

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Laju Penyerapan Kalor

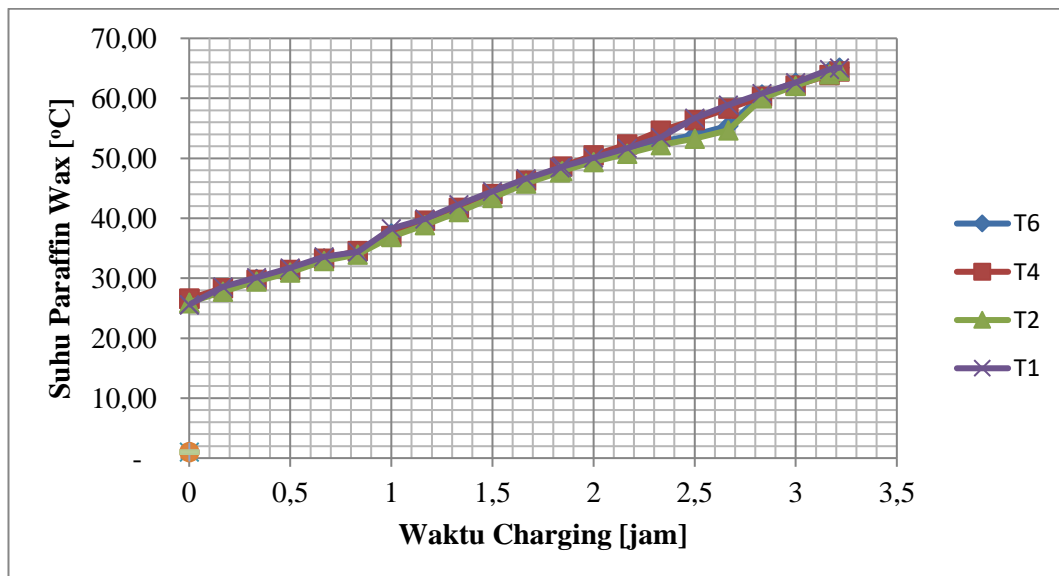
Pengujian *charging* dengan variasi debit air 600, 700, 800, dan 900 mLPM memiliki perubahan suhu berbeda-beda. Pengamatan dilakukan untuk mengetahui laju penyerapan kalor dari HTF ke PCM. Target suhu T-24 mencapai 70°C.

4.1.1 Laju Penyerapan Kalor Pada Campuran PW+20% Cu

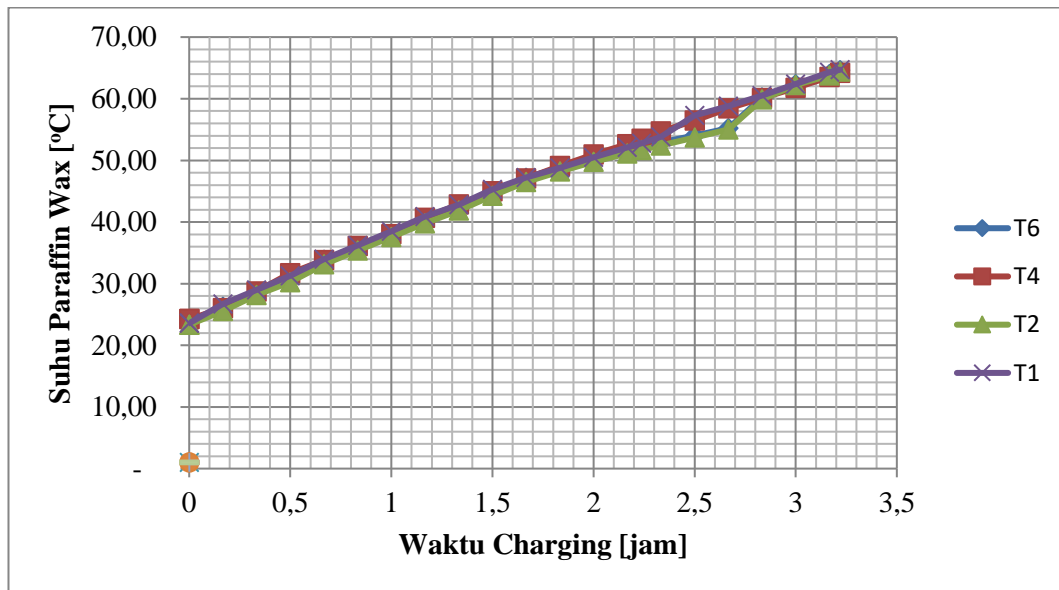
Pada pengujian *charging* dengan debit air 600, 700, 800, dan 900 mLPM laju penyerapan kalor paraffin + 20% Cu dibagi menjadi 3 bagian yaitu vertikal, horisontal, dan aksial.

a. Laju penyerapan kalor *paraffin*+ 20%Cu vertikal

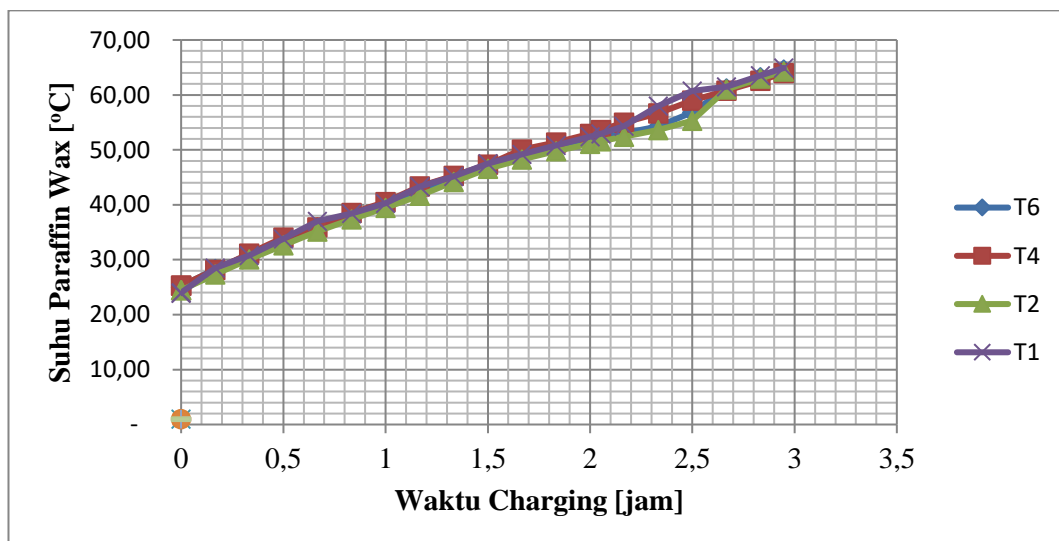
Hasil dari pengujian pada variasi 600, 700, 800 dan 900 mLPM arah vertikal laju penyerapan kalor *paraffin wax* dengan serbuk tembaga 20% memiliki bentuk grafik sebagai berikut dapat dilihat pada gambar 4.1.



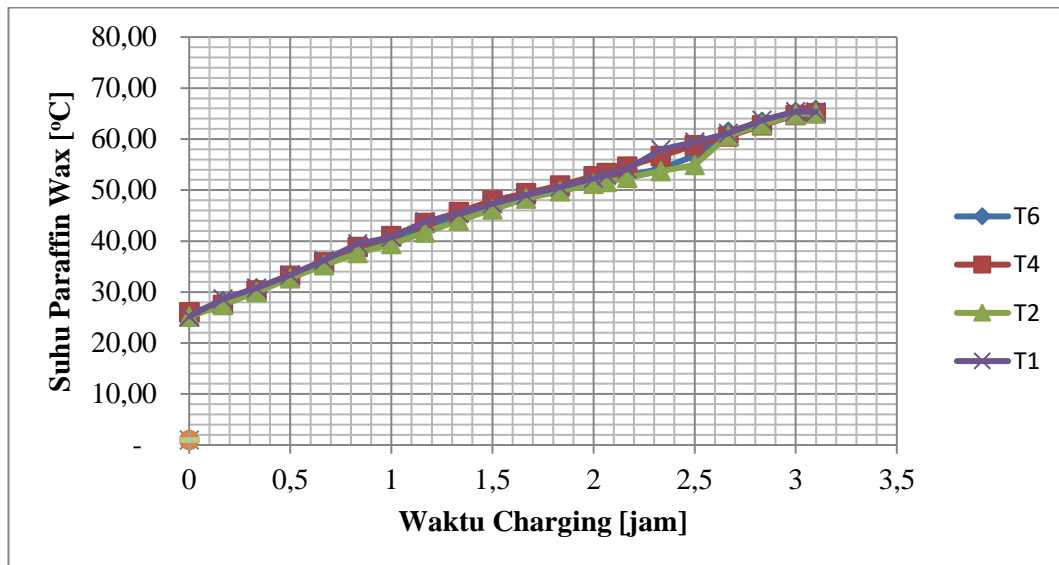
(a)



(b)



(c)



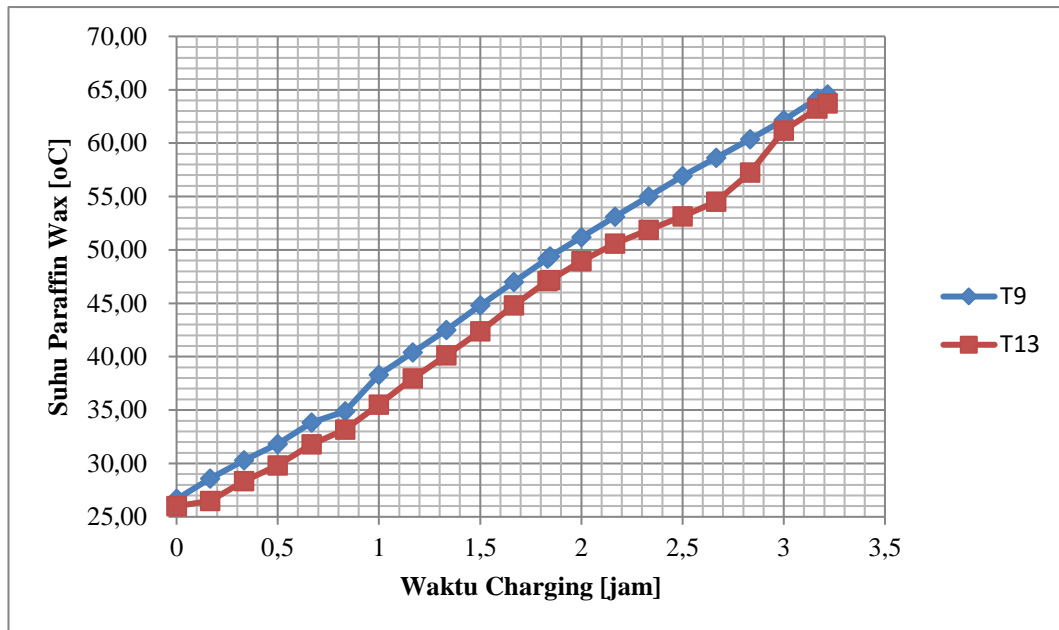
(d)

Gambar 4.14 Penyerapan *paraffin-Cu* baris vertikal (a) 600 mLPM, (b) 700 mLPM, (c) 800 mLPM, (d) 900 mLPM

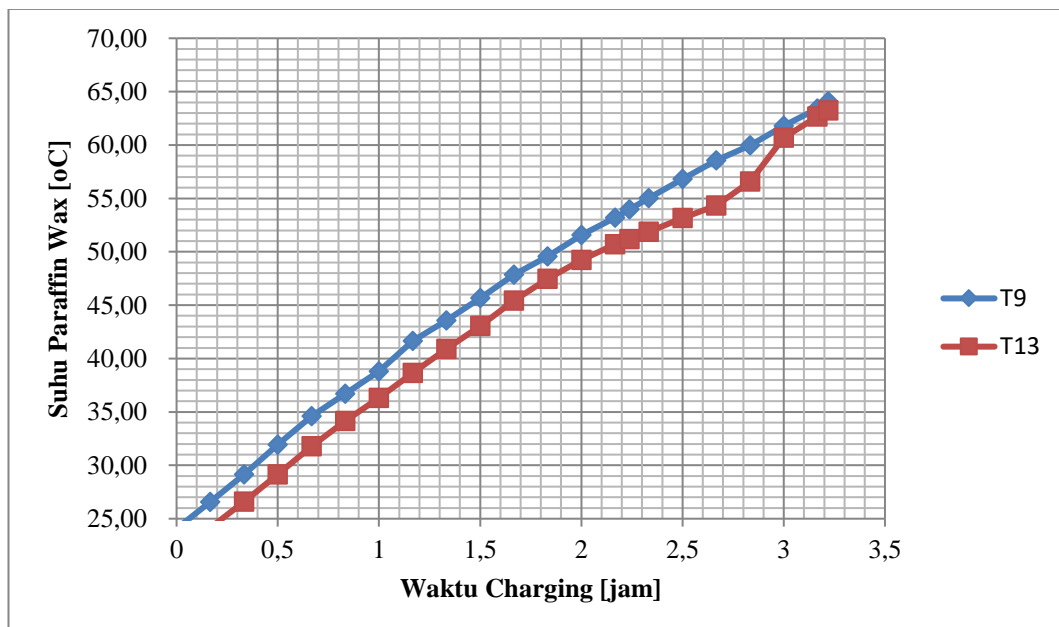
Dari keempat grafik diatas dapat dilihat suhu pada termokopel mengalami kenaikan secara konstan selama proses *charging*, namun pada saat proses *charging* memasuki 2,1 jam terjadi penurunan suhu. Hal ini terjadi karena pada saat suhu menyentuh 50°C hingga 60°C *paraffin-cu* didalam pipa mengalami perubahan fasa. Hal ini sesuai dengan hasil uji DSC yang dapat dilihat pada Gambar 3.13. Hasil uji DSC menyatakan *paraffin-Cu* 20% akan mengalami perubahan fasa pada suhu 52,83°C. Keempat variasi memiliki perbedaan lama waktu pengujian hal ini disebabkan oleh perbedaan debit yang disengaja divariasikan.

b. Laju penyerapan kalor *paraffin*+20% Cu horizontal

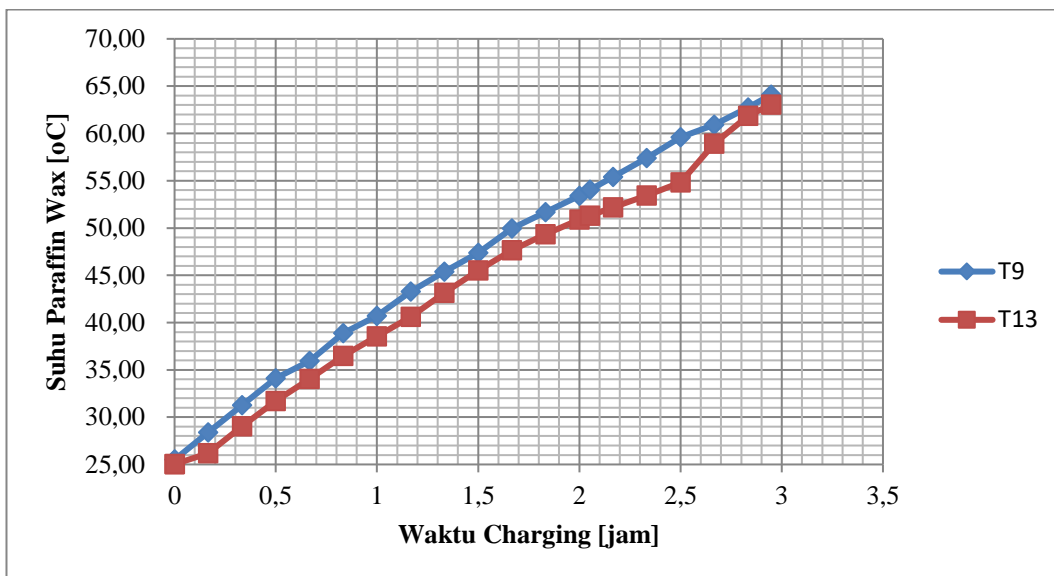
Hasil dari pengujian pada variasi 600, 700, 800 dan 900 mLPM arah horizontal laju penyerapan kalor *paraffin wax* dengan serbuk tembaga 20% memiliki bentuk grafik sebagai berikut dapat dilihat pada gambar 4.2.



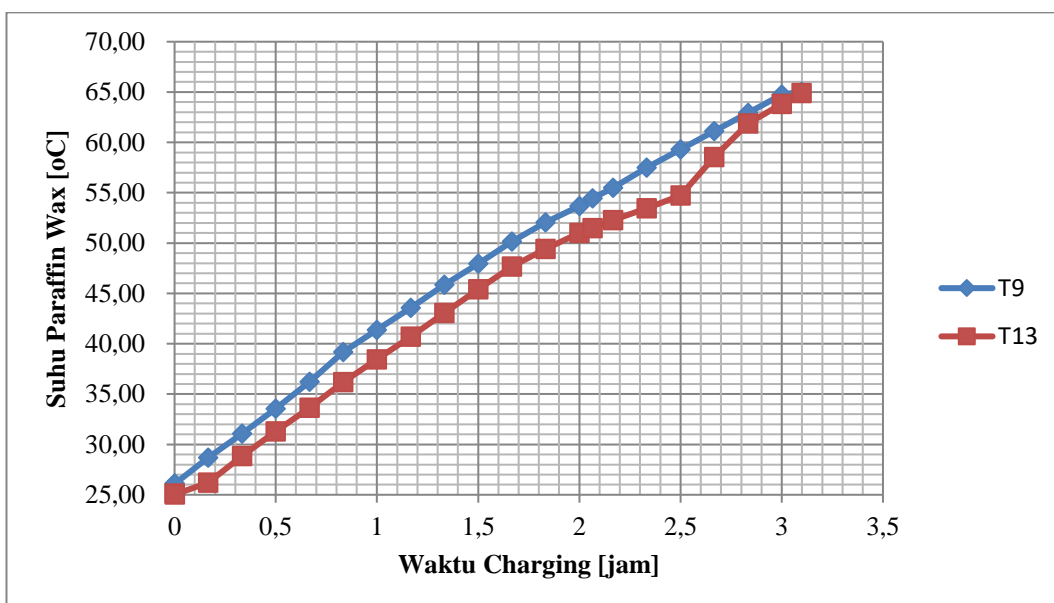
(a)



(b)



(c)



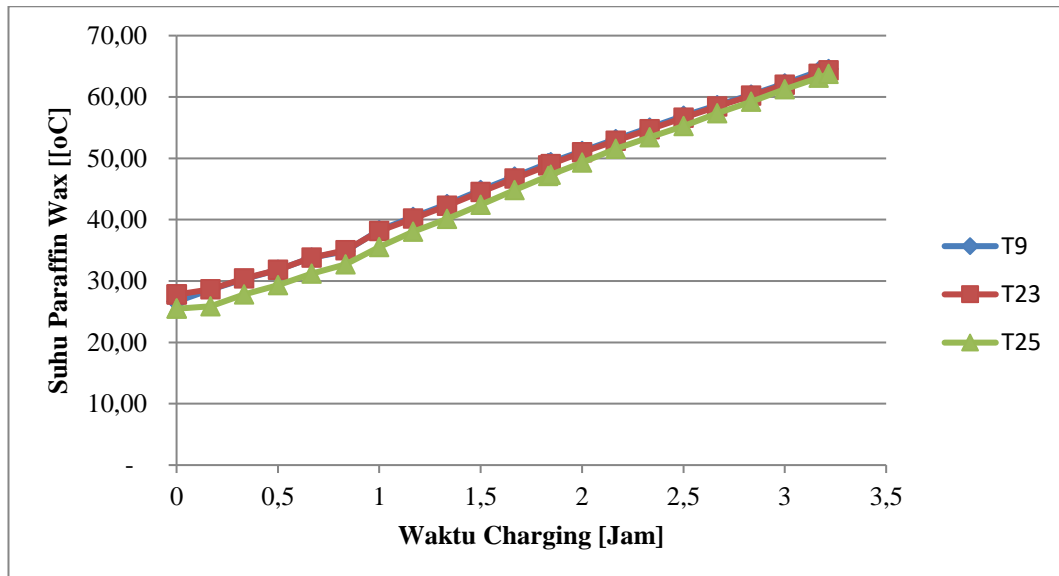
(d)

Gambar 4.15 Penyerapan paraffin-Cu baris horisontal (a) 600 mLPM, (b) 700 mLPM, (c) 800 mLPM, (d) 900 mLPM

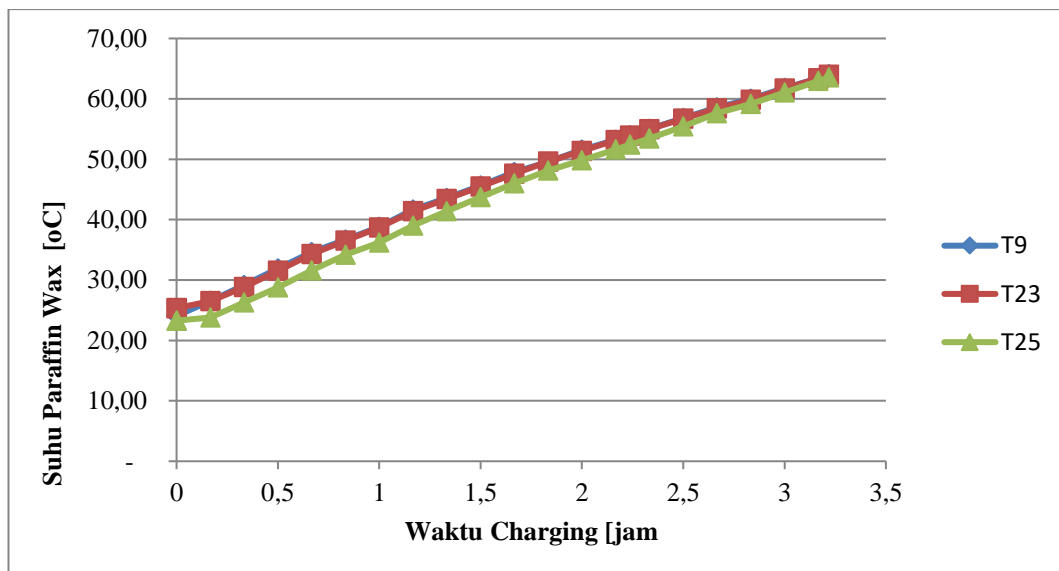
Dari gambar 4.2 dapat dilihat suhu T9 selalu lebih tinggi dari suhu T13. Hal ini terjadi karena letak posisi T9 lebih dekat dari keluaran air heater dari pada T13, yang membuat suhu diterima T9 lebih tinggi dari pada suhu yang diterima T13. Perbedaan suhu jelas terlihat ketika proses charging memasuki melting point dan kembali sama sekitar suhu 60°C.

c. Laju penyerapan kalor *paraffin*+ 20%Cu aksial

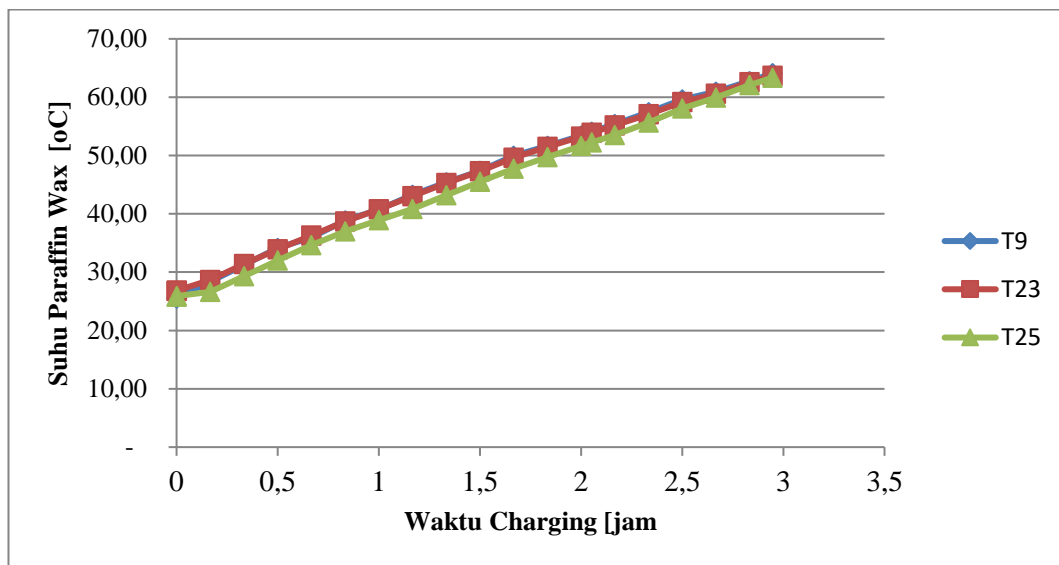
Hasil dari pengujian pada variasi 600, 700, 800 dan 900 mLPM arah aksial laju penyerapan kalor *paraffin wax* dengan serbuk tembaga 20% memiliki bentuk grafik sebagai berikut dapat dilihat pada gambar 4.3.



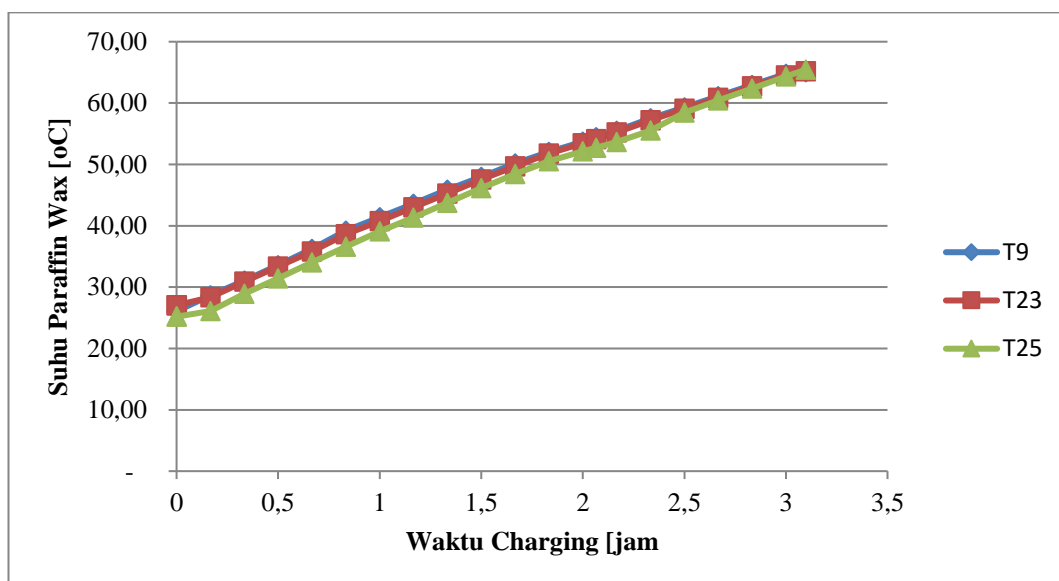
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 16 Penyerapan *paraffin-Cu* baris aksial (a) 600 mLPM, (b) 700 mLPM, (c) 800 mLPM, (d) 900 mLPM

Dari grafik-grafik diatas dapat dilihat bahwa ketiga suhu termokopel mengalami kenaikan yang konstan dan linear. Suhu termokopel T25 adalah yang terendah diantara ketiga termokopel, hal ini terjadi karena lambatnya perubahan fasa pada *paraffin-cu* didalam kapsul. Terjadinya perbedaan perubahan fasa mungkin terjadi karena campuran yang kurang sama rata antara satu sama lain sehingga perubahan fasanya juga membutuhkan suhu yang berbeda. Ketika suhu

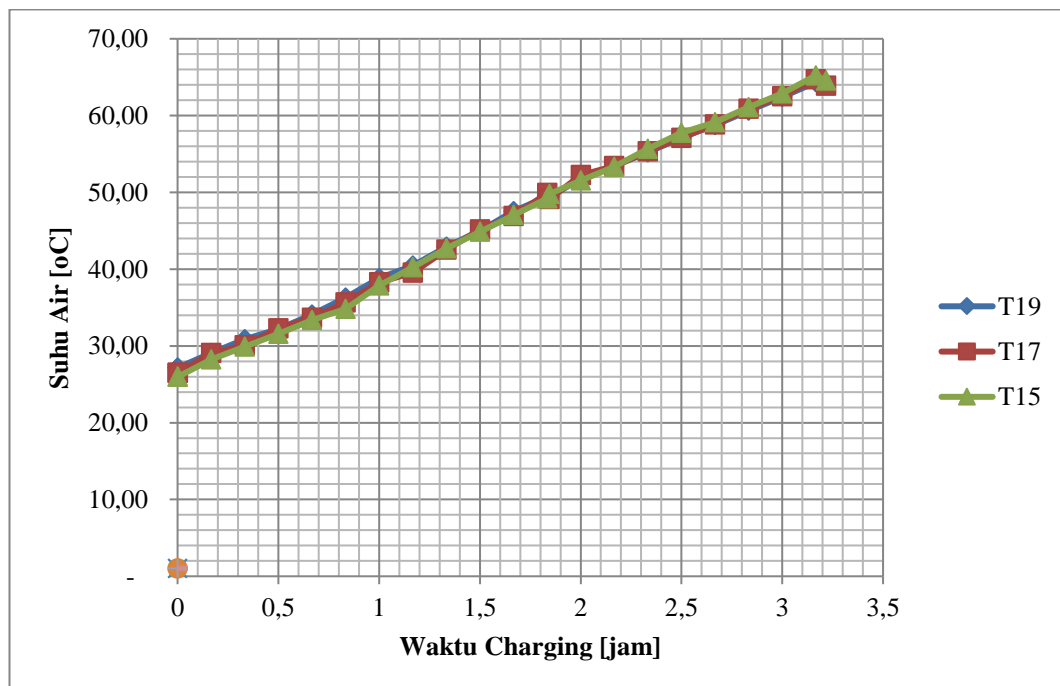
mendekati 60°C *paraffin*-cu didalam kapsul sudah berubah fasa, hal ini bisa dilihat pada grafik ketiga termokopel mulai sejajar.

4.1.2 Laju Penyerapan kalor Air

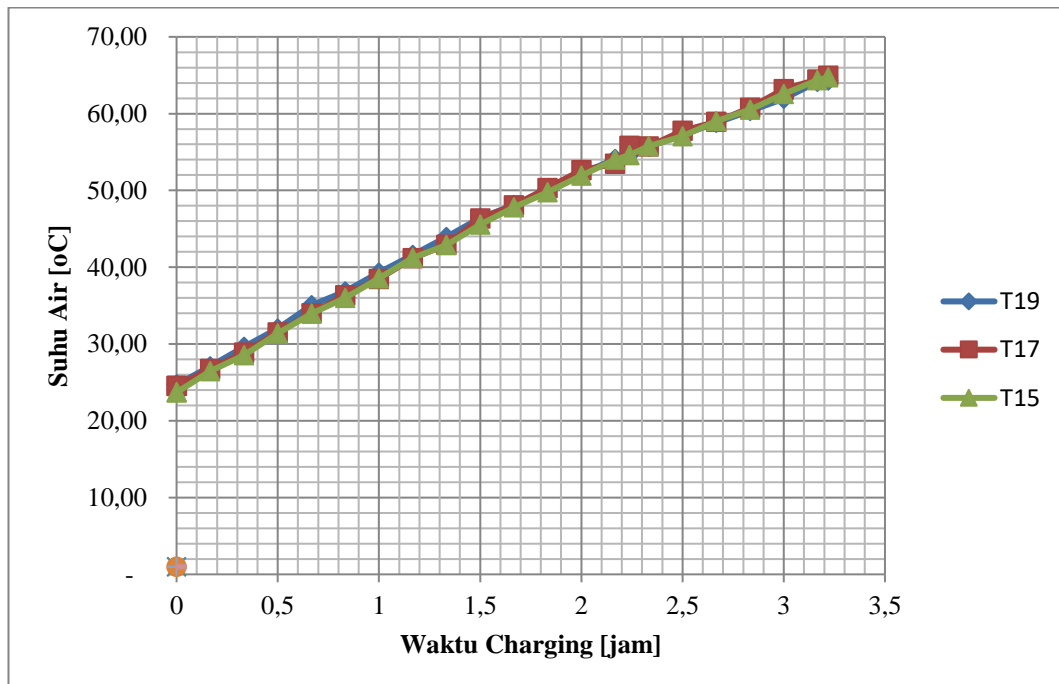
Laju penyerapan kalor air *charging* dengan debit air 600, 700, 800, dan 900 mLPM dibagi menjadi 3 bagian yaitu vertikal, horisontal, aksial.

a. Laju penyerapan kalor air vertikal

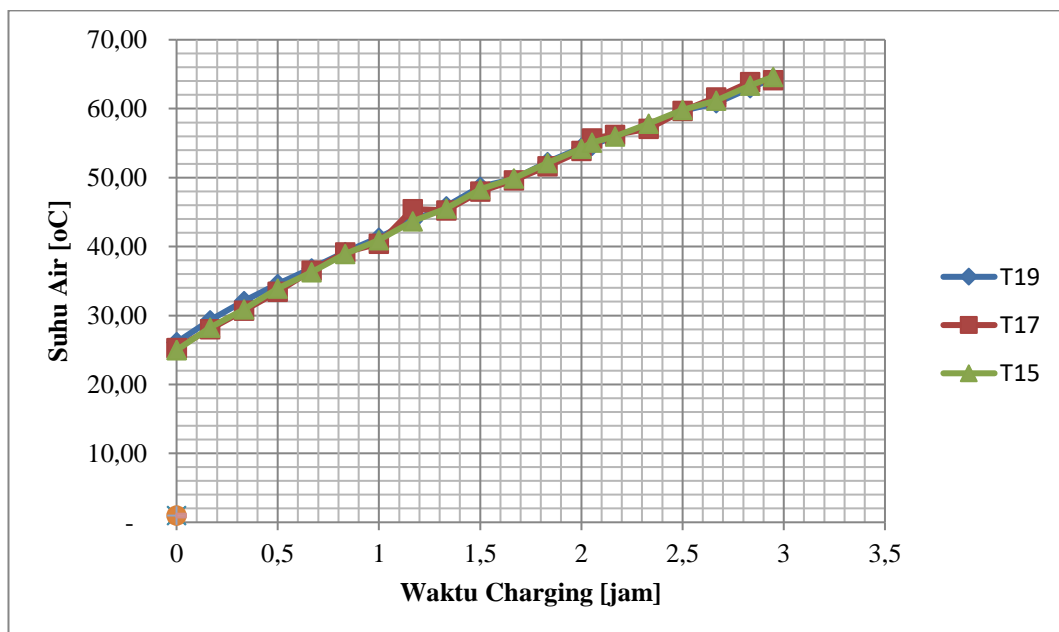
Hasil dari pengujian pada variasi 600, 700, 800 dan 900 mLPM arah vertikal laju penyerapan kalor air memiliki bentuk grafik sebagai berikut dapat dilihat pada gambar 4.4.



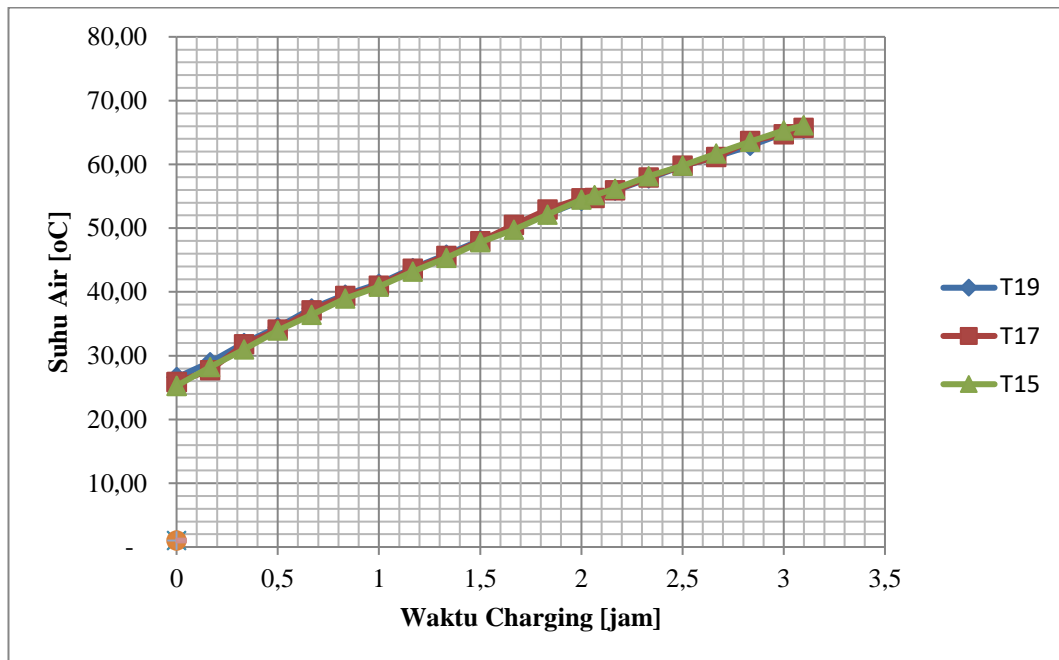
(a)



(b)



(c)



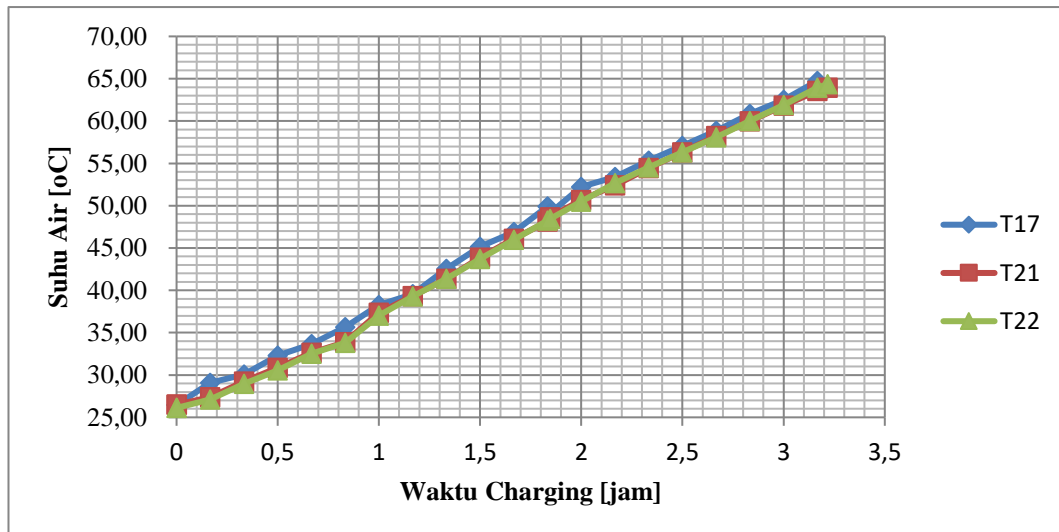
(d)

Gambar 17 Penyerapan air baris vertikal (a) 600 mLPM, (b) 700 mLPM, (c) 800 mLPM, (d) 900 mLPM

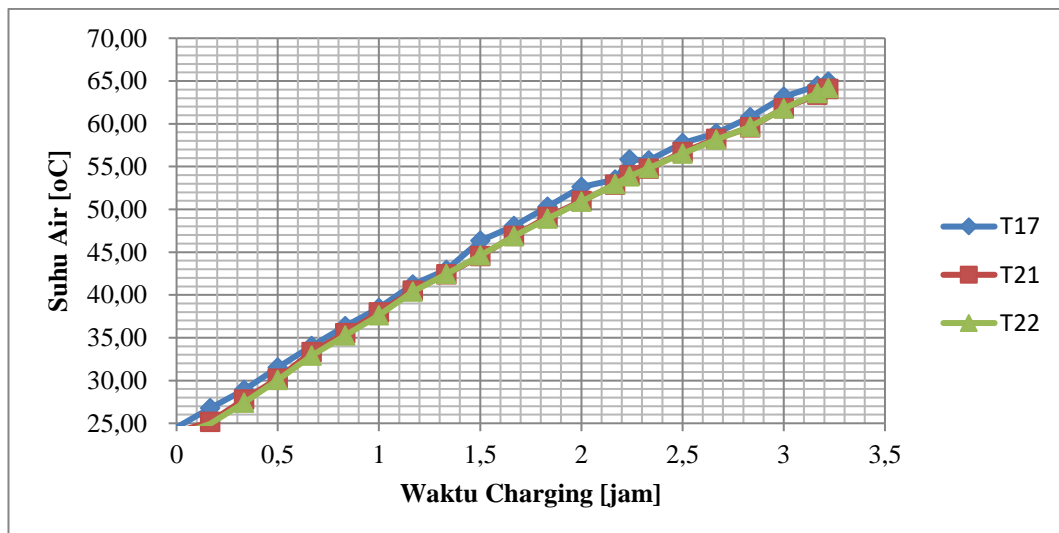
Dari gambar 4.3 hasil grafik penyerapan air menunjukkan bahwa kenaikan pada suhu air cenderung konstan dan linier. Pada variasi 800 mLPM termokopel T17 mengalami fluktuasi yang terlihat jelas pada waktu *charging* 1 jam. Hal ini terjadi karena T17 lebih dekat dengan keluaran air dari pada termokopel T15 dan T19.

b. Laju penyerapan kalor air horizontal

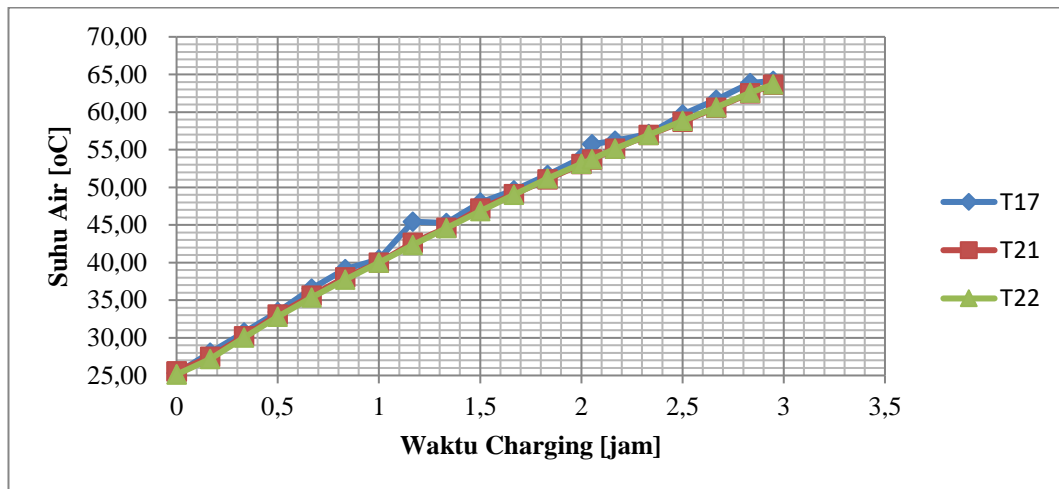
Hasil dari pengujian pada variasi 600, 700, 800 dan 900 mLPM arah horizontal laju penyerapan kalor air memiliki bentuk grafik sebagai berikut dapat dilihat pada gambar 4.5.



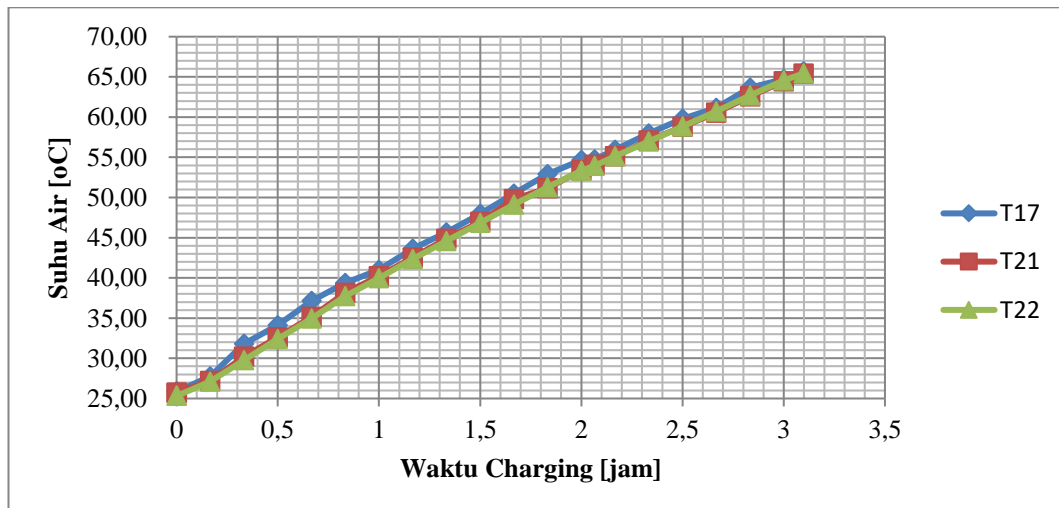
(a)



(b)



(c)



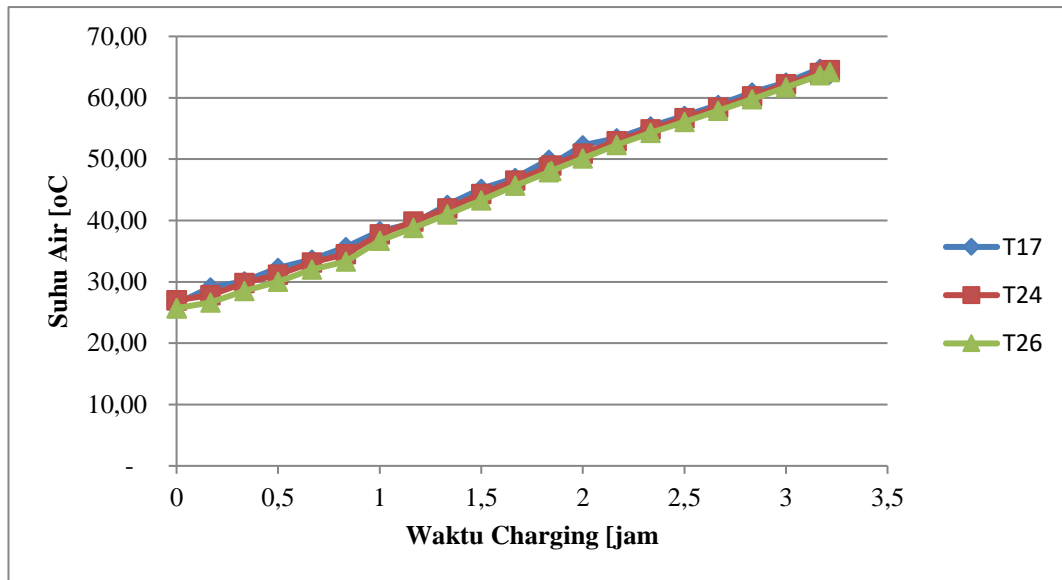
(d)

Gambar 18 Penyerapan air baris horisontal (a) 600 mLPM, (b) 700 mLPM, (c) 800 mLPM, (d) 900 mLPM

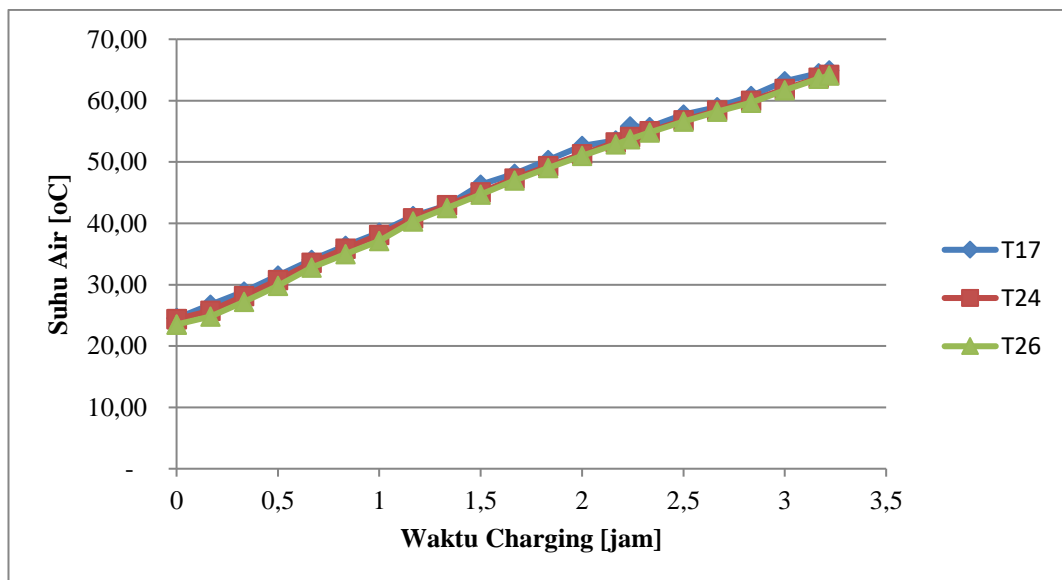
Pada grafik diatas penyerapan air baris horisontal mengalami kenaikan suhu yang konstan dan linier. Pada variasi 800 mLPM termokopel T17 mengalami fluktuasi yang terlihat jelas pada waktu *charging* 1 jam, hal ini terjadi karena termokopel T17 lebih dekat dengan keluaran air dari pada termokopel T21 dan T22. Keluaran air ini membuat fluktuasi suhu pada T17.

c. Laju penyerapan kalor air aksial

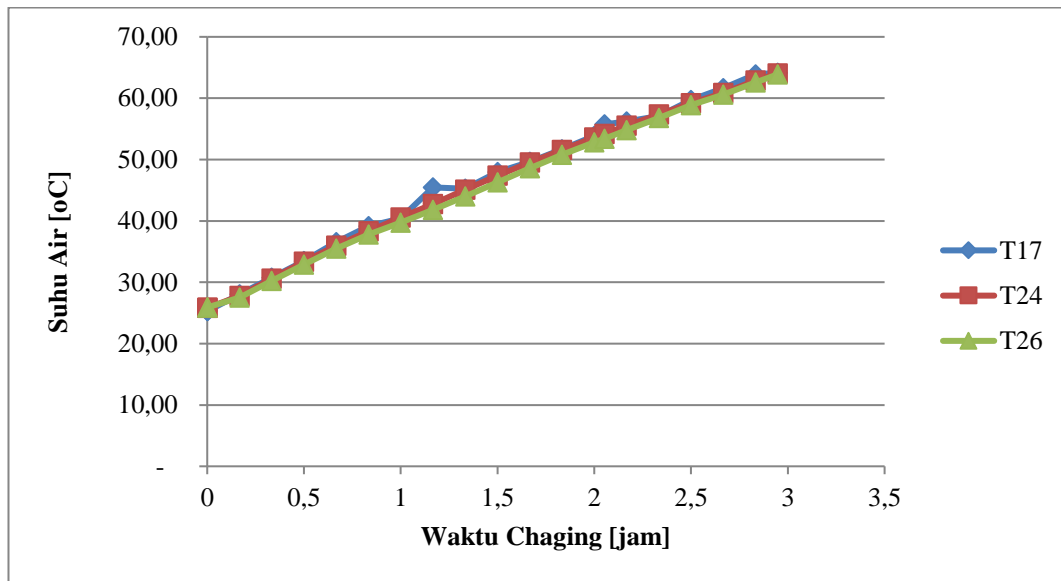
Hasil dari pengujian pada variasi 600, 700, 800 dan 900 mLPM arah aksial laju penyerapan kalor air memiliki bentuk grafik sebagai berikut dapat dilihat pada gambar 4.6.



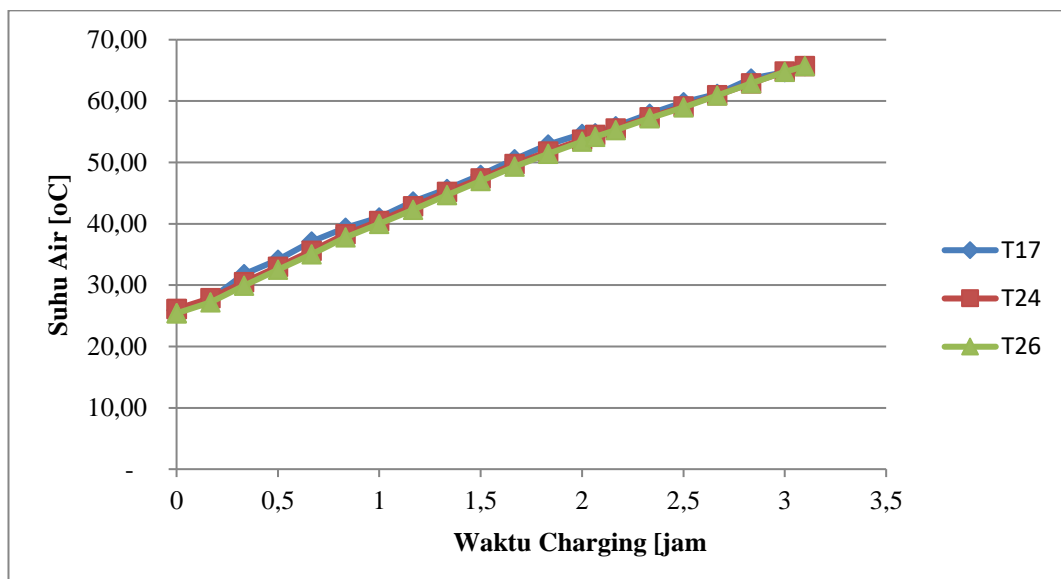
(a)



(b)



(c)



(d)

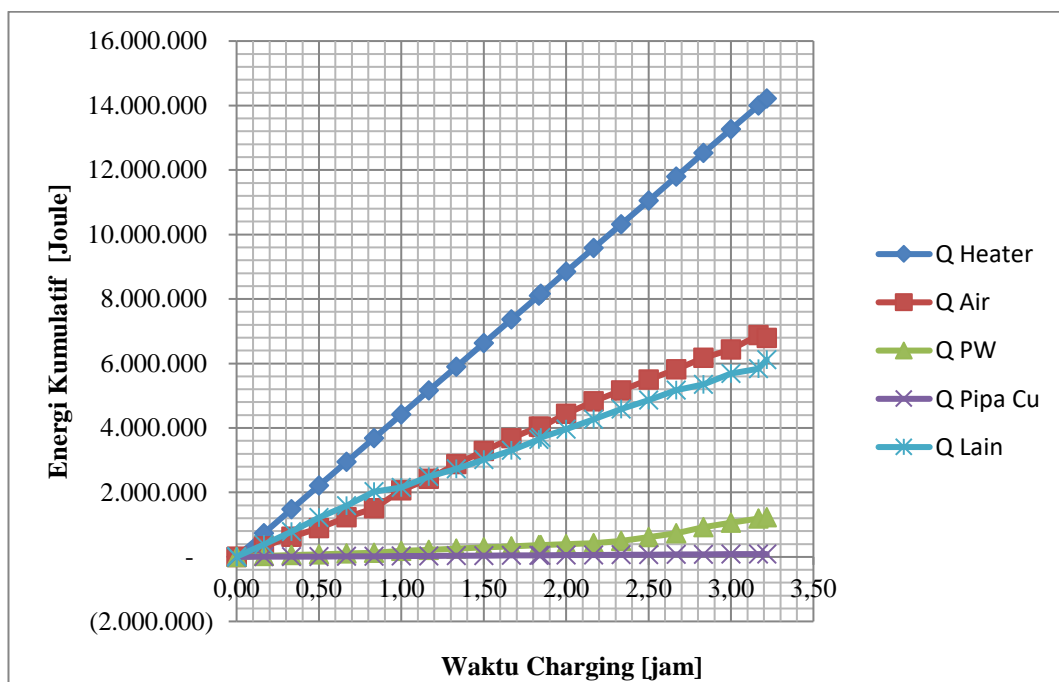
Gambar 19 Penyerapan air baris aksial (a) 600 mLPM, (b) 700 mLPM, (c) 800 mLPM, (d) 900 mLPM

Pada gambar 4.5 diatas menunjukkan penyerapan suhu air dari ketiga termokopel memiliki kesamaan. hal ini terjadi karena proses pesebaran suhu dari air keluaran *heater* relatif merata dibandingkan arah horisontal dan vertikal. dari beberapa variasi T17 mengalami sedikit lonjakan suhu, peristiwa ini terjadi karena T17 lebih dekat dengan air keluaran *heater*.

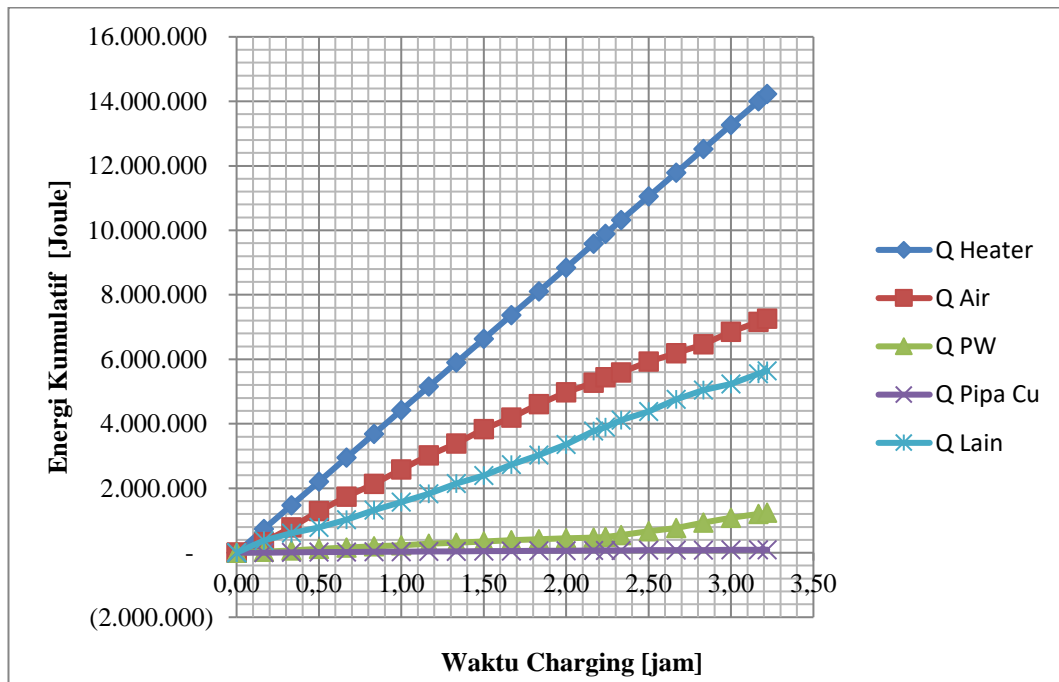
4.2 Energi Kumulatif

4.2.1 Energi Kumulatif Setiap Variasi

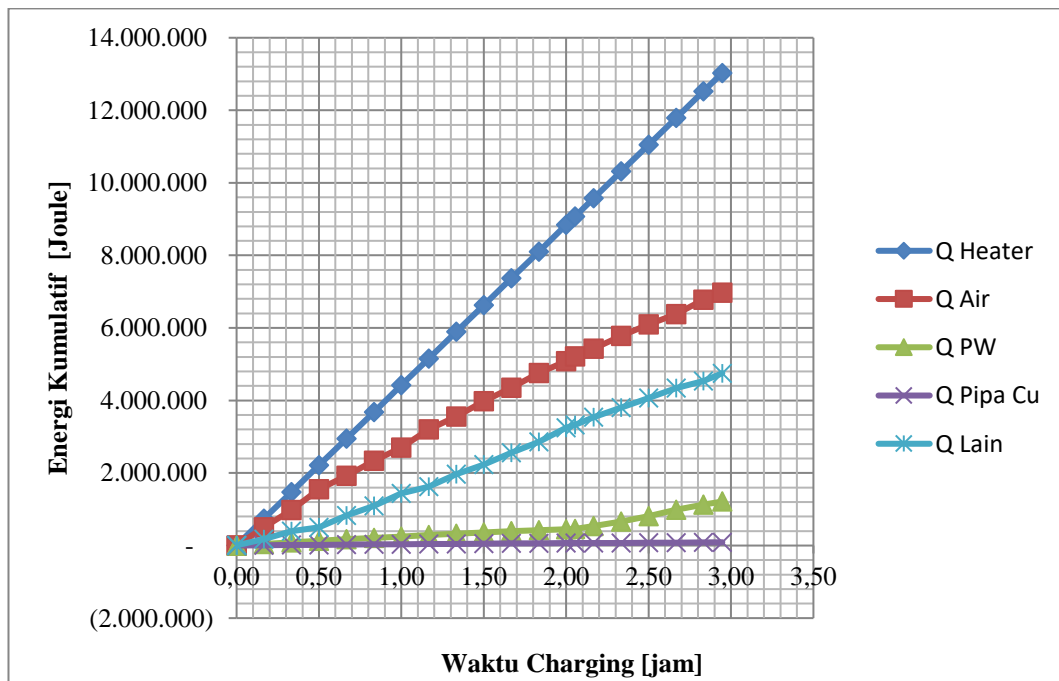
Hasil energi kumulatif yang dihasilkan selama proses *charging* perlu untuk diamati agar mampu menentukan performa serta pengaruh dari *heater* sebagai pemanas air; air sebagai *heat transfer fluid* (HTF); *paraffin wax* sebagai *phase change material* (PCM); pipa Cu sebagai sebagai kapsul tempat dari PCM; energi lain-lain sebagai energi dari tangki dan *losses*.



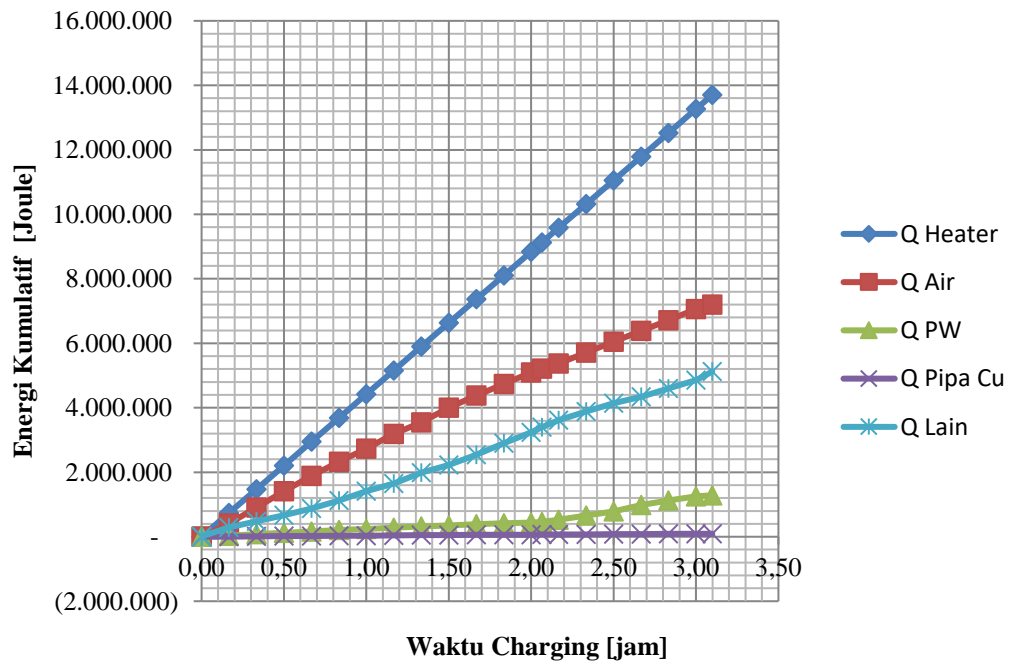
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 20 Energi Kumulatif (a) 600 mLPM, (b) 700 mLPM, (c) 800 mLPM, (d) 900 mLPM

Pada gambar 4.5 diatas grafik energi kumulatif menunjukkan kesamaan pola disetiap variasi. Q heater memiliki energi paling tinggi, diikuti Q air, Q lain, Q *paraffin*-cu dan Q pipa cu. Perbedaan lamanya watu pengujian juga mempengaruhi nilai energi kumulatif yang didapat setiap variasi. Varias 600 mLPM memiliki waktu pengambilan data yang lebih lama dari pada variasi lainnya. Sehingga energi kumulatif yang dihasilkan *heater* mencapai 14.200.000joule sedangkan, variasi 800 mLPM memiliki waktu tercepat dan nilai energi kumulatifnya 13.020.000 joule.

4.2.2 Energi Kumulatif Q Heater

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

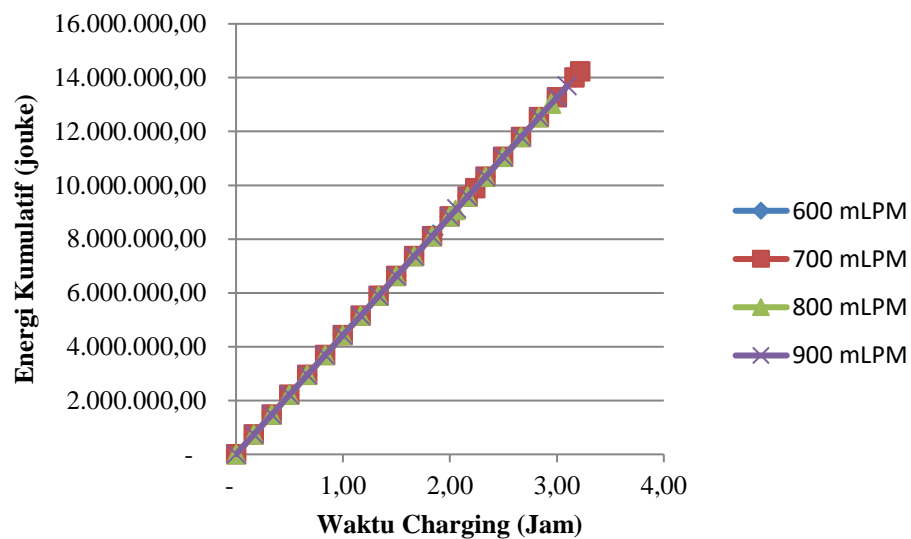
$$Q_{kum\ heater} = Q_{kumulatif\ heater} + Q_{heater\ sesaat} \quad (4.1)$$

$$Q_{kum\ heater} = 4503 + 4503$$

$$Q_{kum\ heater} = 9006 \text{ J}$$

Tabel 4.1 Data Energi Kumulatif Q Heater

No Data	Q heater sesaat	Qheater kumulatif
	Joule	Joule
1	4503	4503
2	4503	9006



Gambar 21 Energi kumulatif Q heater

Grafik diatas menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan *heater* relatif konstan pada setiap variasi. Setiap variasi memiliki energi kumulatif yang dihasilkan berbeda-beda, variasi 800 mLPM adalah yang tertinggi menghasilkan energi kumulatif diikuti 900mLPM, 700 mLPM dan 600 mLPM.

4.2.3 Energi Kumulatif Q Air

Hasil Q Air didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.2.

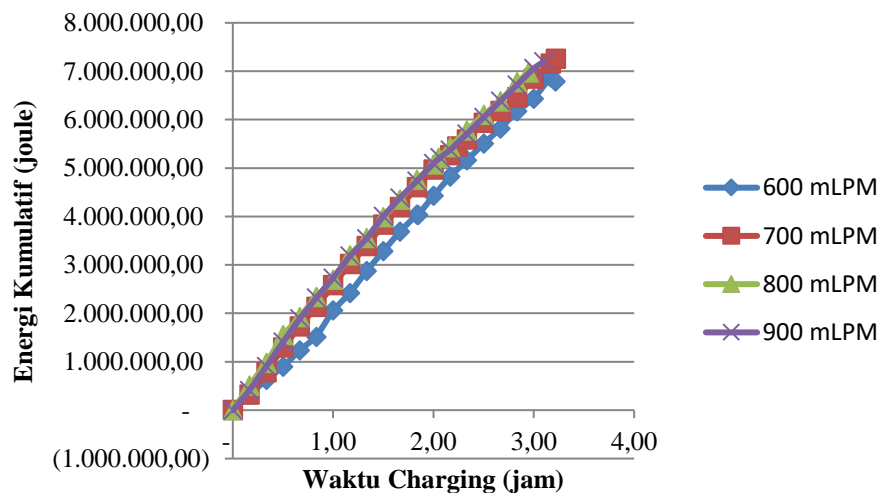
$$Q_{kum\ air} = massa\ air * Cp\ Air * (\Delta T) \quad (4.2)$$

$$Q_{kum\ air} = 43.13 * 4180 * (27,92 - 27.73)$$

$$Q_{kum\ air} = 34253,85\ J$$

Tabel 4.2 Data Energi Kumulatif Q Air

No data	Cp air	Massa Air	Suhu Air Rata-rata	Q kumair
	[J/(kg.K)]	[kg]	°C	(J)
0	4180	43.13	27,73	-
1	4180	43.13	27,92	34253,85



Gambar 22 Energi kumulatif Q Air

Pada gambar 4.8 diatas dapat dilihat hasil energi kumulatif Q air, setiap variasi memiliki perbedaan hasil energi tetapi mengalami kenaikan secara konstan. Variasi 600 mLPM adalah variasi terkecil yang menghasilkan energi kumulatif yang terlihat jelas pada grafik, diikuti variasi 700 mLPM, sedangkan variasi 800 dan 900 mLPM memiliki nilai energi yang hampir sama sehingga kedua garisnya menyatu. Yang menjadi pembedan antara variasi 800 dan 900 mLPM adalah lamanya waktu *charging*.

4.2.4 Energi Kumulatif Q Paraffin-Cu

Hasil Q *paraffin wax* Cu 10% didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.3.

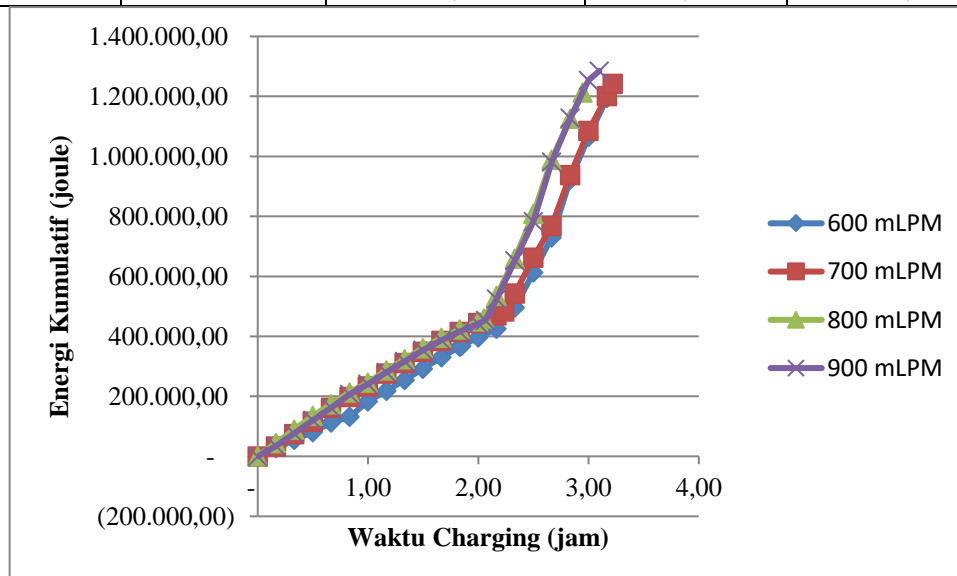
$$Q_{kum} = \text{massa PCM} * C_p \text{ PCM} * (\Delta T) \quad (4.3)$$

$$Q_{kum} = 6,7 * 1839 * (27,90 - 27,86)$$

$$Q_{kum} = 492,85 \text{ J}$$

Tabel 4.3 Data Energi Kumulatif Q PCM

No data	Cp Paraffin Wax Cu 10%	Massa Paraffin Wax Cu 10%	Suhu Paraffin Wax Cu 10% rata-rata	Q kum
	[J/(kg.K)]	[kg]	°C	(J)
2	1839	6,7	27,86	-
4	1839	6,7	27,90	492,85



Gambar 4.10 Energi kumulatif Q Paraffin-CU

Dari grafik diatas menunjukkan energi kumulatif Q *Paraffin-Cu* mengalami perubahan bentuk grafik pada saat proses *charging* memasuki waktu 2 jam. perubahan keatas pada grafik terjadi karena pada waktu tersebut PCM *paraffin-Cu* mengalami perubahan fasa dan energi dari air lebih banyak ditransfer ke PCM. Hal ini lah yang membuat bentuk grafik berubah secara signifikan

4.2.5 Energi Kumulatif Pipa-Cu

Hasil Q Pipa Cu didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.4.

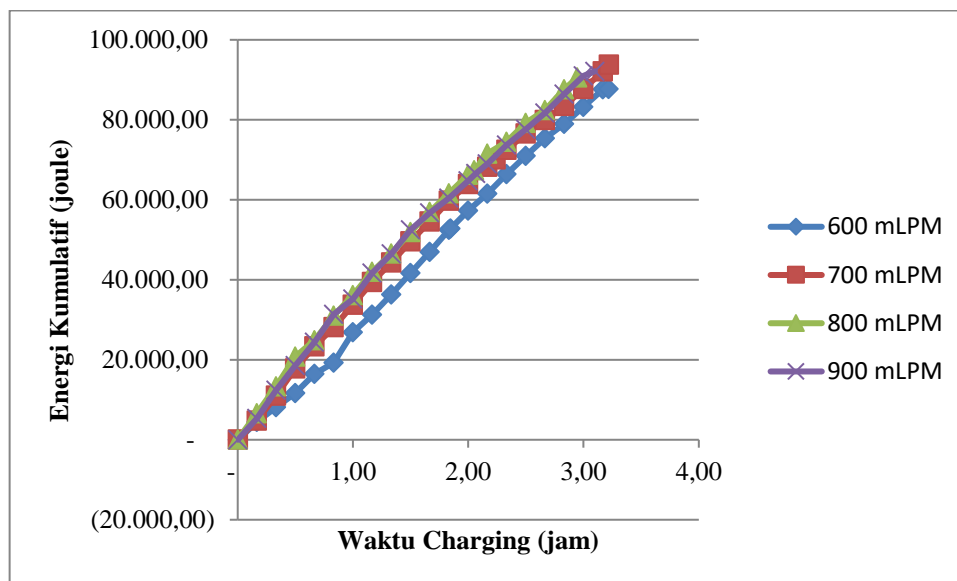
$$Q_{kum} = \text{massa Pipa Cu} * C_p \text{ Pipa Cu} * (T) \quad (4.4)$$

$$Q_{kum} = 5,91 * 390 * (27,66 - 27,64)$$

$$Q_{kum} = 46,1 \text{ J}$$

Tabel 4.4 Data Energi Kumulatif Q Pipa Cu

No data	Cp Pipa Cu	Massa Pipa Cu	Suhu Pipa Cu	Q kumPipa Cu
	[J/(kg.K)]	[kg]	°C	(J)
2	390	5,91	27,64	-
4	390	5,91	27,66	46,1



Gambar 4.11 Energi kumulatif Q Pipa CU

Pipa Cu berfungsi sebagai kapsul untuk menyimpan PCM didalamnya, gambar 4.9 menunjukkan energi yang didapat oleh pipa Cu. Energi yang didapat pipa Cu adalah yang terkecil diantara energi lainnya. Terjadinya hal tersebut dipengaruhi oleh bahan dari pipa Cu dan bentuknya yang silinder dengan ketebaan yang tipis, membuat pipa Cu mendapatkan energi yang kecil.

4.2.6 Energi Kumulatif lain-lain

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

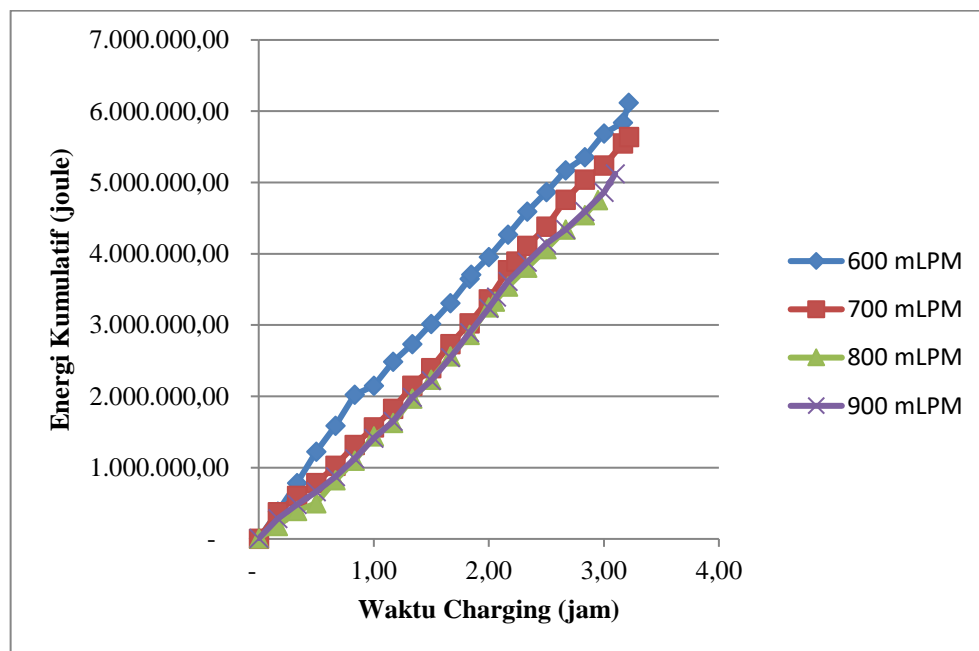
$$Q_{kum} = Q_{kum\ heater} - (Q_{kum\ air} + Q_{kum\ PCM} + Q_{pipa\ Cu}) \quad (4.5)$$

$$Q_{kum} = 4503 - (34931,92 + 3378,37 + 821,42)$$

$$Q_{kum} = 176210090,13 \text{ J}$$

Tabel 4.5 Data Energi Kumulatif Q Lain-lain

No data	$Q_{kum\ heater}$	$Q_{kum\ air}$	$Q_{kum\ PCM}$	$Q_{pipa\ Cu}$
	J	J	J	J
1	4503	34931,92	3378,37	821,42



Gambar 4.12 Energi kumulatif Q Lain-lain

Pada grafik diatas dapat dilihat energi kumulatif Q lain-lain. Variasi 600 mLPM memiliki Q lain-lain tertinggi diantara variasi 700, 800 dan 900 mLPM. Q lain-lain didapat dari hasil pengurangan Q heater dengan Q air, Q paraffin-Cu, dan Q pipa CU. Q lain-lain mempengaruhi waktu untuk proses *charging*, semakin kecil nilai dari Q lain maka semakin efisien proses *charging*.

4.3 Laju Penyerapan dan kenaikan *Paraffin-Cu*

4.3.1 Laju Penyerapan Sensibel

Hasil laju penyerapan *paraffin wax* Cu 20% sensibel didapat dengan menggunakan persamaan 4.6.

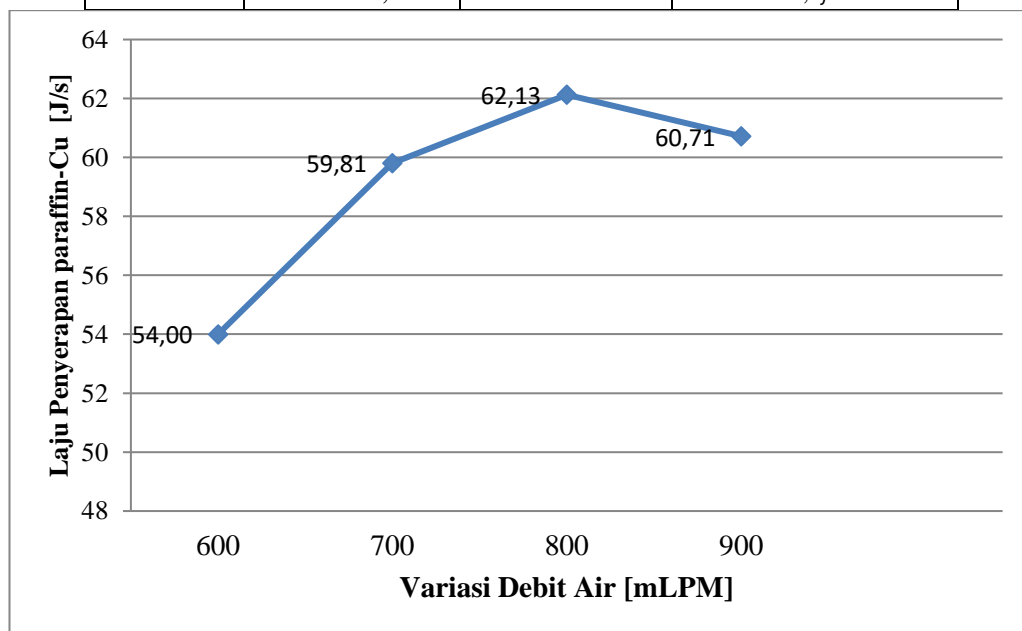
$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{Q \text{ Kumulatif (J)}}{\text{Waktu total (s)}} \quad (4.6)$$

$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{302734,72(J)}{9285 (s)}$$

$$\text{Laju Penyerapan} = 54,0\text{J/s}$$

Tabel 4.6 Data Laju Penyerapan PW Cu 20% Sensibel

No data	<i>Q</i> kumulatif	Waktu Total	Laju Penyerapan
	J	S	J/s
1857	302734,72	9285	54,0J/s



Gambar 4.13 Grafik laju penyerapan paraffin-Cu Sensibel

Gambar grafik diatas menunjukkan laju penyerapan *paraffin-Cu* sensibel selama proses *charging*. *Paraffin-Cu* masih dalam berbentuk padat yang disebut dengansensibel. Laju penyerapan paraffin-CU berbanding lurus dengan variasi debit air, semakin tinggi debit air semakin tinggi nilai laju penyerapan paraffin-Cu. Namun pada grafik nilai tertinggi ditunjukkan pada variasi 800mLPM bukan

variasi 900mLPM, hal ini terjadi karena saat proses *charging* variasi 900mLPM mengalami kebocoran selang pompa yang membuat proses perubahan fasa terhambat sehingga laju penyerapan juga terhambat.

4.3.2 Laju penyerapan Laten

Hasil penyerapan *paraffin wax* Cu 20% laten didapat dengan menggunakan persamaan 4.7.

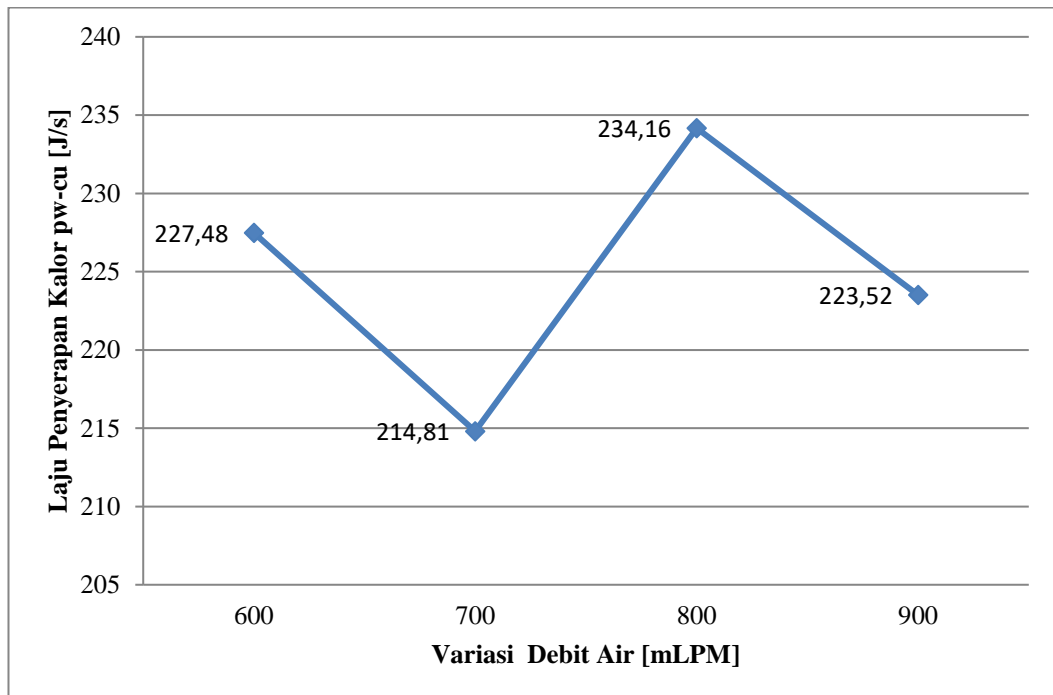
$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{\Delta Q \text{ Kumulatif (J)}}{\Delta \text{Waktu (s)}} \quad (4.7)$$

$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{1002619,63 - 305157,08 \text{ (J)}}{14830 - 9290 \text{ (s)}}$$

$$\text{Laju Penyerapan} = 227,48 \text{ J/s}$$

Tabel 4.7 Data Laju Penyerapan PW Cu 20% Laten

No data	<i>Q</i> kumulatif	<i>Waktu Total</i>	<i>Laju Penyerapan</i>
	J	S	J/s
1858	305157,08	9290	227,48 J/s
2966	1002619,63	14830	



Gambar 4.14 Grafik laju penyerapan paraffin-Cu laten

Grafik diatas menunjukkan laju penyerapan *paraffin*-Cu laten selama proses *charging*. Hasil grafik menunjukkan variasi 600 mLPM memiliki nilai 227,48 joule/s variasi 700 mLPM memiliki nilai 214,81 joule/s variasi 800mLPM memiliki nilai 234,16 joule/s dan 900 mLPM memiliki nilai 223,52 joule/s. Grafik mengalami penurunan dan kenaikan, hal ini terjadi karena suhu yang dihasilkan dan diserap *paraffin*-CU berbeda-beda dan kebocoran selang pompa juga mempengaruhi nilai penyerapan paraffin-Cu. Dari keempat variasi tersebut variasi 800 mLPM memiliki nilai tertinggi dalam proses laju penyerapan paraffin-Cu laten sedangkan variasi 700mLPM adalah yang terendah diantar keempat variasi tersebut.

4.3.3 Laju kenaikan Sensibel

Hasil kenaikan *paraffin wax* Cu 20% sensibel didapat dengan menggunakan persamaan 4.8.

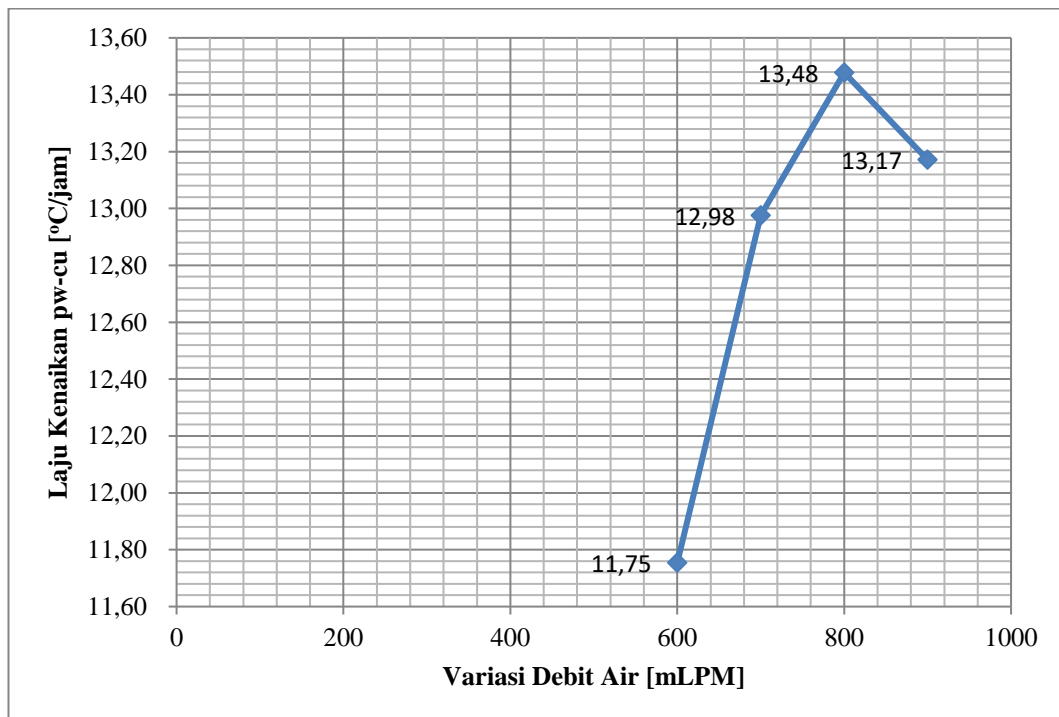
$$\text{Laju Kenaikan} = \frac{\Delta \text{Temperatur} (^\circ\text{C})}{\Delta \text{Waktu} (s)} \quad (4.8)$$

$$\text{Laju Kenaikan} = \frac{(52,17 - 27,58)}{(2579 - 0)}$$

$$\text{Laju Kenaikan} = 11,75 \text{ } ^\circ\text{C/jam}$$

Tabel 4.8 Data Laju Kenaikan PW Cu 20% Sensibel

No data	Temperatur	Waktu	Laju Kenaikan
	$^\circ\text{C}$	jam	$^\circ\text{C/jam}$
0	27,58	0	11,75
1857	52,17	2579	



Gambar 4.15 Grafik laju kenaikan paraffin-Cu sensibel

Gambar grafik diatas menunjukkan nilai laju kenaikan paraffin-cu sensibel mengalami kenaikan yang konstan pada variasi 600, 700 dan 800 mLPM, sedangkan pada variasi 900 mengalami sedikit penurunan nilai, hal ini terjadi

karena pada saat pengambilan data variasi 900 mengalami kebocoran selang, yang mengakibatkan udara masuk dan membuat penyerapan kalor pada paraffin-Cu sedikit terhambat. Adapun nilai lajukenaikan paraffin-CU sensibel tertinggi didapat pada variasi 800 mLPM dengan nilai 13,48°C/jam, dan terendah terdapat pada variasi 600 mLPM dengan nilai 11,75°C/jam.

4.3.4 Laju kenaikan Laten

Hasil kenaikan *paraffin wax* Cu 20% laten didapat dengan menggunakan persamaan 4.9.

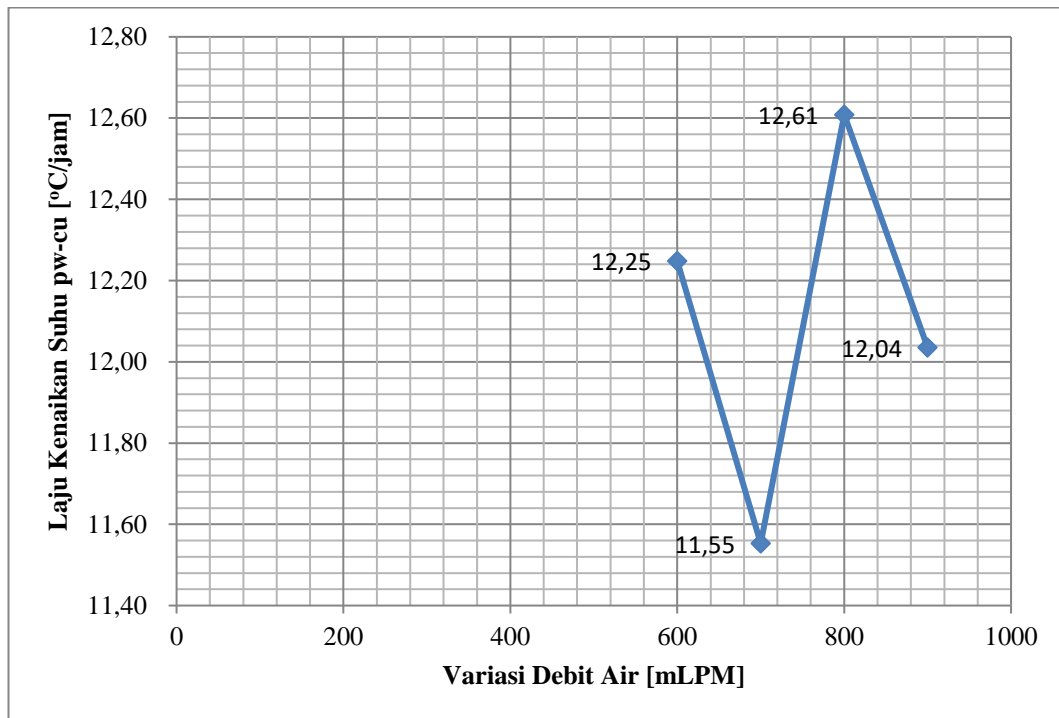
$$\text{Laju Kenaikan} = \frac{\Delta \text{Temperatur} (^{\circ}\text{C})}{\Delta \text{Waktu} (\text{s})} \quad (4.9)$$

$$\text{Laju Kenaikan} = \frac{(66,19 - 52,22)}{(4119 - 2581)}$$

$$\text{Laju Kenaikan} = 12,25 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{jam}$$

Tabel 4.9 Laju Kenaikan PW Cu 20% Laten

No data	Temperatur	Waktu	Laju Kenaikan
	$^{\circ}\text{C}$	jam	$^{\circ}\text{C}/\text{jam}$
1858	52,22	2581	12,25
2966	66,19	4119	



Gambar 4.16 Grafik laju kenaikan paraffin-Cu laten

Gambar 4.16 diatas merupakan laju kenaikan paraffin-Cu laten yang mengalami kenaikan dan penurunan setiap variasinya. Hal ini terjadi karena proses penyerapan kalor setiap variasi berbeda-beda yang mengakibatkan pelelehan paraffin-Cu setiap variasi juga berbeda-beda. Salah satu penyebabnya adalah kebocoran selang pada pengambilan data, yang menimbulkan heat loss disuatu variasi. Besar heat loss membuat proses pelelehan lebih lambat sehingga nilai laju kenaikan paraffin-cu menjadi kecil. pada grafik diatas variasi 800 mLPM dengan nilai 12,61 °C/jam menjadi yang tertinggi untuk laju kenaikan paraffin-Cu laten dan variasi 700 mLPM dengan nilai 11,55 menjadi yang terendah.