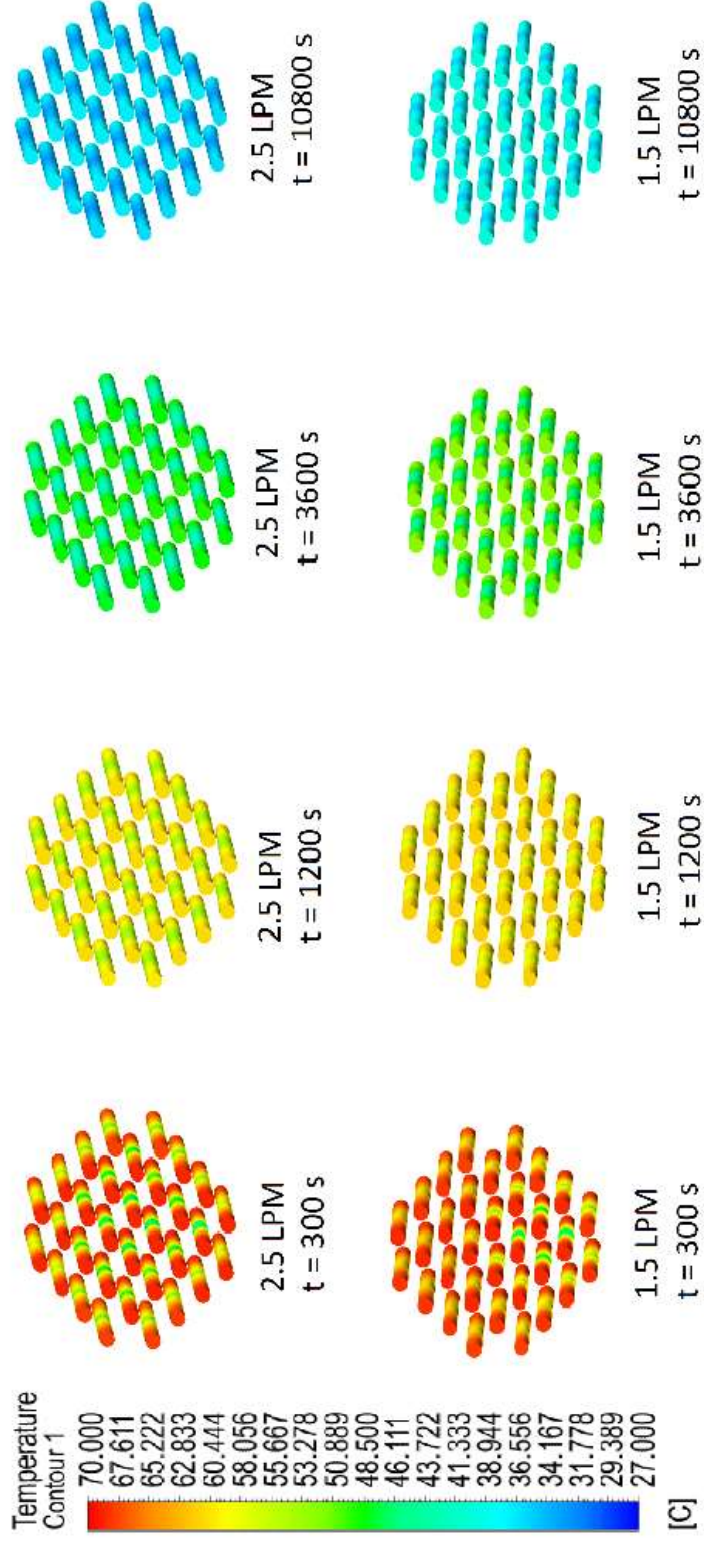
Tabel 4.8. menunjukkan laju penurunan temperatur campuran PCM proses *discharging* secara bertahap pada pengujian simulasi dan eksperimen variasi 1,5 LPM dan 2,5 LPM. Nilai laju kenaikan temperatur pengujian simulasi yang tertinggi terjadi pada T(PCM) V2, lalu diikuti oleh T(PCM) H, T(PCM) V1 dan T(PCM) A. Sementara nilai deviasi yang terkecil pada variasi 1,5 LPM yaitu T(PCM) H, dan pada variasi 2,5 LPM yaitu T(PCM) H.

Tabel 4.8. Perbandingan Laju Penurunan Temperatur Campuran PCM pada Proses *Discharging* secara Bertahap

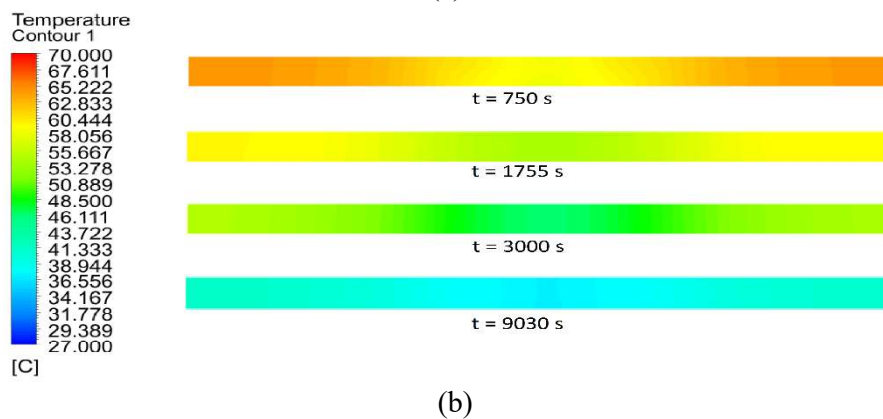
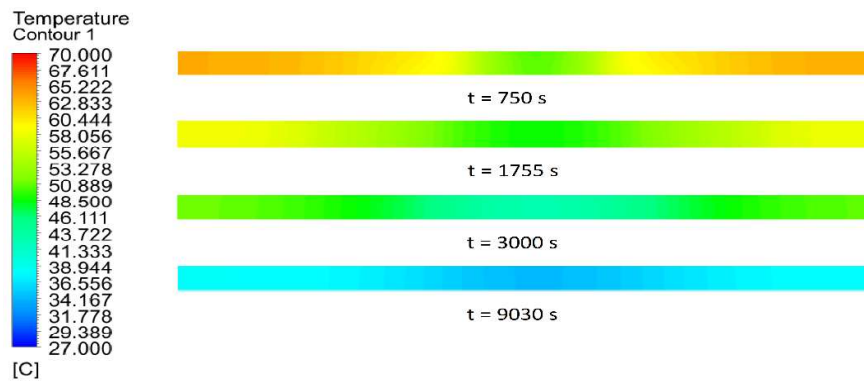
Posisi	Laju Penurunan Temperatur 1,5 LPM (°C/jam)			Laju Penurunan Temperatur 2,5 LPM (°C/jam)		
	Simulasi	Eksperimen	Deviasi	Simulasi	Eksperimen	Deviasi
T(PCM) V1	7,457	9,525	21,71 %	9,981	14,73	32, 24 %
T(PCM) V2	7,589	9,434	19,55 %	10,073	14,687	31,41 %
T(PCM) H	7,573	9,387	19,32 %	10,04	14,58	31,13 %
T(PCM) A	7,244	9,296	22,07 %	9,626	14,498	33,6 %

Pada Gambar 4.10, 4.11 dan 4.12 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.

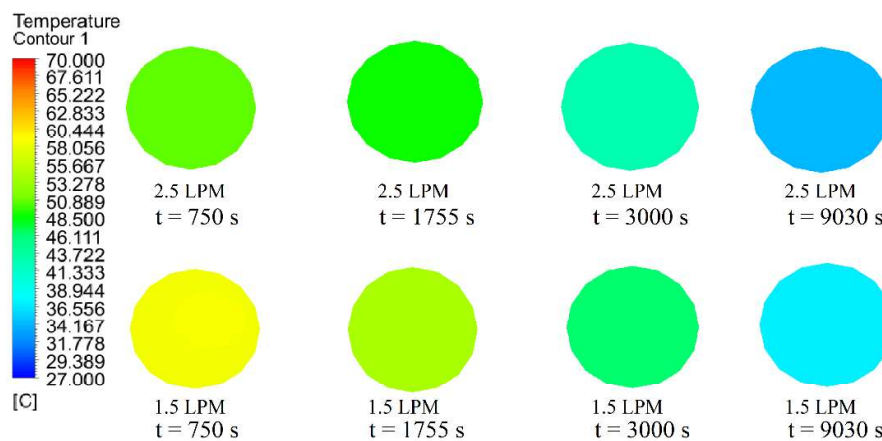




Gambar 4.10. *Contour* Evolusi Temperatur Campuran PCM pada Proses *Discharging* secara bertahap



Gambar 4.11. *Contour* Evolusi Temperatur Campuran PCM No. 27 Arah Aksial pada Proses *Discharging* secara Bertahap (a) 2,5 LPM (b) 1,5 LPM

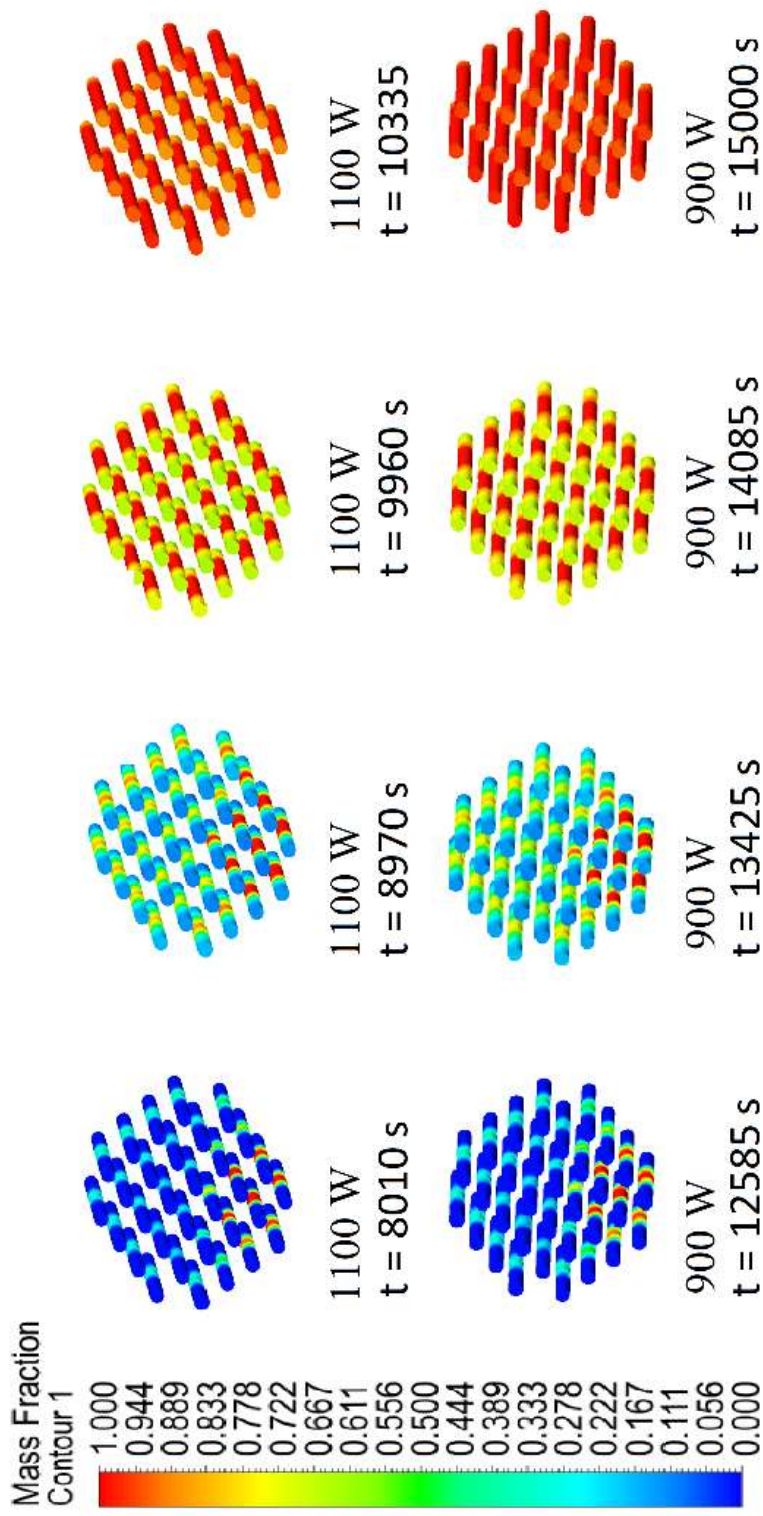


Gambar 4.12. *Contour* Evolusi Temperatur Campuran PCM No. 27 Arah Radial pada Proses *Discharging* secara Bertahap

#### 4.4. Pelelehan dan Pembekuan Campuran PCM

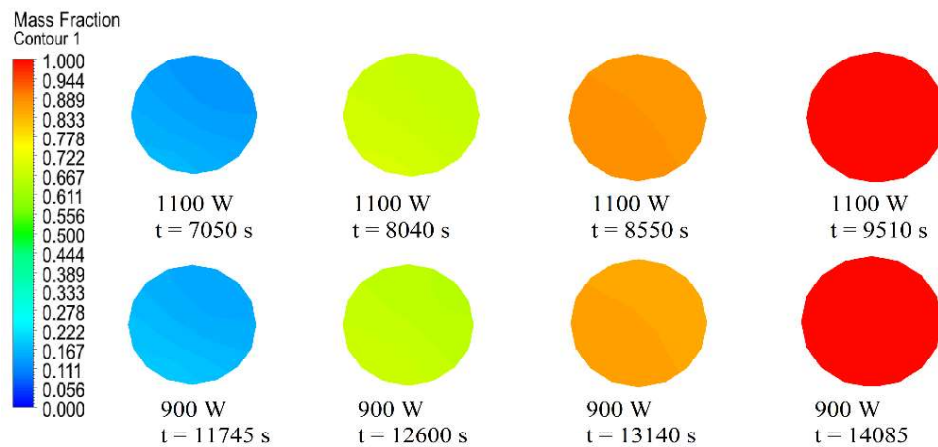
Hasil pelelehan dan pembekuan pada Campuran PCM dengan serbuk tembaga disajikan dalam bentuk *contour*. *Contour* yang diambil meliputi *contour* keseluruhan campuran PCM, *contour* campuran PCM no.27 arah radial, dan *contour* campuran PCM no. 27 arah aksial.

Pada Gambar 4.13 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.

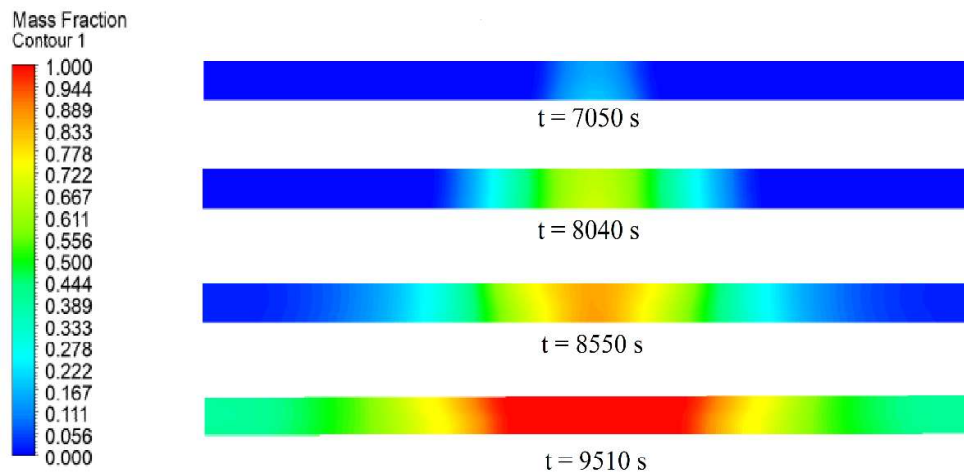


Gambar 4.13. Contour Liquid Fraction pada proses Charging

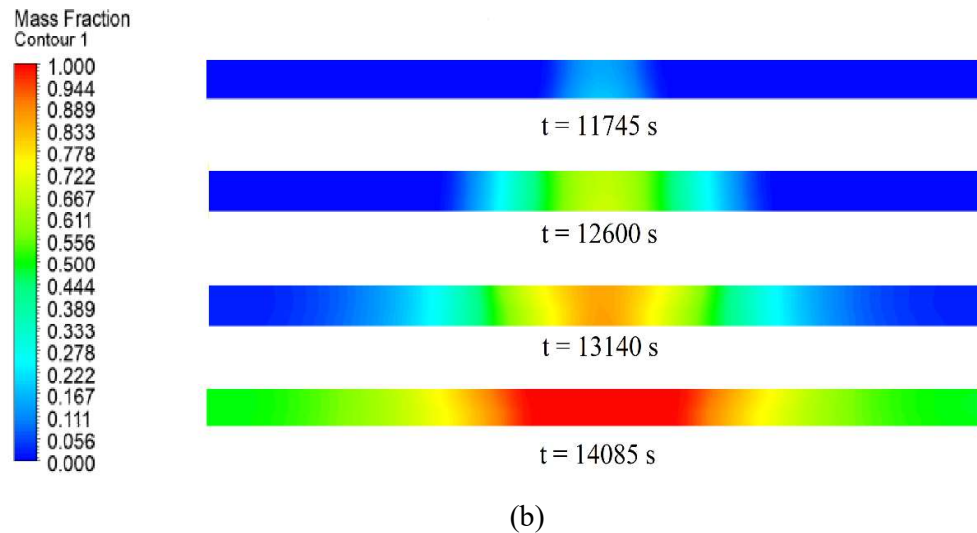
Gambar 4.14 dan 4.15 menunjukkan *contour liquid fraction* pada campuran PCM no. 27 di arah radial dan arah aksial. Saat campuran PCM berada di fase solid terjadi perpindahan panas konduksi, namun setelah campuran PCM mulai mencair terjadi perpindahan panas konveksi. Hal ini yang mengakibatkan pelelehan campuran PCM tidak simetri.



Gambar 4.14. *Contour Liquid Fraction* Campuran PCM No. 27 Arah Radial pada Proses *Charging*

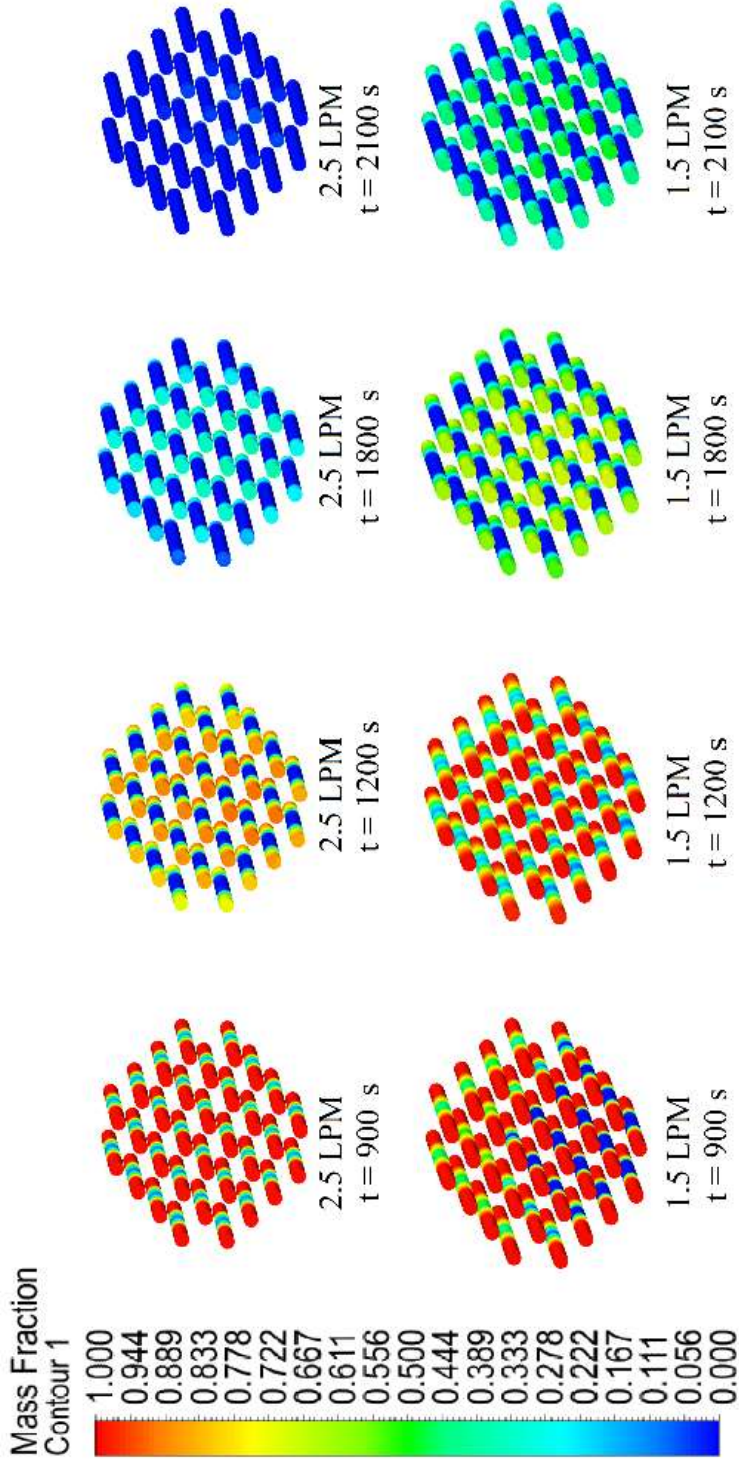


(a)



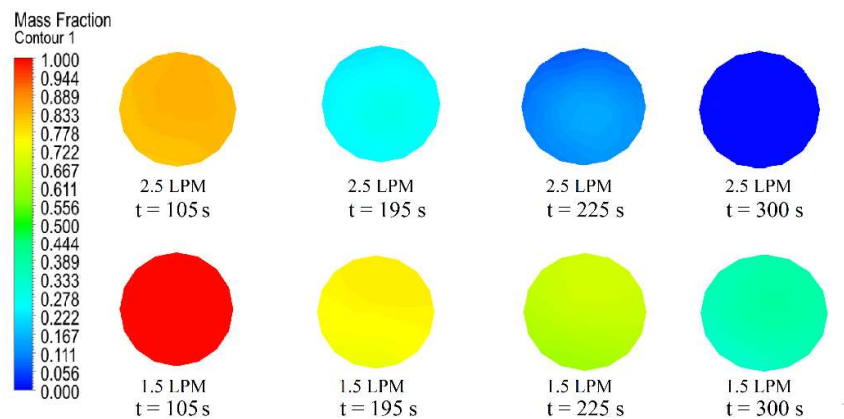
Gambar 4.15. Contour Liquid Fraction Campuran PCM No. 27 Arah Aksial pada Proses *Charging* (a) 1100 W (b) 900 W

Pada Gambar 4.16 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.

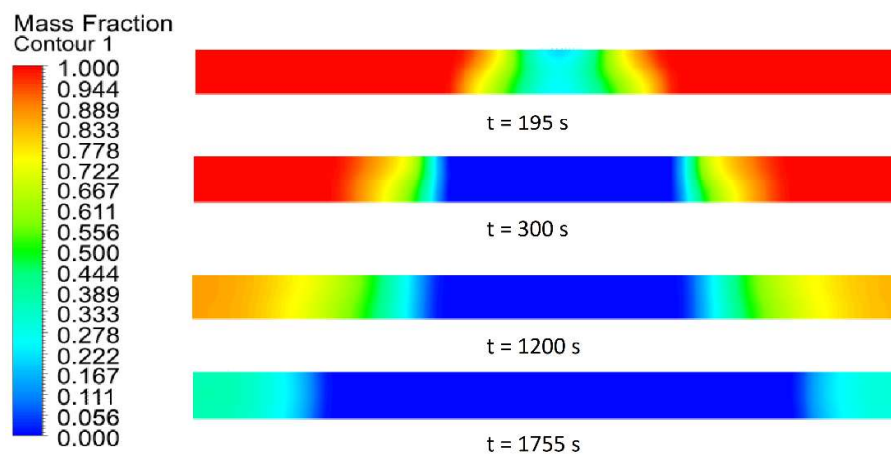


Gambar 4.16. Contour Liquid Fraction pada Proses Discharging secara Bertahap

Gambar 4.17 dan 4.18 menunjukkan *contour liquid fraction* pada campuran PCM no. 27 di arah radial dan arah aksial. Proses pembekuan lebih cepat dibandingkan proses pelelehan disebabkan oleh kondisi temperatur awal yang dekat dengan titik bekunya. Pada detik ke-105 variasi debit 2,5 LPM nilai *liquid fraction* pada arah radialnya sebesar 0,833 sedangkan pada variasi debit 1,5 LPM dengan waktu yang sama nilai *liquid fraction*-nya 0,944. Bagian yang mengalami pembekuan terlebih dahulu berada di bagian bawah. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan densitas yang mengakibatkan *driving force*.

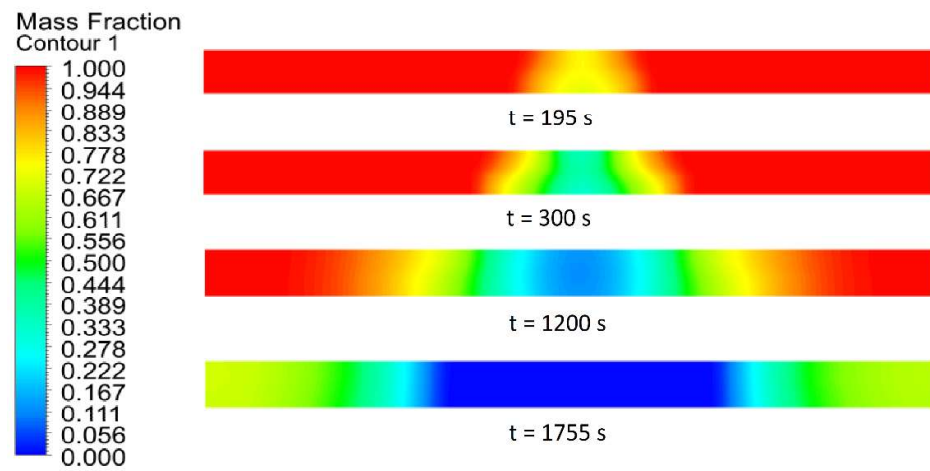


Gambar 4.17. *Contour Liquid Fraction* Campuran PCM No, 27 Arah Radial pada Proses *Discharging* secara Bertahap



(a)





(b)

Gambar 4.18. *Contour Liquid Fraction* Campuran PCM No, 27 Arah Aksial pada Proses *Discharging* secara Bertahap (a) 2,5 LPM (b) 1,5 LPM