

STUDI PEMBEKUAN *PHASE CHANGE MATERIAL* DI DALAM PIPA GANDA KONSENTRIK MENGUNAKAN SIMULASI CFD PADA PROSES DISCHARGING

Fajar Afrianto ^a, Muhammad Nadjib ^b, Thoharudin ^c

^{a,b,c} Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
 Jl. Brawijaya, Kasihan, Bantul, Yogyakarta 55183
 Telp.: 082133777855
 e-mail : fajarafrianto20@gmail.com

Intisari

Proses discharging pada TES merupakan fenomena penting karena pada saat pembekuan terjadi pelepasan energi termal yang dapat digunakan untuk tujuan tertentu. Kendala umum yang biasa terjadi pada penelitian eksperimental dengan memakai beberapa tambahan variasi adalah sulitnya mengatur kondisi lingkungan dan kualitas parameternya. Oleh karena itu perlu dilakukan studi simulasi proses pembekuan paraffin wax menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Simulasi ini dapat membantu mempelajari karakterisasi proses pembekuan paraffin wax di dalam alat penukar kalor.

Heat transfer fluid (HTF) dialirkan melalui lubang inlet yang terletak pada garis sumbu tabung dengan mengasumsikan gesekan pada dinding diabaikan dan heat loss pada dinding luar diabaikan serta menggunakan laju aliran massa konstan sebesar 2 LPM. Proses simulasi dilakukan dengan membuat geometri dari tabung, meshing dengan nilai orthoghonal quality 48%, input kondisi batas yang digunakan, atur batas konvergensi serta mengatur jumlah iterasi yang diinginkan lalu dilanjutkan dengan pengambilan data temperatur pada proses discharging dengan memvariasikan temperatur kondisi awal PCM.

Hasil simulasi CFD menunjukkan transfer kalor dari paraffin ke air pada awal discharging terjadi secara konduksi serta pengaruh gradien temperatur yang tinggi mengakibatkan penurunan temperatur paraffin berlangsung cepat sampai pada titik solidification area. Karakteristik pembekuan pada arah aksial lebih dominan terjadi terlebih dahulu pada daerah yang lebih dekat dengan saluran inlet. Sedangkan pembekuan pada arah radial dipengaruhi oleh gaya gravitasi, paraffin yang membeku akan memiliki densitas lebih besar sehingga pada tabung bagian bawah akan lebih banyak terjadi pembekuan dari tabung bagian atas. Variasi temperatur kondisi awal PCM mempunyai pengaruh yang besar terhadap proses discharging.

Kata Kunci : Paraffin wax, proses discharging, LHS, simulasi CFD.

1. PENDAHULUAN

Ketergantungan pada penggunaan energi fosil khususnya minyak bumi dapat menimbulkan permasalahan yang cukup serius, antara lain emisi gas rumah kaca (terutama CO₂) akibat pembakaran energi fosil. Oleh karena itu, pemanfaatan energi alternatif menjadi penting untuk mensubstitusi kebutuhan minyak bumi [7]. Energi terbarukan (*renewable energi*) dapat menjadi pilihan utama karena ketersediaan yang terus ada hingga akhir zaman. Salah satu contoh sumber energi terbarukan yang

memegang peranan penting adalah energi radiasi matahari.

Akan tetapi, ketersediaan sumber energi radiasi panas matahari dipengaruhi oleh waktu. Di sisi lain kebutuhan tertinggi pemakaian energi matahari terjadi pada sore dan malam hari di mana sumber energi matahari tidak tersedia. Oleh karena itu, antara kebutuhan pemakaian dan sumber energi tidak ada kesesuaian waktu [6]. Metode yang digunakan untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan menyimpan energi termal di dalam *Thermal energy*

storage (TES) [1]. Kategori penyimpan panas yang biasa diterapkan pada TES terdiri dari 3 macam, yaitu *sensible heat storage* (SHS), *laten heat storeage* (LHS) serta *thermochemical*. Dari ketiga metode penyimpan kalor tersebut, LHS merupakan penyimpan kalor yang paling efektif digunakan

SHS yang digunakan berupa air biasa di mana banyak dijumpai dan harganya murah serta memiliki karakteristik perpindahan kalor yang baik [3]. Akan tetapi air memiliki kekurangan yaitu pelepasan energi yang terlalu besar sehingga perlu ditambahkan *phase change material* (PCM) untuk mengatasi kekurangan pada SHS. Material PCM yang umumnya digunakan adalah *paraffin wax* dimana *paraffin wax* merupakan kategori penyimpan energi jenis LHS karena *paraffin wax* memiliki sifat-sifat diantaranya adalah: densitas material tinggi (~ 200 kJ/kg) [2], melting point dari material kisaran antara 8 sampai 106 °C [4], serta siklus termalnya mampu bertahan selama 1500 siklus [9].

Proses *discharging* pada TES merupakan fenomena penting karena pada saat pembekuan terjadi pelepasan energi termal yang dapat digunakan untuk tujuan tertentu. Kendala umum yang biasa terjadi pada penelitian eksperimental dengan memakai beberapa variasi adalah sulitnya mengatur kondisi lingkungan dan kualitas parameternya. Oleh karena itu perlu

dilakukan studi simulasi proses pembekuan *paraffin wax* menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Simulasi ini dapat membantu mempelajari karakterisasi proses pembekuan *paraffin wax* di dalam alat penukar kalor.

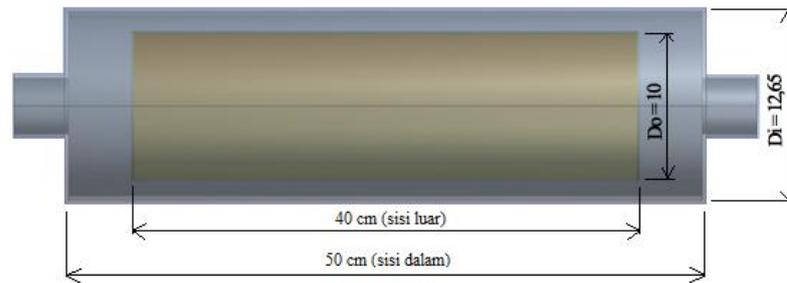
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan HTF berupa air biasa dan *paraffin wax* sebagai PCM. *Paraffin wax* yang digunakan berjenis RT52 dengan sifat termofisik pada Tabel 2.1.

Model TES yang digunakan adalah pipa ganda konsentrik seperti pada Gambar 2.1. Pipa luar terbuat dari *Galvanised Iron Primer* (GIP) dengan ukuran panjang 50 cm, diameter dalam 12,65 cm dan tebal 3 mm. Pipa dalam terbuat dari tembaga dengan ukuran panjang 40 cm, diameter luar 10 cm dan tebal 1,1 mm. Pipa bagian dalam berisi PCM sedangkan air dingin sebagai HTF mengalir di sisi *annulus*. HTF mengalir dari saluran *inlet* dan keluar pada saluran *outlet* yang terletak pada sumbu pipa. Posisi termokopel diletakan pada beberapa titik baik zona HTF, PCM maupun pipa bagian dalam seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.2. HTF dialirkan ke dalam unit TES dengan laju aliran massa konstan sebesar 2 LPM dengan temperatur kondisi awal yang digunakan bervariasi sebesar 55 °C, 60 °C dan 65 °

Tabel 2.1. Sifat termofisik water-liquid dan *paraffin wax* RT52

Sifat-sifat	Harga			Nilai
	Minimum	Main peak	Maksimum	
Water-Liquid				
Densitas				998,0 kg/m ³
<i>Spesific heat</i> (cp)				4182 J/kg.K
Konduktifitas termal				0,6 W/m.K
viskositas				0,001008 kg/m.s
Paraffin Wax RT52				
Pelelehan	49°C	52°C	53°C	
Pembekuan	48°C	52°C	52°C	
Kalor laten peleburan				143 kJ/kg
Kalor jenis spesifik				2 kJ/kg
Massa jenis:				
-Cair				0,76 kg/liter
-Padat				0,88 kg/liter
Konduktifitas termal (padat dan cair)				0,2 W/m.K

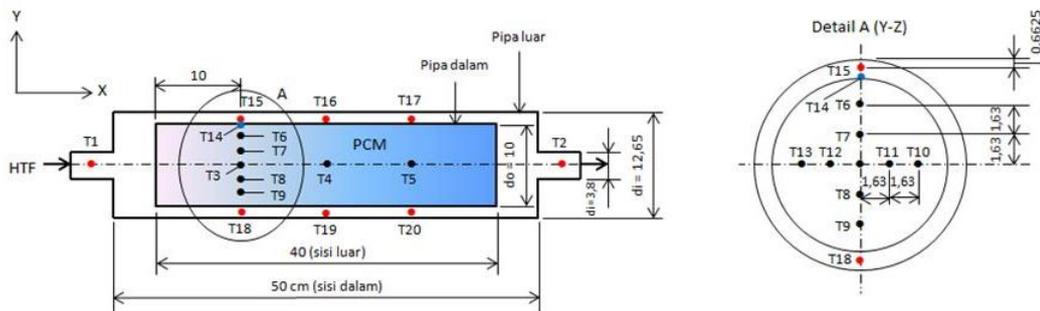


Gambar 2.1. Tabung Thermal Energy Storage

Dimana :

Do = Diameter Luar (cm)

Di = Diameter dalam (cm)

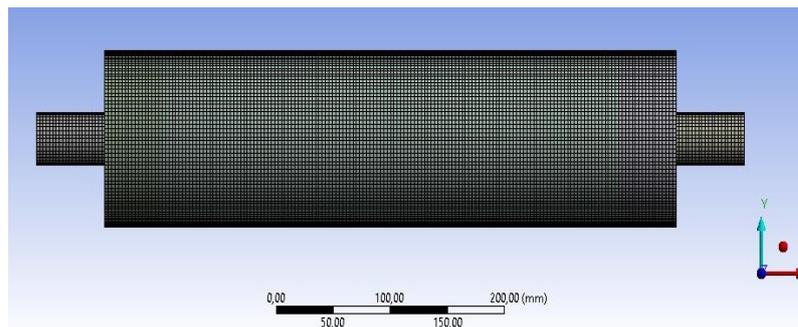


Gambar 2.2. Posisi penempatan termokopel

Pada dasarnya proses CFD dibagi menjadi 3 yaitu *Pre-processing*, *processing* dan *post-processing*.

Pre-processing merupakan tahap awal yang perlu dilakukan sebelum dimulai simulasi [5]. Dalam tahapan ini terdiri dari pembuatan *geometry*, *meshing*, cek statistik *mesh* dan mendefinisikan bidang

batas pada *geometry*. *Geometri* dibagi menjadi beberapa *zone* (bagian), *Meshing* dilakukan perzone supaya mendapat hasil maksimal, hasil *minimum orthogonal quality* didapatkan sebesar 0,48 dengan kategori kualitas *meshing* baik. Hasil *meshing* ditampilkan dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Hasil meshing

Tahap *processing* dilakukan kaitannya dengan pemilihan kondisi batas dalam simulasi CFD. Proses ini merupakan bagian terpenting karena metode yang digunakan pada penelitian suatu kasus diproses pada tahapan ini, model yang digunakan transien dan *viscos yang digunakan* laminar serta *solidification/melting* aktif, asumsi densitas

material *paraffin wax bouusinesq*, pengelompokkan jenis material pada *cellzone conditions*, *input* laju aliran massa pada *boundary conditions*, *mesh interface*, *dynamic mesh*, *references values*, *solution methods*, *solution controls*, *solution initialization*, *calculated activities*, *run calculation* [5].

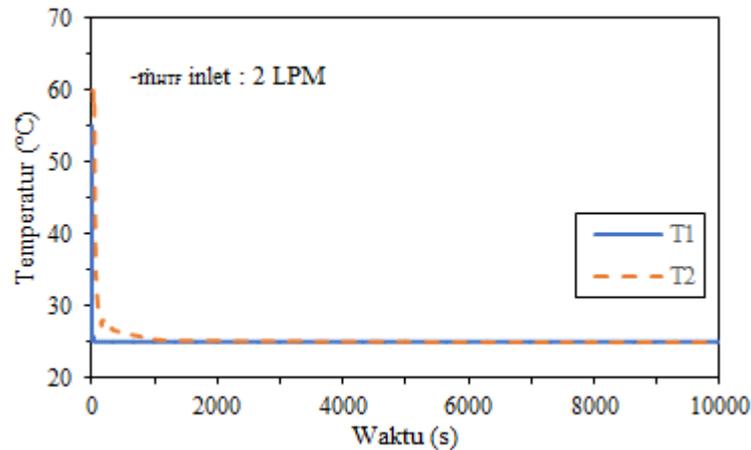
Setelah selesai melakukan proses kalkulasi tahap selanjutnya yaitu *Post processing* atau melihat hasil kalkulasi [5]. Pada menu *Result* dapat menampilkan hasil berupa kontur, *graphics*, *plots*, *animation* dan *report*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 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 2.2 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 3.1.

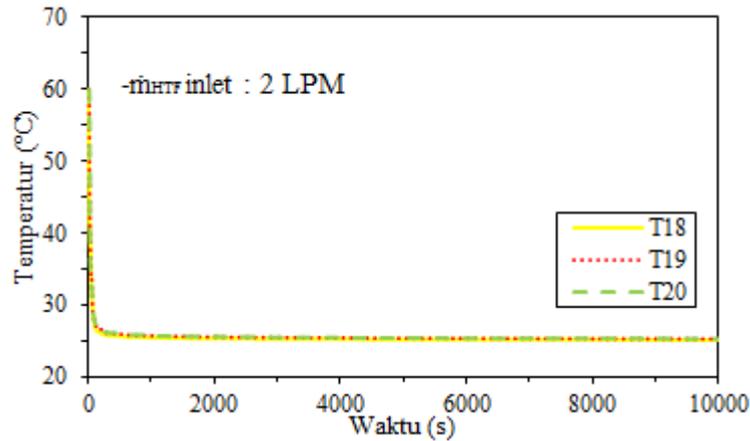


Gambar 3.1. Evolusi Temperatur inlet dan outlet dengan Temperatur Awal PCM 60°C

Kurva evolusi temperatur *inlet* dan *outlet* dari ketiga variasi pada dasarnya memiliki pola aliran yang sama dan menunjukkan bahwa perubahan temperatur pada *inlet* dan *outlet* seketika konstan, dimana titik T1 dari 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-11 untuk temperatur kondisi awal PCM 60°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.

3.2 Evolusi temperatur HTF

Gambar 3.2 menunjukkan perubahan pada saat awal proses pembekuan (*discharging*) terjadi penurunan temperatur HTF yang tajam baik dari ketiga variasi temperatur kondisi awal. Hal ini disebabkan karena HTF berupa air biasa dimana air merupakan *Sensible Heat Storage* (SHS) dan memiliki karakteristik perpindahan kalor yang baik [3] sehingga perpindahan kalor yang terjadi pada HTF sangat cepat. Seiring bertambahnya waktu, temperatur 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.

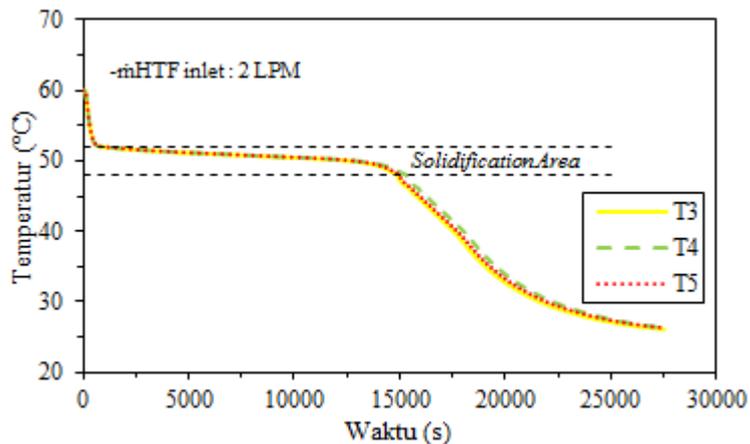


Gambar 3.2. Evolusi temperatur HTF

3.3 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 3.3. Mengacu pada pengertian dari [8]. 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 tinggi 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 2.1) yaitu saat memasuki proses kedua dari *discharging* menurut [8] yakni *Laten* atau perubahan fase *solid-liquid*.

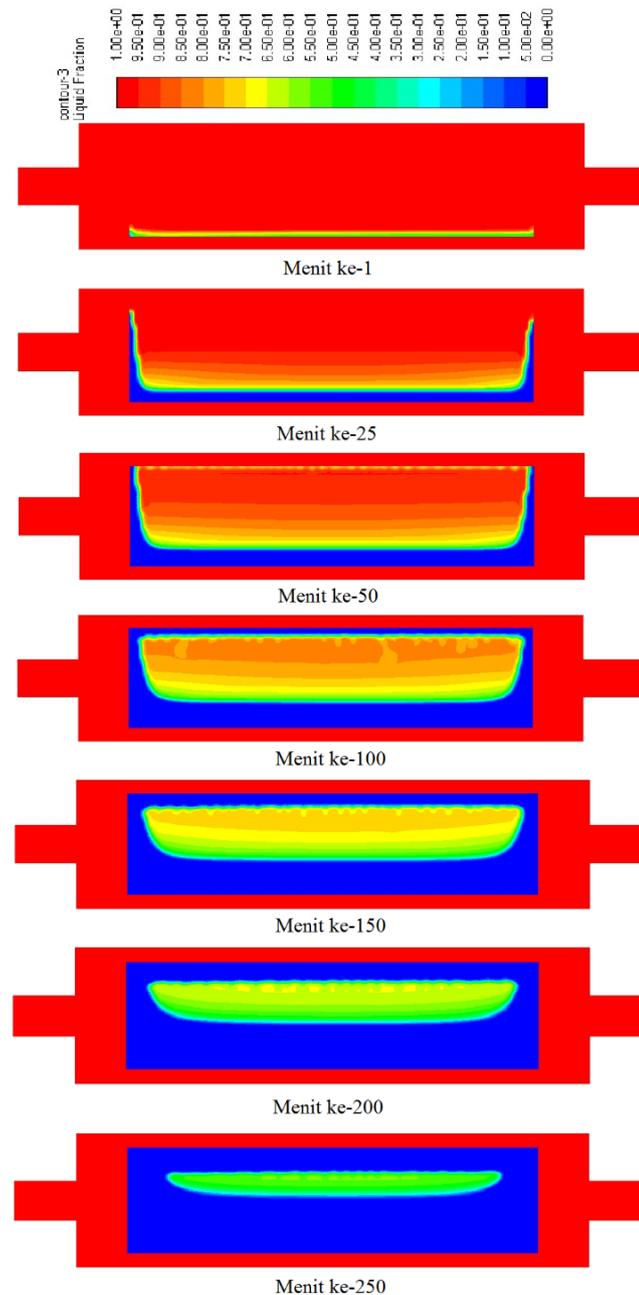
Seiring berjalannya waktu, proses yang kedua yaitu *Laten*, begitu energi kalor yang tersimpan di dalam PCM mulai terbuang maka akan terbentuk padatan-padatan tipis di daerah dinding pipa bagian dalam, karena adanya faktor gravitasi maka padatan akan berkumpul pada bagian bawah tabung PCM. Fenomena padatan 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 dari *liquid-solid*. Saat PCM mengalami proses perubahan fase lebih dominan terjadi perpindahan kalor konveksi alami, hal ini yang mengakibatkan sirkulasi temperatur pada PCM.



Gambar 3.3. Evolusi temperatur PCM pada arah aksial temperatur 60°C

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 *Paraffin wax RT52* memiliki konduktivitas termal sangat kecil (Tabel 2.1) 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 60°C pembekuan pada arah aksial yakni titik

sumbu tabung T3, T4 dan T5 dimulai pada waktu yang hampir bersamaan yaitu pada menit ke-13,5. Fenomena terjadinya pembekuan pada T3, T4 dan T5 dimulai pada waktu bersamaan ini menjelaskan bahwa proses awal yang dikemukakan oleh [8] yaitu proses pembekuan *sensible* fase *liquid* terjadi secara merata pada seluruh bagian tabung PCM.

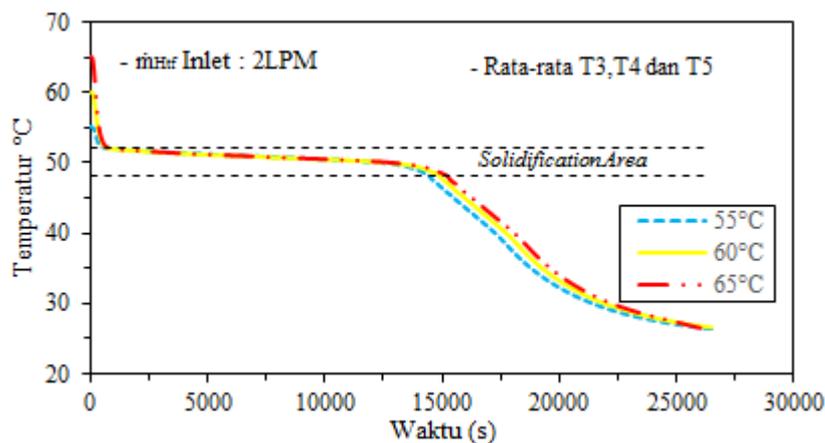


Gambar 3.4. Kontur liquid fraction arah aksial temperatur 60°C

Akan tetapi menurut kurva Gambar 3.3. titik temperatur yang berada pada posisi PCM menunjukkan perbedaan pada akhir dari pembekuan. Pembekuan akan lebih cepat terjadi di daerah yang dekat dengan saluran *inlet* dan dekat dengan dinding kapsul. Seperti ditunjukkan pada titik T3 dan T5 dengan kondisi temperatur awal PCM 60°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-248 dan menit ke-249,5, sedangkan T4 pembekuan berakhir pada menit ke-254. 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 3.4.

Proses *discharging* tahap akhir untuk PCM pada arah aksial adalah *sensible* kondisi *solid*. Setelah melewati area *Solidification* temperatur dari PCM akan mengalami penurunan temperatur yang konstan mengikuti besarnya nilai dari konduktifitas termal PCM seperti diinformasikan pada Tabel 2.1.



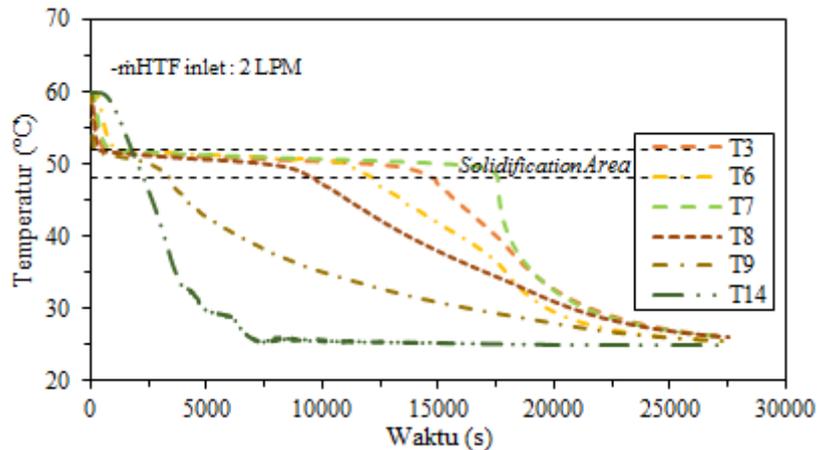
Gambar 3.5. Pengaruh Variasi Temperatur Kondisi Awal PCM Rata-Rata Arah Aksial

Dari ketiga variasi temperatur kondisi awal PCM pada dasarnya memiliki pola aliran yang sama ditunjukkan dalam kurva Gambar 3.5. Pengaruh variasi temperatur awal PCM pada rata-rata arah aksial proses *discharging* jelas terlihat perbedaan pada kecepatan penurunannya, 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-

249,5, 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

3.4 Perubahan Temperatur PCM Arah Radial

Perubahan temperatur atau evolusi temperatur yang terjadi pada arah radial koordinat sumbu (Y) proses *discharging* dengan temperatur *inlet* HTF sebesar 25°C dan laju aliran masa konstan 2 LPM ditampilkan dalam Gambar 3.6.

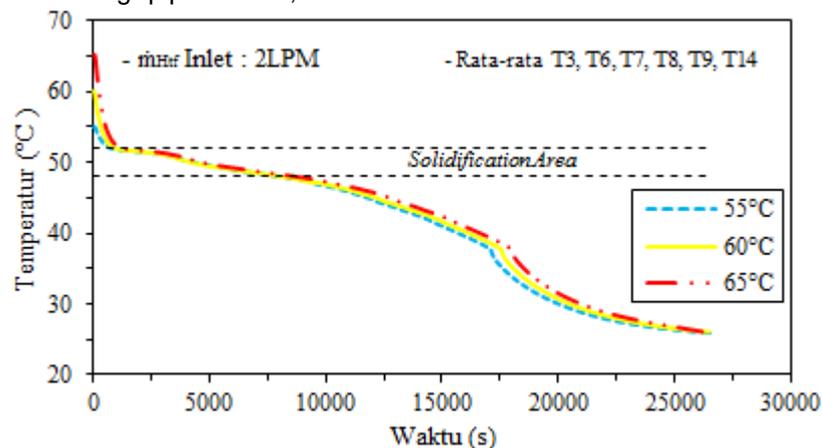


Gambar 3.6. Evolusi Temperatur Arah Radial Koordinat Sumbu Y temperatur 60°C

Sebagaimana dijelaskan pada perubahan temperatur arah aksial, pada awal evolusi temperatur ke arah radial koordinat sumbu (Y) seperti yang digambarkan pada kurva evolusi temperatur Gambar 3.6. juga mengalami penurunan yang tajam sampai pada titik *Solidification Area* karena proses *sensible liquid*, dimana kalor ditransfer keluar melalui dinding pipa secara konduksi serta pengaruh gradien temperatur yang cukup besar.

PCM akan membeku terlebih dahulu di setiap bagian dinding pipa dalam, akan

tetapi berangsur-angsur mengumpul pada bagian bawah pipa seperti terlihat pada kurva evolusi temperatur radial sumbu (Y). Temperatur T9 terjadi penurunan yang lebih cepat daripada T8 dan T3. Fenomena ini terjadi karena massa jenis dari PCM yang membeku lebih besar sehingga akan tertarik 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* dapat dilihat pada Gambar 3.1



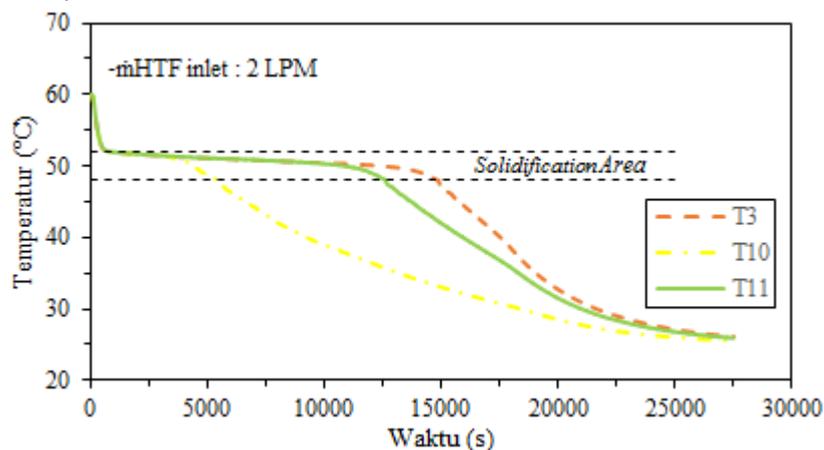
Gambar 3.7. Pengaruh Variasi Temperatur Kondisi Awal PCM Rata-rata Arah Radial Sumbu (Y)

Evolusi temperatur PCM koordinat sumbu (Y) juga memiliki pola aliran yang sama dari ketiga variasi temperatur awal PCM ditunjukkan dalam kurva Gambar 3.7. Pengaruh variasi temperatur awal PCM pada rata-rata arah radial sumbu (Y) saat proses *discharging* terlihat perbedaannya 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.

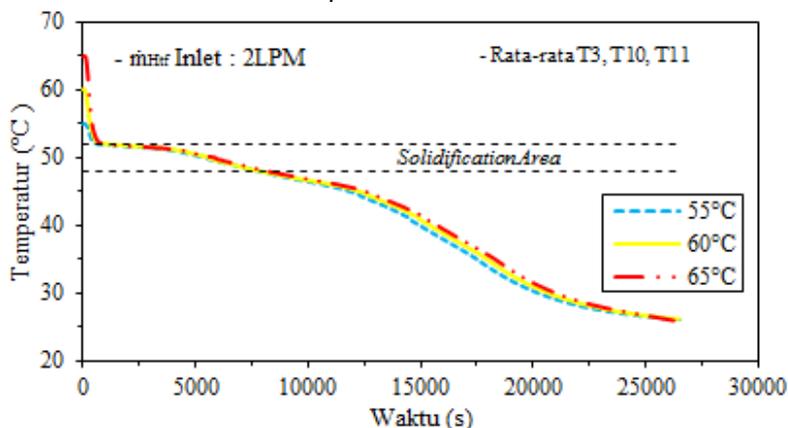
Perubahan temperatur atau evolusi temperatur yang terjadi pada arah radial koordinat sumbu (Z) proses *discharging* dengan temperatur *inlet* HTF sebesar 25°C dan laju aliran masa konstan 2 LPM ditampilkan dalam Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Evolusi Temperatur Arah Radial Koordinat Sumbu Z temperatur 60°C

Titik termokopel 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 termokopel yang ada di sebelahnya yaitu titik T11 dan T3 dimana penurunan temperaturnya tidak secepat T10. Awal proses pembekuan arah radial dengan temperatur kondisi awal 60°C pada T10 terjadi pada menit ke-14,5 dan berakhir di menit ke-92,5. 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 PCM proses pembekuannya diawali pada menit ke-13 dan berakhir lebih lama lagi yaitu pada menit ke-248. Fenomena mulai terjadi perubahan fase atau masuk pada

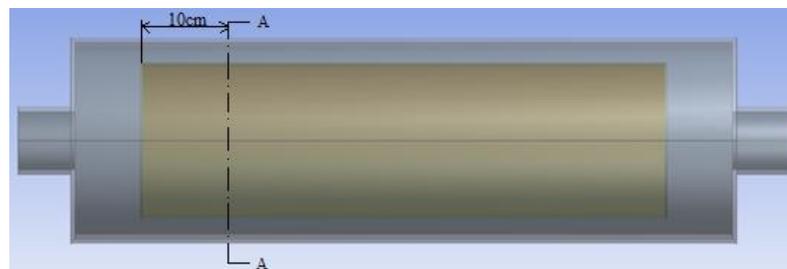
tahap LHS pada T3 lebih dulu dimulai daripada T11 dan T10 karena pada proses *sensible liquid* distribusi kalor yang dibuang keluar dari T3 masih dalam perjalanan. Oleh sebab itu, ketika T3 sudah memasuki daerah *Solidification* atau mulai proses LHS pada T11 dan T10 masih dilewati kalor dari T3 sehingga 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 sama seperti 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.



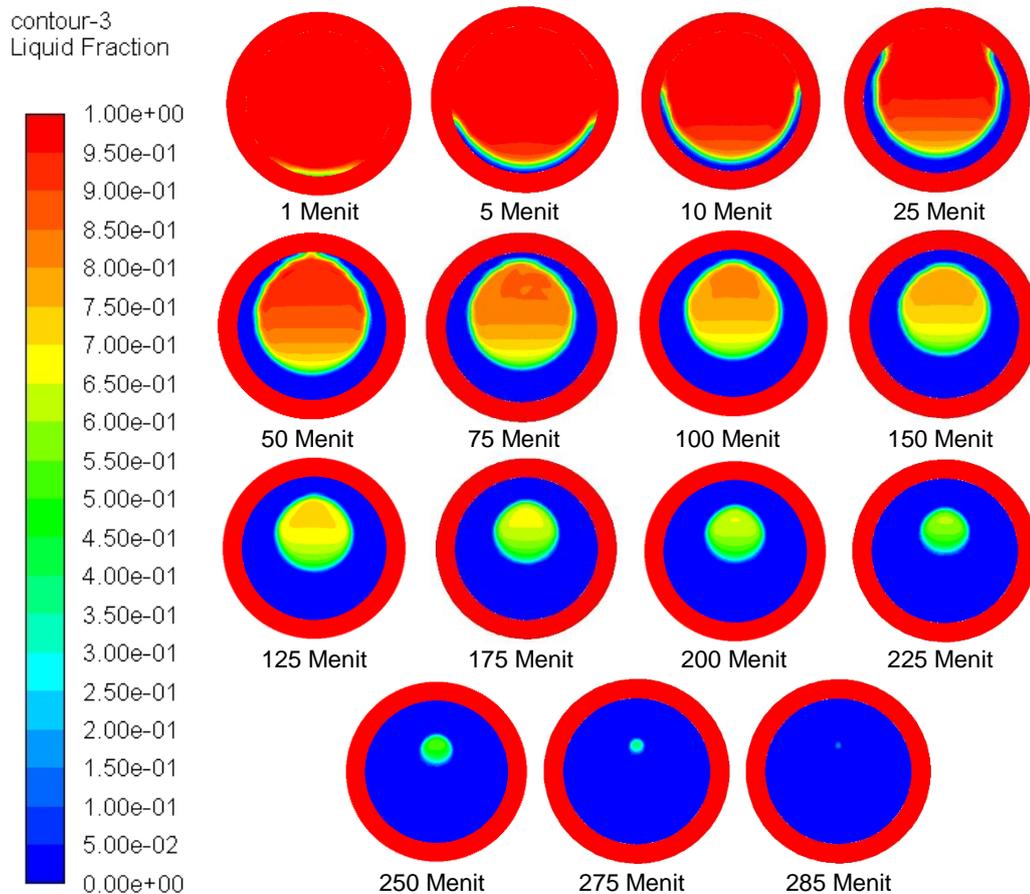
Gambar 3.9. Pengaruh Variasi Temperatur Kondisi Awal PCM Rata-rata Arah Radial Sumbu (Z)

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 ditunjukkan dalam kurva Gambar 3.9. 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.



Gambar 3.10. Posisi potongan A-A untuk kontur arah radial



Gambar 3.11. Kontur Liquid Fraction Arah Radial Temperatur 60°C

4. KESIMPULAN

Telah dilakukan studi simulasi numerik menggunakan ANSYS Fluent pada sistem TES pipa ganda konsentrik dimana pipa dalam berisi *paraffin wax* sebagai PCM. Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Proses *discharging* arah aksial akan terlebih dahulu terbentuk padatan di daerah dekat dengan saluran *inlet*. Kecepatan penurunan temperatur merata pada seluruh bagian dinding tabung.
- b. Pembekuan PCM arah radial sumbu (y) dipengaruhi oleh densitas sehingga pembekuan pada bagian bawah tabung lebih cepat daripada bagian atas tabung. Proses *discharging* untuk arah radial sumbu (z) terjadi secara simetri. Waktu pembekuan untuk arah aksial dan radial terlihat bahwa pada arah radial lebih cepat terjadi *solidification* sempurna daripada arah aksial.
- c. Semakin tinggi variasi temperatur kondisi awal proses *discharging* maka semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk *solidification* sempurna. Semakin tinggi variasi temperatur awal PCM maka gradien temperatur semakin besar sehingga perpindahan kalor semakin tinggi. Perpindahan kalor ke arah radial akibat pengaruh perbedaan temperature kondisi awal tidak terlalu signifikan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cabeza, L.F., 2015, "Advances In Thermal Energy Storage Systems", Woodhead Publishing, UK.
- [2] 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.
- [3] Hasan, A., 1994. "Phase Change Material Energy Storage System Employing Palmatic Acid", Solar Energy, pp. 143-154.
- [4] Kenisarin, M. dan Mahkamov, K., 2007. "Solar Energy Storage Using Phase Change Materials", Renewable and Sustainable Energy reviews, pp. 1913-1965.
- [5] Marsah, T. S., 2014, Simulasi Pelelehan Dan Pembekuan Pada Phase Change Material Di Dalam Pemanas Air Tenaga Surya Dengan Menggunakan Metode Perhitungan Komputasi Dinamik, Universitas Sumatera Utara 2014.
- [6] Nadjib, M., Suhanan., Ansyah, P.A., Anggara, F., 2017, Simulasi Numerik Proses Pelelehan *Paraffin Wax* Pada Unit Penyimpan Energi Termal Tipe Pipa Ganda Konsentrik, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII*, ISBN 978 602 98412 31 7, 430 – 435.
- [7] Permana, D., 2010, "Dampak penerapan undang-undang nomor 4 tahun 2009 tentang pertambangan mineral dan batubara terhadap pengembangan usaha pertambangan mineral dan batubara" Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara, Puslitbang, Bandung.
- [8] Regin, A.F., Solanki S.C. dan Saini J.S., 2009. "An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation", Renewable and Sustainable Energy reviews, pp. 2438-2458.
- [9] Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen C.R. dan Buddhi, D., 2009. "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 318-345.