

BAB IV

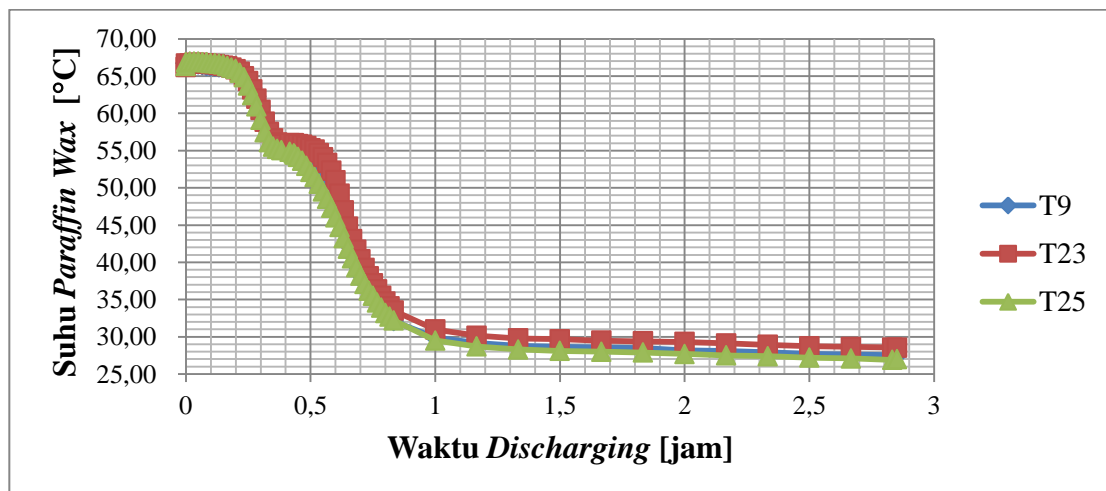
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Laju Pelepasan Kalor pada Variasi 1 LPM

Penelitian laju pelepasan kalor yang terjadi dari PCM ke HTF perlu dilakukan pengamatan pelepasan temperatur PCM arah aksial, arah vertikal, dan arah horisontal yang ada di dalam tangki TES. Hasil pengamatan yang dilihat dari 26 titik termokopel yang tersebar seperti pada Gambar 3.12 dengan variasi debit laju aliran 1 LPM, 1,5 LPM, 2 LPM, dan 2,5 LPM pada proses *discharging kontinyu*. Proses pengambilan data menggunakan *discharging kontinyu*, yaitu dilakukan tanpa adanya jeda waktu dalam pengaliran debit ketika pengambilan data berlangsung. Proses tersebut dilakukan seterusnya hingga suhu pada T32 mencapai 35°C. Laju pelepasan temperatur variasi 1 LPM relatif lebih lama daripada variasi lainnya karena menggunakan debit air paling kecil dan selesai pengambilan data mencapai 2 jam 51 menit.

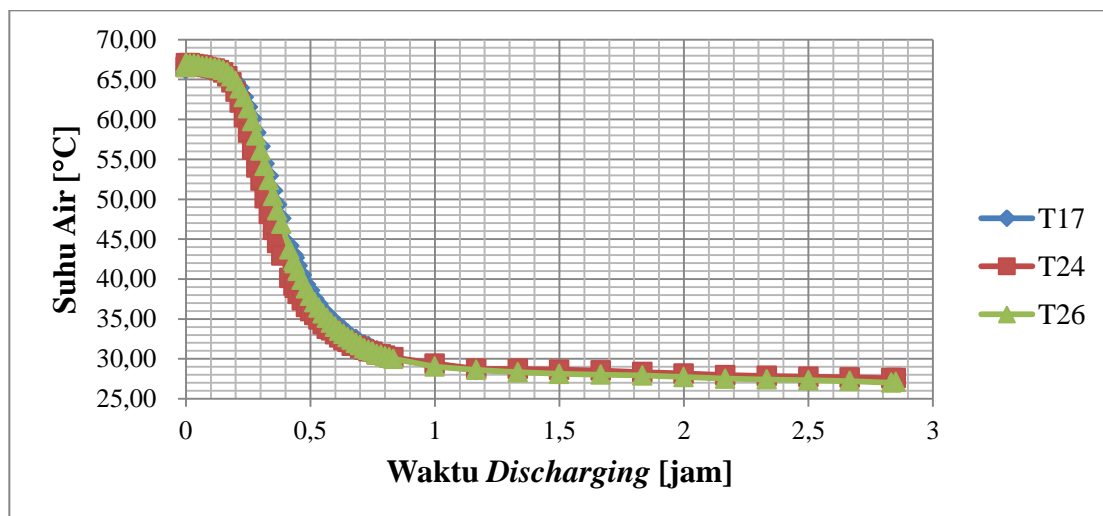
4.1.1. Evolusi Suhu Arah Aksial

Hasil setelah pengujian pada variasi 1 LPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada Gambar 4.1 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.1. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Aksial

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa suhu pada ketiga termokopel tersebut mengalami penurunan suhu yang relatif sama hingga waktu 0,4 jam, karena pada waktu tersebut PCM masih merata, tetapi pada waktu berikutnya mengalami penurunan suhu yang berbeda – beda. Hal ini disebabkan karena terjadinya perubahan fasa yang tidak sama pada setiap termokopel yang terpasang pada arah aksial *paraffin wax* dan pengaruh suhu HTF yang diberikan kepada PCM tidak merata karena titik letak termokopel yang berbeda, yaitu T9 terdapat pada penampang A, T23 pada penampang B, dan T25 pada penampang C. Pengaruh suhu HTF yang tidak merata terbukti pada T25 yang seharusnya waktu penurunan suhu yang lebih lama dibandingkan T9 karena titik letak T25 terdapat pada penampang C, sedangkan T9 pada penampang A yang dekat dengan input air kran. Jadi, urutan yang benar pada penurunan suhu dari lama ke cepat yaitu T25, T23, dan T9.



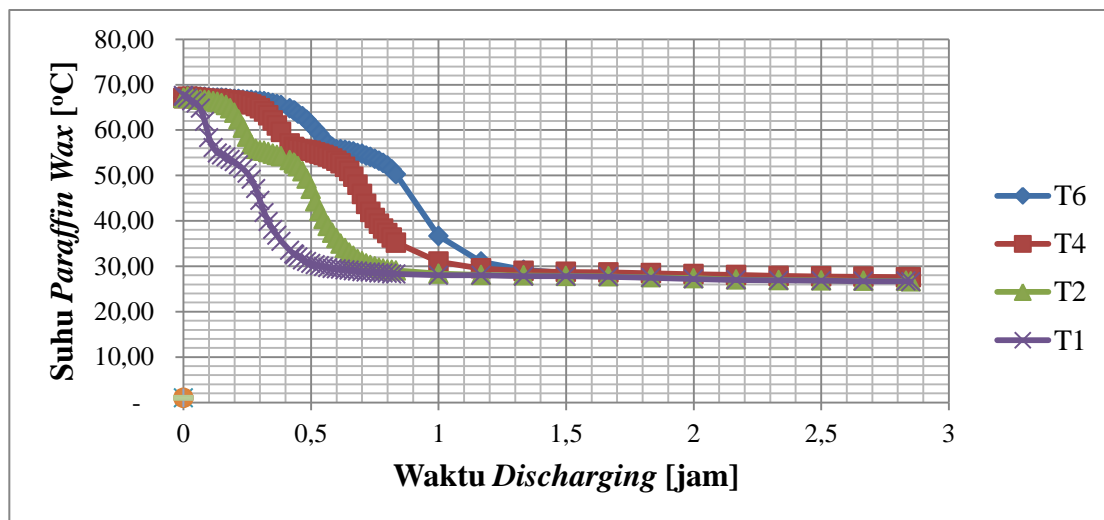
Gambar 4.2. Evolusi Suhu Air Arah Aksial

Gambar 4.2 aksial air menunjukkan penurunan suhu pada T17 dan T26 tidak mengalami perbedaan, tetapi pada T24 mengalami penurunan suhu yang berbeda dan waktu yang berbeda. Perbedaan suhu dan waktu tersebut dilihat dari suhu 61 °C hingga 36 °C dan 0,21 – 0,53 jam. Hal ini sangat tidak logis pada termokopel T24 yang terletak lebih jauh dari input kran air dibandingkan dengan T17, dikarenakan terjadinya gejolak aliran air yang disebabkan peletakan termokopel yang tidak rapi,

sehingga penurunan suhu dan waktu HTF pada T24 lebih cepat. Setelah suhu 36°C dan 0,53 jam penurunan mulai sama secara stabil karena HTF sudah tersebar secara merata.

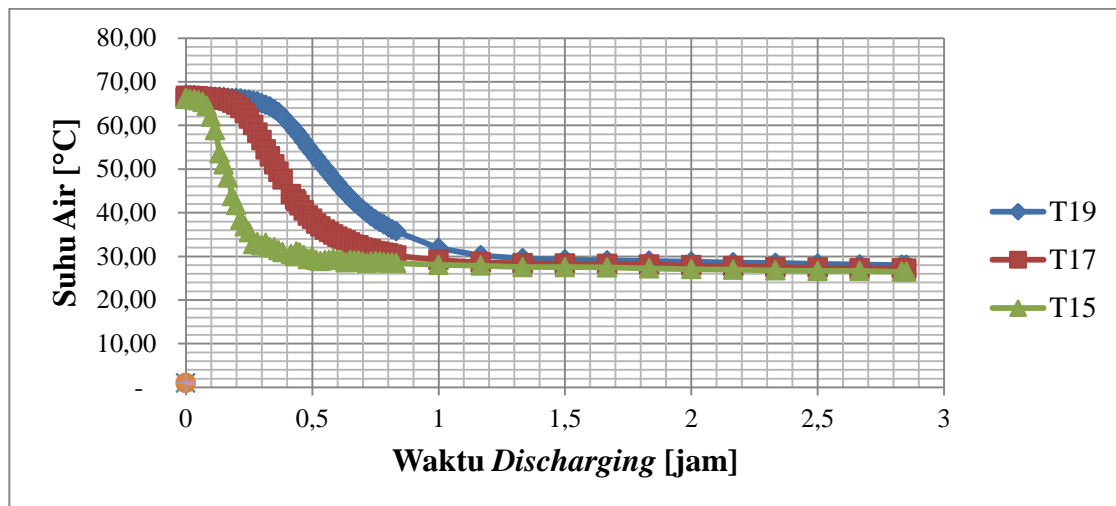
4.1.2. Evolusi Suhu Arah Vertikal

Hasil setelah pengujian pada variasi 1 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.3 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.3. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Vertikal

Gambar 4.3 menjelaskan suhu pada T1 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. Rendahnya T1 dipengaruhi oleh letak pipa tembaga, letak pipa tembaga berada pada paling dekat dengan input air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T6 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak pipa tembaga yang paling jauh dari input air kran. Penurunan suhu T6 pada 0-0,5 jam berkisar 7°C, suhu T4 berkisar 12°C, suhu T2 berkisar 23°C, dan suhu T1 berkisar 37°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T1 selama setengah jam.

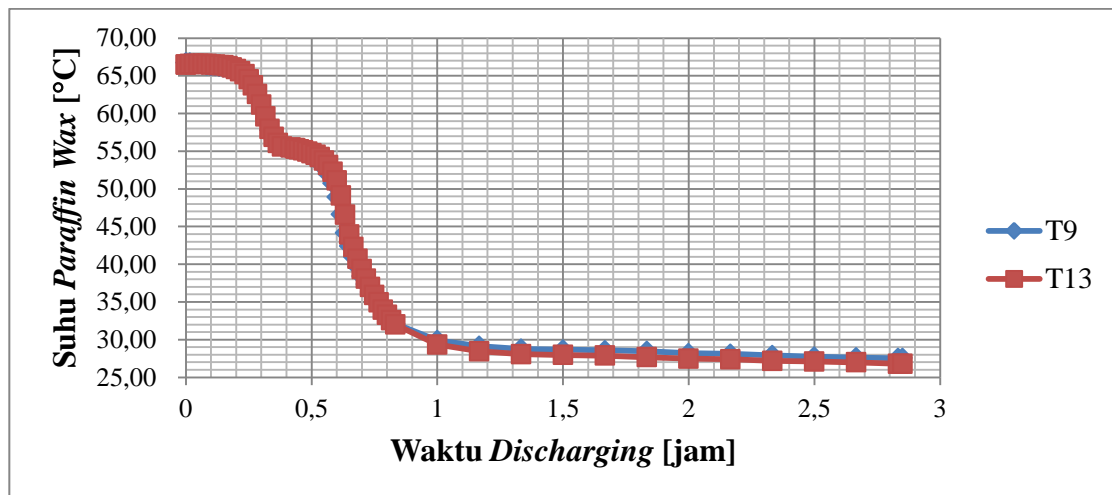


Gambar 4.4. Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Gambar 4.4 menjelaskan suhu pada T15 dalam data penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya dan rendahnya T15 dipengaruhi oleh letak termokopel, letak T15 berada pada paling dekat dengan input air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T19 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak yang paling jauh dari input air kran. Penurunan suhu T19 pada 0-0,5 jam berkisar 14°C, suhu T17 berkisar 28°C, dan suhu T15 berkisar 36°C. Sehingga penurunan suhu paling cepat pada T15.

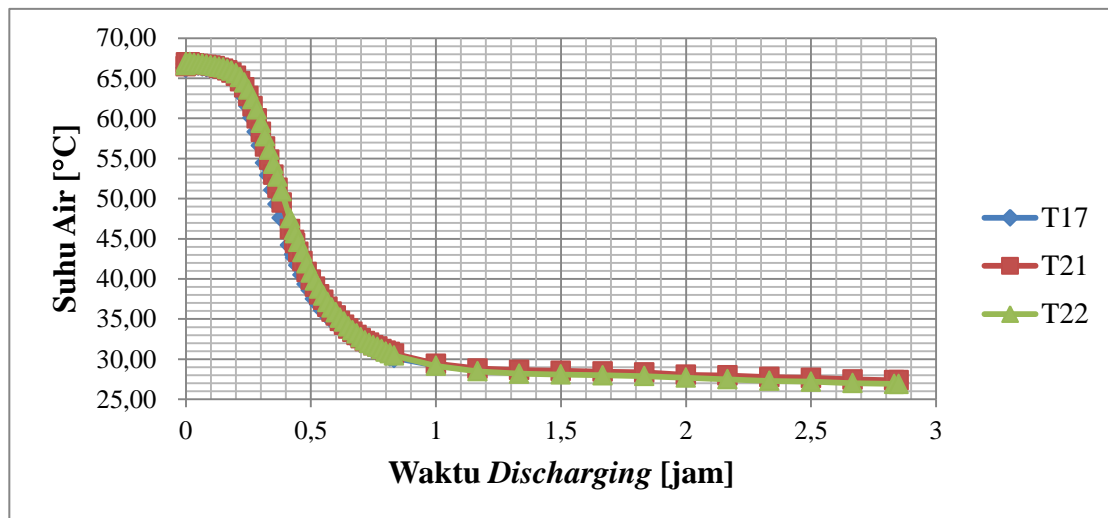
4.1.3. Evolusi Suhu Arah Horizontal

Hasil setelah pengujian pada variasi 1 LPM arah horisontal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 10% dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.5 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.6.



Gambar 4.5. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Horizontal

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa suhu pada kedua termokopel tidak mengalami perbedaan yang signifikan, tetapi adanya lengkungan pada suhu 55°C hingga 53°C. Hal ini disebabkan karena *paraffin wax* sempat menahan suhu saat terjadinya pelepasan kalor dari PCM ke HTF serta karena menggunakan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu tidak lebih dari 1°C. Maka dari itu, semakin besar debit yang dipakai maka membuat kedua termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar. Pada waktu 0-0,8 jam suhu T13 lebih tinggi dari T9 namun dari 0,8-2,51 jam T9 lebih tinggi dari T13. Suhu T9 pada awal pengambilan data lebih rendah dari T13 dikarenakan letak pipa tembaga T9 berada di atas *output* air kran, sehingga saat kran dibuka T9 dahulu mengenai air dari T13 yang berada pada samping T9.



Gambar 4.6. Evolusi Suhu Air Arah Horizontal

Gambar 4.6 horizontal air menunjukkan penurunan suhu pada T17 dan T21 tidak mengalami perbedaan, tetapi pada T22 mengalami penurunan suhu yang berbeda dan waktu yang berbeda. Perbedaan suhu dan waktu tersebut dilihat dari suhu 62 °C hingga 36 °C dan 0,26 – 0,51 jam. Hal ini disebabkan karena T17 terkena debit air kran terlebih dahulu dibandingkan T21 dan T22, sehingga penurunan suhu dan waktu HTF pada T17 lebih cepat. Setelah suhu 36°C dan 0,51 jam penurunan mulai sama secara stabil karena HTF sudah tersebar secara merata. Secara garis besar perbedaan suhu ketiga termokopel rata-rata tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu tidak sampai 2°C.

4.1.4. Grafik Energi Kumulatif 1 LPM

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses *discharging* dari awal penelitian hingga selesai dan didapatkan dengan menggunakan persamaan 4.1.

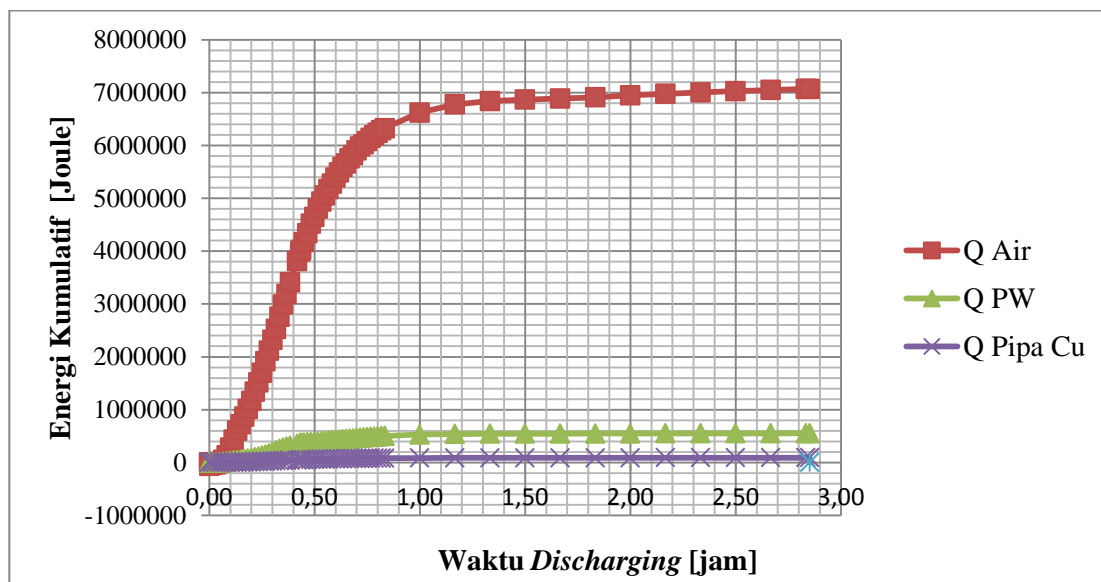
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43,13 \times 4180 \times (66,46 - 27,24)$$

$$Q_{kum} = 7.069.918,65 \text{ J}$$

Tabel 4.1. Energi Kumulatif 1 LPM

Bahan	cp	Massa [kg]	T1 °C	T2 °C	ΔT °C	Q kum (J)
	[J/(kg.K)]					
Air	4180	43,13	66,46	27,24	39,22	7.069.918,65
Pipa Cu	390	5,91	66,56	26,93	39,63	91.280,81
PW	2000	3,50	66,80	27,16	39,64	553.681,71



Gambar 4.7. Grafik Energi Komulatif 1 LPM

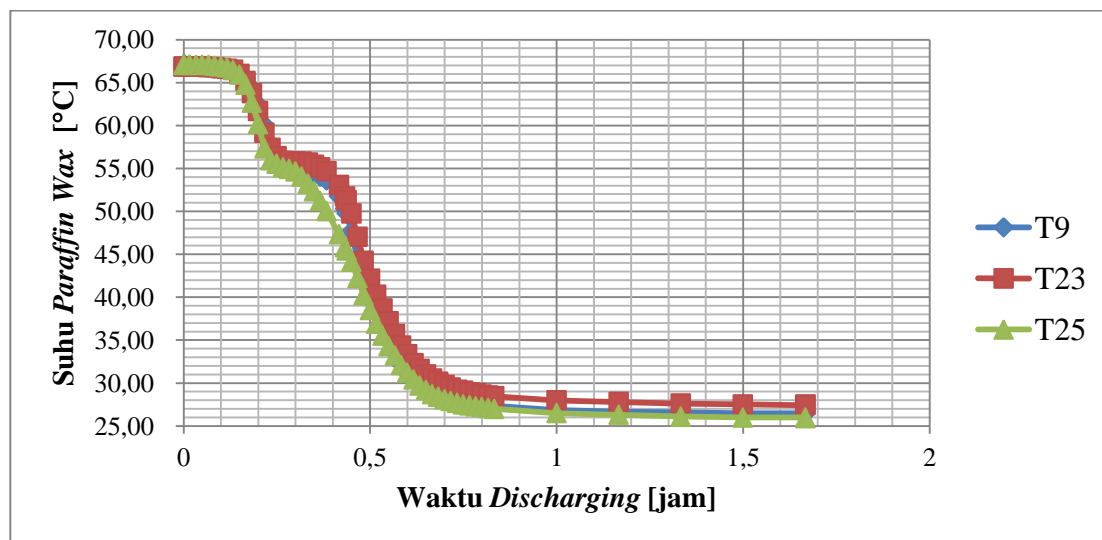
Gambar 4.7 menjelaskan bahwa energi kumulatif menunjukkan pada Q pipa Cu lebih rendah dari air dan *paraffin wax* Cu disebabkan nilai Cp yang rendah yaitu 390 J/kg.K, sedangkan nilai Cp air 4180 J/kg.K dan Cp *Paraffin Wax* 2000 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax* mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,83 jam sebanyak 0,501 kJ, setelah 0,83 jam hingga selesai laju kenaikan hanya sebesar 501,751 – 553,682 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa Cu mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 81,449 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-0,83 jam sebesar 6325,497 kJ, setelah 0,83 jam relatif mengalami kenaikan lebih stabil.

4.2. Laju Pelepasan Kalor pada Variasi 1,5 LPM

Penelitian laju pelepasan kalor yang terjadi dari PCM ke HTF perlu dilakukan pengamatan pelepasan temperatur PCM arah aksial, arah vertikal, dan arah horisontal yang ada di dalam tangki TES. Hasil pengamatan yang dilihat dari 26 titik termokopel yang tersebar seperti pada Gambar 3.12 dengan variasi debit laju aliran 1 LPM, 1,5 LPM, 2 LPM, dan 2,5 LPM pada proses *discharging kontinyu*. Proses pengambilan data menggunakan *discharging kontinyu*, yaitu dilakukan tanpa adanya jeda waktu dalam pengaliran debit ketika pengambilan data berlangsung. Proses tersebut dilakukan seterusnya hingga suhu pada T32 mencapai 35°C. Laju pelepasan temperatur variasi 1,5 LPM relatif lebih lama daripada variasi 2,5 LPM, tetapi lebih cepat dibanding variasi 2 LPM. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan nilai ΔT . Pengambilan data 1,5 LPM mencapai 1 jam 48 menit.

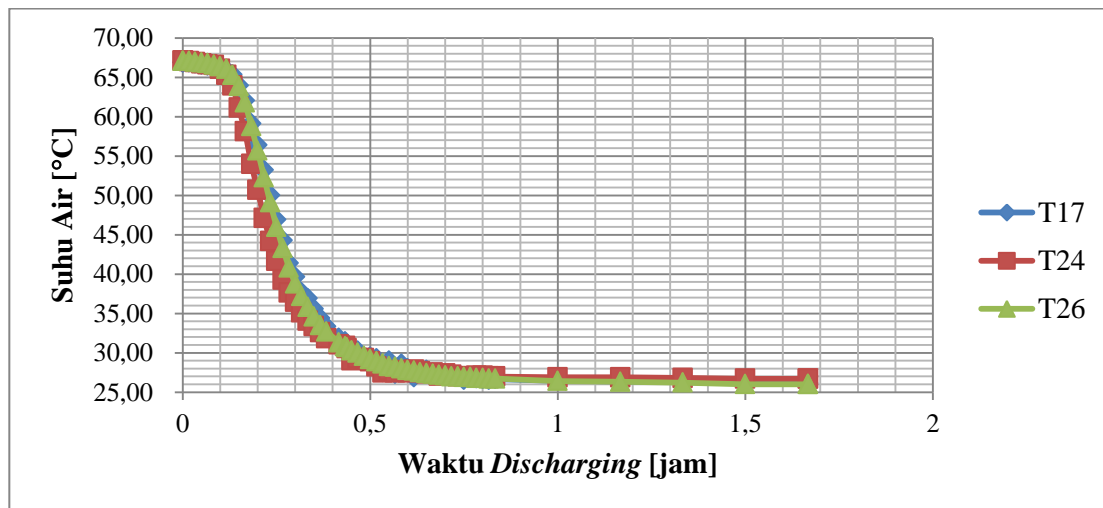
4.2.1. Evolusi Suhu Arah Aksial

Hasil setelah pengujian pada variasi 1,5 LPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.8 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.8. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Aksial

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa suhu pada ketiga termokopel tersebut mengalami penurunan suhu yang relatif sama hingga waktu 0,2 jam, karena pada waktu tersebut kalor yang diberikan dari HTF ke PCM masih merata, tetapi pada waktu berikutnya mengalami penurunan suhu yang berbeda – beda. Hal ini disebabkan karena terjadinya perubahan fasa yang tidak sama pada setiap termokopel yang terpasang pada arah aksial *paraffin wax* dan pengaruh suhu HTF yang diberikan kepada PCM tidak merata karena titik letak termokopel yang berbeda, yaitu T9 terdapat pada penampang A, T23 pada penampang B, dan T25 pada penampang C. Pengaruh suhu HTF yang tidak merata terbukti pada T25 yang seharusnya waktu penurunan kalor yang lebih lama dibandingkan T9 karena titik letak T25 terdapat pada penampang C, sedangkan T9 pada penampang A yang dekat dengan input air kran. Jadi, urutan yang benar pada penurunan suhu dari lama ke cepat yaitu T25, T23, dan T9.



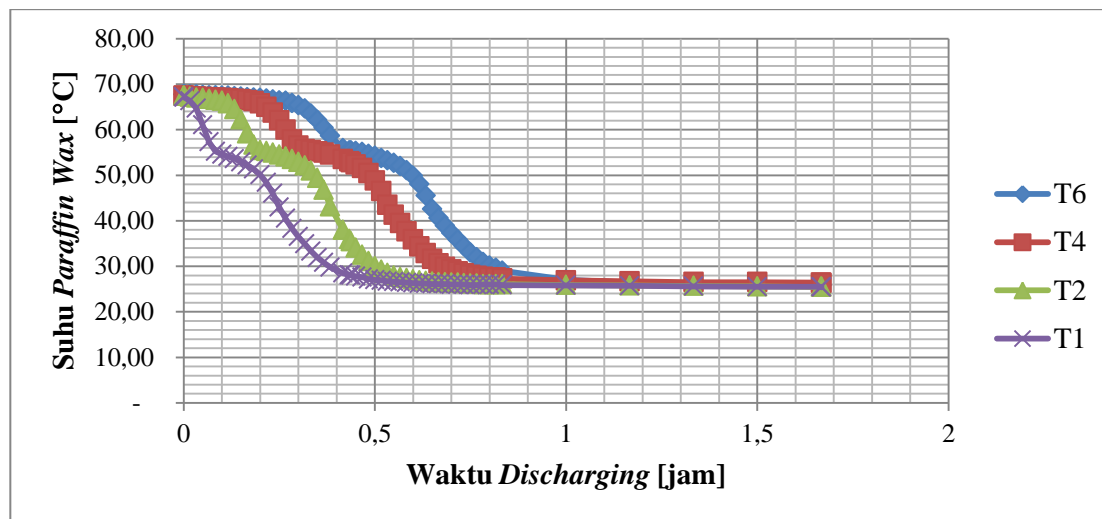
Gambar 4.9. Evolusi Suhu Air Arah Aksial

Gambar 4.9 menjelaskan bahwa aksial air menunjukkan penurunan suhu pada T17 dan T26 tidak mengalami perbedaan, tetapi pada T24 mengalami penurunan suhu yang berbeda dan waktu yang berbeda. Perbedaan suhu dan waktu tersebut dilihat dari suhu 63 °C hingga 34 °C dan 0,15 – 0,3 jam. Hal ini sangat tidak logis pada termokopel T24 yang terletak lebih jauh dari input kran air dibandingkan

dengan T17, dikarenakan terjadinya gejala aliran air yang disebabkan peletakan termokopel yang tidak rapi, sehingga penurunan suhu dan waktu HTF pada T24 lebih cepat. Setelah suhu 34°C dan 0,3 jam penurunan mulai sama secara stabil karena HTF sudah tersebar secara merata.

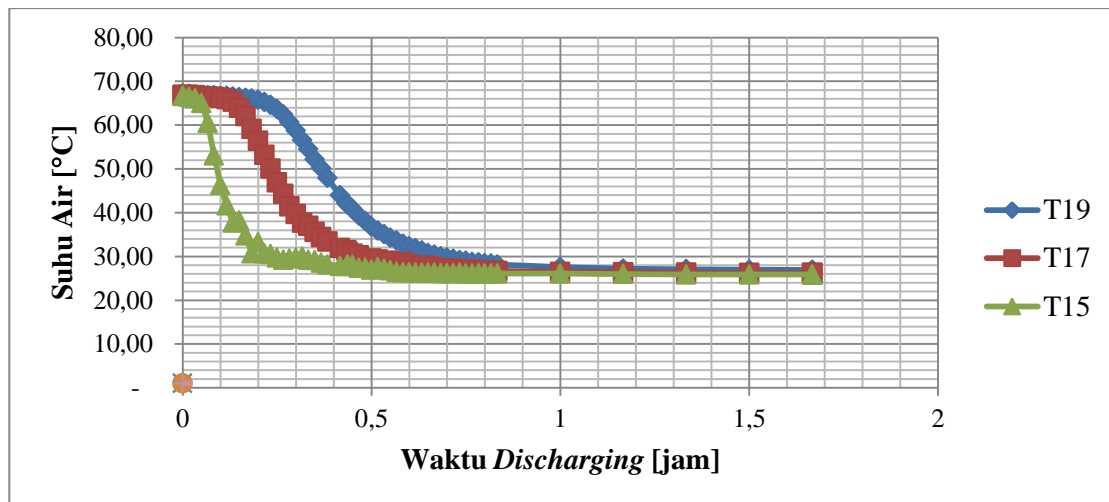
4.2.2. . Evolusi Suhu Arah Vertikal

Hasil setelah pengujian pada variasi 1,5 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.10 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.10. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Vertikal

Gambar 4.10 menjelaskan bahwa suhu pada T1 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. Rendahnya T1 dipengaruhi oleh letak pipa tembaga, letak pipa tembaga berada pada paling dekat dengan input air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T6 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak pipa tembaga yang paling jauh dari input air kran. Penurunan suhu T6 pada 0-0,4 jam berkisar 11°C , suhu T4 berkisar 14°C , suhu T2 berkisar 29°C , dan suhu T1 berkisar 39°C . Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T1 selama 0,4 jam.

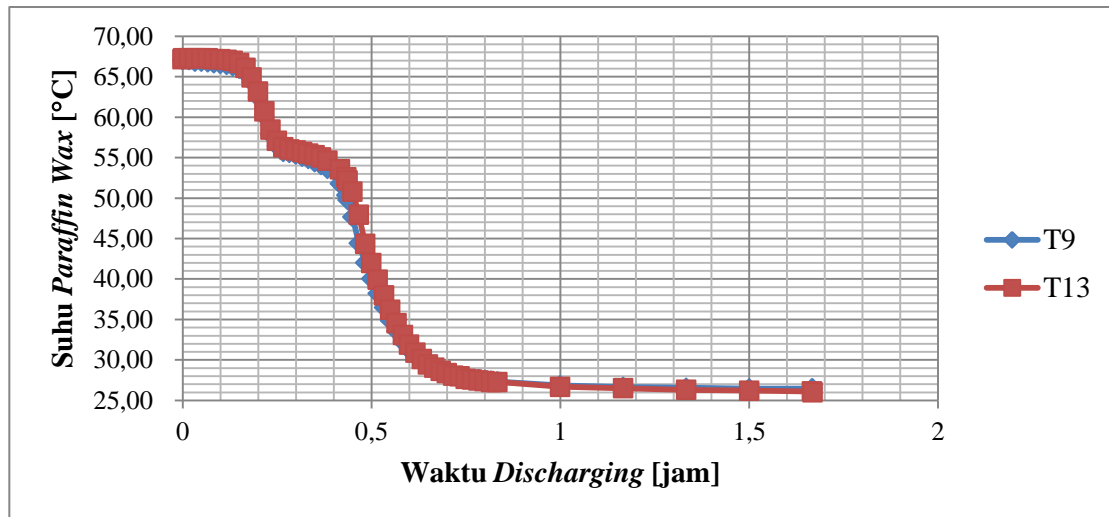


Gambar 4.11. Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Gambar 4.11 menjelaskan bahwa suhu pada T15 dalam data penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya dan rendahnya T15 dipengaruhi oleh letak termokopel, letak T15 berada pada paling dekat dengan input air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T19 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak yang paling jauh dari input air kran. Termokopel T15 mengalami kenaikan suhu pada waktu 0,2-0,26 jam sebesar 3°C dan kembali turun secara tidak beraturan, Termokopel T17 juga mengalami kenaikan dan penurunan suhu yang tidak beraturan pada waktu 0,55-0,63 jam sebesar 2°C. Hal ini disebabkan terjadinya gejolak aliran air pada suhu tersebut. Penurunan suhu T19 pada 0-0,5 jam berkisar 30°C, suhu T17 berkisar 37°C, dan suhu T15 berkisar 40°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T15.

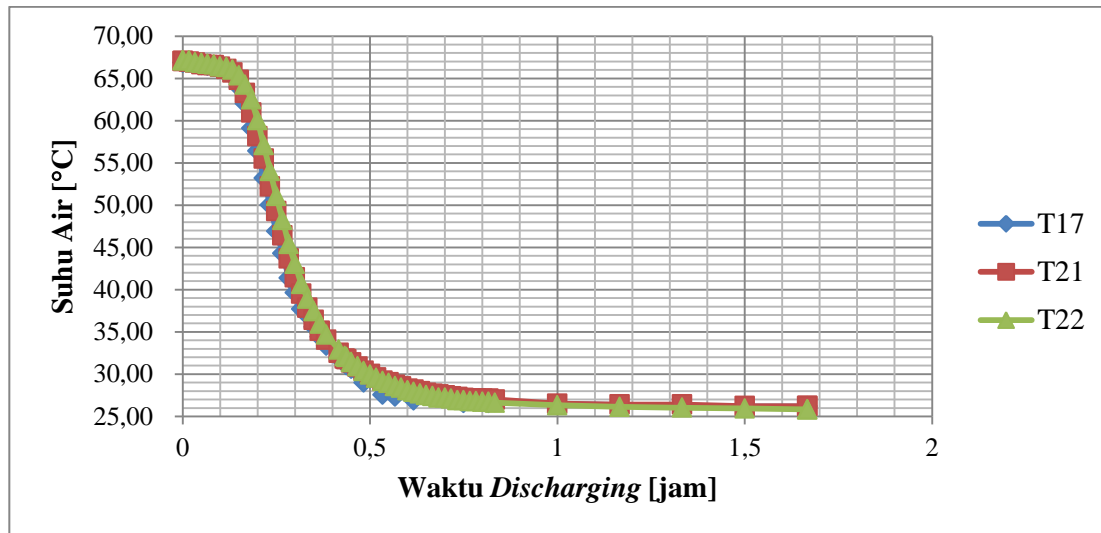
4.2.3. Evolusi Suhu Arah Horizontal

Hasil setelah pengujian pada variasi 1,5 LPM arah horisontal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.12 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.13.



Gambar 4.12. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Horizontal

Gambar 4.12 menunjukkan bahwa suhu pada kedua termokopel tidak mengalami perbedaan yang signifikan, tetapi adanya lengkungan pada suhu 55°C hingga 52°C. Hal ini disebabkan karena *paraffin wax* sempat menahan suhu saat terjadinya pelepasan kalor dari PCM ke HTF. Penurunan T9 pada waktu 0,35-0,55 jam mengalami perbedaan sedikit dengan T13, disebabkan debit air yang diberikan lebih besar yaitu 1,5 LPM dibanding 1 LPM. Maka, besar semakin besar debit yang dipakai akan mengakibatkan turbulen pada waktu tertentu. Pada waktu 0-0,6 jam suhu T13 lebih tinggi dari T9 namun dari 0,6-1,6 jam T9 lebih tinggi dari T13. Suhu T9 pada awal pengambilan data lebih rendah dari T13 dikarenakan letak pipa tembaga T9 berada di atas *output* air kran, sehingga saat kran dibuka T9 dahulu mengenai air dari T13 yang berada pada samping T9.



Gambar 4.13. Evolusi Suhu Air Arah Horizontal

Gambar 4.13 menjelaskan pada arah horizontal air menunjukkan penurunan suhu pada T17 dan T21 tidak mengalami perbedaan, tetapi pada T22 mengalami penurunan suhu yang berbeda dan waktu yang berbeda. Perbedaan suhu dan waktu tersebut dilihat dari suhu 63 °C hingga 37 °C dan 0,16 – 0,31 jam. Hal ini disebabkan karena T17 terkena debit air kran terlebih dahulu dibandingkan T21 dan T22, sehingga penurunan suhu dan waktu HTF pada T17 lebih cepat. Setelah suhu 37°C dan 0,31 jam penurunan mulai sama secara stabil karena HTF sudah tersebar secara merata. Tetapi termokopel T17 pada waktu 0,48-0,61 jam mengalami kenaikan dan penurunan yang tidak stabil sebesar 2°C. Secara garis besar perbedaan suhu ketiga termokopel rata-rata tidak mengalami perbedaan yang signifikan tetapi penurunan suhu yang lebih cepat dibandingkan debit 1 LPM.

4.2.4. Grafik Energi Kumulatif 1,5 LPM

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses *discharging* dari awal penelitian hingga selesai dan didapatkan dengan menggunakan persamaan 4.1.

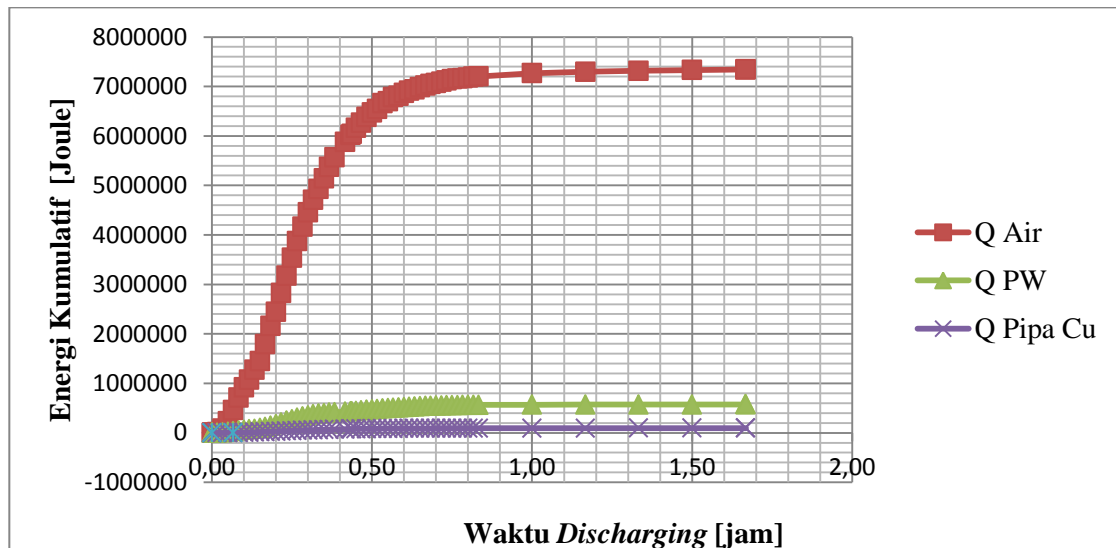
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43.13 \times 4180 \times (66,98 - 26,24)$$

$$Q_{kum} = 7.343.781,24 \text{ J}$$

Tabel 4.2. Energi Kumulatif 1,5 LPM

Bahan	cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg.K)]					
Air	4180	43,13	66,98	26,24	40,74	7.343.781,24
Pipa Cu	390	5,91	67,00	25,85	41,15	94.783,93
PW	2000	3,50	67,24	26,05	41,19	573.426,54



Gambar 4. 14. Grafik Energi Kumulatif 1,5 LPM

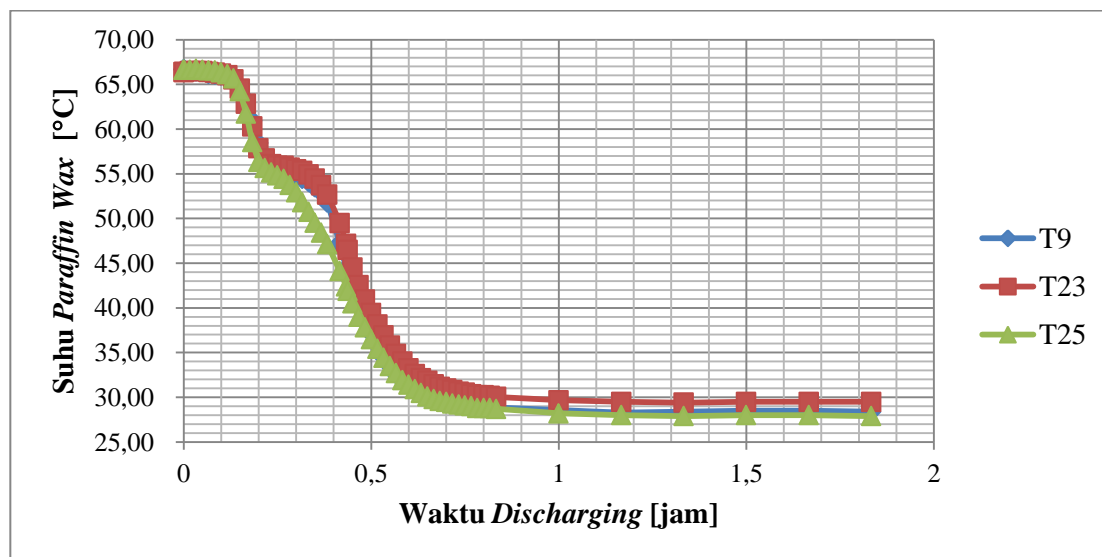
Gambar 4.14 menjelaskan energi kumulatif pada Q pipa *Cu* lebih rendah dari air dan *paraffin wax Cu* disebabkan nilai C_p yang rendah yaitu 390 J/kg.K, sedangkan nilai C_p air 4180 J/kg.K dan C_p *Paraffin Wax* 2000 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax* mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,83 jam sebanyak 564,672 kJ, setelah 0,83 jam hingga selesai laju kenaikan hanya sebesar 564,672-573,427 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa *Cu* mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 92,873 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-0,83 jam sebesar 7204,111 kJ, setelah 0,83 jam relatif mengalami kenaikan lebih stabil.

4.3. Laju Pelepasan Kalor pada Variasi 2 LPM

Penelitian laju pelepasan kalor yang terjadi dari PCM ke HTF perlu dilakukan pengamatan pelepasan temperatur PCM arah aksial, arah vertikal, dan arah horisontal yang ada di dalam tangki TES. Hasil pengamatan yang dilihat dari 26 titik termokopel yang tersebar seperti pada Gambar 3.12 dengan variasi debit laju aliran 1 LPM, 1.5 LPM, 2 LPM, dan 2.5 LPM pada proses *discharging kontinyu*. Proses pengambilan data menggunakan *discharging kontinyu*, yaitu dilakukan tanpa adanya jeda waktu dalam pengaliran debit ketika pengambilan data berlangsung. Proses tersebut dilakukan seterusnya hingga suhu pada T32 mencapai 35°C. Laju pelepasan temperatur variasi 2 LPM relatif lebih lama daripada variasi 2,5 LPM, tetapi tidak lebih cepat dibanding variasi 1,5 LPM. Hal ini disebabkan terjadinya perbedaan ΔT . Pengambilan data 2 LPM mencapai 1 jam 53 menit.

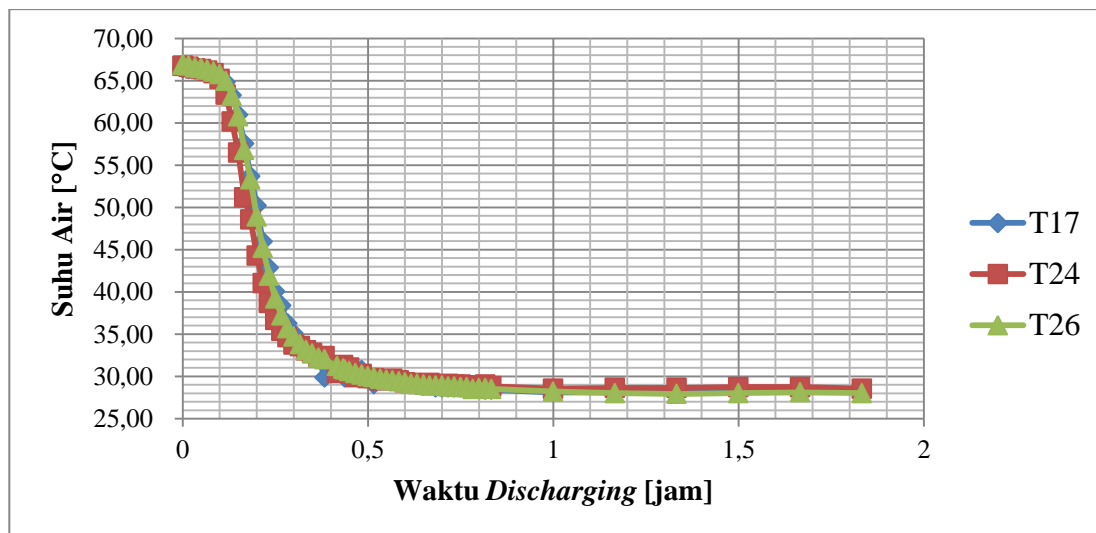
4.3.1. Evolusi Suhu Arah Aksial

Hasil setelah pengujian pada variasi 2 LPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.15 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.16.



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

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa suhu pada ketiga termokopel tersebut mengalami penurunan suhu yang relatif sama hingga waktu 0,21 jam, karena pada waktu tersebut PCM masih merata, tetapi pada waktu berikutnya mengalami penurunan suhu yang berbeda – beda. Hal ini disebabkan karena terjadinya perubahan fasa yang tidak sama pada setiap termokopel yang terpasang pada arah aksial *paraffin wax* dan pengaruh suhu HTF yang diberikan kepada PCM tidak merata karena titik letak termokopel yang berbeda, yaitu T9 terdapat pada penampang A, T23 pada penampang B, dan T25 pada penampang C. Pengaruh suhu HTF yang tidak merata terbukti pada T25 yang seharusnya waktu penurunan suhu yang lebih lama dibandingkan T9 karena titik letak T25 terdapat pada penampang C, sedangkan T9 pada penampang A yang dekat dengan input air kran. Jadi, urutan yang benar pada penurunan suhu dari lama ke cepat yaitu T25, T23, dan T9.



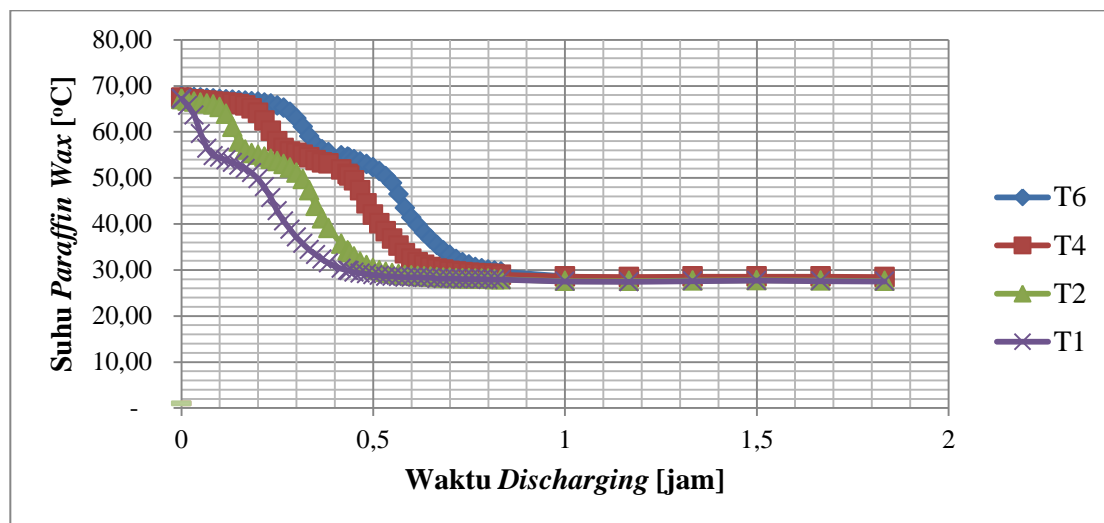
Gambar 4. 16 Evolusi Suhu Air Arah Aksial

Gambar 4.16 menjelaskan bahwa aksial air mengalami penurunan suhu pada T17 dan T26 tidak mengalami perbedaan, tetapi pada T24 mengalami penurunan suhu yang berbeda dan waktu yang berbeda. Perbedaan suhu dan waktu tersebut dilihat dari suhu 63 °C hingga 34 °C dan 0,13 – 0,28 jam. Hal ini sangat tidak logis pada termokopel T24 yang terletak lebih jauh dari input kran air dibandingkan

dengan T17, dikarenakan terjadinya gejolak aliran air yang disebabkan peletakan termokopel yang tidak rapi, sehingga penurunan suhu dan waktu HTF pada T24 lebih cepat. Perubahan suhu yang tidak stabil terjadi juga pada T17 dari 0,3-0,4 jam sebesar 3°C, dikarenakan adanya turbulen aliran air pada waktu tersebut. Setelah suhu 30°C dan 0,4 jam penurunan mulai sama secara stabil karena HTF sudah tersebar secara merata.

4.3.2. Evolusi Suhu Arah Vertikal

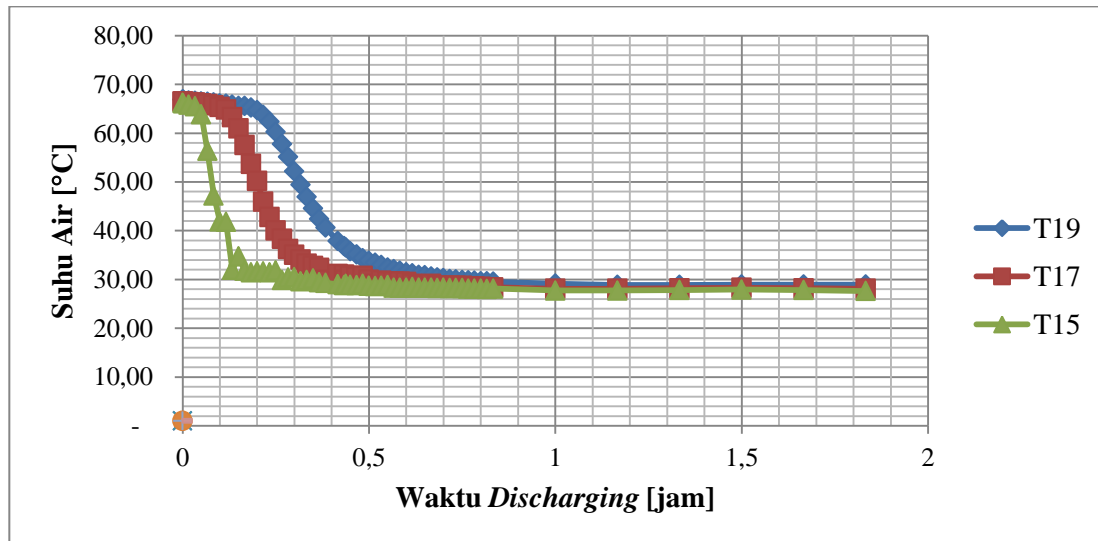
Hasil setelah pengujian pada variasi 2 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.17 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.18.



Gambar 4.17. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Vertikal

Gambar 4.17 menjelaskan bahwa suhu pada T1 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. Rendahnya T1 dipengaruhi oleh letak pipa tembaga, letak pipa tembaga berada pada paling dekat dengan input air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T6 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak pipa tembaga yang paling jauh dari input air kran. Penurunan suhu T6 pada 0-0,5 jam berkisar 15°C, suhu T4 berkisar

25°C, suhu T2 berkisar 37°C, dan suhu T1 berkisar 39°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T1 selama setengah jam.

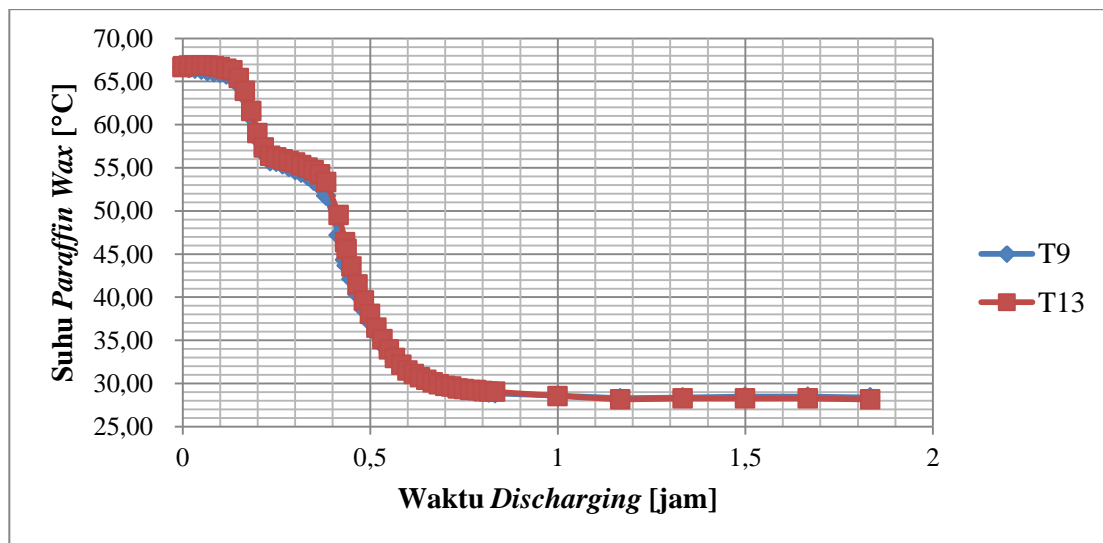


Gambar 4.18. Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Gambar 4.18 menunjukkan pada suhu pada T15 dalam data penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya dan rendahnya T15 dipengaruhi oleh letak termokopel, letak T15 berada pada paling dekat dengan input air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T19 memiliki suhu yang relatif stabil karena letak yang paling jauh dari input air kran. Penurunan suhu T19 pada 0-0,5 jam berkisar 33°C, suhu T17 berkisar 37°C, dan suhu T15 berkisar 38°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T15, tetapi suhu T15 mengalami perubahan suhu yang tidak stabil dimulai dari 0,1-0,3 jam, serta pada suhu T17 dari 0,3-0,5 jam juga demikian. Hal ini disebabkan terjadinya gejala aliran air yang tidak merata.

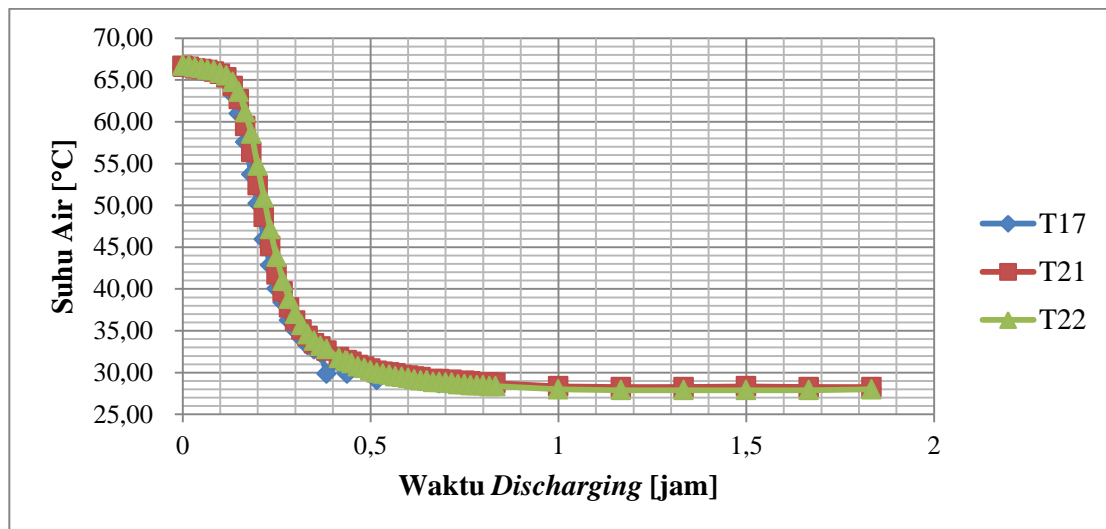
4.3.3. Evolusi Suhu Arah Horizontal

Hasil setelah pengujian pada variasi 2 LPM arah horizontal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.19 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.20.



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

Gambar 4.19 menunjukkan bahwa suhu pada kedua termokopel tidak mengalami perbedaan yang signifikan, tetapi adanya lengkungan pada suhu 56°C hingga 54°C. Hal ini disebabkan karena *paraffin wax* sempat menahan suhu saat terjadinya pelepasan kalor dari PCM ke HTF serta karena menggunakan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu tidak lebih dari 1°C. Maka dari itu, semakin besar debit yang dipakai maka membuat kedua termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar. Pada waktu 0-0,8 jam suhu T13 lebih tinggi dari T9 namun dari 0,8-1,83 jam T9 lebih tinggi dari T13. Suhu T9 pada awal pengambilan data lebih rendah dari T13 dikarenakan letak pipa tembaga T9 berada di atas *output* air kran, sehingga saat kran dibuka T9 dahulu mengenai air dari T13 yang berada pada samping T9.



Gambar 4. 20. Evolusi Suhu Air Arah Horizontal

Gambar 4.20 menjelaskan bahwa arah horizontal air mengalami penurunan suhu pada T17 dan T21 tidak mengalami perbedaan, tetapi pada T22 mengalami penurunan suhu yang berbeda dan waktu yang berbeda. Perbedaan suhu dan waktu tersebut dilihat dari suhu 62 °C hingga 36 °C dan 0,26 – 0,51 jam. Hal ini disebabkan karena T17 terkena debit air kran terlebih dahulu dibandingkan T21 dan T22, sehingga penurunan suhu dan waktu HTF pada T17 lebih cepat. Setelah suhu 36°C dan 0,51 jam penurunan mulai sama secara stabil karena HTF sudah tersebar secara merata. Secara garis besar perbedaan suhu ketiga termokopel rata-rata tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan selisih suhu tidak sampai 2°C.

4.3.4. Grafik Energi Kumulatif 2 LPM

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses *discharging* dari awal penelitian hingga selesai dan didapatkan dengan menggunakan persamaan 4.1.

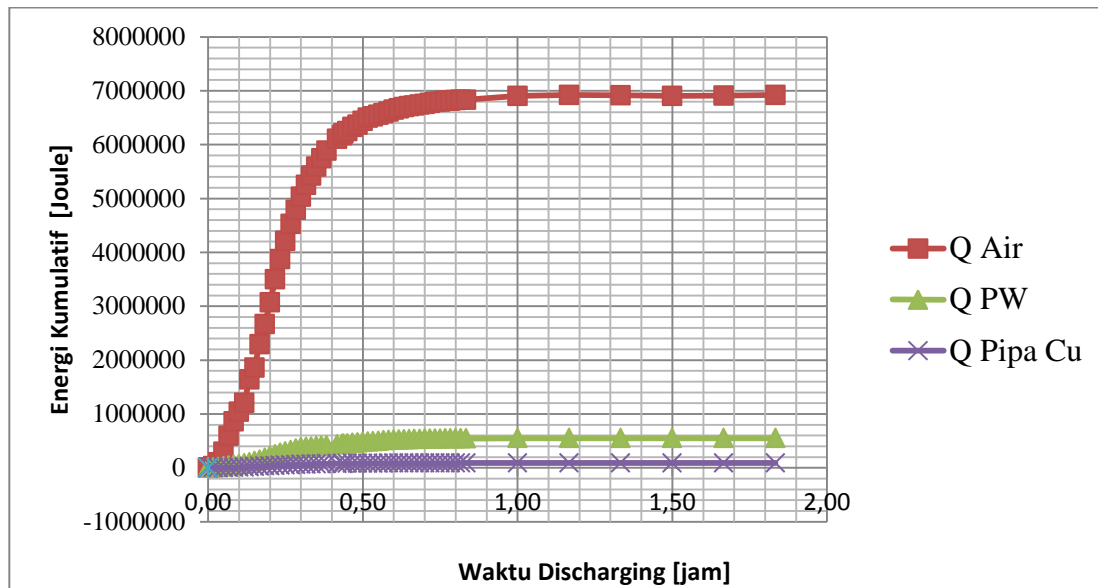
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43,13 \times 4180 \times (66,64 - 28,16)$$

$$Q_{kum} = 6.935.957,79 \text{ J}$$

Tabel 4. 3 Energi Kumulatif 2 LPM

Bahan	cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg.K)]	[kg]	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	(J)
Air	4180	43,13	66,,64	28,16	38,48	6.935.957,79
Pipa Cu	390	5,91	66,64	27,90	38,74	89.233,96
PW	2000	3,50	66,94	28,11	38,83	550.311,68



Gambar 4. 21. Grafik Energi Kumulatif 2 LPM

Gambar 4.21 menjelaskan bahwa energi kumulatif pada Q pipa *Cu* lebih rendah dari air dan *paraffin wax Cu* disebabkan 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 signifikan pada 0-0,83 jam sebanyak 545,145 kJ, setelah 0,83 jam hingga selesai laju kenaikan hanya sebesar 545,145-550,249 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa *Cu* mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 0,088 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-0,83 jam sebesar 6832,435 kJ, setelah 0,83 jam relatif mengalami kenaikan lebih stabil.

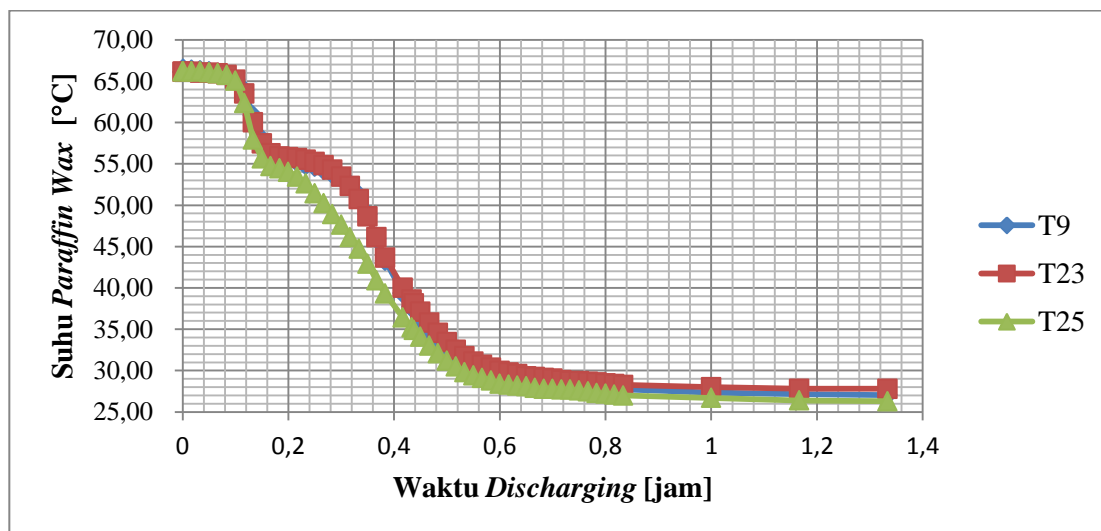
4.4. Laju Pelepasan Kalor pada Variasi 2,5 LPM

Penelitian laju pelepasan kalor yang terjadi dari PCM ke HTF perlu dilakukan pengamatan pelepasan temperatur PCM arah aksial, arah vertikal, dan arah horisontal

yang ada di dalam tangki TES. Hasil pengamatan yang dilihat dari 26 titik termokopel yang tersebar seperti pada Gambar 3.11 dengan variasi debit laju aliran 1 LPM, 1,5 LPM, 2 LPM, dan 2,5 LPM pada proses *discharging kontinyu*. Proses pengambilan data menggunakan *discharging kontinyu*, yaitu dilakukan tanpa adanya jeda waktu dalam pengaliran debit ketika pengambilan data berlangsung. Proses tersebut dilakukan seterusnya hingga suhu pada T32 mencapai 35°C. Laju pelepasan temperatur variasi 2,5 LPM paling cepat diantara variasi debit LPM lainnya. Karena semakin besar debit yang diberikan pada proses discharging, maka semakin cepat penurunan suhu yang didapatkan. Pengambilan data 2,5 LPM mencapai 1 jam 27 menit.

4.4.1. Evolusi Suhu Arah Aksial

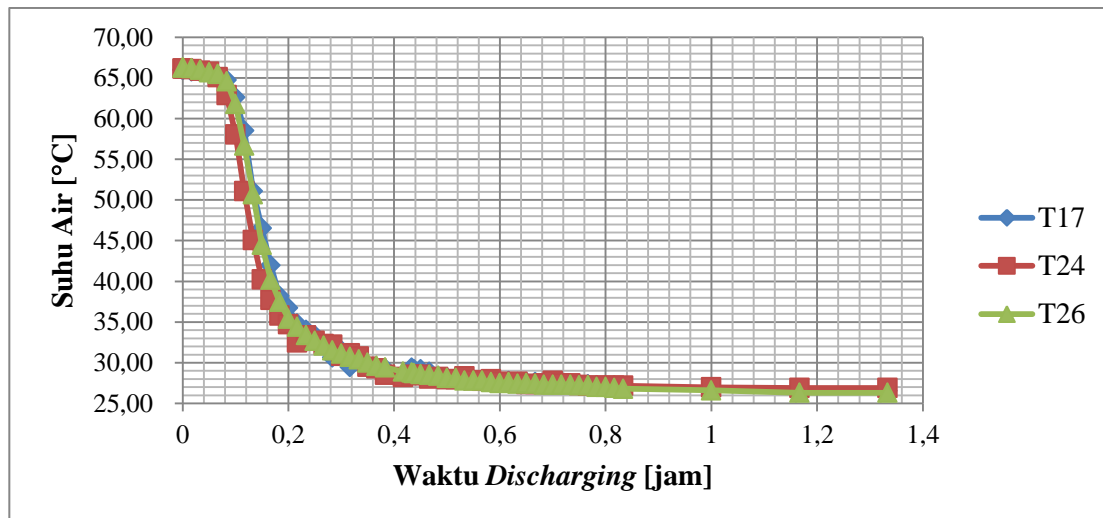
Hasil setelah pengujian pada variasi 2,5 LPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.22 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.23.



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

Gambar 4.22 menunjukkan bahwa suhu pada ketiga termokopel tersebut mengalami penurunan suhu yang relatif sama hingga waktu 0,18 jam, karena pada

waktu tersebut PCM masih merata, tetapi pada waktu berikutnya mengalami penurunan suhu yang berbeda – beda. Hal ini disebabkan karena terjadinya perubahan fasa yang tidak sama pada setiap termokopel yang terpasang pada arah aksial *paraffin wax* dan pengaruh suhu HTF yang diberikan kepada PCM tidak merata karena titik letak termokopel yang berbeda, yaitu T9 terdapat pada penampang A, T23 pada penampang B, dan T25 pada penampang C. Pengaruh suhu HTF yang tidak merata terbukti pada T25 yang seharusnya waktu penurunan kalor yang lebih lama dibandingkan T9 karena titik letak T25 terdapat pada penampang C, sedangkan T9 pada penampang A yang dekat dengan input air kran. Jadi, urutan yang benar pada pelepasan kalor dari lama ke cepat yaitu T25, T23, dan T9.



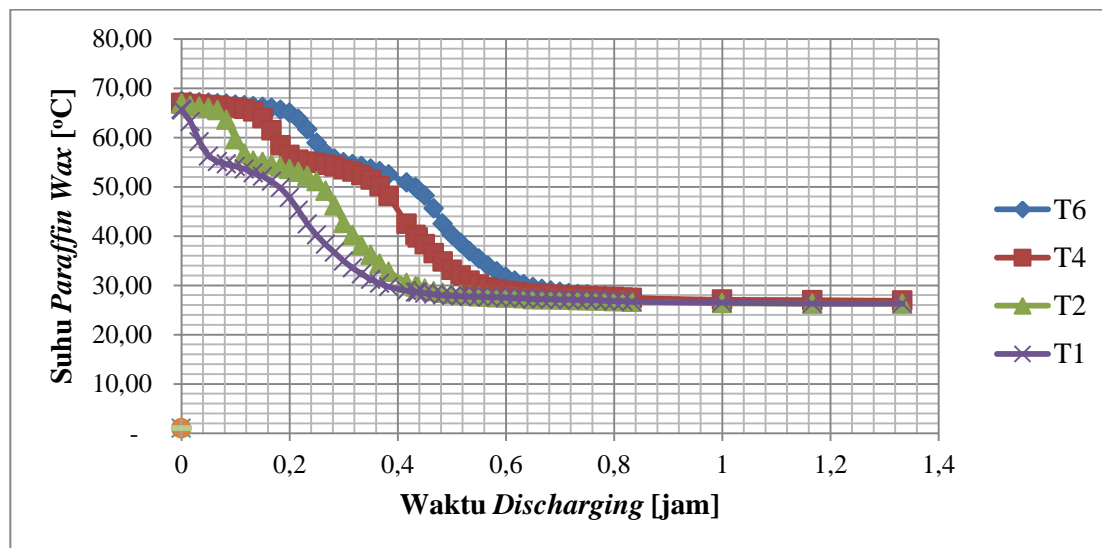
Gambar 4. 23. Evolusi Suhu Air Arah Aksial

Gambar 4.23 menjelaskan bahwa aksial air mengalami penurunan suhu pada T17 dan T26 tidak mengalami perbedaan, tetapi pada T24 mengalami penurunan suhu yang berbeda dan waktu yang berbeda. Perbedaan suhu dan waktu tersebut dilihat dari suhu 61 °C hingga 35 °C dan 0,1 – 0,2 jam. Hal ini sangat tidak logis pada termokopel T24 yang terletak lebih jauh dari input kran air dibandingkan dengan T17, dikarenakan terjadinya gejolak aliran air yang disebabkan peletakan termokopel yang tidak rapi, sehingga penurunan suhu dan waktu HTF pada T24 lebih cepat,

tetapi setelah suhu 35°C dan 0,2 jam terjadi gejolak aliran air kembali yang mengakibatkan perubahan suhu yang tidak beraturan pada ketiga termokopel tersebut. Perubahan suhu mulai stabil pada temperatur 27°C karena HTF sudah tidak terjadi gejolak aliran air yang tidak merata.

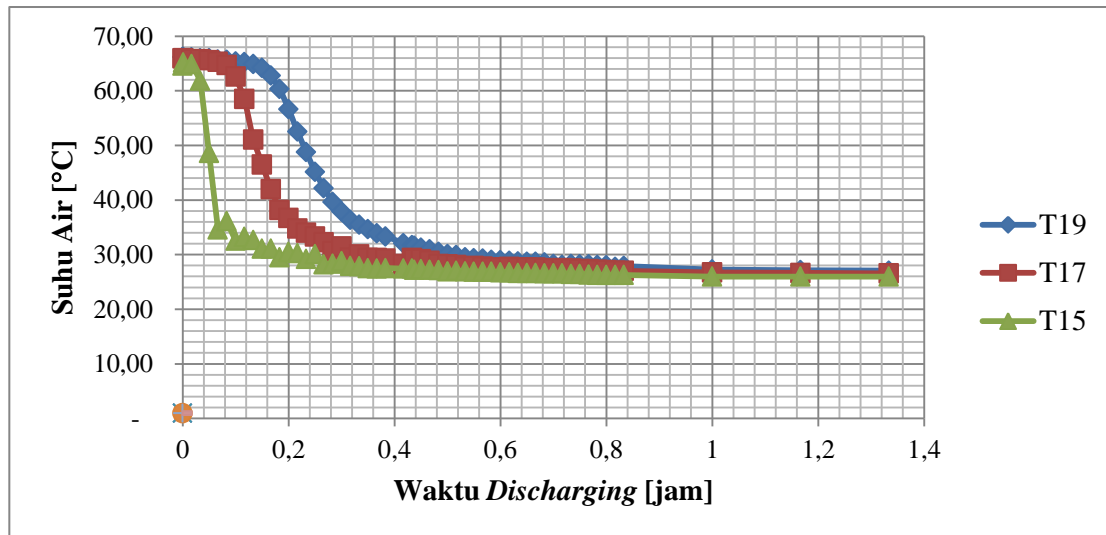
4.4.2 Evolusi Suhu Arah Vertikal

Hasil setelah pengujian pada variasi 2,5 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.24 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.25.



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

Gambar 4.24 menunjukkan suhu pada T1 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. Rendahnya T1 dipengaruhi oleh letak pipa tembaga, letak pipa tembaga berada pada paling dekat dengan input air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T6 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak pipa tembaga yang paling jauh dari input air kran. Penurunan suhu T6 pada 0-0,5 jam berkisar 27°C , suhu T4 berkisar 34°C , suhu T2 berkisar 37°C , dan suhu T1 berkisar 38°C . Sehingga penurunan suhu paling cepat pada T1 selama setengah jam.

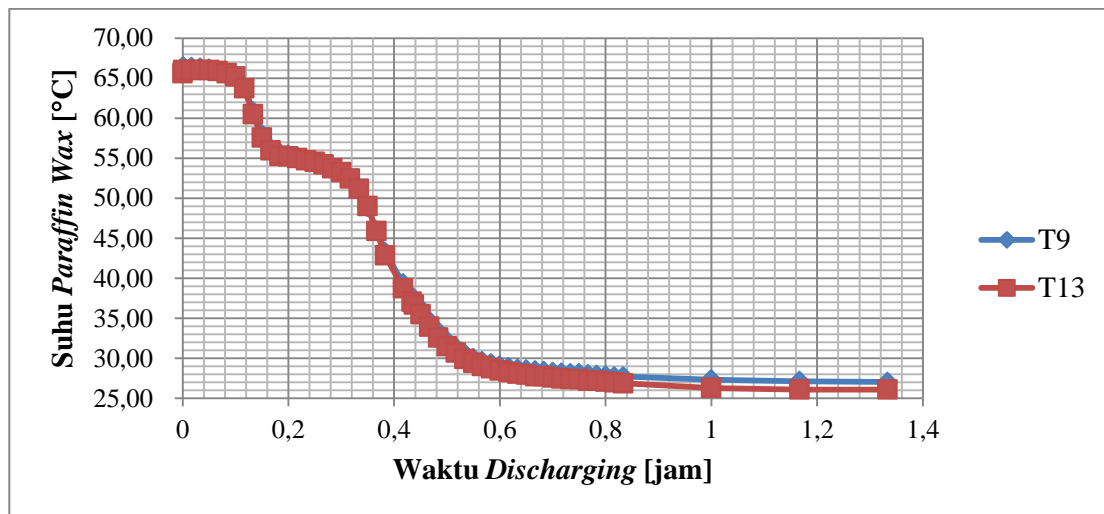


Gambar 4. 25 Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Gambar 4.25 menunjukkan suhu pada T15 dalam data penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya dan rendahnya T15 dipengaruhi oleh letak termokopel, letak T15 berada pada paling dekat dengan input air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T19 memiliki suhu yang relatif stabil karena letak yang paling jauh dari input air kran. Penurunan suhu T19 pada 0-0,5 jam berkisar 34°C, suhu T17 berkisar 37°C, dan suhu T15 berkisar 39°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T15, tetapi suhu T15 mengalami perubahan suhu yang tidak stabil dimulai dari 0,06-0,31 jam, serta pada suhu T17 dari 0,28-0,45 jam juga demikian. Hal ini disebabkan terjadinya gejala aliran air yang tidak merata.

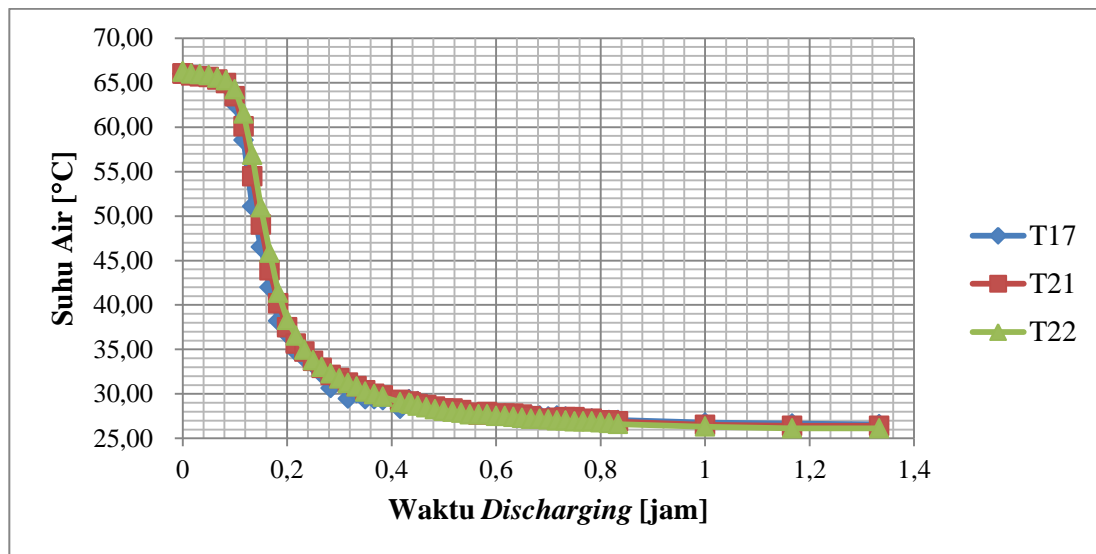
4.4.3. Evolusi Suhu Arah Horizontal

Hasil setelah pengujian pada variasi 2,5 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu *paraffin wax* dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.26 sedangkan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.27.



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

Gambar 4.26 menunjukkan bahwa suhu pada kedua termokopel tidak mengalami perbedaan yang signifikan, tetapi adanya lengkungan pada suhu 55°C hingga 51°C. Hal ini disebabkan karena *paraffin wax* sempat menahan suhu saat terjadinya pelepasan kalor dari PCM ke HTF dan tidak begitu terjadi gejolak aliran air yang besar sehingga tidak membuat kedua termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar. Suhu T9 pada awal pengambilan data lebih rendah dari T13 dikarenakan letak pipa tembaga T9 berada di atas *output* air kran, sehingga saat kran dibuka T9 dahulu mengenai air dari T13 yang berada pada samping T9.



Gambar 4. 27. Evolusi Suhu Air Arah Horizontal

Gambar 4.27 horizontal air menunjukkan penurunan suhu pada T21 dan T22 tidak mengalami perbedaan yang signifikan, tetapi pada T17 mengalami penurunan suhu yang signifikan dan waktu yang berbeda. Hal ini disebabkan karena T17 terkena debit air kran terlebih dahulu dibandingkan T21 dan T22, sehingga penurunan suhu dan waktu HTF pada T17 lebih cepat. Setelah suhu 28°C dan 0,5 jam penurunan mulai sama secara stabil karena HTF sudah tersebar secara merata. Secara garis besar perbedaan suhu ketiga termokopel rata-rata mengalami perbedaan penurunan suhu dan waktu yang berbeda karena letak termokopel tersebut pada setiap penampangnya.

4.4.4. Grafik Energi Kumulatif 2,5 LPM

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses *discharging* dari awal penelitian hingga selesai dan didapatkan dengan menggunakan persamaan 4.1.

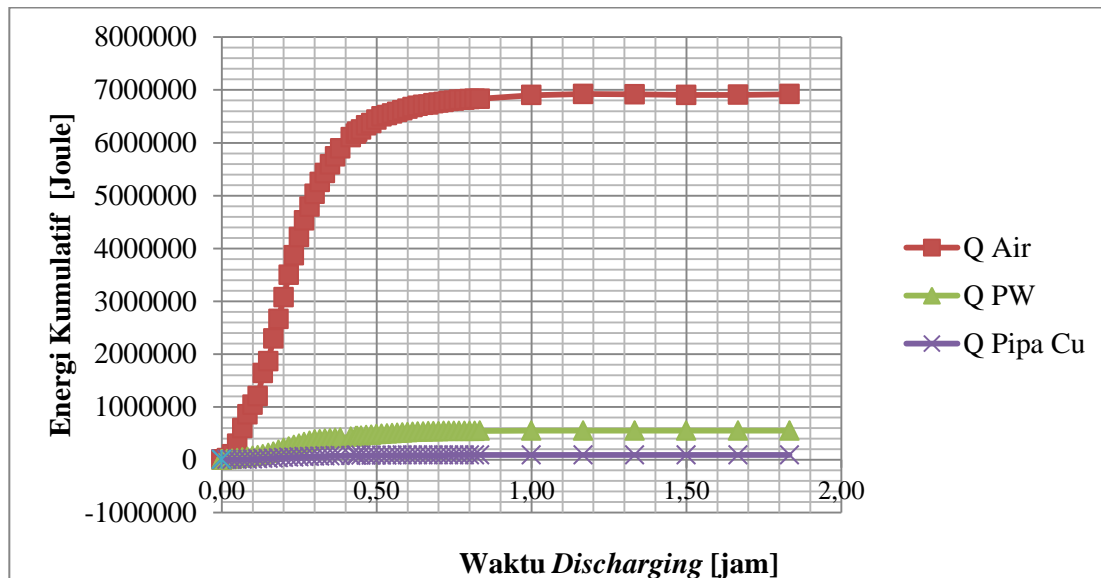
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43,13 \times 4180 \times (65,80 - 26,44)$$

$$Q_{kum} = 7.095.134,33 \text{ J}$$

Tabel 4. 4 Energi Kumulatif 2,5 LPM

Bahan	cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg.K)]					
Air	4180	43,13	65,80	26,44	39,36	7.095.134,33
Pipa Cu	390	5,91	66,05	26,32	39,73	91.509,92
PW	2000	3,50	66,32	26,51	39,81	545.161,55



Gambar 4. 28. Grafik Energi Kumulatif

Gambar 4.28 menunjukkan energi kumulatif pada Q pipa *Cu* lebih rendah dari air dan *paraffin wax Cu* disebabkan 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 signifikan pada 0-0,83 jam sebanyak 0,347 kJ, setelah 0,83 jam hingga selesai laju kenaikan hanya sebesar 540,340-545,162 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa *Cu* mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 91,418 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-0,83 jam sebesar 6994,991 kJ, setelah 0,83 jam relatif mengalami kenaikan lebih stabil.

4.5. Laju Pelepasan Kalor dan Laju Penurunan Suhu

4.5.1. Laju Pelepasan Kalor Air

Laju pelepasan kalor pada air dapat dicari dengan persamaan 4.2:

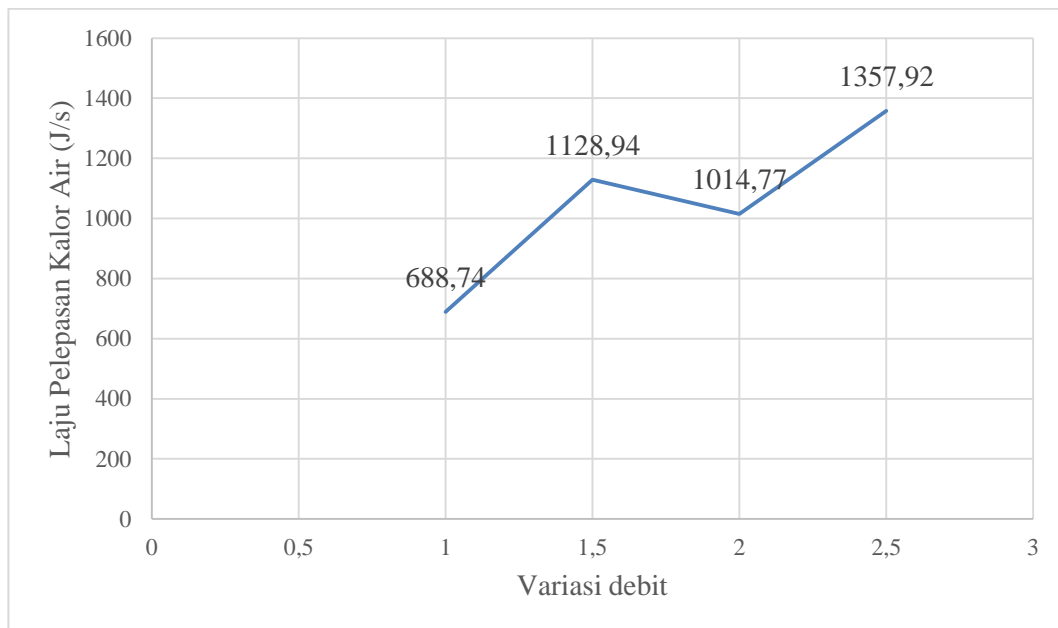
$$\dot{Q} = \frac{Q_{kumulatif}}{t_{total}} \quad (4.2)$$

$$\dot{Q} = \frac{7.069.918,65}{10265}$$

$$\dot{Q} = 688,74 \text{ J/s}$$

Tabel 4. 5 Laju Pelepasan Kalor Air

V	T1 Air	T2 Air	ΔT	Δt	Q kum Air	Q kum <i>Paraffin Wax</i>	\dot{Q}
LPM	°C	°C	°C	(detik)	(J)	(J)	(J/s)
1	66,45	27,24	39,21	10265	7.069.918,65	553.681,77	688,74
1.5	66,98	26,24	40,73	6505	7.343.781,23	573.426,53	1128,94
2	66,63	28,16	38,47	6835	6.935.957,92	550.331,67	1014,77
2.5	65,79	26,43	39,35	5225	7.095.134,33	545.161,54	1357,92



Gambar 4. 29. Laju Pelepasan Kalor Air

Gambar 4.29 menunjukkan bahwa laju pelepasan kalor paling rendah yaitu pada variasi 1 LPM karena memiliki waktu yang paling lama 2 jam 51 menit diantara variasi lainnya. Sedangkan laju pelepasan terbesar pada variasi 2,5 LPM karena memiliki waktu yang tercepat saat pengujian. Variasi 2,5 LPM memiliki waktu yang tercepat karena suhu mulai proses *discharging* 65°C yang membuat proses penurunan lebih cepat dari variasi lainnya yang suhu awalnya 66°C. Selain itu semakin besar debit juga berpengaruh terhadap pelepasan kalor yang terjadi. Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 1 jam 27 menit.

4.5.2. Laju Pelepasan Kalor *Paraffin Wax*

Laju pelepasan kalor pada *paraffin wax* dapat dicari dengan persamaan 4.2:

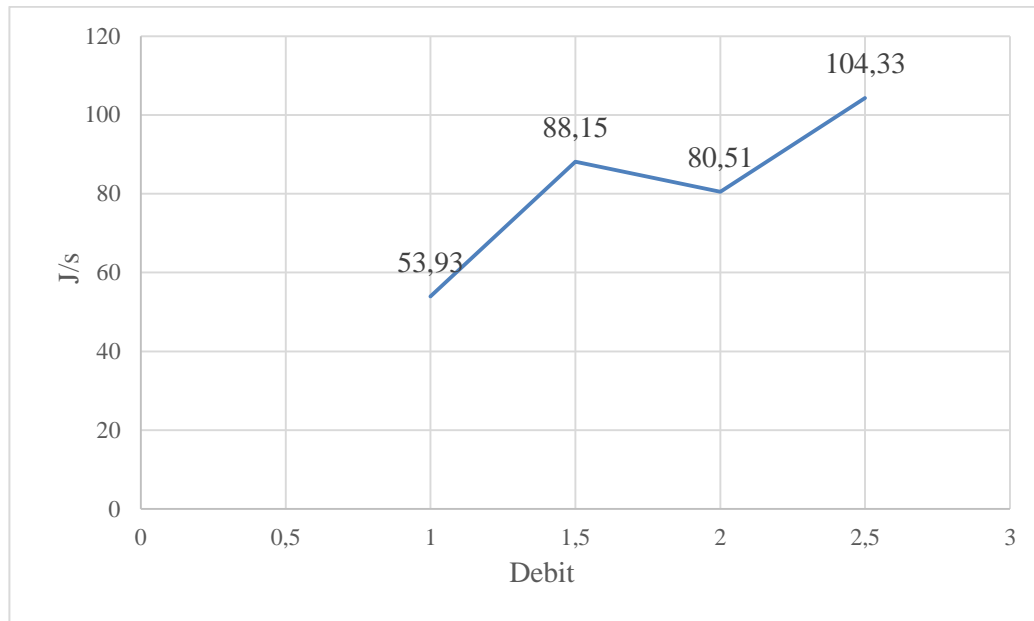
$$\dot{Q} = \frac{Q_{kumulatif}}{t_{total}} \quad (4.2)$$

$$\dot{Q} = \frac{553.681,77}{10265}$$

$$\dot{Q} = 53,93 \text{ J/s}$$

Tabel 4. 6 Laju Pelepasan Kalor *Paraffin Wax*

V	T1 PCM	T2 PCM	ΔT	Δt	Q kum Air	Q kum <i>Paraffin Wax</i>	\dot{Q}
LPM	°C	°C	°C	(detik)	(J)	(J)	(J/s)
1	66,80	27,16	39,64	10265	7.069.918,65	553.681,77	53,93
1.5	67,24	26,05	41,19	6505	7.343.781,23	573.426,53	88,15
2	66,94	28,11	38,83	6835	6.935.957,92	550.331,67	80,51
2.5	66,32	26,51	39,81	5225	7.095.134,33	545.161,54	104,33



Gambar 4. 30. Laju Pelepasan Kalor *Paraffin Wax*

Gambar 4.30 menunjukkan bahwa laju pelepasan kalor pada *paraffin wax* paling rendah yaitu pada variasi 1 LPM yaitu 53,93 J/s. Sedangkan laju pelepasan terbesar pada variasi 2,5 LPM yaitu 104,33 J/s. Variasi 2,5 LPM memiliki laju pelepasan terbesar karena menggunakan debit paling besar sehingga memiliki perubahan suhu yang cepat.

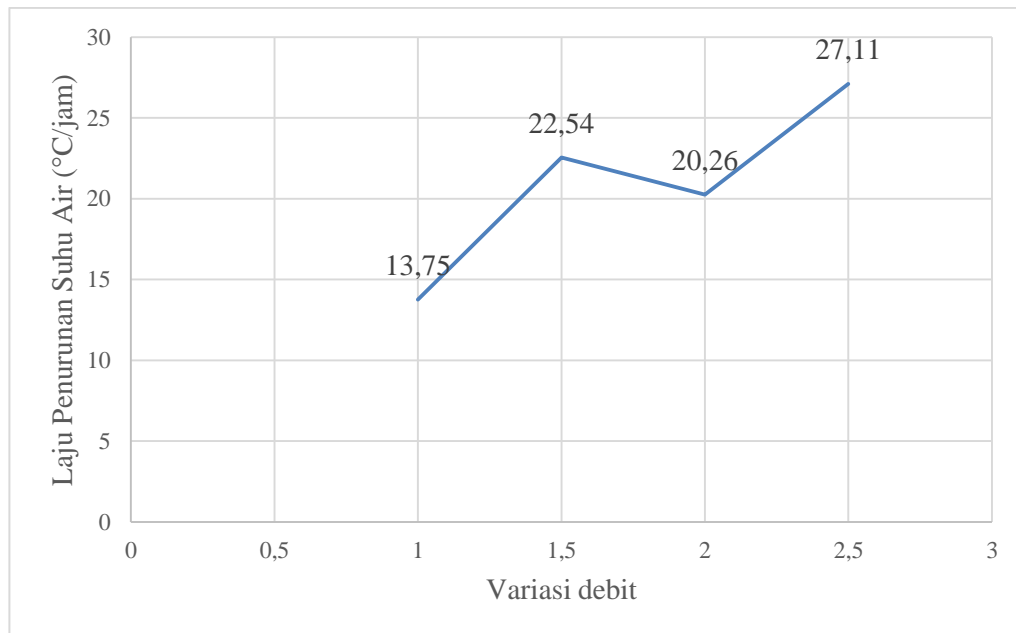
4.5.3. Laju Penurunan Suhu Air

Laju penurunan suhu pada air dapat dicari dengan persamaan 4.3.

$$\begin{aligned}
 \text{Laju Penurunan Suhu} &= \frac{(T_{awal} - T_{akhir}) \times 3600}{t_{total}} & (4.3) \\
 &= \frac{(66,45 - 27,24) \times 3600}{10265} \\
 &= 13,75 \text{ } ^\circ\text{C/jam}
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 7 Laju Penurunan Suhu Air

V	T1 Air	T2 Air	ΔT	Δt	Laju penurunan suhu
LPM	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	(detik)	$(^{\circ}\text{C}/\text{jam})$
1	66,45	27,24	39,21	10265	13,75
1.5	66,98	26,24	40,73	6505	22,54
2	66,63	28,16	38,47	6835	2,26
2.5	65,79	26,43	39,35	5225	27,11



Gambar 4. 31. Laju Penurunan Suhu Air

Gambar 4.31 diatas menunjukkan bahwa laju penurunan suhu air paling rendah 13,75 $^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ yaitu pada variasi 1 LPM karena memiliki waktu yang paling lama 2 jam 51 menit diantara variasi lainnya. Sedangkan laju penurunan suhu air terbesar 27,11 $^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ pada variasi 2,5 LPM karena memiliki waktu yang tercepat saat pengujian. Variasi 2 LPM memiliki waktu yang tercepat karena suhu mulai proses *discharging* 65 $^{\circ}\text{C}$ yang membuat proses penurunan lebih cepat dari variasi yang suhu awalnya 66 $^{\circ}\text{C}$. Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 1 jam 27 menit

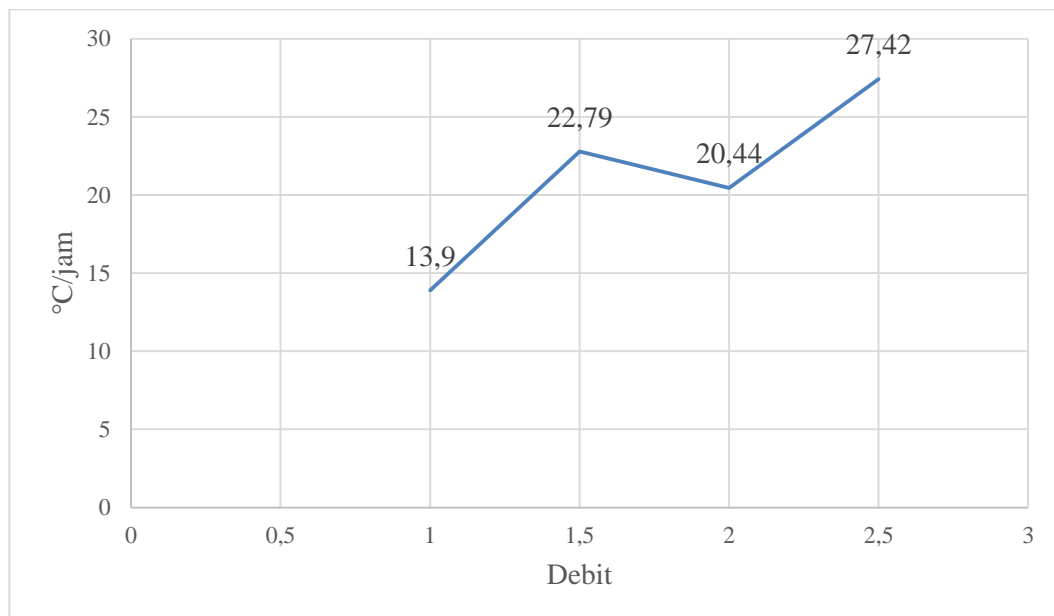
4.5.3 Laju Penurunan Suhu *Paraffin Wax*

Laju penurunan suhu pada air dapat dicari dengan persamaan 4.3.

$$\begin{aligned} \text{Laju Penurunan Suhu} &= \frac{(T_{awal} - T_{akhir}) \times 3600}{t_{total}} & (4.3) \\ &= \frac{(66,80 - 27,16) \times 3600}{10265} \\ &= 13,90 \text{ } ^\circ\text{C/jam} \end{aligned}$$

Tabel 4. 8 Laju Penurunan Suhu *Paraffin Wax*

V	T1 PcM	T2 PCM	ΔT	Δt	Laju penurunan suhu
LPM	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	(detik)	($^\circ\text{C/jam}$)
1	66,80	27,16	39,64	10265	13,9
1.5	67,24	26,05	41,19	6505	22,79
2	66,94	28,11	38,83	6835	20,44
2.5	66,32	26,51	39,81	5225	27,42



Gambar 4. 32. Laju Penurunan Suhu *Paraffin Wax*

Gambar 4.32 diatas menunjukkan bahwa laju penurunan suhu *paraffin wax* paling rendah 13,90 C/jam yaitu pada variasi 1 LPM karena memiliki waktu yang paling lama 2 jam 51 menit diantara variasi lainnya. Sedangkan laju penurunan suhu air terbesar 27,42 °C/jam pada variasi 2,5 LPM karena memiliki waktu yang tercepat saat pengujian. Variasi 2,5 LPM memiliki waktu yang tercepat karena suhu mulai proses *discharging* 65°C yang membuat proses penurunan lebih cepat dari variasi yang suhu awalnya 66°C. Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 1 jam 27 menit.