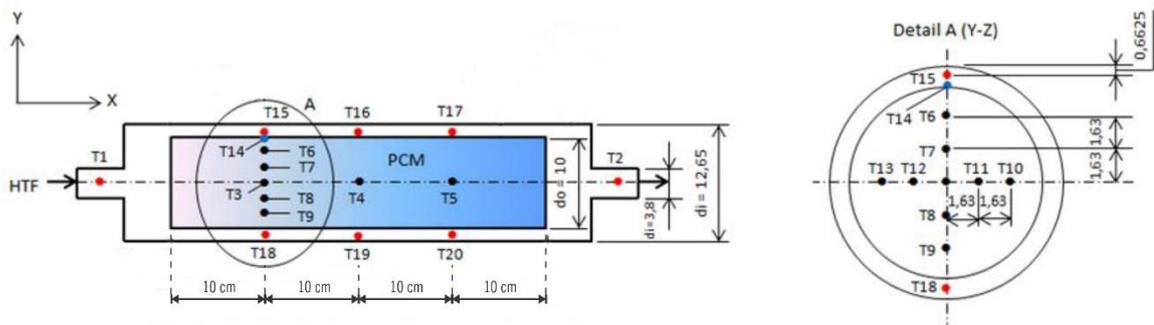


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

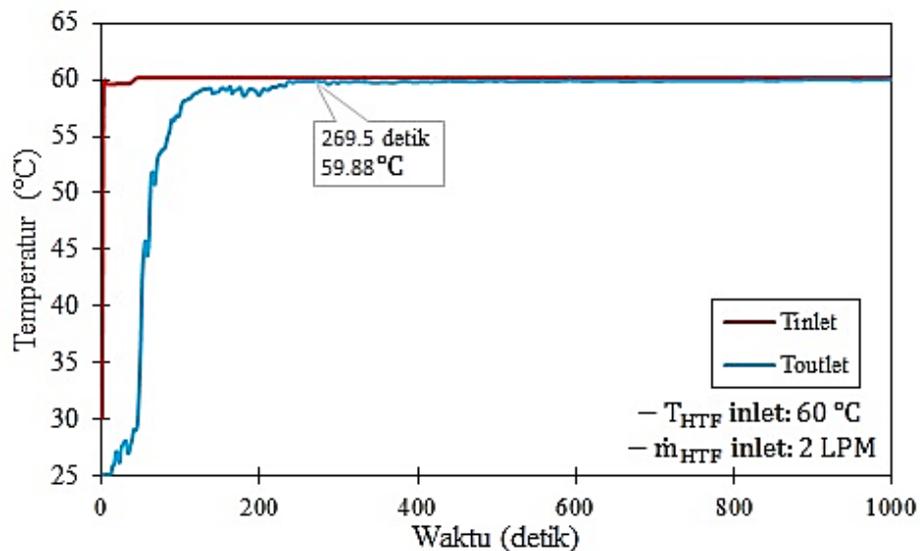
4.1. Distribusi Temperatur HTF

Perbandingan antara grafik temperatur *inlet* dan *outlet* pada simulasi diperlukan untuk mengamati distribusi temperatur dari HTF menuju PCM. Gambar 4.1 merupakan posisi penempatan titik termokopel pada desain geometri TES. Kondisi awal dalam tabung HTF diasumsikan diisi air dingin bertemperatur 25 °C yang bertujuan agar temperatur PCM seragam saat simulasi.



Gambar 4.1. Posisi penempatan titik termokopel pada desain geometri TES

Air panas sebagai HTF masuk bercampur dengan air dingin yang telah berada di dalam tabung. Gambar 4.2 menunjukkan distribusi temperatur antara T_{in} dan T_{out} pada kondisi temperatur HTF *inlet* konstan 60 °C dengan laju aliran massa 2 LPM.



Gambar 4.2. Perubahan temperatur *inlet* dan *outlet* di dalam alat penukar kalor

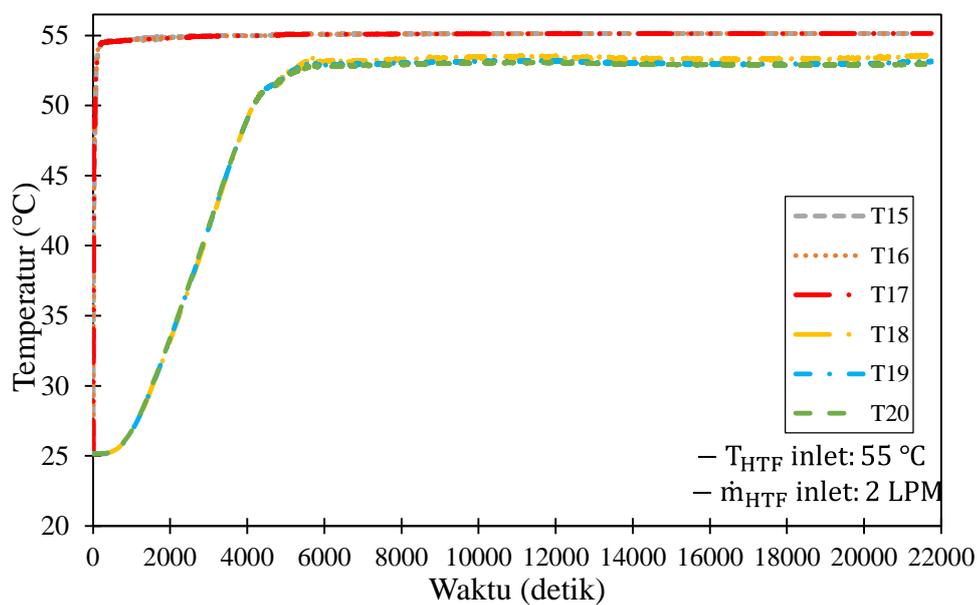
Kurva T_{in} terlihat cukup cepat mengalami kenaikan karena temperatur *inlet* pada simulasi dianggap konstan seperti pada Gambar 4.2. Gambar 4.2 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan gradien yang cukup besar pada awal simulasi dengan akhir simulasi. Hal ini disebabkan perpindahan kalor pada saat awal 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. Hal tersebut tidak lepas dari pemakaian air sebagai HTF yang merupakan kalor sensibel. Air memiliki karakteristik perpindahan kalor yang baik sehingga tidak memerlukan waktu yang terlalu lama agar HTF yang ada di dalam tabung seragam dengan $T_{HTF\ inlet}$.

4.2. Pengaruh Temperatur HTF Masuk Terhadap Temperatur HTF Di Dalam Shell

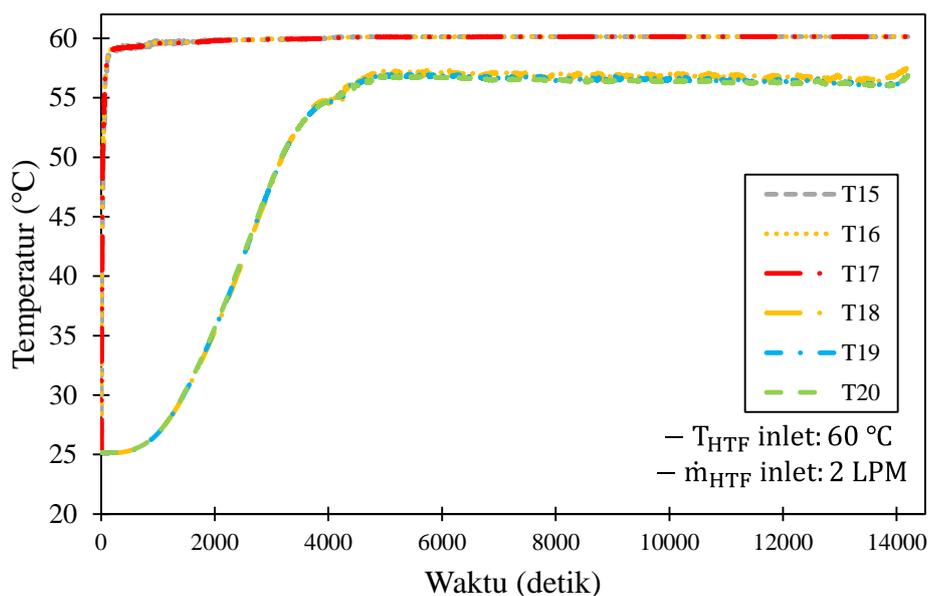
Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5 menunjukkan perubahan temperatur HTF di titik termokopel T15, T16, T17, T18, T19, dan T20. Penentuan titik termokopel terdapat di Gambar 4.1. Tabung HTF bagian atas terdiri dari titik termokopel T15-T17, sedangkan bagian bawah tabung terdiri dari titik termokopel T18-T20. Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5 menunjukkan bahwa bagian atas kurva perbedaan gradien temperatur terjadi di awal saja, seiring bertambahnya waktu temperatur T16 dan T17 akan sama dengan T15.

Perbedaan kurva temperatur antara tabung HTF di dalam *shell* bagian atas (T15-T17) dengan tabung HTF di dalam *shell* bagian bawah (T18-T20) pada Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5 terlihat cukup jauh, dimana ketiga variasi memiliki kesamaan yakni pola kenaikan kurva temperatur diawali titik termokopel T15, T16, T17, T18, T19, dan terakhir T20. Rendahnya kurva temperatur di titik termokopel T19 dan T20 dipengaruhi oleh jarak penempatan titik termokopel dari *inlet* HTF. Jika membandingkan kurva temperatur HTF di Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5 bahwa semakin besar temperatur *inlet* HTF maka kurva T15-T17 serta T18-T20 akan semakin tegak.

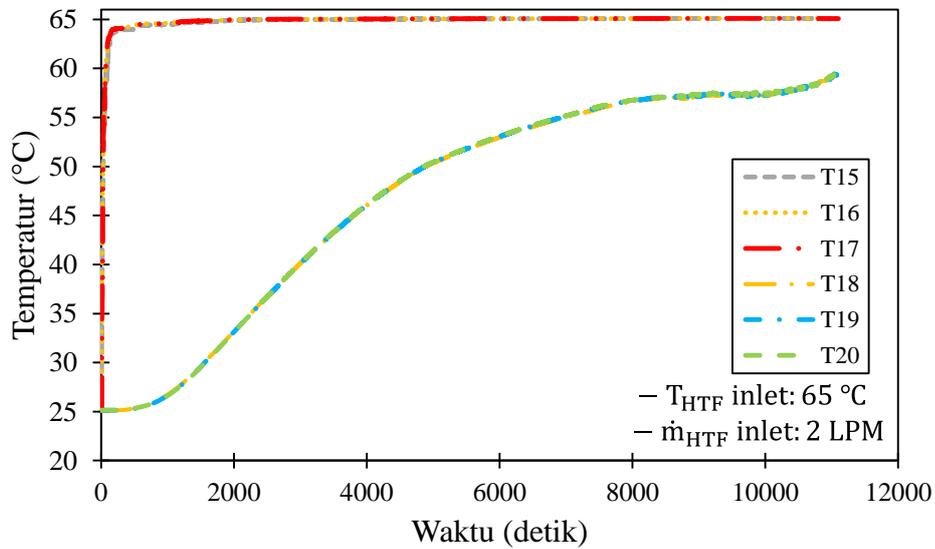
Terkait waktu yang dibutuhkan agar temperatur antara tabung HTF di dalam *shell* bagian atas (T15-T17) dengan tabung HTF di dalam *shell* bagian bawah (T18-T20) seragam di dalam sistem diasumsikan ketika kondisi temperatur $\geq 52^\circ\text{C}$. Hal tersebut tidak lepas dari pemakaian air sebagai HTF yang merupakan kalor sensibel. air memiliki karakteristik perpindahan kalor yang baik namun seiring bertambahnya waktu temperatur HTF di dalam *shell* akan di *transfer* ke tabung PCM.



Gambar 4.3. Evolusi Temperatur HTF pada $T_{\text{HTF Inlet}} 55^\circ\text{C}$

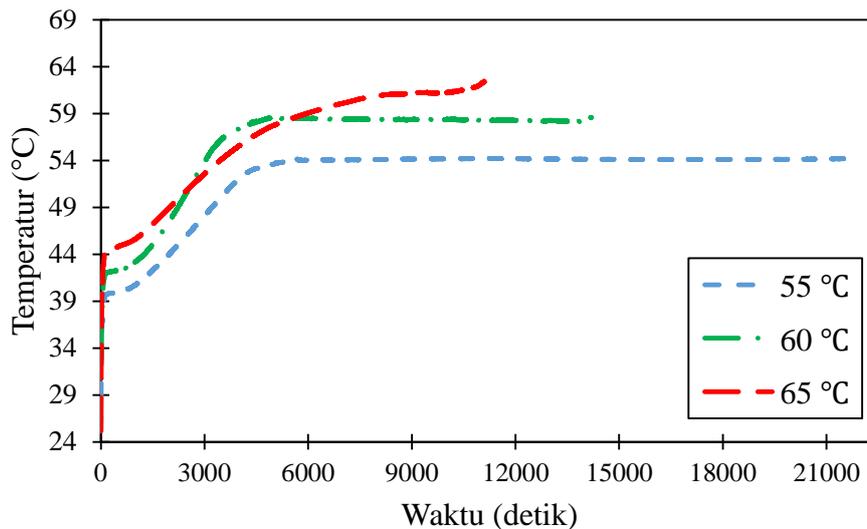


Gambar 4.4. Evolusi Temperatur HTF pada $T_{\text{HTF Inlet}} 60^\circ\text{C}$



Gambar 4.5. Evolusi Temperatur HTF pada T_{HTF} Inlet 65 °C

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa semakin besar variasi temperatur HTF *inlet* pengaruh terhadap distribusi temperatur HTF di dalam *shell* akan semakin tegak. Hal tersebut dikarenakan air memiliki karakteristik perpindahan kalor yang baik sehingga temperatur HTF di dalam *shell* akan secara cepat untuk seragam dengan temperatur HTF *inlet*. Oleh karena itu, dampak perpindahan kalor dari HTF *shell* ke *paraffin wax* dengan perbedaan temperatur yang besar maka proses pelelehan akan lebih cepat terbentuk.

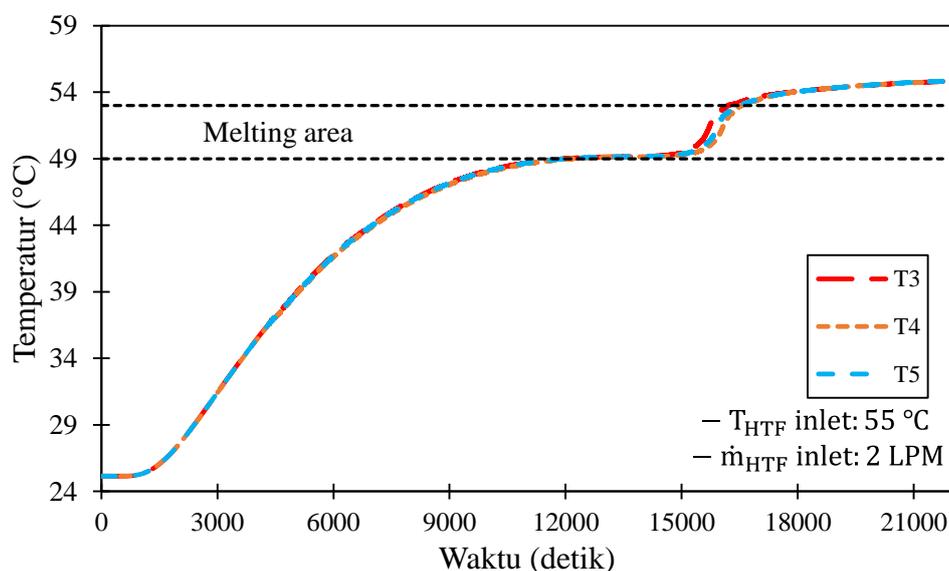


Gambar 4.6. Pengaruh T_{HTF} *inlet* Terhadap Distribusi Temperatur HTF Di Dalam *Shell*

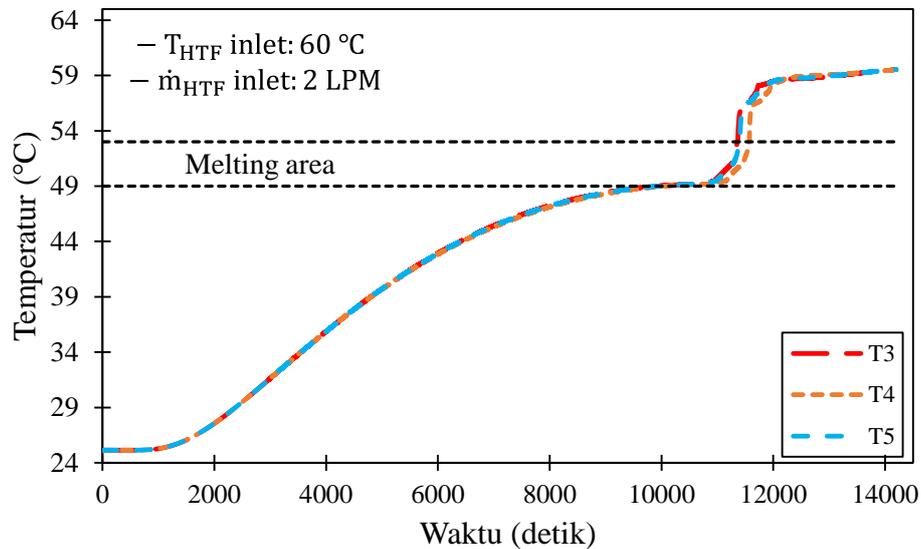
4.3. Pengaruh Variasi Temperatur HTF *Inlet* Terhadap Pelelehan PCM

Arah Aksial

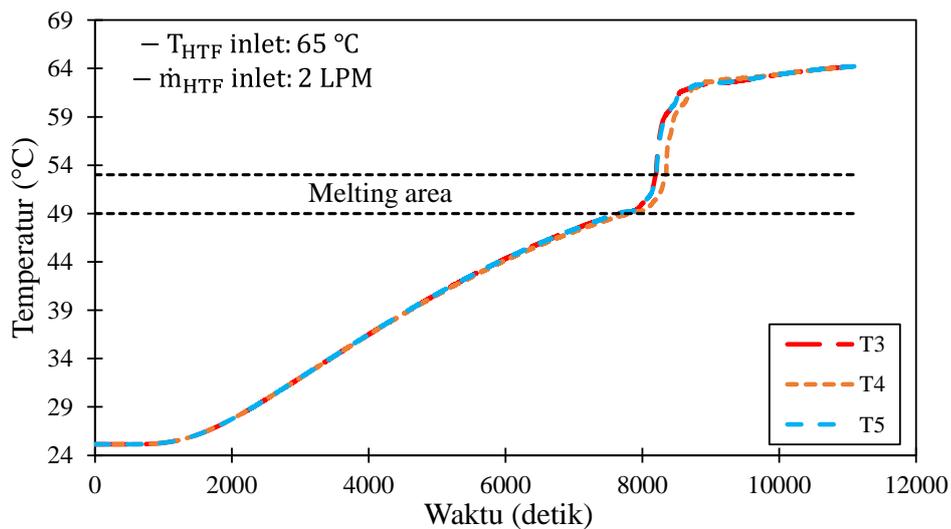
Gambar 4.7, Gambar 4.8, dan Gambar 4.9 menunjukkan pengaruh variasi temperatur HTF *inlet* terhadap distribusi temperatur PCM arah aksial. Kenaikan kurva paling cepat terjadi pada variasi temperatur HTF *inlet* 65 °C dimana gradien temperatur secara rapat memasuki garis batas *solidus* pada saat waktu 8000 detik, sedangkan kenaikan kurva paling lama terjadi pada variasi temperatur HTF *inlet* 55 °C pada waktu 14000 detik. Gambar 4.7, Gambar 4.8, dan Gambar 4.9 menunjukkan kesamaan dari ketiga grafik yakni 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. Kondisi tersebut terjadi disebabkan oleh adanya *transfer* kalor secara konveksi alami dan perbedaan temperatur. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Hosseini dkk (2014), dan Longeon dkk (2013).



Gambar 4.7. Distribusi Temperatur PCM Arah Aksial pada $T_{HTF Inlet}$



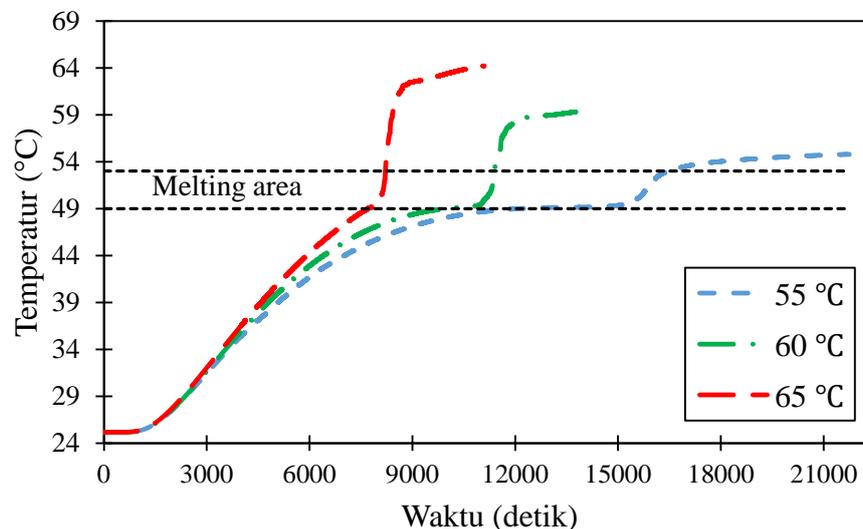
Gambar 4.8. Distribusi Temperatur PCM Arah Aksial pada T_{HTF} Inlet



Gambar 4.9. Distribusi Temperatur PCM Arah Aksial pada T_{HTF} Inlet

Gambar 4.10 menunjukkan variasi T_{HTF} inlet 65 °C 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 °C kurva temperatur PCM rata-rata arah aksial semakin landai seperti yang disajikan Gambar 4.10. Hal tersebut disebabkan karena besarnya perbedaan temperatur di dalam TES sehingga perpindahan kalor secara konveksi alami akan semakin berperan besar. Perpindahan kalor secara konduksi di awal yang besar juga

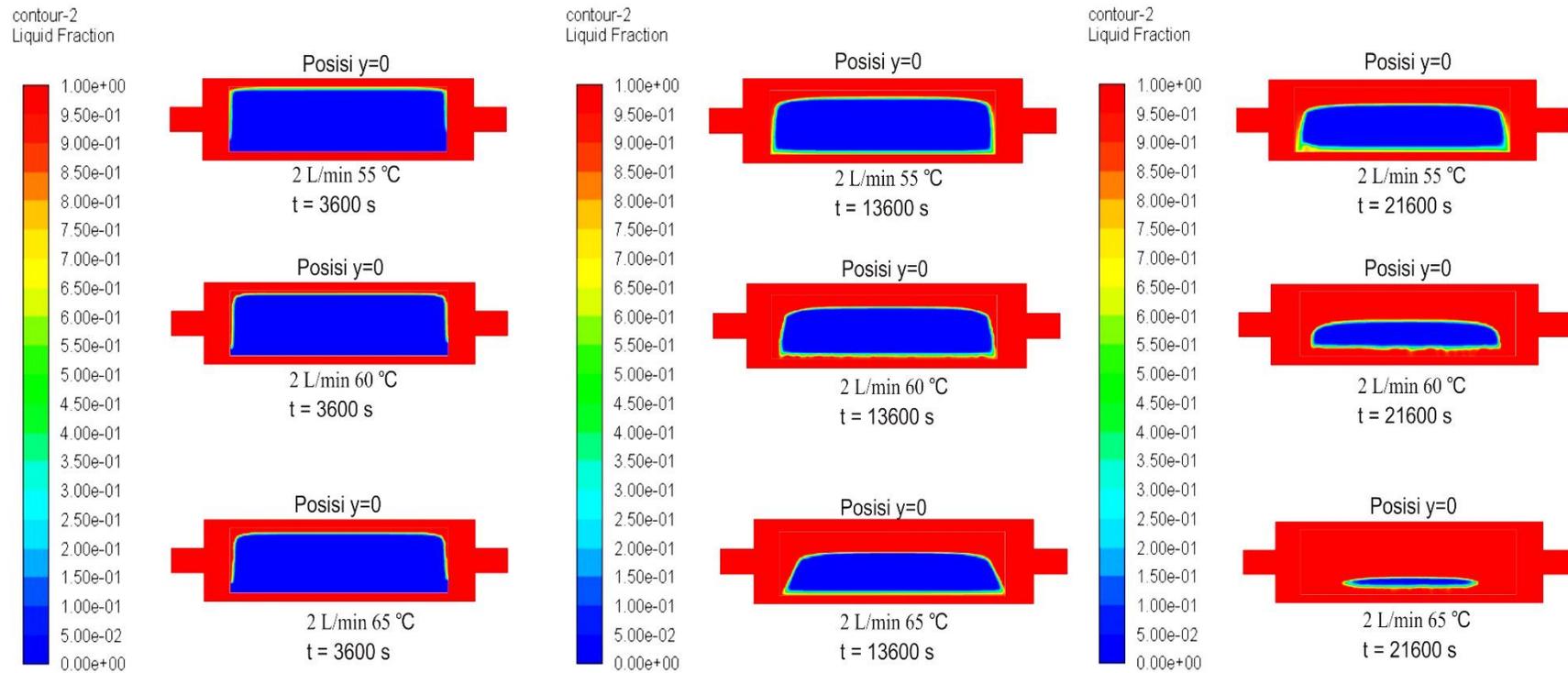
berperan dalam terjadinya proses pelelehan khususnya perpindahan kalor yang terjadi antara dinding tembaga dengan lapisan PCM padat di dalam tabung.



Gambar 4.10. Distribusi Temperatur PCM Rata-Rata Arah Aksial Pada Variasi $T_{HTF\ Inlet}$

Gambar 4.11 menyajikan kontur pelelehan PCM arah aksial pada tiga variasi temperatur air masuk (55 °C, 60 °C, dan 65 °C). Terdapat kesesuaian diantara ketiga kontur pada saat waktu ke 3600 detik seperti disajikan pada Gambar 4.11. Hal tersebut disebabkan dengan adanya perubahan fasa pada PCM, dan nilai *Melting* PCM untuk jenis *paraffin waxRT52* yaitu 52 °C. Adanya perpindahan kalor konduksi membuat lapisan padat PCM pada bagian dinding tabung akan terlebih dahulu meleleh. Gambar 4.11 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.

Jika membandingkan antara Gambar 4.21 kontur pelelehan PCM arah radial dengan Gambar 4.11 maka pelelehan arah aksial akan lebih lama. Hal tersebut dikarenakan proses perpindahan kalor yang sangat dipengaruhi jarak dan perbedaan nilai densitas. Selain itu, pengaruh penentuan metode simulasi dan konstanta porositas pelelehan sangat berperan untuk keakuratan hasil simulasi.

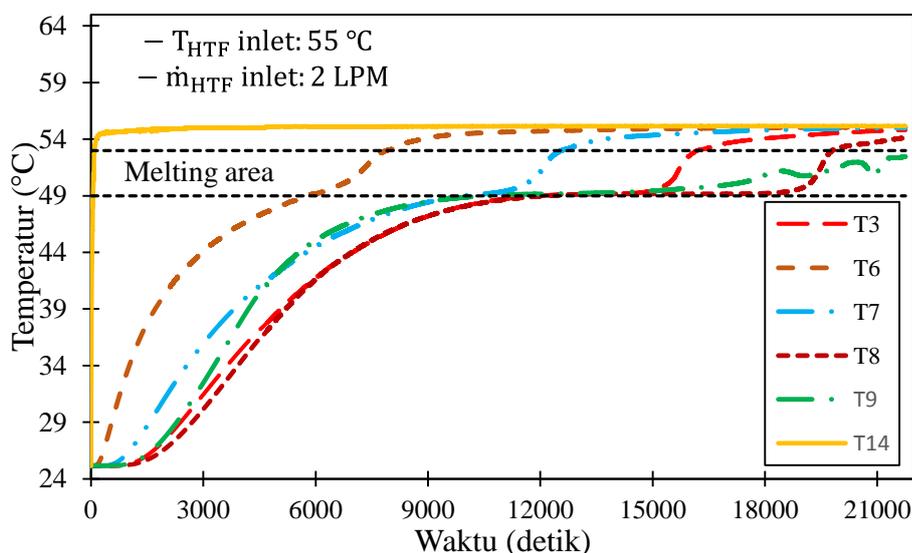


Gambar 4.11. Perbandingan Kontur *Liquid Fraction* PCM Arah Aksial

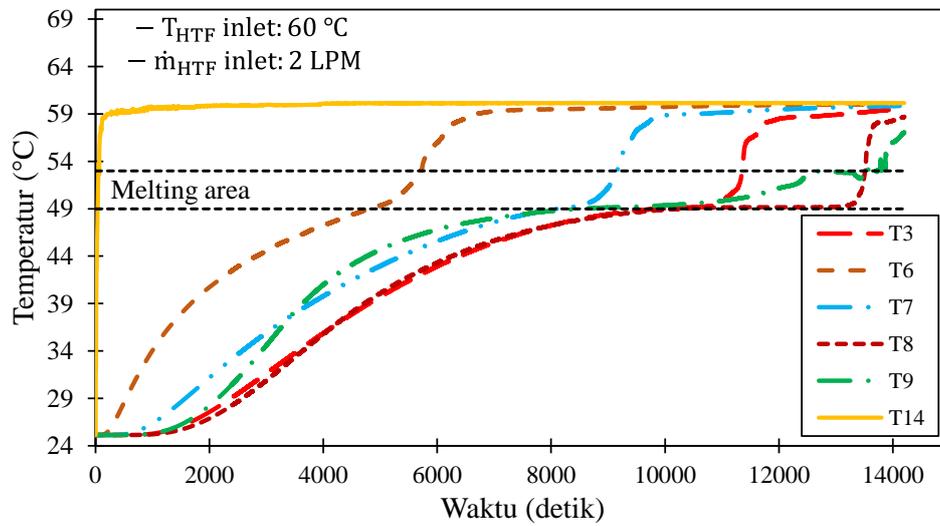
4.4. Pengaruh Variasi Temperatur HTF *Inlet* Terhadap Pelelehan PCM Arah Radial Pada Sumbu Y

Gambar 4.12, Gambar 4.13, dan Gambar 4.14 menunjukkan perubahan distribusi temperatur arah radial pada sumbu Y akibat variasi temperatur HTF *inlet*. Pola kenaikan dari Gambar 4.12, Gambar 4.13, dan Gambar 4.14 menunjukkan kesamaan dimana kurva temperatur titik termokopel T6, T7 dan T3 terlebih dahulu mencapai temperatur *melting*, kemudian titik termokopel T8, dan T9 yang letaknya terdapat di bagian bawah arah radial tabung adalah yang terakhir. Terkait kenaikan temperatur PCM disimpulkan bahwa perbedaan jarak dan densitas sangat mempengaruhi *transfer* kalor yang terjadi.

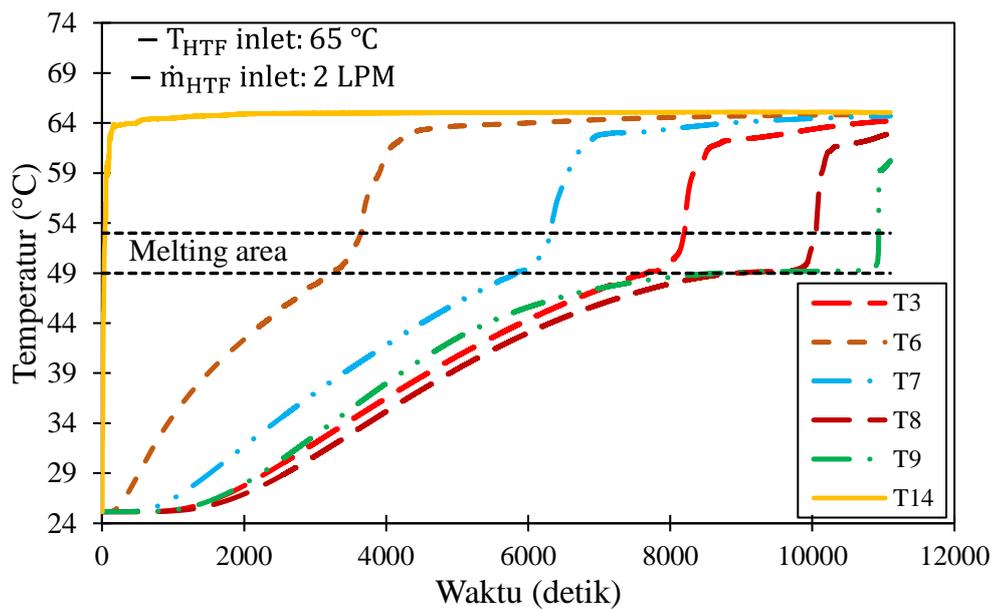
Kenaikan kurva temperatur PCM arah radial paling cepat terjadi ketika variasi temperatur *inlet* HTF 65 °C dengan waktu 3500 detik pada kurva titik termokopel T6. Semakin besar temperatur *inlet* semakin cepat perpindahan kalor ke arah radial. Hal tersebut, disebabkan besarnya perbedaan temperatur pada saat proses *transfer* kalor antara T14 sebagai dinding tembaga dengan T6 sebagai PCM padat seperti pada Gambar 4.1. *Transfer* kalor semakin besar maka semakin banyak fraksi cairan yang terbentuk dan *transfer* kalor secara konveksi alami mulai terjadi.



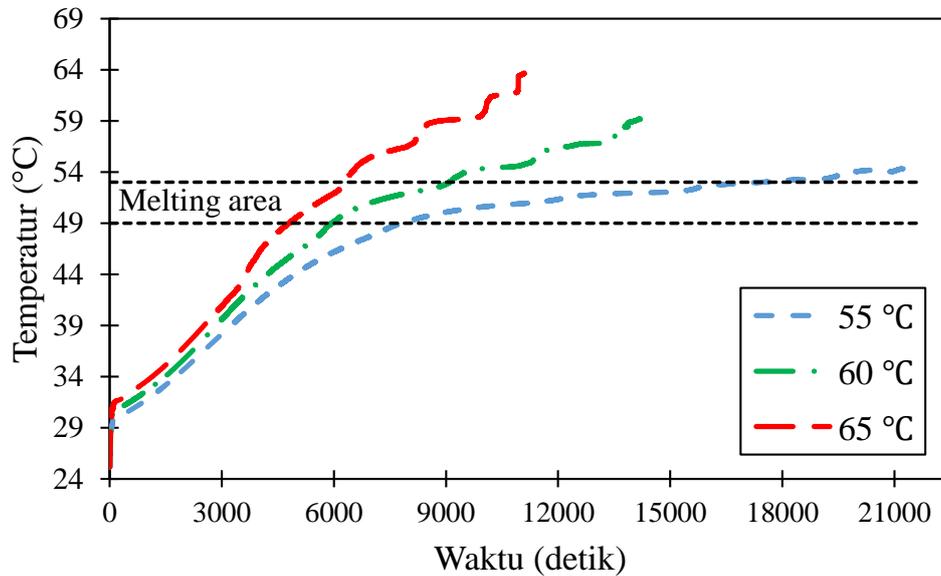
Gambar 4.12. Distribusi Temperatur PCM Arah Radial Sumbu Y Pada Variasi $T_{HTF Inlet}$



Gambar 4.13. Distribusi Temperatur PCM Arah Radial Sumbu Y Pada Variasi $T_{HTF\ Inlet}$



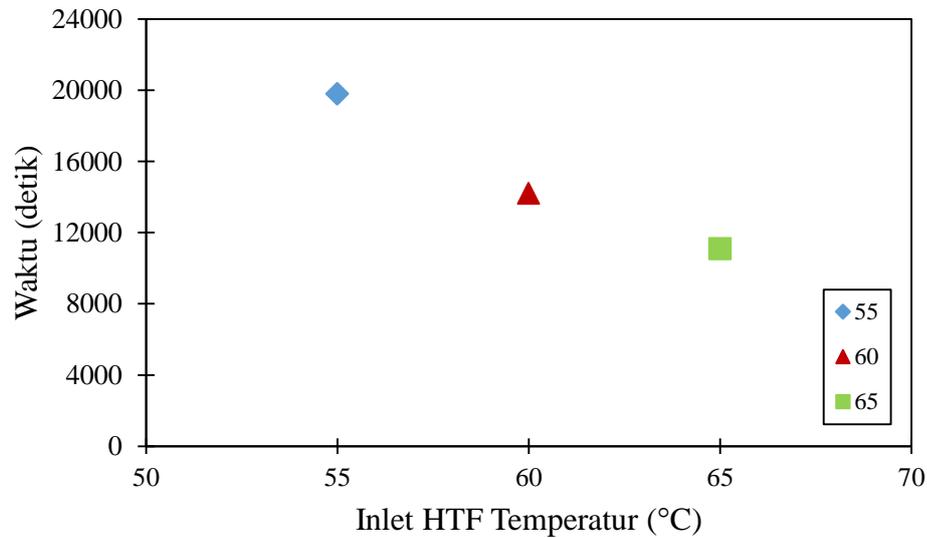
Gambar 4.14. Distribusi Temperatur PCM Arah Radial Sumbu Y Pada Variasi $T_{HTF\ Inlet}$



Gambar 4.15. Distribusi Temperatur PCM Rata-Rata Arah Radial Sumbu Y Pada Variasi $T_{HTF\ Inlet}$

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa semakin besar variasi $T_{HTF\ inlet}$ maka grafik temperatur PCM rata-rata arah radial akan semakin cepat. Variasi $T_{HTF\ inlet}$ 65 °C akan membuat kurva semakin tegak dimana waktu yang diperlukan untuk proses pelelehan akan semakin cepat, sedangkan dengan variasi $T_{HTF\ inlet}$ 55 °C akan membuat kurva semakin landai seperti yang disajikan Gambar 4.15. 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 $T_{HTF\ inlet}$.

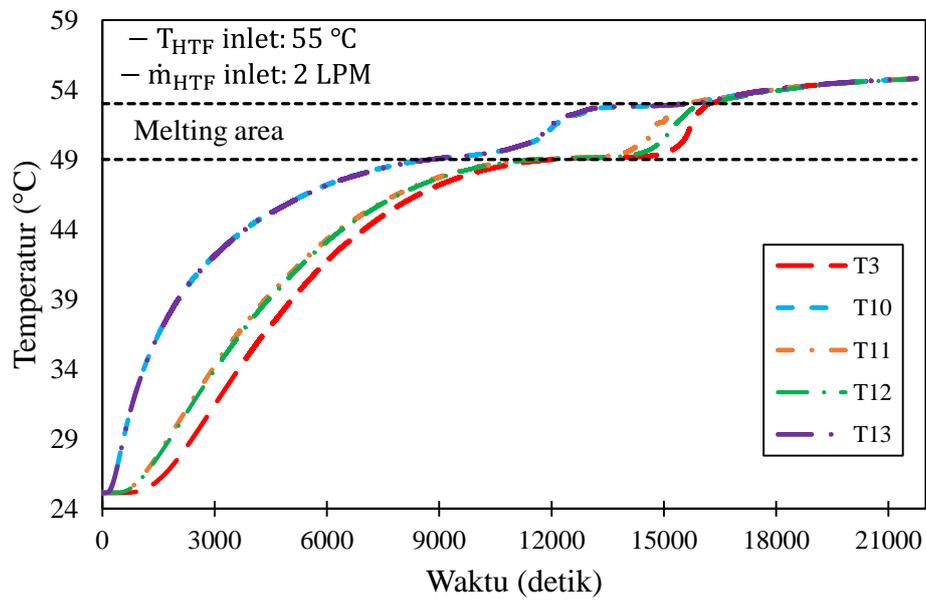
Variasi temperatur *inlet* HTF secara langsung mempengaruhi waktu pelelehan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16. Gambar 4.16 mengindikasikan bahwa pengaruh tingginya variasi temperatur HTF *inlet* akan mempercepat waktu pelelehan pada saat proses *charging*. Waktu pelelehan paling cepat terjadi pada variasi temperatur HTF *inlet* 65°C yakni pada waktu ke 185 menit telah terjadi *melting* sempurna sedangkan waktu pelelehan paling lama terjadi saat variasi temperatur HTF *inlet* 55 °C pada waktu ke 360 menit baru terjadi *melting* sempurna.



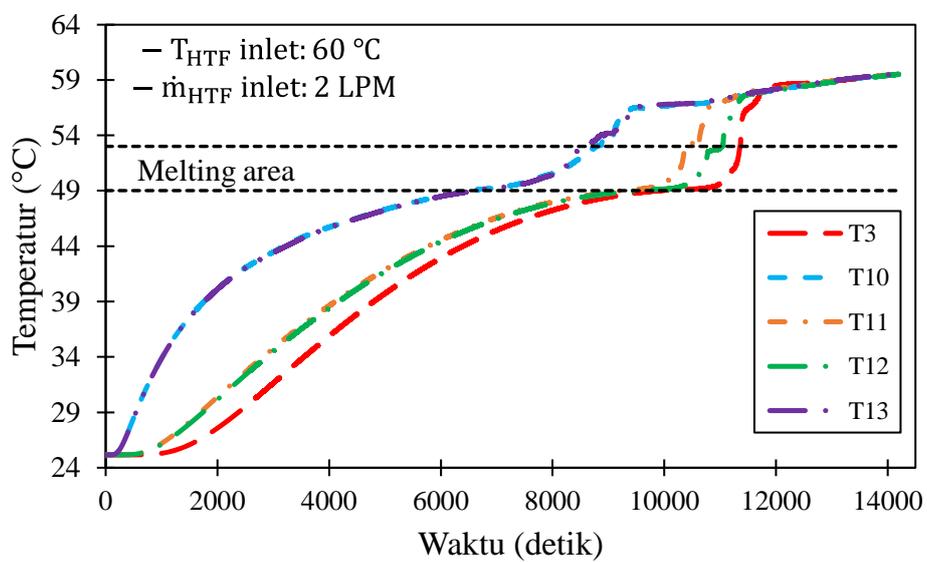
Gambar 4.16. Perbedaan waktu pelelehan PCM

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

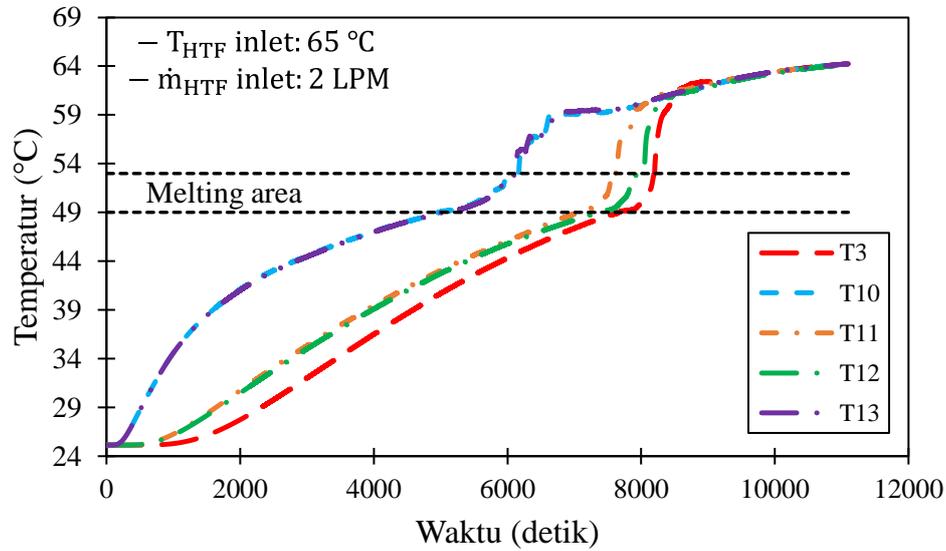
Gambar 4.17, Gambar 4.18, dan Gambar 4.19 menunjukkan perubahan distribusi temperatur arah radial sumbu Z akibat variasi temperatur HTF inlet. Pola kenaikan dari Gambar 4.17, Gambar 4.18, dan Gambar 4.19 memiliki kesamaan yakni ditandai dengan kenaikan kurva temperatur titik termokopel berturut-turut 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.



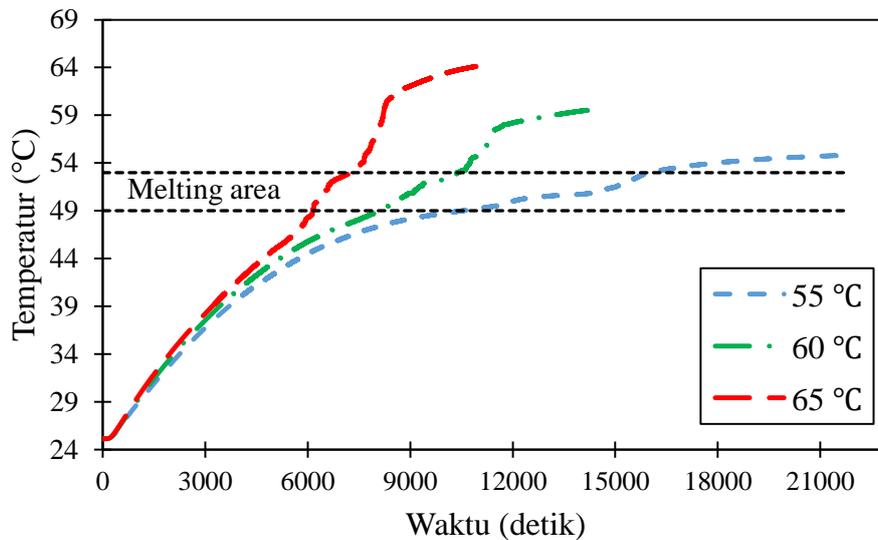
Gambar 4.17. Distribusi Temperatur PCM Arah Radial Sumbu Z Pada Variasi T_{HTF} Inlet



Gambar 4.18. Distribusi Temperatur PCM Arah Radial Sumbu Z Pada Variasi T_{HTF} Inlet



Gambar 4.19. Distribusi Temperatur PCM Arah Radial Sumbu Z Pada Variasi T_{HTF} Inlet



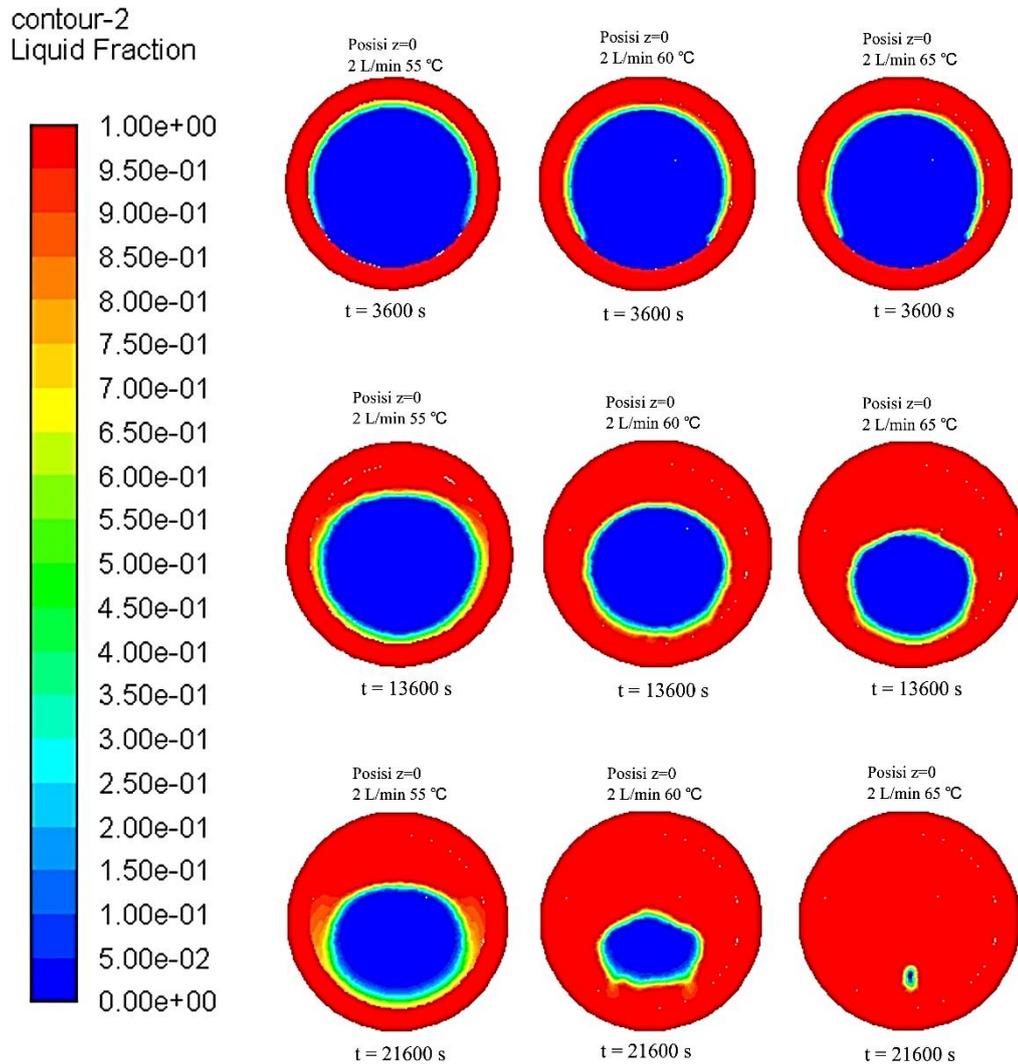
Gambar 4.20. Distribusi Temperatur PCM Rata-Rata Arah Radial Sumbu Z Pada Variasi T_{HTF} Inlet

Gambar 4.20 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 °C 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 °C akan

membuat kurva semakin landai dimana waktu yang diperlukan untuk memasuki *melting area* yakni 12000 detik seperti yang disajikan pada Gambar 4.20. 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 4.21 merupakan perbandingan kontur perubahan *liquid fraction* arah radial pada variasi temperatur air masuk (55 °C, 60 °C, dan 65 °C). Proses dominasi *transfer* kalor ke arah radial dapat diindikasikan dari pembentukan fraksi cairan (*liquid fraction*) seperti di Gambar 4.21. Gambar 4.21 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 4.21 saat waktu ke-13600 detik. Gambar 4.21 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. 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 4.21. Gambar 4.21 menyajikan bahwa seiring bertambahnya waktu *charging* perpindahan kalor di dalam tabung khususnya ke arah radial sangat dipengaruhi oleh peranan perpindahan kalor secara konveksi alami dampak dari adanya distribusi temperatur yang tidak seragam dan gaya gravitasi.



Gambar 4.21. Perbandingan Kontur *Liquid Fraction* PCM Arah Radial

Gambar 4.21 terlihat dari ketiga variasi bahwa bentuk pelelehan *paraffin wax* yang terbentuk tidak simetris. Peristiwa tersebut mengindikasikan besarnya peranan perpindahan kalor secara konveksi alami dan konduksi. Hal ini sesuai dengan penelitian terdahulu diantaranya Hosseini dkk (2014), Longeon dkk (2013), dan Rosler dkk (2011). Semakin besar variasi temperatur HTF maka waktu pelelehan yang diperlukan akan semakin cepat. Gambar 4.21 menyajikan kontur pelelehan terbentuk secara sempurna tercepat terjadi pada variasi THTF *inlet* 65°C saat waktu ke 21600 detik.