

BAB IV

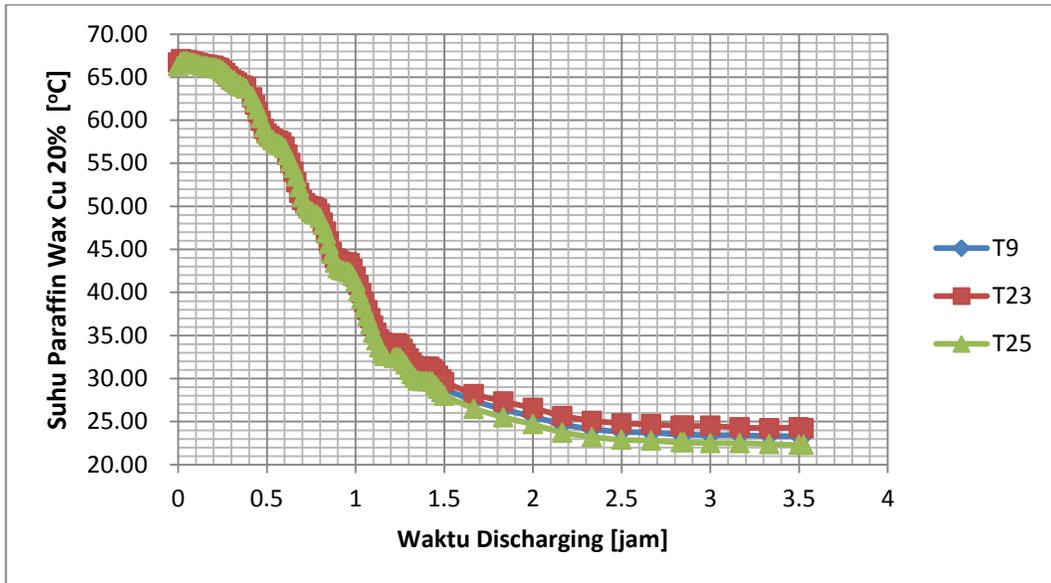
HASIL DAN PEMBAHASAN

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 dengan posisi Gambar 3.16 dan dilakukan dengan variasi laju aliran 1 LPM, 1.5 LPM, 2 LPM, dan 2.5 LPM pada proses *discharging* bertahap. Proses pengambilan data menggunakan *discharging* bertahap atau setiap lima menit aliran air dihidupkan dan lima menit dimatikan seterusnya sampai 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 3,5 jam.

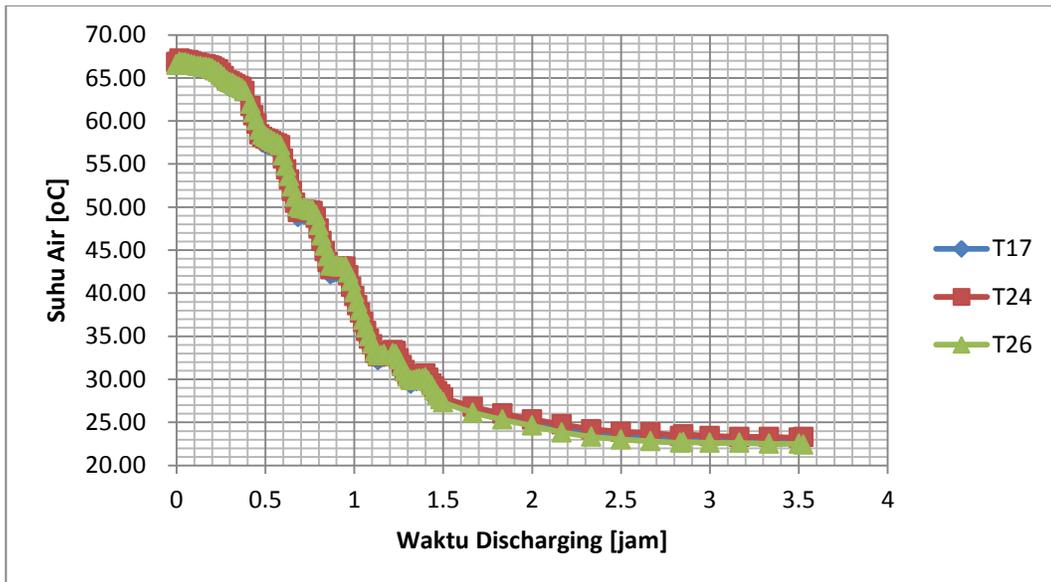
4.1.1. Penurunan Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Aksial

Hasil setelah pengujian pada variasi 1 LPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu penurunan suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan penurunan suhu pada air. Grafik penurunan suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.1 sedangkan grafik penurunan suhu air dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.1 Penurunan Temperatur PCM Arah Aksial Paraffin Wax Cu 20%

Grafik menunjukkan bahwa suhu ketiga termokopel mengalami penurunan pada 0,5 jam paraffin wax Cu 20%. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalor dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan.

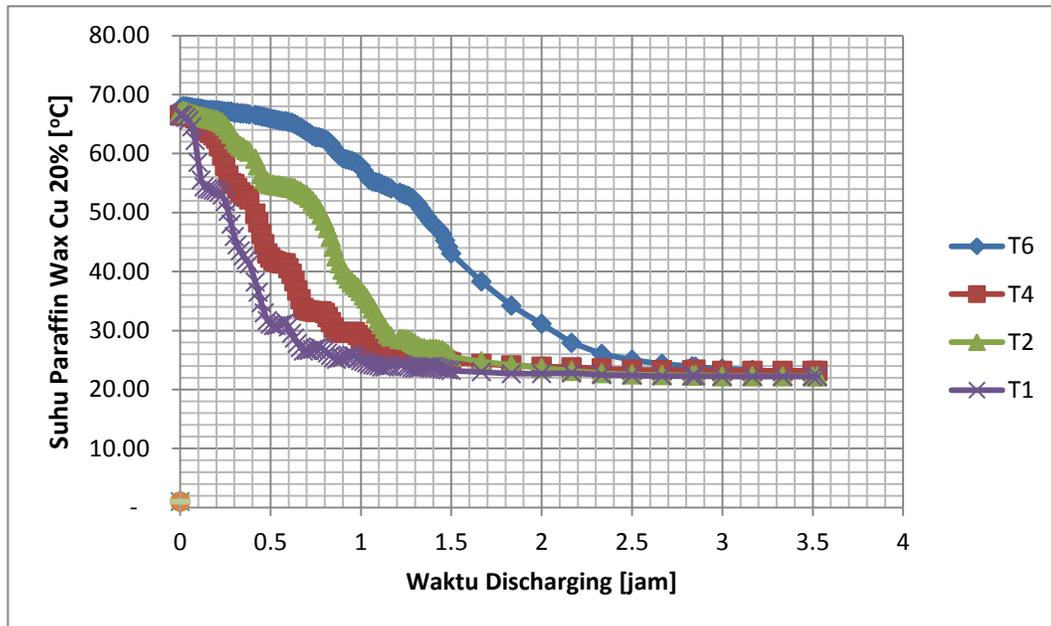


Gambar 4.2 Penurunan Temperatur PCM Arah Aksial Air

Grafik aksial air cenderung terdapat kenaikan suhu daripada grafik aksial *paraffin wax Cu 20%*. Naik turun grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging* bertahap saat air kran dimatikan dan dihidupkan. Naiknya suhu terjadi karena kran air ditutup sehingga air menyerap panas dari PCM. Setelah kran air ditutup maka air menyerap panas dari PCM sehingga saat kran dibuka suhu rata-rata mengalami kenaikan 1-2°C pada waktu 0,5-1,4 jam dan setelah waktu 1,5-3,5 jam suhu dalam tangki konstan pada 23°C mengikuti suhu dari air kran.

Suhu pada ketiga termokopel dari 0-1,5 jam mengalami grafik naik turun karena terjadi pelepasan kalor dan setelah dari 1,5 jam suhu dalam pipa cenderung lebih stabil tidak mengalami kenaikan karena *paraffin wax Cu 20%* berat sudah berubah fasa menjadi solid sempurna. Suhu pada ketiga termokopel dari 0-1,5 jam tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil sehingga turbulen aliran air pun kecil. Maka dari itu semakin besar debit yang dipakai maka turbulen aliran air pun semakin besar dan membuat ketiga termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar.

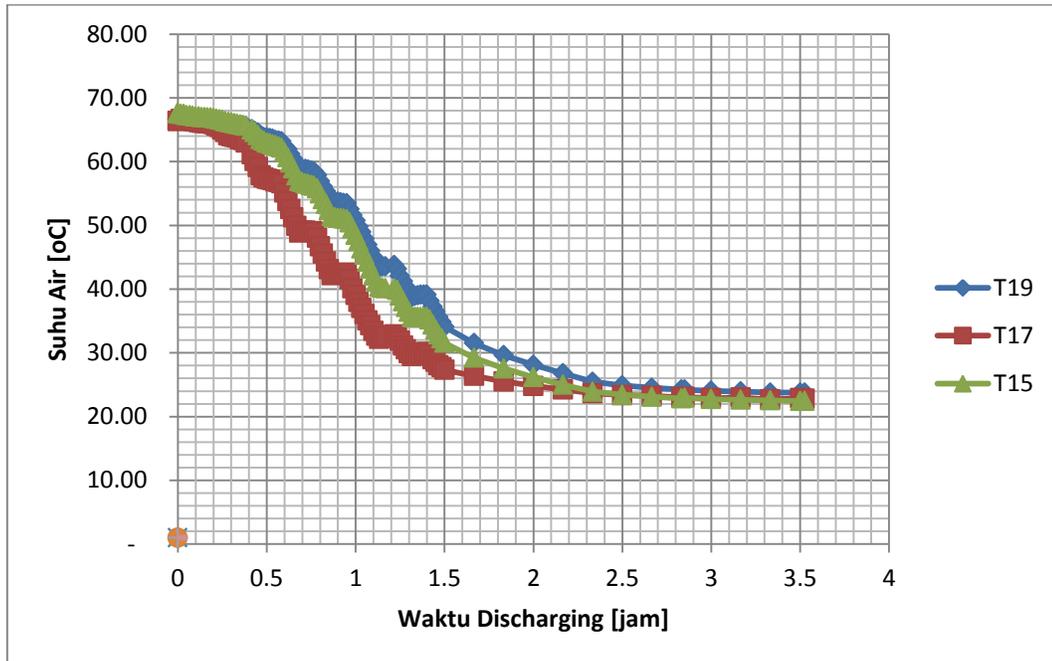
4.1.2. Penurunan suhu campuran PW 20% Cu dalam arah vertikal



Hasil setelah pengujian pada variasi 1 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu penurunan suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan penurunan suhu pada air. Grafik penurunan suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.3 sedangkan grafik penurunan suhu air dilihat pada gambar 4.4.

Gambar 4.3 Penurunan Temperatur PCM Arah Vertikal Paraffin Wax Cu 20%

Suhu pada T1 saat pengambilan data mengalami penurunan yang signifikan dan suhu dari T1 paling rendah dari tiga termokopel lainnya. Rendahnya suhu T1 diakibatkan posisi kapsul tembaga yang berada pada paling dekat dengan input air ke tangki TES. Sedangkan suhu dari T6 relatif konstan karena letak kapsul tembaga paling jauh dari input air kran. Penurunan suhu T6 pada 0-1 jam berkisar 11 °C, suhu T4 berkisar 40 °C, suhu T2 berkisar 32 °C, dan suhu T1 pada berkisar 38 °C. Sehingga pelepasan kalor yang paling cepat terjadi pada T1.

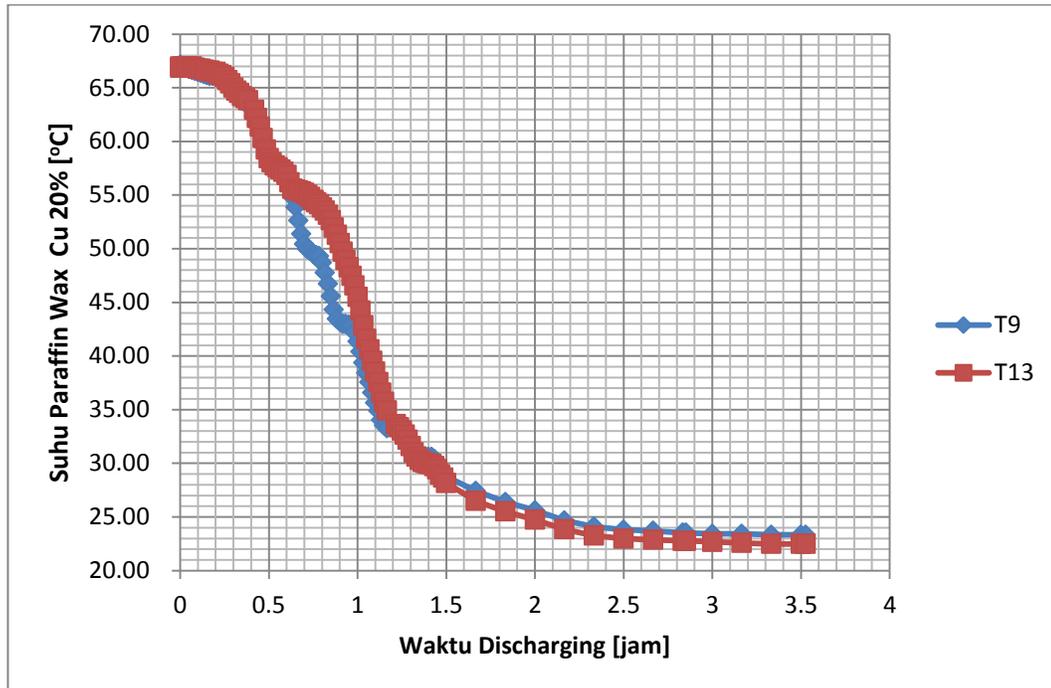


Gambar 4.4 Penurunan Temperatur PCM Arah Vertikal Air

Suhu pada T17 ketika pengambilan data mengalami penurunan suhu lebih cepat dibandingkan T15 dan T19. Karena T17 dipengaruhi oleh letak termokopel, letak T17 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 0-1 jam berkisar 14°C, suhu T17 berkisar 25°C, dan suhu T15 pada 0-1 jam berkisar 39°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T17.

4.1.3. Penurunan Suhu Campuran PW+20% Cu dalam Arah Horisontal

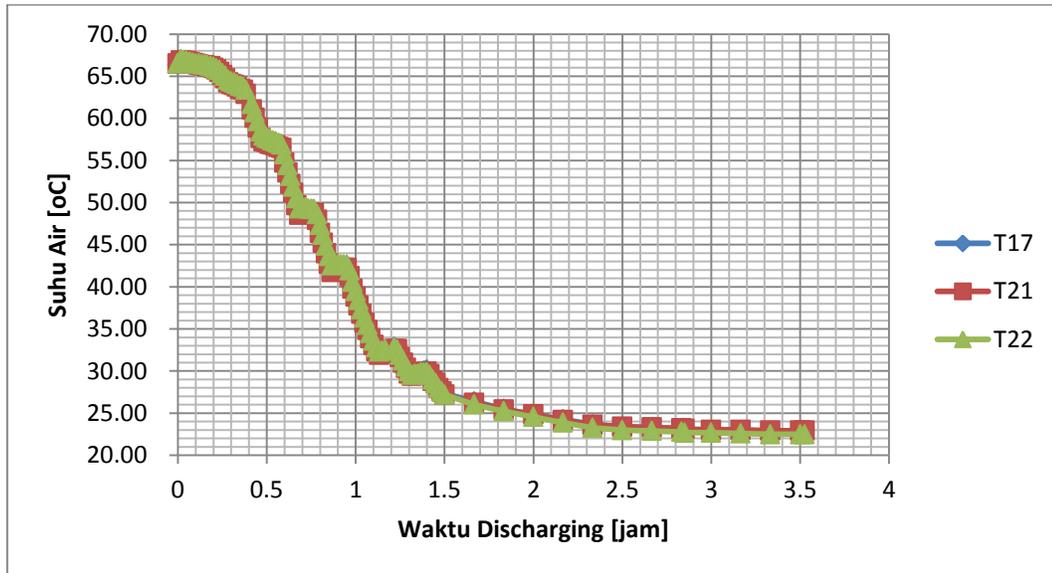
Hasil setelah pengujian pada variasi 1 LPM arah horisontal terdapat dua grafik yaitu penurunan suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan penurunan suhu pada air. Grafik penurunan suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.5 sedangkan grafik penurunan suhu air dilihat pada gambar 4.6.



Gambar 4.5 Penurunan Temperatur PCM Arah Horisontal Paraffin Wax Cu 20%

Suhu pada kedua termokopel dari 0-0,6 jam tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu kurang lebih mencapai 1 °C. Maka dari itu, semakin besar debit yang dipakai maka membuat kedua termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar. Pada waktu 0,6-1,2 jam suhu T13 lebih tinggi dari T9 yang mengalami penurunan suhu yang cukup drastis. 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.

Grafik menunjukkan bahwa suhu pada kedua termokopel tidak mengalami kenaikan namun pada 0,6-1,2 jam T9 mengalami penurunan yang cukup signifikan. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalo dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan tetapi suhu HTF mengalami kenaikan saat air kran dihentikan.



Gambar 4.6 Penurunan Temperatur PCM Arah Horisontal Air

Grafik tersebut menunjukkan bahwa cenderung terdapat kenaikan suhu daripada grafik horisontal *paraffin wax Cu 20%*. Hal itu dipengarungi oleh proses *discharging* bertahap (per 5 menit) saat air kran dimatikan dan dihidupkan. Naiknya suhu terjadi karena kran air ditutup sehingga air menyerap panas dari PCM. Kenaikan suhu terjadi dari 0,4-1,5 jam dan selanjutnya ketiga termokopel mengalami penurunan suhu stabil hingga selesai pengujian.

Suhu ketiga termokopel tidak mengalami perbedaan yang signifikan karena penggunaan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu kurang lebih 1-2°C. Oleh sebab itu, semakin besar debit yang dipakai maka membuat ketiga termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar pula.

4.1.4. Grafik Energi Kumulatif

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

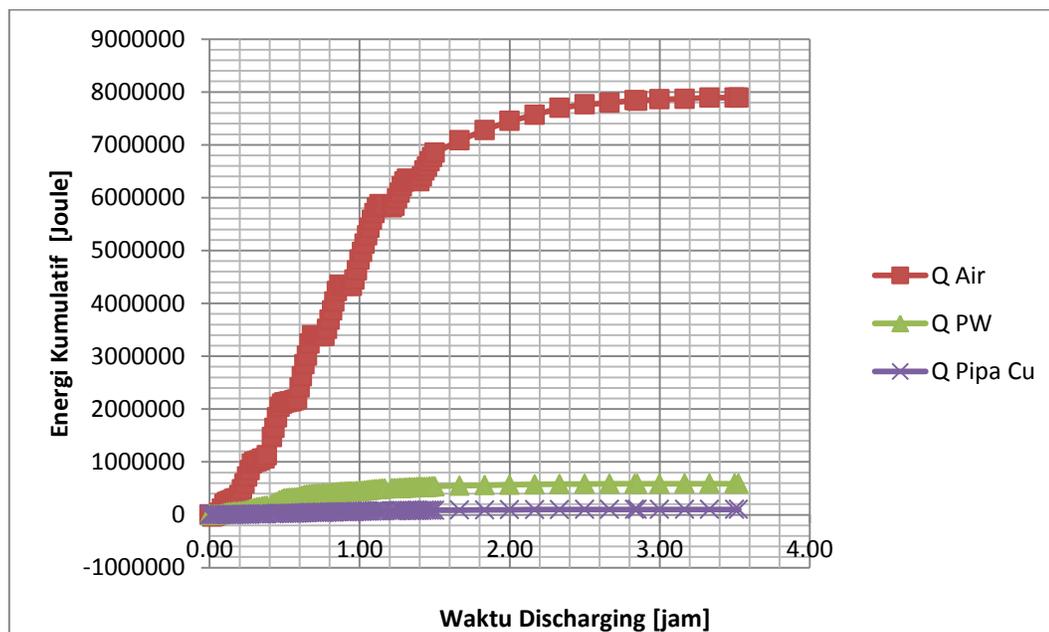
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43.13 \times 4180 \times (66.67 - 22.89)$$

$$Q_{kum} = 7.893.898 \text{ J}$$

Tabel 4.1 Energi Kumulatif 1 LPM

Bahan	Cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg.K)]					
Air	4180	43.13	66.67	22.89	43.78	7.893.898
Pipa Cu	390	5.91	66.85	22.63	44.22	101.864,94
PW+20%Cu	1678	9.89	66.99	22.81	44.18	1.565.130,50



Gambar 4.7 Grafik Energi Komulatif

Grafik pada Q pipa Cu lebih rendah dari air dan *paraffin wax Cu* karena nilai Cp yang rendah sekitar 390 J/kg.K, sedangkan nilai Cp air 4180 J/kg.K dan Cp *Paraffin Wax Cu 20 %* 1678 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax Cu 20%* mengalami kenaikan

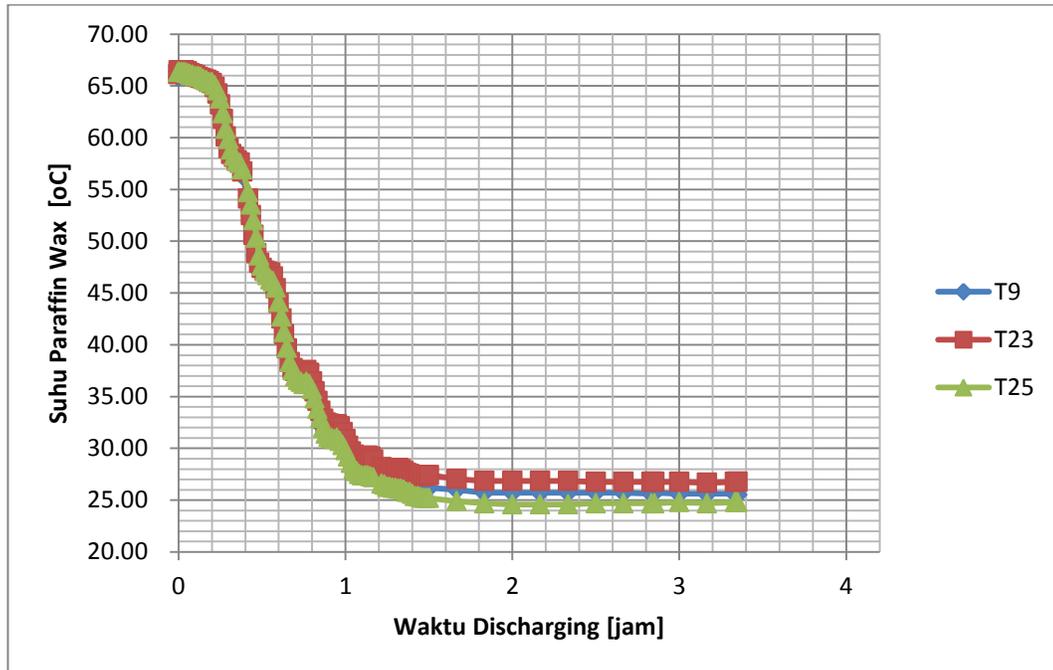
signifikan pada 0-0,4 jam sebanyak 5-10 kJ, setelah 0,4 jam laju kenaikan hanya sebesar 2-3 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa *Cu* mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 0.2-0.4 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-1,6 jam sebesar 80-90 kJ, setelah 1,6 jam mengalami kenaikan suhu yang relatif 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 dengan posisi Gambar 3.16 dan dilakukan dengan variasi laju aliran 1 LPM, 1.5 LPM, 2 LPM, dan 2.5 LPM pada proses *discharging* bertahap. Proses pengambilan data menggunakan *discharging* bertahap atau setiap lima menit aliran air dihidupkan dan lima menit dimatikan seterusnya sampai suhu pada T32 mencapai 35°C. Laju pelepasan temperature dengan variasi 1,5 LPM relatif lebih cepat dibandingkan dengan variasi 1 LPM. Proses pengambilan data dengan variasi 1,5 LPM mencapai 3,4 jam.

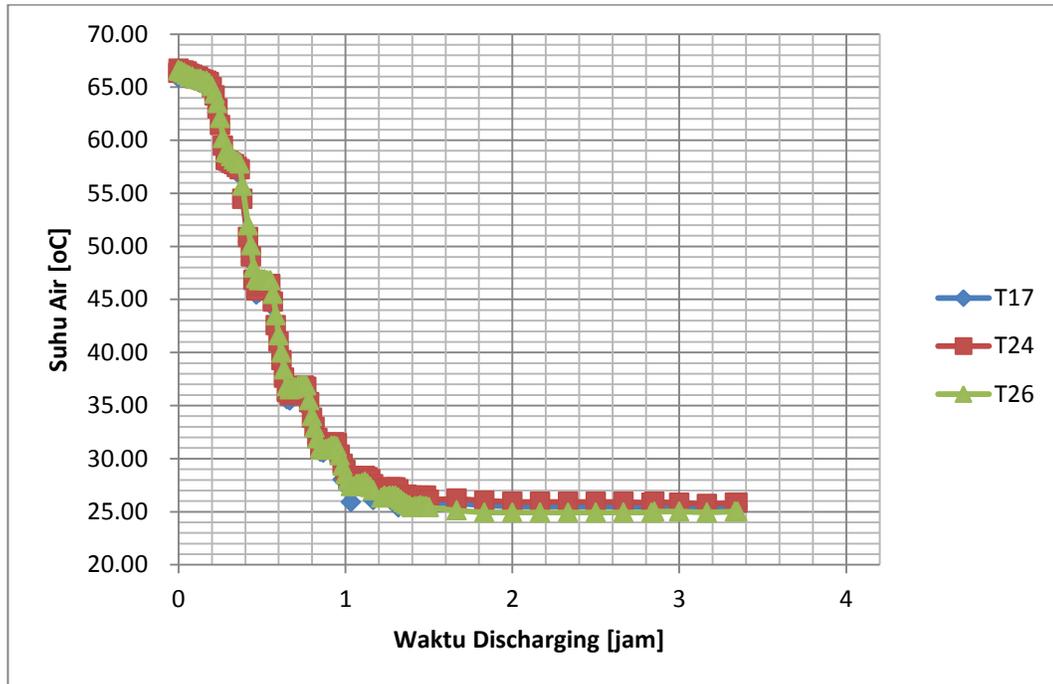
4.2.1 Penurunan Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Aksial

Hasil setelah pengujian pada variasi 1,5 LPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu penurunan suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan penurunan suhu pada air. Grafik penurunan suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.8 sedangkan grafik penurunan suhu air dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.8 Penurunan Temperatur PCM Arah Aksial Paraffin Wax Cu 20%

Grafik menunjukkan bahwa suhu ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan namun pada 0,6-0,8 jam dan 0,8-1,0 jam *paraffin wax Cu 20%* sempat menahan suhu sekitar 37°C dan 33°C. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalo dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan, tetapi suhu HTF mengalami kenaikan saat air kran ditutup. Setelah 1 jam pengujian ketiga termokopel mengalami penurunan secara stabil.



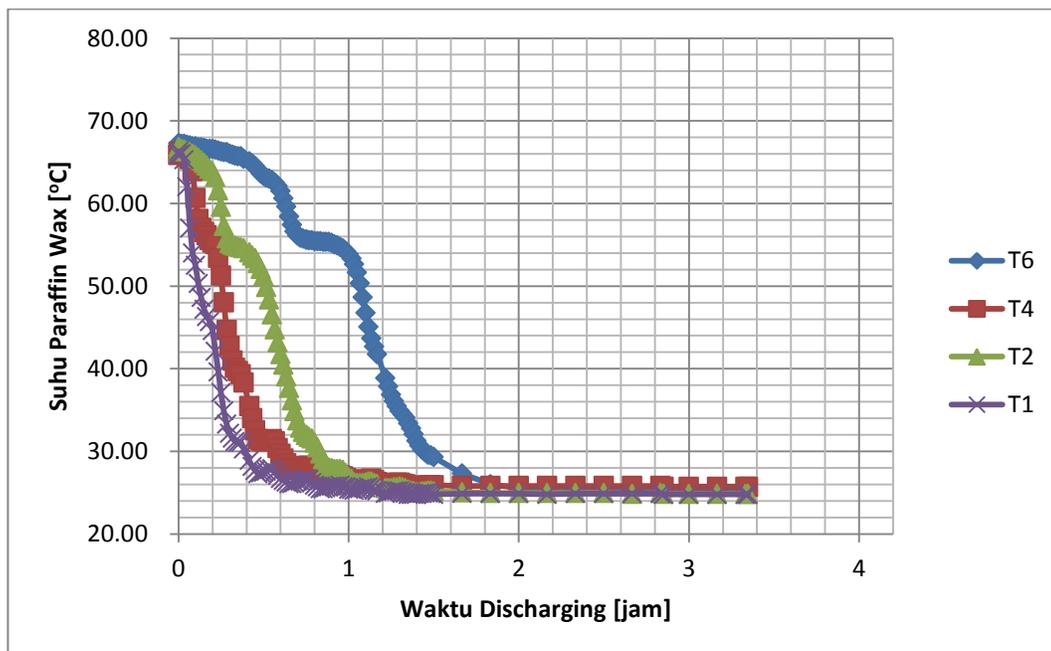
Gambar 4.9 Penurunan Temperatur PCM Arah Aksial Air

Grafik aksial air *paraffin wax Cu 20%* cenderung terdapat kenaikan suhu. Hal itu dipengarungi oleh proses *discharging* bertahap saat air kran dimatikan dan dihidupkan selang waktu 5 menit sekali. Kenaikan suhu terjadi karena kran air ditutup sehingga air menyerap panas dari PCM. Setelah kran air ditutup maka air menyerap panas dari PCM sehingga saat kran dibuka suhu rata-rata mengalami kenaikan 1-3 °C pada waktu 0,4-1,3 jam dan setelah waktu 1,3-3,4 jam suhu dalam tangki konstan pada 26 °C mengikuti suhu input air.

Suhu ketiga termokopel mengalami naik turun pada 0-1,3 jam karena terjadi pelepasan kalor tetapi setelah dari 1,3 jam suhu dalam pipa cenderung turun dengan stabil tidak mengalami kenaikan. Suhu ketiga termokopel tidak mengalami perbedaan signifikan akibat penggunaan debit air 1,5 LPM sehingga turbulen aliran air kecil. Jadi, penggunaan debit air yang dipakai sangat menentukan turbulen aliran air untuk mengontrol perbedaan suhu ketiga termokopel.

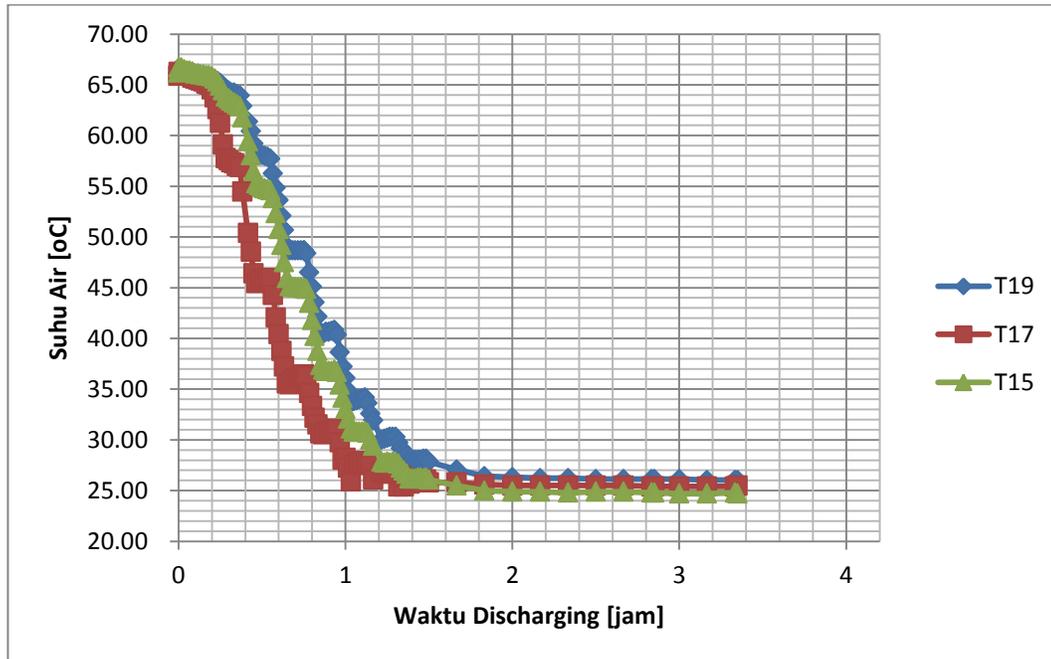
4.2.2 Penurunan Temperatur PCM Arah Vertikal

Hasil setelah pengujian pada variasi 1,5 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu penurunan suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan penurunan suhu pada air. Grafik penurunan suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.10 sedangkan grafik penurunan suhu air dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.10 Penurunan Temperatur PCM Arah Vertikal Paraffin Wax Cu 20%

Suhu T1 mengalami penurunan drastis dan menjadi yang terendah dari ketiga termokopel lainnya. Hal itu dipengaruhi oleh letak pipa tembaga, letak pipa tembaga berada pada paling dekat dengan input air kran masuk ke tangki TES. Berbanding terbalik dengan T6 yang memiliki suhu relatif konstan karena letak pipa tembaga yang paling jauh dari input air. Penurunan suhu T6 pada 0-0,8 jam berkisar 13°C, suhu T4 berkisar 30°C, suhu T2 berkisar 29°C, dan suhu T1 pada 0-8 jam berkisar 35°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat terjadi pada T1 selama 0,8 jam.

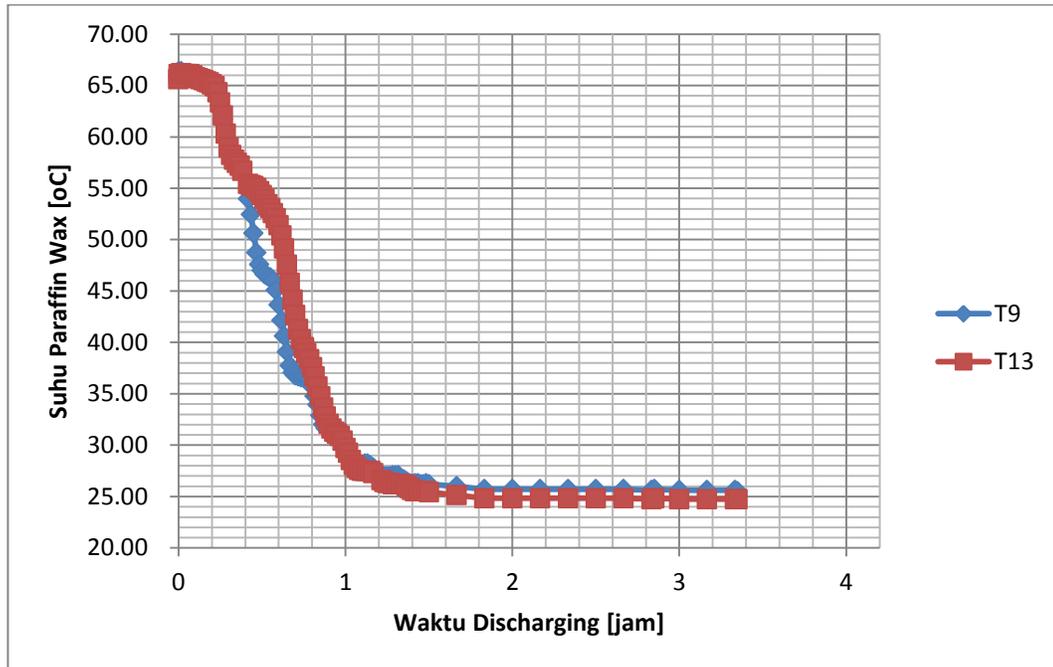


Gambar 4.11 Penurunan Temperatur PCM Arah Vertikal Air

Suhu pada T17 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. Rendahnya T17 dipengaruhi oleh letak termokopel, letak T17 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 0-1 jam berkisar 30°C, suhu T17 berkisar 44°C, dan suhu T15 pada 0-1 jam berkisar 35°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T17.

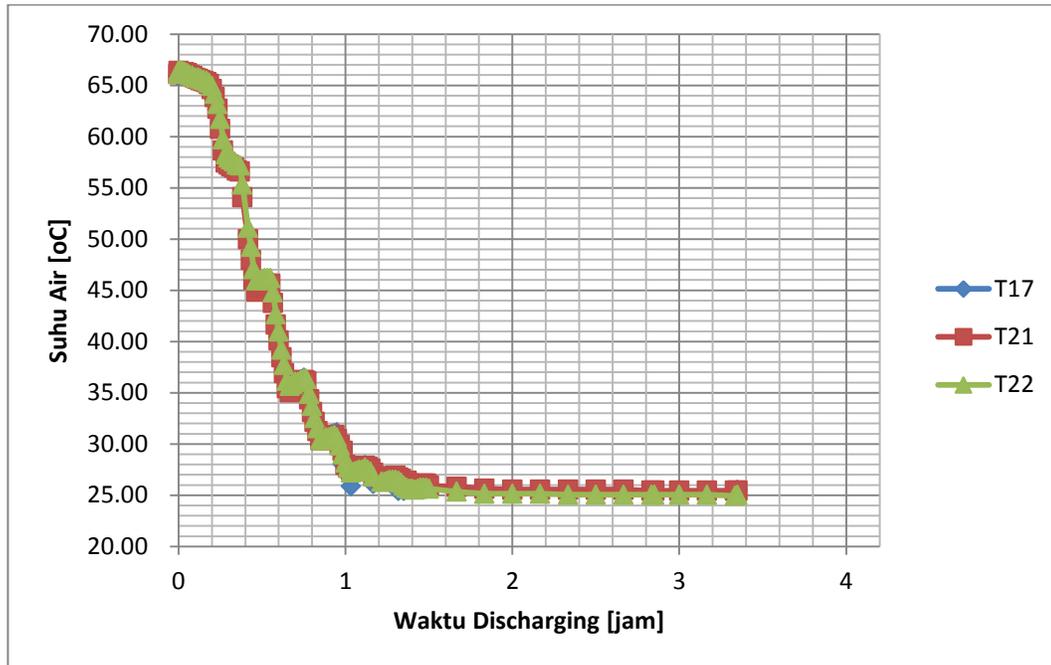
4.2.3 Penurunan Temperatur PCM Arah Horisontal

Hasil setelah pengujian pada variasi 1,5 LPM arah horisontal terdapat dua grafik yaitu penurunan suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan penurunan suhu pada air. Grafik penurunan suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.12 sedangkan grafik penurunan suhu air dilihat pada gambar 4.13.



Gambar 4.12 Penurunan Temperatur PCM Arah Horizontal Paraffin Wax Cu 20%

Suhu kedua termokopel dari 0-0,4 jam tidak mengalami perbedaan signifikan karena penggunaan debit air yang kecil dengan selisih suhu yang tidak mencapai 1 °C. Oleh karena itu, makin besar debit makin besar pula perbedaan suhu kedua termokopel. Pada waktu 0-0,8 jam suhu T13 lebih tinggi dari T9 namun dari 1,1-3,4 jam T9 lebih tinggi dari T13. Suhu T9 pada awal pengambilan data lebih rendah dari T13 karena letak pipa tembaga T9 berada di atas *output* air, sehingga saat kran input air dibuka T9 dahulu mengenai air dari T13 yang berada disamping T9.



Gambar 4.13 Penurunan Temperatur PCM Arah Horisontal Air

Grafik horisontal air cenderung terdapat kenaikan suhu daripada grafik horisontal *paraffin wax Cu 20%*. Hal itu dipengarungi oleh proses *discharging* bertahap saat air kran dimatikan dan dihidupkan. Kenaikan suhu terjadi karena kran air di stop sehingga air menyerap kalor dari PCM. Suhu ketiga termokopel pada 0,4-0,5 jam terjadi penurunan drastis sekitar 11 °C. Kenaikan suhu terjadi dari 0,4-1 jam selanjutnya ketiga termokopel mengalami penurunan suhu stabil hingga selesai pengujian.

Suhu ketiga termokopel rata-rata tidak mengalami perbedaan signifikan karena penggunaan debit air kecil dan selisih suhu kurang lebih mendekati 4 °C. Jadi, semakin besar debit maka ketiga termokopel akan mengalami perbedaan suhu yang besar.

4.2.4 Grafik Energi Kumulatif

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses *discharging* dari awal penelitian hingga selesai dan didapatkan dengan menggunakan persamaan 4.2.

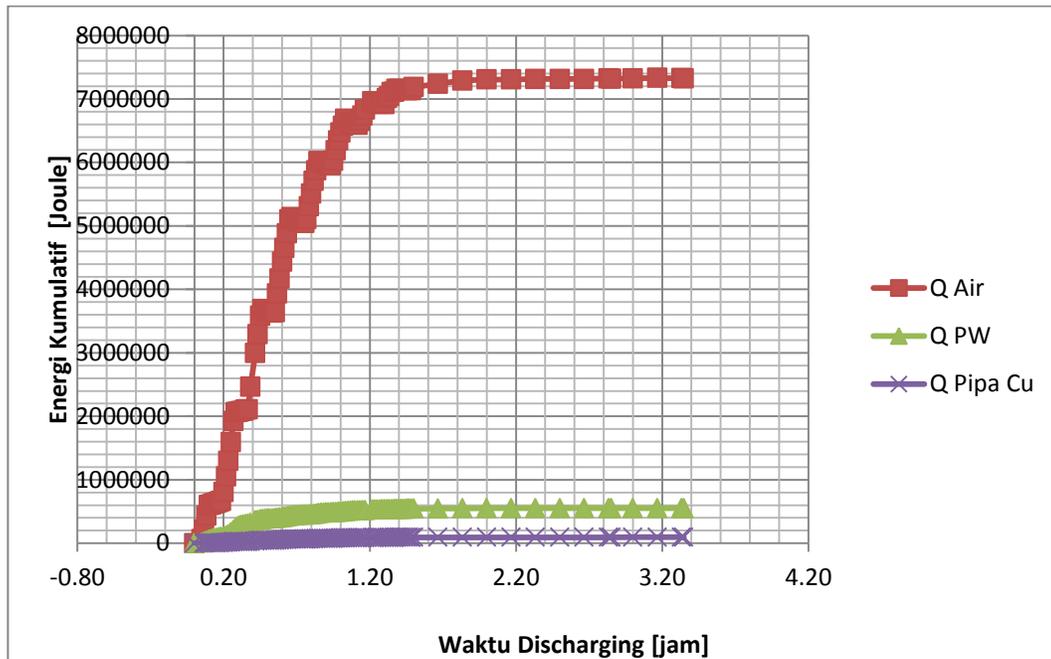
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.2)$$

$$Q_{kum} = 43.13 \times 4180 \times (65.99 - 25.37)$$

$$Q_{kum} = 7.323.463 \text{ J}$$

Tabel 4.2 Energi Kumulatif 1,5 LPM

Bahan	cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg.K)]					
Air	4180	43.13	65.99	25.37	40.63	7.323.463
Pipa Cu	390	5.91	65.96	25.10	40.86	94.133
PW+20%Cu	1678	9.89	66.22	25.22	41.0	551.559



Gambar 4.14 Grafik Energi Komulatif

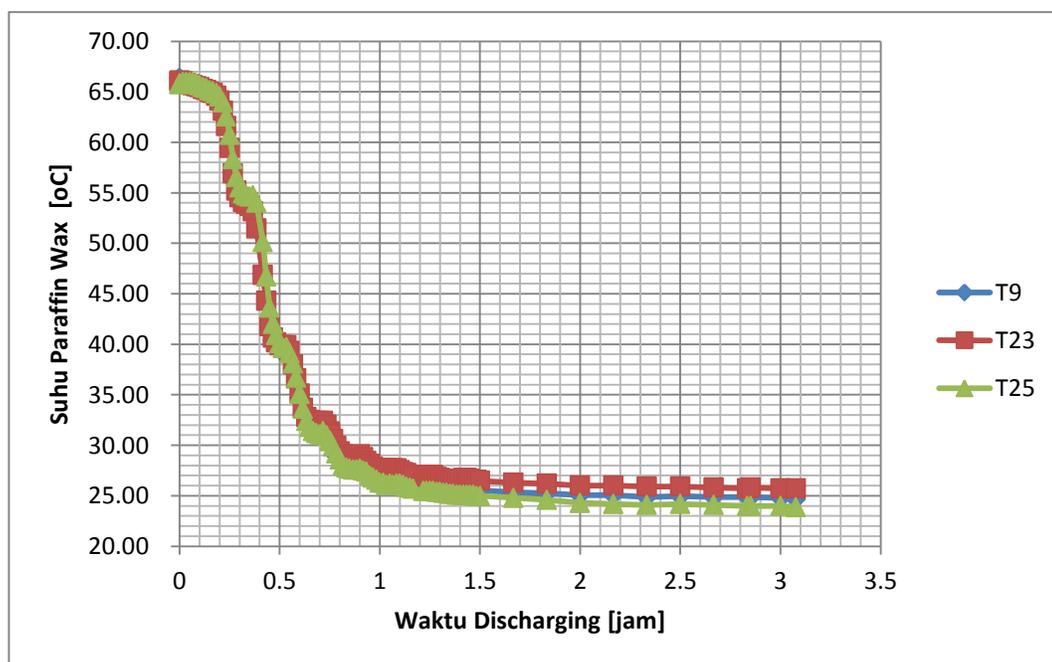
Grafik pada Q pipa Cu lebih rendah dari air dan *paraffin wax Cu* disebabkan nilai Cp yang rendah yaitu 390 J/kg.K, sedangkan nilai Cp air 4180 J/kg.K dan Cp *Paraffin Wax Cu 20 %* 1678 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax Cu 20%* mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,3 jam sebanyak 7-9 kJ, setelah 0,3 jam laju kenaikan hanya sebesar 3-6 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa Cu mengalami kenaikan relatif

stabil sebesar 0,3-0,8 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-1,4 jam sebesar 60-110 kJ, setelah 1,4 jam kenaikan relatif lebih stabil.

4.3. Laju Penurunan suhu pada Variasi 2 LPM

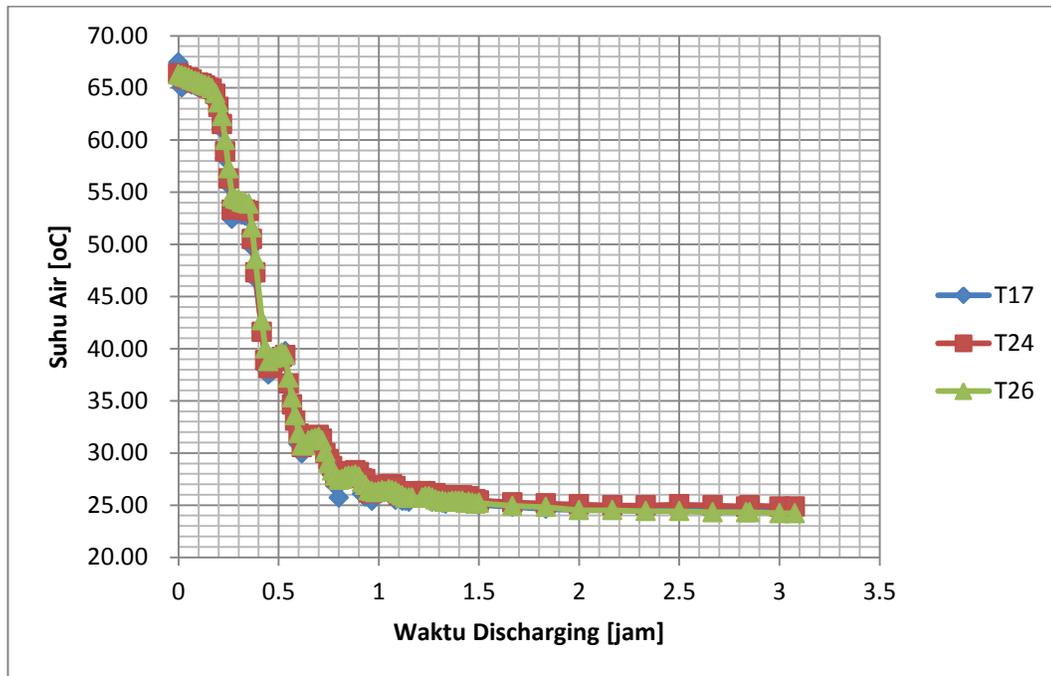
Penelitian laju penurunan suhu yang terjadi dari PCM ke HTF perlu dilakukan pengamatan pelepasan temperatur PCM arah aksial, arah vertikal, dan arah horisontal yang ada di dalam tangki TES. Hasil pengamatan yang dilihat dari 26 titik termokopel yang tersebar dengan posisi Gambar 3.16 dan dilakukan dengan variasi laju aliran 1 LPM, 1.5 LPM, 2 LPM, dan 2.5 LPM pada proses *discharging* bertahap. Proses pengambilan data menggunakan *discharging* bertahap atau setiap lima menit aliran air dihidupkan dan lima menit dimatikan seterusnya sampai suhu pada T32 mencapai 35°C. Laju pelepasan kalor pada 2 LPM relatif paling cepat daripada variasi lainnya karena suhu mulai proses *discharging* dibawah 63°C yang membuat proses penurunan lebih cepat dari variasi yang suhu awalnya 69°C. Pengambilan data pada variasi 2 LPM mencapai 3,2 jam.

4.3.1 Penurunan Temperatur PCM Arah Aksial



Gambar 4.15 Penurunan Temperatur PCM Arah Aksial Paraffin Wax Cu 20%

Grafik menunjukkan bahwa suhu pada ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan namun pada 0,3-0,4 jam *paraffin wax Cu 20%* sempat menahan suhu sekitar 54°C. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalo dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan tetapi suhu HTF mengalami kenaikan saat air kran ditutup. Setelah 0,4 jam pengujian ketiga termokopel mengalami penurunan relatif stabil karena fasa lilin berubah solid ketika suhu mencapai 52,86°C.



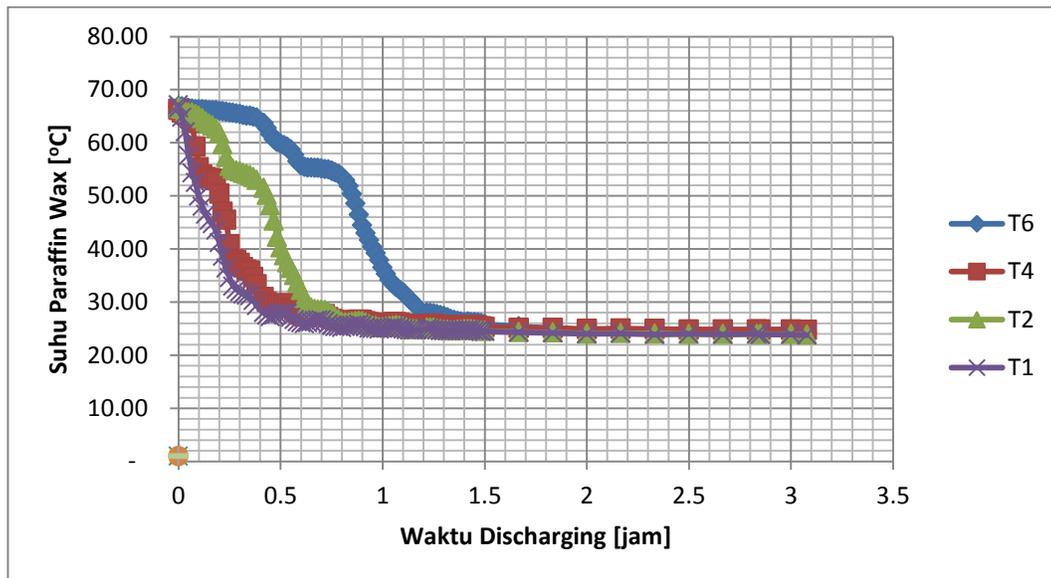
Gambar 4.16 Penurunan Temperatur PCM Arah Aksial Air

Grafik aksial air cenderung terdapat kenaikan suhu daripada grafik aksial *paraffin wax Cu 20%*. Naik turun grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging* bertahap saat air kran dimatikan dan dihidupkan. Naiknya suhu terjadi karena kran air ditutup sehingga air menyerap panas dari PCM. Setelah kran air ditutup maka air menyerap panas dari PCM sehingga saat kran dibuka suhu rata-rata mengalami kenaikan 1-3 °C pada waktu 0,3-1,1 jam dan setelah waktu 1,1-3,2 jam suhu dalam tangki konstan pada 25 °C mengikuti suhu dari air kran.

Suhu pada ketiga termokopel dari 0-1,1 jam mengalami grafik naik turun karena terjadi pelepasan kalor dan setelah dari 1,1 jam suhu dalam pipa cenderung lebih stabil. Suhu pada ketiga termokopel dari 0-3,2 jam tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil sehingga turbulen aliran air pun kecil. Jadi, semakin besar debit yang dipakai maka turbulen aliran air pun semakin besar dan membuat ketiga termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar.

4.3.2 Penurunan Temperatur PCM Arah Vertikal

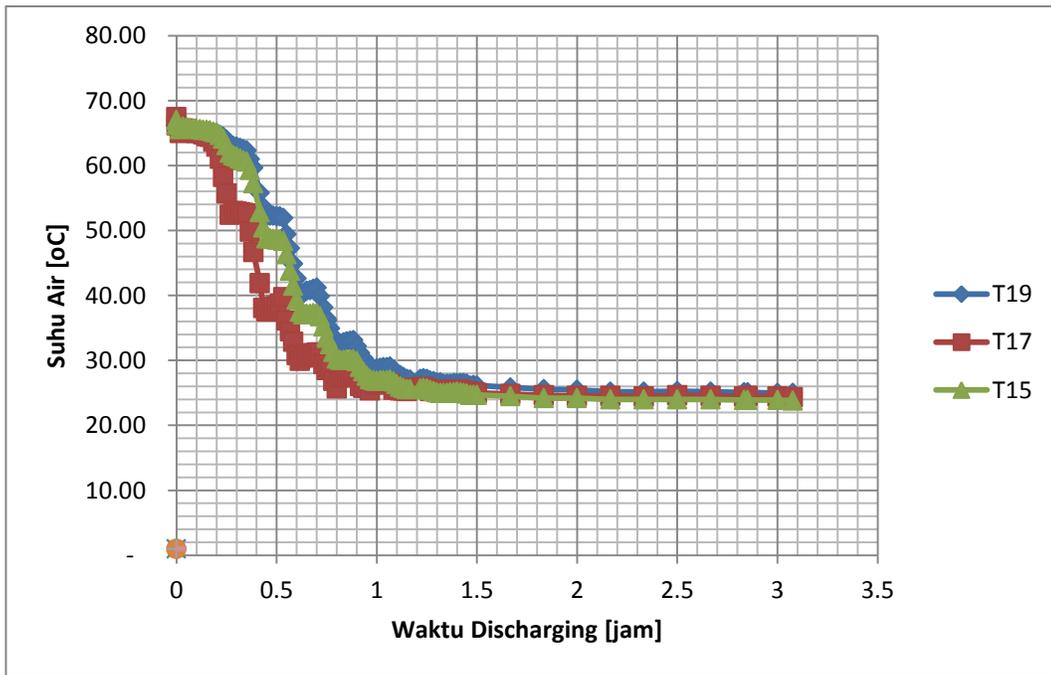
Hasil setelah pengujian pada variasi 2 LPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu penurunan suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan penurunan suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.15 sedangkan grafik penurunan suhu air dilihat pada gambar 4.16.



Gambar 4.17 Penurunan Temperatur PCM Arah Vertikal Paraffin Wax Cu 20%

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 0-1 jam berkisar 33 °C, suhu T4 berkisar 41 °C, suhu T2 berkisar 42 °C, dan suhu T1 pada 0-1 jam berkisar 43 °C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T1 selama satu jam.

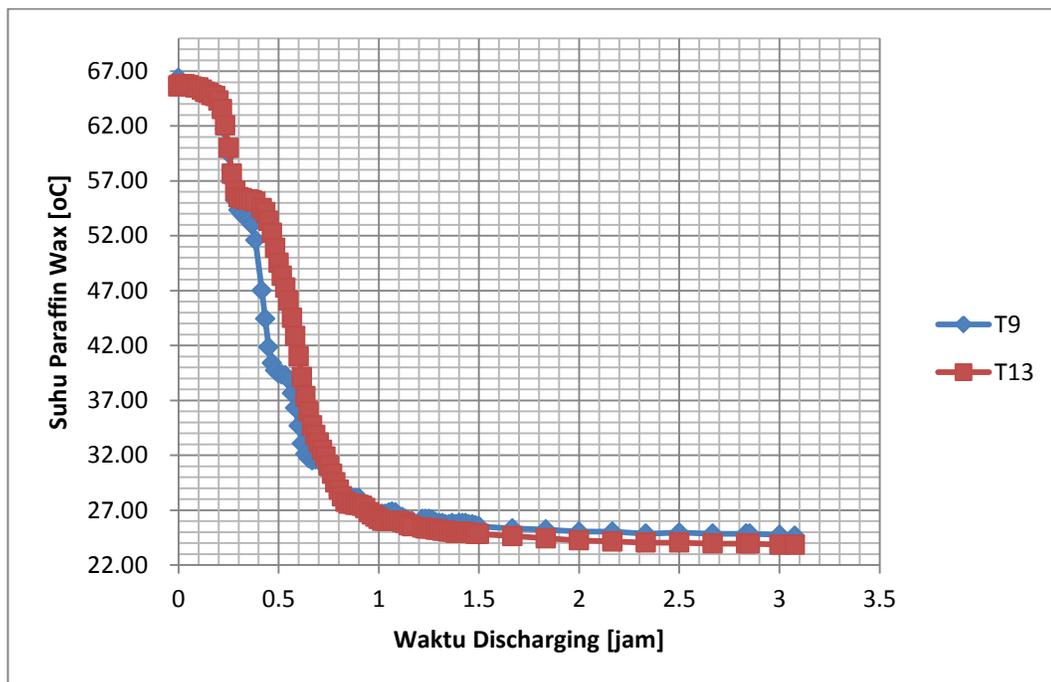


Gambar 4.18 Penurunan Temperatur PCM Arah Vertikal Air

Suhu pada T17 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. 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 0-1 jam berkisar 31 °C, suhu T17 berkisar 35 °C, dan suhu T15 pada 0-1 jam berkisar 36 °C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T15.

4.3.3 Penurunan Temperatur PCM Arah Horisontal

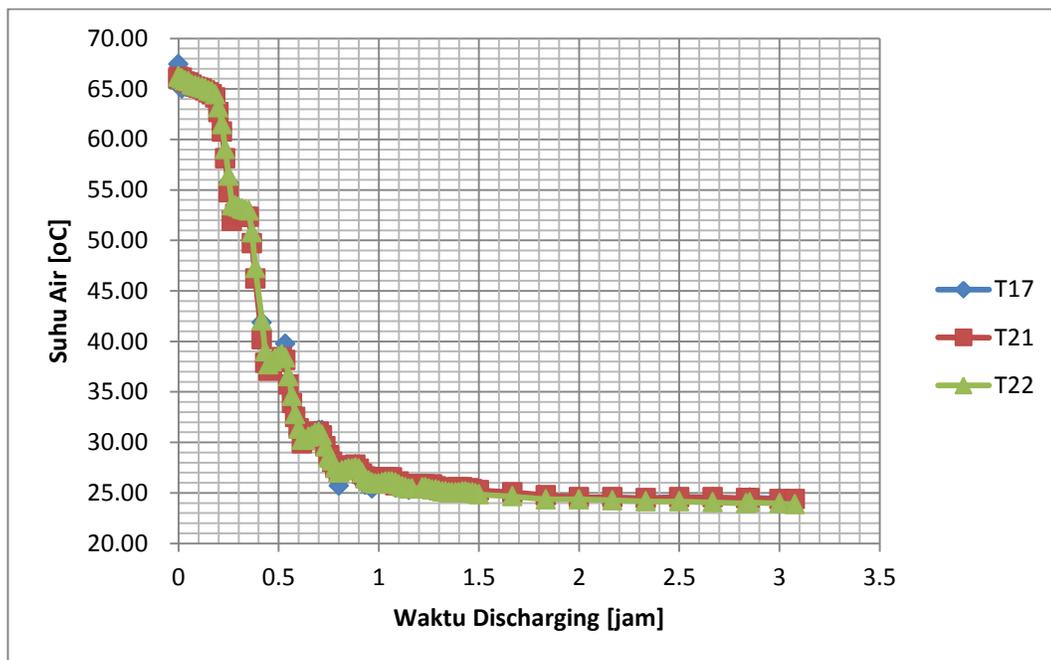
Hasil setelah pengujian pada variasi 2 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu penurunan suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan penurunan suhu pada air. Grafik penurunan suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.17 sedangkan grafik penurunan suhu air dilihat pada gambar 4.18.



Gambar 4.19 Penurunan Temperatur PCM Arah Horisontal Paraffin Wax Cu 20%

Suhu pada kedua termokopel dari 0-0,5 jam tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu tidak sampai 2°C. Maka dari itu, semakin besar debit yang dipakai maka membuat kedua termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar. Pada waktu 0-0,7 jam suhu T13 lebih tinggi dari T9 namun dari 1-3,1 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.

Grafik menunjukkan bahwa suhu pada kedua termokopel tidak mengalami kenaikan namun pada 0,3-0,4 jam *paraffin wax Cu 20%* sempat menahan suhu sekitar 56°C. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalo dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan tetapi suhu HTF mengalami kenaikan saat air kran ditutup.



Gambar 4.20 Penurunan Temperatur PCM Arah Horisontal Air

Grafik horisontal air cenderung terdapat kenaikan suhu daripada grafik horisontal *paraffin wax Cu 20%*. Naik turun grafik sangat dipengarungi oleh proses *discharging* bertahap saat air kran dimatikan dan dihidupkan. Naiknya suhu terjadi karena kran air ditutup sehingga air menyerap panas dari PCM. Grafik ketiga termokopel pada 0,35-0,4 jam terjadi penurunan drastis sekitar 16°C. Kenaikan suhu terjadi dari 0,45-1,1 jam kemudian ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan dan penurunan suhu stabil hingga selesai pengujian.

Suhu pada ketiga termokopel rata-rata tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu

tidak sampai 4 °C. Maka dari itu, semakin besar debit yang dipakai maka membuat ketiga termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar.

4.3.4 Grafik Energi Kumulatif

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses discharging dari awal penelitian hingga selesai dan didapatkan dengan menggunakan persamaan 4.3.

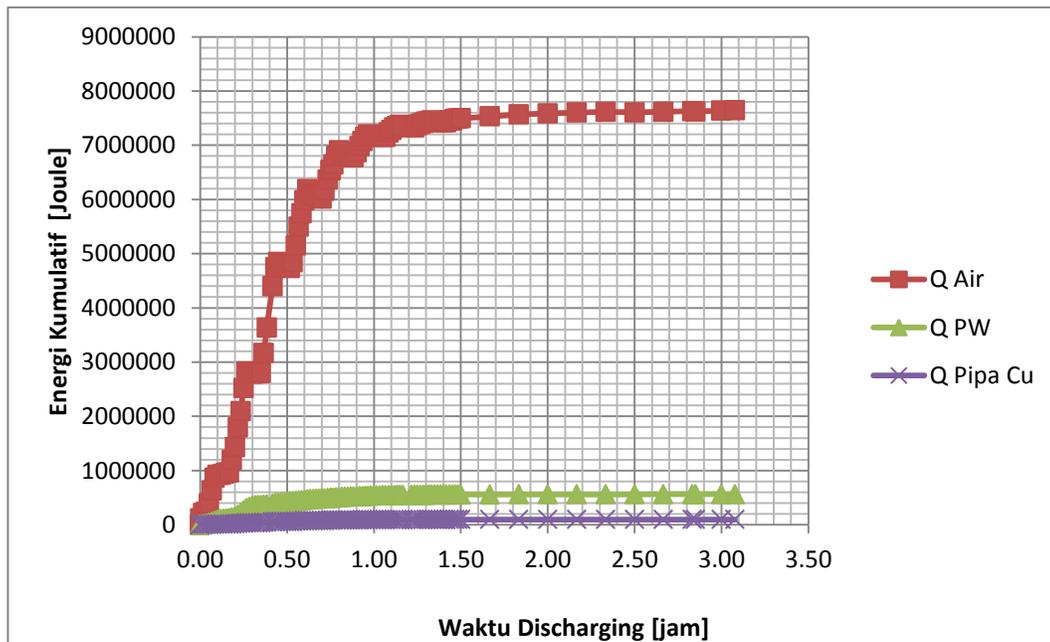
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.3)$$

$$Q_{kum} = 43.13 \times 4180 \times (66.74 - 24.34)$$

$$Q_{kum} = 7.644.122 \text{ J}$$

Tabel 4.3 Energi Kumulatif 2 LPM

Bahan	Cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg.K)]	[kg]	°C	°C	°C	(J)
Air	4180	43.13	66,74	24,34	42.4	7.644.122
Pipa Cu	390	5.91	66,54	24,09	42.45	97.778
PW+20%Cu	1839	6.7	66,38	24,27	42.11	546.471



Gambar 4.21 Grafik Energi Komulatif

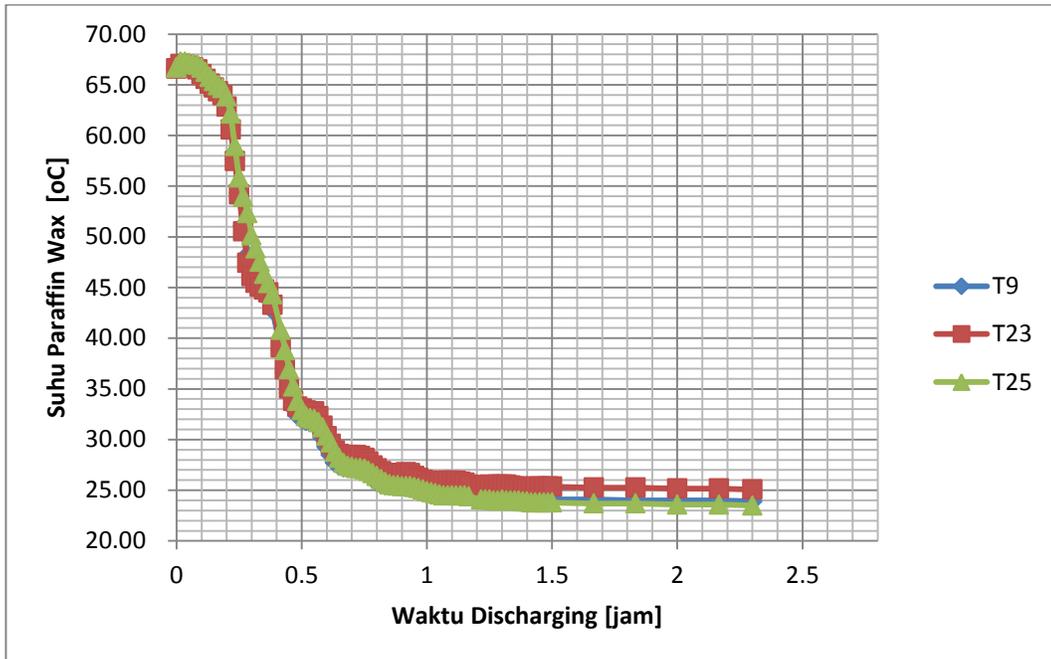
Grafik pada Q pipa *Cu* lebih rendah dari air dan *paraffin wax Cu* disebabkan nilai C_p yang rendah yaitu 390 J/kg.K, sedangkan nilai C_p air 4180 J/kg.K dan C_p *Paraffin Wax Cu* 20 % 1678 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax Cu* 20% mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,3 jam sebanyak 6-20 kJ, setelah 0,4 jam laju kenaikan hanya sebesar 2-5 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa *Cu* mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 0,4-1,0 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-1,5 jam sebesar 50-610 kJ, setelah 1,5 jam relatif mengalami kenaikan lebih stabil. Besarnya Q air dipengaruhi oleh cepatnya penurunan suhu saat discharging.

4.4. Laju Penurunan Suhu pada Variasi 2,5 LPM

Penelitian laju penurunan suhu 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 dengan posisi Gambar 3.16 dan dilakukan dengan variasi laju aliran 1 LPM, 1.5 LPM, 2 LPM, dan 2.5 LPM pada proses *discharging* bertahap. Proses pengambilan data menggunakan discharging bertahap atau setiap lima menit aliran air dihidupkan dan lima menit dimatikan seterusnya sampai suhu pada T32 mencapai 35°C. Laju pelepasan temperatur variasi 2,5 LPM relatif lebih lama daripada variasi 2 LPM. Pengambilan data pada variasi 1,5 LPM mencapai 2,3 jam.

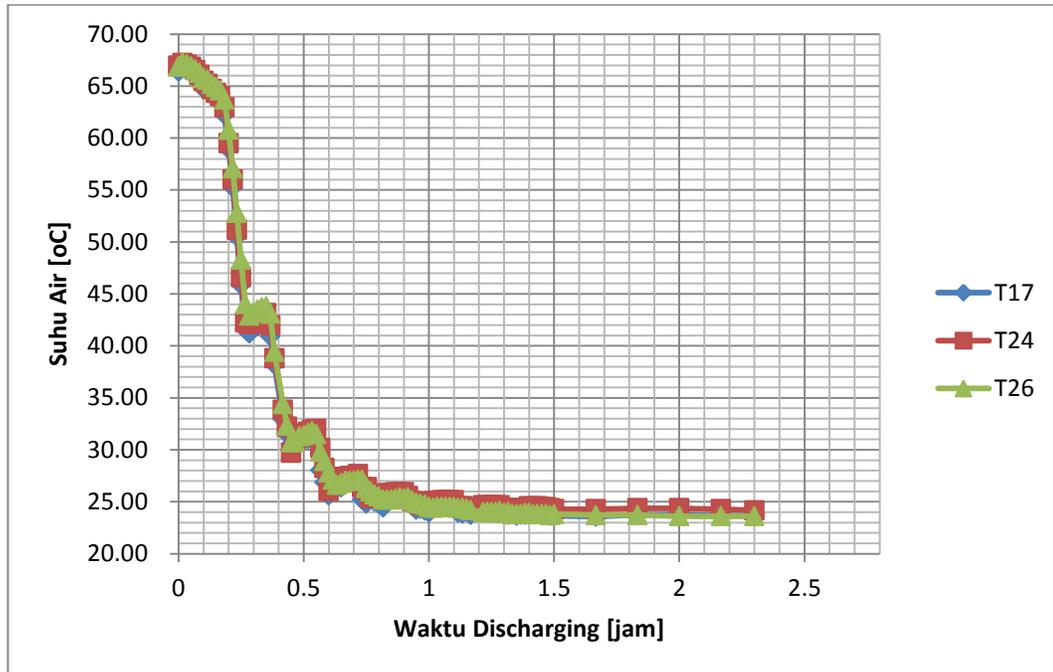
4.4.1 Penurunan Temperatur PCM Arah Aksial

Hasil setelah pengujian pada variasi 2,5 LPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu penurunan suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan penurunan suhu pada air. Grafik penurunan suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.22 sedangkan grafik penurunan suhu air dilihat pada gambar 4.23.



Gambar 4.22 Penurunan Temperatur PCM Arah Aksial Paraffin Wax Cu 20%

Grafik menunjukkan bahwa suhu pada ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan. Pada 0,2-0,6 ketiga termokopel mengalami penurunan suhu secara signifikan. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalo dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan tetapi suhu HTF mengalami kenaikan saat air kran ditutup. Setelah 0,6 jam pengujian ketiga termokopel mengalami penurunan secara stabil karena fasa lilin berubah menjadi solid saat suhu mulai mencapai 52,86 °C.



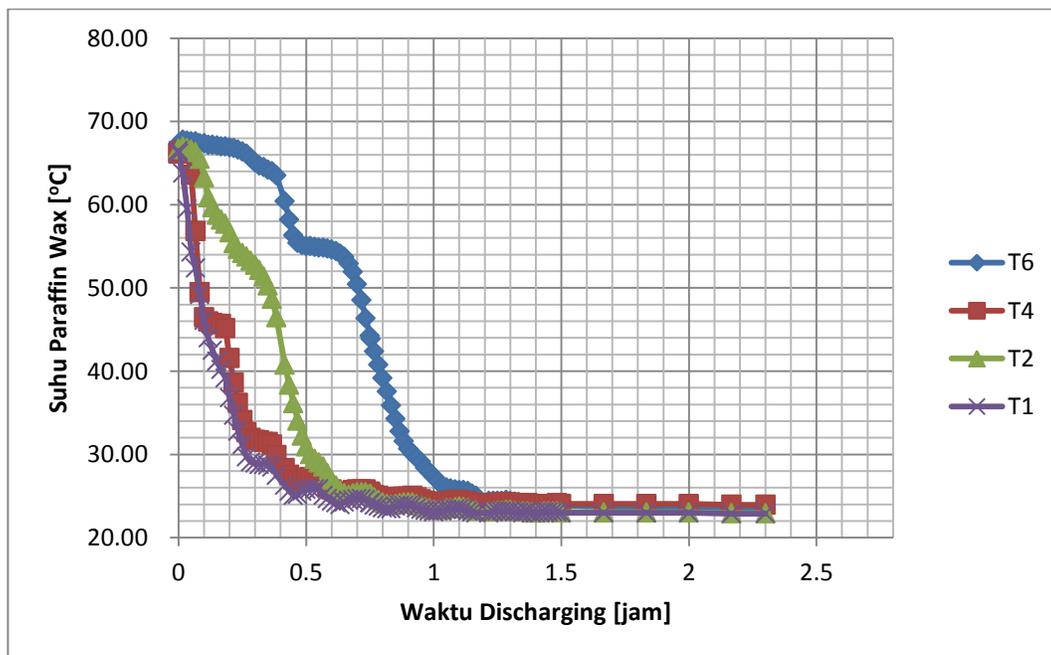
Gambar 4.23 Penurunan Temperatur PCM Arah Aksial Air

Grafik aksial air cenderung terdapat kenaikan suhu daripada grafik aksial *paraffin wax Cu 20%*. Naik turun grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging* bertahap saat buka tutup air kran. Naiknya suhu terjadi karena kran air ditutup sehingga air menyerap panas dari PCM. Setelah kran air ditutup maka air menyerap panas dari PCM sehingga saat kran dibuka suhu rata-rata mengalami kenaikan 1-3 °C pada waktu 0,3-0,9 jam dan setelah waktu 0,9-2,3 jam suhu dalam tangki konstan pada 24 °C mengikuti suhu dari input air kran.

Suhu pada ketiga termokopel dari 0-0,9 jam mengalami grafik naik turun karena terjadi pelepasan kalor dan setelah dari 0,9 jam suhu dalam pipa cenderung lebih stabil tidak mengalami kenaikan. Suhu pada ketiga termokopel dari 0-0,8 jam tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan belum terdapat turbulen dan pada 0,8-1,1 jam mengalami turbulen sehingga perbandingan suhu dari ketiga termokopel cukup besar.

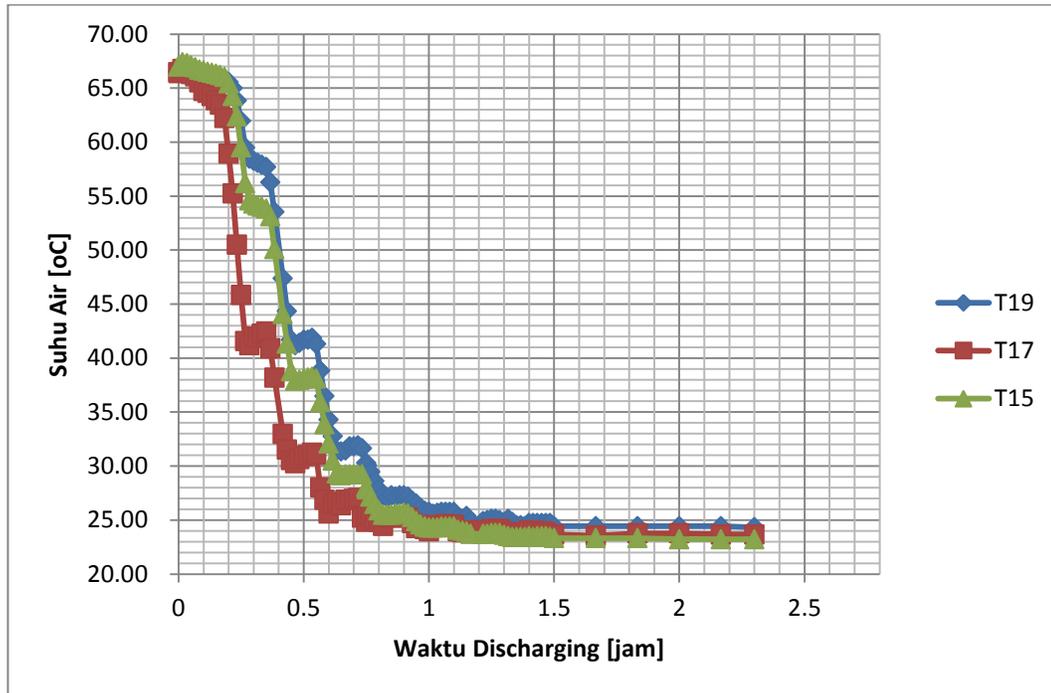
4.4.2 Penurunan Temperatur PCM Arah Vertikal

Hasil setelah pengujian pada variasi 2,5 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu penurunan suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan penurunan suhu pada air. Grafik penurunan suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.24 sedangkan grafik penurunan suhu air dilihat pada gambar 4.25.



Gambar 4.24 Penurunan Temperatur PCM Arah Vertikal Paraffin Wax Cu 20%

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 0-1 jam berkisar 29°C, suhu T4 berkisar 25°C, suhu T2 berkisar 24°C, dan suhu T1 berkisar 23°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T1 dan T2 selama satu jam.

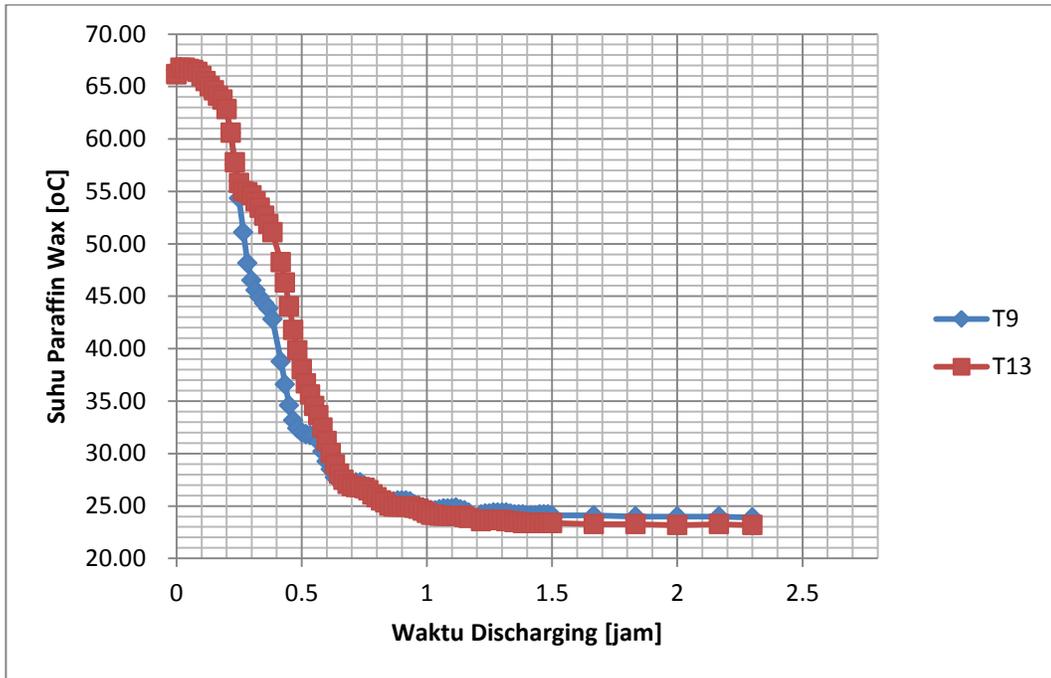


Gambar 4.25 Penurunan Temperatur PCM Arah Vertikal Air

Suhu pada T17 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. Rendahnya T17 dipengaruhi oleh letak termokopel, letak T17 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 0-1 jam berkisar 26°C, suhu T17 berkisar 24°C, dan suhu T15 pada 0-1 jam berkisar 25°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T17.

4.4.3 Penurunan Temperatur PCM Arah Horisontal

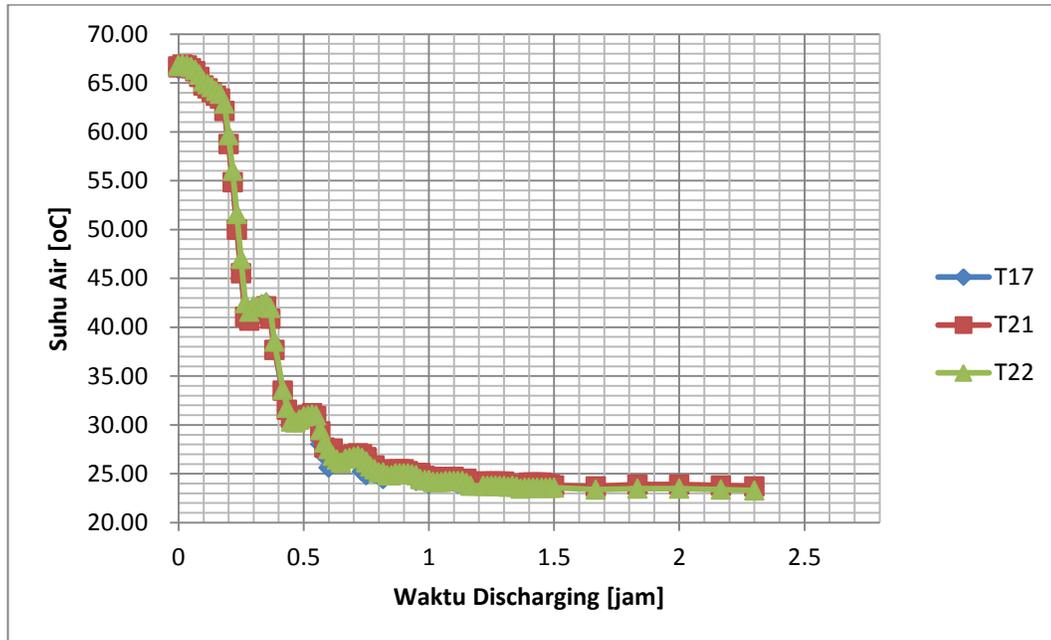
Hasil setelah pengujian pada variasi 2,5 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu penurunan suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan penurunan suhu pada air. Grafik penurunan suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.26 sedangkan grafik penurunan suhu air dilihat pada gambar 4.27.



Gambar 4.26 Penurunan Temperatur PCM Arah Horisontal Paraffin Wax Cu 20%

Suhu pada kedua termokopel dari 0-0,2 jam tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu tidak sampai 1°C. Maka dari itu, semakin besar debit yang dipakai maka membuat kedua termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar. Pada waktu 0,2-0,6 jam suhu T13 lebih tinggi dari T9 namun dari 0,6-2,3 jam T9 lebih tinggi dari T13. Suhu T9 lebih rendah dari T13 dikarenakan letak pipa tembaga T9 berada di atas *output* air kran, sehingga saat kran dibuka T9 lebih dulu mengenai air dari T13 yang berada pada samping T9.

Grafik menunjukkan bahwa suhu pada kedua termokopel tidak mengalami kenaikan. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalsium dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan tetapi suhu HTF mengalami kenaikan ketika air kran ditutup.



Gambar 4.27 Penurunan Temperatur PCM Arah Horisontal Air

Grafik horisontal air cenderung terdapat kenaikan suhu daripada grafik horisontal *paraffin wax Cu 20%*. Naik turun grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging* bertahap saat air kran dibuka dan ditutup. Naiknya suhu terjadi karena kran air ditutup sehingga air menyerap panas dari PCM. Grafik ketiga termokopel pada 0,2-0,25 jam terjadi penurunan drastis sekitar 20 °C. Kenaikan suhu terjadi dari 0,25-0,9 jam kemudian ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan dan penurunan suhu stabil sampai selesai pengujian.

Suhu ketiga termokopel rata-rata tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang relatif kecil dan memiliki selisih suhu tidak sampai 1-3 °C. Maka dari itu, semakin besar debit yang dipakai maka membuat ketiga termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar.

4.4.4 Grafik Energi Kumulatif

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses *discharging* dari awal penelitian hingga selesai dan didapatkan dengan menggunakan persamaan 4.4.

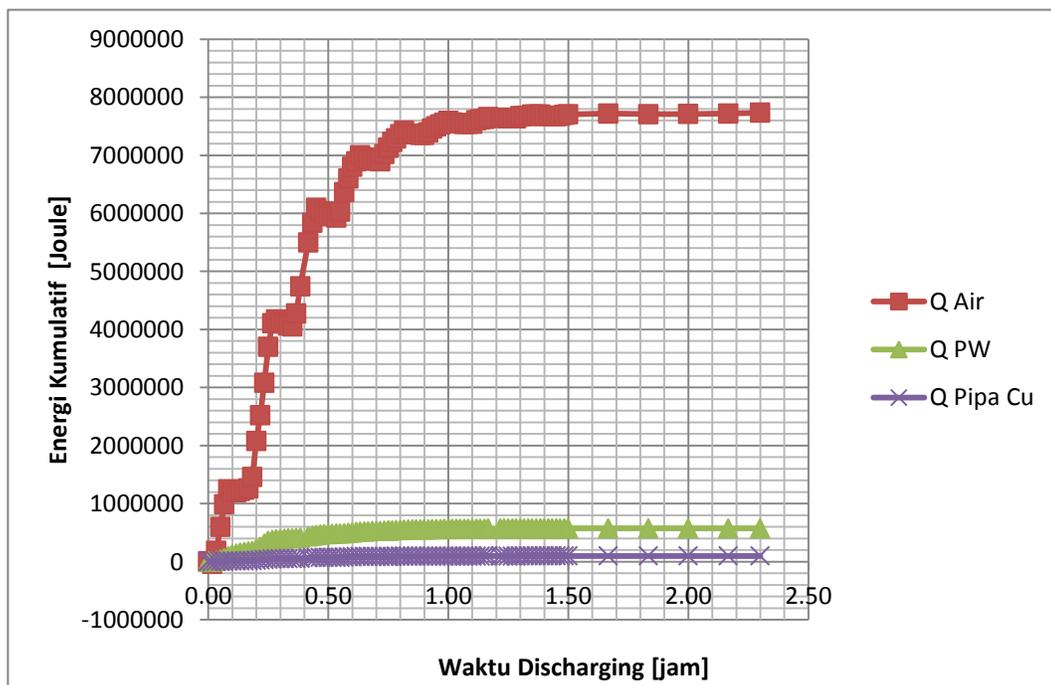
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.4)$$

$$Q_{kum} = 43.13 \times 4180 \times (66.58 - 23.69)$$

$$Q_{kum} = 7.732.742 \text{ J}$$

Tabel 4 4 Energi Kumulatif 2,5 LPM

Bahan	cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg.K)]					
Air	4180	43.13	66,58	23,69	42.89	7.732.742
Pipa Cu	390	5.91	66,50	23,32	43.18	99.456
PW+20%Cu	1839	6.7	66,71	23,53	43.18	557.832



Gambar 4.28 Grafik Energi Komulatif

Grafik 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 Cu* 20 % 1678 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax Cu* 20% mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,25 jam sebanyak 11-20 kJ, setelah 0,25 jam laju

kenaikan hanya sebesar 3-9 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa *Cu* mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 0,9-1,1 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-1 jam sebesar 100-700 kJ, setelah 1 jam relatif mengalami kenaikan lebih stabil. Besarnya Q air dipengaruhi oleh cepatnya penurunan suhu saat discharging.

4.5. Laju Pelepasan Kalor Air dan Laju Penurunan Suhu Air

4.5.1 Laju Pelepasan Kalor Air

Laju pelepasan kalor pada air dapat dicari dengan persamaan 4.2:

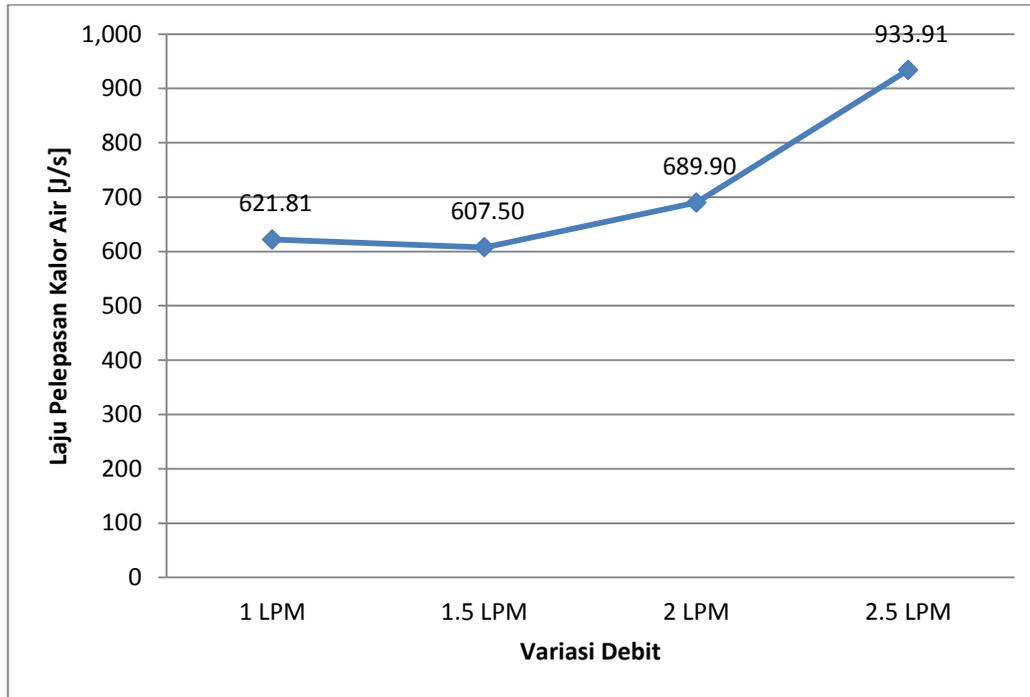
$$\dot{Q} = \frac{Q_{kumulatif}}{t_{total}} \quad (4.2)$$

$$\dot{Q} = \frac{7.893.898}{12695}$$

$$\dot{Q} = 621,8 \text{ J/s}$$

Tabel 4.5 Laju Pelepasan Kalor Air

V	T1 Air	T2 Air	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 20%	\dot{Q}
LPM	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	(detik)	(J)	(J)	(J/s)
1	66,67	22,89	43,78	12695	7.893.898	1.565.131	621,8
1.5	65,99	25,37	40,62	12055	7.323.463	551.559	607,5
2	66,74	24,34	42,40	11080	7.644.122	546.471	689,9
2.5	66,58	23,69	42,89	8280	7.732.742	557.832	933,9



Gambar 4 29 Laju Pelepasan Kalor Air

Grafik diatas menunjukkan bahwa laju pelepasan kalor paling rendah yaitu pada variasi 1,5 LPM karena memiliki suhu T akhir yang lebih tinggi. Sedangkan laju pelepasan terbesar pada variasi 2,5 LPM karena memiliki suhu T akhir yang lebih rendah dari semua variasi. Variasi 2,5 LPM memiliki waktu yang tercepat karena suhu mulai proses *discharging* 66,71 °C. Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 2,3 jam.

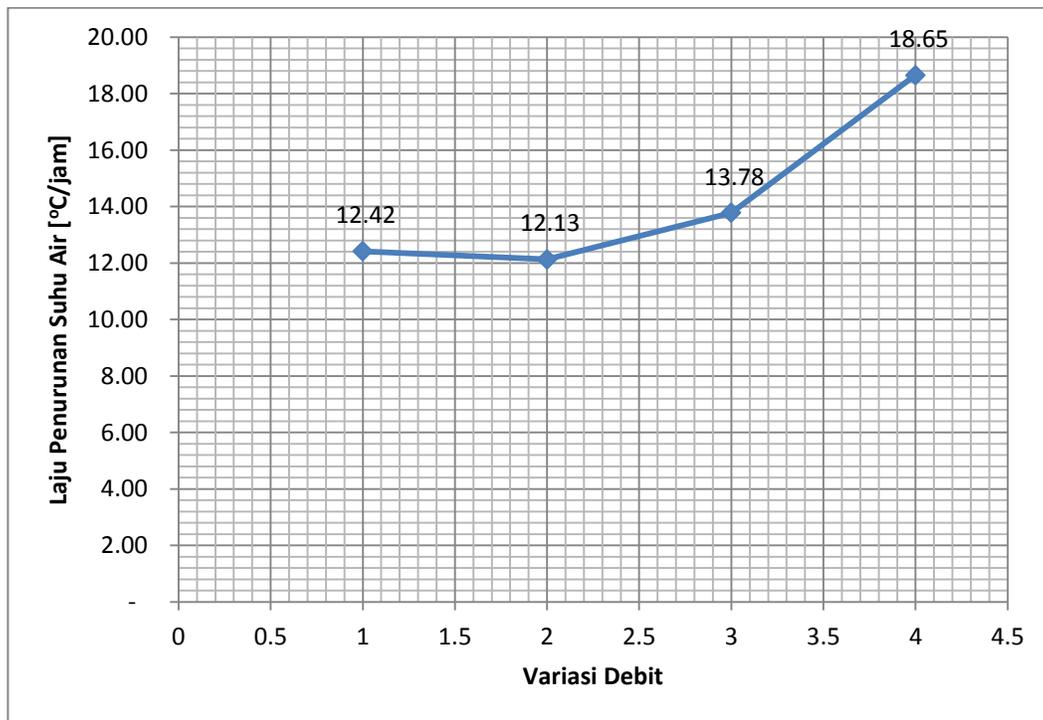
4.5.2 Laju Penurunan Suhu Air

Laju penurunan suhu pada air dapat dicari dengan persamaan 4.3.

$$\begin{aligned}
 \text{Laju Penurunan Suhu} &= \frac{(T_{awal} - T_{akhir}) \times 3600}{t_{total}} & (4.3) \\
 &= \frac{(66,67 - 22,89) \times 3600}{12695} \\
 &= 12,42 \text{ } ^\circ\text{C/jam}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.6 Laju Penurunan Suhu Air

V	T1 Air	T2 Air	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 20%	Q pipa Cu
LPM	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	(detik)	(J)	(J)	(J)
1	66,67	22,89	43,78	12695	7.893.898	1.565.131	101.865
1.5	65,99	25,37	40,62	12055	7.323.463	551.559	94.133
2	66,74	24,34	42,40	11080	7.644.122	546.471	97.778
2.5	66,58	23,69	42,89	8280	7.732.742	557.832	99.456



Gambar 4.30 Laju Penurunan Suhu Air

Grafik diatas menunjukkan bahwa laju penurunan suhu air paling rendah 12,13 $^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ yaitu pada variasi 1,5 LPM karena memiliki T_i yang paling tinggi diantara variasi lainnya. Sedangkan laju penurunan suhu air terbesar 18,65 $^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ 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* dibawah 65 $^{\circ}\text{C}$ yang membuat proses penurunan lebih cepat dari variasi yang suhu awalnya 69 $^{\circ}\text{C}$. Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 2,3 jam.

4.6. Laju Pelepasan Kalor Paraffin dan Laju Penurunan Suhu Paraffin

Laju pelepasan kalor pada paraffin wax Cu 20% dapat dicari dengan persamaan 4.2:

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

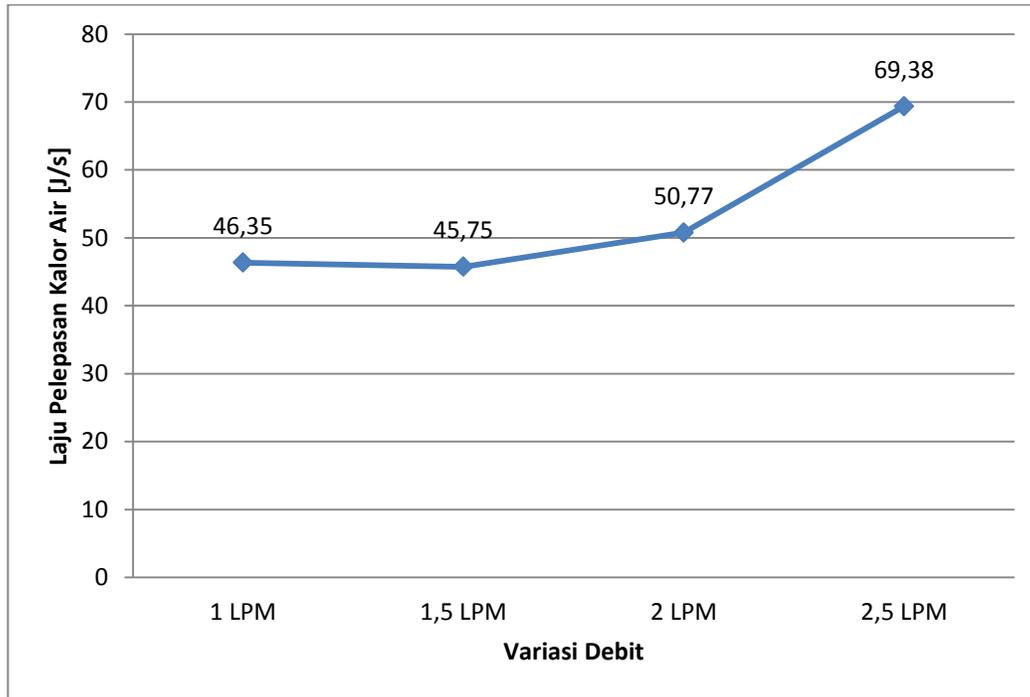
$$\dot{Q} = \frac{Q_{kumulatif}}{t_{total}}$$

$$\dot{Q} = \frac{1.565.131}{12695}$$

$$\dot{Q} = 123,28 \text{ J/s}$$

Tabel 4.7 Laju Pelepasan Kalor Paraffin Wax Cu 20%

V	T1 PCM	T2 PCM	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 20%	\dot{Q}
LPM	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	(detik)	(J)	(J)	(J/s)
1	66,99	22,81	44,18	12695	7.893.898	1.565.131	123,28
1.5	66,22	25,22	41	12055	7.323.463	551.559	13,27
2	66,38	24,27	42,11	11080	7.644.122	546.471	49,32
2.5	66,71	23,53	43,18	8280	7.732.742	557.832	67,37



Gambar 4.31 Laju Pelepasan Kalor Paraffin

Grafik diatas menunjukkan bahwa laju pelepasan kalor paling rendah yaitu pada variasi 1,5 LPM karena memiliki suhu T_i yang lebih tinggi. Sedangkan laju pelepasan terbesar pada variasi 2,5 LPM karena memiliki suhu T_i yang lebih rendah dari semua variasi. Variasi 2,5 LPM memiliki waktu yang tercepat karena suhu mulai proses *discharging* $65,99^\circ\text{C}$. Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 2,3 jam.

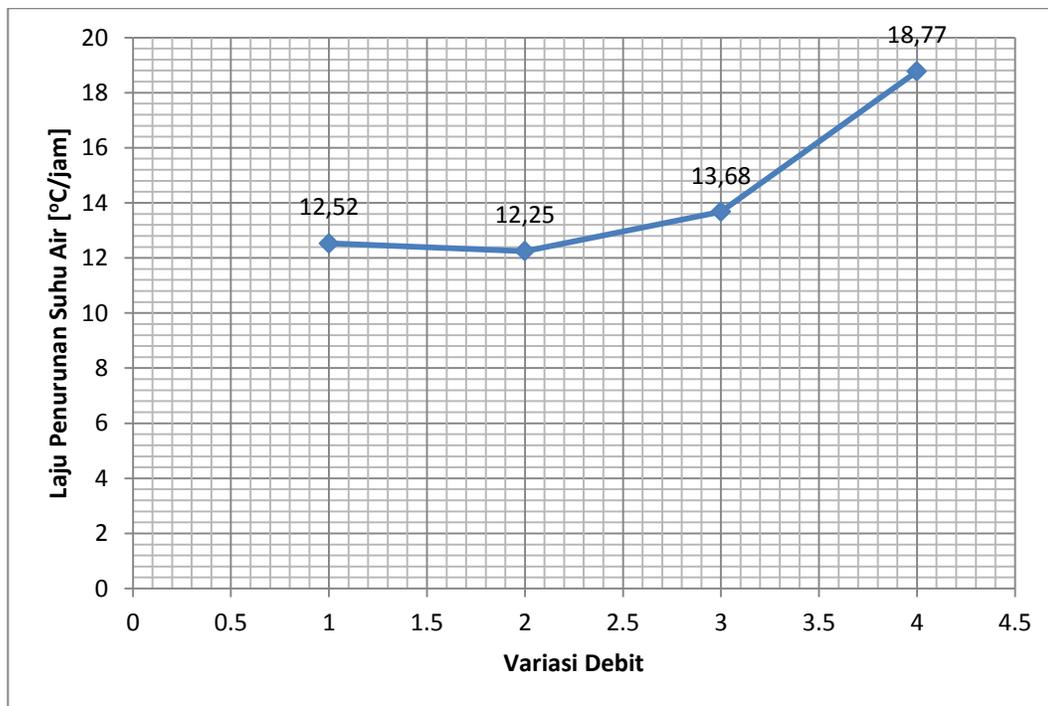
4.6.1 Laju Penurunan Suhu Paraffin

Laju penurunan suhu pada *paraffin wax* Cu 20% dapat dicari dengan persamaan 4.3.

$$\begin{aligned}
 \text{Laju Penurunan Suhu} &= \frac{(T_{awal} - T_{akhir}) \times 3600}{t_{total}} & (4.3) \\
 &= \frac{(66,99 - 22,81) \times 3600}{12695} \\
 &= 12,52 \text{ C/jam}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.8 Laju Penurunan Suhu *Paraffin Wax Cu 20%*

V	T1 PCM	T2 PCM	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 20%	Q pipa Cu
LPM	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	(detik)	(J)	(J)	(J)
1	66,99	22,81	44,18	12695	7.893.898	1.565.131	101.865
1.5	66,22	25,22	41	12055	7.323.463	551.559	94.133
2	66,38	24,27	42,11	11080	7.644.122	546.471	97.778
2.5	66,71	23,53	43,18	8280	7.732.742	557.832	99.456



Gambar 4.32 Laju Penurunan Suhu Paraffin

Grafik diatas menunjukkan bahwa laju penurunan suhu paraffin paling rendah 12,25 $^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ yaitu pada variasi 1,5 LPM karena memiliki T_i yang paling tinggi diantara variasi lainnya. Sedangkan laju penurunan suhu paraffin terbesar 18,77 $^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ 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* dibawah 65 $^{\circ}\text{C}$ yang membuat proses penurunan lebih cepat dari variasi yang suhu awalnya 69 $^{\circ}\text{C}$. Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 2,3 jam.