BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan hasil dan pembahasan didapat dari data yang diambil dari proses discharging kontinyu pada paraffin wax + serbuk tembaga 20% yang dilakukan pada variasi debit air 1; 1,5; 2; dan 2,5 LPM menyajikan hasil grafik sebagai berikut :

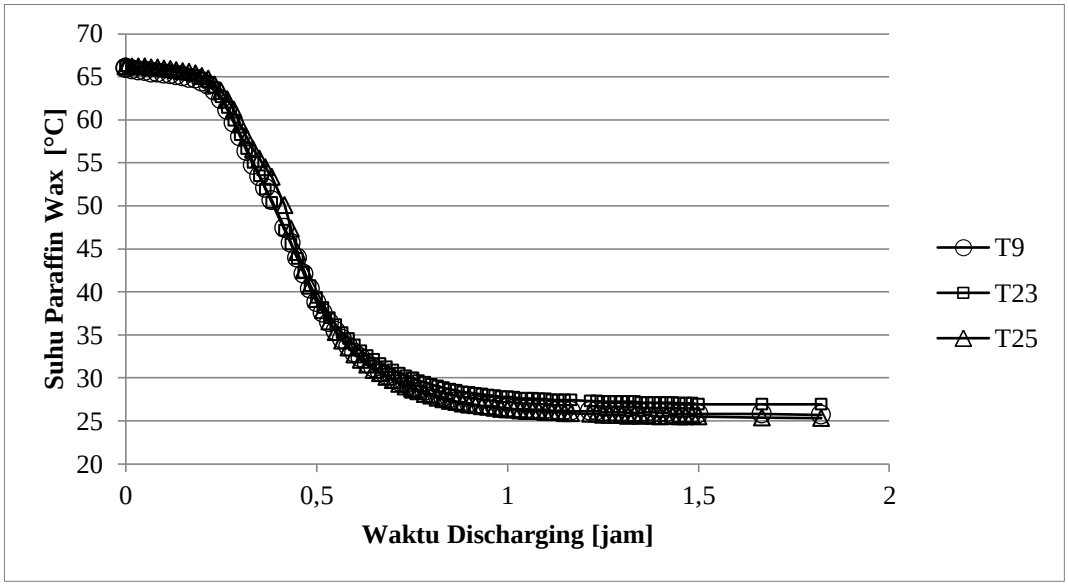
1. Grafik evolusi suhu
    a. Arah aksial
    b. Arah vertikal
    c. Arah horizontal
2. Grafik energi komulatif air, *paraffin wax* + CU 20%, dan pipa CU.
3. Grafik laju pelepasan kalor dan penurunan suhu.

4.1 Evolusi Suhu pada Variasi 1 LPM

Data hasil penelitian laju pelepasan kalor yang terjadi dari PCM ke HTF perlu dilakukan pengamatan laju pelepasan temperatur PCM arah horisontal, arah vertikal, dan arah aksial. yang ada di dalam tangki TES. Hasil pengamatan dilihat dari 26 titik termokopel yang disusun dengan posisi Gambar 3.23 dan dilakukan pengambilan data dengan variasi laju aliran 1 LPM, 1,5 LPM, 2 LPM, dan 2,5 LPM pada proses *discharging kontinyu*. Proses pengambilan data *discharging kontinyu* dilakukan hingga suhu pada T32 mencapai 35°C.

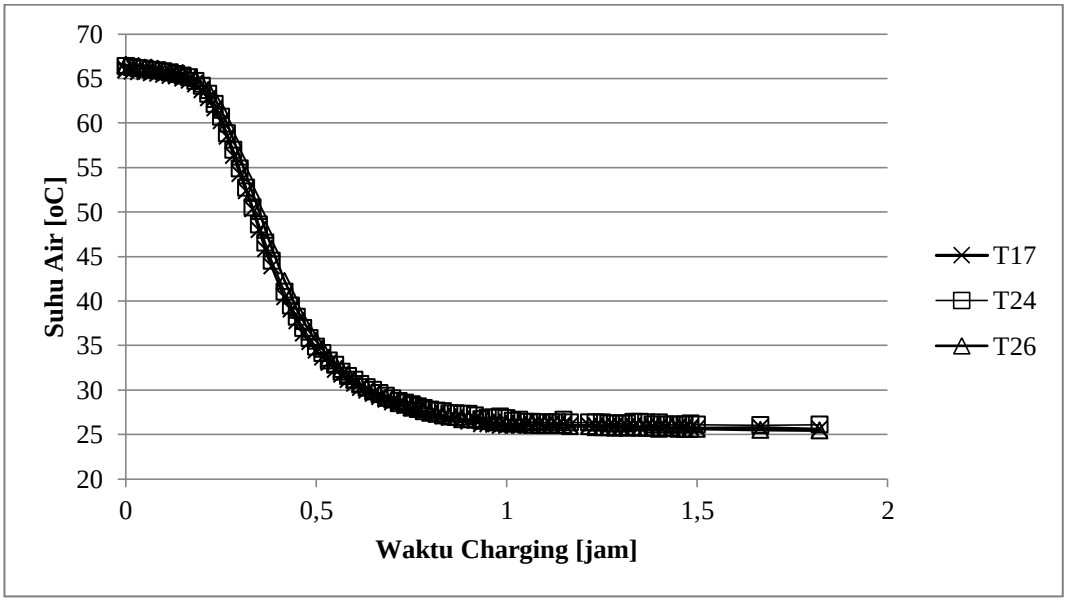
4.1.1 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Aksial

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



Gambar 4. 1 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Aksial

Grafik pada gambar 4.1 menunjukkan bahwa suhu pada ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalor dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan. Setelah 0,2 jam suhu ketiga termokopel mengalami penurunan secara stabil karena menggunakan proses *discharging continue*. Perbedaan suhu ketiga termokopel tidak terlalu signifikan karena menggunakan debit yang kecil, semakin besar debit maka perbedaan suhu akan lebih besar.

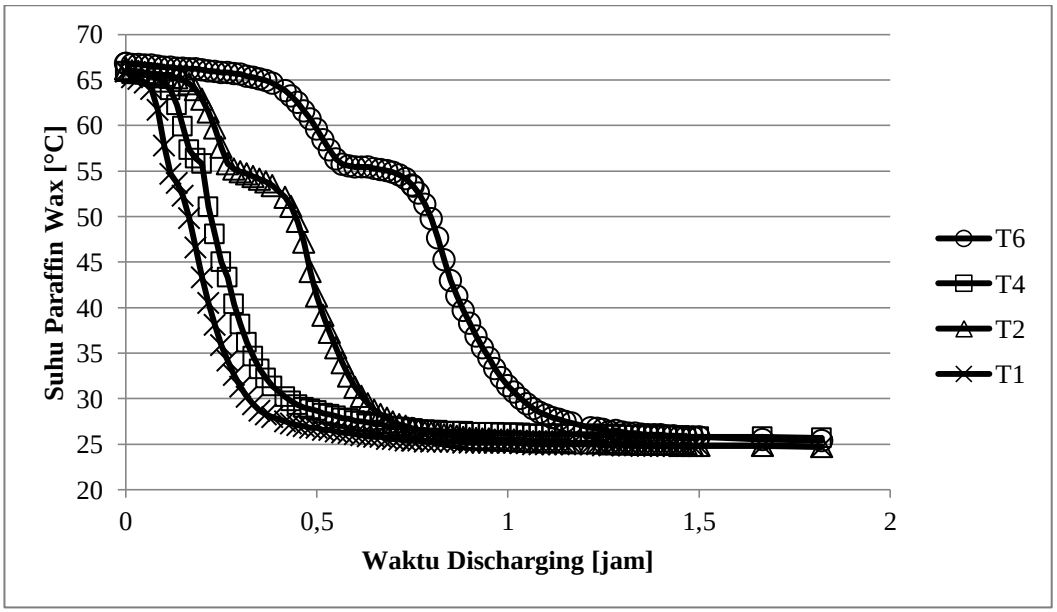


Gambar 4. 2 Evolusi Suhu Airdalam Arah Aksial

Grafik pada gambar 4.2 menunjukan bahwa suhu pada ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan. Peristiwa ini disebabkan karena air tidak menyerap kalor secara maksimal dari PCM sehingga suhu air tidak mengalami kenaikan. Setelah 0,2 jam suhu ketiga termokopel mengalami penurunan secara stabil karena menggunakan proses *discharging continue*. Perbedaan suhu ketiga termokopel tidak terlalu signifikan karena menggunakan debit yang kecil, semakin besar debit maka perbedaan suhu akan lebih besar.

4.1.2 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Vertikal

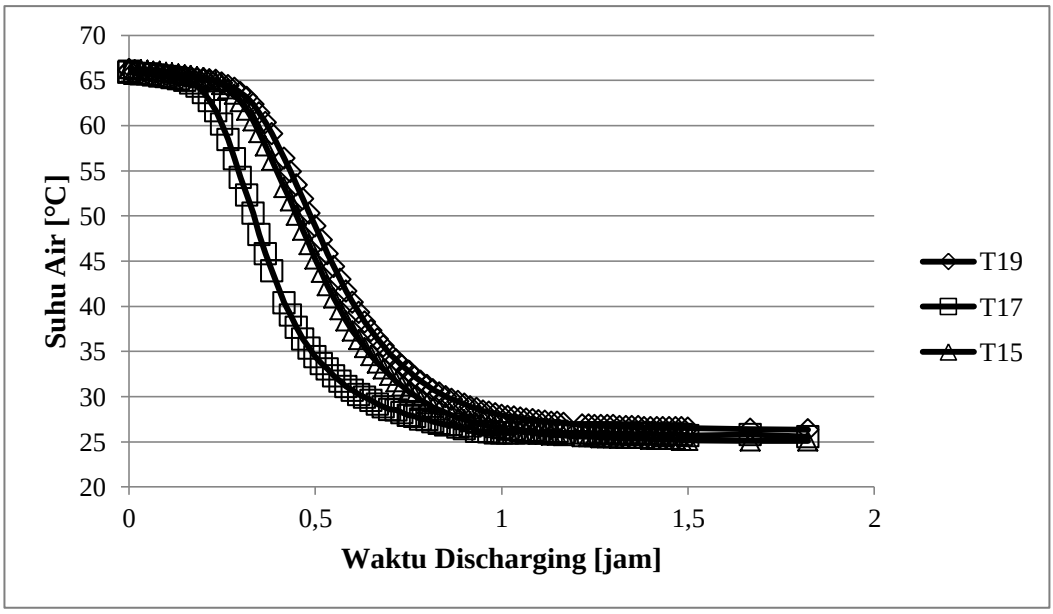
Hasil pengujian pada variasi 1 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.3 dan grafik evolusi suhu air pada gambar 4.4.



Gambar 4. 3 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Vertikal

Dari grafik 4.3 yang mengalami penurunan suhu paling cepat dari keempat termokopel pada arah vertikal adalah termokopel T1. Peristiwa ini dipengengaruhi oleh letak pipa tembaga, karena letak pipa tembaga berada pada sisi paling dekat dengan input air kran yang masuk ke tangki TES. Dan T6 memiliki suhu yang relatif konstan dan paling lambat mengalami peurunan suhu karena letak pipa tembaga T6 berada paling jauh dari input air kran. Penurunan suhu T6 pada 0-0,6

jam berkisar 11℃, suhu T4 berkisar 38 ℃, suhu T2 berkisar 35℃, dan suhu T1 pada 0-0,6 jam berkisar 39℃. Sehingga pelepasan kalor selama 0-0,6 jam paling cepat yaitu terjadi pada T1.

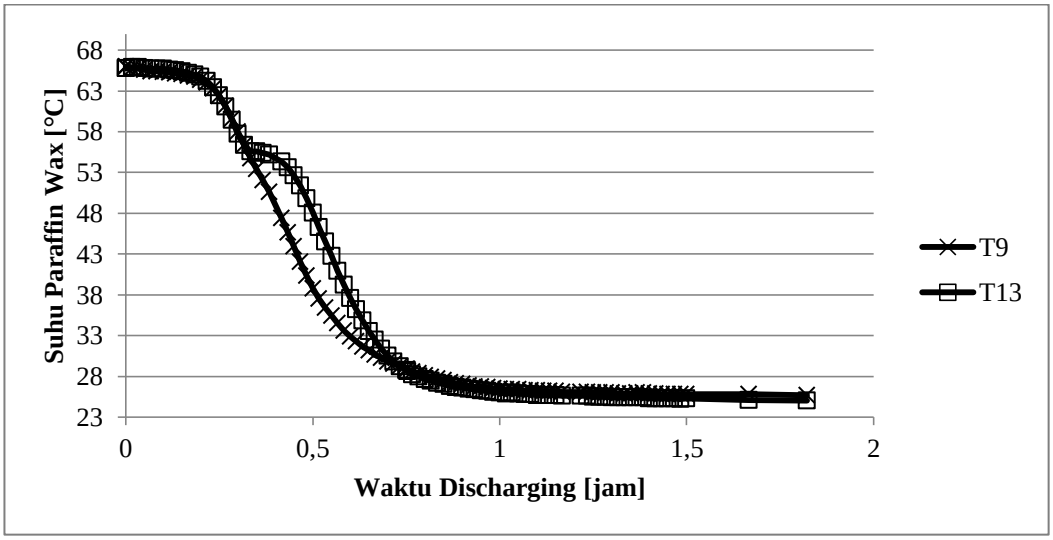


Gambar 4. 4 Evolusi Suhu Air dalam Arah Vertikal

Dari grafik 4.4 setelah suhu mencapai 63°C dan 0,2 jam ketiga termokopel mengalami penurunan suhu yang cepat dan drastis hingga mencapai suhu 26°C pada 1,2 jam. Dari ketiga termokopel T17 mengalami penurunan suhu paling cepat karena letak T17 yang berada pada jalur input air masuk dari kran. Sedangkan T19 memiliki suhu yang relatif konstan dan paling lama mengalami penurunan suhu karena letak yang paling jauh dari input air masuk dari kran menuju tangki TES. Setelah 1,2 jam ketiga termokopel mengalami perubahan suhu yang relatif sama dan konstan karena saat itu air sudah tidak menerima panas dari PCM sehingga antar termokopel berselisih tidak lebih dari 2°C.

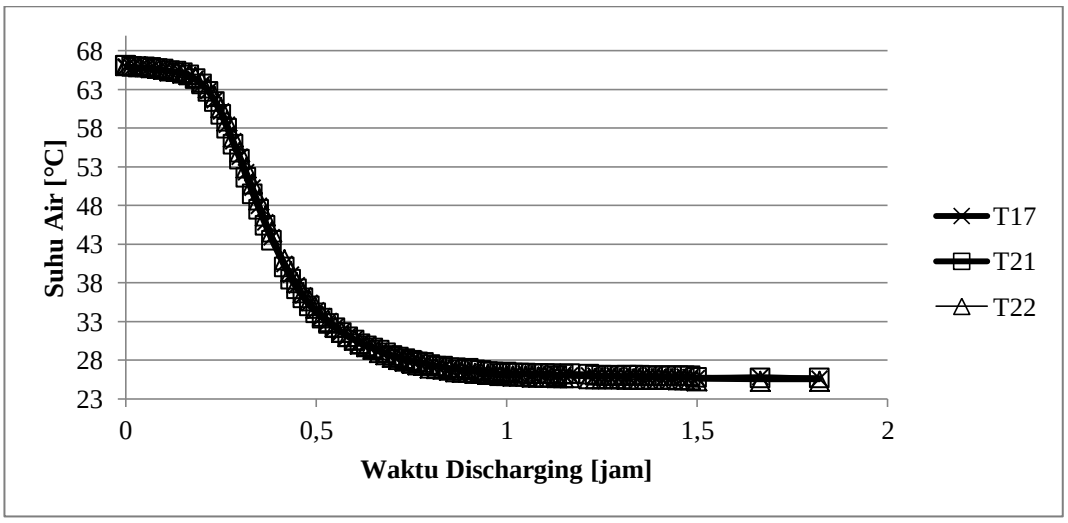
4.1.3 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Horisontal

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



Gambar 4. 5 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Horisontal

Suhu pada kedua *termocuple* dari 0-0,3 jam mengalami penurunan suhu yang relatif sama. Tetai setelah 0,3 jam suhu pada T13 mengalami penurunan suhu yang lebih lama dibanding T9 dan membentuk lengkungan pada suhu 55°C sampai pada suhu 29°C kedua suhu pada T9 dan T13 mulai stabil. Peristiwa ini dikarenanan air dari kran masuk melalui tengah tengki sehingga menyebabkan air panas yang berada ditengah bergeser berpindah ke sisi luar tengki sehingga suhu pada T13 lebih panas. Pada 0,8 jam – selesai tidak ada kenaikan suhu dan penurunan suhu sudah stabil karena PCM sudah tidak melepas kalor lagi.



Gambar 4. 6 Evolusi Suhu Air dalam Arah Horisontal

Grafik horizontal air menunjukan penurunan suhu pada T17 dan T22 tidak mengalami perbedaan, tetapi pada T21 mengalami penurunan suhu yang berbeda dan waktu yang berbeda. Perbedaan suhu dan waktu tersebut dilihat dari suhu 61 °C hingga 38 °C dan 0,25 – 0,43 jam. Hal ini disebabkan karena T21 terkena debit air kran terlebih dahulu dibandingkan T17 dan T22, sehingga penurunan suhu dan waktu HTF pada T21 lebih cepat. Setelah mencapai suhu 38°C ketiga termokopel mengalami penurunan suhu yang relatif sama dan stabil dikarenakan HTF sudah tersebar merata sehingga perbedaan suhu antar termokopel tidak lebih dari 1°C.

Debit air mempengaruhi perbedaan suhu pada termokopel, jika menggunakan debit air yang kecil maka perbedaan suhu tidak terlalu signifikan hanya mencapai 2°C dikarenakan dorongan debit air dari kran yang kecil tidak menyebabkan putaran air yang masuk kedalam tangki besar sehingga suhu yang terbaca dari termokopel relatif sama.

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.

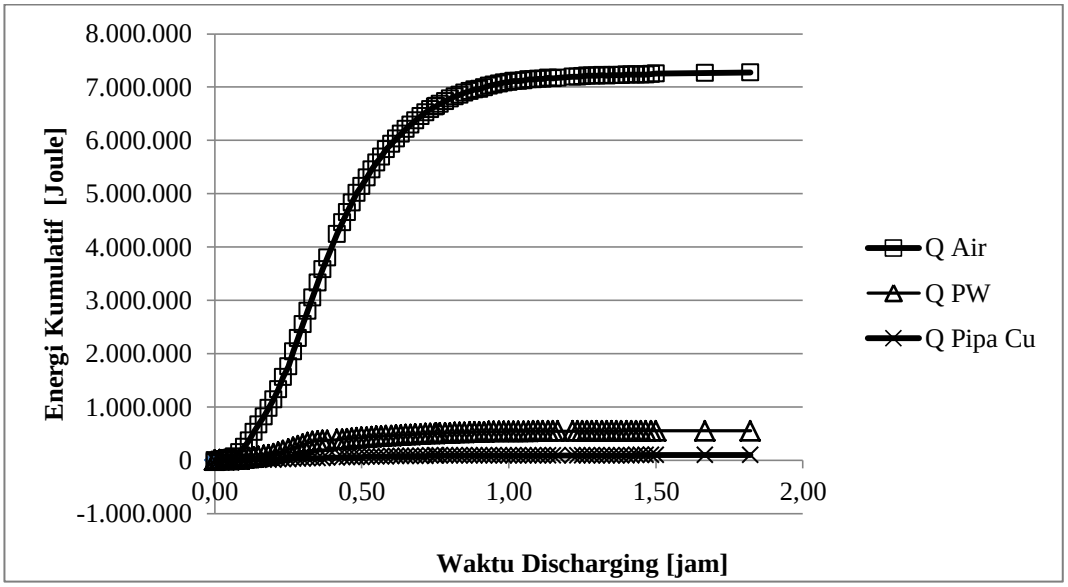
$$Q_{kum} = m \times c\dot{p} \times \Delta T \qquad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43{,}13 \times 4180 \times (6\dot{5},94 - 25{,}58)$$

$$Q_{kum} = 7.275.700{,}69 \text{ J}$$

Tabel 4. 1 Energi Kumulatif 1 LPM

Bahan	cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg.K)]	[kg]	^{o}C	^{o}C	^{o}C	(J)
Air	4180	43,13	65,94	25,58	40,36	7.275.700,69
Pipa Cu	390	5,91	65,98	25,17	40,81	94.000,25
PW+20%Cu	1678	9,89	66,23	25,38	40,85	550.913,12



Gambar 4. 7 Grafik Energi Kumulatif

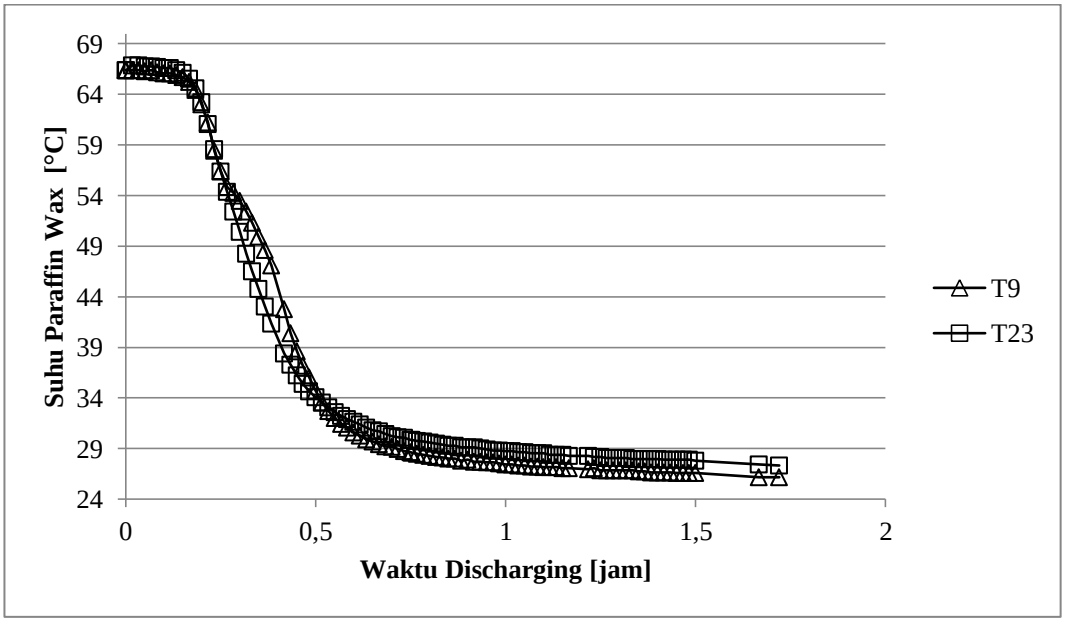
Grafik pada gambar 4.7 Q pipa *Cu* lebih rendah dari air dan *paraffin wax Cu* disebabkan nilai Cp yang rendah yaitu 390 J/kg.K, sedangkan nilai Cp air 4180 J/kg.K dan Cp *Paraffin Wax Cu* 20 % 1678 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax Cu 20%* mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,93 jam sebanyak 534,152 kJ, setelah 0,93 jam sampai selesai laju kenaikannya sebesar 534,152 - 550,913 kJ dan kenaikannya relatif stabil. Grafik Q pipa *Cu* setelah 0,93 jam mengalami kenaikan sebesar 90,517 kJ dan dari 0,93 jam sampai selesai hanya sebesar 90,517-94,0 kJ . Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-0,93 jam yaitu sebesar 5.146 kJ, setelah 0,93 jam relatif mengalami kenaikan lebih stabil hingga berakhir pada 7.275,701 kJ.

4.2 Evolusi Suhu pada Variasi 1,5 LPM

Data hasil penelitian laju pelepasan kalor yang terjadi dari PCM ke HTF perlu dilakukan pengamatan laju pelepasan temperatur PCM arah horisontal, arah vertikal, dan arah aksial. yang ada di dalam tangki TES. Hasil pengamatan dilihat dari 26 titik termokopel yang disusun dengan posisi Gambar 3.16 dan dilakukan pengambilan data dengan variasi laju aliran 1 LPM, 1,5 LPM, 2 LPM, dan 2,5 LPM pada proses *discharging kontinyu*. Proses pengambilan data *discharging kontinyu* dilakukan hingga suhu pada T32 mencapai 35°C.

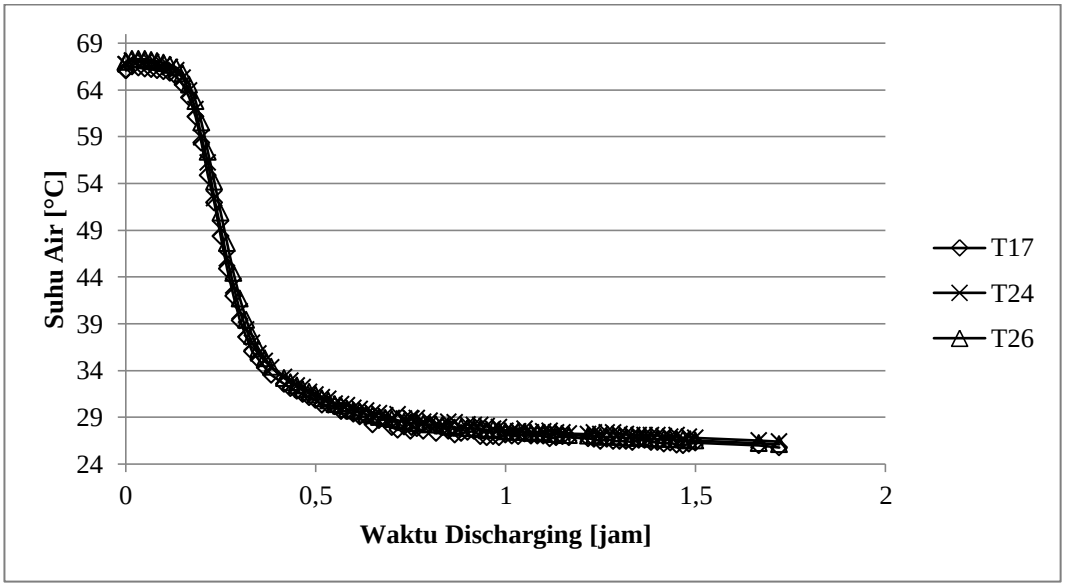
4.2.1 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Aksial

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



Gambar 4. 8 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Aksial

Grafik pada gambar 4.8 menunjukan bahwa suhu pada ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalor dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan. Setelah 0,17 jam suhu ketiga termokopel mengalami penurunan secara konstan karena menggunakan proses *discharging continue*. Perbedaan suhu ketiga termokopel tidak terlalu signifikan karena menggunakan debit yang kecil, semakin besar debit maka perbedaan suhu akan lebih besar.

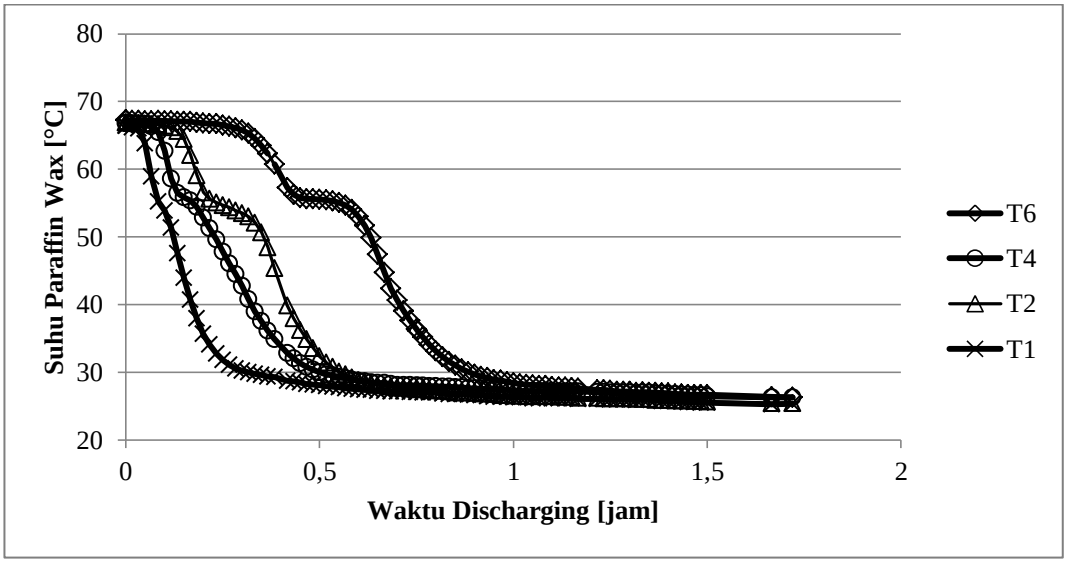


Gambar 4. 9 Evolusi Suhu Air dalam Arah Aksial

Grafik pada gambar 4.9 menunjukan bahwa suhu pada ketiga termokopel tidak menahan suhu dan tidak mengalami kenaikan. Peristiwa ini disebabkan karena air tidak menyerap kalor secara maksimal dari PCM sehingga suhu air langsung menurun dan tidak mengalami kenaikan. Setelah 0,12 jam suhu ketiga termokopel mengalami penurunan secara konstan karena menggunakan proses *discharging continue* dan suhu mulai stabil setelah 0,12 jam . Perbedaan suhu ketiga termokopel tidak terlalu signifikan perbedaan suhu termokopel setelah 1,2 jam tidak lebih dari 2°C peristiwa ini karena menggunakan debit yang kecil, semakin besar debit maka perbedaan suhu akan lebih besar.

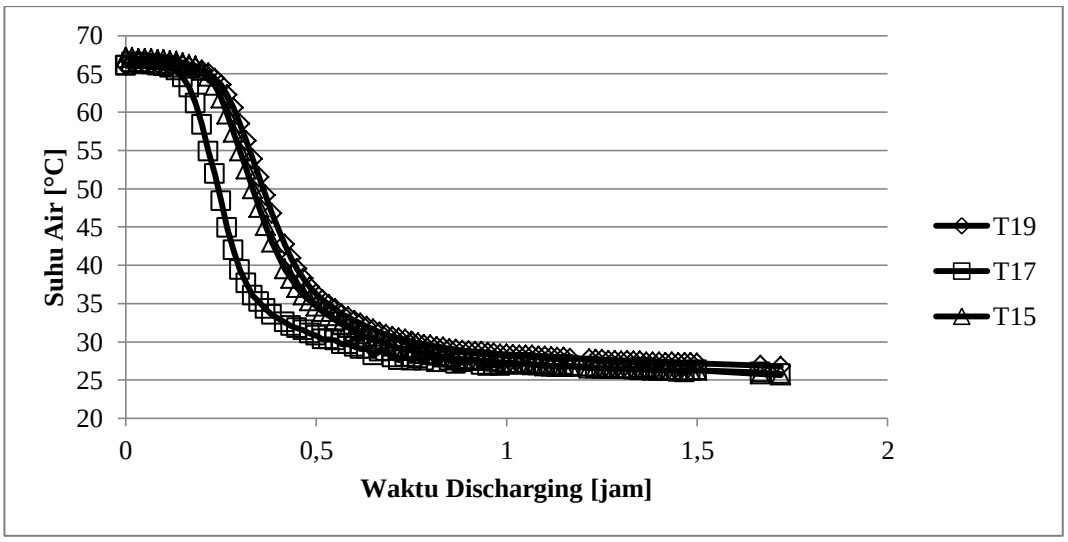
4.2.2 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Vertikal

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



Gambar 4. 10 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Vertikal

Dari grafik 4.10 yang mengalami penurunan suhu paling cepat dari keempat termokopel pada arah vertikal adalah termokopel T1. Peristiwa ini dipengengaruhi oleh letak pipa tembaga, karena letak pipa tembaga berada pada sisi paling dekat dengan input air kran yang masuk ke tangki TES. Dan T6 memiliki suhu yang relatif konstan dan paling lambat mengalami peurunan suhu karena letak pipa tembaga T6 berada paling jauh dari input air kran. Penurunan suhu T6 pada 0-0,5 jam berkisar 12℃, suhu T4 berkisar 36℃, suhu T2 berkisar 34℃, dan suhu T1 pada 0-0,5 jam berkisar 38℃. Sehingga pelepasan kalor selama 0-0,5 jam paling cepat yaitu terjadi pada T1.

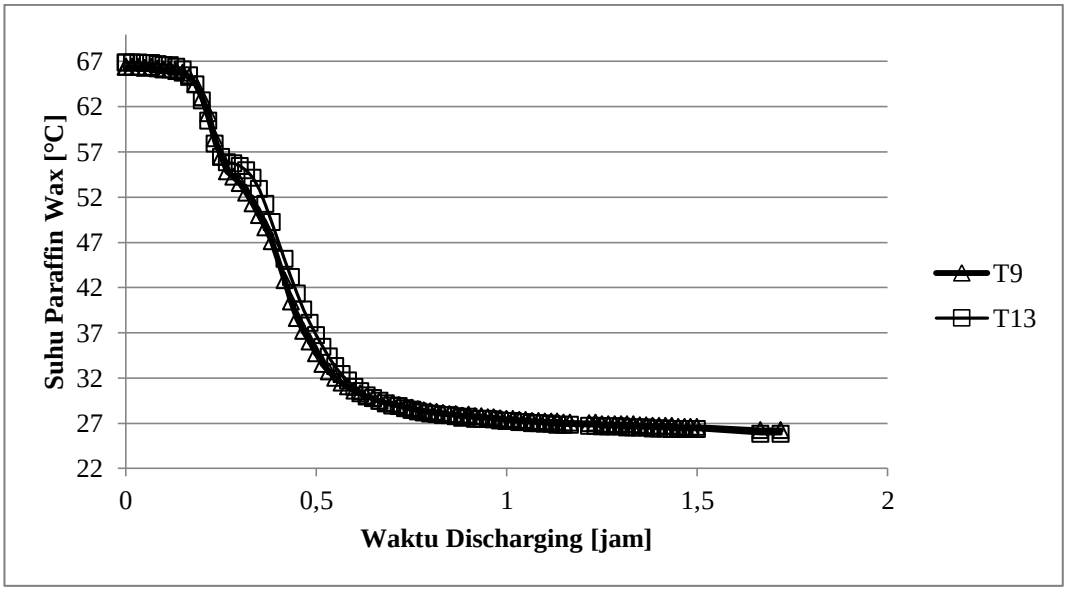


Gambar 4. 11 Evolusi Suhu Air dalam Arah Vertikal

Dari grafik 4.11 setelah suhu mencapai 63°C dan 0,2 jam ketiga termokopel mengalami penurunan suhu yang cepat dan drastis hingga mencapai suhu 26°C pada 1,2 jam. Dari ketiga termokopel pada 0,2-0,5 jam T17 mengalami penurunan suhu paling cepat dari 58°C-30°C karena letak T17 yang berada pada jalur input air masuk dari kran. Sedangkan T19 memiliki suhu yang relatif konstan dan paling lama mengalami penurunan suhu karena letak yang paling jauh dari input air masuk dari kran menuju tangki TES. Setelah 1,2 jam ketiga termokopel mengalami perubahan suhu yang relatif sama dan konstan karena saat itu air sudah tidak menerima panas dari PCM sehingga antar termokopel berselisih tidak lebih dari 2°C.

4.2.3 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Horisontal

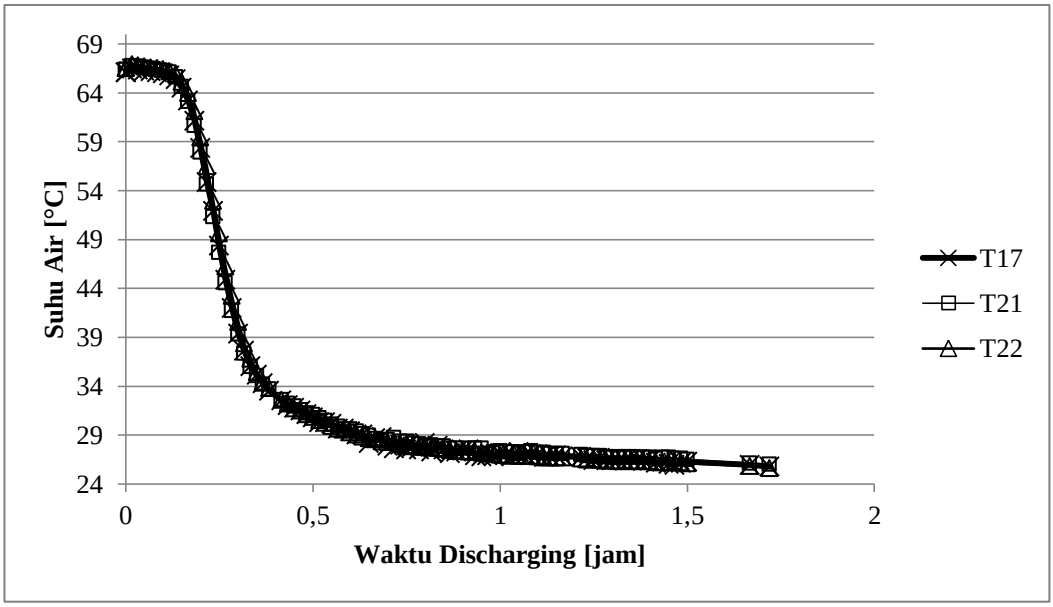
Hasil setelah pengujian pada variasi 1,5 LPM arah horisontal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.12 dan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.13.



Gambar 4. 12 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Horisontal

Dari Gambar 4.12 menunjukkan suhu pada kedua *termocuple* dari 0-0,2 jam mengalami penurunan suhu yang relatif sama. Tetai setelah 0,2 jam suhu pada T13 mengalami penurunan suhu yang lebih lama dibanding T9 dan membentuk

lengkungan pada suhu 55°C sampai pada suhu 48°C kedua suhu pada T9 dan T13 mulai stabil. Peristiwa ini dikarenanan air dari kran masuk melalui tengah tengki sehingga menyebabkan air panas yang berada ditengah bergeser berpindah ke sisi luar tengki sehingga suhu pada T13 lebih panas. Pada 0,9 jam sampai selesai tidak ada kenaikan suhu dan penurunan suhu sudah stabil karena PCM sudah tidak melepas kalor lagi. Dan perbedaan suhu dari kedua termokopel tidak lebih dari 2°C.



Gambar 4. 13 Evolusi Suhu Air dalam Arah Horisontal

Grafik horizontal air menunjukan penurunan suhu pada T17, T22, dan T21 tidak mengalami perbedaan yang signifikan, dari 0,15-0,4 jam suhu dari air mulai turun secara konstan dari suhu 64°C-31°C. pada 0,7 jam setelah mencapai suhu 28°C ketiga termokopel mengalami penurunan suhu yang relatif sama dan stabil dikarenakan HTF sudah tersebar merata sehingga perbedaan suhu antar termokopel tidak lebih dari 1°C.

Debit air mempengaruhi perbedaan suhu pada termokopel, jika menggunakan debit air yang kecil maka perbedaan suhu tidak terlalu signifikan hanya mencapai 2°C dikarenakan dorongan debit air dari kran yang kecil tidak menyebabkan putaran air yang masuk kedalam tangki besar sehingga suhu yang terbaca dari termokopel relatif sama.

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 4.1.

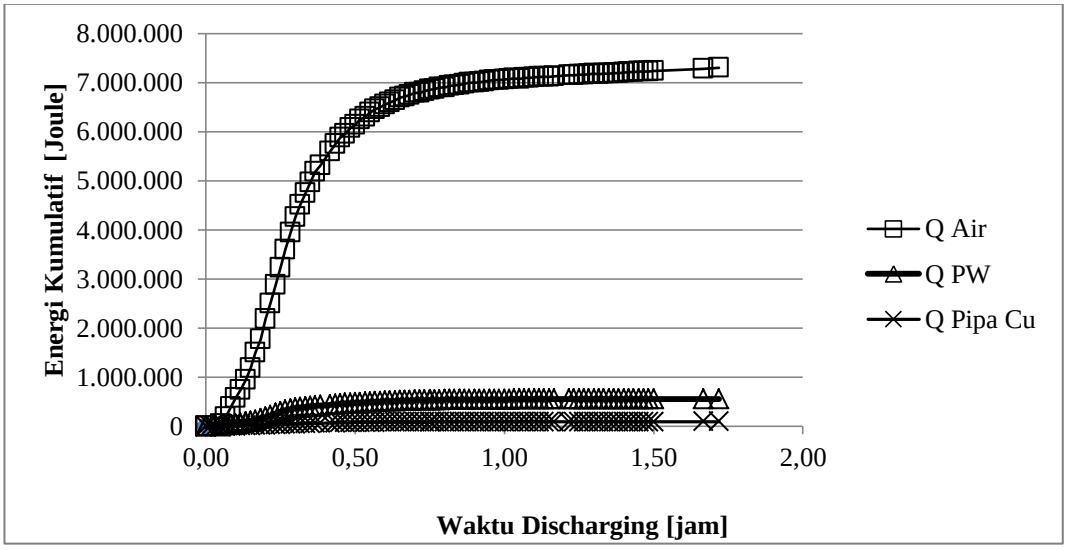
$$Q_{kum} = m \times c\dot{p} \times \Delta T \qquad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43{,}13 \times 4180 \times (66\dot{,}85 - 28{,}15)$$

$$Q_{kum} = 6.975.258{,}37 \text{ J}$$

Tabel 4. 2 Energi Kumulatif 1,5 LPM

Bahan	cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg.K)]	[kg]	°C	°C	°C	(J)
Air	4180	43,13	66,85	28,15	38,69	6.975.258,37
Pipa Cu	390	5,91	67,04	27,72	39,31	90.554,78
PW+20%Cu	1678	9,89	66,79	26,04	40,75	676.263,37



Gambar 4. 14 Grafik Energi Kumulatif

Grafik pada Gambar 4.14 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 2*0 % 1678 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax Cu 20%* mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,5 jam sebanyak 0-6 kJ, setelah 0,5 jam laju kenaikan hanya sebesar 6-7 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa *Cu*

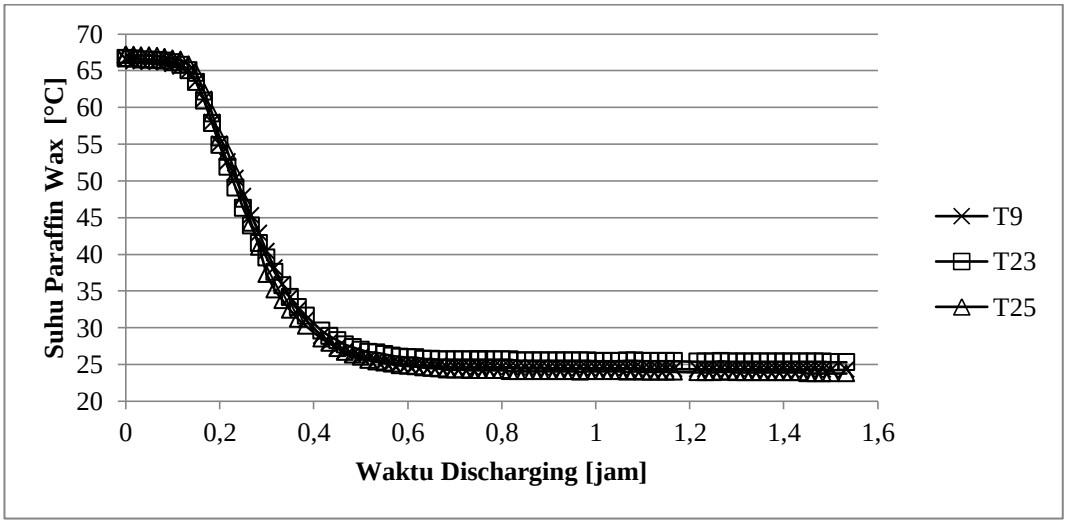
mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 0,1-0,6 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-0,5 jam sebesar 0-60 kJ, setelah 0,5 jam Q air menglami kenaikan yang relatif lebih stabil.

4.3 Evolusi Suhu pada Variasi 2 LPM

Data hasil penelitian laju pelepasan kalor yang terjadi dari PCM ke HTF perlu dilakukan pengamatan laju pelepasan temperatur PCM arah horisontal, arah vertikal, dan arah aksial. yang ada di dalam tangki TES. Hasil pengamatan dilihat dari 26 titik termokopel yang disusun dengan posisi Gambar 3.16 dan dilakukan pengambilan data dengan variasi laju aliran 1 LPM, 1,5 LPM, 2 LPM, dan 2,5 LPM pada proses *discharging kontinyu*. Proses pengambilan data *discharging kontinyu* dilakukan hingga suhu pada T32 mencapai 35°C.

4.3.1 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Aksial

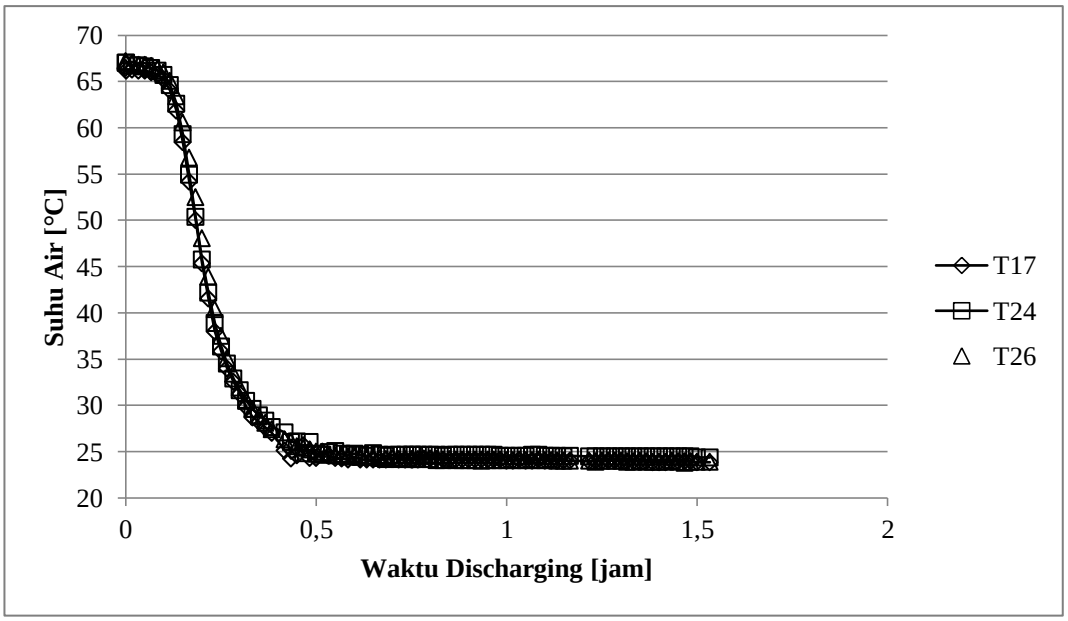
Hasil setelah pengujian pada variasi 2 LPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.15 dan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.16.



Gambar 4.15 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Aksial

Grafik pada gambar 4.15 menunjukan bahwa suhu pada ketiga termokopel mengalami penurunan suhu yang relatif sama. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalor dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan. Setelah 0,15 jam suhu ketiga termokopel mengalami penurunan secara

konstan karena menggunakan proses *discharging kontinyu*. Kemudian setelah 0,6 jam suhu relatif stabil. Perbedaan suhu antara ketiga termokopel tidak terlalu signifikan.

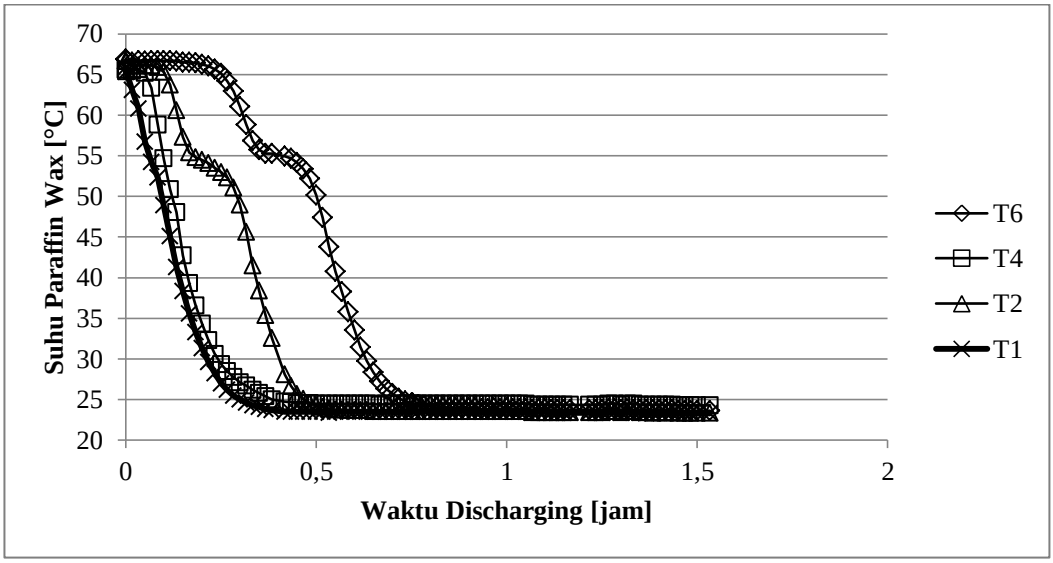


Gambar 4. 15 Evolusi Suhu Air dalam Arah Aksial

Grafik pada gambar 4.16 menunjukan bahwa suhu pada ketiga termokopel mengalami penurunan suhu yang relatif sama. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalor dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan. Pada 0,2-0,35 jam suhu pada T17 tidak stabil karena terjadi gejolak air yang terbaca pada T17. Setelah 0,15 jam suhu ketiga termokopel mengalami penurunan secara konstan karena menggunakan proses *discharging continue* dan suhu air mulai stabil setelah 0,5 jam karena air sudah tidak menerima kalor dari PCM.

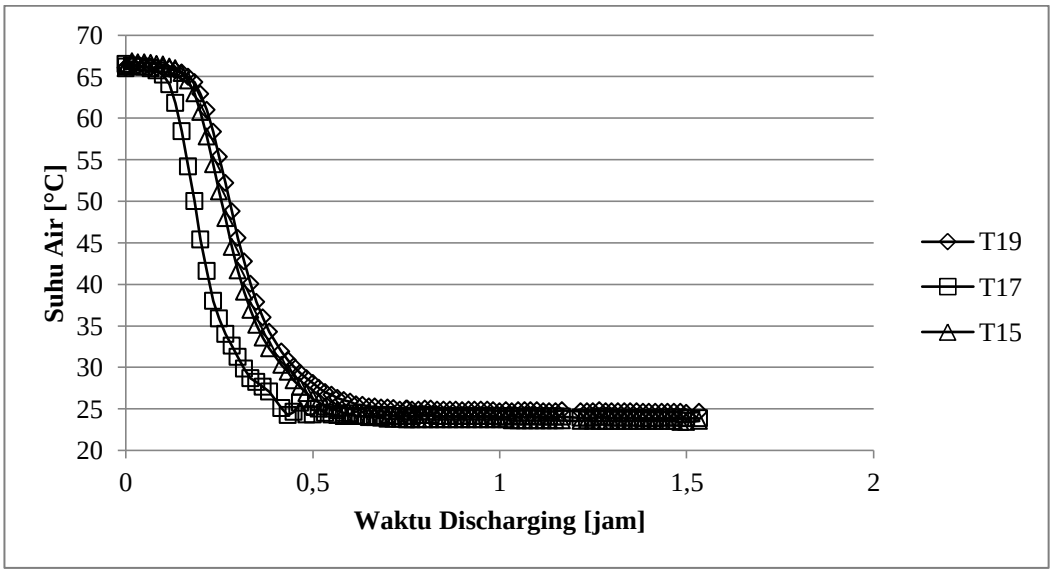
4.3.2 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Vertikal

Hasil setelah pengujian pada variasi 2 LPM arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% 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. 16 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Vertikal

Suhu pada T1 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya dapat dilihat pada gambar 4.17. Rendahnya T1 dipengengaruhi 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 10℃, suhu T4 berkisar 41℃, suhu T2 berkisar 40℃, dan suhu T1 pada 0-0,5 jam berkisar 42℃. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T1 selama satu jam.

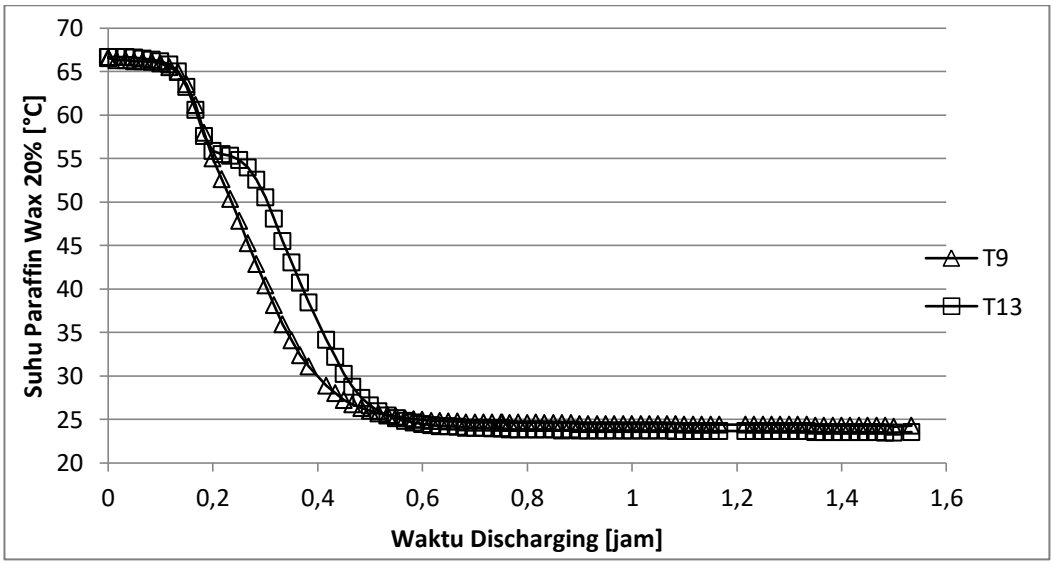


Gambar 4. 17 Evolusi Suhu Air dalam Arah Vertikal

Pada gambar 4.18 suhu pada T17 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel. Rendahnya T15 dipengengaruhi 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 0-0,4 jam berkisar 36℃, suhu T17 berkisar 42℃, dan suhu T15 pada 0-4 jam berkisar 38℃. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T17. Pada 0,4-0,5 jam terjadi gejolak air yang menyebabkan perubahan suhu tidak beraturan.

4.3.3 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Horisontal

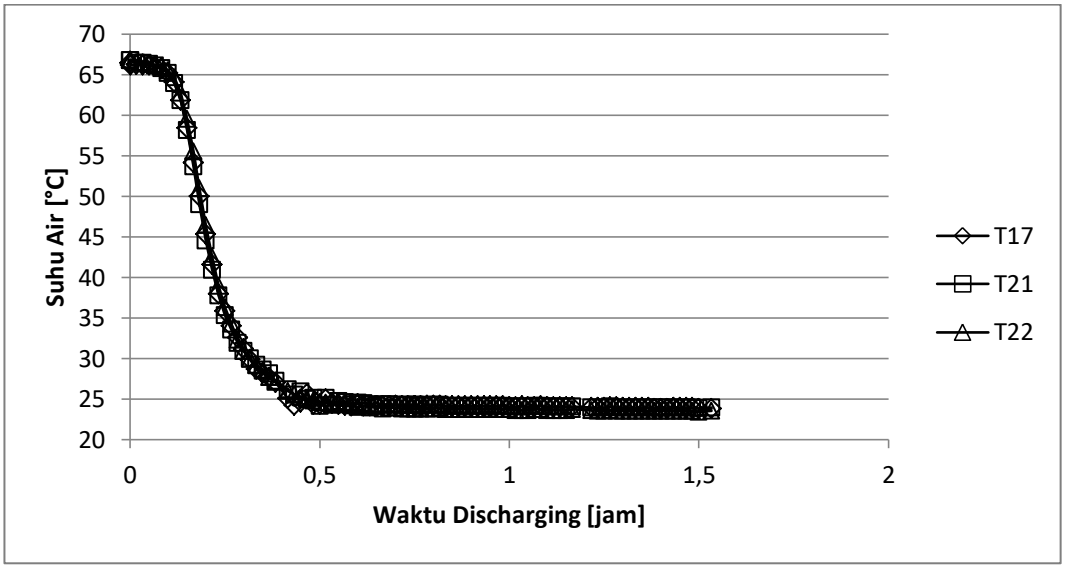
Hasil setelah pengujian pada variasi 2 LPM arah horisontal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.18 dan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.19.



Gambar 4. 18 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Horisontal

Dari Gambar 4.18 menunjukkan suhu pada kedua termokopel dari 0-0,2 jam mengalami penurunan suhu yang relatif sama. Tetai setelah 0,2 jam suhu pada T13 mengalami penurunan suhu yang lebih lama dibanding T9 dan membentuk lengkungan pada suhu 55°C sampai pada suhu 50° peristiwa ini dikarenanan air dari kran masuk melalui tengah tengki sehingga menyebabkan air panas yang berada ditengah bergeser berpindah ke sisi luar tengki sehingga suhu pada T13

lebih panas. Pada 0,6 jam sampai selesai tidak ada kenaikan suhu dan penurunan suhu sudah stabil karena PCM sudah tidak melepas kalor lagi.



Gambar 4. 19 Evolusi Suhu Air dalam Arah Horisontal

Grafik horizontal air menunjukan penurunan suhu pada T17, T21, T22 tidak mengalami perbedaan yang signifikan hanya berkisar 1°C - 2°C, tetapi pada T17 mengalami penurunan suhu yang tidak beraturan pada 0,4 - 0,5 jam peristiwa ini disebabkan oleh gejolak air yang melewati T17. Penurunan suhu yang signifikan terjadi pada 0,2 - 0,5 jam antara suhu 62°C hingga 25°C. Dan yang mengalami penurunan paling besar yaitu T17 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 25°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℃.

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 4.1.

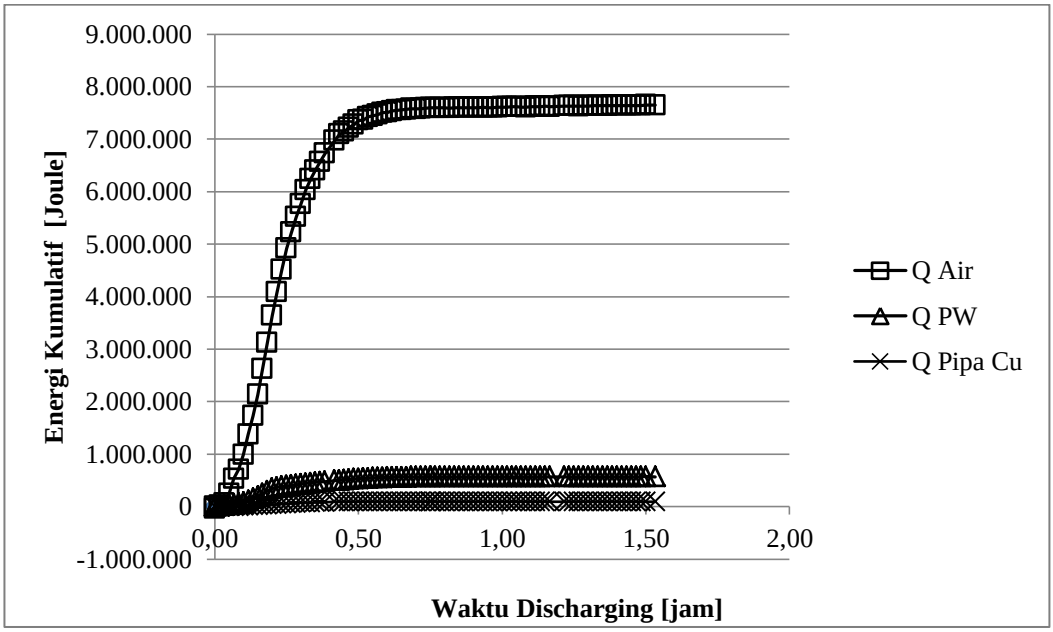
$$Q_{kum} = m \times c\dot{p} \times \Delta T \qquad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43.13 \times 4180 \times (66\dot{6}.37 - 23.97)$$

$$Q_{kum} = 7.644.016{,}16 \text{ J}$$

Tabel 4. 3 Energi Kumulatif 2 LPM

Bahan	Cp [J/(kg. K)]	Massa [kg]	T1 °C	T2 °C	ΔT °C	Q kum (J)
Air	4180	43,13	66,37	23,97	42,40	7.644.016,16
Pipa Cu	390	5,91	63,01	25,81	37,20	85.688,62
PW+20%Cu	1678	9,89	66,56	23,85	42,71	708.790,38



Gambar 4. 20 Grafik Energi Kumulatif

Grafik pada Gambar 4.20 Q pipa *Cu* lebih rendah dari air dan *paraffin wax Cu* 20% disebabkan nilai Cp yang rendah yaitu 390 J/kg.K, sedangkan nilai Cp air 4180 J/kg.K dan Cp *Paraffin Wax Cu 2*0 % 1678 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax Cu* 20% mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,5 jam sebanyak 5 kJ, setelah 0,5 jam laju kenaikan hanya sebesar 0-1 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa *Cu* mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 0,3-0,9 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-5 jam sebesar 7.355 kJ, setelah 0,5 jam relatif

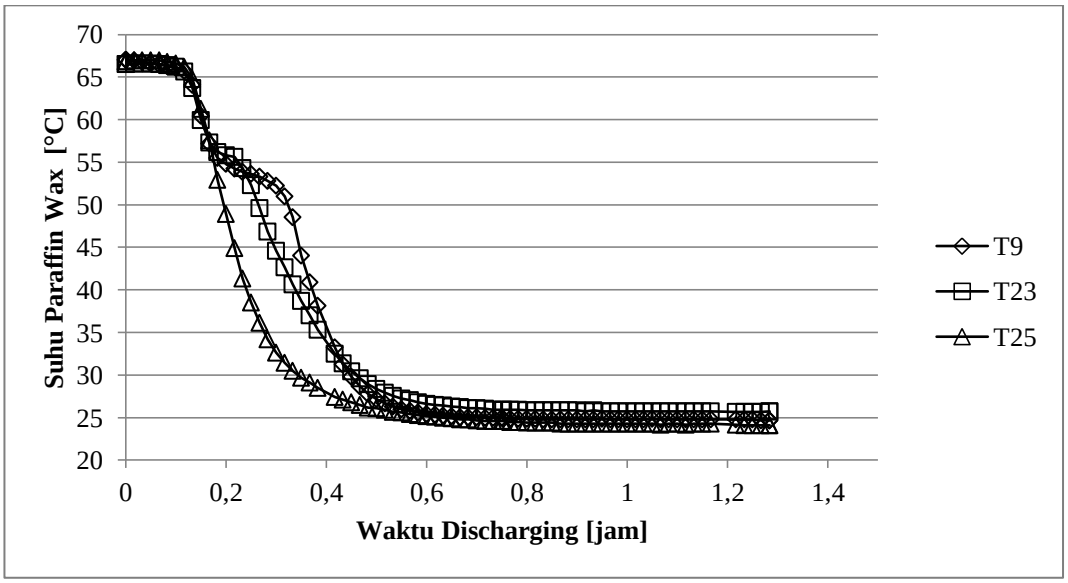
mengalami kenaikan lebih stabil. Besarnya Q air dipengaruhi oleh cepatnya peurunan suhu saat *discharging*.

4.4 Evolusi Suhu 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 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 kontiyu.* Proses pengambilan data menggunakan discharging sampai suhu pada T32 mencapai 35°C.

4.4.1 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Aksial

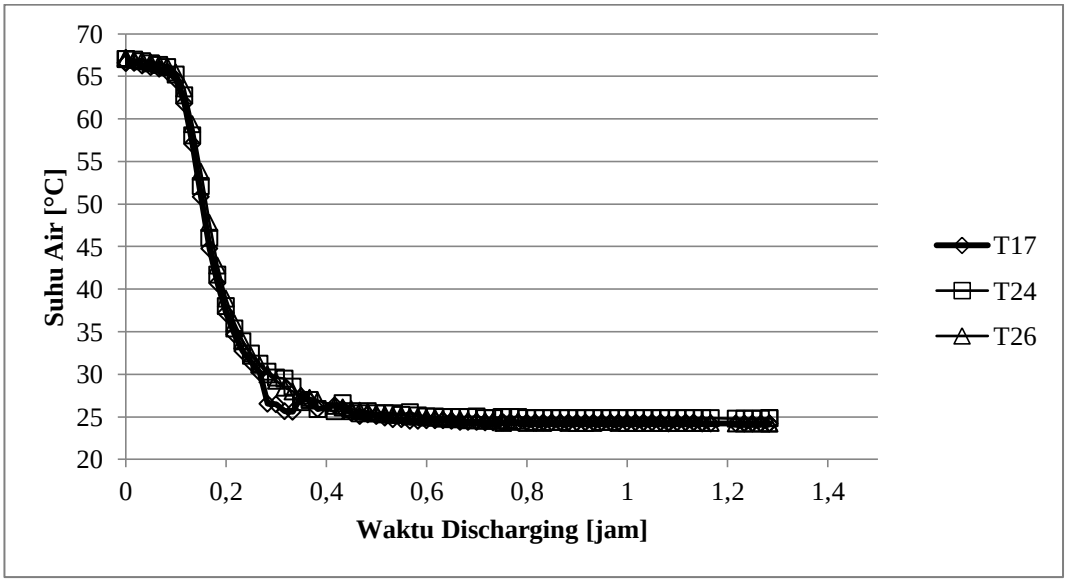
Hasil setelah pengujian pada variasi 2,5 LPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 20% dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada PCM dilihat pada gambar 4.21 dan grafik evolusi suhu air dilihat pada gambar 4.22.



Gambar 4. 21 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Aksial

Grafik pada gambar 4.21 menunjukan bahwa suhu pada ketiga termokopel mengalami penurunan suhu yang relatif sama dari 0-0,18 jam karena kalor yang diberikan PCM ke HTF 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 PCM dan pengaruh suhu HTF yang diberikan kepada PCM tidak merata karena titik letak termokopel yang berbeda. Setelah 0,6 jam suhu ketiga termokopel mengalami penurunan secara konstan karena menggunakan proses *discharging kontinyu*. Perbedaan suhu antara ketiga termokopel tidak terlalu signifikan.

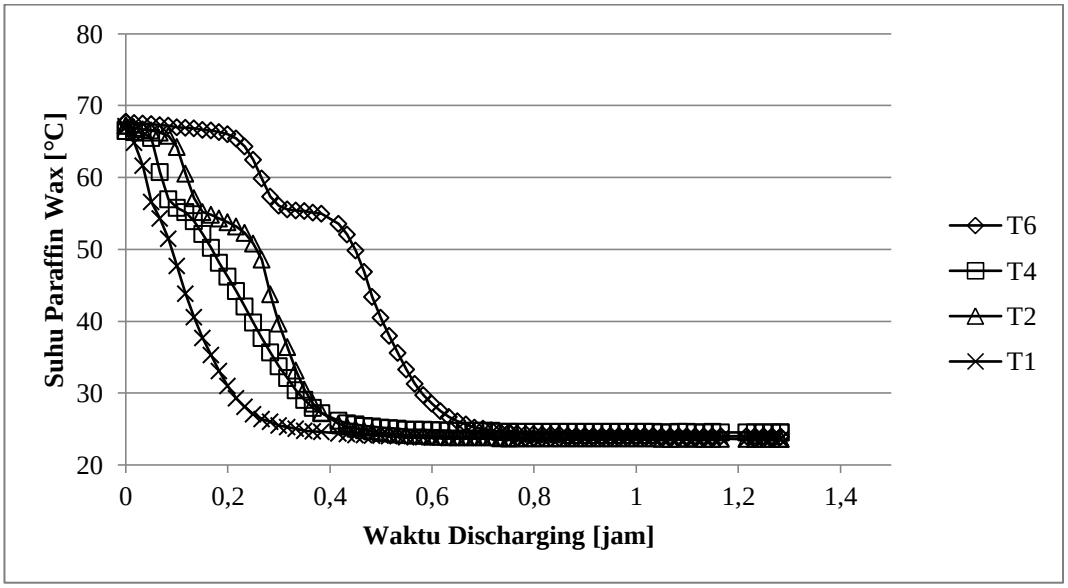


Gambar 4. 22 Evolusi Suhu Air dalam Arah Aksial

Grafik aksial air menunjukan penurunan suhu pada T17, T24, T26 tidak mengalami perbedaan yang signifikan, tetapi pada T17 mengalami penurunan suhu yang tidak beraturan pada 0,23 - 0,35 jam peristiwa ini disebabkan oleh gejolak air yang melewati T17. Penurunan suhu yang signifikan terjadi pada 0,1 - 0,4 jam antara suhu 64°C hingga 25°C. Setelah suhu 25°C dan 0,4 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℃.

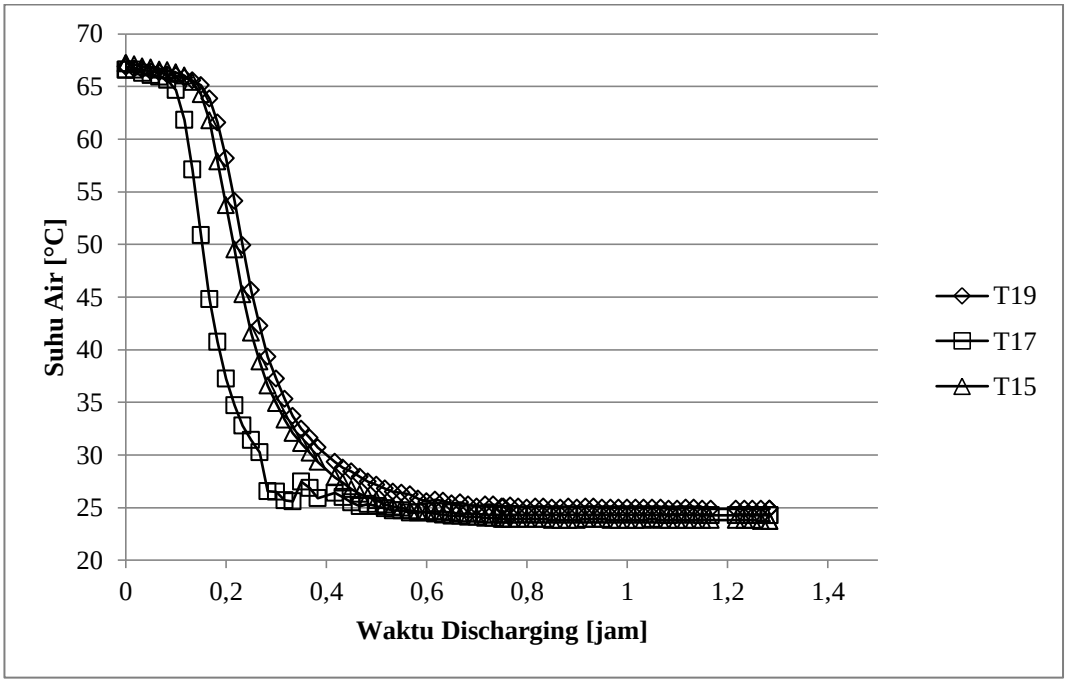
4.4.2 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Vertikal

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



Gambar 4. 23 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Vertikal

Suhu pada T1 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya dapat dilihat pada gambar 4.24. Rendahnya T1 dipengengaruhi 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 0-0,2 jam berkisar 2C, suhu T4 berkisar 20℃, suhu T2 berkisar 11℃, dan suhu T1 pada 0-1 jam berkisar 33℃. Sehingga pelepasan alor paling cepat pada T1.

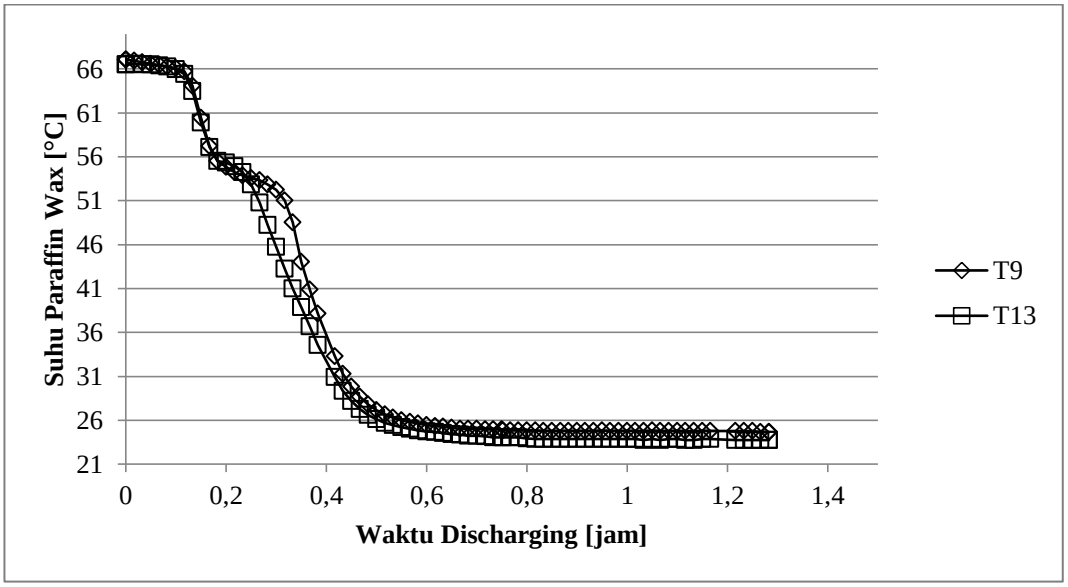


Gambar 4. 24 Evolusi Suhu Air dalam Arah Vertikal

Suhu pada T17 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. Pada 0,25-0,38 suhu yang terbaca mengalami naik turun, peristiwa ini terjadi karena adanya gejolak air yang melewati T17. Pada T19 memiliki penurunan suhu yang paling lama karena letak yang paling jauh dari input air kran. Penurunan suhu T19 pada 0-0,3 jam berkisar 29℃, suhu T17 berkisar 39℃, dan suhu T15 berkisar 38℃. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T17.

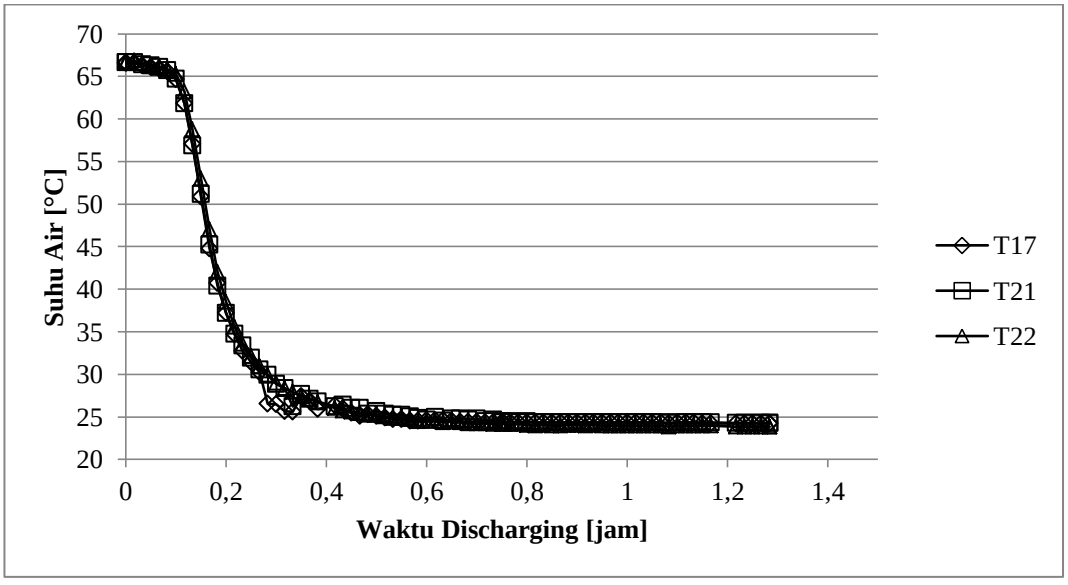
4.4.3 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Horisontal

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



Gambar 4. 25 Evolusi Suhu Campuran PW + 20% Cu dalam Arah Horisontal

Grafik menunjukkan suhu pada kedua termokopel dari 0-0,2 jam tidak mengalami perbedaan yang signifikan. Tetapi pada 56℃ hingga 54℃ terjadi lengkungan, Hal ini disebabkan karena PCM sempat menahan suhu saat terjadinya pelepasan kalor dari PCM ke HTF dan T9 menahan kalor lebih lama disbanding T13. Pada waktu 0-0,3 jam penurunan suhu T13 berkisar 15°C dan suhu T9 berkisar 21°C. setelah 0,4 jam penurunan suhu dikedua termokopel relatif sama dan perbedaan suhu keduanya hanya berkisar 1-2°C.



Gambar 4. 26 Evolusi Suhu Air dalam Arah Horisontal

Grafik horizontal air menunjukan penurunan suhu pada T17, T21, T22 tidak mengalami perbedaan yang signifikan, tetapi pada T17 mengalami penurunan suhu yang tidak beraturan pada 0,3 - 0,4 jam peristiwa ini disebabkan oleh gejolak air yang melewati T17. Penurunan suhu yang signifikan terjadi pada 0,1 - 0,4 jam antara suhu 64°C hingga 26°C. Dan yang mengalami penurunan paling besar yaitu T17 hal ini disebabkan karena T17 terkena debit air kran terlebih dahulu dibandingkan T21 dan T22, sehingga penurunan suhu T17 lebih cepat. Setelah suhu 26°C dan 0,4 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℃.

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 4.1.

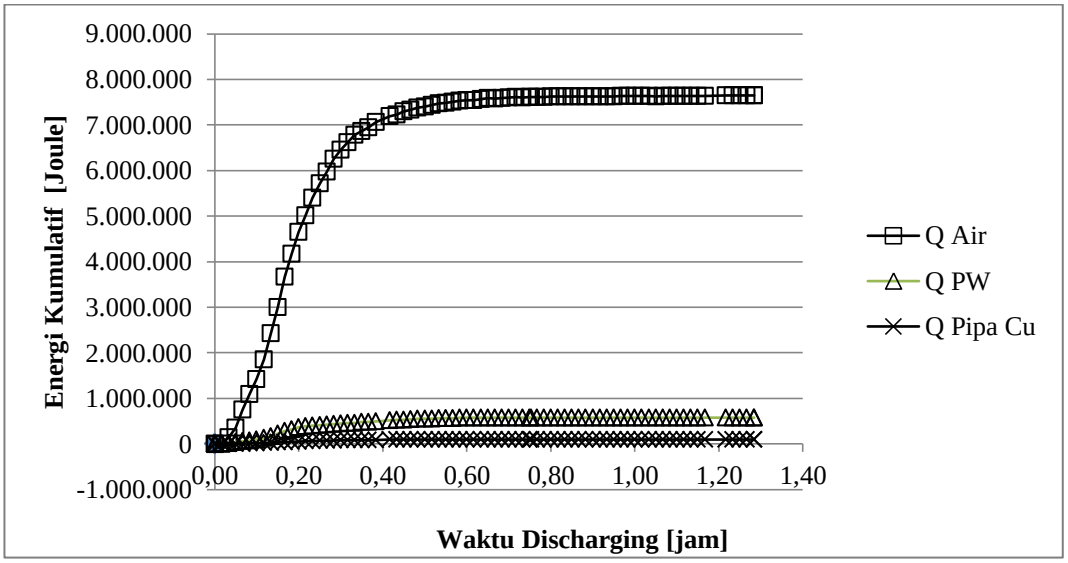
$$Q_{kum} = m \times c\dot{p} \times \Delta T \qquad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43{,}13 \times 4180 \times (66\dot{,}70 - 24{,}29)$$

$$Q_{kum} = 7.656.455{,}42 \text{ J}$$

Tabel 4. 4 Energi Kumulatif 2,5 LPM

Bahan	cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg. K)]	[kg]	^{o}C	^{o}C	^{o}C	(J)
Air	4180	43,13	66,70	24,29	42,11	7.656.455,42
Pipa Cu	390	5,91	64,76	25,73	39,04	89.915,17
PW+20%Cu	1678	9,89	67,07	24,18	4289	711.777,56



Gambar 4. 27 Grafik Energi Kumulatif

Grafik pada gambar 4.26 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 0-0,6 jam sebanyak 573 kJ, setelah 0,6 jam laju kenaikan hanya sebesar 573-581 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa *Cu* mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 0,8-1 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-6 jam sebesar 7548 kJ, setelah 0,6 jam relatif mengalami kenaikan lebih stabil. Besarnya Q air dipengaruhi oleh cepatnya penurunan suhu saat discharging.

4.5 Laju Pelepasan Kalor dan Laju Penurunan Suhu

4.5.1 Laju Pelepasan Kalor Paraffin Wax + Cu 20% berat

Laju pelepasan kalor pada paraffin wax Cu 20% dapat dicari dengan persamaan 4.1:

$$\dot{Q} = \frac{\mathbf{Q}_{kumulatif}}{\mathbf{t}_{total}} \qquad (4.1)$$

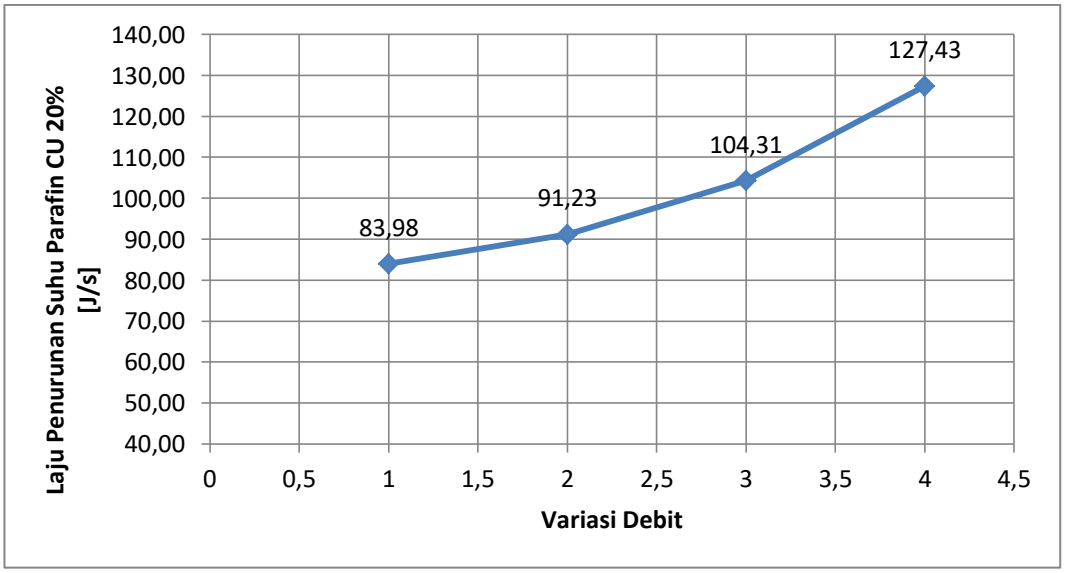
$$\dot{Q} = \frac{\mathbf{Q}_{kumulatif}}{\mathbf{t}_{total}}$$

$$\dot{Q} = \frac{\mathbf{1.029.378,78}}{\mathbf{16585}}$$

$$\dot{Q} = 62{,}07 \text{ J/s}$$

Tabel 4. 5 Laju Pelepasan Kalor Paraffin Wax Cu 20%

V	T1 PCM	T2 PCM	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 20%	$\dot{Q}$
LPM	**°C**	**°C**	**°C**	(detik)	(J)	(J)	(J/s)
1	66,14	25,05	41,09	16.585	7.377.020,99	1.029.378,78	62,07
1.5	66,14	27,95	38,20	14.825	6.975.258,37	994.180,17	67,06
2	62,50	26,07	36,43	8.405	6.641.135,76	835.264,46	99,38
2.5	65,44	25,92	39,52	9.690	7.040.438,55	982.907,99	101,44



Gambar 4. 28 Laju Pelepasan Kalor Paraffin Wax + Cu 20%

Grafik pada gambar 4.27 diatas menunjukan bahwa laju pelepasan kalor pada *paraffin wax Cu* 20% paling rendah yaitu pada variasi 1 LPM yaitu 83,98 J/s. Sedangkan laju pelepasan terbesar pada variasi 2,5 LPM yaitu 127,43 J/s. Variasi 2,5 LPM memiliki laju pelepasan terbesar karena menggunakan debit paling besar sehingga memiliki perubahan suhu yang cepat dan mengalami pelepasan kalor 127,43 joule dalam setiap detik.

4.5.2 Laju Pelepasan Kalor Air

Laju pelepasan kalor pada air dapat dicari dengan persamaan 4.2:

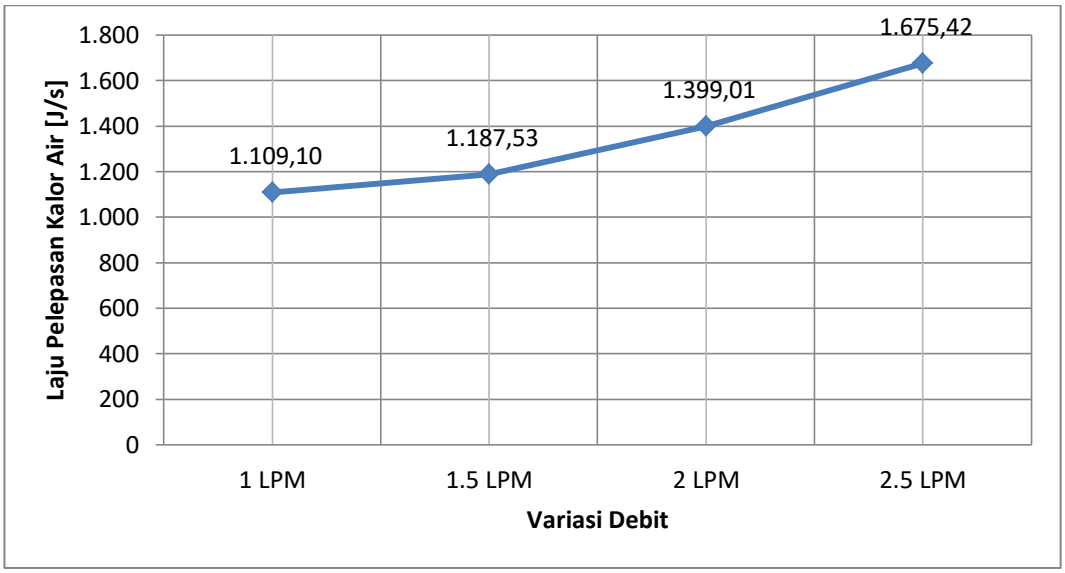
$$\dot{Q} = \frac{Q_{kumulatif}}{t_{total}} \qquad (4.2)$$

$$\dot{Q} = \frac{7.377.020,99}{16585}$$

$$\dot{Q} = 444,8 \text{ J/s}$$

Tabel 4. 6 Laju Pelepasan Kalor Air

V	T1 Air	T2 Air	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 20%	$\dot{Q}$
LPM	**°C**	**°C**	**°C**	(detik)	(J)	(J)	(J/s)
1	66,17	25,25	40,92	16.585	7.377.020,99	1.029.378,78	444,80
1.5	66,85	28,15	38,69	14.825	6.975.258,37	994.180,17	470,51
2	63,07	26,24	36,84	8.405	6.641.135,76	835.264,46	790,14
2.5	65,09	26,03	39,06	9.690	7.040.438,55	982.907,99	726,57



Gambar 4. 29 Laju Pelepasan Kalor Air

Grafik pada gambar 4.28 diatas menunjukan bahwa laju pelepasan kalor air paling rendah yaitu pada variasi 1 LPM yaitu 1.109,10 J/s karena memiliki waktu yang paling lama 1,8 jam diantara variasi lainnya. Sedangkan laju pelepasan terbesar pada variasi 2,5 LPM yaitu 1.675,42 J/s karena memiliki waktu yang tercepat saat pengujian. Variasi 2,5 LPM memiliki waktu yang tercepat karena debit air yang besar menyebabkan proses penurunan lebih cepat dari variasi yang suhu lainnya. Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 1,3 jam dan

variasi 2,5 LPM memiliki perubahan suhu paling rendah daripada ketiga variasi lainnya.

4.5.3 Laju Penurunan Suhu Paraffin Wax + Cu 20% berat

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

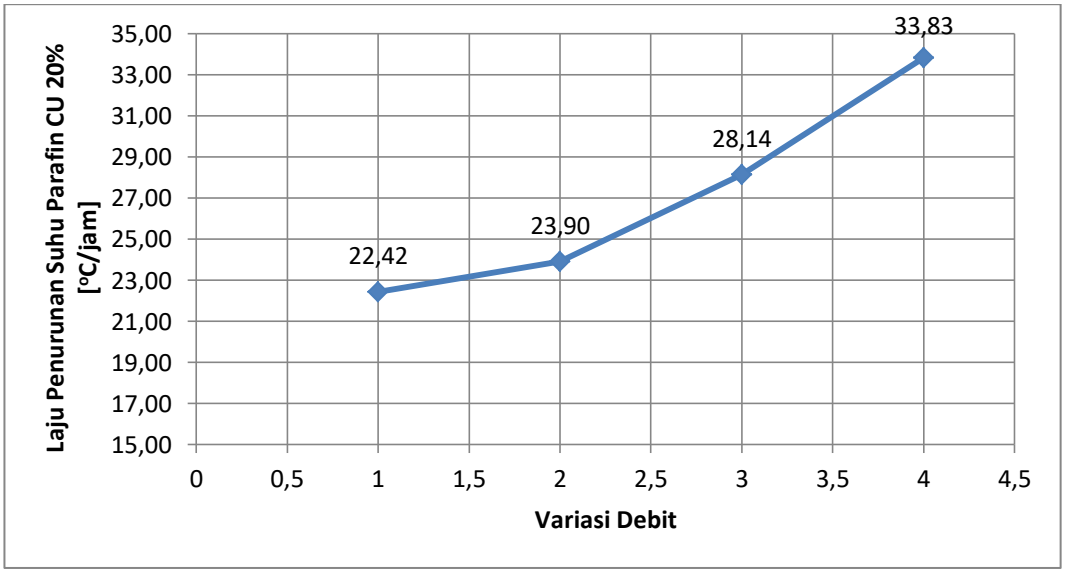
$$\text{Laju Penurunan Suhu} = \frac{(T_{awal} - T_{akhir}) \times 3600}{t_{total}} \quad (4.3)$$

$$= \frac{(66{,}14 - 25{,}05) \times 3600}{16585}$$

$$= 8.92\,℃/\text{jam}$$

Tabel 4. 7 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	°C	°C	°C	(detik)	(J)	(J)	(J)
1	66,14	25,05	41,09	16.585	7.377.020,99	1.029.378,78	96.338,79
1.5	66,14	27,95	38,20	14.825	6.975.258,37	994.180,17	90.554,78
2	62,50	26,07	36,43	8.405	6.641.135,76	835.264,46	85.688,62
2.5	65,44	25,92	39,52	9.690	7.040.438,55	982.907,99	89.915,17



Gambar 4. 30 Laju Penurunan Suhu *Paraffin Wax Cu* 20%

Grafik pada gambar 4.29 diatas menunjukan bahwa laju penurunan suhu *paraffin wax Cu* 20% paling rendah 22,42°C/jam yaitu pada variasi 1 LPM karena memiliki waktu yang paling lama 1,8 jam diantara variasi lainnya. Sedangkan laju

penurunan suhu air terbesar 33,83℃/jam pada variasi 2,5 LPM karena memiliki waktu yang tercepat saat pengujian. Variasi 2,5 LPM memiliki waktu yang tercepat karena debit air yang besar membuat proses penurunan lebih cepat. Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM selama 1,3 jam. Sehingga pada 2,5 LPM mengalami rata-rata penurunan suhu 33,83℃ dalam setiap jam dan pada 1 LPM mengalami rata-rata penurunan suhu 22,42℃ dalam setiap jam.

4.5.4 Laju Penurunan Suhu Air

Laju penurunan suhu pada air dapat dicari dengan persamaan 4.4.

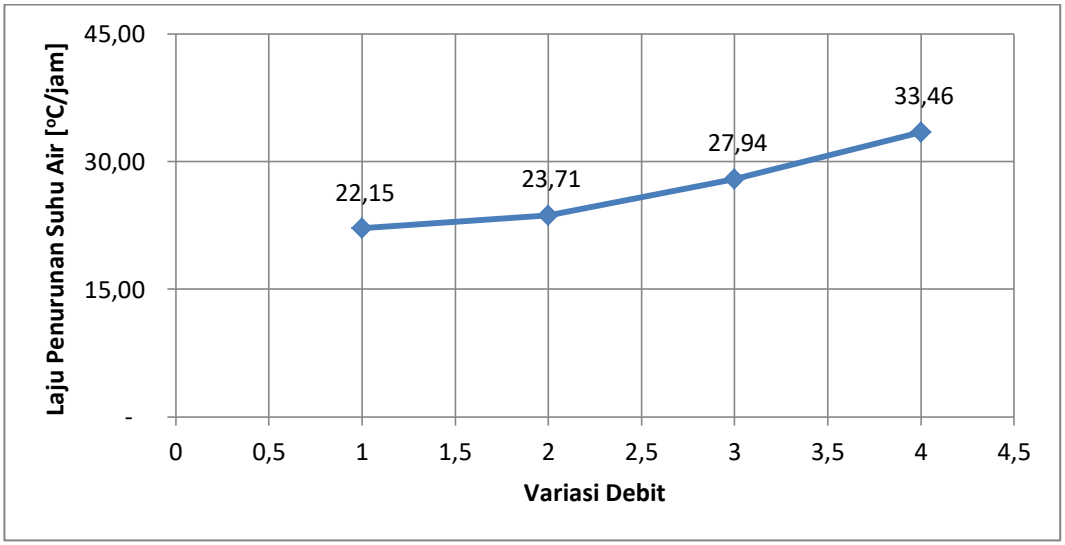
$$\text{Laju Penurunan Suhu} = \frac{(T_{awal} - T_{akhir}) \times 3600}{t_{total}} \quad (4.4)$$

$$= \frac{(66{,}17 - 25{,}25) \times 3600}{16585}$$

$$= 8.88\,℃/\text{jam}$$

Tabel 4. 8 Laju Penurunan Suhu Air

V	T1 Air	T2 Air	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 20%	Q pipa Cu
LPM	**°C**	**°C**	**°C**	(detik)	(J)	(J)	(J)
1	66.17	25.25	40.92	16585	7.377.020,99	1.029.378,78	96.338,79
1.5	66.85	28.15	38.69	14825	6.975.258,37	994.180,17	90.554,78
2	63.07	26.24	36.84	8405	6.641.135,76	835.264,46	85.688,62
2.5	65.09	26.03	39.06	9690	7.040.438,55	982.907,99	89.915,17



Gambar 4. 31 Laju Penurunan Suhu Air

Grafik pada gambar 4.30 diatas menunjukan bahwa laju penurunan suhu air paling rendah 22,15℃/jam yaitu pada variasi 1 LPM karena memiliki waktu yang paling lama 1,8 jam diantara variasi lainnya. Sedangkan laju penurunan suhu air terbesar 33,46°C/jam pada variasi 2,5 LPM karena memiliki waktu yang tercepat saat pengujian karena debit air yang besar membuat proses penurunan lebih cepat. Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 1,3 jam. Sehingga pada 2,5 LPM mengalami rata-rata penurunan suhu 33,46°C dalam setiap jam dan pada 1 LPM mengalami rata-rata penurunan suhu 22,15℃ dalam setiap jam.