JMPM: Jurnal Material dan Proses Manufaktur - Vol.XXX, No.XXX, XXX

http://journal.umy.ac.id/index.php/jmpm

STUDI PROSES PELELEHAN *PARAFFIN WAX* DI DALAM PIPA GANDA KONSENTRIK DENGAN VARIASI TEMPERATUR AIR MASUK MENGGUNAKAN SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Rizal Nazarrudin[1,a], Muhammad Nadjib[1,b], Thoharudin[1,c]

[1]Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Jalan Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan, Bantul, D.I. Yogyakarta, Indonesia, 55183

[a]rizal.nazar29@gmail.com, [b]nadjibar@yahoo.com, [c]thoharudin@gmail.com

INTISARI

Makalah ini menyajikan studi proses pelelehan *paraffin wax* di dalam pipa ganda konsentrik dengan variasi temperatur air masuk menggunakan simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) ANSYS Fluent. Diameter *inlet-outlet* 3,8 cm dengan panjang masing-masing 6 cm dari ujung tabung luar. Konfigurasi geometri terdiri atas dua tabung yakni dimensi tabung dalam berdiameter 10 cm dan panjangnya 40 cm, sedangkan tabung luar berdiameter 12,65 cm dan panjangnya 50 cm. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi numerik menggunakan CFD ANSYS Fluent 18.0 dengan variasi Temperatur air masuk (55℃, 60℃, dan 65℃). Metode yang digunakan menggunakan asumsi *Boussinesq* pada densitas PCM. Simulasi numerik menggunakan konstanta porositas 10^6 dengan nilai *optimum elements mesh* 430.718 didapatkan kualitas *ortoghonal* 0,48 dengan kualifikasi baik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perpindahan kalor pada proses pelelehan *paraffin wax* di dalam TES terjadi secara konduksi dan konveksi, dimana pengaruh perbedaan temperatur sangat besar. Semakin besar perbedaan temperatur maka penyerapan kalor oleh PCM juga akan semakin besar, hal ini mengakibatkan waktu terbentuknya proses pelelehan *paraffin wax* akan semakin cepat. Kontur pelelehan *paraffin wax* yang terbentuk tidak simetris, hal ini dikarenakan adanya pengaruh konveksi alami.

Kata Kunci: TES, *paraffin wax* RT52, CFD, proses pelelehan, konveksi alami.

1. PENDAHULUAN

Peningkatan penggunaan energi secara terus-menerus mengakibatkan kelangkaan sumber energi khususnya energi fosil. Salah satu jalan alternatif untuk mengatasi kelangkaan sumber energi tersebut adalah memanfaatkan energi terbarukan (*renewable energy*). Pemakaian energi terbarukan memiliki ciri yang khas yaitu memerlukan penyimpanan energi. Salah satu bentuk penyimpanan energi adalah *Thermal Energy Storage* (TES). TES memiliki prinsip kerja untuk menyimpan energi termal baik dari sumber panasnya langsung atau dari panas yang terbuang di lingkungan yang dapat digunakan pada waktu tertentu. Cabeza (2015) menyatakan bahwa TES bermanfaat untuk mengatasi ketidaksesuaian antara pembangkit energi dengan penggunaannya. Penyimpanan kalor laten (*Latent Heat Thermal Energy Storage*, LHTES) merupakan bentuk TES yang paling efektif untuk pengelolaan energi termal.

LHTES memerlukan media penyimpanan energi yang disebut *Phase Change Material* (PCM) yang fasenya dapat berubah saat menyimpan energi termal. *Parrafin wax* merupakan salah satu jenis material dari PCM yang digunakan untuk LHTES pada TES. Beberapa karakteristik yang dimiliki *parrafin wax* diantaranya: ekonomis, nilai densitas energinya tinggi (kisaran 200 kJ/kg), memiliki nilai konduktivitas termal yang rendah (kisaran 0,2 W/m.℃) (Farid dkk, 2004), temperatur lelehnya bervariasi antara 8℃-106℃ (Kenisarin dan Mahkamov, 2007), tidak reaktif dan tidak berbahaya (Sharma dan Sagara, 2005), dan kondisi sifat termal yang stabil di bawah 500 ℃ (Sharma, dkk, 2009).

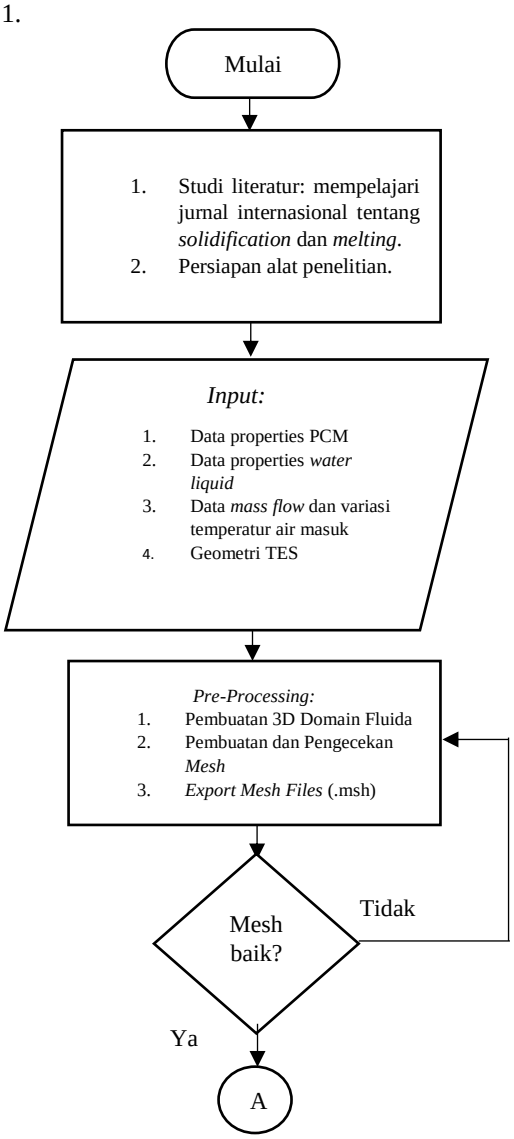
Penelitian eksperimental yang menggunakan *paraffin wax* untuk penyimpanan energi termal pernah dilakukan peneliti sebelumnya. *Paraffin wax* dipakai pada instalasi pemanas air tenaga surya (Nadjib dan Suhanan, 2014). *Paraffin wax* juga digunakan pada alat penukar kalor sebagai penyimpan energi termal (Hosseini dkk, 2014). Kesulitan penelitian tersebut adalah prediksi waktu terjadinya proses pelelehan *paraffin wax*. Kesulitan ini dapat

diatasi dengan mengaplikasikan simulasi numerik memakai *software Computational Fluid Dynamics* (CFD) ANSYS Fluent.

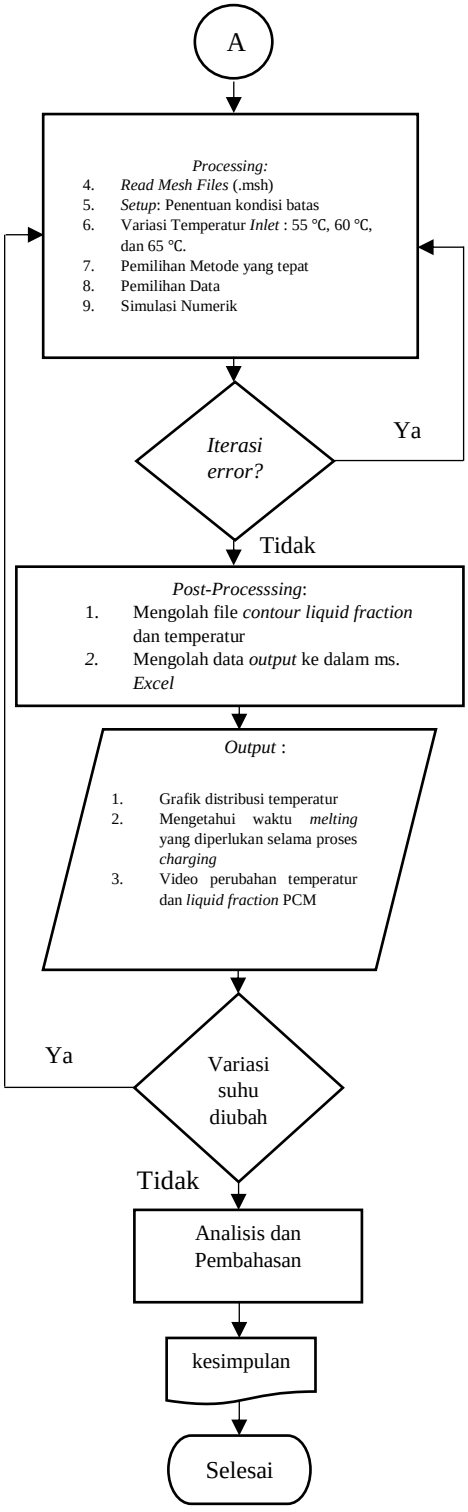
Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan hasil penyelidikan tentang proses pelelehan *paraffin wax* RT52 di dalam tabung TES pada arah aksial dan arah radial dengan variasi temperatur air masuk searah dengan sumbu tabung menggunakan *software* CFD ANSYS Fluent.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan proses penelitian dapat dilihat pada kerangka besar diagram alir di Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian (lanjutan).

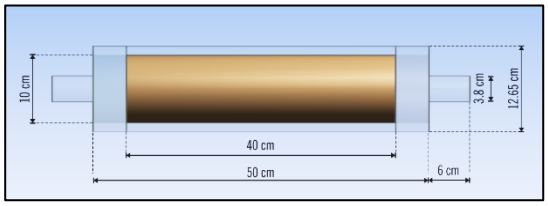
Air sebagai HTF dan *paraffin wax* sebagai PCM merupakan material yang digunakan pada penelitian proses pelelehan

menggunakan simulasi numerik. Tabel 1 merupakan sifat termofisik *paraffin wax* RT52.

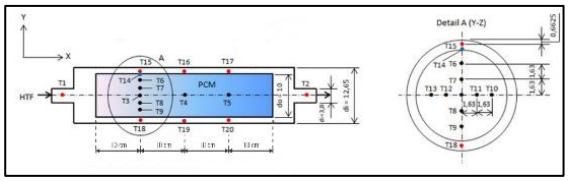
Bentuk geometri yang digunakan berbentuk anulus yang terdiri dari dua tabung seperti yang disajikan pada Gambar 2. Tabung luar dan tabung dalam dipasang konsentrik dimana air masuk searah dengan sumbu tabung. Tabung dalam berisi PCM berdiameter 10 cm dan panjang 40 cm. Tabung luar sebagai tempat mengalirnya HTF berdiameter 12,65 cm dan panjang 50 cm. Tabung PCM dan tabung luar berturut-turut memiliki ketebalan dinding 1,1 mm dan 3 mm. Gambar 3 menunjukkan letak titik termokopel pada desain simulasi untuk mengetahui evolusi temperatur baik HTF maupun PCM. Tabung HTF bagian atas terdiri dari titik termokopel T15-T17, sedangkan bagian bawah tabung terdiri dari titik termokopel T18-T20. Titik termokopel bagian tabung PCM untuk arah aksial yakni T3-T5, untuk arah radial pada sumbu Y yakni T6-T9, dan untuk arah radial pada sumbu Z yakni T10-T13. Gambar 4. Merupakan proses *meshing*, dimana pada (a) panel pembuatan *mesh* dengan menentukan *size function* yaitu *curvature* dan menggunakan transisi *slow* lalu memasukkan nilai minimal dan maksimal *size* sebesar 3 mm, sedangkan (b) hasil *meshing* didapatkan nilai *minimum orthogonal quality mesh* 0,48 yang menandakan bahwa pada simulasi kualitas *mesh* dalam kualifikasi baik (*good*).

Tabel 1. Sifat Termofisik *paraffin wax* RT52

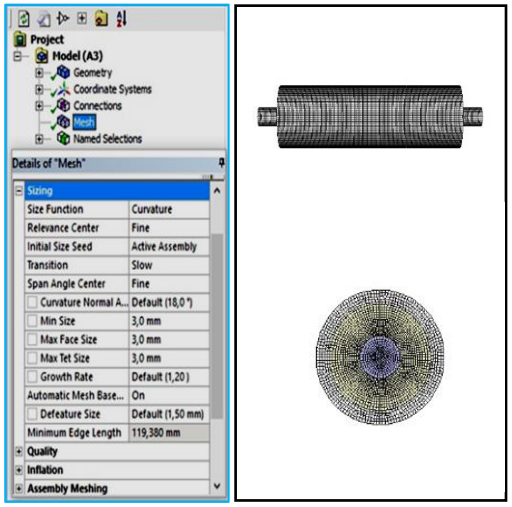
Kriteria	Satuan	Nilai
Rentang pelelehan	℃	49-53
Kapasitas penyimpanan panas *T=44℃-59℃	kJ/kg	173
Specific heat capacity	kJ/kg*K	2
Massa jenis fase padat *T= 15℃	kg/m^3	880
Massa jenis fase cair *T= 80℃	kg/m^3	760
Konduktivitas termal	W/(mK)	0,2
Viskositas kinematik *T= 80℃	mm^2/s	31,28
Kalor laten	kJ/kg	143



Gambar 2. Geometri *thermal energy storage*.



Gambar 3. Letak titik termokopel pada TES.



(a) (b)

Gambar 4. Proses *Meshing* (a.) Panel Pembuatan *Mesh*, (b) Hasil *Meshing*.

Perhitungan dalam proses simulasi numerik diperlukan penyederhanaan, dimana simulasi menggunakan permodelan 3D dengan asumsi sebagai berikut:

1. *Heat loss* pada sistem diabaikan.
2. Perpindahan kalor secara radiasi dianggap tidak ada.
3. PCM bersifat homogen di sepanjang kapsul.
4. Sifat-sifat dari *paraffin wax* RT52 bersifat konstan, kecuali pada densitasnya yang menggunakan metode *boussinesq* (tergantung oleh jenis fasenya).
5. Dinding tembaga dan *galvanised iron pipe* (GIP) diasumsikan sebagai dinding tipis pada *interface*.

6. Proses pelelehan PCM di dalam sistem diakhiri sampai terjadi melting sempurna.

Asumsi-asumsi yang telah dimasukkan pada kondisi batas, selanjutnya pada saat proses simulasi numerik akan didefinisikan ke dalam beberapa persamaan aritmatik berikut:

Persamaan energi:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} H) = \nabla.(\mathrm{k}\nabla T) + S \quad (1)$$

$$H = h + \Delta H \quad (2)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^{T} C_p dT \quad (3)$$

$$\Delta H = \gamma L \quad (4)$$

Nilai γ merupakan fraksi pelelehan pada persamaan (4) dengan definisi sebagai berikut:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & T < Ts \\ \frac{T-Ts}{Tl-Ts} & Ts \le T \le Tl \\ 1 & T > Tl \end{cases} \quad (5)$$

Sehingga persamaan energi dari persamaan (1) dan (2) ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho(h+\gamma L)}{\partial t} + \nabla \rho(h+\gamma L)\vec{v} = \nabla.(k\nabla T) + S \quad (6)$$

Harga S pada persamaan (6) diberikan oleh persamaan (7).

$$S = \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3+\varepsilon)} A_{mush}\left(\vec{v} - \vec{v}_p\right) \quad (7)$$

Nilai ε dimasukan dengan nilai 0,001 agar fungsi *porosity-source* tidak menjadi tak hingga ketika PCM masih berfase padat.

Persamaan momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla.(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla.(\bar{\bar{\tau}}) + \rho\vec{g} + \vec{F} \quad (8)$$

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu\left[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T) - \frac{2}{3}\nabla.\vec{v}l\right] \quad (9)$$

Persamaan atur massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.\left(\rho\vec{V}\right) = 0 \quad (10)$$

Asumsi *boussinesq* merupakan persamaan yang digunakan menurut Hosseini, dkk (2014) untuk mendekati sifat termal PCM pada simulasi numerik dengan mendefinisikan persamaan (11) dan (12) sebagai berikut.

$$\mu = A.e^{BT} \quad (11)$$

Dimana : $\mathrm{A} = 5{,}8035,\ \mathrm{B} = -1{,}55\mathrm{x}10^{-2}$, $325\ \mathrm{K} \le T \le 353\ K$.

$$\rho = \rho_0\left(\beta\left(T - T_{liquidus}\right) + 1\right)^{-1} \text{ untuk } 51℃ < \mathrm{T} < 100℃ \quad (12)$$

Dimana : ρ adalah densitas, β yaitu termal *expansion*, dan T adalah temperatur.

Permodelan densitas PCM dimodelkan ke dalam bentuk persamaan 13.

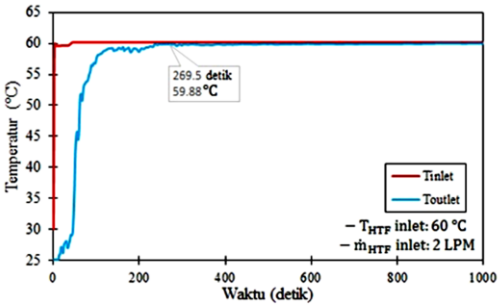
$$\rho = \gamma\rho_l + (1-\gamma)\rho_s \quad (13)$$

Dimana: ρ adalah densitas PCM, γ adalah *liquid fraction* dan ρ_l dan ρ_s berturut-turut adalah densitas PCM fase cair dan fase padat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Distribusi Temperatur HTF

Perbandingan antara grafik temperatur *inlet* dan *outlet* pada simulasi diperlukan untuk mengamati distribusi temperatur dari HTF menuju PCM. Kondisi awal dalam tabung HTF diasumsikan diisi air dingin bertemperatur 25 ℃ yang bertujuan agar temperatur PCM seragam saat simulasi. Kondisi awal dalam tabung HTF diasumsikan diisi air dingin bertemperatur 25 ℃ yang bertujuan agar temperatur PCM seragam saat simulasi. Gambar 5 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan gradien yang cukup besar pada awal simulasi dengan akhir simulasi. Hal ini disebabkan perpindahan kalor pada saat awal waktu T_{in} lebih besar dimana kalor di *transfer* ke HTF yang ada di dalam tabung terlebih dahulu, sedangkan semakin lama waktu gradien temperatur T_{in} dan T_{out} tidak terlalu besar. Waktu yang dibutuhkan agar temperatur HTF sama dengan temperatur HTF *inlet* yakni 4,5 menit.

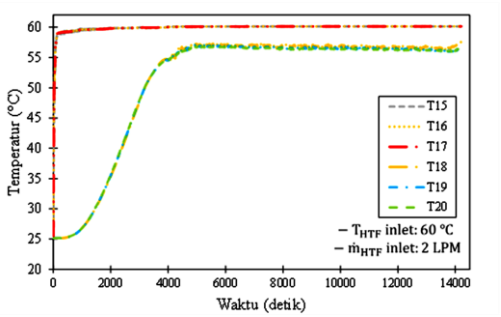


Gambar 5. Perubahan temperatur *inlet* dan *outlet* di dalam alat penukar kalor

3.2. Pengaruh Temperatur HTF Masuk Terhadap Temperatur HTF Di Dalam *Shell*

Gambar 6 menunjukkan perubahan temperatur HTF di titik termokopel T15, T16, T17, T18, T19, dan T20. Penentuan titik termokopel terdapat di Gambar 3, dimana tabung HTF bagian atas terdiri dari titik termokopel T15-T17, sedangkan bagian bawah tabung terdiri dari titik termokopel T18-T20. Gambar 6 juga menunjukkan bahwa pola kenaikan kurva temperatur diawali titik termokopel T15, T16, T17, T18, T19, dan terakhir T20. Terkait waktu yang dibutuhkan agar temperatur antara tabung

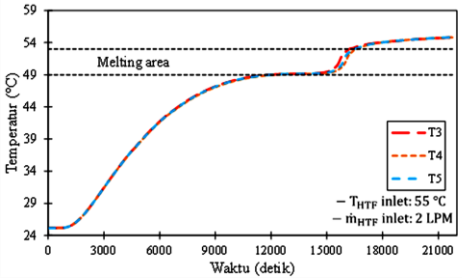
HTF di dalam *shell* bagian atas (T15-T17) dengan tabung HTF di dalam *shell* bagian bawah (T18-T20) seragam di dalam sistem diasumsikan ketika kondisi temperatur ≥ 52°C.



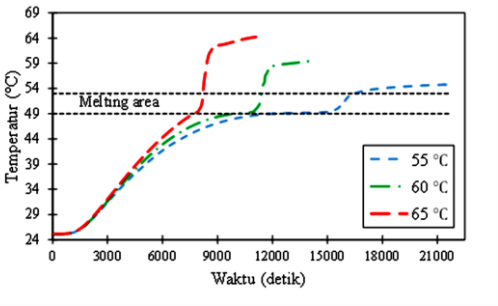
Gambar 6. Evolusi Temperatur HTF pada T_{HFT} *Inlet*

3.3. Pengaruh Variasi Temperatur HTF *Inlet* Terhadap Pelelehan PCM Arah Aksial

Gambar 7 menunjukkan pengaruh variasi temperatur HTF *inlet* terhadap distribusi temperatur PCM arah aksial. Kenaikan kurva paling cepat terjadi pada variasi temperatur HTF *inlet* 65 ℃ dimana gradien temperatur secara rapat memasuki garis batas *solidus* pada saat waktu 8000 detik, sedangkan kenaikan kurva paling lama terjadi pada variasi temperatur HTF *inlet* 55 ℃ pada waktu 14000 detik. Gambar 7 menunjukkan bahwa kenaikan kurva temperatur pada titik termokopel T3 dan T5 terlebih dahulu mencapai temperatur *melting*, kemudian titik termokopel T4 yang letaknya terdapat di tengah-tengah arah aksial adalah yang terakhir. Gambar 8 menunjukkan variasi T_{HTF} *inlet* 65 ℃ akan membuat kurva temperatur PCM rata-rata arah aksial semakin tegak dimana waktu yang diperlukan untuk proses pelelehan akan semakin cepat, sedangkan dengan variasi T_{HTF} *inlet* 55 ℃ kurva temperatur PCM rata-rata arah aksial semakin landai.

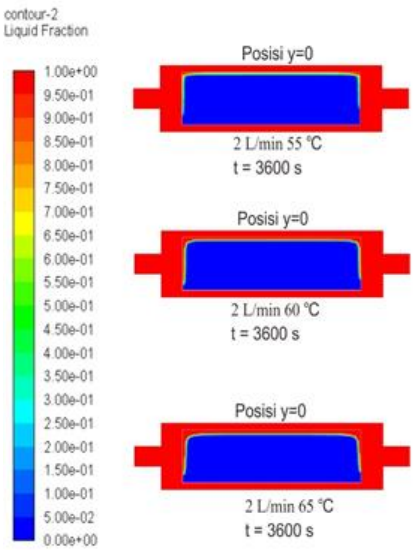


Gambar 7. Distribusi Temperatur PCM Arah Aksial pada T_{HTF} Inlet

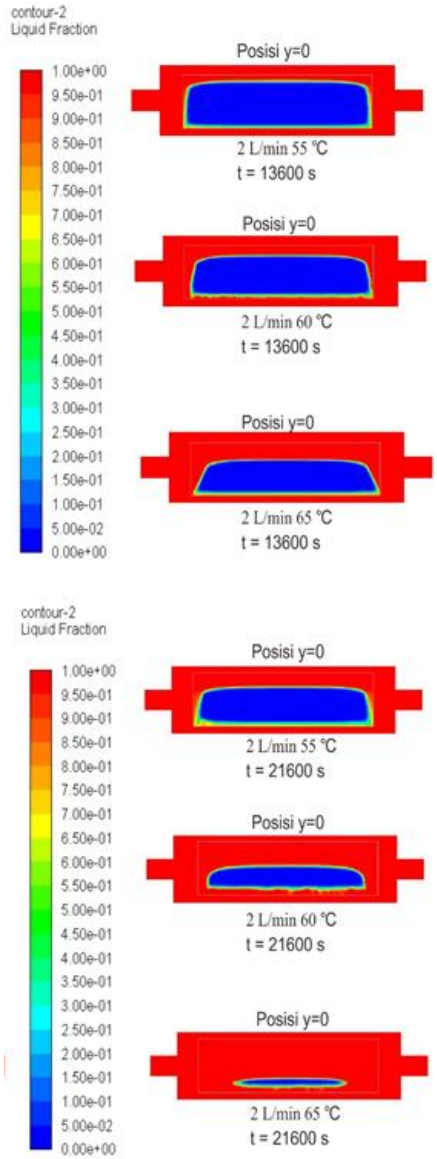


Gambar 8. Distribusi Temperatur PCM Rata-Rata Arah Aksial Pada Variasi T_{HTF} *Inlet*

Gambar 9 menyajikan kontur pelelehan PCM arah aksial pada tiga variasi temperatur air masuk (55 ℃, 60 ℃, dan 65 ℃). Terdapat kesesuaian diantara ketiga kontur pada saat waktu ke 3600 detik seperti disajikan pada Gambar 9. Hal tersebut disebabkan dengan adanya perubahan fasa pada PCM, dan nilai *Melting* PCM untuk jenis *parrafin wax*RT52 yaitu 52 ℃. Adanya perpindahan kalor konduksi membuat lapisan padat PCM pada bagian dinding tabung akan terlebih dahulu meleleh. Gambar 9 juga menunjukkan bahwa kontur pelelehan PCM arah aksial tidak terjadi secara simetris karena adanya konveksi alami. Densitas akan ringan seiring temperatur yang tinggi, sehingga dengan variasi temperatur air masuk yang tinggi maka proses pelelehan PCM akan semakin cepat terbentuk.



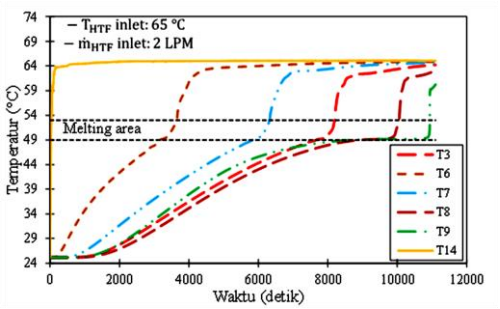
Gambar 9. Perbandingan Kontur *Liquid Fraction* PCM Arah Aksial



Gambar 9. Perbandingan Kontur *Liquid Fraction* PCM Arah Aksial (lanjutan)

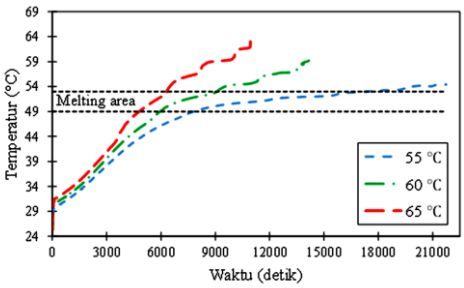
3.4. Pengaruh Variasi Temperatur HTF *Inlet* Terhadap Pelelehan PCM Arah Radial Pada Sumbu Y

Pola kenaikan kurva temperatur dari Gambar 10 menunjukkan kesamaan dimana kurva temperatur titik termokopel T6, T7 dan 3 terlebih dahulu mencapai temperatur *melting*, kemudian titik termokopel T8, dan T9 yang letaknya terdapat di bagian bawah arah radial tabung adalah yang terakhir. Kenaikan kurva temperatur PCM arah radial paling cepat terjadi ketika variasi temperatur *inlet* HTF 65 ℃ dengan waktu 3500 detik pada kurva titik termokopel T6. Semakin besar temperatur *inlet* semakin cepat perpindahan kalor ke arah radial. Hal tersebut, disebabkan besarnya perbedaan temperatur pada saat proses *transfer* kalor antara T14 sebagai dinding tembaga dengan T6 sebagai PCM padat seperti pada Gambar 3.



Gambar 10. Distribusi Temperatur PCM Arah Radial Sumbu Y Pada Variasi T_{HTF} *Inlet*

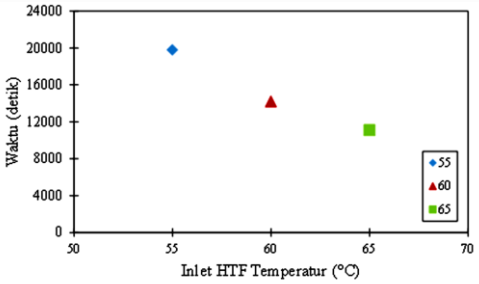
Gambar 11 menunjukkan bahwa semakin besar variasi T_{HTF} *inlet* maka grafik temperatur PCM rata-rata arah radial akan semakin cepat. Variasi T_{HTF} *inlet* 65 ℃ akan membuat kurva semakin tegak dimana waktu yang diperlukan untuk proses pelelehan akan semakin cepat, sedangkan dengan variasi T_{HTF} *inlet* 55 ℃ akan membuat kurva semakin landai seperti yang disajikan Gambar 11. Hal tersebut, tidak lepas dari perpindahan kalor baik secara konduksi di awal maupun secara konveksi alami sehingga temperatur PCM di dalam tabung akan seragam dengan temperatur T_{HTF} *inlet.*



Gambar 11. Distribusi Temperatur PCM Rata-Rata Arah Radial Sumbu Y Pada Variasi T_{HTF} *Inlet*

Variasi temperatur *inlet* HTF secara langsung mempengaruhi waktu pelelehan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12. Gambar 4.12 mengindikasikan bahwa pengaruh tingginya variasi temperatur HTF *inlet* akan mempercepat waktu pelelehan pada saat proses *charging.* Waktu pelelehan

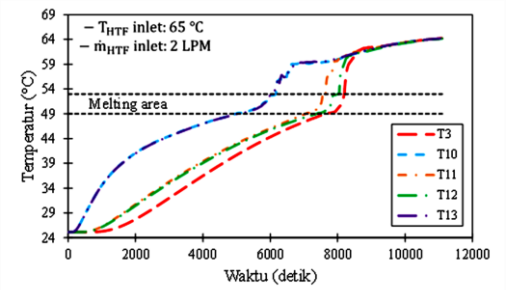
paling cepat terjadi pada variasi temperatur HTF *inlet* 65℃ yakni pada waktu ke 185 menit telah terjadi *melting* sempurna sedangkan waktu pelelehan paling lama terjadi saat variasi temperatur HTF *inlet* 55 ℃ pada waktu ke 360 menit baru terjadi *melting* sempurna.



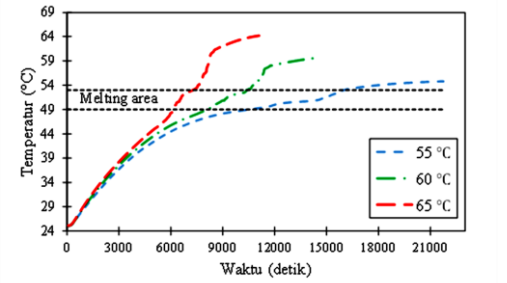
Gambar 12. Perbedaan waktu pelelehan PCM

3.5. Pengaruh Variasi Temperatur HTF *Inlet* Terhadap Pelelehan PCM Arah Radial Pada Sumbu Z

Gambar 4.13 menunjukan perubahan distribusi temperatur arah radial sumbu Z akibat variasi temperatur HTF *inlet*. Pola kenaikan dari Gambar 4.13 yakni ditandai dengan kenaikan kurva temperatur titik termokopel berturut-turut diawali T10, T11, T12, T13 dan T3 yang letaknya terdapat di bagian tengah tabung arah radial sumbu Z adalah yang terakhir. Hal tersebut dikarenakan temperatur yang tinggi pada sisi termokopel T10 sehingga waktu yang dibutuhkan untuk memasuki melting area yakni 9000 detik. Gambar 14 menunjukkan bahwa semakin besar variasi T_{HTF} *inlet* maka grafik temperatur PCM rata-rata arah radial sumbu Z akan semakin cepat. Variasi T_{HTF} *inlet* 65 ℃ akan membuat kurva temperatur semakin tegak dimana waktu yang diperlukan untuk proses pelelehan akan semakin cepat yakni pada waktu 6500 detik telah mulai memasuki melting area, sedangkan dengan variasi T_{HTF} *inlet* 55 ℃ akan membuat kurva semakin landai dimana waktu yang diperlukan untuk memasuki melting area yakni 12000 detik seperti yang disajikan pada Gambar 14. Hal tersebut, tidak lepas dari besarnya perpindahan kalor yang terjadi baik secara konduksi maupun secara konveksi alami diakibatkan besarnya perbedaan temperatur, sehingga temperatur PCM di dalam tabung akan cepat seragam dengan temperatur T_{HTF} *inlet*.



Gambar 13. Distribusi Temperatur PCM Arah Radial Sumbu Z Pada Variasi T_{HTF} Inlet

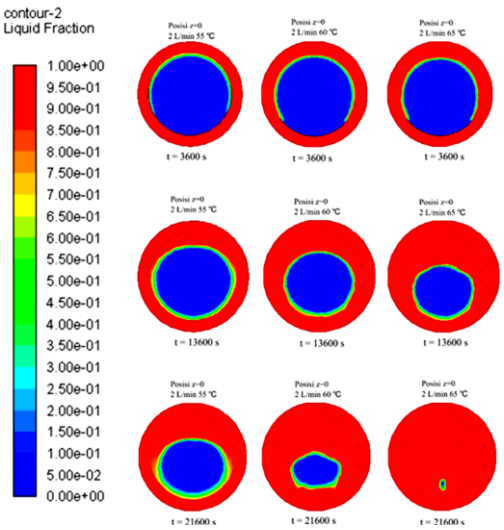


Gambar 14. Distribusi Temperatur PCM Rata-Rata Arah Radial Sumbu Z Pada Variasi T_{HTF} *Inlet*

Gambar 15 merupakan perbandingan kontur perubahan *liquid fraction* arah radial pada variasi temperatur air masuk (55 ℃, 60 ℃, dan 65 ℃). Proses dominasi *transfer* kalor ke arah radial dapat diindikasikan dari pembentukan fraksi cairan (*liquid fraction*) seperti di Gambar 15. Gambar 15 menyajikan kontur pembentukan pelelehan pada waktu 3600 detik dimana pelelehan *paraffin wax* masih di dekat lapisan dinding PCM fasa padat. Hal tersebut dipengaruhi oleh rendahnya temperatur HTF di dalam *shell* pada awal waktu dan perpindahan kalor di dalam tabung PCM masih rendah. Perbedaan temperatur yang besar membuat penyerapan kalor juga besar pada saat perpindahan kalor konduksi maupun konveksi alami sehingga pelelehan *paraffin wax* semakin bertambah seperti pada Gambar 15 saat waktu ke-13600 detik.

Gambar 15 pada waktu 13600 detik menunjukkan bahwa terbentuknya proses pelelehan PCM arah radial terjadi secara tidak simetris. Hal tersebut diakibatkan adanya perbedaan nilai densitas pada PCM sehingga sangat mempengaruhi perpindahan kalor secara konveksi alami. Hal ini sesuai dengan penelitian terdahulu diantaranya

Hosseini dkk (2014), Longeon dkk (2013), dan Rosler dkk (2011). Semakin tinggi temperatur PCM maka densitas akan semakin ringan sedangkan temperatur rendah akan mengakibatkan densitas semakin berat. Hal tersebut mengakibatkan densitas yang ringan akan bersirkulasi menuju ke bagian atas tabung. Sebaliknya densitas PCM yang berat akan menuju ke bagian bawah tabung sehingga proses pelelehan akan lebih besar dari bagian atas tabung seperti terlihat di Gambar 15. Gambar 15 menyajikan kontur pelelehan terbentuk secara sempurna tercepat terjadi pada variasi THTF *inlet* 65℃ saat waktu ke 21600 detik.



Gambar 15. Perbandingan Kontur *Liquid Fraction* PCM Arah Radial

4. KESIMPULAN

Studi simulasi numerik pada sistem TES tipe ganda konsentrik, posisi tabung bagian dalam penuh berisikan PCM telah dilakukan. Dari penelitian ini diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pelelehan *paraffin wax* RT52 arah aksial pada variasi T_{HTF} *inlet* 60 ℃ menunjukkan kurva temperatur titik termokopel T3 dan T5 terlebih dahulu mencapai temperatur *melting*, kemudian temperatur titik termokopel T4 yang letaknya terdapat di tengah-tengah arah aksial adalah yang terakhir. Kondisi tersebut disebabkan adanya gradien temperatur yang tinggi sehingga lapisan-lapisan padat *paraffin wax* RT52 yang dekat dengan dinding tabung arah aksial akan terlebih dahulu mengalami pelelehan.
2. Kontur pelelehan *paraffin wax* RT52 arah radial disimpulkan bahwa bentuk pelelehan *paraffin wax* RT52 yang terbentuk tidak simetris. Hal ini dikarenakan besarnya perbedaan temperatur antara HTF dengan PCM. Adanya *driving force* akibat konveksi alami membuat pelelehan *paraffin wax* paling banyak terbentuk pada bagian atas tabung PCM.
3. Perpindahan kalor pada proses pelelehan *paraffin wax* RT52 di dalam TES terjadi secara konduksi dan konveksi, dimana pengaruh perbedaan temperatur sangat besar. Semakin besar perbedaan temperatur maka penyerapan kalor oleh PCM juga akan semakin besar, hal ini mengakibatkan waktu terbentuknya proses pelelehan *paraffin wax* RT52 akan semakin cepat. Pelelehan *paraffin wax* RT52 tercepat diperoleh pada saat variasi temperatur HTF *inlet* 65℃ dengan waktu 185 menit, sedangkan pelelehan paling lambat terjadi pada saat variasi temperatur HTF *inlet* 55℃ dengan waktu 360 menit.
4. *Software computational fluid dynamics* ANSYS Fluent 18.0 dapat digunakan untuk mensimulasikan proses pelelehan *paraffin wax* RT52.

5. REFERENSI

Cabeza, L. (2015). *"Advances in Thermal Energy Storage Systems"*. UK: *Woodhead Publishing*.

Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Fluid Mechanics, Fundamentals and Applications.* New York: *McGraw-Hill*.

Dincer, I., & Rosen, M. (2011). *Thermal Energy Storage: Systems and Applications, Second Edition. West Sussex*: John Wiley & Sons, Ltd.

Fornarelli, F., Camporeale, S., Fortunato, B., Torresi, M., Oresta, P., Magliocchetti, L., Santo, G. (2016). CFD *Analysis of Melting Process in A Shell and Tube Latent Heat Storage for Concentrated Solar Power Plants*. *Applied Energy*, Vol 164, 711 - 722.

Hosseini, M., Rahimi, M., & Bahrampoury, R. (2014). *Experimental and Computational Evolution of a Shell and Tube Heat Exchanger as a* PCM *Thermal Storage System*. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol 50, 128 - 136.

Jiji, L. (2006). *Heat Convection, Second Edition.* Berlin: *Springer*.

Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2007). *Solar Energy Storage using Phase Change Materials*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, 1913 - 1965.

Longeon, M., Soupart, A., Fourmingue, J.-F., Bruch, A., & Marty, P. (2013). *Experimental and Numerical Study of Annular* PCM *Storage in the Presence of Natural Convection*. *Applied Energy*, Vol 112, 175 - 184.

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.

Regin, A., Solanki, S., & Saini, J. (2006). *Latent Heat Thermal Energy Storage using Cylinder Capsule: Numerical and Experimental investigations*. *Renewable Energy*, Vol 31, 2025 - 2041.

Rosler, F., & Bruggerman, D. (2011). *Shell and Tube Latent Heat Thermal Energy Storage: Numerical Analysis and Comparison with Experiments*. *Heat Mass Transfer*, Vol 47, 1027 - 1033.

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.

Sharma, S., & Sagara, K. (2005). *Latent Heat Storage Materials and Systems*: *A Review*. *International Journal of Green Energy*, Vol. 2, 1 - 56