

## Karakterisasi PCM RT52 Kapsul Vertikal Pada Solar Water Heater Sistem Aktif

Michael Seen<sup>1</sup> dan Joko Waluyo<sup>2</sup>

Program Studi S-2 Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada<sup>1</sup>,  
Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada<sup>2</sup>  
e-mail: michael.seen@mail.ugm.ac.id<sup>1</sup>, jokowaluyo@ugm.ac.id<sup>2</sup>

### ABSTRACT

*Solar water heater (SWH) is one of the technologies in utilizing solar energy. In this study phase change material (PCM) was applied to increase the heat storage capacity of solar water heater (SWH). PCM receives sensible heat and latent heat until it reaches the melting point. This study is aim to determine the characteristics of the PCM (melting time, melting contour, heat transfer, cumulative heat) during the charging process. Simulation modeling was carried out using the enthalpy-porosity method by varying the arrangement of capsule placement to be inline, staggered, and crossline. The type of PCM used was paraffin wax RT52. Heat flux and water flow rates are maintained at 1000 W/m<sup>2</sup> and 1 lpm. The simulation results show that the inline, staggered and crossline variations cause a difference in melting time of 6.8%, the highest heat transfer is 12.9%, and the cumulative heat is 8%.*

**Kata kunci:** Melting, phase change material, renewable energy, solar water heater.

### ABSTRAK

*Solar water heater (SWH) merupakan salah satu teknologi dalam pemanfaatan energi matahari. Pada penelitian ini phase change material (PCM) diaplikasikan untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan panas solar water heater (SWH). PCM menerima panas sensibel dan panas laten hingga mencapai titik pelelehan. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui karakteristik PCM (waktu pelelehan, kontur pelelehan, heat transfer, panas kumulatif) selama proses charging. Pemodelan simulasi dilakukan menggunakan metode enthalpy-porosity dengan memvariasikan susunan peletakan kapsul menjadi inline, staggered, dan crossline. Jenis PCM yang digunakan adalah paraffin wax RT52. Heat flux dan debit aliran air dijaga tetap sebesar 1000 W/m<sup>2</sup> dan 1 lpm. Hasil simulasi menunjukkan variasi inline, staggered dan crossline menyebabkan perbedaan waktu pelelehan 6,8%, heat transfer tertinggi 12,9% , dan panas kumulatif sebesar 8%.*

**Kata kunci:** Melting, phase change material, renewable energy, solar water heater.

### PENDAHULUAN

*Thermal Energy Storage (TES) adalah salah satu teknologi dalam konservasi energi. Prinsip kerja TES adalah menyimpan sementara energi panas yang didapat dari sumber panas untuk digunakan kembali dikemudian waktu. TES jenis laten atau latent heat thermal energy storage (LHTES) lebih efektif dalam penyimpanan energi termal [1]. Pada LHTES menggunakan material yang dapat berubah fase atau phase change material (PCM) sebagai penyimpan panas. PCM pada solar water heater (SWH) membantu mempertahankan temperatur air pada malam hari atau saat tidak terdapat sumber panas dengan cara melepaskan panas yang sudah tersimpan dalam PCM. PCM yang ditempatkan di dalam tangki akan menerima panas sensibel dari air yang mengalir dari solar collector dan mengalami kenaikan temperatur hingga mencapai titik pelelehan. Saat PCM mencapai titik pelelehan PCM akan menerima panas laten sehingga mengalami perubahan fase. Banyaknya energi panas yang diterima oleh PCM sangat berpengaruh terhadap waktu yang dibutuhkan sampai PCM mencapai titik pelelehan pada saat proses charging.*

Dalam penelitian eksperimen kondisi PCM tidak bisa diamati secara langsung. PCM terletak pada tabung yang tertutup dan tidak dapat dilihat dari luar, sehingga proses pelelehan PCM dan karakteristiknya tidak bisa diamati dan menjadi sulit untuk diteliti. Marausna dan Waluyo melakukan penelitian untuk mengetahui pelelehan PCM di dalam tabung penyimpanan panas [2]. Penelitian ini menyatakan bahwa perbedaan laju aliran heat transfer fluid (HTF) mempengaruhi durasi HTF menerima kalor dari dinding pipa solar collector. HTF dengan durasi penerimaan kalor yang panjang akan memiliki temperatur lebih tinggi dibandingkan dengan HTF dengan durasi penerimaan kalor yang pendek. Tetapi dari hasil penelitian yang dilakukan peningkatan temperatur HTF tidak disertai perbedaan waktu pelelehan PCM yang signifikan.

Hal ini berhubungan dengan posisi kapsul di dalam tabung penyimpan panas. Kapsul yang berada paling dekat dengan pipa air masuk dari kolektor memiliki temperatur rata – rata yang lebih tinggi. Kapsul yang berada jauh dari pipa masuk memiliki temperatur rata – rata yang lebih rendah sehingga transfer panas ke PCM semakin berkurang [3].

Posisi kapsul PCM yang sejajar dengan arah aliran air juga mempengaruhi perpindahan panas yang terjadi. Kondisi aliran fluida dalam tangki dipengaruhi oleh pemisahan *boundary condition* kapsul yang menghalangi laju aliran fluida tersebut. Interaksi yang terjadi akan mempengaruhi proses transfer panas secara konveksi [4]. Penelitian dilakukan dengan simulasi SWH sistem aktif yang dapat memprediksi temperatur, kurva pelelehan, waktu pelelehan, kontur pelelehan, heat transfer, dan panas kumulatif sebagai karakteristik PCM yang dipengaruhi oleh susunan peletakan PCM di dalam tangki penyimpan panas. Peletakan kapsul PCM secara vertikal atau tegak lurus dengan arah aliran air yang divariasikan menjadi *inline*, *staggered*, dan *crossline*.

## TINJAUAN PUSTAKA

Eksperimen mengenai penambahan *thermal energy storage* terhadap performansi *solar water heater* jenis kolektor plat datar telah dilakukan oleh jurfizal, dkk [5]. Pengukuran dilakukan pada proses *charging* dan *discharging*. Proses *charging* dilakukan dari pagi sampai sore hari, pengukuran meliputi intensitas radiasi matahari, temperatur lingkungan, kecepatan angin, temperatur kolektor dan TES. Proses *discharging* dilakukan dengan melewati air pada pipa – pipa penukar panas sehingga air mengambil panas dari TES. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi termal tertinggi untuk proses *charging* sebesar 44,28%. Tingginya efisiensi karena kehilangan panas kolektor ( $\sum q_b + \sum q_s$ ) lebih kecil sehingga energi panas total yang disimpan TES dapat lebih banyak. Massa parafin wax melebur tertinggi adalah 18,81 kg dari total 19,5 kg. Efisiensi termal tertinggi untuk proses *discharging* sebesar 46,81% dengan total air panas yang diperoleh pada temperatur minimum 35°C sebanyak 40 liter.

Penelitian terkait proses pelelehan paraffin pada unit penyimpan energi termal berbentuk pipa ganda konsentrik telah dilakukan oleh Suhanan, dkk [6]. Penelitian dilakukan secara simulasi menggunakan software ANSYS Fluent 17. Simulasi dilakukan dengan tujuan mengetahui karakteristik paraffin wax selama proses *charging* dalam unit TES dengan memvariasikan laju aliran massa dan temperatur inlet HTF. Dari hasil penelitian temperatur inlet lebih memberikan pengaruh dibandingkan laju aliran massa yang divariasikan terhadap proses pelelehan paraffin. Temperatur inlet ditunjukkan dengan bilangan Stefan (Ste). Bilangan Stefan adalah perbandingan antara kapasitas termal zat padat yang meleleh dengan panas laten. Berdasarkan variasi temperatur inlet yang dilakukan maka didapat bilangan Stefan 0,08, 0,14, dan 0,2. Semakin tinggi bilangan Stefan maka kandungan panas sensibel semakin besar.

Penelitian eksperimen perilaku termal proses peleburan lilin paraffin di dalam kapsul silinder telah dilakukan Ansyah, dkk [7]. Terdapat dua kapsul silinder, kapsul bagian dalam digunakan sebagai wadah PCM sedangkan kapsul bagian luar digunakan untuk aliran HTF. PCM dipanaskan dengan cara mengalirkan HTF yang divariasikan temperaturnya menjadi 60°C, 65°C, dan 70°C. Temperatur awal adalah 30°C. Proses pelelehan yang terjadi didokumentasikan setiap 10 detik. Proses pelelehan yang terjadi diawali dengan terbentuknya lelehan pada dinding bagian dalam kapsul penyimpan PCM. Lelehan terjadi mengelilingi permukaan dinding bagian dalam. Area lelehan terus meluas menuju ke tengah PCM hingga PCM seluruhnya menjadi cairan.

Penelitian terkait temperatur air dan efisiensi pemanas air kolektor tabung yang diberi penambahan PCM telah dilakukan oleh Sulastri, dkk [8]. Penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimental dengan memvariasi laju aliran massa menjadi 0,008 kg/s, 0,010 kg/s, dan 0,030 kg/s. PCM yang digunakan adalah campuran parafin 70% dan minyak goreng 30%. Kolektor tabung dilengkapi dengan *reflektor double-U*. *Reflektor double-U* berguna untuk meningkatkan efektivitas kolektor berdasarkan pola pantulannya. Posisi kolektor tabung pada reflektor divariasikan menggunakan PCM dan tanpa PCM. Penambahan PCM terbukti dapat menaikkan efisiensi, terlihat rata-rata efisiensi kolektor A pada setiap laju aliran massa lebih tinggi dibandingkan B. Kolektor A memiliki rata – rata efisiensi 36,81% dan kolektor B 37,27% pada laju aliran massa 0,008 kg/s. Kolektor A memiliki rata – rata efisiensi 39,97% dan kolektor B 41,08% pada laju aliran

massa 0,010 kg/s. Kolektor A memiliki rata – rata efisiensi 48,3% dan kolektor B 50,53% pada laju aliran massa 0,030 kg/s. Sifat PCM yang dapat menyimpan panas mengurangi heat loss yang terjadi sehingga lebih efisien dibandingkan tanpa PCM.

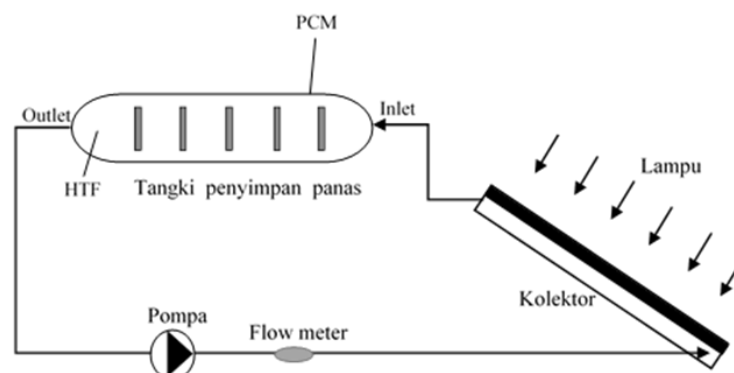
Penelitian mengenai pelelehan PCM di dalam tabung penyimpanan panas *solar water heater* telah dilakukan oleh Marausna dan Waluyo [9]. Penelitian dilakukan menggunakan model simulasi *solar water heater* sistem aktif. Pemodelan simulasi menggunakan metode *enthalpy-porosity*. Pengujian dilakukan pada *heat flux* konstan sebesar 1000 W/m<sup>2</sup> dengan laju aliran divariasikan menjadi 2 liter per menit (lpm), 3 lpm, dan 4 lpm. Variasi laju aliran mempengaruhi temperatur HTF. Hasil penelitian menunjukkan bahwa menurunkan laju aliran dari 4 lpm menjadi 2 lpm menyebabkan meningkatnya temperatur HTF menuju tangki, tetapi memperlama waktu pelelehan PCM dari 87 menit menjadi 96 menit.

## METODE

Penelitian ini dilakukan secara simulasi numerik menggunakan pemodelan 3D yang divalidasi dengan membandingkan pada data eksperimen. Data eksperimen dan validasi yang dibandingkan adalah temperatur pada titik keluar pipa *outlet* tangki penyimpan panas. Data dibandingkan setiap 10 menit dan dilihat perbedaannya antara data temperatur yang didapat dari eksperimen dengan data yang didapat dari hasil simulasi. Skema dari SWH ditunjukkan pada Gambar 1. Solar collector dipanaskan dengan *heatflux* konstan sebesar 100 W/m<sup>2</sup> dan meningkatkan temperatur air sebagai HTF di dalam *solar collector*. Air disirkulasikan menggunakan pompa menuju ke tangki penyimpan kalor terisolasi berdiameter 260 mm dan panjang 1220 mm yang berisi PCM dengan diameter 25 mm dan panjang 1000 mm. Paraffin wax yang digunakan dalam penelitian ini adalah paraffin wax RT 52. Paraffin wax RT 52 merupakan jenis paraffin organik dengan sifat termal yang ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Sifat termal paraffin wax RT 52

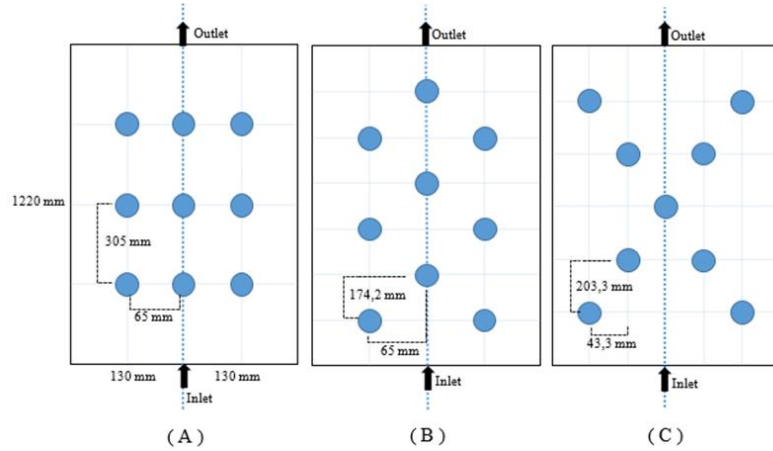
Sifat termal paraffin wax RT 52	Nilai
Temperatur pelelehan, $T_m$ (K)	322-326
Kalor laten peleburan, $L$ (J/kg)	173000
Kalor spesifik, $C_{PL}$ , $C_{PS}$ (J/ K)	2000
Densitas padat, $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	880
Densitas cair, $\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	760
Konduktivitas termal, $k$ (W/m K)	0,2
Viskositas kinematis, $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	31,28 x 10 <sup>-6</sup>



Gambar 1. Skema SWH sistem aktif

Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah tata letak penyusunan kapsul PCM. Variasi tata letak tabung PCM di dalam tangki di gambarkan tampak atas pada Gambar 2. Setiap variasi tata letak akan

disimulasikan pada heat flux yang sama dengan yang dilakukan pada eksperimen sebesar  $1000 \text{ W/m}^2$  dengan pertimbangan intensitas maksimal radiasi matahari di Yogyakarta.



Gambar 2. Skema tampak atas dari variasi tata letak kapsul PCM  
(A) Inline, (B) Staggered, (C) Cross line

Panas yang diterima HTF di dalam *solar collector* dimodelkan dengan memberikan fluks kalor konstan pada dinding pipa tembaga sebesar  $1000 \text{ W/m}^2$ . Sirkulasi HTF di dalam sistem SWH dijaga konstan dengan variasi laju aliran 1 lpm. Fenomena perubahan fasa yang terjadi disimulasikan dengan menggunakan persamaan atur berikut :

Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

Persamaan momentum

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla^2 \mu \vec{V} + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (2)$$

$$\text{Dimana } \vec{S} = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + 0,001)} A_{\text{mush}} \vec{V} \quad (3)$$

Persamaan energi

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho H \vec{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4)$$

$$\text{Dimana } H = h + \Delta H \quad (5)$$

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (6)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (7)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T \leq T_l \\ 1 & T > T_l \end{cases} \quad (8)$$

Persamaan turbulensi

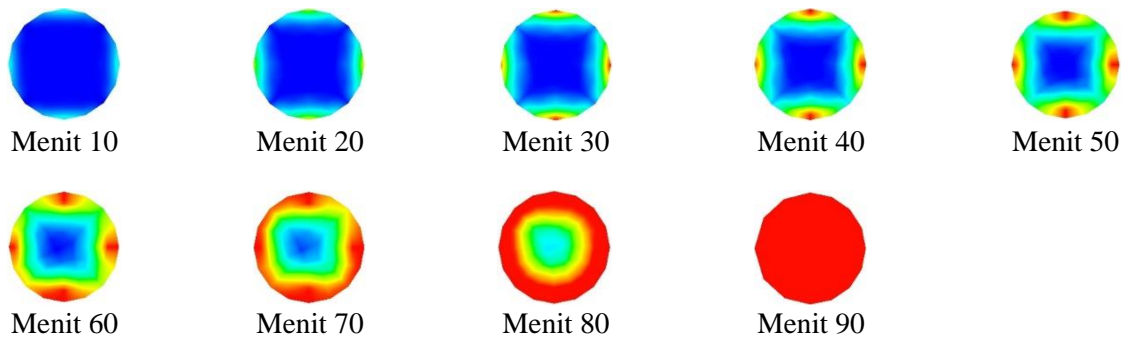
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot k) + \vec{V} \cdot (\rho \cdot \vec{u} \cdot k) = \vec{V} \cdot \left( \rho \cdot \left\{ v_l + \frac{v_t}{\sigma_{t,k}} \right\} \cdot \vec{\nabla} k \right) + \rho \cdot (P_k + G_b - \varepsilon) \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \varepsilon) + \vec{V} \cdot (\rho \cdot \vec{u} \cdot \varepsilon) = \vec{V} \cdot \left( \rho \cdot \left\{ v_l + \frac{v_t}{\sigma_{t,\varepsilon}} \right\} \cdot \vec{\nabla} \varepsilon \right) + \left\{ \rho \cdot \frac{\varepsilon}{k} \right\} \cdot (C_{l\varepsilon} \cdot P_k + C_{3\varepsilon} \cdot G_b - C_{2\varepsilon} \cdot \varepsilon) \quad (10)$$

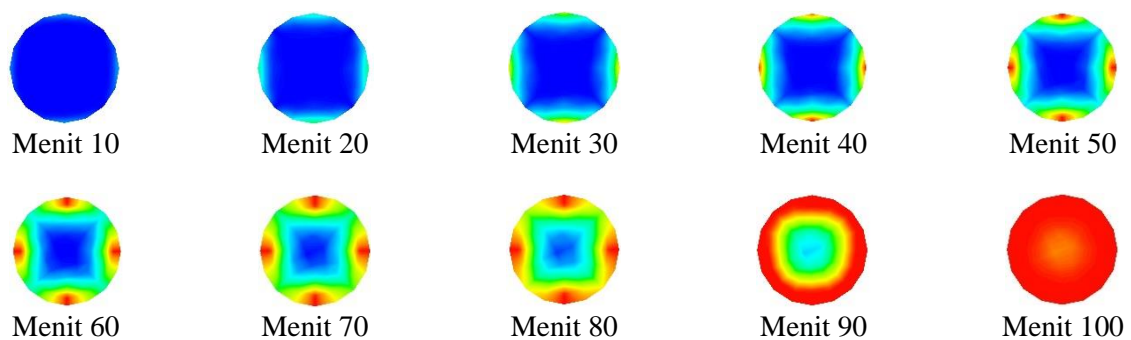
Persamaan kontinuitas, persamaan momentum, dan persamaan energi diselesaikan menggunakan metode *enthalpy porosity* dan *densitas* PCM didefinisikan dengan pendekatan *phase dependent*. Proses simulasi dijalankan pada perangkat komputer yang telah dipasang software untuk melakukan proses komputasi dengan mengaplikasikan metode-metode tersebut.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

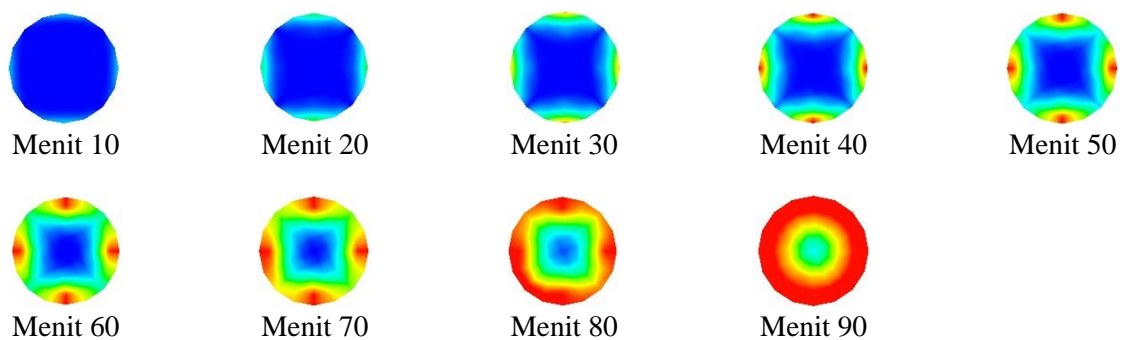
Variasi peletakan kapsul didalam tangki penyimpan panas mengakibatkan perbedaan panas yang diterima PCM. HTF yang mengalir melewati susunan PCM akan disertai dengan terjadinya transfer panas antara HTF dan PCM. Semakin banyak panas yang dapat ditransfer maka semakin cepat proses *charging*. Proses pelelehan PCM mulai terjadi saat temperatur dinding kapsul sudah di atas temperatur pelelehan PCM. Kontur pelelehan PCM ditunjukkan pada Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5. Panas dari dinding kapsul akan di transfer kedalam PCM diawali dari bagian PCM terluar atau yang bersentuhan langsung dengan dinding kapsul. Pada proses awal ini dimana PCM masih dalam fase padat perpindahan panas terjadi secara konduksi. PCM yang dekat dengan dinding kapsul akan meleleh terlebih dahulu dan berubah memasuki fase cair. PCM yang telah berubah menjadi fase cair akan mentransfer panas dari dinding kapsul ke PCM bagian dalam secara konveksi alami. Semakin banyak PCM yang berubah fase menjadi cair akan mempercepat proses konveksi sehingga mempercepat proses pelelehan PCM.



Gambar 3. Kontur pelelehan PCM nomor 5 pada variasi peletakan *inline*



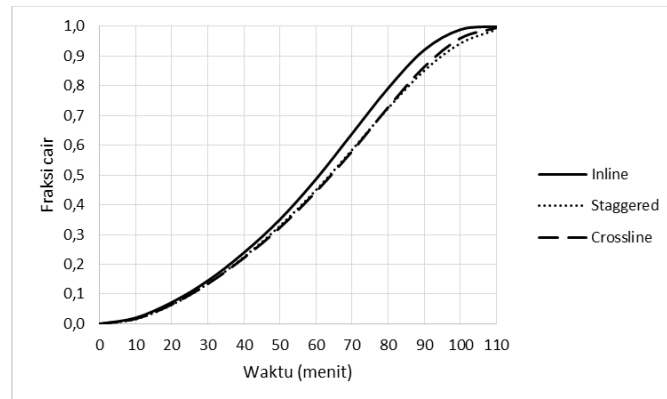
Gambar 4. Kontur pelelehan PCM nomor 6 pada variasi peletakan *staggered*



Gambar 5. Kontur pelelehan PCM nomor 5 pada variasi peletakan *crossline*

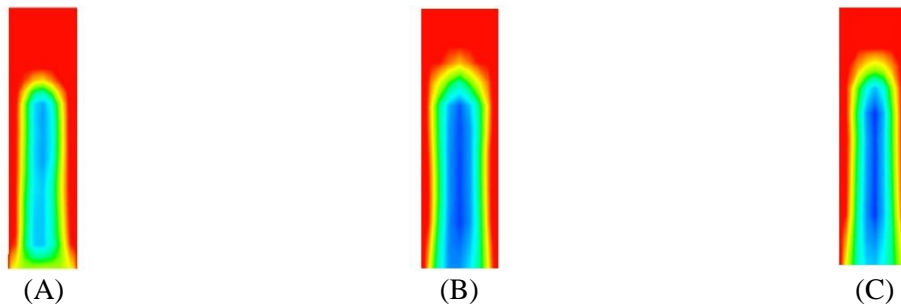
PCM pada variasi *inline* memiliki kurva fraksi cair dengan waktu pelelehan tercepat. Sedangkan variasi *staggered* dan *crossline* memiliki karakteristik kurva pelelehan yang hampir sama dengan waktu pelelehan yang lebih lama. PCM pada variasi *inline* berubah seluruhnya ke fasa cair pada menit ke 102, variasi *staggered* pada menit ke 112, dan variasi *crossline* pada menit ke 109. Perbedaan nilai fraksi terbesar antara variasi *inline* dan *staggered* terjadi pada menit ke 83,7 dengan perbedaan 6,4% sedangkan variasi *inline*

dan *crossline* terjadi pada menit ke 80,5 dengan perbedaan 7,1% selanjutnya perbedaan tersebut semakin berkurang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



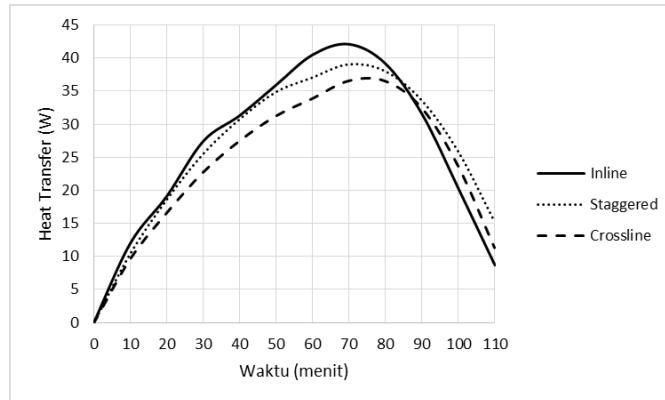
Gambar 6. Kurva fraksi cair PCM pada variasi peletakan kapsul PCM

Pada visualisasi secara vertikal terlihat pengaruh *buoyancy* mempengaruhi kontur pelelehan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Selama proses *charging* peningkatan temperatur PCM menyebabkan perubahan fasa yang diikuti perubahan massa jenis PCM. Massa jenis yang lebih rendah akan bergerak naik keatas sehingga pada kapsul PCM terlihat area pelelehan lebih banyak terjadi dibagian atas kapsul.



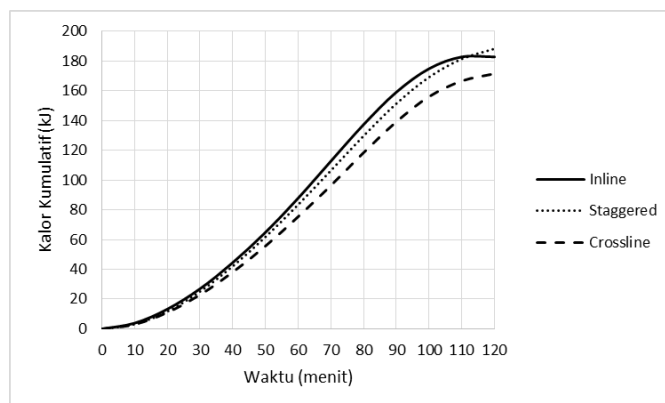
Gambar 7. Kontur fraksi cair PCM pada menit 80 pada variasi (A) *inline*, (B) *staggered*, (C) *crossline*

Perubahan heat transfer rate mengikuti perubahan pada perbedaan temperatur antara HTF dan PCM. Saat perbedaan temperatur HTF dan PCM berada diperbedaan terjauh maka kurva heat transfer rate berada di puncak. Heat transfer rate akan semakin turun saat perbedaan HTF dan PCM mengecil bersama dengan PCM sudah mendekati fase cair seluruhnya. Perbedaan *heat transfer* antara variasi peletakan kapsul ditunjukkan pada Gambar 8. SWH dengan peletakan kapsul secara *inline* memiliki *heat transfer* yang paling tinggi dibandingkan dengan *staggered* maupun *crossline*. Saat proses pelelehan *heat transfer rate* meningkat mengikuti perubahan pada perbedaan temperatur antara HTF dan PCM. Saat perbedaan temperatur HTF dan PCM berada diperbedaan terjauh maka kurva *heat transfer rate* berada di puncak. *Heat transfer rate* akan semakin turun saat perbedaan temperatur HTF dan PCM mengecil bersama dengan PCM sudah mendekati fase cair seluruhnya.



Gambar 8. Heat transfer rate pada setiap variasi peletakan kapsul PCM

Kalor kumulatif selama proses *charging* berupa kalor laten yang digunakan untuk mengubah fasa PCM dari padat ke cair dan kalor sensibel yang digunakan untuk menaikkan temperatur PCM. Gambar 9 menunjukkan kalor kumulatif yang dihitung mulai dari PCM berupa fasa padat hingga PCM mencapai seluruhnya. Kalor kumulatif diperoleh dengan mengalikan total *heat transfer rate* dengan waktu pengambilan data yaitu 1 detik dan menjumlahkan secara kumulatif sejak awal proses pelelehan PCM hingga akhir pelelehan PCM.



Gambar 9. Kalor kumulatif PCM pada variasi peletakan kapsul PCM

Kalor kumulatif setiap variasi peletakan kapsul PCM memiliki nilai yang berbeda – beda tergantung dengan besarnya *heat transfer* dan waktu pelelehan PCM. Kalor kumulatif pada variasi *inline* sebesar 182,76 kJ dengan waktu pelelehan 109,9 menit, variasi *staggered* sebesar 186,6 kJ dengan waktu pelelehan 117,3 menit dan variasi *crossline* sebesar 170,2 kJ dengan waktu pelelehan 117 menit.

## KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan perubahan karakteristik PCM RT52 yaitu waktu pelelehan, kontur pelelehan, *heat transfer*, dan panas kumulatif dapat diketahui. Waktu pelelehan PCM tercepat adalah variasi *inline* yaitu 109,9 menit dengan perbedaan 8 menit terhadap variasi *staggered* dan variasi *crossline*. Pengubahan pada posisi peletakan kapsul PCM menyebabkan perbedaan pada karakteristik SWH. Peletakan kapsul PCM secara *inline* memerlukan waktu pelelehan 109,9 menit, *heat transfer* tertinggi pada 42,5 W dan panas kumulatif hingga PCM meleleh seluruhnya adalah 182,76 kJ. Peletakan kapsul PCM secara *staggered* memerlukan waktu pelelehan 117,3 menit, *heat transfer* tertinggi pada 39,2 W dan panas kumulatif hingga PCM meleleh seluruhnya adalah 186,6 kJ. Peletakan kapsul PCM secara *crossline* memerlukan waktu pelelehan 117 menit, *heat transfer* tertinggi pada 37 W dan panas kumulatif hingga PCM meleleh seluruhnya adalah 170,2 kJ.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kee, S. Y., Munusamy, Y., & Ong, K. S. Review of solar water heaters incorporating solid-liquid organic phase change materials as thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 131, 455-471, 2018.
- [2] MARAUSNA, G. *Simulasi Pelelehan Paraffin Wax RT52 pada Solar Water Heater (SWH) Sistem Aktif dengan Variasi Heat Flux dan Debit* (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada), 2019.
- [3] Nadjib, M., Thoharudin, T., & Yudha, F. A. K. Kinerja Termal Pemanas Air Tenaga Surya Sistem Aktif Berbahan Penyimpan Energi Air dan Paraffin Wax Dengan Variasi Heat Flux. *Syntax Literate; Jurnal Ilmiah Indonesia*, 7(6), 7311-7323, 2022.
- [4] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer* (Vol. 6, p. 116). New York: Wiley, 1996.
- [5] Jufrizal, J., Napitupulu, F. H., & Ambarita, H. Studi Eksperimental Performansi Solar Water Heater Jenis Kolektor Plat Datar dengan Penambahan Thermal Energy Storage. *Cylinder: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 1(2), 27-36, 2015.
- [6] Suhanan, S., Nadjib, M., Ansyah, P. R., & Anggara, F. SIMULASI NUMERIK PROSES PELELEHAN PARAFFIN WAX PADA UNIT PENYIMPAN ENERGI TERMAL TIPE PIPA GANDA KONSENTRIK. *ROTASI*, 19(1), 36-44, 2017.
- [7] Ansyah, P. R., Waluyo, J., Suhanan, Najib, M., & Anggara, F. Thermal behavior of melting paraffin wax process in cylindrical capsule by experimental study. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2001, No. 1, p. 020008). AIP Publishing LLC, 2018.
- [8] Sulastri, V. D., Sutjahjono, H., & Syuhri, A. Pengaruh Penambahan Phase Change Material (PCM) Pada Pemanas Air Kolektor Tabung Dilengkapi Dengan Reflektor Double-U. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 12(2), 58-61, 2019.
- [9] Marausna, G., & Waluyo, J. Studi Pelelehan PCM di Dalam Tabung Penyimpanan Kalor Pada Solar Water Heater Sistem Aktif. *Journal of Mechanical Design and Testing*, 1(1), 47-56, 2019.