

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan hasil dan pembahasan didapat dari data yang diambil saat proses *charging* yang dilakukan dalam beberapa variasi. Hasil dan pembahasan akan menyajikan grafik sebagai berikut :

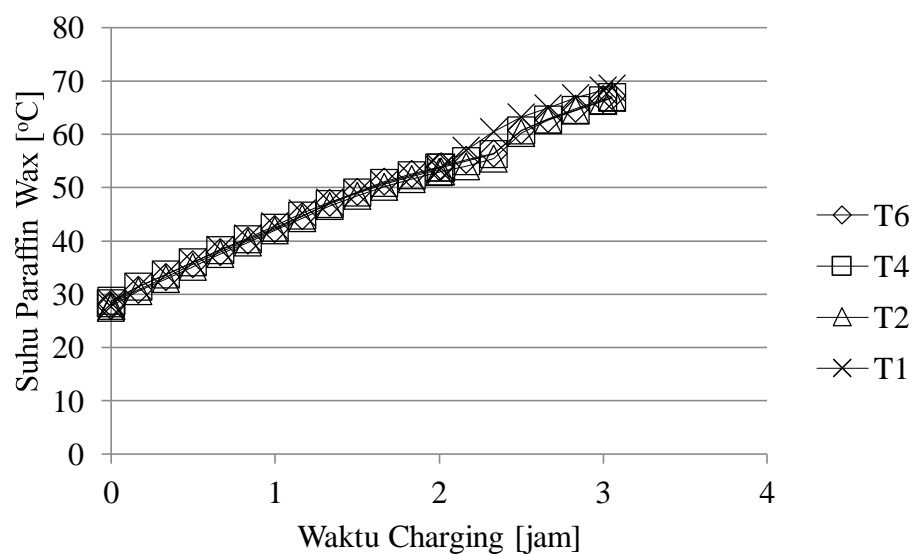
1. Grafik Evolusi Suhu arah vertikal, arah horisontal, dan arah aksial.
2. Grafik energi kumulatif air, paraffin wax, pipa Cu, dan lain-lain.
3. Grafik laju penyerapan dan kenaikan.

4.1. Evolusi Suhu pada Variasi 600 mLPM

Pengamatan perubahan temperatur pada variasi 600 mLPM yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan. Pengamatan dilakukan di 26 titik termokopel yang tersebar dalam tangki. Peletakan termokopel meliputi arah vertikal, arah horisontal, dan arah aksial yang terpasang pada pipa tembaga dengan posisi pada Gambar 3.28.

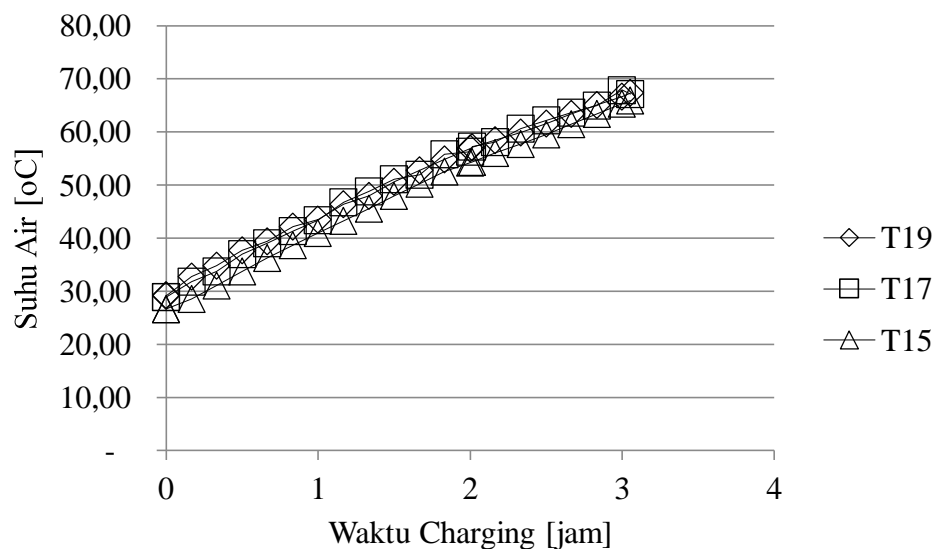
4.1.1. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* dan Air Arah Vertikal

Hasil pengujian pada variasi 600 mLPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.1 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.2.



Gambar 4. 1 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Vertikal

Berdasarkan grafik menunjukkan bahwa suhu awal pada semua termokopel tidak terdapat perbedaan drastis. Setelah penyerapan suhu selama 2 jam memasuki 55°C pada T1 mengalami kenaikan suhu yang drastis dibandingkan 3 termokopel lainnya. Kenaikan suhu T1 dipengaruhi oleh letak termokopel yang berada paling dekat dengan input tangki yang berasal dari heater. Suhu T2, T4, dan T6 baru mengalami kenaikan suhu setelah 2,3 jam.

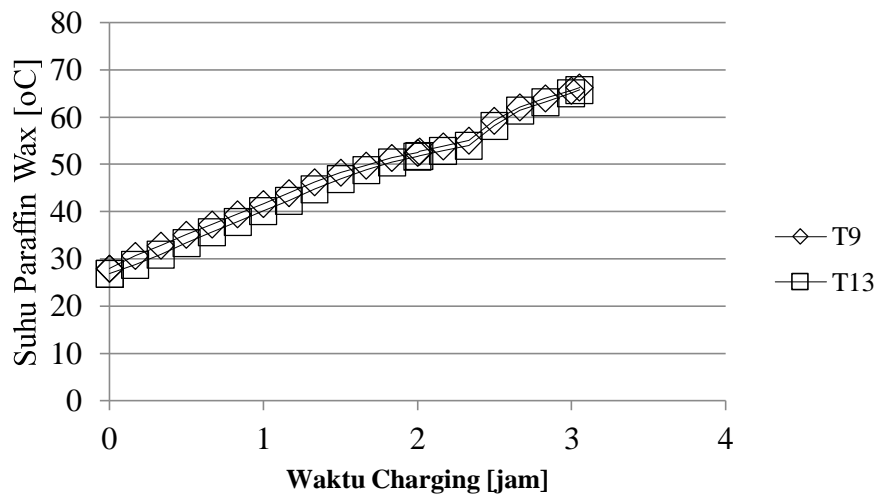


Gambar 4. 2 Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Kenaikan suhu pada masing-masing termokopel terbilang konstan karena dari awal sampai akhir pengujian tidak terdapat lonjakan suhu yang drastis. Pada termokopel T17 dan T19 memiliki suhu yang tidak jauh berbeda, namun pada suhu T17 memiliki nilai suhu yang lebih tinggi dibandingkan T19. T17 memiliki suhu yang lebih tinggi disebabkan karena letak termokopel yang lebih dekat dengan input tangki.

4.1.2. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* dan Air Arah Horisontal

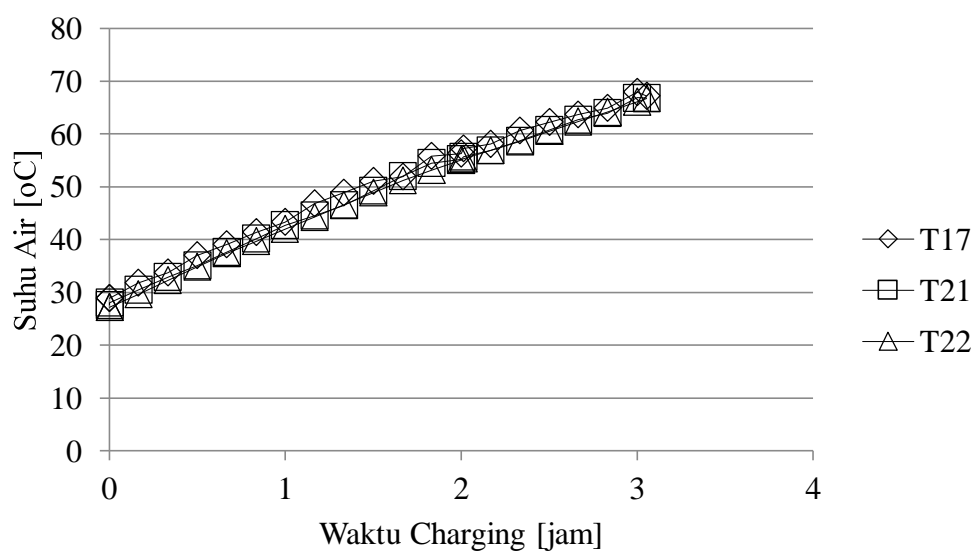
Hasil pengujian pada variasi 600 mLPM arah horisontal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.3 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.4.



Gambar 4. 3 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Horisontal

Berdasarkan Grafik menunjukkan bahwa suhu pada T9 lebih besar daripada suhu T13. Hal tersebut dapat diamati berdasarkan letak termokopel dimana T9 lebih dekat dengan input tangki TES, sehingga T9 lebih dahulu terkena air *heater* daripada T13 yang lebih jauh dari input tangki.

Kenaikan suhu T9 dan T13 dari suhu awal dan waktu 0-2,1 jam tidak mengalami kenaikan suhu yang drastis. Sampai pada waktu 2,3 jam dan suhu memasuki suhu 55°C mengalami lonjakan suhu dimana pada suhu tersebut terjadi perubahan fasa paraffin dari padat menjadi cair.

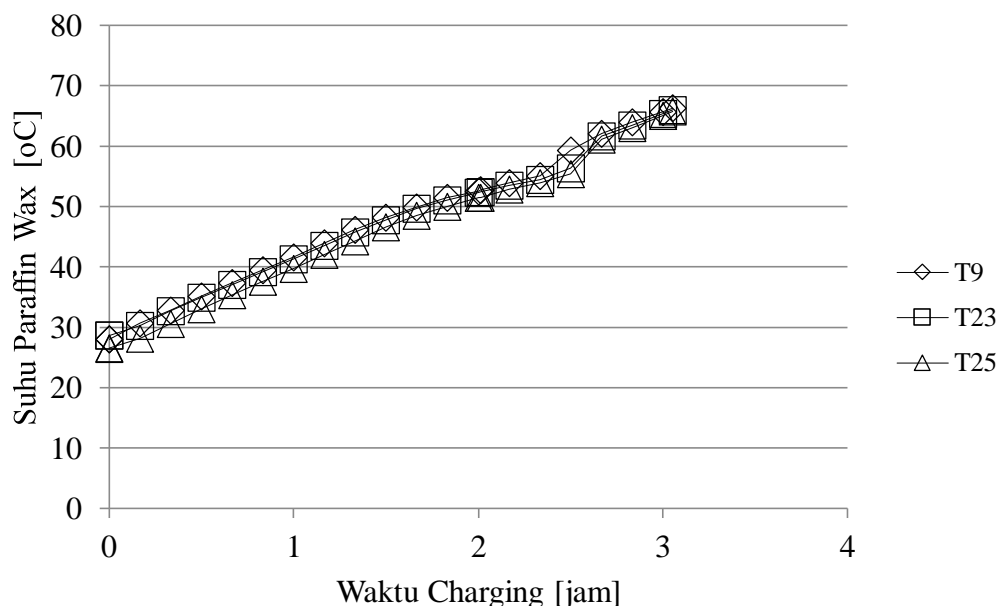


Gambar 4. 4 Evolusi Suhu Air Arah Horisontal

Terdapat perbedaan kenaikan suhu air dari ketiga termokopel. Dari awal pengujian sampai akhir T17 merupakan suhu yang tertinggi dari ketiga termokopel tersebut, karena letak T17 yang lebih dekat dengan posisi inlet air yang berasal dari *heater*.

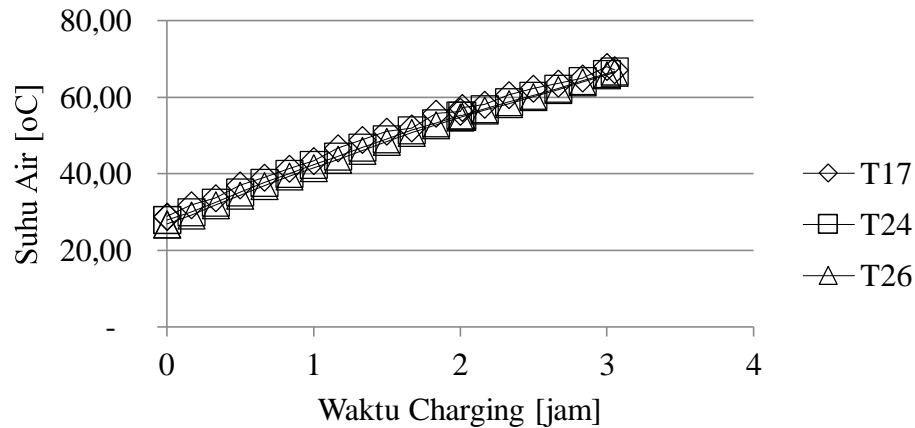
4.1.3. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* dan Air Arah Aksial

Hasil pengujian pada variasi 600 mLPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.5 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.6.



Gambar 4. 5 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Aksial

Kenaikan suhu T9 mengalami lonjakan temperatur pada waktu 2,3-2,5 jam dan berada pada suhu 55-60°C dikarenakan terjadinya perubahan fasa dari padat menjadi cair. Sedangkan pada T23 dan T25 mengalami lonjakan temperatur pada waktu 2,5 jam. Pada T9 mengalami kenaikan suhu lebih cepat, hal tersebut terjadi karena letak termokopel T9 lebih dekat dengan input tangki yang berasal dari *heater*, sehingga perubahan fasa T9 lebih cepat.

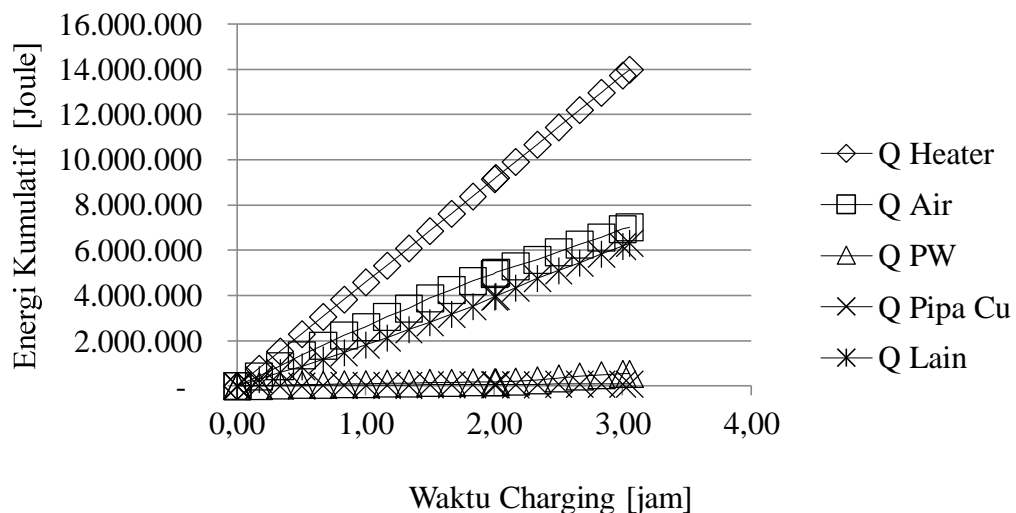


Gambar 4. 6 Evolusi Suhu Air Arah Aksial

Suhu air pada T17 mengalami kenaikan yang fluktuasi dan merupakan termokopel yang mengalami kenaikan suhu paling besar dari ketiga termokopel. Hal itu terjadi karena letak T17 yang berada di tengah sedangkan T24 berada di penampang B dan T26 berada di penampang C sehingga T17 yang berada di tengah lebih dahulu terkena air inlet tangki. T24 dan T26 memiliki temperatur yang relatif sama karena masing-masing dari termokopel tersebut terletak di samping T17.

4.1.4. Energi Kumulatif

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses *charging*. Hasil energi kumulatif yang dihasilkan selama proses *charging* perlu diamati untuk menentukan performa *heater* sebagai pemanas air, grafik dapat diamati pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Grafik Energi Kumulatif

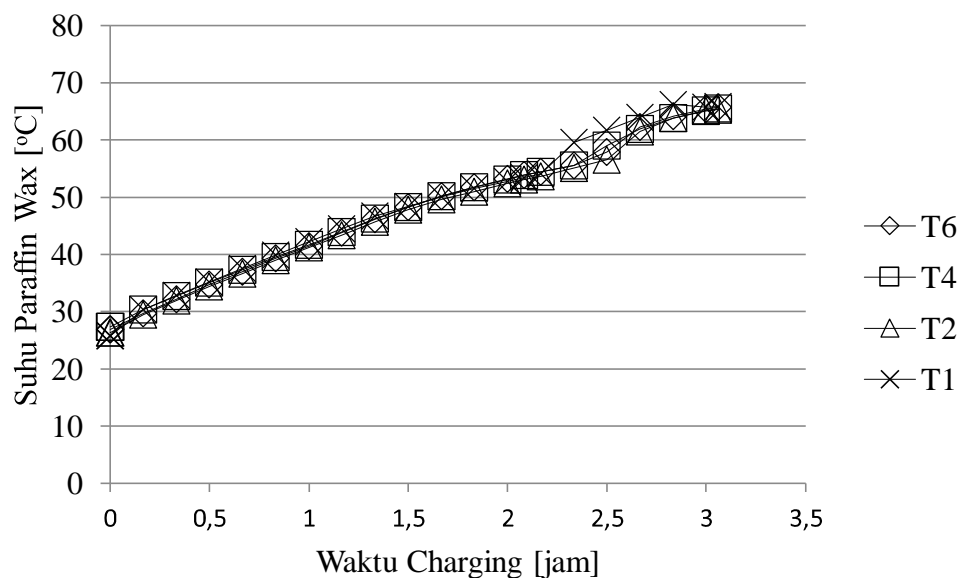
Grafik energi kumulatif menunjukkan bahwa Q heater merupakan energi kalor yang digunakan untuk mengirimkan kalor ke Q air, Q PW, Q Pipa Cu, dan Q lain. Pada grafik Q pipa Cu lebih rendah dari air dan paraffin disebabkan karena nilai C_p yang rendah yaitu 390 J/kg.K , sedangkan nilai C_p air 4180 J/kg.K dan C_p paraffin wax 2000 J/kg.K . Grafik Q paraffin wax mengalami kenaikan yang signifikan saat waktu 2,3-3 jam, laju kenaikan sebesar $80\text{-}100 \text{ Joule}$. Grafik Q air mengalami kenaikan yang relatif stabil. Grafik Q lain yang merupakan kalor yang terbuang ke tangki dan lingkungan juga mengalami kenaikan yang relatif stabil.

4.2. Evolusi Suhu pada Variasi 700 mLPM

Pengamatan perubahan temperatur pada variasi 700 mLPM yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan. Pengamatan dilakukan di 26 titik termokopel yang tersebar dalam tangki. Peletakan termokopel meliputi arah vertikal, arah horisontal, dan arah aksial yang terpasang pada pipa embaga dengan posisi pada Gambar 3.26.

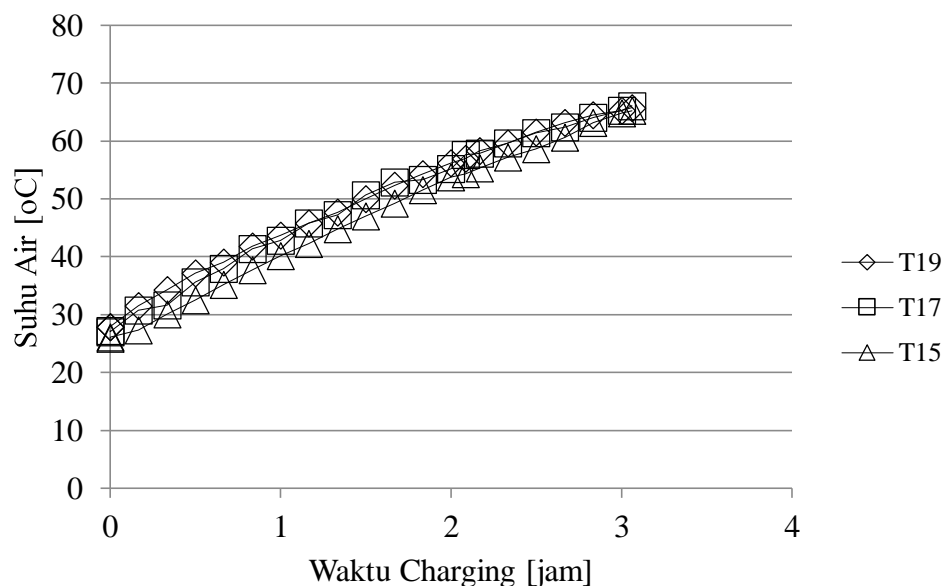
4.2.1. Evolusi Suhu Paraffin Wax dan Air Arah Vertikal

Hasil pengujian pada variasi 700 mLPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.8 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.9.



Gambar 4. 8 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Vertikal

Berdasarkan grafik menunjukkan bahwa suhu awal pada semua termokopel tidak terdapat perbedaan drastis. Setelah penyerapan suhu selama 2,16 jam memasuki 54⁰C pada T1 mengalami kenaikan suhu yang drastis dibandingkan 3 termokopel lainnya. Kenaikan suhu T1 dipengaruhi oleh letak termokopel yang berada paling dekat dengan input tangki yang berasal dari *heater*. Suhu T4 dan T6 baru mengalami kenaikan suhu setelah 2,3 jam. Sedangkan T2 baru mengalami peningkatan suhu pada waktu 2,5 jam dimana merupakan perubahan terlama diantara keempat termokopel.

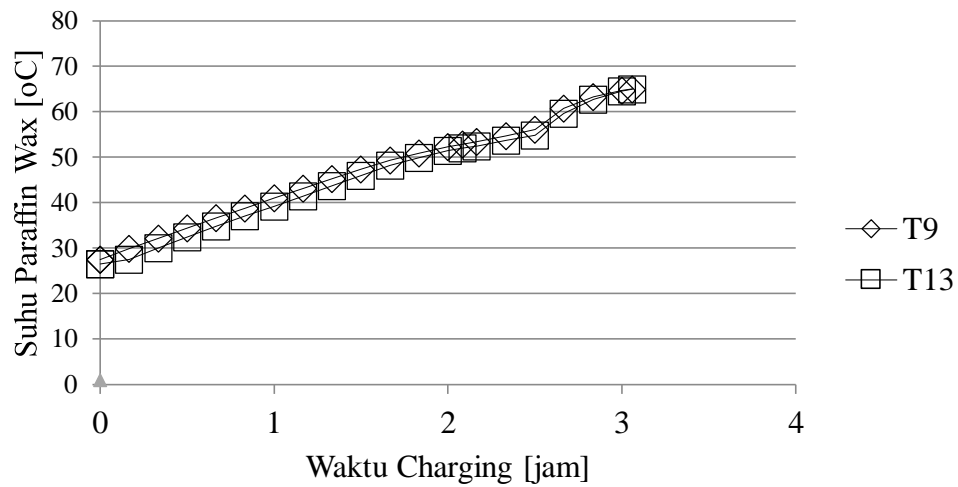


Gambar 4. 9 Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Pada termokopel T17 mengalami kenaikan suhu yang fluktuasi. T17 memiliki nilai suhu yang tidak jauh berbeda dengan T19, namun pada suhu T17 memiliki nilai suhu yang lebih tinggi dibandingkan T19. T17 memiliki suhu yang lebih tinggi disebabkan karena letak termokopel yang lebih dekat dengan input tangki.

4.2.2. Evolusi Suhu Paraffin Wax dan Air Arah Horisontal

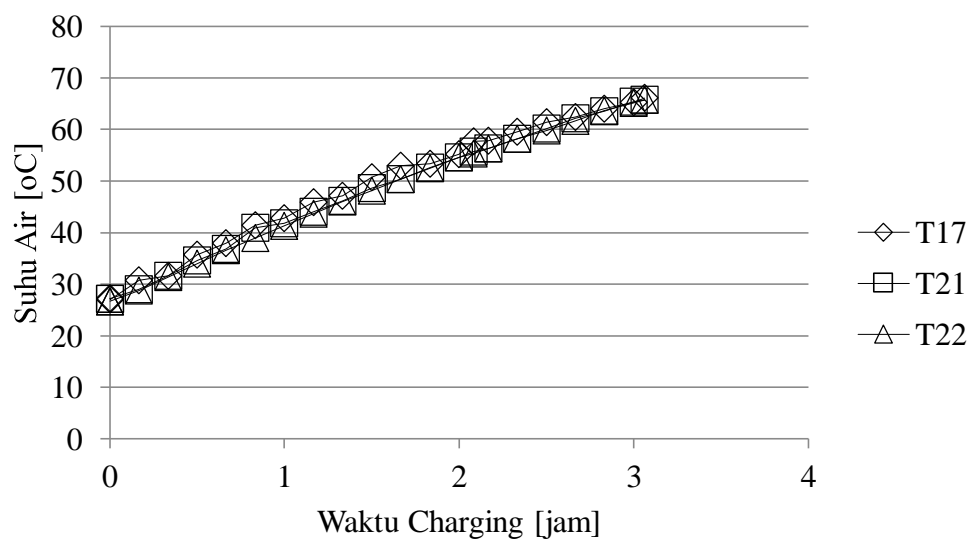
Hasil pengujian pada variasi 700 mLPM arah horisontal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.10 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.11.



Gambar 4. 10 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Horizontal

Berdasarkan Grafik menunjukkan bahwa suhu pada T9 lebih besar daripada suhu T13. Hal tersebut dapat diamati berdasarkan letak termokopel dimana T9 lebih dekat dengan input tangki, sehingga T9 lebih dahulu terkena air *heater* daripada T13 yang terletak di samping T9.

Kenaikan suhu T9 dan T13 dari suhu awal dan waktu 0-2,3 jam tidak mengalami kenaikan suhu yang drastis. Sampai pada waktu 2,5 jam suhu T9 memasuki suhu 55°C dan T13 memasuki suhu 54°C mengalami lonjakan suhu dimana pada suhu tersebut terjadi perubahan fasa paraffin dari padat menjadi cair.

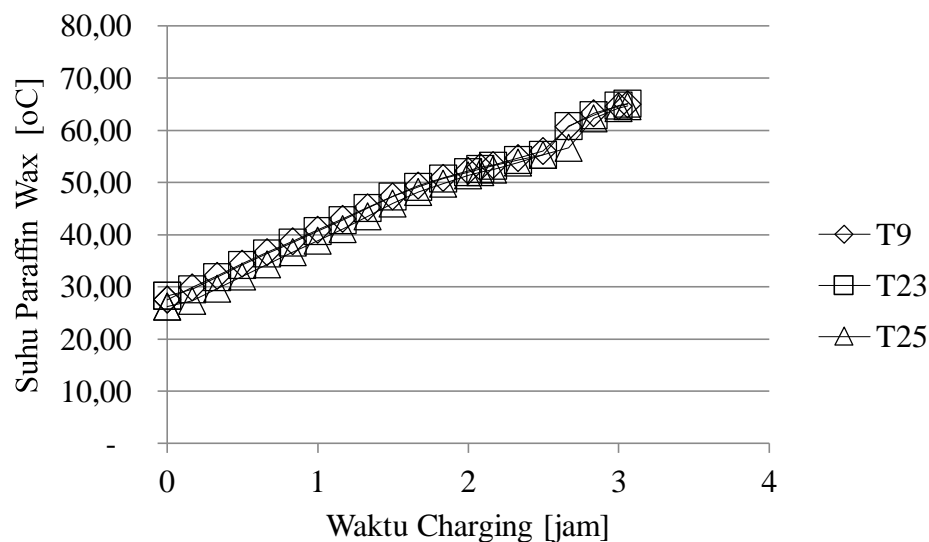


Gambar 4. 11 Evolusi Suhu Air Arah Horizontal

Terdapat perbedaan kenaikan suhu air dari ketiga termokopel. T17 merupakan suhu yang tertinggi dari ketiga termokopel tersebut, karena letak T17 yang lebih dekat dengan posisi inlet air yang berasal dari *heater*. Namun, pada grafik T17 mengalami fluktuasi kenaikan suhu dikarenakan panas air pada tangki yang belum merata. Grafik T21 dan T22 memiliki temperatur yang relatif sama, namun pada T21 terdapat kenaikan suhu yang kurang stabil pada 1 titik yaitu waktu 0,83 jam dan suhu 41°C.

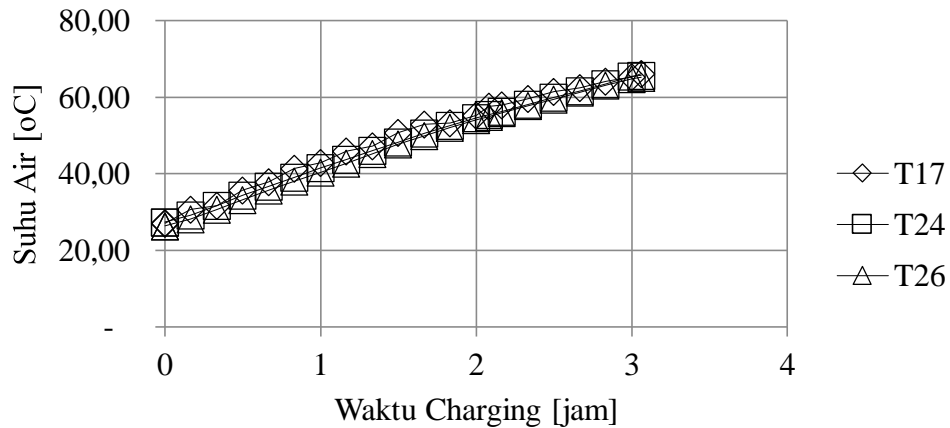
4.2.3. Evolusi Suhu Paraffin Wax dan Air Arah Aksial

Hasil pengujian pada variasi 700 mLPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.12 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.13.



Gambar 4. 12 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Aksial

Kenaikan suhu pada T9 dan T23 mengalami lonjakan temperatur pada waktu 2,5- 2,8 jam dan berada pada suhu 55-63°C, sedangkan T25 mengalami lonjakan temperatur pada waktu 2,6 jam. Lonjakan tersebut terjadi karena adanya perubahan fasa yang dari padat menjadi cair.

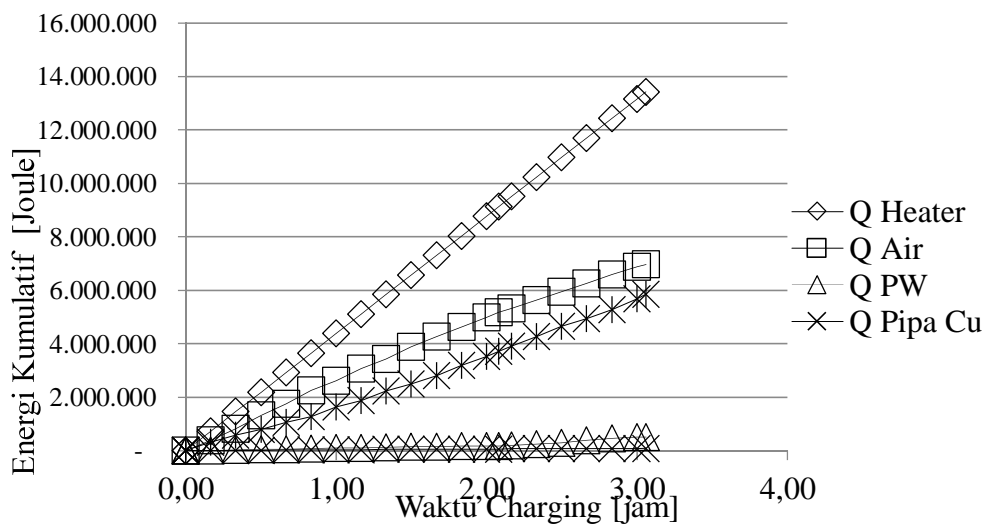


Gambar 4. 13 Evolusi Suhu Air Arah Aksial

Temperatur air pada T17 merupakan temperatur yang paling besar dari ketiga termokopel. Hal itu terjadi karena letak T17 yang berada di tengah sedangkan T24 berada di penampang B dan T26 berada di penampang C sehingga T17 yang berada di tengah lebih dahulu terkena air inlet tangki. T24 dan T26 memiliki temperatur yang relatif sama karena masing-masing dari termokopel tersebut terletak di samping T17.

4.2.4. Grafik Energi Kumulatif

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses *charging*. Hasil energi kumulatif yang dihasilkan selama proses *charging* perlu diamati untuk menentukan performa *heater* sebagai pemanas air, grafik dapat diamati pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 14 Grafik Energi Kumulatif

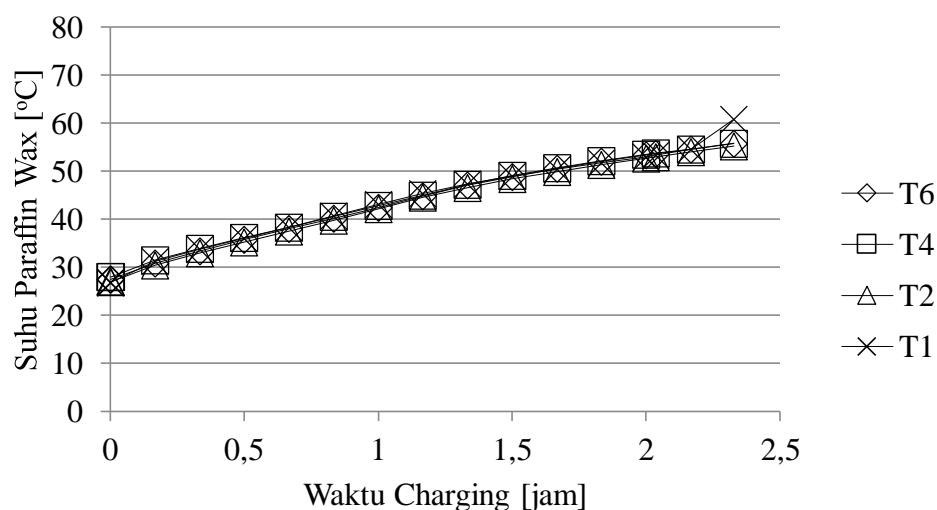
Grafik energi kumulatif menunjukkan bahwa Q heater merupakan energi kalor yang digunakan untuk mengirimkan kalor ke Q air, Q PW, Q Pipa Cu, dan Q lain. Pada grafik Q pipa Cu lebih rendah dari air dan paraffin disebabkan karena nilai C_p yang rendah yaitu 390 J/kg.K , sedangkan nilai C_p air 4180 J/kg.K dan C_p paraffin wax 2000 J/kg.K . Grafik Q paraffin wax mengalami kenaikan yang signifikan saat waktu 2,5-3 jam, laju kenaikan sebesar 40-80 Joule. Kenaikan tersebut terjadi karena terjadinya perubahan fasa dari padat menjadi cair. Grafik Q air mengalami kenaikan yang relatif stabil. Grafik Q lain yang merupakan kalor yang terbuang ke tangki dan lingkungan juga mengalami kenaikan yang relatif stabil.

4.3. Evolusi Suhu pada Variasi 800 mLPM

Pengamatan perubahan temperatur pada variasi 800 mLPM yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan. Pengamatan dilakukan di 26 titik termokopel yang tersebar dalam tangki. Peletakan termokopel meliputi arah vertikal, arah horisontal, dan arah aksial yang terpasang pada pipa tembaga dengan posisi pada Gambar 3.26.

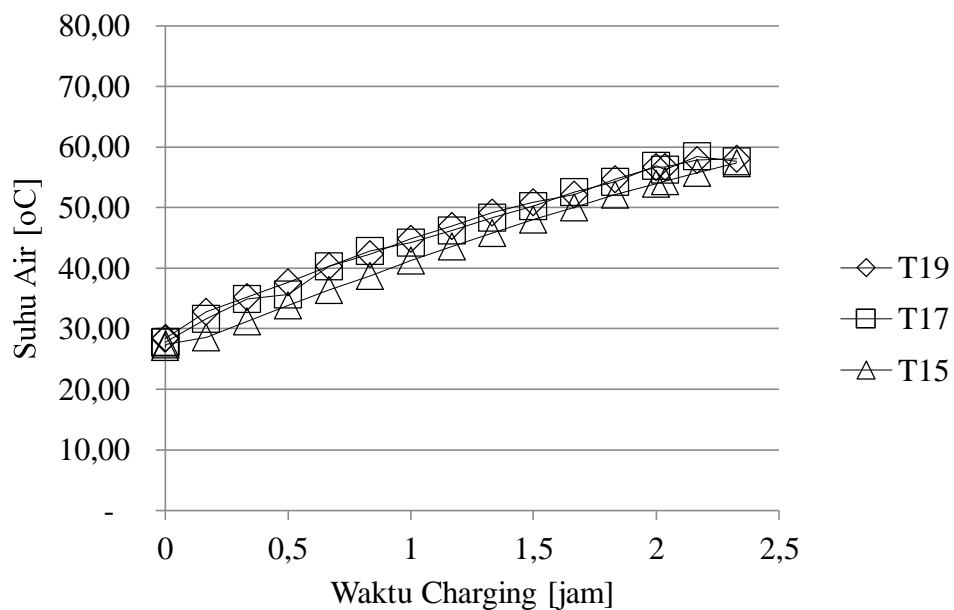
4.3.1. Evolusi Suhu Paraffin Wax dan Air Arah Vertikal

Hasil pengujian pada variasi 800 mLPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.15 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.16.



Gambar 4. 15 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Vertikal

Grafik menunjukkan bahwa suhu dari semua termokopel tidak terdapat perbedaan drastis. Namun, pada waktu 2,1 jam dan suhu mencapai 54,6°C terjadi lonjakan sampai 2,3 jam dan mencapai suhu 60,8°C. Hal tersebut terjadi karena pada temperatur tersebut terjadi perubahan fasa dari padat menjadi cair. Suhu T2, T4, dan T6 mengalami kenaikan suhu yang lebih lambat dari T1 karena posisi termokopel yang lebih jauh dari input tangki.

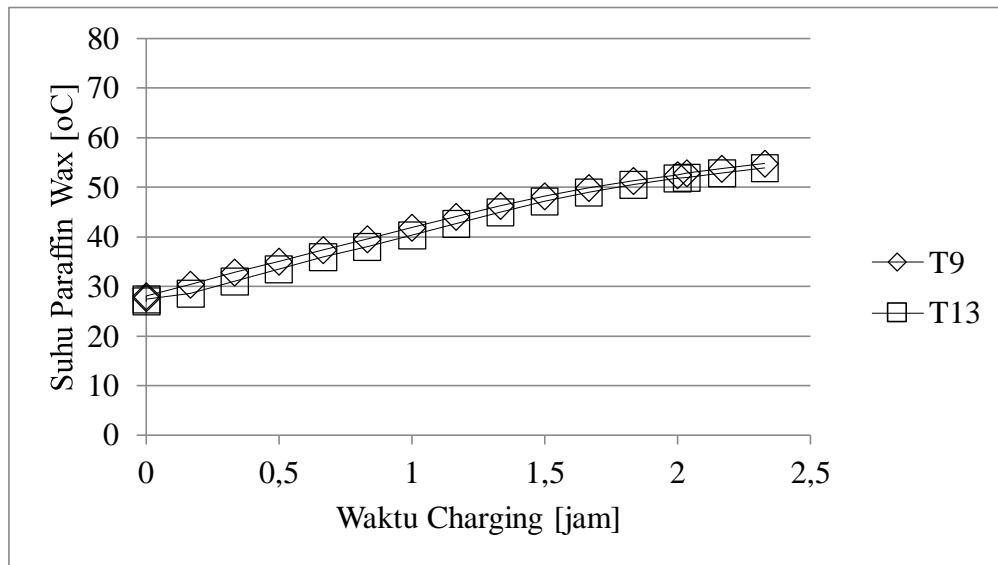


Gambar 4. 16 Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Pada termokopel T17 mengalami kenaikan suhu yang fluktuasi. T17 memiliki nilai suhu yang tidak jauh berbeda dengan T19, namun pada suhu T17 memiliki nilai suhu yang lebih tinggi dibandingkan T19. T17 memiliki suhu yang lebih tinggi disebabkan karena letak termokopel yang lebih dekat dengan input tangki..

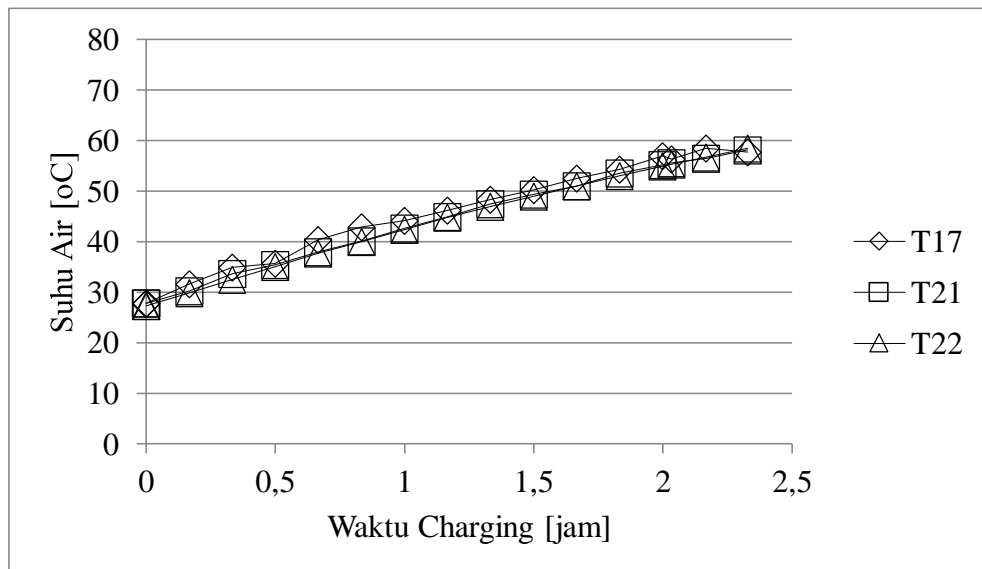
4.3.2. Evolusi Suhu Paraffin Wax dan Air Arah Horisontal

Hasil pengujian pada variasi 800 mLPM arah horisontal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.17 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.18.



Gambar 4. 17 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Horizontal

Grafik menunjukkan temperatur pada T9 lebih besar dari suhu T13. Berdasarkan posisi termokopel menunjukkan bahwa T9 lebih dekat dengan input tangki, sehingga temperatur termokopel T9 akan lebih dahulu menyerap panas yang dikirimkan oleh *heater*.

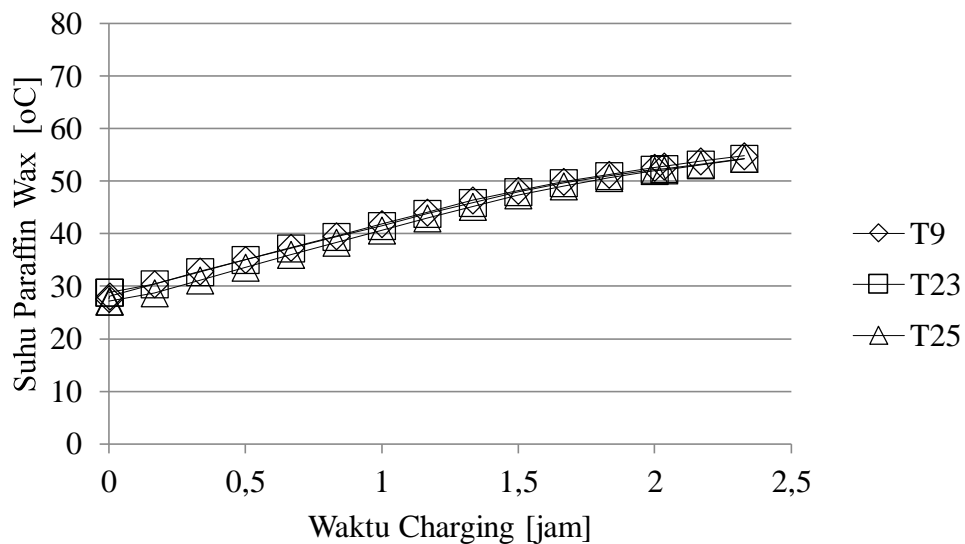


Gambar 4. 18 Evolusi Suhu Air Arah Horizontal

Kenaikan suhu awal pada tiga termokopel memiliki temperatur yang relatif sama. Namun pada grafik T17 terjadi fluktuasi suhu, dikarenakan suhu air yang berasal dari *heater* dan masuk ke tangki belum merata.

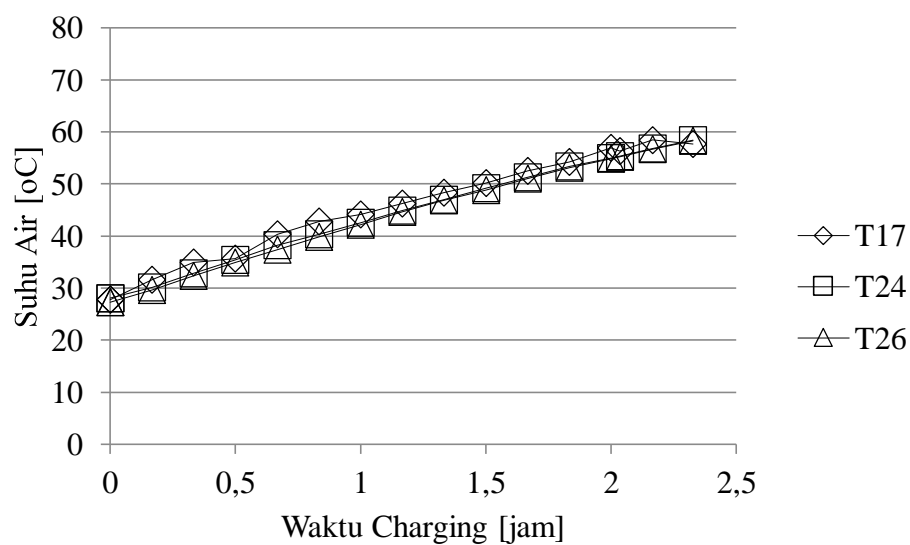
4.3.3. Evolusi Suhu Paraffin Wax dan Air Arah Aksial

Hasil pengujian pada variasi 800 mLPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.19 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.20.



Gambar 4. 19 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Aksial

Kenaikan suhu dari ketiga termokopel tersebut memiliki temperatur yang relatif sama. Hal tersebut terjadi karena suhu pada *paraffin wax* mengalami pemanasan kalor yang merata.

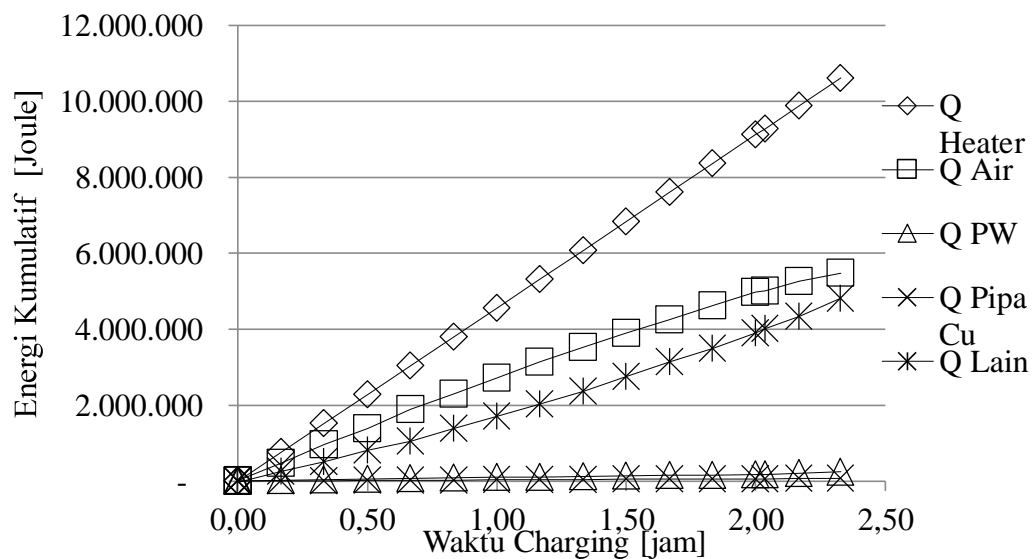


Gambar 4. 20 Evolusi Suhu Air Arah Aksial

Temperatur air pada T17 merupakan temperatur yang paling besar dari ketiga termokopel. Hal itu terjadi karena letak T17 yang berada di tengah sedangkan T24 berada di penampang B dan T26 berada di penampang C sehingga T17 yang berada di tengah lebih dahulu terkena air inlet tangki. T24 dan T26 memiliki temperatur yang relatif sama karena masing-masing dari termokopel tersebut terletak di samping T17. Namun, grafik peningkatan temperatur T17 terdapat penurunan pada waktu 2-2,03 jam dengan temperatur 56,89-56,31°C dan 2,16-1,32 jam dengan temperatur 58,44-57,66°C. Hal tersebut terjadi karena suhu air yang berada di dalam tangki tidak merata.

4.3.4. Grafik Energi Kumulatif

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses *charging*. Hasil energi kumulatif yang dihasilkan selama proses *charging* perlu diamati untuk menentukan performa *heater* sebagai pemanas air, grafik dapat diamati pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 21 Grafik Energi Kumulatif

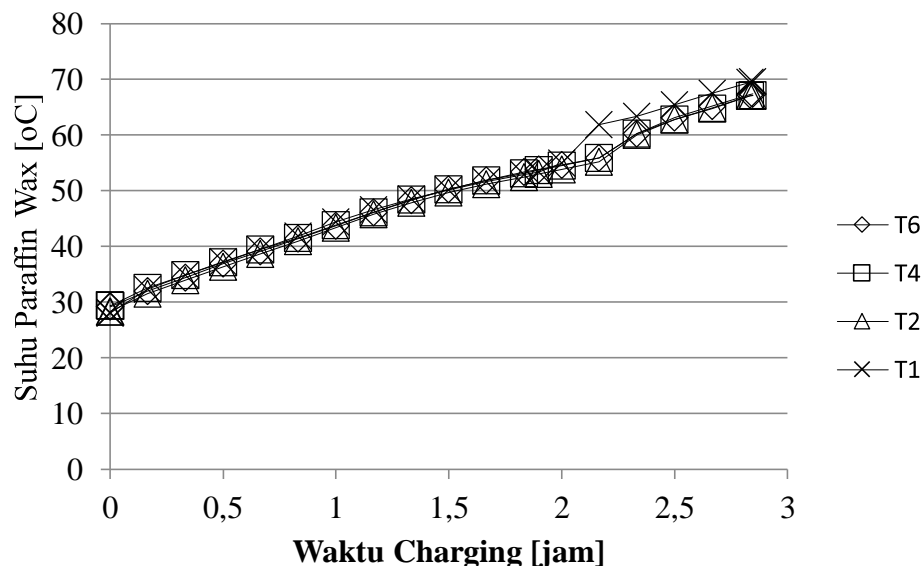
Grafik energi kumulatif menunjukkan bahwa Q heater merupakan energi kalor yang digunakan untuk mengirimkan kalor ke Q air, Q PW, Q Pipa Cu, dan Q lain. Pada grafik Q pipa Cu lebih rendah dari air dan paraffin disebabkan karena nilai C_p yang rendah yaitu 390 J/kg.K, sedangkan nilai C_p air 4180 J/kg.K dan C_p paraffin wax 2000 J/kg.K. Grafik Q *paraffin wax* dan Grafik Q air mengalami kenaikan yang relatif stabil. Grafik Q lain yang merupakan kalor yang terbuang ke tangki dan lingkungan juga mengalami kenaikan yang relatif stabil.

4.4. Evolusi Suhu pada Variasi 900 mLPM

Pengamatan perubahan temperatur pada variasi 800 mLPM yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan. Pengamatan dilakukan di 26 titik termokopel yang tersebar dalam tangki. Peletakan termokopel meliputi arah vertikal, arah horisontal, dan arah aksial yang terpasang pada pipa tembaga dengan posisi pada Gambar 3.26.

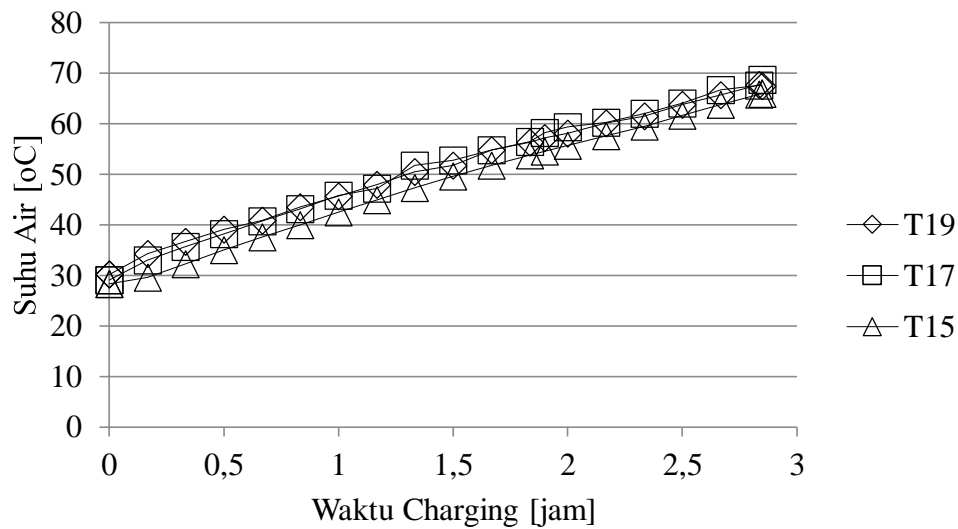
4.4.1. Evolusi Suhu Paraffin Wax dan Air Arah Vertikal

Hasil pengujian pada variasi 900 mLPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.22 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.23.



Gambar 4. 22 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Vertikal

Kenaikan pada awal temperatur dari tiga termokopel tidak terdapat perbedaan yang drastis. Namun, pada T1 waktu 2 jam dan suhu mencapai 55°C terjadi lonjakan sampai 2,16 jam dan mencapai suhu $61,91^{\circ}\text{C}$. Hal tersebut terjadi karena pada temperatur tersebut terjadi perubahan fasa dari padat menjadi cair. Suhu T2, T4, dan T6 baru mengalami kenaikan suhu pada waktu 2,16 jam. Hal itu dapat terjadi karena posisi termokopel T2, T4, dan T6 yang lebih jauh dari input tangki dibanding T1 yang dekat dengan input tangki.

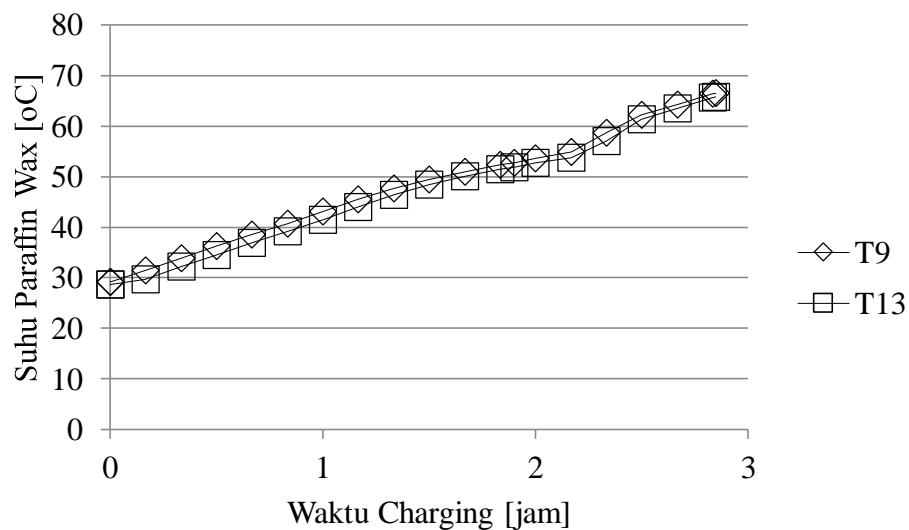


Gambar 4. 23 Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Pada termokopel T17 mengalami kenaikan suhu yang fluktuasi. T17 memiliki nilai suhu yang tidak jauh berbeda dengan T19, namun pada suhu T17 memiliki nilai suhu yang lebih tinggi dibandingkan T19. T17 memiliki suhu yang lebih tinggi disebabkan karena letak termokopel yang lebih dekat dengan input tangki.

4.4.2. Evolusi Suhu Paraffin Wax dan Air Arah Horizontal

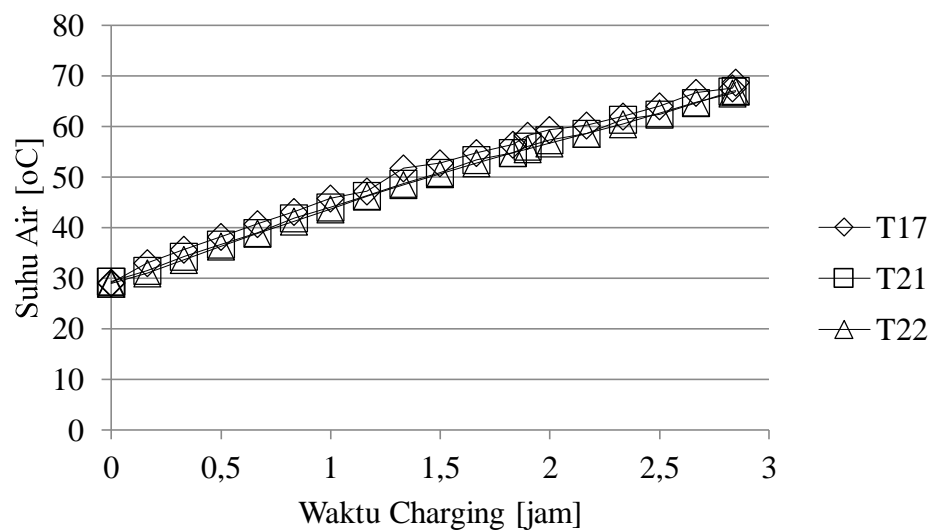
Hasil pengujian pada variasi 900 mLPM arah horizontal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.24 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.25.



Gambar 4. 24 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Horizontal

Berdasarkan Grafik menunjukkan bahwa suhu pada T9 lebih besar daripada suhu T13. Hal tersebut dapat diamati berdasarkan letak termokopel dimana T9 lebih dekat dengan input tangki, sehingga T9 lebih dahulu terkena air *heater* daripada T13 yang terletak di samping T9.

Kenaikan suhu T9 dan T13 dari suhu awal dan waktu 0-2 jam tidak mengalami kenaikan suhu yang drastis. Sampai pada waktu 2,16 jam suhu T9 memasuki suhu $54,82^{\circ}\text{C}$ dan T13 memasuki suhu $53,74^{\circ}\text{C}$ mengalami lonjakan suhu dimana pada suhu tersebut terjadi perubahan fasa paraffin dari padat menjadi cair.

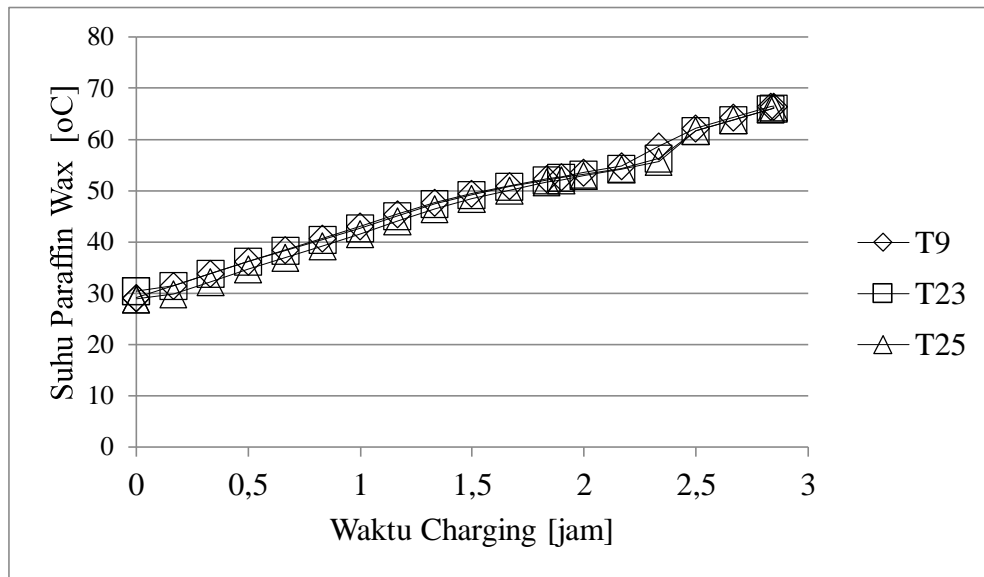


Gambar 4. 25 Evolusi Suhu Air Arah Horisontal

Terdapat perbedaan kenaikan suhu air dari ketiga termokopel. T17 merupakan suhu yang tertinggi dari ketiga termokopel tersebut, karena letak T17 yang lebih dekat dengan posisi inlet air yang berasal dari *heater*. Namun, pada grafik T17 mengalami kenaikan suhu yang kurang stabil, hal tersebut terjadi karena suhu air pada tangki yang belum panas merata. Grafik T21 dan T22 memiliki temperatur yang relatif sama.

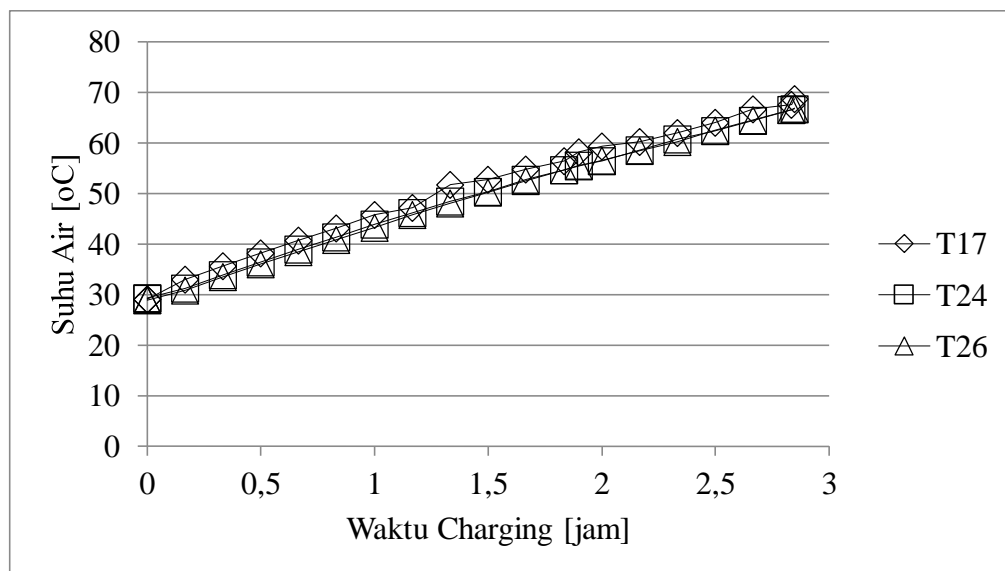
4.4.3. Evolusi Suhu Paraffin Wax dan Air Arah Aksial

Hasil pengujian pada variasi 900 mLPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu air. Grafik evolusi suhu *paraffin wax* dapat dilihat pada gambar 4.26 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.27.



Gambar 4. 26 Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Aksial

T9 mengalami lonjakan temperatur pada waktu 2,16 jam dan berada pada suhu 54,24 °C, sedangkan T23 dan T25 mengalami lonjakan temperatur pada waktu 2,3 jam pada suhu 55,64 °C. Lonjakan tersebut terjadi karena adanya perubahan fasa yang dari padat menjadi cair.



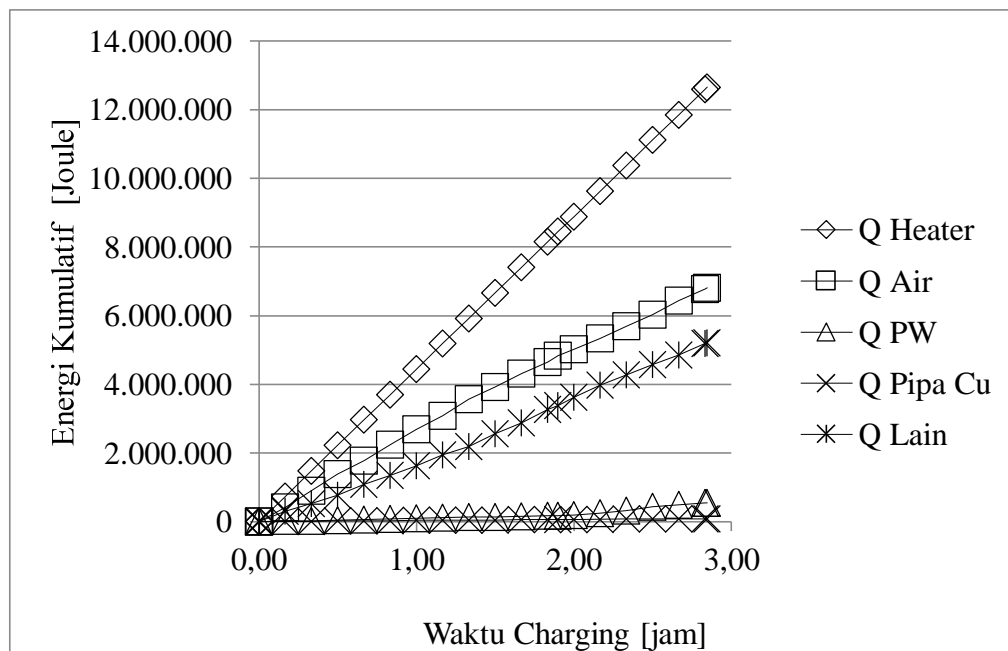
Gambar 4. 27 Evolusi Suhu Air Arah Aksial

Temperatur air pada T17 merupakan temperatur yang paling besar dari ketiga termokopel. Hal itu terjadi karena letak T17 yang berada di tengah sedangkan T24 berada di penampang B dan T26 berada di penampang C sehingga T17 yang berada di tengah lebih dahulu terkena air inlet tangki. T24 dan T26 memiliki temperatur

yang relatif sama karena masing-masing dari termokopel tersebut terletak di samping T17. Namun, grafik peningkatan temperatur T17 mengalami kenaikan yang tidak stabil.

4.4.4. Grafik Energi Kumulatif

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses *charging*. Hasil energi kumulatif yang dihasilkan selama proses *charging* perlu diamati untuk menentukan performa *heater* sebagai pemanas air, grafik dapat diamati pada Gambar 4.28.



Gambar 4. 28 Grafik Energi Kumulatif

Grafik energi kumulatif menunjukkan bahwa Q heater merupakan energi kalor yang digunakan untuk mengirimkan kalor ke Q air, Q PW, Q Pipa Cu, dan Q lain. Pada grafik Q pipa C7\ lebih rendah dari air dan paraffin disebabkan karena nilai C_p yang rendah yaitu 390 J/kg.K, sedangkan nilai C_p air 4180 J/kg.K dan C_p paraffin wax 2000 J/kg.K. Grafik Q paraffin wax mengalami kenaikan yang signifikan saat waktu 2-2,83 jam, laju kenaikan sebesar 50-100 Joule. Kenaikan tersebut terjadi karena terjadinya perubahan fasa paraffin wax dari padat menjadi cair. Grafik Q air mengalami kenaikan yang relatif stabil, besarnya Q air dipengaruhi cepatnya kenaikan suhu saat *charging*. Grafik Q lain yang merupakan kalor yang terbuang ke tangki dan lingkungan juga mengalami kenaikan yang relatif stabil.

4.5. Energi Kumulatif Q Heater, Air, PCM, Pipa Cu, dan lain-lain

4.5.1. Energi Kumulatif Q Heater

Energi Kumulatif yang dihasilkan selama proses charging oleh heater. Hasil Q heater didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.1.

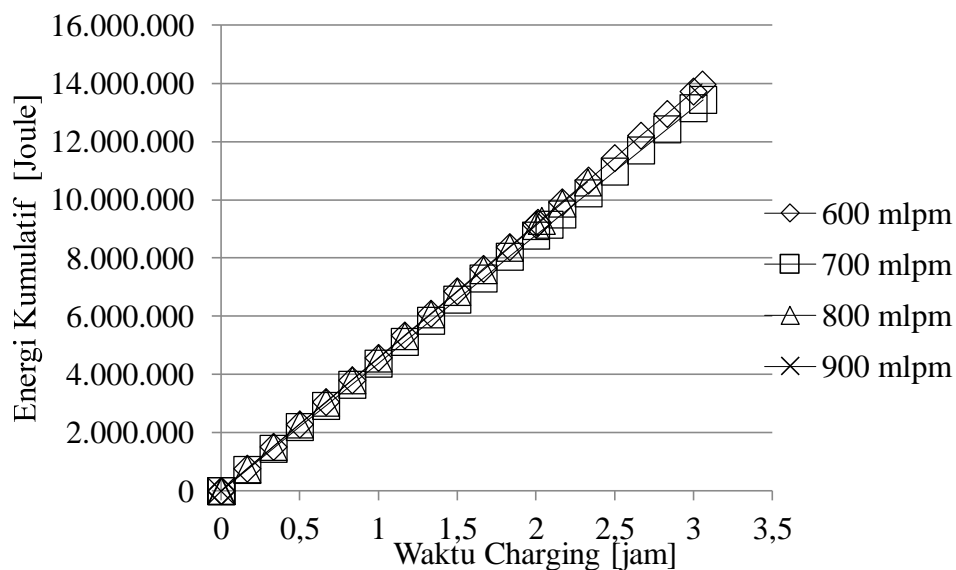
$$Q_{\text{kum heater}} = Q_{\text{kum heater}} + Q_{\text{heater sesaat}} \quad (4.1)$$

$$Q_{\text{kum heater}} = 6356 + 6356$$

$$Q_{\text{kum heater}} = 12.712 \text{ J}$$

Tabel 4. 1 Data energi kumulatif Q heater

No	Q heater sesaat	Q heater kumulatif
	Joule	Joule
1	6174,4	6174,4
2	6174,4	12348,8



Gambar 4. 29 Energi kumulatif Q heater

Grafik menunjukkan heater mampu menghasilkan energi yang relatif stabil. Perbedaan pada grafik adalah panjangnya. Dimana panjang dari trend grafik tersebut menunjukkan seberapa besar energi yang terkumpul. Berdasarkan grafik di atas energi yang terbesar pada 600 mLPM dan terkecil adalah 800 mLPM.

4.5.2. Energi Kumulatif Q Air

Hasil Q air didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.2.

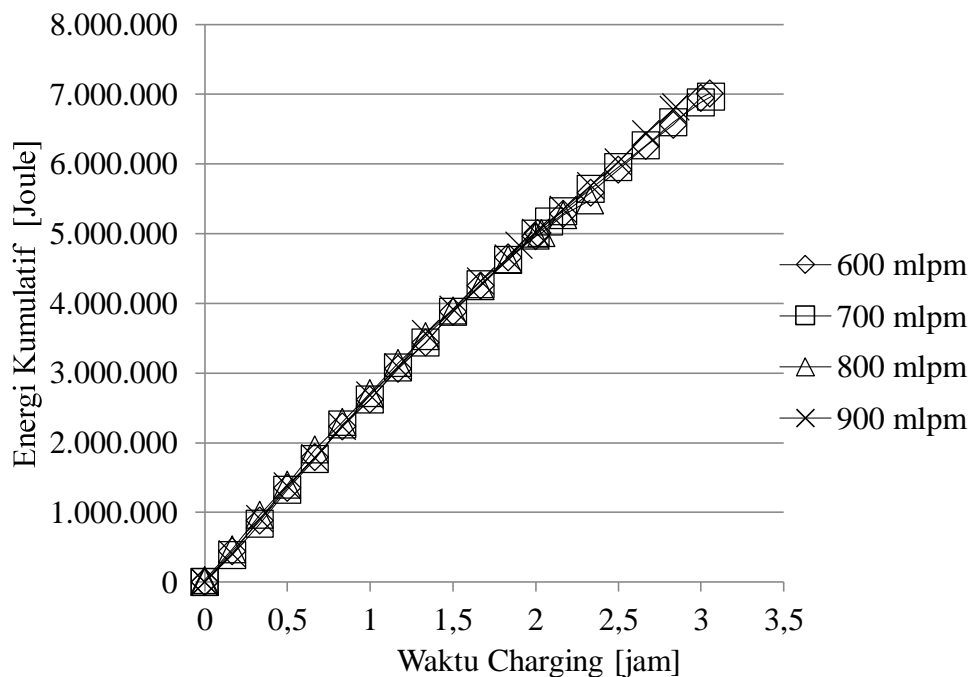
$$Q_{\text{kum air}} = \text{massa air} \times C_p \text{ air} \times \Delta T \quad (4.2)$$

$$Q_{\text{kum air}} = 43,13 \times 4180 \times (27,76 - 27,75)$$

$$Q_{\text{kum air}} = 1555,32 \text{ J}$$

Tabel 4. 2 Data energi kumulatif Q air

No Data	Cp air	Massa Air	Suhu Air rata-rata	Q kum air
	J/kg.K	kg	°C	J
0	4180	43,13	27,75	-
3	4180	43,13	27,76	1555,32



Gambar 4. 30 Energi kumulatif Q air

Grafik menunjukkan kenaikan yang relatif stabil, namun kenaikan grafik tersebut tidak dibarengi kenaikan yang konstan. Hal tersebut dapat terjadi karena penurunan dari energi yang didapat dan PCM mulai berubah fasa kemudian menyerap energi air untuk disimpan oleh PCM.

4.5.3. Energi Kumulatif Q Paraffin Wax

Hasil Q paraffin wax didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.3.

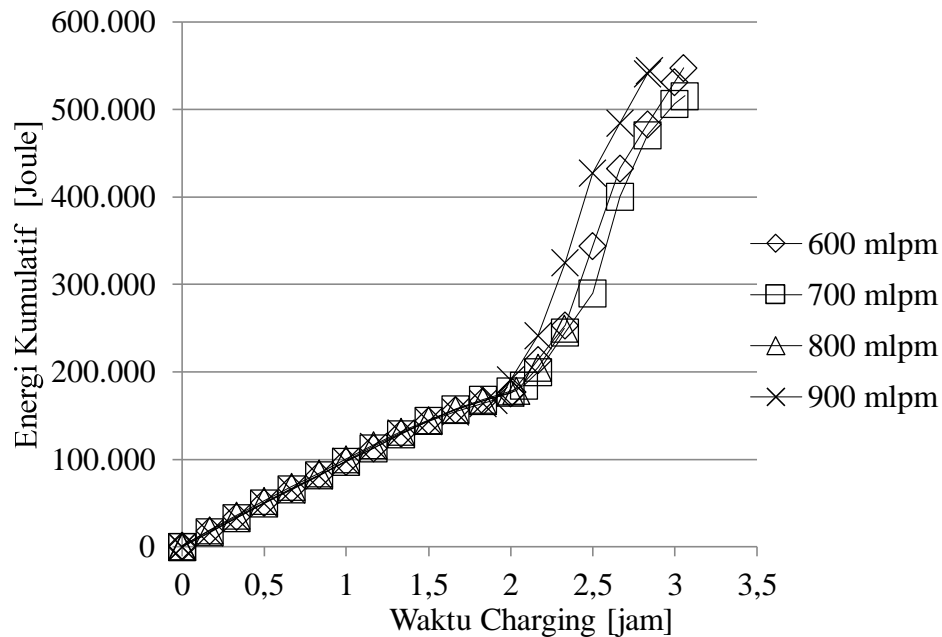
$$Q_{\text{kum}} = \text{massa PCM} \times C_p \text{ PCM} \times \Delta T$$

$$Q_{\text{kum}} = 3,5 \times 2000 \times (27,85 - 27,6)$$

$$Q_{\text{kum}} = 1812,22 \text{ J}$$

Tabel 4. 3 Data energi kumulatif Q paraffin wax

No Data	Cp PW	Massa PW	Suhu PW rata-rata	Q kum PW
	J/kg.K	kg	°C	J
0	2000	3,5	27,6	-
1	2000	3,5	27,85	1812,22



Gambar 4. 31 Energi kumulatif Q paraffin wax

Grafik menunjukkan saat pengujian memasuki waktu 2 jam, grafik mengalami lonjakan suhu. Lonjakan tersebut menunjukkan kenaikan energi yang didapat. Hal tersebut terjadi karena pada waktu tersebut PCM mengalami perubahan fasa dan mengambil energi dari air kemudian disimpan oleh PCM.

4.5.4. Energi Kumulatif Pipa Cu

Hasil Q Pipa-Cu didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.4.

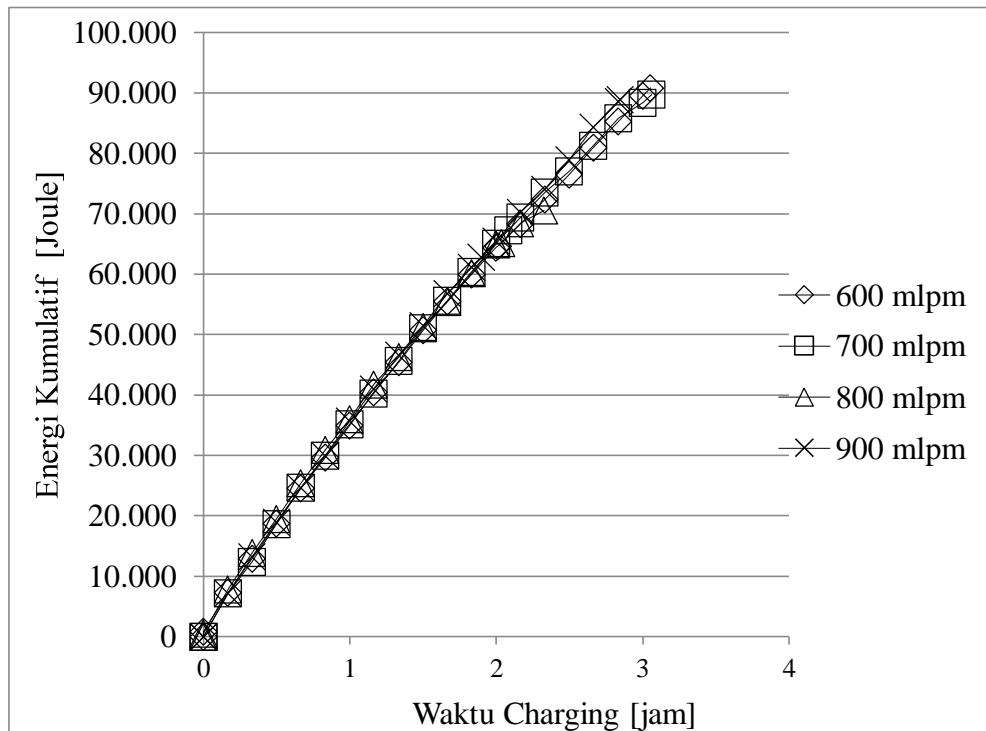
$$Q_{\text{kum}} = \text{massa pipa Cu} \times C_p \text{ pipa Cu} \times \Delta T$$

$$Q_{\text{kum}} = 5,91 \times 390 \times (28,06 - 27,71)$$

$$Q_{\text{kum}} = 821,15$$

Tabel 4. 4 Data energi kumulatif pipa Cu

No Data	Cp Pipa Cu	Massa Pipa Cu	Suhu Pipa Cu	Q kum Pipa Cu
	J/kg.K	kg	°C	J
0	390	5,91	27,71	-
1	390	5,91	28,06	821,15



Gambar 4. 32 Energi kumulatif Q pipa Cu

Grafik diatas mmenunjukkan energi yang didapat oleh pipa Cu, dimana pipa Cu merupakan kapsul untuk menempatkan PCM di dalamnya. Grafik menunjukkan kenaikan yang relatif stabil.

4.5.5. Energi Kumulatif Lain-lain

Hasil Q lain-lain didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.5.

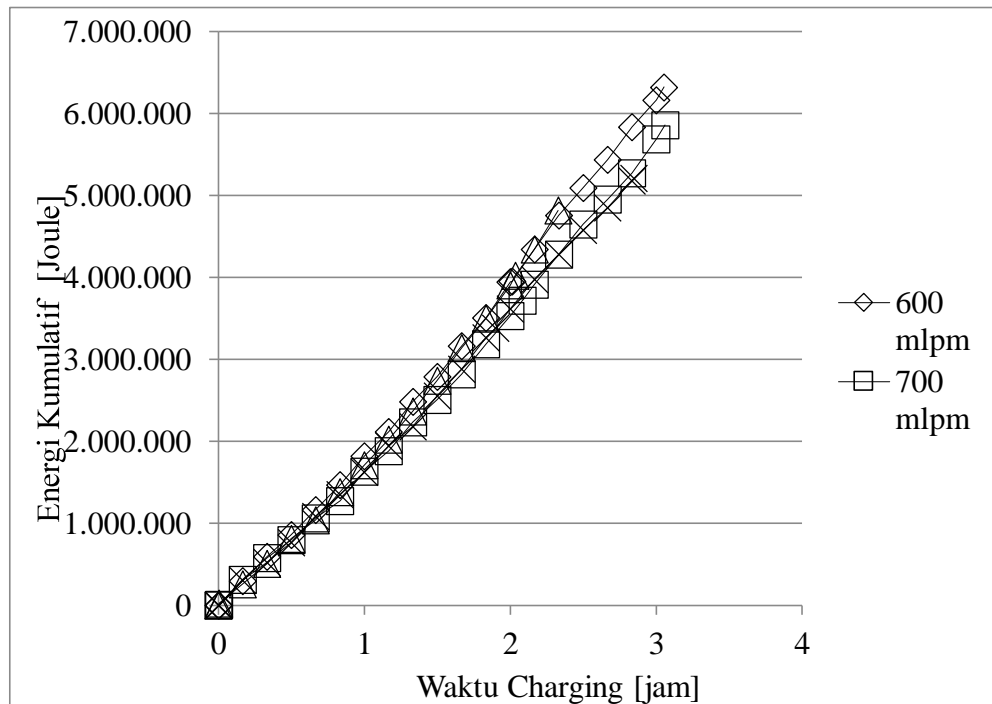
$$Q_{kum} = Q_{kum \text{ heater}} + Q_{kum \text{ air}} + Q_{kum \text{ PCM}} + Q_{kum \text{ pipa Cu}}$$

$$Q_{kum} = 6356 + 1555,32 + 1812,12 + 821,15$$

$$Q_{kum} = 2167,32$$

Tabel 4. 5 Data energi kumulatif Q lain-lain

No Data	Qkum heater	Qkum air	Qkum PCM	Qkum pipa Cu
	J	J	J	J
1	6356	1555,32	1812,12	821,15



Gambar 4. 33 Energi kumulatif lain-lain

Grafik menunjukkan energi yang didapat Q lain-lain. Q lain-lain didapat dengan mengurangi energi *heater* yang merupakan energi awal dikurangi energi air, energi paraffin wax, energi pipa Cu. Maka laju kenaikan grafik Q lain-lain mengikuti hasil masing-masing dari energi kumulatif tersebut.

4.6. Laju Penyerapan Kalor dan Laju Kenaikan Suhu

4.6.1. Laju Penyerapan Paraffin Wax Sensibel dan Laten

Hasil laju penyerapan sensibel didapat menggunakan rumus persamaan 4.6.

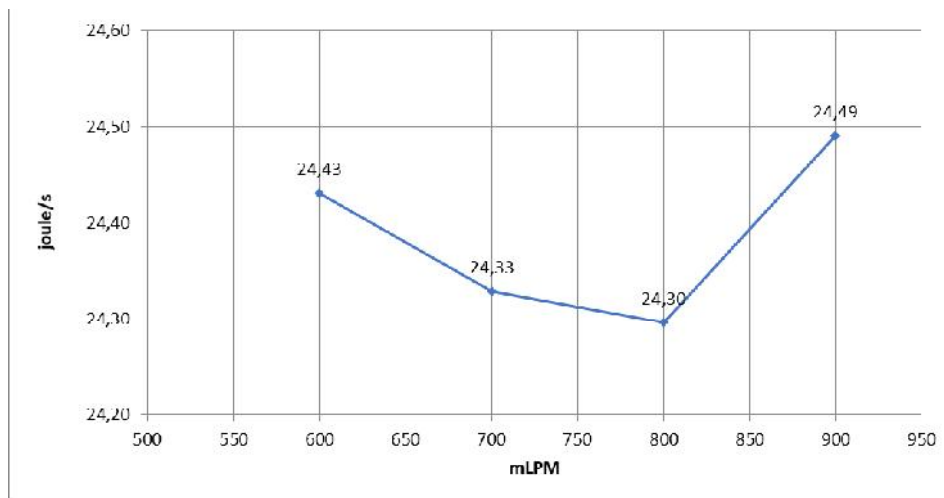
$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{Q_{\text{kumulatif}} (J)}{t_{\text{total}} (s)} \quad (4.6)$$

$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{176878,57}{7240}$$

$$\text{Laju Penyerapan} = 24,43 \text{ J/s}$$

Tabel 4. 6 Data laju penyerapan paraffin wax sensibel

No Data	Q kumulatif	Waktu	Laju Penyerapan
	J	s	J/s
1448	176878,57	7240	24,43



Gambar 4. 34 Laju penyerapan paraffin wax sensibel

Grafik menunjukkan laju penyerapan kalor selama proses *charging*. Kata sensibel merupakan keadaan *paraffin wax* saat belum mencapai titik leleh atau masih dalam keadaan padat. Berdasarkan grafik, laju penyerapan pada setiap variasi memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Nilai laju penyerapan tertinggi didapat pada variasi debit 900 mLPM karena nilai Δt yang rendah dibandingkan waktu lainnya. Sedangkan nilai laju penyerapan terendah terjadi pada variasi 800 mLPM. Hal tersebut terjadi karena nilai ΔT kecil dibandingkan variasi lainnya, nilai ΔT rendah diakibatkan suhu lingkungan yang rendah.

Hasil laju penyerapan laten didapat menggunakan rumus persamaan 4.7.

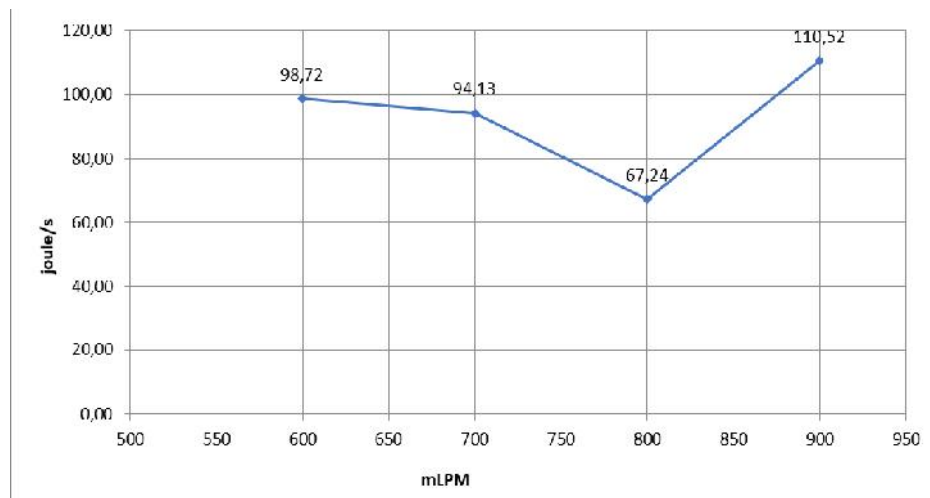
$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{\Delta Q_{\text{kumulatif}} (J)}{\Delta t (s)} \quad (4.7)$$

$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{(547599,07 - 177408,26)}{(10995 - 7245)}$$

$$\text{Laju Penyerapan} = 98,72 \text{ J/s}$$

Tabel 4. 7 Data laju penyerapan paraffin wax laten

No Data	Q kumulatif	Waktu	Laju Penyerapan
	J	s	J/s
1449	177408,26	7245	98,72
2199	547599,07	10995	



Gambar 4. 35 Laju penyerapan paraffin wax laten

Grafik laju penyerapan laten menunjukkan trend yang tidak jauh berbeda dengan grafik laju penyerapan sensibel. Hal tersebut menunjukkan bahwa laju penyerapan laten dipengaruhi oleh laju penyerapan kalor *paraffin wax* pada saat kondisi sensibel.

4.6.2. Laju Kenaikan Paraffin Wax Sensibel dan Laten

Hasil laju kenaikan sensibel didapat menggunakan rumus persamaan 4.8.

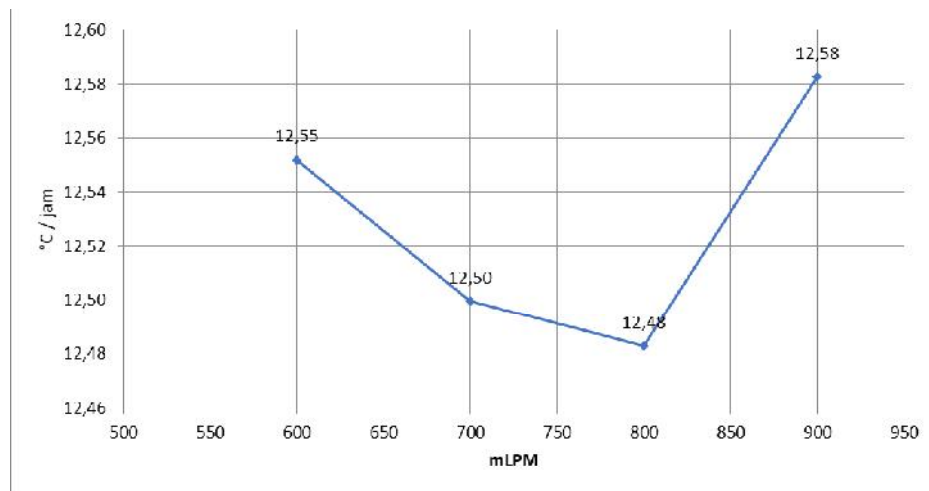
$$\text{Laju kenaikan} = \frac{\Delta \text{temperatur (J)}}{\Delta t \text{ (s)}} \quad (4.8)$$

$$\text{Laju kenaikan} = \frac{(52,84 - 0)}{(2,011 - 0)}$$

$$\text{Laju kenaikan} = 12,55 \text{ } ^\circ\text{C/jam}$$

Tabel 4. 8 Data laju kenaikan paraffin wax sensibel

No Data	Temperatur	Waktu	Laju Kenaikan
	$^{\circ}\text{C}$	jam	$^{\circ}\text{C/jam}$
0	27,75	0	12,55
1448	52,84	2,011	



Gambar 4. 36 Laju kenaikan paraffin wax sensibel

Hasil grafik laju kenaikan hampir sama dengan grafik laju penyerapan *paraffin wax* sensibel. Hal tersebut terjadi karena kedua grafik tersebut saling berkaitan, dimana grafik didapat dengan cara mengurangi suhu pada saat puncak sensibel dengan suhu awal. Maka jika laju penyerapan memiliki nilai yang kecil nilai laju kenaikan juga akan kecil.

Hasil laju kenaikan laten didapat menggunakan rumus persamaan 4.9.

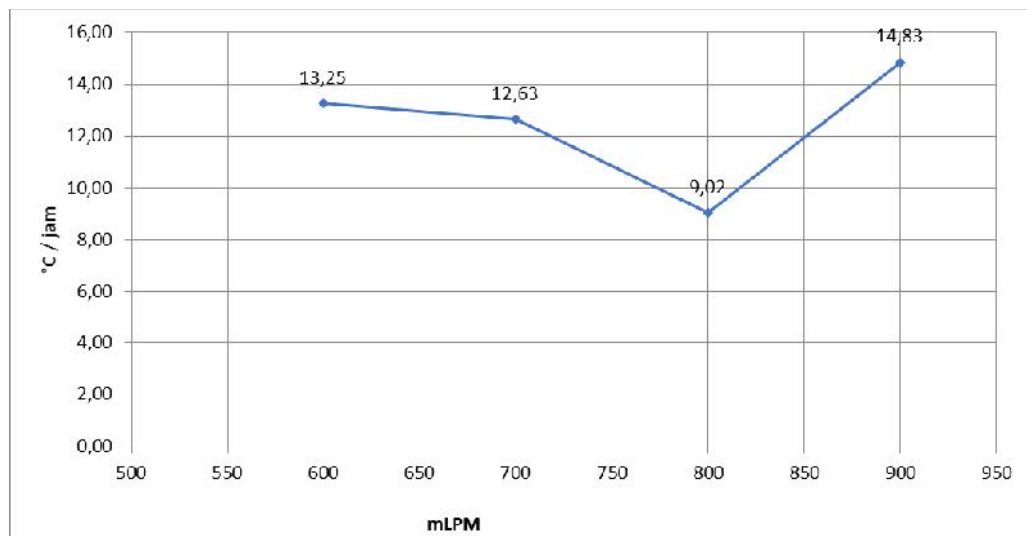
$$\text{Laju kenaikan} = \frac{\Delta \text{temperatur } (J)}{\Delta t \text{ (s)}} \quad (4.9)$$

$$\text{Laju kenaikan} = \frac{(66,66 - 52,86)}{(3,054 - 2,013)}$$

$$\text{Laju kenaikan} = 13,26 \text{ } ^\circ\text{C/jam}$$

Tabel 4. 9 Data laju kenaikan paraffin wax laten

No Data	Temperatur	Waktu	Laju Kenaikan
	°C	jam	°C/ jam
1449	52,86	2,013	13,26
2199	66,66	3,054	



Gambar 4. 37 Laju kenaikan paraffin wax laten

Trendline dari grafik hampir sama dengan grafik laju penyerapan *paraffin wax* laten. Dimana grafik didapat dengan cara mengurangi suhu akhir yang dalam keadaan laten dengan suhu awal mulai menjadi kalor laten. Sehingga jika laju penyerapan kecil laju maka laju kenaikan juga kecil. Sehingga didapatkan hasil yang sama.

4.6.3. Laju Penyerapan Kalor dan Kenaikan Suhu Air

Hasil laju penyerapan kalor air dapat menggunakan rumus persamaan (4.10)

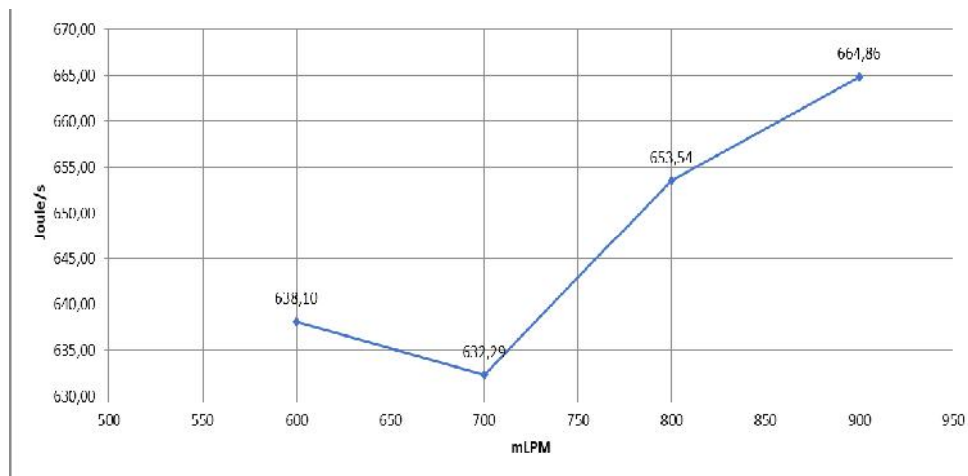
$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{Q_{\text{kumulatif}} (J)}{t_{\text{total}} (s)} \quad (4.10)$$

$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{7015955,95}{10995}$$

$$\text{Laju Penyerapan} = 638,10 \text{ J/s}$$

Tabel 4. 10 Data laju penyerapan kalor air

No Data	Q kumulatif J	Waktu s	Laju Penyerapan J/s
2199	7015955,95	10995	638,10



Gambar 4. 38 Laju Penyerapan Kalor Air

Grafik menunjukkan bahwa laju penyerapan kalor air mendapatkan nilai berkisar 632,29 J/s – 664,86 J/s. Nilai tersebut jika dibandingkan dengan laju penyerapan kalor *paraffin wax* memiliki nilai yang jauh berbeda. Hal tersebut dikarenakan prosentase dari air pada tangki jauh lebih besar dibanding kan prosentase *paraffin wax*. Pada variasi 700 mLPM memiliki nilai yang terendah karena Δt pada variasi 700 mLPM memiliki nilai yang tertinggi dibandingkan variasi lainnya.

Hasil laju kenaikan suhu air dapat menggunakan rumus persamaan (4.11)

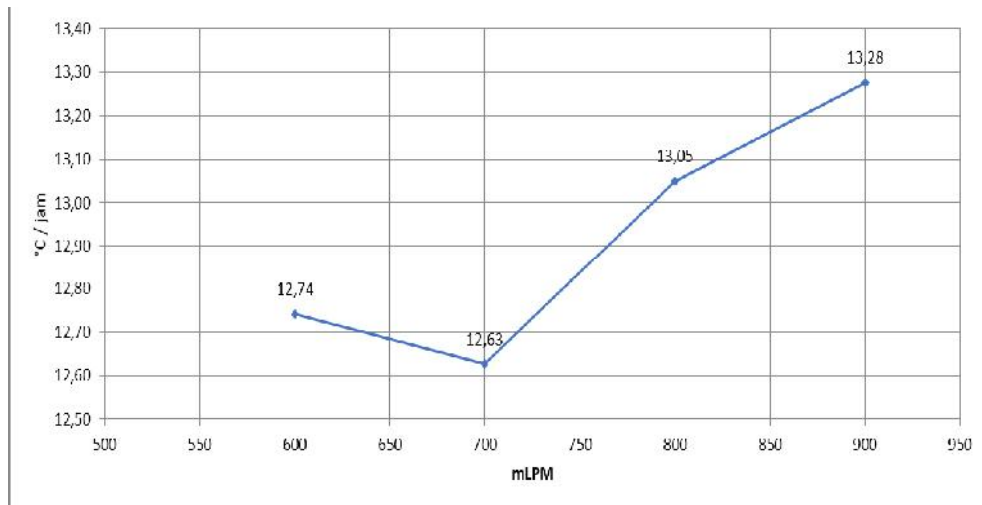
$$\text{Laju kenaikan} = \frac{\Delta \text{temperatur (J)}}{\Delta t \text{ (s)}} \quad (4.11)$$

$$\text{Laju kenaikan} = \frac{(66,67 - 27,75)}{3,054}$$

$$\text{Laju kenaikan} = 12,74 \text{ } ^\circ\text{C/jam}$$

Tabel 4. 11 Data laju kenaikan suhu air

No Data	Temperatur	Waktu Total	Laju Kenaikan
	$^{\circ}\text{C}$	jam	$^{\circ}\text{C/ jam}$
0	27,75	3,054	12,74
2199	66,67		



Gambar 4. 39 Laju kenaikan suhu air

Grafik laju kenaikan sangat dipengaruhi oleh hasil yang diperoleh pada laju penyerapan. Hal tersebut karena semakin besar laju penyerapan kalor pada air maka perubahan suhu semakin cepat dan perbedaan suhu yang didapatpun semakin besar, sementara waktu konstan.