

SIMULASI NUMERIK PROSES PELELEHAN *PARAFFIN WAX* PADA UNIT PENYIMPAN ENERGI TERMAL TIPE PIPA GANDA KONSENTRIK

*Suhanan^a, Muhammad Nadjib^b, Pathur Razi Ansyah^c, Fajar Anggara^d

^aDepartemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55581

^bProgram Studi S3 Ilmu Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55581

^cProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jl. Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta 55183

^dProgram Studi S2 Ilmu Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55581

*E-mail: suhanan@ugm.ac.id

ABSTRAK

Phase change material (PCM) dikenal memiliki densitas energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan material penyimpan kalor sensibel. Oleh karena itu, PCM menarik diaplikasikan pada pemanas air tenaga surya (PATS) yang umumnya menggunakan air sebagai penyimpan energi termal. Penelitian terakhir untuk sistem PATS *thermosyphon* belum dapat mengidentifikasi perilaku termal PCM pada arah radial dan aksial. Selain itu, tidak diketahui temperatur PCM saat terjadi pelelehan karena sumber kalornya berfluktuasi. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki perilaku termal proses pelelehan *paraffin wax* secara numerik di dalam pipa ganda konsentrik dengan sumber kalor yang konstan. Simulasi numerik dilakukan pada penyimpanan energi termal berbentuk pipa ganda konsentrik. *Paraffin wax* dimasukkan pada pipa bagian dalam sedangkan air sebagai *heat transfer fluid* (HTF) dialirkan di bagian *annulus*. Termokopel dipasang di beberapa tempat baik sisi HTF maupun sisi PCM. *Software* yang dipakai adalah ANSYS FLUENT 17. Proses simulasi dilakukan dengan membuat *meshing*, menginput persamaan dan kondisi batasnya, *setting* penghitungan jumlah iterasi serta batas konvergensi dan dilanjutkan dengan pengambilan data temperatur selama proses *charging*. Simulasi menggunakan variasi temperatur HTF *input* dan laju aliran massanya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa proses pelelehan PCM tidak terjadi secara isothermal. Transfer kalor ke PCM saat awal *charging* terjadi secara konduksi dan berlangsung cepat yang diakibatkan oleh besarnya gradien temperatur di arah radial pada fasa padat. Pembentukan fraksi cairan di sepanjang sisi luar PCM terjadi sejak awal proses *charging*. Bilangan Stefan mempunyai pengaruh yang besar terhadap proses pelelehan PCM.

Kata kunci: PCM, PATS, *paraffin wax*, proses *charging*, proses pelelehan

1. PENDAHULUAN

Karakteristik khas aplikasi energi termal matahari adalah adanya ketidaksesuaian antara waktu pembangkitan energi dan pemakaiannya. Kondisi ini dapat diatasi dengan menggunakan penyimpanan energi termal (*thermal energy storage*, TES) yang berfungsi untuk menjembatani ketidaksesuaian tersebut [1]. Penggunaan penyimpanan energi memberi keuntungan yang signifikan seperti: mengurangi konsumsi dan harga energi; melestarikan energi fosil; mengurangi *initial cost*; meningkatkan fleksibilitas operasional; dan mengurangi emisi polutan seperti CO₂ [2].

Metode penyimpanan energi termal ada tiga jenis yaitu secara laten, sensibel dan *thermochemical* [3]. Di antara ketiga metode tersebut, penyimpan kalor laten (*latent heat storage*, LHS) merupakan metode yang efektif untuk pengelolaan energi termal [4]. Material LHS adalah berupa *phase change materials* (PCM) yang memiliki keuntungan antara lain: densitas energinya besar; penyimpanan kalornya tinggi; beroperasi pada temperatur yang moderat [5]. Salah satu material LHS adalah *paraffin wax* yang mempunyai karakteristik seperti: harganya murah, densitas energinya cukup tinggi (~ 200 kJ/kg), dan konduktivitas termalnya rendah (~ 0,2 W/m.°C) [6]; temperatur leleh beberapa produk *paraffin wax* bervariasi antara 8 sampai 106 °C [7]; tidak berbahaya dan tidak reaktif [8]; sifat termalnya stabil di bawah 500 °C [9]; dan ketahanan siklusnya cukup handal karena selama pengulangan 1500 siklus termal tidak terjadi penurunan secara tetap terhadap titik lelehnya [10].

PATS adalah contoh alat yang mengkonversi energi matahari menjadi energi termal. PATS memiliki tangki sebagai penyimpan energi termal. Selama ini material penyimpan energi termal pada PATS adalah air yang dikenal mempunyai sifat perpindahan kalor yang baik dan harganya murah. Namun begitu menurut referensi [11], penggunaan air memiliki kekurangan yaitu densitas energinya rendah sehingga cenderung memiliki karakteristik sistem yang berat. Disamping itu, masalah yang sering muncul pada PATS adalah korosi dan kebocoran karena pengaruh temperatur operasional yang tinggi.

Referensi [1] kembali menyatakan bahwa dalam mendesain TES dibutuhkan sistem yang memiliki densitas energi tinggi dimana sistem mampu menyimpan energi sebanyak-banyaknya. Mempertimbangkan sifat *paraffin wax* di atas dan konsep desain konstruksi sistem TES maka material ini menarik untuk diaplikasikan pada sistem PATS. *Paraffin wax* memungkinkan diintegrasikan bersama air sebagai material penyimpan kalor pada PATS.

Penelitian eksperimental penggunaan PCM pada PATS sistem aktif telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Penambahan PCM pada tangki TES memberikan kontribusi positif, seperti: berpotensi mengurangi volume tangki [12]; prestasi termal kombinasi LHS dan SHS lebih baik daripada sistem konvensional [13]; memberikan peningkatan unjuk kerja termal pada tangki [14]; dan penambahan PCM pada kolektor matahari mampu menstabilkan temperatur yang keluar dari kolektor [15]. Penggunaan PCM pada PATS sistem pasif *thermosyphon* belum banyak ditemui. Nadjib dan Suhanan [16] pernah melakukan penelitian eksperimental untuk PATS domestik *thermosyphon* yang mengintegrasikan *paraffin wax* dan air sebagai penyimpan kalor. Fokus penelitian ini adalah tentang penyimpanan energi termal yang berasal dari air dan *paraffin wax* selama proses *charging*. Nadjib dan Suhanan [17] juga melakukan penelitian serupa yang mengkaji aspek perpindahan kalor di dalam tangki TES sistem PATS *thermosyphon*. Dalam penelitian terakhir ini, perilaku perpindahan kalor dipelajari dengan menganalisis evolusi temperatur antara air dan *paraffin wax* selama proses *charging* serta membandingkan kecepatan pemanasan masing-masing. Keterbatasan titik pengambilan data temperatur *paraffin wax* yang hanya pada arah aksial kapsul dan kapsulnya yang panjang menjadikan penelitian ini tidak dapat menjawab transfer kalor ke arah radial. Disamping itu, proses pelelehan tidak dapat dipastikan kapan terjadi karena sumber kalornya menggunakan *heat flux* yang berfluktuasi dimana eksperimen dilakukan secara *outdoor*.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari karakteristik proses *charging* pada kapsul berbentuk silinder yang berisi *paraffin wax* di dalam unit TES skala kecil baik dalam arah radial maupun aksial dengan menggunakan simulasi numerik. Unit TES berbentuk pipa ganda konsentrik dimana *paraffin wax* berada di pipa bagian dalam.

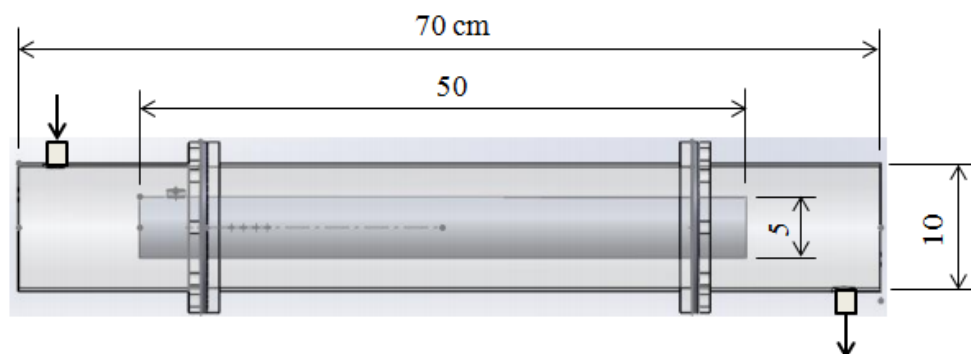
2. MATERIAL DAN METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan material berupa air sebagai HTF dan *paraffin wax* sebagai PCM. *Paraffin wax* yang dipakai adalah jenis organik yaitu RT52 dengan sifat termofisik diberikan pada Tabel 1.

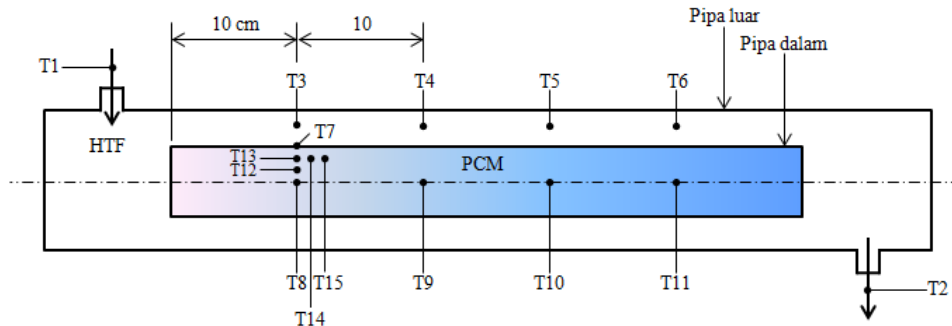
Model TES yang digunakan adalah seperti pada Gambar 1. Pipa luar dan pipa dalam terbuat dari akrilik. Pipa dalam berukuran panjang 50 cm, diameter luar 5 cm dan diameter dalamnya 4,4 cm. Pipa luar panjangnya 70 cm, diameter luar 10 cm dan diameter 9,4 cm. Pipa bagian dalam berisi PCM sebanyak 0,64 kg sedangkan air panas dialirkan di sisi *annulus*. HTF mengalir dari bagian atas pipa luar dan keluar di bagian bawah. Termokopel dipasang di beberapa titik baik sisi HTF maupun sisi PCM seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Termokopel T3 – T6 diletakkan di tengah-tengah ruang *annulus*. Jarak termokopel T8 – T12, T12 – T13, T13 – T7, T13 – T14 dan T14 – T15 adalah sama. Peletakan termokopel T13, T14 dan T15 adalah sejajar sumbu aksial pipa. HTF disirkulasikan ke dalam unit TES dengan laju aliran massa sebesar 2 LPM, 3 LPM dan 4 LPM. Temperatur HTF *inlet* yang digunakan adalah 55 °C, 59 °C dan 63 °C.

Tabel 1. Sifat termofisik *paraffin wax* RT52 [14].

Sifat-sifat	Harga			
	Minimum	Main peak	Maksimum	Rata-rata
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.K
Massa jenis:				
- Cair				0,88 kg/liter
- Padat				0,76 kg/liter
Konduktivitas termal (padat dan cair)				0,2 W/m.K



Gambar 1. Penyimpanan energy termal.



Gambar 2. Posisi penempatan termokopel.

Untuk menyederhanakan perhitungan, model dibuat dalam 2 dimensi dengan asumsi sebagai berikut:

- Ekspansi volume PCM saat pelelehan diasumsikan seperti spesifikasi teknis pabrik yaitu 16% [18].
- PCM dianggap homogen dan isotropik.
- HTF adalah fluida inkompresibel dan berlaku sebagai fluida Newtonian.
- Temperatur dan laju aliran massa HTF dianggap konstan.
- Temperatur awal HTF dan PCM adalah sama.
- Rugi-rugi termal dari TES ke lingkungan diabaikan.

Berdasarkan asumsi-asumsi di atas maka persamaan yang digunakan adalah sebagaimana tertera di bawah ini.

Persamaan energi:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \rho v H = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \tag{1}$$

$$H = h + fL \tag{2}$$

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

$$f = \begin{cases} 0 & T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & T_{solidus} \leq T \leq T_{liquidus} \\ 1 & T > T_{liquidus} \end{cases} \tag{4}$$

Persamaan (1) sampai (4) digunakan untuk menyusun persamaan energi.

$$\frac{\partial \rho(h + fL)}{\partial t} + \nabla \rho v(h + fL) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \tag{5}$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \rho v h = \nabla \cdot (k \nabla T) - \frac{\partial \rho f L}{\partial t} - \nabla \rho v f L + S \tag{6}$$

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

$$S = \frac{(1 - f)^2}{f^3 + \varepsilon} A_{mus h} (\vec{v} - \vec{v}_p) \tag{7}$$

dengan $\varepsilon = 0,001$ dan \vec{v}_p adalah *pull velocity* yang biasa digunakan untuk kecepatan pembuatan *casting* tetapi untuk penelitian ini dianggap berharga nol.

Persamaan momentum:

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \rho v v = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + \rho g + \frac{(1 - f)^2}{f^3 + \varepsilon} A_{mus h} \vec{v} \tag{8}$$

Persamaan kontinuitas:

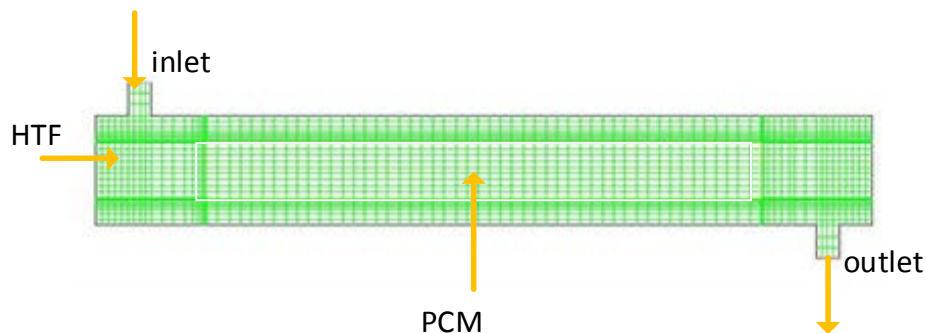
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \tag{9}$$

Kondisi batas yang diambil adalah seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Kondisi batas

Laju aliran massa HTF (LPM)	Kondisi batas		Temperatur HTF (°C)	Kondisi batas	
	V inlet	V outlet		T inlet	T outlet
2	0.01 m/s	default			default
3	0.16 m/s	default	59	59	default
4	0.212 m/s	default			default
		default	55	55	default
3	0.16 m/s	default	59	59	default
		default	63	63	default

Meshing dilakukan dengan *skewness* kurang dari 0,6 dan *aspect ratio* kurang dari 5. Hasil *meshing* TES disajikan pada Gambar 3.

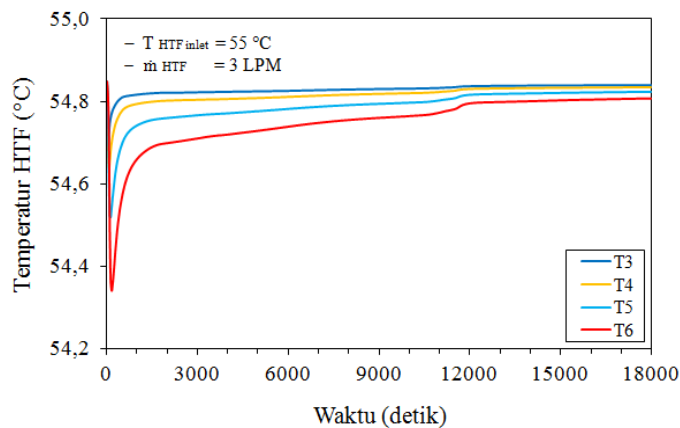


Gambar 3. Hasil *meshing*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Evolusi temperatur HTF

Gambar 4 menunjukkan perubahan temperatur HTF di dalam *annulus* bagian atas seiring dengan waktu pada proses *charging* selama 300 menit. Temperatur HTF adalah konstan yakni 55 °C sedangkan laju aliran massanya 3 LPM. Saat awal proses *charging* terjadi penurunan temperatur HTF yang tajam. Penurunan tajam ini disebabkan terjadi transfer kalor yang besar antara HTF dan PCM melalui dinding pipa dalam akibat tingginya perbedaan temperatur antara HTF dan PCM. Seiring dengan bertambahnya waktu, perbedaan temperatur antara HTF dan PCM berkurang sehingga transfer kalor ke PCM semakin rendah. Oleh karena itu temperatur HTF perlahan naik. Gambar 4 juga memperlihatkan bahwa semakin jauh dari pipa *inlet*, temperatur HTF semakin rendah dengan penurunan temperatur antara termokopel semakin besar. Fenomena ini terjadi karena begitu memasuki ruang *annulus*, energi termal HTF diserap oleh PCM sehingga pada arah aksial temperaturnya berkurang.



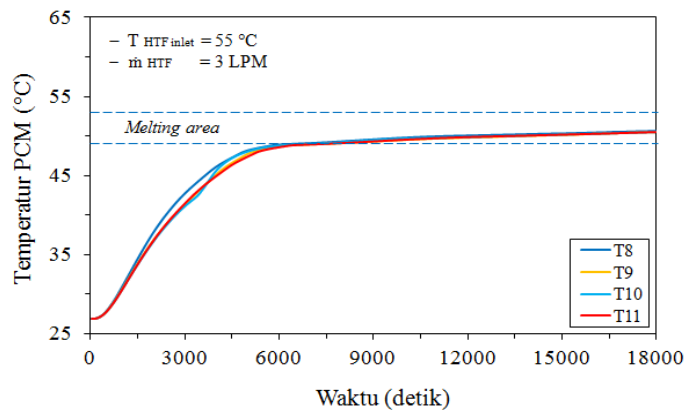
Gambar 4. Evolusi temperatur HTF.

3.2. Evolusi temperatur PCM

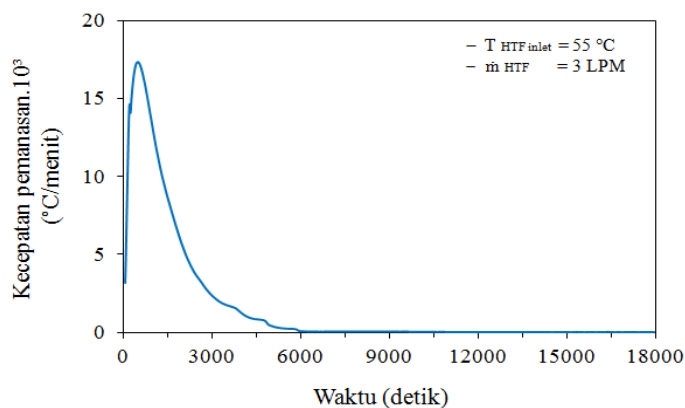
Evolusi temperatur PCM pada arah aksial disajikan dalam Gambar 5. Proses *charging* terjadi selama 300 menit dengan temperatur HTF *inlet* konstan sebesar 55 °C dan laju aliran massanya 3 LPM. Menurut kurva pelelehan di Gambar 5, pada awalnya terjadi kenaikan temperatur yang besar kemudian menurun dan akhirnya sampai di daerah pelelehan dengan kenaikan temperatur yang rendah. Transfer kalor diawali dari HTF yang berada di *annulus* menuju pipa dalam, kemudian diteruskan ke PCM sehingga akan menaikkan temperaturnya dari kondisi awal sampai temperatur tertentu. Saat awal proses *charging*, kalor sensibel ditransfer dari dinding pipa dalam ke PCM padat secara konduksi dimana temperatur PCM naik dengan cepat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Transfer kalor sensibel di awal proses adalah besar karena adanya perbedaan temperatur yang tinggi antara dinding pipa dalam dengan PCM padat. Walaupun konduktivitas termal PCM rendah, transfer kalor terjadi dengan cepat akibat tingginya gradien temperatur. Begitu kalor sensibel diterima PCM, mulailah terbentuk lapisan tipis cairan di daerah antara dinding pipa dalam dan PCM padat [19]. Semakin besar transfer kalor yang terjadi maka semakin banyak fraksi cairan yang terbentuk dan transfer kalor secara konveksi alamiah mulai terjadi. Setelah transfer kalor meningkat pesat, PCM mulai memasuki fase pelelehan dengan tetap terjadi kenaikan temperatur walaupun rendah. Gambar 5 juga menunjukkan daerah pelelehan PCM sebagaimana diinformasikan dalam Tabel 1. Kurva tersebut menggambarkan bahwa proses pelelehan *paraffin wax* tidak terjadi secara isothermal. Dengan kata lain, PCM jenis ini bukan termasuk material murni.

Menurut Gambar 5, pelelehan lebih cepat terjadi di daerah yang lebih dekat dengan pipa *inlet*. Hal ini ditunjukkan dengan laju rata-rata kenaikan temperatur (*average rate of temperatur rise, ARTR*) yang berbeda untuk setiap posisi termokopel di arah aksial. ARTR ditentukan dengan mencari selisih temperatur antara 2 waktu dan dibagi lama waktu antara interval tersebut kemudian dibuat rata-rata selama proses *charging*. ARTR untuk termokopel T8, T9, T10 dan T11 masing-masing adalah $1,653 \times 10^{-3}$ °C/menit, $1,572 \times 10^{-3}$ °C/menit, $1,559 \times 10^{-3}$ °C/menit dan $1,556 \times 10^{-3}$ °C/menit. Harga ARTR yang tinggi mengindikasikan transfer kalor yang lebih besar.

Kenaikan transfer kalor ke PCM yang besar seperti disebutkan di atas, dapat dijelaskan dengan Gambar 6 yaitu grafik ARTR untuk termokopel T8. Gambar 6 menunjukkan bahwa harga ARTR meningkat pesat sampai menit ke-7,5 dengan harga tertinggi sebesar $17,37 \times 10^{-3}$ °C/menit dan kemudian terjadi penurunan perlahan-lahan sampai sekitar menit ke-98,5. Setelah itu harga ARTR menurun sangat rendah dan hampir konstan. Penurunan ARTR setelah menit ke-7,5 menjelaskan bahwa transfer kalor konduksi tidak lagi memegang peranan utama karena mulai terjadi konveksi alamiah. Harga ARTR sesudah menit ke-98,5 yang hampir konstan menginformasikan bahwa transfer kalor tidak lagi terjadi secara sensibel tetapi digunakan untuk mengubah fase PCM.



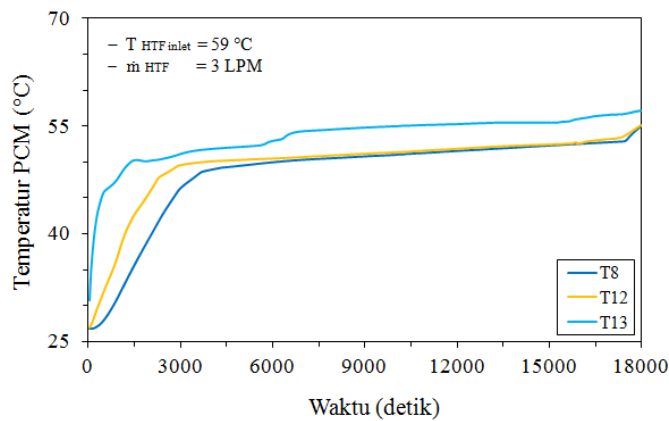
Gambar 5. Evolusi temperatur PCM pada arah aksial.



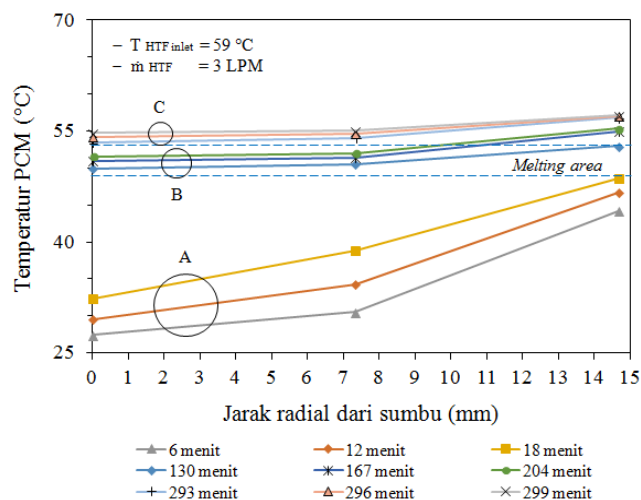
Gambar 6. Kecepatan rata-rata kenaikan temperatur termokopel T8.

Evolusi temperatur PCM pada arah radial dengan temperatur HTF *inlet* sebesar 59 °C dan laju aliran massa 3 LPM diberikan pada Gambar 7. Sebagaimana terlihat jelas di Gambar 7, temperatur termokopel yang dekat dengan pipa dalam (T13) naik dengan cepat dan terus bertambah pada saat terjadi proses pelelehan. Hal ini berbeda dengan termokopel di bawahnya yaitu T12 dan T8 dimana kenaikan temperaturnya di awal tidak secepat termokopel T13 serta kenaikan temperaturnya selama proses pelelehan lebih rata. Awal pelelehan termokopel T13 dicapai pada menit ke-19,5 dan berakhir di menit ke-101,5. Untuk termokopel T12, pelelehan dimulai di menit ke-46 dan berakhir pada menit ke-273,5. Proses pelelehan termokopel T8 lebih lama lagi yaitu awal pelelehan terjadi pada menit ke-68 dan berakhir di menit ke-292. PCM bagian terluar luar lebih dahulu meleleh. Daerah terdepan pelelehan (*melting front*) bergerak ke bagian dalam menuju pusat. Oleh karena itu, semakin ke arah sumbu aksial pipa proses pelelehannya semakin lambat. Hasil ini sama dengan yang telah dilaporkan oleh peneliti terdahulu [20].

Gambar 8 menunjukkan distribusi temperatur PCM pada waktu dan jarak radial pipa dalam yang berbeda selama proses pelelehan. Grup A mewakili waktu pelelehan yang terjadi pada menit ke-6, menit ke-12 dan menit ke-18. Waktu pelelehan untuk grup B adalah menit ke-130, menit ke-167 dan menit ke-204. Grup C merepresentasikan waktu pelelehan pada menit ke-293, menit ke-296 dan menit ke-299. Gambar 8 menjelaskan bahwa profil gradien temperatur untuk grup A lebih besar daripada grup B dan grup C. Penyebab terjadinya fenomena ini adalah sebagai berikut. Temperatur untuk grup A berada di bawah batas pelelehan dan PCM di daerah itu berada pada fasa padat. Transfer kalor di daerah ini berlangsung secara konduksi yang ditandai oleh besarnya gradien temperatur meskipun konduktivitas termal PCM rendah. Seiring dengan waktu, temperatur PCM bertambah besar secara bertahap menuju batas temperatur pelelehan dan akhirnya mulai terjadi pelelehan. Proses pelelehan ini menyerap kalor yang besar untuk mengubah fasa PCM dengan kenaikan temperatur yang rendah. Oleh karena itu, profil gradien temperatur di grup B lebih rendah dibandingkan dengan grup A. Kemudian PCM tetap menyerap kalor sehingga pembentukan fasa cair lebih banyak. Pada tahap ini (grup C) proses transfer kalornya didominasi oleh konveksi alamiah dengan gradien temperatur jauh lebih rendah dimana yang lebih berperan sebagai *driving force* adalah koefisien transfer kalor konveksi.



Gambar 7. Evolusi temperatur PCM pada arah radial.



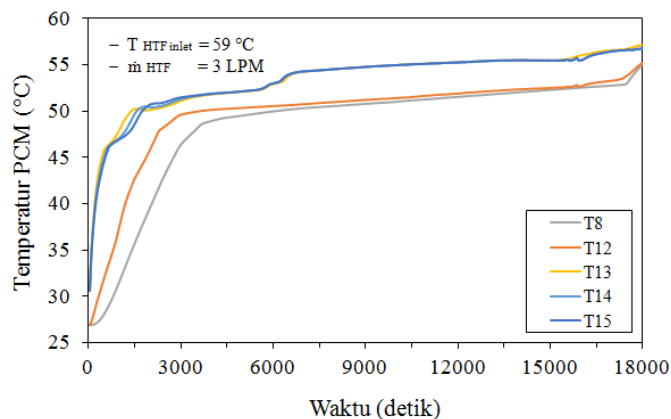
Gambar 8. Distribusi temperatur PCM terhadap jarak radial dan waktu.

3.3. Transfer kalor arah radial dan aksial

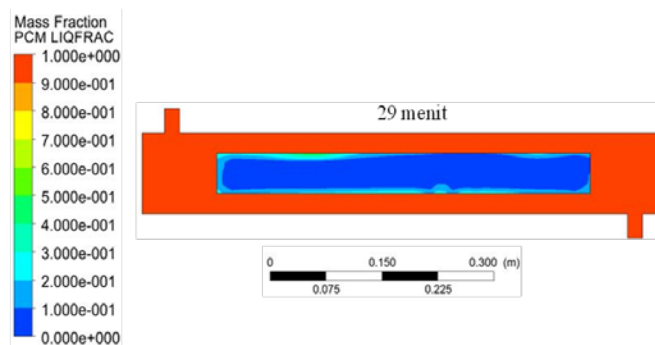
Transfer kalor di suatu titik daerah PCM dapat terjadi pada arah radial dan aksial. Gambar 9 memberikan kurva pelelehan beberapa titik di arah radial dan aksial dengan titik referensi termokopel T13. Arah radial dan aksial dari

termokopel 13 adalah seperti dijelaskan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 9, urutan waktu pelelehan setelah T13 dari yang tercepat adalah titik termokopel T14, T15, T12 dan T8. Kondisi ini menunjukkan bahwa transfer kalor ke arah radial dari termokopel T13 lebih rendah daripada arah aksial. Sebagaimana diketahui bahwa pembentukan *melting front* dimulai dari PCM sisi luar menuju sisi dalam. Energi termal yang tersedia untuk menaikkan temperatur titik T14 dan T15 jauh lebih besar daripada titik T12 dan T8 karena posisinya yang lebih dekat dengan pipa dalam. Oleh karena itu titik T14 dan T15 lebih cepat terbentuk *melting front*.

Peristiwa dominasi transfer kalor ke arah aksial dapat ditunjukkan oleh pembentukan fraksi cairan (*liquid fraction*) seperti disajikan dalam Gambar 10. Gambar tersebut diperoleh dengan temperatur HTF *inlet* sebesar 59 °C, laju aliran massa 3 LPM dan waktu *charging* selama 29 menit. Terlihat di Gambar 10, cairan mulai terbentuk di sekitar permukaan pipa dalam di sepanjang arah aksialnya baik di sisi atas maupun sisi bawah.



Gambar 9. Evolusi temperatur PCM radial dan aksial.



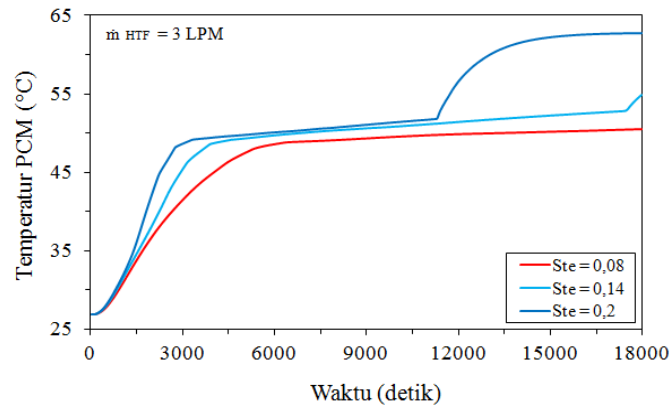
Gambar 10. Liquid fraction.

3.4. Pengaruh temperature HTF inlet

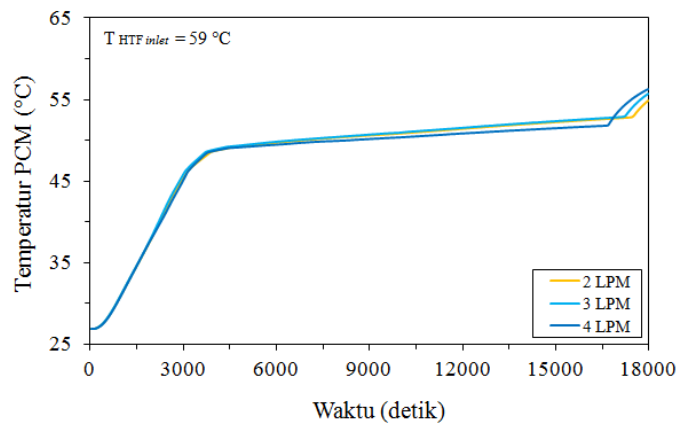
Gambar 11 menyajikan perbedaan evolusi temperatur PCM untuk termokopel T11 akibat perubahan temperatur HTF *inlet* sebesar 55 °C, 59 °C dan 60 °C dengan laju aliran massa konstan sebesar 3 LPM. Parameter besarnya temperatur *inlet* dapat diekspresikan dengan bilangan Stefan (*Ste*) yaitu perbandingan antara kapasitas termal zat padat yang meleleh dengan kalor laten [21]. Berdasarkan sifat fisis PCM sebagaimana tercantum dalam Tabel 1, harga bilangan Stefan untuk temperatur HTF *inlet* tersebut masing-masing sebesar 0,08, 0,14 dan 0,2.

Gambar 11 menunjukkan bahwa temperatur HTF *inlet* berpengaruh signifikan terhadap proses pelelehan PCM. Awal pelelehan dengan harga bilangan Stefan 0,08, 0,14 dan 0,2 masing-masing terjadi pada menit ke-121, menit ke-73 dan menit ke-53,5. Pelelehan PCM untuk bilangan Stefan 0,14 dan 0,2 masing-masing berakhir pada menit ke-292 dan menit ke-190,5, sedangkan untuk bilangan Stefan 0,08 belum kelihatan akhir pelelehan dalam pengambilan data selama 300 menit. Jadi semakin besar temperatur HTF *inlet* maka proses pelelehan semakin cepat.

Semakin besar temperatur HTF *inlet* maka semakin tinggi harga bilangan Stefan. Bilangan Stefan yang tinggi menandakan kandungan kalor sensibelnya besar. Selanjutnya PCM menerima kalor dengan jumlah yang lebih banyak sehingga mempercepat proses pelelehan. Kecepatan pelelehan sudah terlihat jelas sejak awal proses *charging* dimana *slope* kurvanya lebih tajam.



Gambar 11. Pengaruh bilangan Stefan terhadap proses pelelehan.



Gambar 12. Pengaruh laju aliran massa berbeda terhadap proses pelelehan.

3.5. Pengaruh laju aliran massa HTF

Gambar 12 menunjukkan pengaruh laju aliran massa HTF yang memasuki *annulus* terhadap pelelehan PCM untuk termokopel T11 dengan temperatur inlet HTF sebesar 59 °C. Sejak proses *charging* dimulai sampai dengan awal pelelehan tidak terlihat perbedaan yang mencolok. Perbedaan yang muncul adalah saat akhir proses pelelehan dimana untuk laju aliran massa 2 LPM, 3 LPM dan 4 LPM masing-masing terjadi pada menit ke-292, menit ke-288 dan menit ke-281,5.

Laju aliran massa yang besar berarti HTF memiliki bilangan Reynolds tinggi. Hal ini memberi kontribusi terhadap meningkatnya bilangan Nusselt sehingga pelepasan kalor oleh HTF semakin besar. Namun demikian, menurut Gambar 12 di atas pengaruh laju aliran massa HTF kurang signifikan terhadap proses pelelehan. Memperhatikan Gambar 11 dan Gambar 12, terlihat jelas bahwa perubahan temperatur HTF *inlet* memberi pengaruh yang dominan terhadap proses pelelehan dibanding dengan perubahan laju aliran massa.

4. KESIMPULAN

Telah dilakukan studi simulasi numerik pada sistem TES tipe pipa ganda konsentrik dimana pipa bagian dalamnya berisi PCM. Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Proses pelelehan PCM tidak terjadi secara isothermal. PCM yang digunakan tergolong material campuran.
- Gradien temperatur yang tinggi pada fasa padat menyebabkan terjadinya transfer kalor yang besar di arah radial meskipun konduktivitas termal PCM rendah.
- Proses pelelehan PCM lebih cepat ke arah aksial yang ditandai dengan terbentuknya fraksi cairan di bagian terluarnya sejak awal.
- Bilangan Stefan memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap proses pelelehan daripada laju aliran massa.

5. REFERENSI

- [1] Cabeza, L.F., 2015, “*Advances in Thermal Energy Storage Systems*”, Woodhead Publishing, UK.
- [2] Dincer, I. dan Rosen, M.A., 2011, “*Thermal Energy Storage: Systems and Applications*”, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex.
- [3] Akgun, M., Aydin, O. dan Kaygusuz, K., 2007, “Thermal Energy Storage Behavior of a Paraffin during Melting and Solidification”, *Energy Sources, Part A*, 29: 1315-1326.

- [4] Zhong, Y., Li, S., Wei, X., Liu, Z., Guo, Q., Shi, J., dan Liu, L., 2010, "Heat Transfer Enhancement of Paraffin Wax using Compressed Expanded Natural Graphit for Thermal Energy Storage", *Carbon*, 48: 300-304.
- [5] Zhou, D. dan Zhao, C.Y., 2011, "Experimental Investigation on Heat Transfer in Phase Change Materials (PSMs) Embedded in Porous Materials", *Applied Thermal Engineering*, 31: 970-977.
- [6] Farid, M.M., Khudair, A.M., Razack, S.A.K., Al-Hallaj, S., 2004, "A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications", *Energy Conversion & Management*, 45:1597-1615.
- [7] Kenisarin, M. dan Mahkamov, K., 2007, "Solar Energy Storage Using Phase Change Materials", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:1913-1965.
- [8] Sharma, S.D. dan Sagara, K., 2005, "Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review", *International Journal of Green Energy*, 2:1-56.
- [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*, 13:318-345.
- [10] Sharma, A., Sharma, S.D. dan Buddhi, D., 2002, "Accelerated Thermal Cycle Test of Acetamide, Stearic Acid and Paraffin Wax for Solar Thermal Latent Heat Storage Applications", *Energy Conversion and Management*, 43: 1923-1930.
- [11] Hasan, A., 1994, "Phase Change Material Energy Storage System Employing Palmatic Acid", *Solar Energy*, 52(2): 143-154.
- [12] Cabeza, L.F., Ibanez, M., Sole, C., Roca, J., Nogues, M., 2006, "Experimentation with a Water Tank Including a PCM Module", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90, 1273 – 1282.
- [13] Nallusamy, N., Sampatha, S., Velraj, R., 2007, "Experimental Investigation on a Combined Sensible and Latent Heat Storage System Integrated with Constant/Varying (Solar) Heat Sources", *Renewable Energy*, 32, 1206–1227.
- [14] Mazman, M., Cabeza, L.F., Mehling, H., Nogues, M., Evliya, H. dan Paksoy, H.O., 2009, "Utilization of Phase Change Materials in Solar Domestic Hot Water Systems", *Renewable Energy*, 34, 1639 – 1643.
- [15] Bouadila, S., Fteiti, M., Oueslati, M.M., Guizani, A., Farhat, A., 2014, "Enhancement of latent heat storage in a rectangular cavity: Solar water heater case study", *Energy Conversion and Management*, 78, 904 – 912.
- [16] Nadjib, M. dan Suhanan, 2013, "Studi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal Proses *Charging* pada Pemanas Air Tenaga Surya Tipe *Termosyphon* Menggunakan Air dan *Paraffin Wax* sebagai Material Penyimpan Kalor", *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII*, ISBN 978 979 8510 61 8, 355-359.
- [17] Nadjib, M. dan 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.
- [18] Anonymous, 2013, "*Data Sheet RT52*", Rubitherm Technologies GmbH, Version 22 April.
- [19] Jesumathy, S.P., Udayakumar, M., Suresh, S., Jegadheeswaran, S., 2014, "An experimental study on heat transfer characteristics of paraffin wax in horizontal double pipe heat latent heat storage unit", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45, 1298–1306.
- [20] Liu, Z., Sun, X., Ma, C., 2005, "Experimental investigations on the characteristics of melting processes of stearic acid in an annulus and its thermal conductivity enhancement by fins", *Energy Conversion and Management*, 46, 959–969.
- [21] Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P. dan Smyth, M., 2010, A Review of Materials, Heat Transfer and Phase Change problem Formulation for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 615–628.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada atas dukungan fasilitas sehingga penelitian dengan nomor kontrak 1569/H1.17/TMI/LK/2016 ini dapat terlaksana.