## BAB IV

## HASIL DAN PEMBAHASAN

## 4.1 Temperatur Inlet dan Outlet

Untuk mengamati perpindahan kalor yang terjadi dari PCM ke HTF perlu dilakukan perbandingan temperatur *inlet* dan *outlet*. Hasil simulasi yang didapatkan dari 20 titik temperatur yang tersebar dengan posisi Gambar 3.1 menggunakan ANSYS Fluent 18.0 dengan laju aliran massa konstan 2 LPM serta variasi temperatur awal sebesar 55°C, 60°C dan 65°C pada proses *discharging*. kurva temperatur bagian *inlet* dan *outlet* disajikan dalam evolusi temperatur *inlet* dan *outlet* Gambar 4.1.

Kurva evolusi temperatur *inlet* dan *outlet* dari ketiga variasi memiliki pola aliran yang sama dan menunjukkan bahwa perubahan temperatur pada *inlet* dan *outlet* seketika konstan, dimana titik T1 dari setiap variasi temperatur kondisi awal langsung turun tajam karena T1 langsung berhadapan dengan aliran masuk sehingga temperatur pada bagian *inlet* konstan mengikuti temperatur aliran masuk sebesar 25°C. Sedangkan untuk mengamati seberapa besar perpindahan kalor yang terjadi dapat dilihat pada temperatur T2, selisih temperatur dari T1 dan T2 saat konstan merupakan seberapa besar perpindahan kalor yang terjadi dari PCM ke HTF. Terlihat pada menit ke-8 untuk temperatur kondisi awal PCM 55°C titik T2 mulai konstan sekitar 26,5°C. Jadi selisih temperatur atau perpindahan kalor yang terjadi dari PCM ke HTF sekitar 1,5°C. Selisih temperaturnya sangat kecil antara T1 dan T2 karena mengikuti nilai konduktivitas termal dari PCM yang sangat kecil.

Pengaruh variasi temperatur kondisi awal ditunjukkan pada waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik temperatur tertentu. Semakin tinggi variasi temperatur awal PCM maka semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik temperatur tertentu. Terlihat pada Gambar 4.2. untuk temperatur kondisi awal 55°C titik T2 mulai konstan sekitar 26,5°C membutuhkan waktu 8 menit, lalu untuk temperatur kondisi awal PCM 60°C pada T2 mulai konstan sekitar 26,5°C membutuhkan waktu 11 menit, sedangkan untuk temperatur kondisi awal PCM 65°C pada T2 untuk mencapai temperatur 26,5°C butuh waktu sekitar 13,5 menit.



Gambar 4.1. Evolusi Temperatur *inlet* dan *outlet* di dalam Selongsong pada Temperatur Awal PCM a) 55°C, b) 60°C dan c) 65°C.



Gambar 4.2. Pengaruh Variasi Temperatur Kondisi awal pada T2 untuk mencapai Temperatur 26,5°C

# 4.2 Evolusi Temperatur HTF

Hasil simulasi evolusi temperatur HTF yang didapatkan dari 20 titik temperatur yang tersebar dengan posisi seperti Gambar 3.1 pada proses *discharging* menggunakan temperatur HTF inlet sebesar 25°C dengan laju aliran massa 2 LPM secara kontinyu serta variasi temperatur awal PCM di dalam TES sebesar 55°C, 60°C dan 65°C disajikan dalam kurva evolusi temperatur HTF Gambar 4.3. Dari ketiga variasi temperatur awal PCM memiliki pola aliran yang sama, saat awal proses pembekuan menunjukkan terjadinya penurunan temperatur HTF tajam baik dari ketiga variasi temperatur. Hal ini disebabkan karena HTF berupa air biasa dimana air merupakan *Sensible Heat Storage* (SHS) dan memiliki karakteristik perpindahan kalor yang baik (Hasan, 1994) sehingga perpindahan kalor yang terjadi pada HTF sangat cepat.

Besarnya penurunan temperatur HTF yang terjadi pada setiap variasi sedikit berbeda. Di titik T18 untuk mencapai temperatur 26,5°C dengan temperatur kondisi awal 55°C terjadi pada menit ke-5 sedangkan untuk temperatur kondisi awal 60°C membutuhkan waktu 6 menit lalu pada temperatur 65°C terjadi pada menit ke-8. Hal ini disebabkan karena pada HTF terjadi perpindahan kalor secara SHS sahingga semakin tinggi nilai temperatur kondisi awal dengan nilai laju aliran massa yang sama maka untuk mencapai titik temperatur tertentu membutuhkan waktu yang lebih lama.



Gambar 4.3. Evolusi Temperatur HTF di dalam Selongsong pada Temperatur Awal PCM a) 55°C, b) 60°C, c) 65°C.

Seiring bertambahnya waktu, temperatur pada HTF semakin mendekati temperatur *inlet* akan tetapi tidak sama persis karena adanya tranfer kalor dari PCM sehingga temperatur HTF konstan diatas nilai temperatur *inlet* sampai kalor yang tersimpan di dalam PCM terbuang habis. Fenomena ini disebabkan karena adanya Hukum Termodinamika ke-nol, yaitu kesetimbangan termal dimana terjadi perbedaan temperatur antara dua zat yang berbeda maka akan mengakibatkan terjadinya transfer kalor dari temperatur tinggi yaitu PCM ke temperatur HTF yang lebih rendah.

Kurva evolusi temperatur HTF Gambar 4.3. juga mengindikasikan bahwa titik T18 dari ketiga variasi temperatur kondisi awal PCM mengalami penurunan temperatur lebih cepat daripada titik T19 dan T20. Kasus ini terjadi begitu HTF memasuki TES massa jenis fluida akan mempengaruhi arah dari aliran fluidanya. HTF memiliki temperatur yang lebih rendah daripada temperatur kondisi awal sehingga dengan pengaruh gaya gravitasi HTF akan tertarik kebawah terlihat pada Gambar 4.4. arah aliranya kebawah dan akan menyerap kalor pada titik T18 terlebih dahulu. Dengan demikian pada arah aksial titik yang lebih dekat dengan pipa *inlet* dan berada pada bagian bawah TES akan mengalami penurunan temperatur yang lebih cepat.



Gambar 4.4. Kontur Temperatur Aliran HTF pada menit ke-1 Temperatur awal PCM 60°C

Gambar 4.4. bagian *inlet* warna biru menunjukkan temperatur rendah yaitu sebesar 25°C sedangkan warna merah mengindikasikan bahwa temperatur masih dalam kondisi awal yaitu sebesar 60°C. Bagian *outlet* terjadi fenomena yang diluar perkiraan dimana seharusnya temperatur *outlet* masih dalam kondisi temperatur awal akan tetapi muncul warna biru yang mengindikasikan bahwa temperatur di daerah tersebut rendah. Hal ini terjadi karena pengaruh aliran balik atau *backflow* yang terindikasi secara otomatis pada *boundary condition* serta pengaruh laju aliran massa terlalu kecil sehingga pada bagian *outlet* fluida dari HTF tidak dapat memenuhi seluruh bagian selongsong. Fenomena ini tidak dapat dihilangkan pada kasus penelitian kali ini akan tetapi dapat diminimalisir dengan menurunkan *backflow* sampai habis sehingga pengaruh dari aliran tersebut tidak banyak, serta pada titik T2 juga diposisikan tidak berada dalam *backflow* supaya tidak berpengaruh terhadap hasil evolusi temperatur T2 atau bagian *outlet*.

#### 4.3 Evolusi Temperatur PCM Arah Aksial

Distribusi temperatur PCM arah aksial pada proses *discharging* dengan laju aliran masa konstan 2 LPM dan temperatur inlet sebesar 25°C serta temperatur awal PCM variasi yakni 55°C, 60°C dan 65°C disajikan dalam Gambar 4.5. Mengacu pada pengertian dari Regin dkk, (2009) serta Gambar 2.2. proses *discharging* diawali dengan transfer kalor secara *Sensible* pada *liquid*, dimana kalor pada PCM ditransfer keluar melalui dinding pipa secara konduksi sehingga mengakibatkan temperatur PCM turun dengan cepat sampai pada titik tertentu. Walaupun PCM memiliki konduktivitas termal yang rendah, 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* (Tabel 3.1) yaitu saat mamasuki proses kedua dari *discharging* menurut Regin dkk, (2009) yakni *Laten* atau perubahan fase *solid-liquid*.



Gambar 4.5. Evolusi Temperatur PCM Arah Aksial pada Temperatur Awal PCM a) 55°C, b) 60°C, c) 65°C.

Seiring berjalannya waktu, proses yang kedua yaitu *Laten*, begitu energi kalor yang tersimpan di dalam PCM mulai terbuang maka akan terbentuk padatanpadatan tipis di daerah dinding pipa bagian dalam, karena adanya faktor gravitasi maka padatan akan mengumpul pada bagian bawah tabung PCM. Fenomena padatan terjadi karena *paraffin* mengalami proses perubahan fase saat memasuki daerah *solidification area*, yaitu proses dimana PCM mengalami pembekuan. Perubahan fase ditandai dengan pembentukan padatan pada dinding karena transfer kalor yang dibuang melalui dinding cukup besar mengakibatkan fraksi cairan (*liquid fraction*) pada PCM akan menurun sehingga pada proses *laten* ini, PCM akan mengalami perubahan fase lebih dominan terjadi perpindahan kalor konveksi alami, hal ini yang mengakibatkan sirkulasi temperatur pada PCM.

Proses *discharging* atau pembekuan dari PCM akan terus mengalami penurunan temperatur walaupun kecil. Hal ini ditengarai dengan distribusi kalor dari PCM ke HTF yang rendah, karena bahan *Parrafin wax RT52* memiliki konduktivitas termal sangat kecil (Tabel 3.1) sehingga proses transfer kalor yang terjadi di dalam PCM berjalan lambat, oleh sebab itu butuh waktu yang cukup lama untuk mendistribusikan kalor keluar dari PCM. Temperatur kondisi awal PCM 55°C pembekuan pada arah aksila yakni titik sumbu tabung T3, T4 dan T5 dimulai pada waktu yang hampir bersamaan yaitu pada menit ke-11,5. Begitu pula untuk temperatur kondisi awal PCM 60°C pembekuan yang terjadi pada titik sumbu tabung dimulai pada menit yang hampir sama yaitu menit ke-13,5, sedangkan pada temperatur kondisi awal PCM 65°C pembekuan dimulai pada menit ke-15,5. Fenomena terjadinya pembekuan pada T3, T4 dan T5 dimulai pada waktu bersamaan ini menjelaskan bahwa proses awal yang dikemukakan oleh Regin dkk, (2009) yaitu proses pembekuan *sensible* fase *liquid* terjadi secara merata pada seluruh bagian tabung PCM.

Akan tetapi menurut kurva Gambar 4.4. titik temperatur yang berada pada posisi PCM menunjukkan perbedaan di akhir dari pembekuan. Pembekuan akan lebih cepat terjadi di daerah yang dekat dengan saluran *inlet* dan dekat dengan dinding kapsul. Seperti ditunjukan pada titik T3 dan T5 dengan kondisi temperatur awal PCM 55°C penurunan temperatur yang terjadi relatif lebih cepat daripada titik T4 dimana proses *discharging* secara sempurna terjadi di titik T3 dan T5 berurutan berakhir pada menit yang hampir mendekati yaitu menit ke-241 dan menit ke-242, sedangkan T4 pembekuan berakhir pada menit ke-247,5. Hal ini membuktikan bahwa titik T5 yang merupakan titik paling jauh dari pipa *inlet* terjadi penurunan temperatur lebih cepat daripada titik T4 karena pada titik T5 lebih dekat dengan dinding pipa dalam, dimana temperatur HTF pada *inlet* akan merata pada seluruh bagian dinding pipa. Oleh sebab itu, kalor yang terserap di titik T5 lebih cepat daripada titik T4 seperti ditunjukkan dalam kontur evolusi *liquid fraction* Gambar 4.6.

Untuk temperatur kondisi awal PCM 60°C dan 65°C juga terjadi fenomena yang sama, akan tetapi perbedaanya hanya pada waktu *solidification* sempurna saja. Kondisi temperatur awal PCM 60°C pada T3 dan T5 berurutan berakhir pada menit ke-248 dan menit ke-249,5, sedangkan T4 pembekuan berakhir pada menit ke-254 lalu pada kondisi temperatur awal PCM 65°C pembekuan pada T3 dan T5 berurutan berakhir pada menit ke-253,5 dan menit ke-255, sedangkan T4 berakhir pada menit ke-260.

Proses yang dikemukakan oleh Regin dkk, (2009) selanjutnya adalah *Sensible* pada *solid*. Setelah melewati area *Solidification* temperatur PCM akan mengalami penurunan temperatur mengikuti besarnya nilai dari konduktifitas termal PCM dapat dilihat pada Tabel 3.1.



Gambar 4.6. Kontur Liquid Fraction Arah Aksial Temperatur awal PCM 60°C



Gambar 4.7. Pengaruh Variasi Temperatur Kondisi Awal PCM Rata-Rata Arah Aksial

Dari ketiga variasi temperatur kondisi awal PCM pada dasarnya memiliki pola aliran yang sama ditunjukan dalam kurva Gambar 4.7. Pengaruh variasi temperatur awal PCM pada rata-rata arah aksial proses *discharging* jelas terlihat perbedaan pada kecepatan penurunan temperaturnya, ditandai dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *solidification* sempurna. Untuk variasi temperatur awal PCM 55°C terjadi proses *solidification* sempurna lebih cepat daripada temperatur awal PCM 60°C dan 65°C. Untuk temperatur awal PCM 55°C terjadi solid sempurna pada menit ke-241,5, lalu untuk temperatur kondisi awal 60°C terjadi solid sempurna pada menit ke-249, sedangkan untuk variasi temperatur 65°C solid sempurna terjadi pada menit ke-254,5. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin besar temperatur kondisi awal PCM maka waktu yang dibutuhkan untuk *solidification* sempurna akan semakin lama.

## 4.4 Evolusi Temperatur PCM Arah Radial Sumbu (Z)

Evolusi temperatur arah radial koordinat sumbu (Z) pada proses *discharging* dengan temperatur *inlet* HTF sebesar 25°C dan laju aliran massa konstan 2 LPM serta temperatur kondisi awal PCM variasi yakni 55°C, 60°C dan 65°C ditampilkan dalam Gambar 4.8.

Sebagaimana dijelaskan pada perubahan temperatur arah aksial, pada awal evolusi temperatur ke arah radial koordinat sumbu (Z) seperti digambarkan pada kurva temperatur Gambar 4.8. juga mengalami penurunan tajam sampai pada titik *Solidification Area* karena proses *Sensible liquid*, yaitu kalor ditransfer keluar melalui dinding pipa secara konduksi serta pengaruh gradien temperatur yang cukup besar.

Saat proses LHS dari ketiga variasi temperatur awal PCM pada titik yang lebih dekat dengan dinding pipa yakni T10 turun dengan cepat saat terjadi proses pembekuan PCM serta penurunan temperaturnya lebih stabil. Hal ini berbeda dengan titik yang ada di sebelahnya yaitu titik T11 dan T3 dimana penurunan temperaturnya tidak secepat T10. Awal proses padatan arah radial koordinat sumbu (z) untuk temperatur awal PCM 55°C pada T10 terjadi pada menit ke-12,5 dan solid sempurna pada menit ke-91,5, untuk termokopel T11 proses pembekuan diawali pada menit ke-11,5 dan berakhir atau solid sempurna pada menit ke-205, sedangkan pada T3 yang berada di sumbu tabung proses pembekuan diawali pada menit ke-11 dan berakhir lebih lama lagi yaitu pada menit ke-241.

Fenomena awal mula terjadi perubahan fase atau awal proses pembekuan pada T3 lebih dulu dimulai daripada T11 dan T10 karena pada proses sensible liquid, distribusi kalor yang akan dibuang keluar dari T3 masih dalam perjalanan. Oleh sebab itu, ketika T3 sudah memasuki daerah *Solidification* atau mulai proses *Laten*, di titik T11 dan T10 masih dilewati kalor dari T3 sehingga semakin jauh dari dinding pipa proses perubahan fase akan dimulai terlebih dahulu.

Akan tetapi sebaliknya pada T3 dan T11 akhir dari proses pembekuan lebih lama daripada T10 karena terjadi fenomena sama seperti evolusi temperatur pada arah aksial, titik yang lebih dekat dengan dinding pipa bagian dalam akan membeku terlebih dahulu sehingga titik akhir dari proses pembekuan pada T10 lebih cepat daripada T11 dan T3.



Gambar 4.8. Evolusi Temperatur PCM Arah Radial Sumbu (Z) pada Temperatur Awal PCM a) 55°C, b) 60°C dan c) 65°C.

Dengan laju aliran massa yang sama pada variasi temperatur awal PCM 60°C dan 65°C arah radial sumbu (Z) juga akan terjadi fenomena yang sama. Untuk temperatur kondisi awal 60°C awal proses pembekuan pada T10 terjadi pada menit ke-14,5 dan terjadi solid sempurna pada menit ke-92,5, lalu untuk termokopel T11 proses pembekuan diawali pada menit ke-13,5 dan diakhiri pada menit ke-210,5, sedangkan pada T3 yang berada di sumbu tabung proses awal pembekuan terjadi pada menit ke-13 dan solid sempurna pada menit ke-248. Lalu pada kondisi temperatur awal 65°C titik T10 proses pemebuan dimulai pada menit ke-17,5 dan berakhir pada menit ke-98. Lalu pada T11 proses pembekuan dimulai pada menit ke-16 dan berakhir pada menit ke-216,5, sedangkan di T3 dimana letak titiknya berada pada sumbu PCM dimulai pada menit ke-15,5 berakhir pada menit ke-253,5.



Gambar 4.9. Pengaruh Variasi Temperatur Kondisi Awal PCM Rata-Rata pada Arah Radial Sumbu (Z)

Dengan laju aliran massa yang sama sebesar 2 LPM dan temperatur HTF inlet 25°C dari ketiga variasi temperatur kondisi awal PCM arah radial koordinat sumbu (z) pada dasarnya memiliki pola aliran yang sama ditunjukan dalam kurva Gambar 4.9. Pengaruh variasi temperatur awal PCM pada rata-rata arah radial sumbu (z) saat proses *discharging* terlihat perbedaan pada kecepatan penurunan temperatur, ditandai dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *solidification* sempurna. Untuk temperatur awal PCM 55°C terjadi proses *solidification* sempurna lebih cepat daripada temperatur awal PCM 60°C dan 65°C. Untuk temperatur awal PCM 55°C terjadi solid sempurna pada menit ke-129,5, lalu untuk temperatur kondisi awal 60°C terjadi solid sempurna pada menit ke-130, sedangkan untuk variasi temperatur 65°C solid sempurna terjadi pada menit ke-136. Selisih waktu *solidification* sempurna ketiga variasi tidak terlalu besar dikarenakan perpindahan kalor akibat pengaruh gradien temperatur ke arah radial tidak terlalu besar, jadi selisih antara ketiga variasi temperatur awal PCM tidak signifikan. Akan tetapi fenomena pengaruh variasi temperatur awal PCM masih terlihat bahwa semakin besar temperatur kondisi awal PCM maka waktu yang dibutuhkan untuk *solidification* sempurna akan semakin lama.

## 4.5 Evolusi Temperatur PCM Arah Radial Sumbu (Y)

Untuk evolusi temperatur PCM arah radial koordinat sumbu (Y) proses *discharging* dengan temperatur HTF *inlet* sebesar 25°C dan laju aliran masa konstan 2 LPM serta temperatur kondisi awal PCM variasi yakni 55°C, 60°C dan 65°C simulasi yang didapatkan dari 20 titik temperatur yang tersebar dengan posisi seperti pada Gambar 3.1 disajikan dalam Gambar 4.10.

PCM akan membeku terlebih dahulu di setiap bagian dinding tabung bagian dalam, akan tetapi berangsur-angsur mengumpul pada bagian bawah tabung seperti terlihat pada Gambar 4.10. Temperatur T9 dari ketiga variasi temperatur kondisi awal PCM terjadi penurunan yang lebih cepat daripada titik yang lainnya. Fenomena ini terjadi karena massa jenis dari PCM yang membeku lebih besar dari PCM yang masih cair sehingga terpengaruh oleh gaya gravitasi dan lebih banyak mengendap di bagian bawah tabung, oleh sebab itu pembekuan arah radial koordinat sumbu (Y) maupun sumbu (Z) akan sedikit berbeda seperti yang terjadi pada kontur *liquid fraction* arah radial dalam Gambar 4.12.

Untuk titik T14 terjadi penurunan temperatur cepat karena titik T14 berada pada domain *solid* pipa bagian dalam. Seperti yang dijelaskan oleh Regin dkk, (2009) proses pembekuan *sensible* fase *liquid* terjadi secara merata pada seluruh bagian tabung PCM. Oleh sebab itu temperatur di titik T14 langsung turun tajam karena kalor yang tersimpan langsung terserap oleh HTF.







Gambar 4.10. Evolusi temperatur PCM Arah Radial Sumbu (Y) pada Temperatur Awal PCM a) 55°C, b) 60°C dan c) 65°C.



Gambar 4.11. Posisi potongan A-A untuk kontur arah radial



Gambar 4.12. Kontur Liquid Fraction Arah Radial Temperatur 60°C



Gambar 4.13. Pengaruh Variasi Temperatur Kondisi Awal PCM Rata-Rata pada Arah Radial Sumbu (Y)

Dengan kualitas parameter yang sama seperti pada evolusi temperatur PCM koordniat sumbu (y) juga memiliki pola aliran yang sama dari ketiga variasi temperatur awal PCM ditunjukan dalam kurva Gambar 4.13. Pengaruh variasi temperatur awal PCM pada rata-rata arah radial sumbu (y) saat proses *discharging* terlihat perbedaanya pada kecepatan penurunan temperatur, ditandai dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai solidification sempurna. Untuk temperatur awal PCM 55°C terjadi proses solidification sempurna lebih cepat daripada temperatur awal PCM 60°C dan 65°C. Untuk temperatur awal PCM 55°C terjadi solid sempurna pada menit ke-132, lalu untuk temperatur kondisi awal 60°C terjadi solid sempurna pada menit ke-133, sedangkan untuk variasi temperatur 65°C solid sempurna terjadi pada menit ke-139,5. Fenomena selisih waktu solidification sempurna tiga variasi pada arah radial sumbu (y) sama seperti pada arah radial sumbu (z) dimana selisih temperatur ketiga variasi tidak terlalu besar dikarenakan perpindahan kalor akibat pengaruh gradien temperatur ke arah radial tidak terlalu dominan, jadi selisihnya tidak signifikan. Akan tetapi fenomena pengaruh variasi temperatur awal PCM masih terlihat bahwa semakin besar temperatur kondisi awal PCM maka waktu yang dibutuhkan untuk *solidification* sempurna akan semakin lama.