

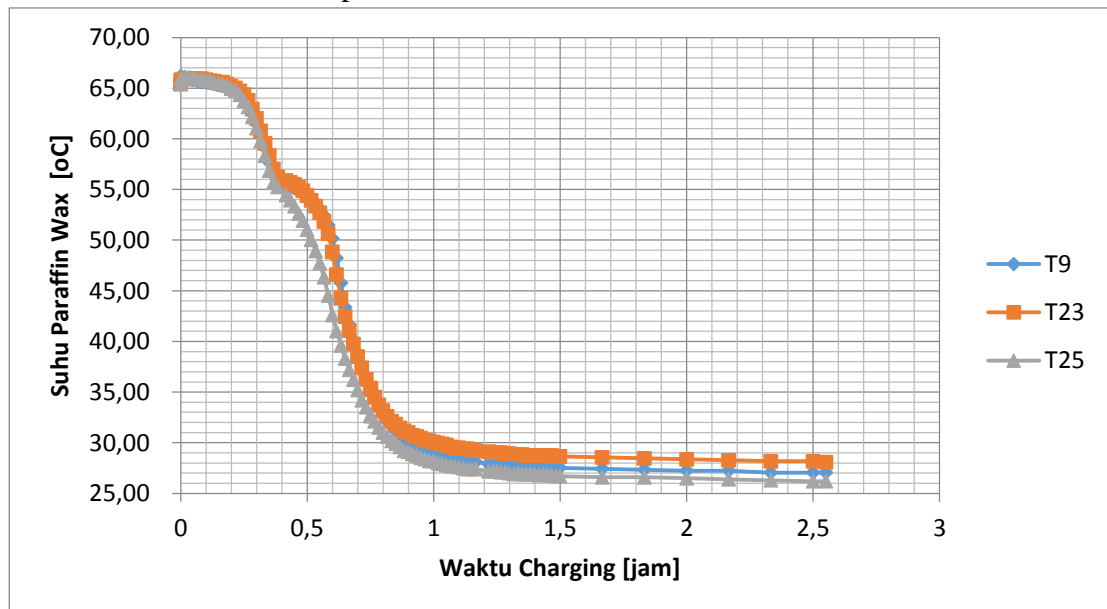
BAB IV

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 temperature PCM arah aksial, arah vertikal, dan arah yang ada di dalam tengki TES. Hasil pengamatan yang dilihat dari 26 titik termokopel tersebar dengan posisi Gambar 3.11 dan dilakukan dengan variasi laju aliran 1 LPM, 1.5 LPM, 2 LPM, dan 2.5 LPM pada proses *discharging* kontinyu. Proses pengambilan data menggunakan *discharging* secara kontinyu air selalu di alirkan air terus menurus sampai suhu pada T32 mencapai 35°C. Laju pelepasan temperatur variasi 1 LPM relatif lebih lama dari pada variasi lainnya karena menggunakan debit air paling kecil dan selesai pengambilan data mencapai 2:33 jam.

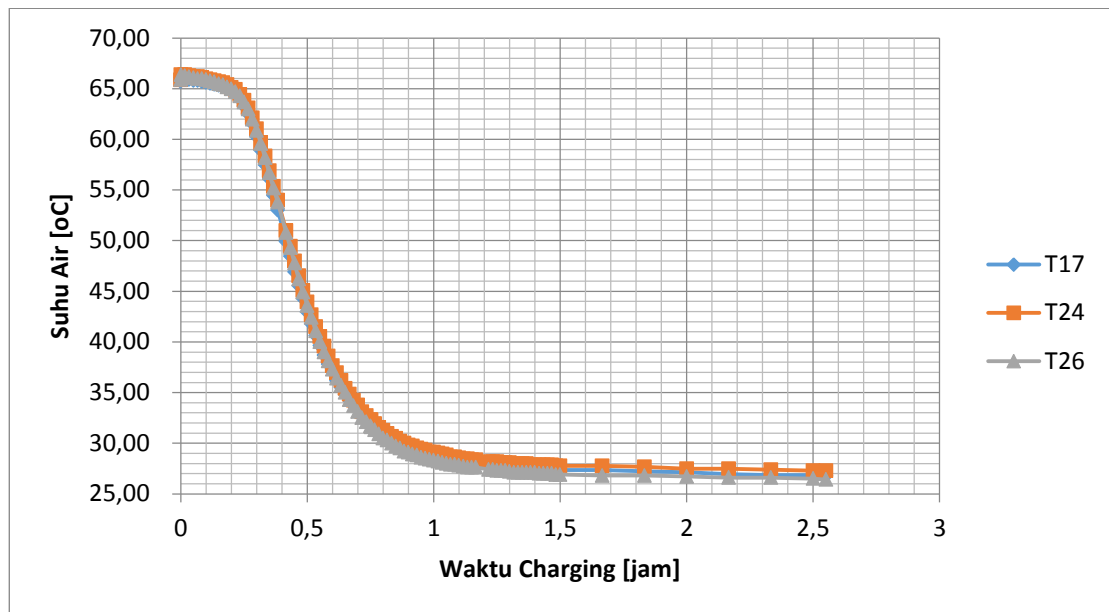
4.1.1. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Aksial



Gambar 4.1 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Aksial

Grafik menunjukan bahwa suhu pada ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan namun pada 0,4-0,5 jam *paraffin wax Cu 10%* sempat menahan suhu sekitar 55°C. peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalor dari PCM ke

HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan tetapi suhu HTF mengalami kenaikan meskipun dalam keadaan keran air tetap terbuka.



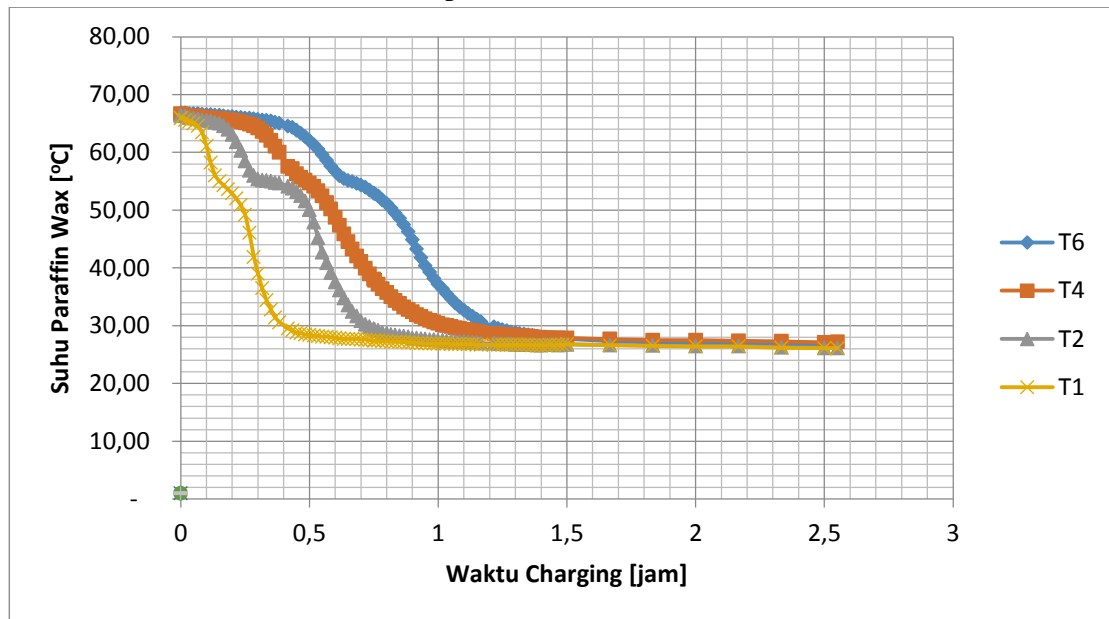
Gambar 4.2 Evolusi Suhu Air dalam Arah Aksial

Grafik aksial air cenderung terdapat kenaikan suhu dari pada grafik aksial *paraffin wax Cu 10%*. Naik turun grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging*. Naiknya suhu terjadi karena keran air selalu dibuka sehingga air menyerap panas dari PCM. Setelah keran air dibuka maka air menyerap panas dari PCM sehingga saat keran dibuka suhu rata-rata mengalami kenaikan 1-2°C pada waktu 0,6-1,4 jam dan setelah waktu 3-4,6 jam suhu dalam tangki konstan pada 25°C mengikuti suhu dari air keran.

Suhu pada ketiga termokopel dari 0-1,5 jam mengalami penurunan grafik karena terjadi pelepasan kalor dan setelah dari 1,5 jam suhu dalam pipa cenderung lebih stabil tidak mengalami kenaikan karena *paraffin wax*

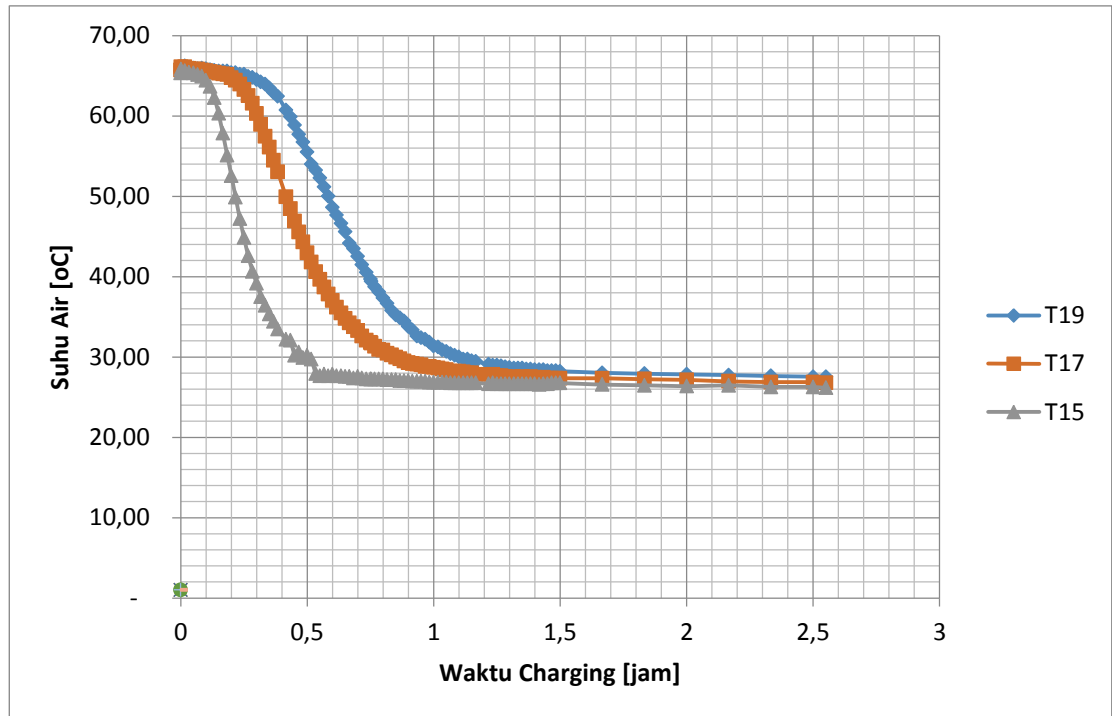
Cu 10% berat sudah berubah fasa menjadi solid sempurna. Suhu pada ketiga termokopel dari 0-1,5 jam tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil sehingga turbulen aliran air pun kecil. Maka dari itu semakin besar debit yang dipakai maka turbulen aliran air pun semakin besar dan membuat ketiga termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar.

4.1.2. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Vertikal



Gambar 4.3 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Vertikal

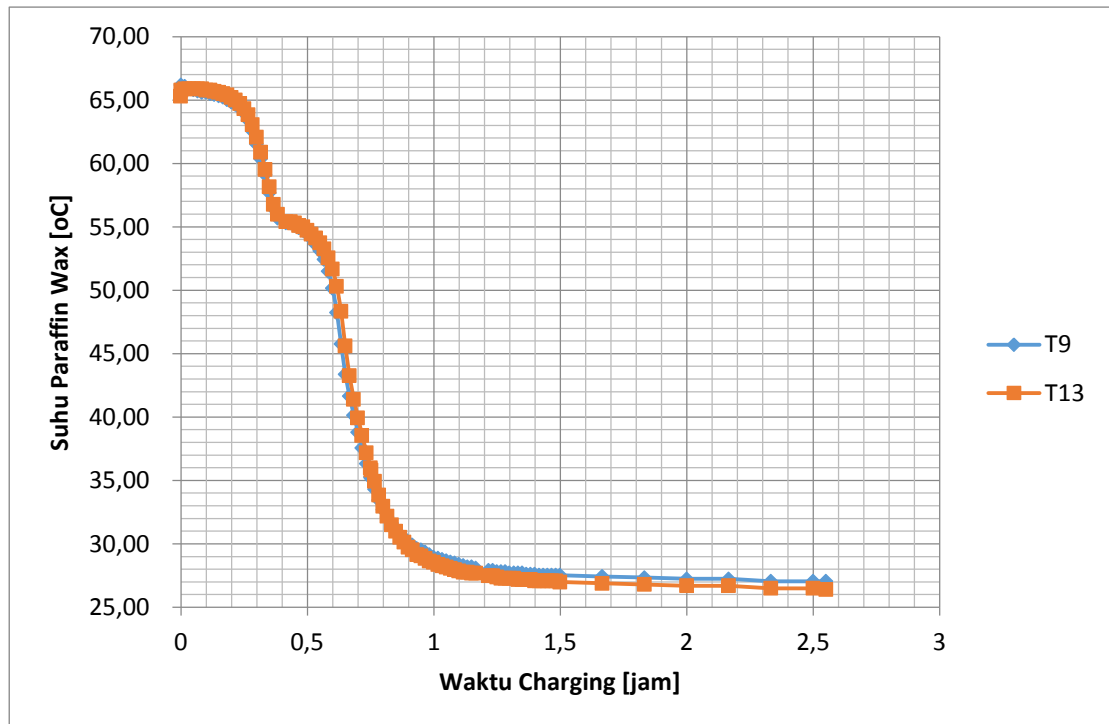
Suhu pada T1 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. Rendahnya T1 dipengaruhi oleh letak pipa tembaga, letak pipa tembaga berada pada paling dekat dengan *input* air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T6 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak pipa tembaga yang paling jauh dari *input* air kran. Penurunan suhu T6 pada 0-1 jam berkisar 11 °C, suhu T4 berkisar 14 °C, suhu T2 berkisar 26 °C, dan suhu T1 pada 0-0,5 jam berkisar 38 °C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T1 selama satu jam.



Gambar 4.4 Evolusi Suhu Air Dalam Arah Vertikal

Suhu pada T15 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 0-0,5 jam berkisar 7 °C, suhu T17 berkisar 27°C, dan suhu T15 berkisar 37°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T15.

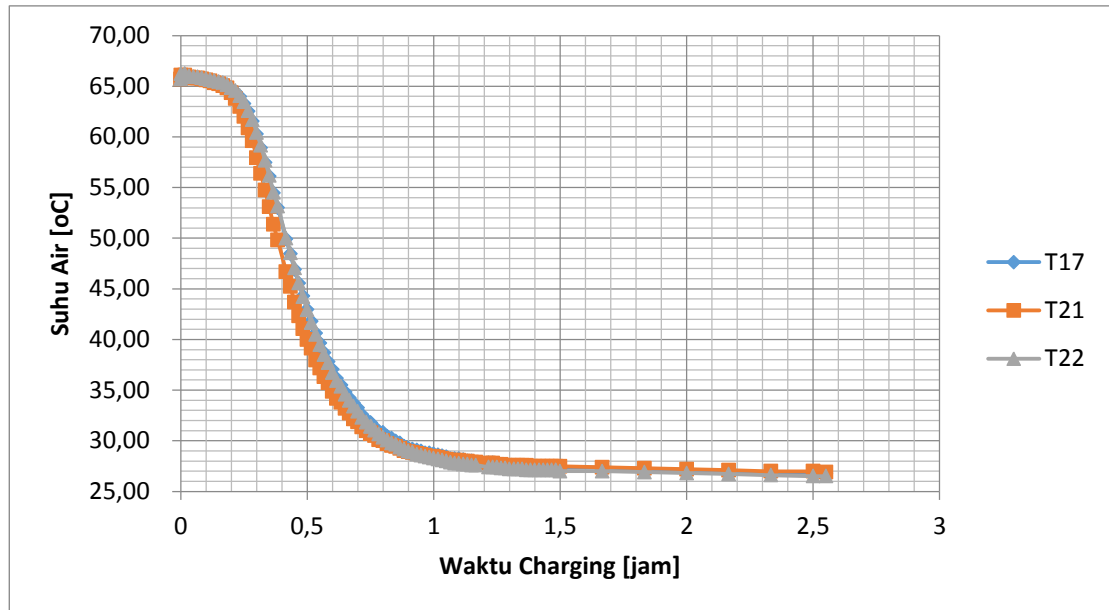
4.1.3. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Horisontal



Gambar 4.5 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Horisontal

Suhu pada kedua termokopel dari 0-1 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 0-1,5 jam suhu T13 lebih tinggi dari T9 namun dari 1,5-4,5 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 0,3-0,5 jam *paraffin wax* Cu 10% sempat menahan suhu sekitar 55 °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 dibuka.



Gambar 4.6 Evolusi Suhu Air Dalam Arah Horizontal

Grafik horizontal air cenderung terdapat kenaikan suhu dari pada grafik horizontal *paraffin wax Cu 10%*. Penurunan grafik dipengaruhi oleh proses *discharging* saat air kran selalu dihidupkan. Penurunan suhu juga di pengaruhi karena kran air yang selalu terbuka sehingga air tidak menyerap panas dari PCM. Ketiga termokopel mampu stabil pada waktu 1,5 jam di suhu 26°C.

Suhu pada ketiga termokopel rata-rata 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 ketiga termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar.

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.

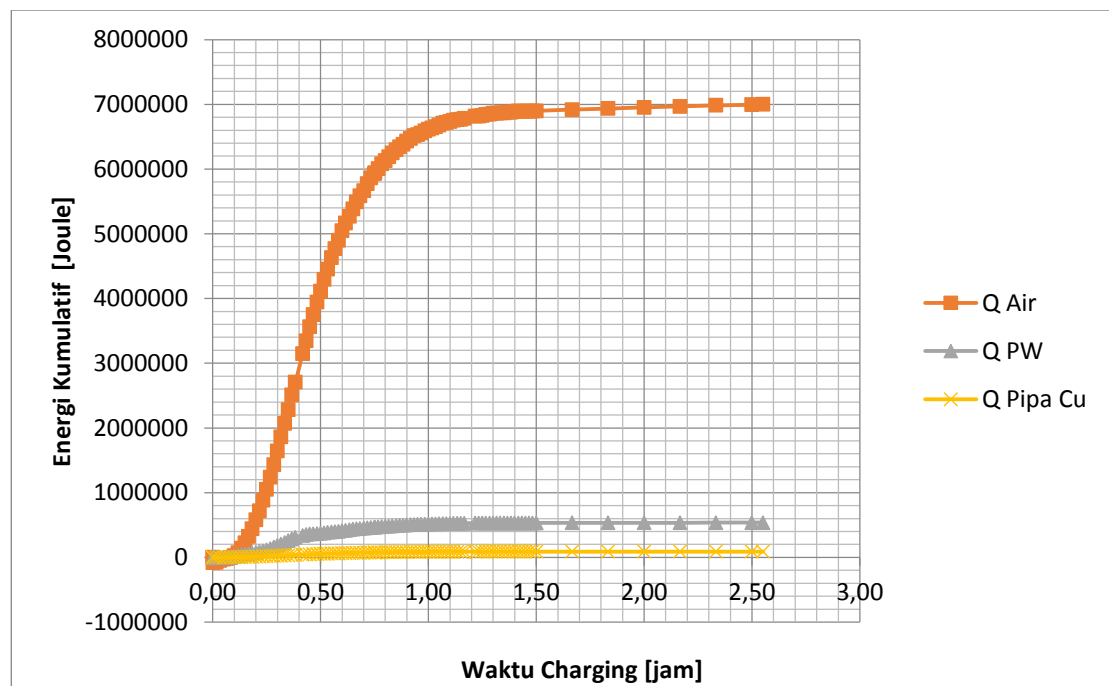
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43,13 \times 4180 \times (65,66 - 26,83)$$

$$Q_{kum} = 7,377,196.72J$$

Bahan	Cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg.K)]					
Air	4180	43,13	65,66	26,83	38,83	7,377,196,72
Pipa Cu	390	5,91	65,91	26,50	39,41	90,782,66
PW+10%Cu	1839	3,50	65,98	26,66	39,32	537,712,98

Tabel 4.1 Energi Kumulatif 1 LPM



Gambar 4.7 Grafik Energi Kumulatif

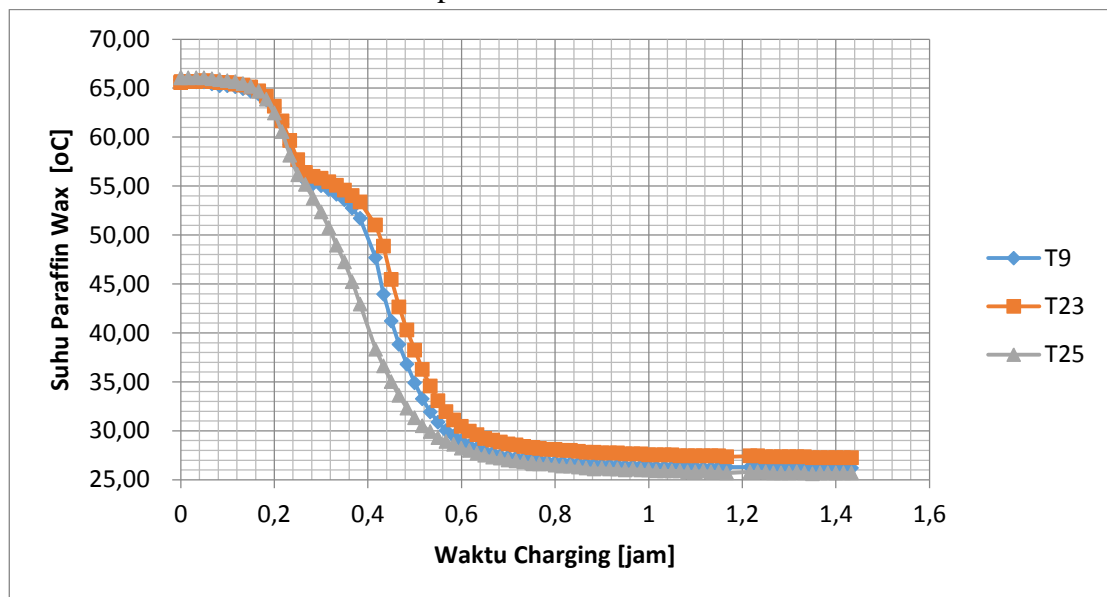
Grafik pada Q pipa Cu lebih rendah dari air dan *paraffin wax Cu* disebabkan nilai Cp yang rendah yaitu 390 J/kg.K, sedangkan nilai Cp air 4180 J/kg.K dan Cp *Paraffin Wax Cu* 10 % 1839 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax Cu* 10% mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,4 jam sebanyak 2-5 kJ, setelah 0,5 jam laju kenaikan hanya sebesar 1-2 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa Cu

mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 0,1-0,2 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-1,2 jam sebesar 68-70 kJ, setelah 1,2 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 dengan posisi Gambar 3.11 dan dilakukan dengan variasi laju aliran 1 LPM, 1.5 LPM, 2 LPM, dan 2.5 LPM pada proses *discharging* kontinu. Proses pengambilan data menggunakan *discharging* kontinu dilakukan sampai suhu pada T32 mencapai 35°C. Laju pelepasan temperatur variasi 1,5 LPM relatif lebih lama dari pada variasi 2 LPM dan 2,5 LPM. Pengambilan data pada variasi 1,5 LPM mencapai 1,26 jam.

4.2.1. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Aksial

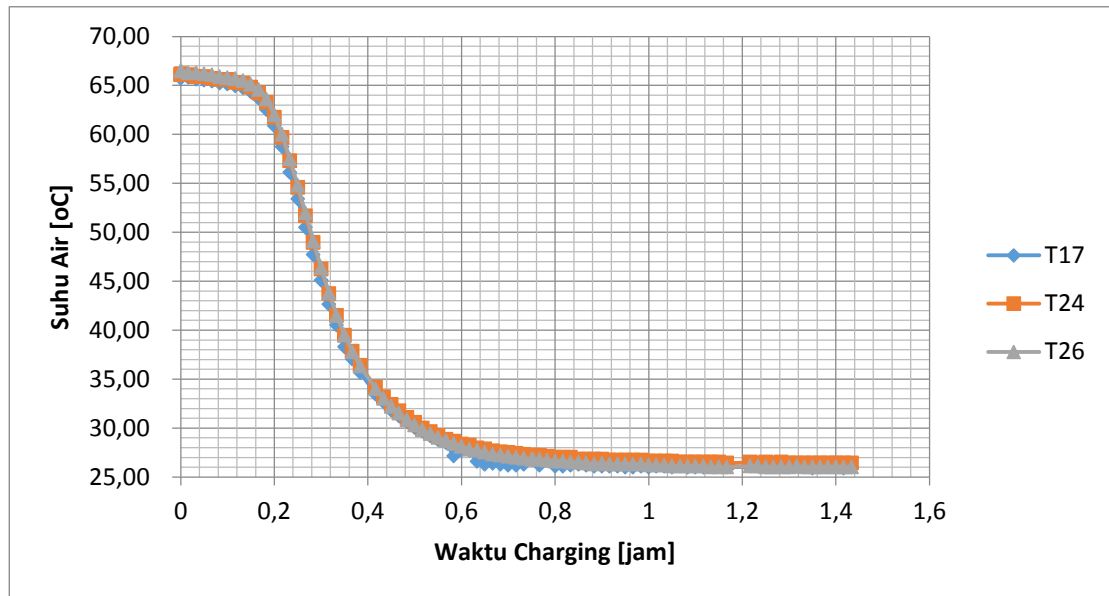


Gambar 4.8 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Aksial

Grafik diatas menunjukkan bahwa suhu pada ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan namun pada T9 dan T23 di waktu 0,2-0,4 jam *paraffin wax Cu 10%* sempat menahan suhu sekitar 55°C. Kalor yang diberikan dari HTF ke PCM berbeda disebabkan karena terjadinya perubahan fasa yang tidak sama pada setiap termokopel yang terpasang pada arah aksial *paraffin wax Cu 10%* dan pengaruh

suhu HTF yang diberikan kepada PCM tidak merata karena titik letak termokopel yang berbeda juga.

. Setelah 0,4 jam pengujian ketiga termokopel mengalami penurunan secara stabil karena fasa lilin berubah menjadi solid saat suhu mencapai 55 °C.

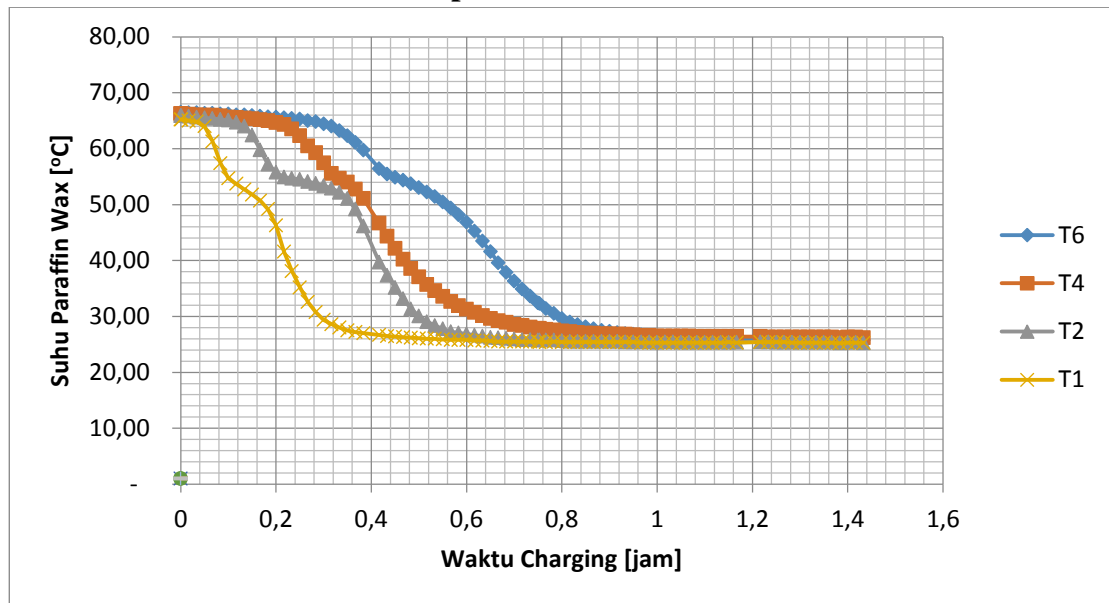


Gambar 4.9 Evolusi Suhu Air Dalam Arah Aksial

Grafik aksial air cenderung terdapat penurunan suhu dari pada grafik aksial *paraffin wax Cu 10%*. Penurunan grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging* saat air kran dihidupkan sehingga air menyerap sedikit panas dari PCM.

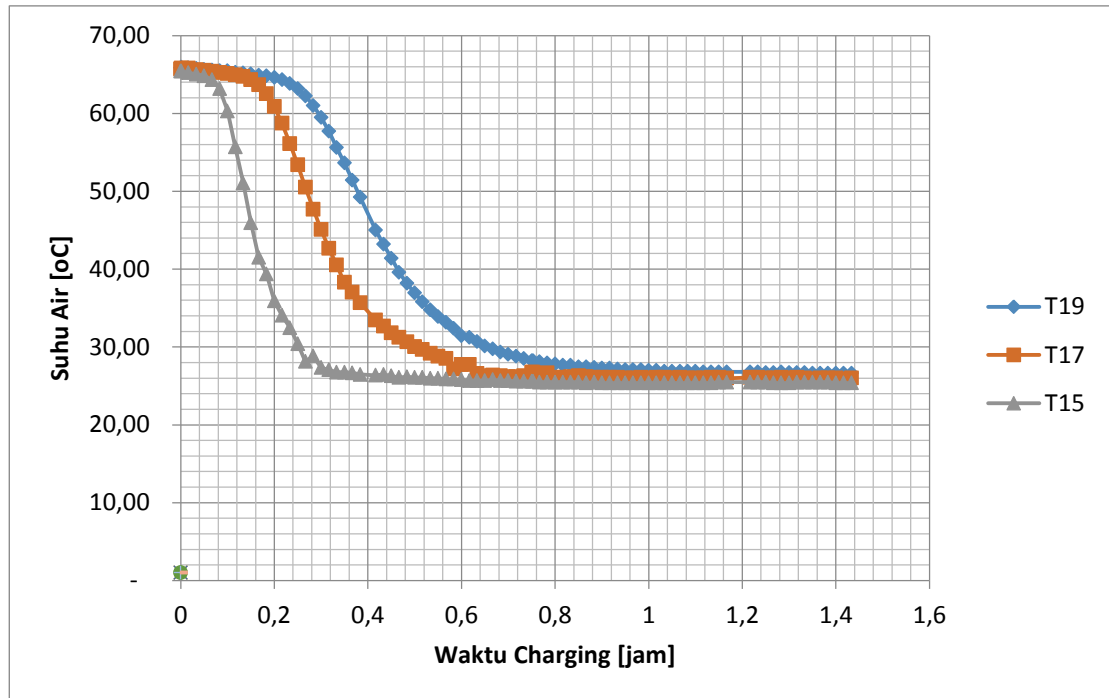
Suhu pada ketiga termokopel dari 0,2-0,6 jam mengalami penurunan dan setelah dari 0,6-1,4 jam suhu dalam pipa cenderung lebih stabil tidak mengalami penurunan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil sehingga turbulen aliran air pun kecil. Maka dari itu semakin besar debit yang dipakai maka turbulen aliran air pun semakin besar dan membuat ketiga termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar.

4.2.2. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Vertikal



Gambar 4.10 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu dalam Arah Vertikal

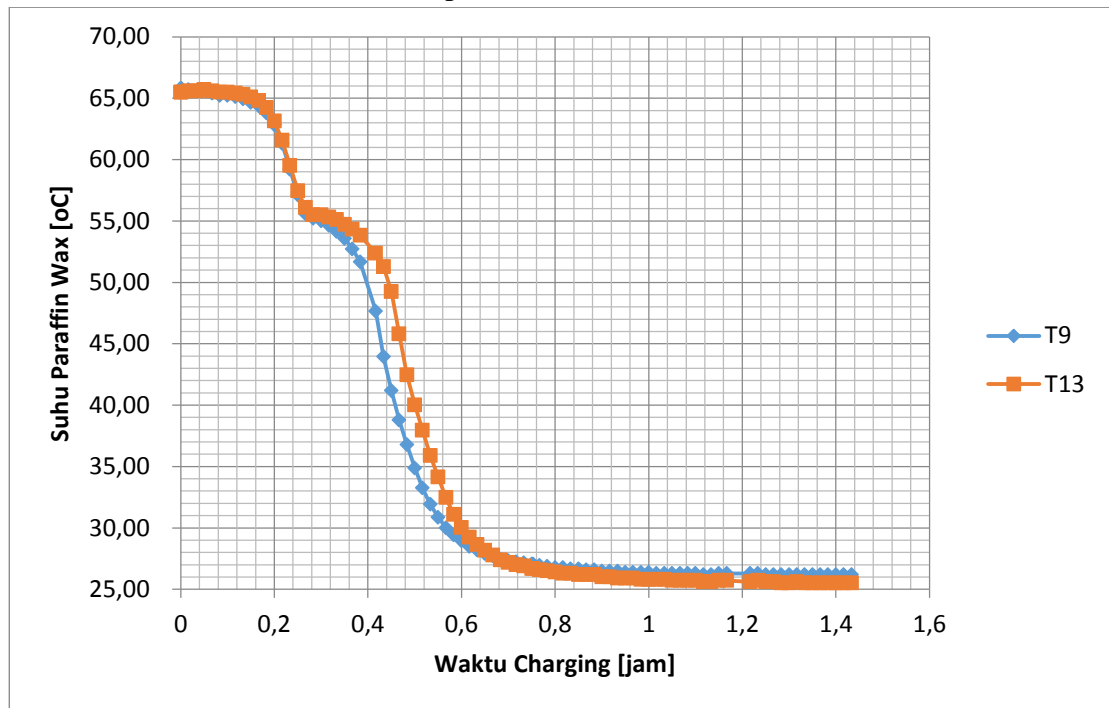
Suhu pada T1 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. Rendahnya T1 dipengaruhi oleh letak pipa tembaga, letak pipa tembaga berada pada paling dekat dengan *input* air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T6 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak pipa tembaga yang paling jauh dari *input* air kran. Penurunan suhu T6 pada 0-0,8 jam berkisar 35°C, suhu T4 berkisar 30°C, suhu T2 berkisar 35°C, dan suhu T1 pada 0-0,3 jam berkisar 28°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T1 selama satu jam.



Gambar 4.11 Evolusi Suhu Air Dalam Arah Vertikal

Suhu pada T15 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari kedua 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 0-0,8 jam berkisar 29°C, suhu T17 berkisar 28°C, dan suhu T15 pada 0-0,3 jam berkisar 26°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T15.

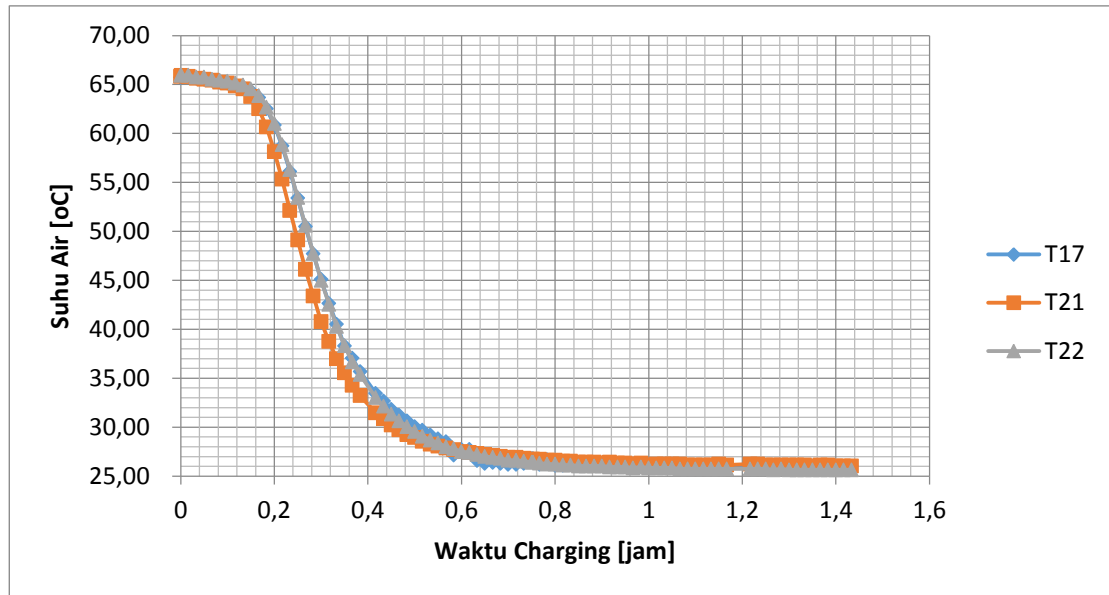
4.2.3. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Horizontal



Gambar 4.12 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Horizontal

Suhu pada kedua termokopel dari 0-0,6 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 0,2-0,6 jam suhu T13 lebih tinggi dari T9 namun dari 0,8-1,4 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 0,2-0,6 jam *paraffin wax Cu 10%* sempat menahan suhu sekitar 55°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 dibuka.



Gambar 4.13 Evolusi Suhu Air Dalam Arah Horisontal

Grafik aksial air cenderung terdapat penurunan suhu dari pada grafik aksial *paraffin wax Cu 10%*. Penurunan grafik sangat dipengarungi oleh proses *discharging* saat air kran dihidupkan sehingga air menyerap sedikit panas dari PCM.

Grafik ketiga termokopel pada 0-0,4 jam terjadi penurunan drastis sekitar 36°C. Suhu pada ketiga termokopel rata-rata 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 ketiga termokopel 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 4.1.

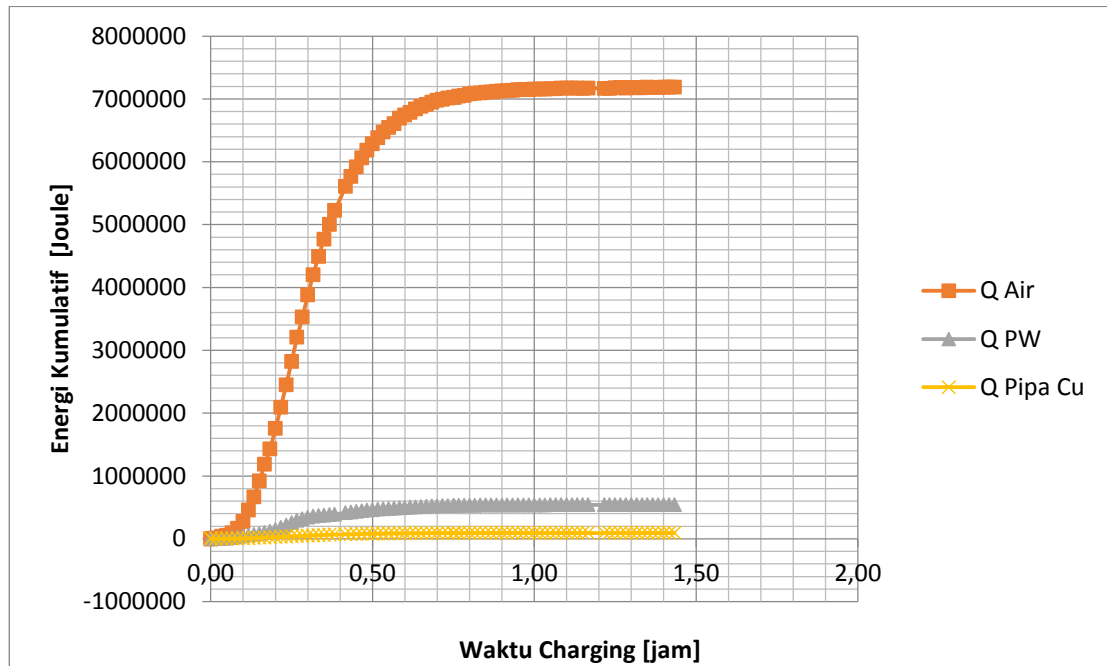
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43.13 \times 4180 \times (65.85 - 30.52)$$

$$Q_{kum} = 6,369,412.522J$$

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	65.85	30.52	35.33	6,369,412.522
Pipa Cu	390	5.91	65.69	30.36	35.33	81,394.56
PW+10%Cu	1839	3.50	65.85	31.90	33.95	498,131.88

Tabel 4.2 Energi Kumulatif 1,5 LPM



Gambar 4.14 Grafik Energi Kumulatif

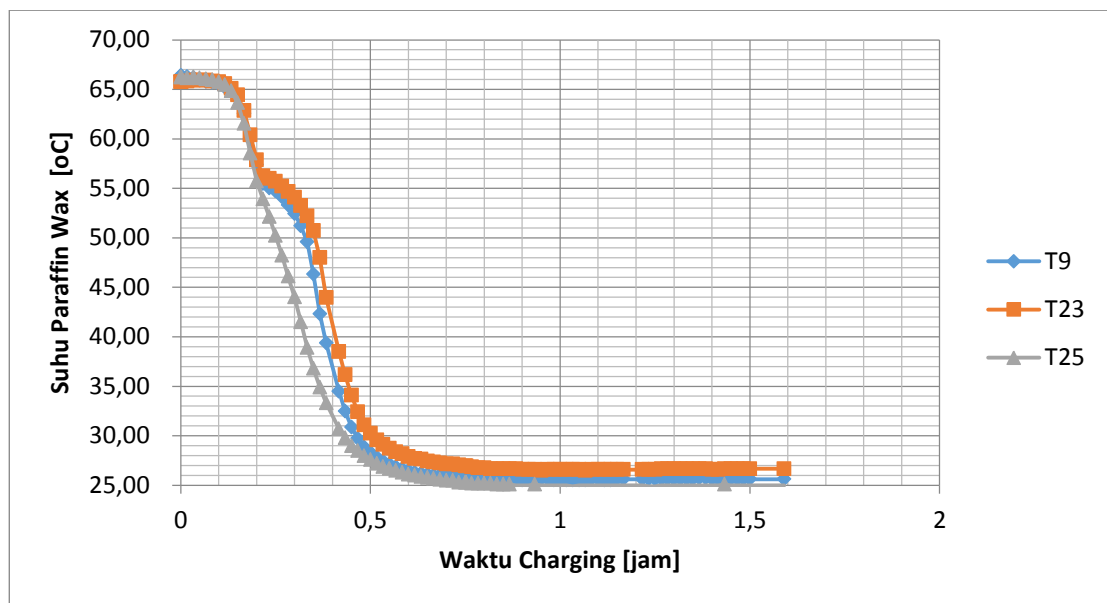
Grafik pada Q pipa Cu lebih rendah dari air dan *paraffin wax Cu* disebabkan nilai Cp yang rendah yaitu 390 J/kg.K, sedangkan nilai Cp air 4180 J/kg.K dan Cp *Paraffin Wax Cu* 10 % 1839 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax Cu* 10% mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,3 jam sebanyak 6-8kJ, setelah 0,3 jam laju kenaikan hanya sebesar 2-3kJ 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 0-0,6 jam sebesar 64-70 kJ, setelah 0,6 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 dengan posisi Gambar 3.11 dan dilakukan

dengan variasi laju aliran 1 LPM, 1.5 LPM, 2 LPM, dan 2.5 LPM pada proses *discharging*. Proses pengambilan data menggunakan *discharging* kontinu atau sampai suhu pada T32 mencapai 35°C. Laju pelepasan kalor pada 2 LPM relatif paling cepat dari pada variasi lainnya karena suhu mulai proses *discharging* di bawah 65°C yang membuat proses penurunan lebih cepat dari variasi yang suhu awalnya 69°C. Pengambilan data pada variasi 2 LPM mencapai 1:35 jam.

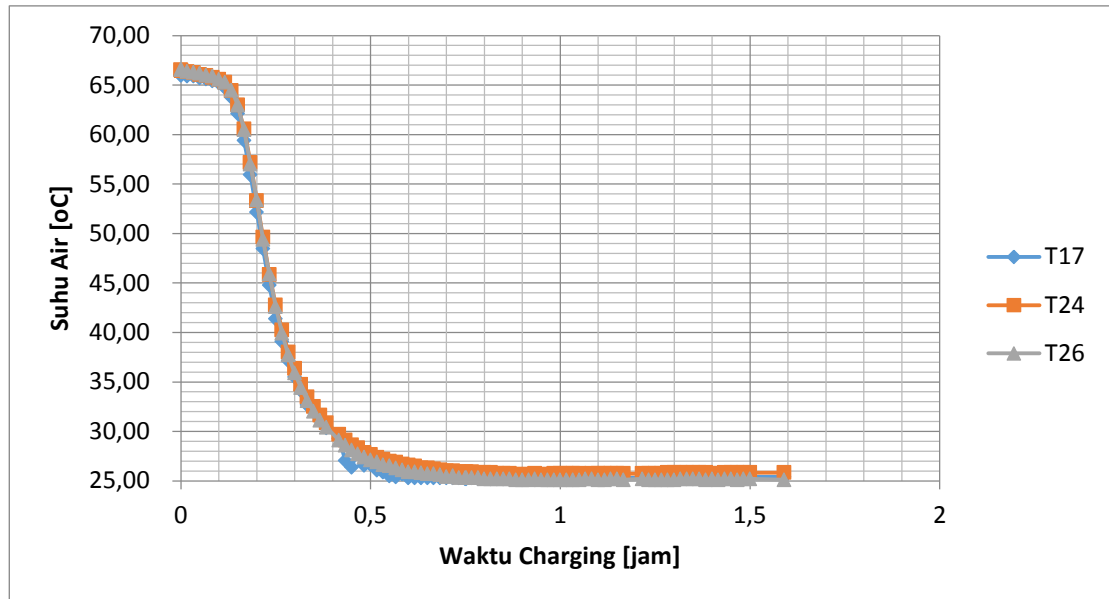
4.3.1. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Aksial



Gambar 4.15 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Aksial

Grafik menunjukkan bahwa suhu pada ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan namun pada 0,3-0,4 jam *paraffin wax Cu 10%* sempat menahan suhu sekitar 55°C. Kalor yang diberikan dari HTF ke PCM berbeda disebabkan karena terjadinya perubahan fasa yang tidak sama pada setiap termokopel yang terpasang pada arah aksial *paraffin wax Cu 10%* dan pengaruh suhu HTF yang diberikan kepada PCM tidak merata karena titik letak termokopel yang berbeda juga.

Setelah 0,25 jam pengujian ketiga termokopel mengalami penurunan secara stabil karena fasa lilin berubah menjadi solid saat suhu mencapai 52,19°C.

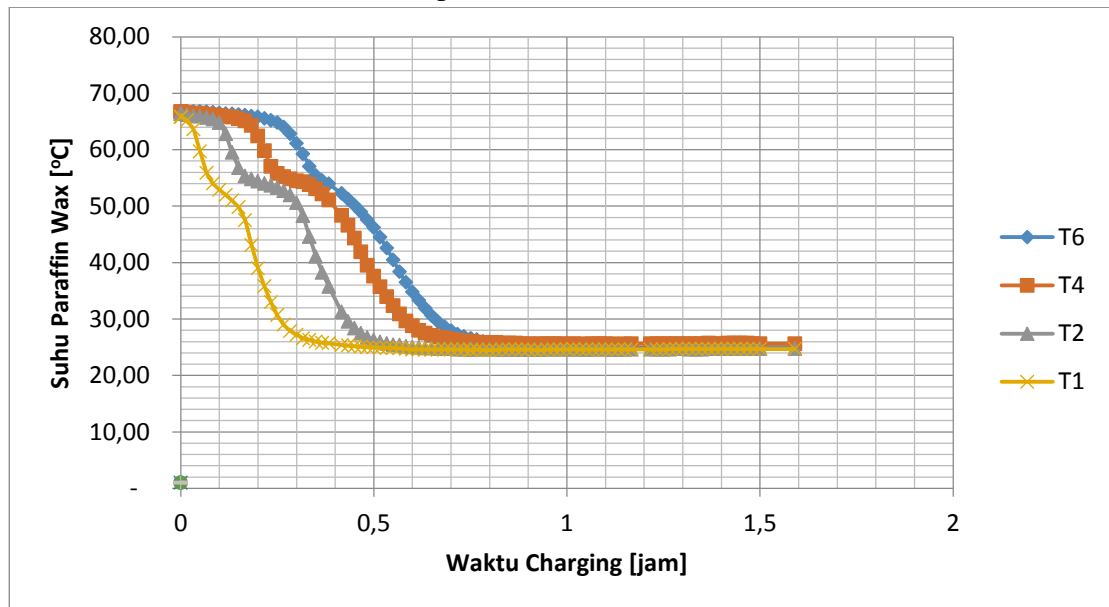


Gambar 4.16 Evolusi Suhu Air Dalam Arah Aksial

Grafik aksial air cenderung terdapat kenaikan suhu dari pada grafik aksial *paraffin wax Cu 10%*. Penurunan grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging* saat air kran dihidupkan sehingga air menyerap sedikit panas dari PCM.

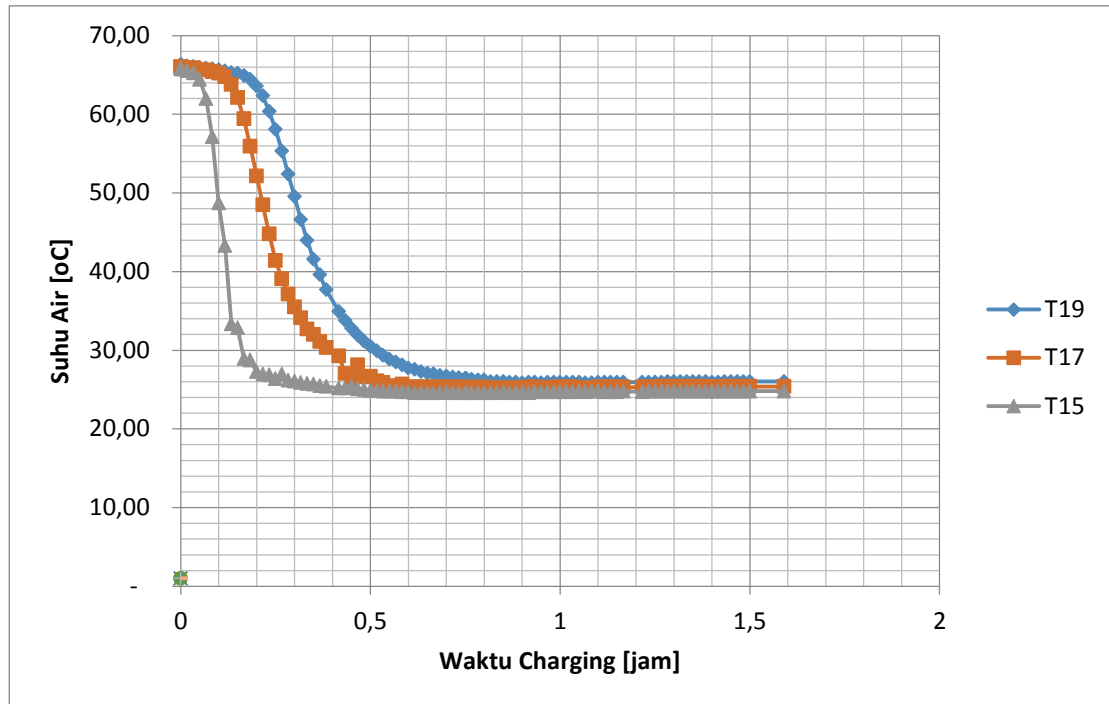
Grafik ketiga termokopel pada 0-0,4 jam terjadi penurunan drastis sekitar 36°C. Suhu pada ketiga termokopel rata-rata tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu tidak sampai 2°C. Maka dari itu, semakin besar debit yang dipakai maka membuat ketiga termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar.

4.3.2. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Vertikal



Gambar 4.17 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Vertikal

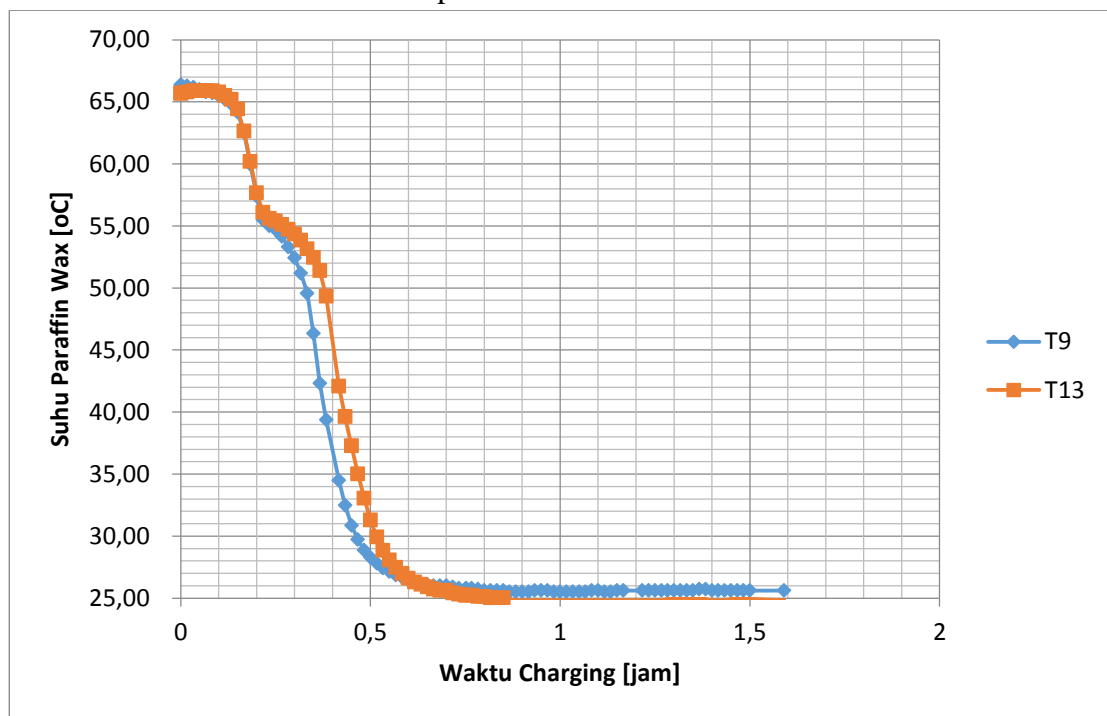
Suhu pada T1 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. Rendahnya T1 dipengaruhi oleh letak pipa tembaga, letak pipa tembaga berada pada paling dekat dengan *input* air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T6 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak pipa tembaga yang paling jauh dari *input* air kran. Penurunan suhu T6 pada 0-0,8 jam berkisar 30°C, suhu T4 berkisar 20°C, suhu T2 berkisar 25°C, dan suhu T1 pada 0-0,3 jam berkisar 25°C.



Gambar 4.18 Evolusi Suhu Air Dalam Arah Vertikal

Suhu pada T15 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari kedua 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 0-0,5 jam berkisar 36°C, suhu T17 berkisar 38°C, dan suhu T15 pada 0-0,2 jam berkisar 40°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T15.

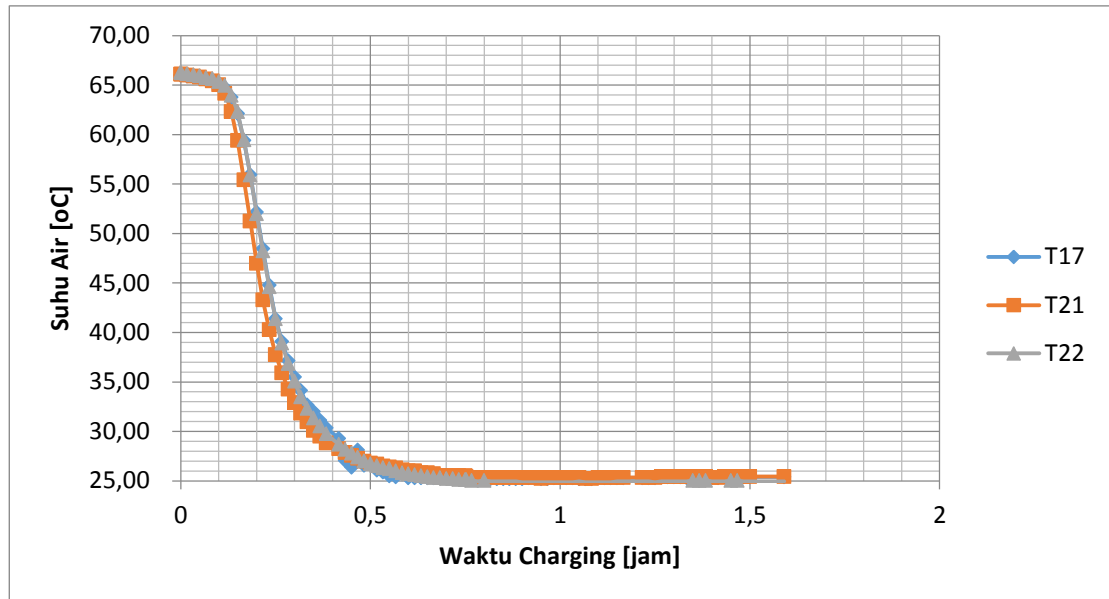
4.3.3. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Horisontal



Gambar 4.19 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Horisontal

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 1 °C. Maka dari itu, semakin besar debit yang dipakai maka membuat kedua termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar. Pada waktu 0-0,5 jam suhu T13 lebih tinggi dari T9 namun dari 1-1,5 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 0,2-0,4 jam *paraffin wax Cu 10%* sempat menahan suhu sekitar 55 °C. Kalor yang diberikan dari HTF ke PCM berbeda disebabkan karena terjadinya perubahan fasa yang tidak sama pada setiap termokopel yang terpasang pada arah aksial *paraffin wax Cu 10%* dan pengaruh suhu HTF yang diberikan kepada PCM tidak merata karena titik letak termokopel yang berbeda juga.



Gambar 4.20 Evolusi Suhu Air Dalam Arah Horisontal

Grafik horisontal air cenderung terdapat kenaikan suhu dari pada grafik horisontal *paraffin wax Cu 10%*. Penurunan grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging* saat air kran dihidupkan sehingga air menyerap sedikit panas dari PCM.

Suhu pada ketiga termokopel rata-rata tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu tidak sampai 3 °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 4.1.

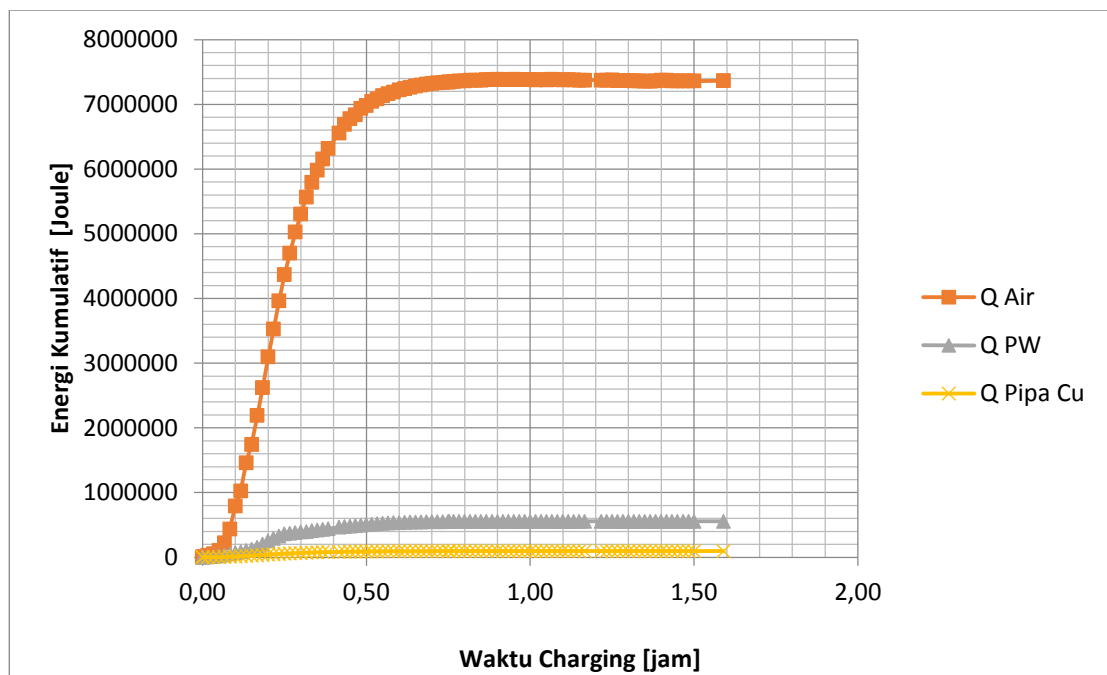
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43.13 \times 4180 \times (66.21 - 25.36)$$

$$Q_{kum} = 7,364,576.89 \text{ J}$$

Bahan	Cp	Massa	T1	T2	ΔT	Q kum
	[J/(kg.K)]	[kg]	°C	°C	°C	(J)
Air	4180	43.13	66.21	25.36	40.85	7,364,576.89
Pipa Cu	390	5.91	66.13	25.81	40.32	94,557.23
PW+10%Cu	1839	3.50	66.25	25.08	41.08	554,408.59

Tabel 4.3 Energi Kumulatif 2 LPM



Gambar 4.21 Grafik Energi Kumulatif

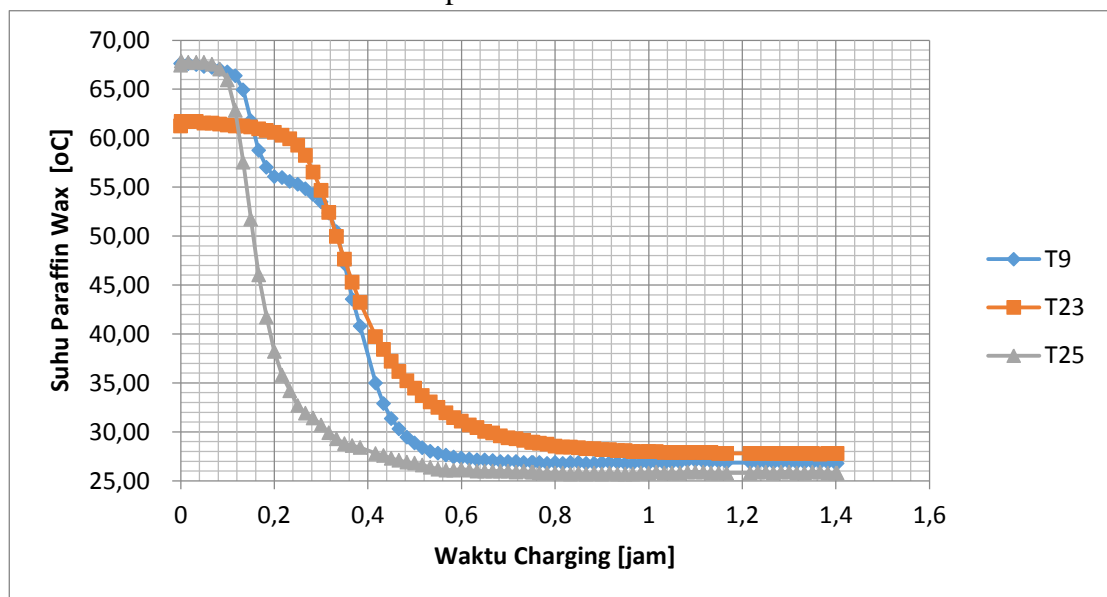
Grafik pada Q pipa Cu lebih rendah dari air dan *paraffin wax Cu* disebabkan nilai Cp yang rendah yaitu 390 J/kg.K, sedangkan nilai Cp air 4180 J/kg.K dan Cp *Paraffin Wax Cu* 10% 1839 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax Cu* 10% mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,2jam sebanyak 4-8kJ, setelah 0,2 jam laju kenaikan hanya sebesar 1-3kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa Cu

mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 0,2-0,6 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-0,5 jam sebesar 680-780 kJ, setelah 0,5 jam relatif mengalami kenaikan lebih stabil. Besarnya Q air dipengaruhi oleh cepatnya penurunan suhu saat *discharging*.

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 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. Laju pelepasan temperatur variasi 2,5 LPM relatif lebih cepat dari pada variasi 2 LPM. Pengambilan data pada variasi 1,5 LPM mencapai 1:24 jam.

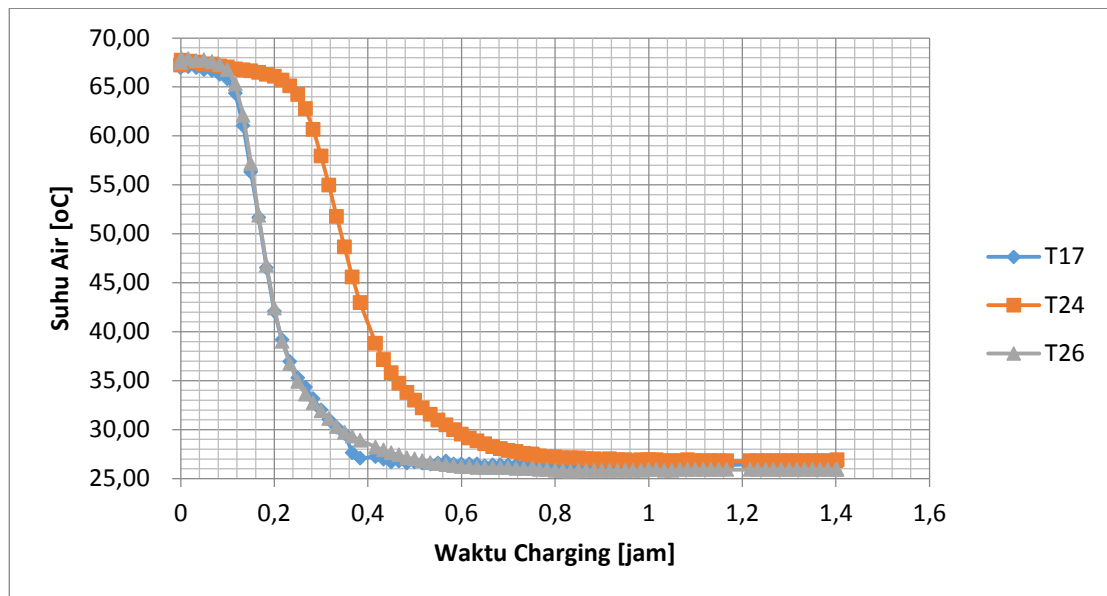
4.4.1. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Aksial



Gambar 4.22 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Aksial

Grafik menunjukkan bahwa suhu pada ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan namun pada 0,2-0,4 jam *paraffin wax Cu 10%* sempat menahan suhu sekitar 60°C. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalo dari PCM ke HTF sehingga suhu PCM tidak mengalami kenaikan. Setelah 0,24 jam pengujian ketiga

termokopel mengalami penurunan secara stabil karena fasa lilin berubah menjadi solid saat suhu mencapai $52,86\text{ }^{\circ}\text{C}$.

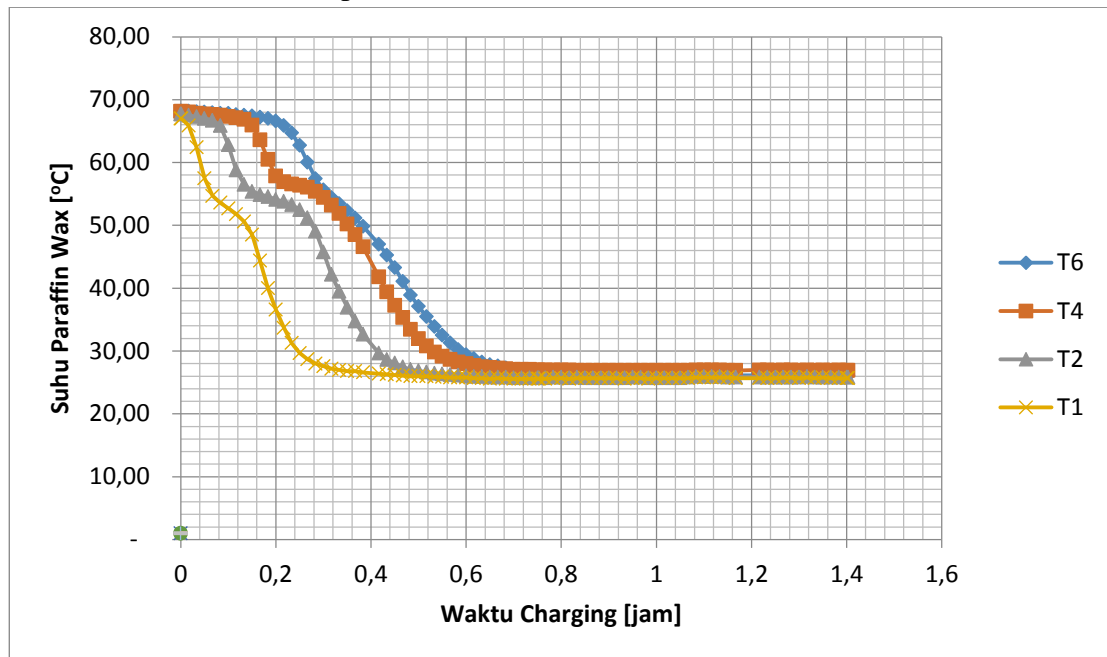


Gambar 4.23 Evolusi Suhu Air Dalam Arah Aksial

Grafik aksial air cenderung terdapat penurunan suhu berbeda, T17 dan T26 mengalami penurunan pada 0,1-0,3 jam mencapai suhu $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan sedangkan T24 mengalami penurunan pada 0,2-0,6 jam. Penurunan grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging* saat air kran dihidupkan sehingga air menyerap sedikit panas dari PCM.

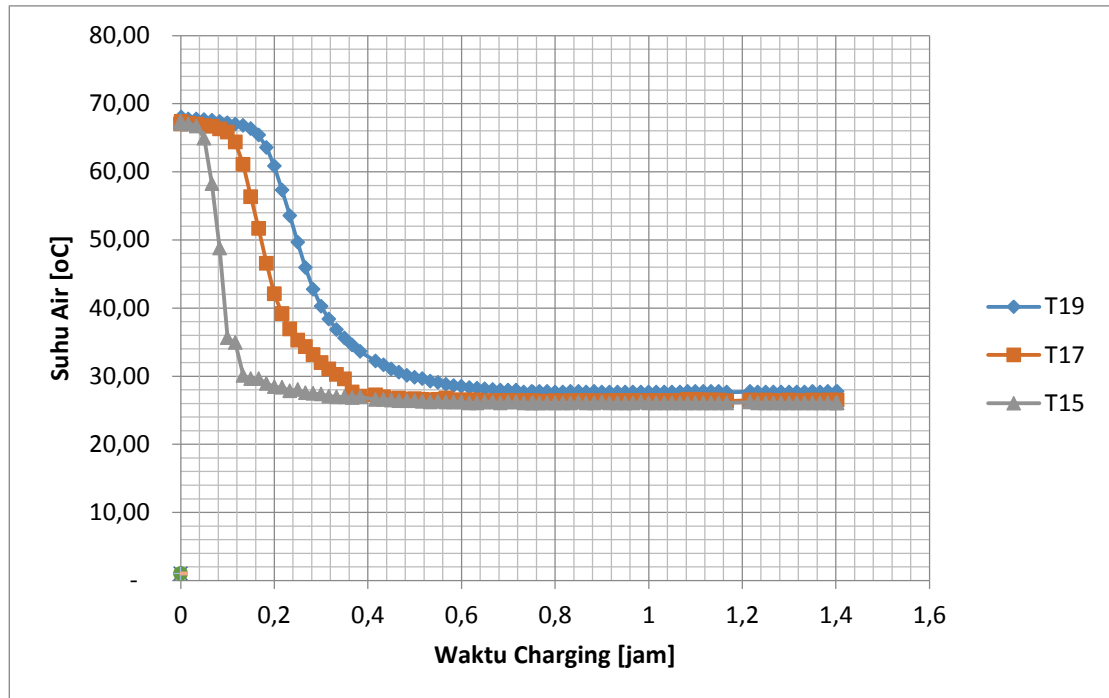
Suhu pada ketiga termokopel rata-rata tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu tidak sampai $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maka dari itu, semakin besar debit yang dipakai maka membuat ketiga termokopel mengalami perbedaan suhu yang besar.

4.4.2. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Vertikal



Gambar 4.24 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Vertikal

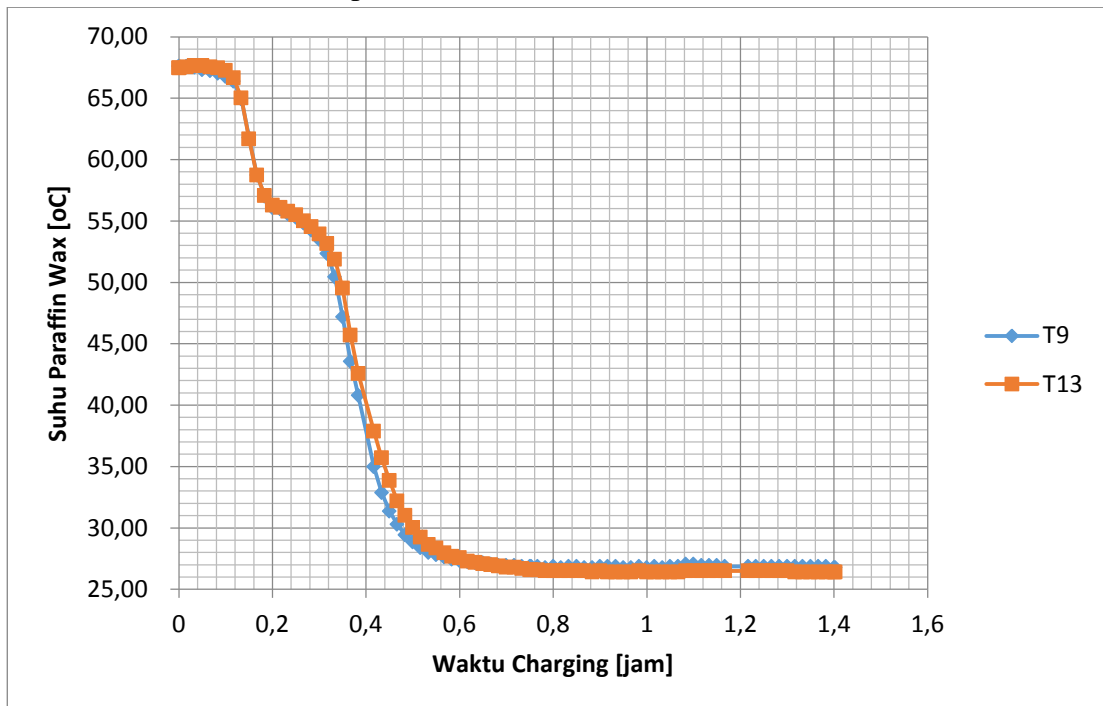
Suhu pada T1 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis dan suhu lebih rendah dari ketiga termokopel lainnya. Rendahnya T1 dipengaruhi oleh letak pipa tembaga, letak pipa tembaga berada pada paling dekat dengan *input* air kran masuk ke tangki TES. Sebaliknya T6 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak pipa tembaga yang paling jauh dari *input* air kran. Penurunan suhu T6 pada 0-1 jam berkisar 36°C, suhu T4 berkisar 38°C, suhu T2 berkisar 39°C, dan suhu T1 pada 0-1 jam berkisar 40°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T1 dan T2 selama satu jam.



Gambar 4.25 Evolusi Suhu Air Dalam Arah Vertikal

Suhu pada T15 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 36°C, suhu T17 berkisar 37°C, dan suhu T15 pada 0-1 jam berkisar 38°C. Sehingga pelepasan kalor paling cepat pada T15.

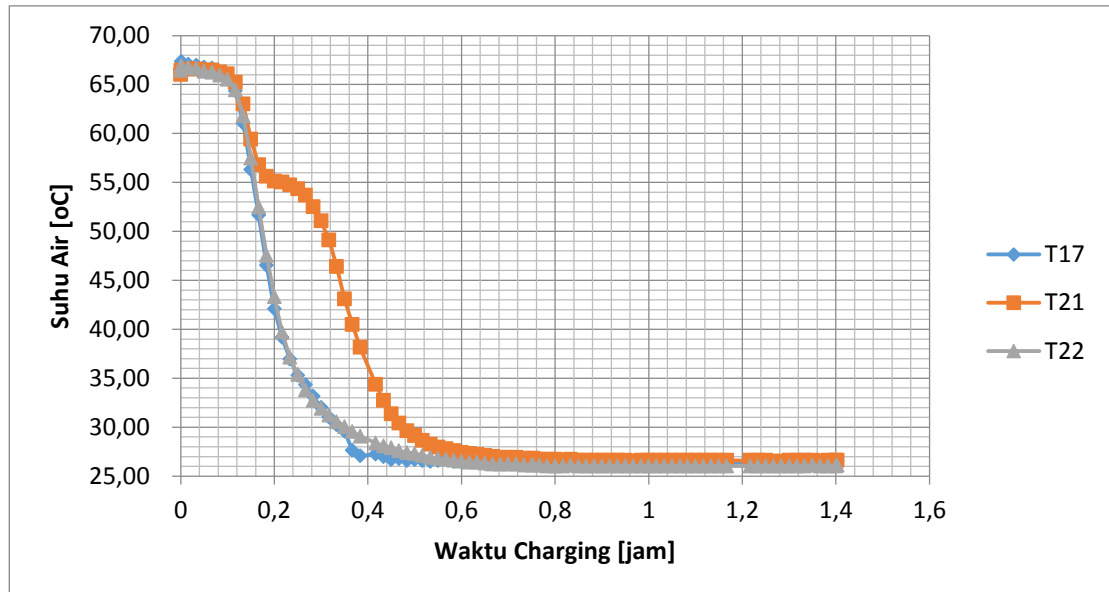
4.4.3. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Horizontal



Gambar 4.26 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu Dalam Arah Horizontal

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 0,2-0,5 jam suhu T13 lebih tinggi dari T9 namun dari 0,7-1,4 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 0,1-0,3 jam *paraffin wax Cu 10%* sempat menahan suhu sekitar 55 °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 dibuka.



Gambar 4.27 Evolusi Suhu Air Dalam Arah Horisontal

Grafik horisontal air cenderung tidak terdapat kenaikan suhu tetapi pada 0,2-0,4 jam dapat menahan suhu 55°C. Penurunan grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging* saat air kran dihidupkan sehingga air menyerap sedikit panas dari PCM.

Suhu pada ketiga termokopel rata-rata tidak mengalami perbedaan yang signifikan dikarenakan menggunakan debit air yang relatif kecil dan memiliki selisih suhu tidak sampai 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 4.1.

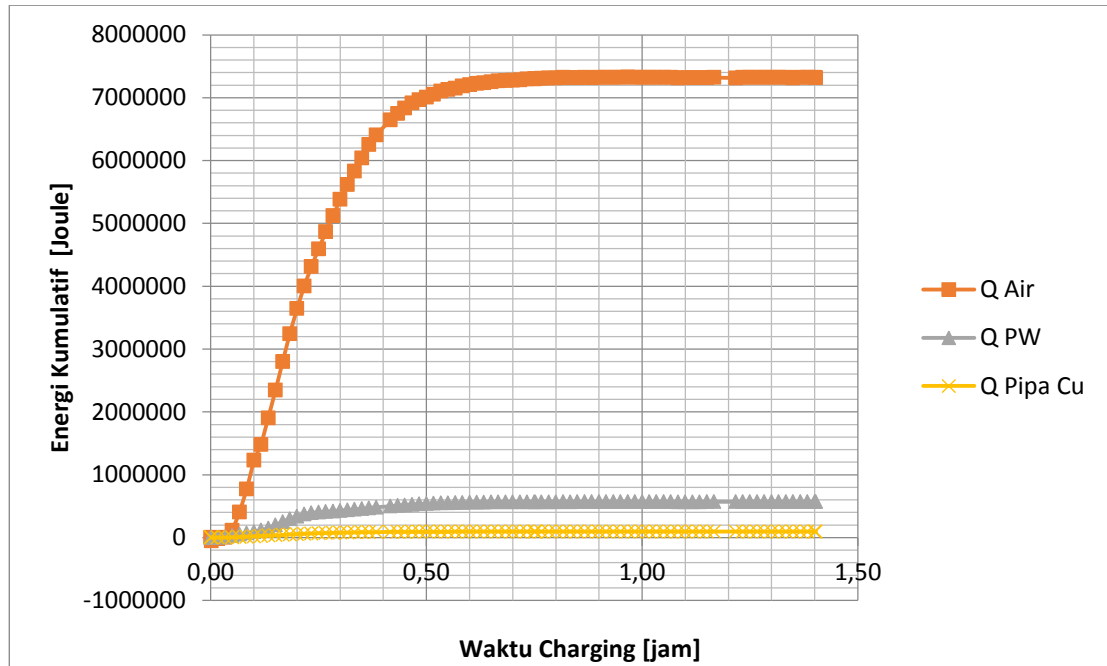
$$Q_{kum} = m \times c_p \times \Delta T \quad (4.1)$$

$$Q_{kum} = 43.13 \times 4180 \times (65.09 - 26.03)$$

$$Q_{kum} = 7,315,900.372 \text{ J}$$

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	67.18	26.60	40.58	7,315,900.372
Pipa Cu	390	5.91	67.77	26.54	41.23	94,965.14
PW+10%Cu	1839	3.50	67.13	26.44	40.69	570,364.50

Tabel 4.4 Energi Kumulatif 2,5 LPM



Gambar 4.28 Grafik Energi Kumulatif

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* 10% 2000 J/kg.K. Grafik Q *Paraffin Wax Cu* 10% mengalami kenaikan signifikan pada 0-0,3 jam sebanyak 13-23kJ, setelah 0,2 jam laju kenaikan hanya sebesar 1-2 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa Cu mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 02-04 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-0,5 jam sebesar 100-600 kJ, setelah 0,5 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 Air

Laju pelepasan kalor pada air dapat dicari dengan persamaan 4.2:

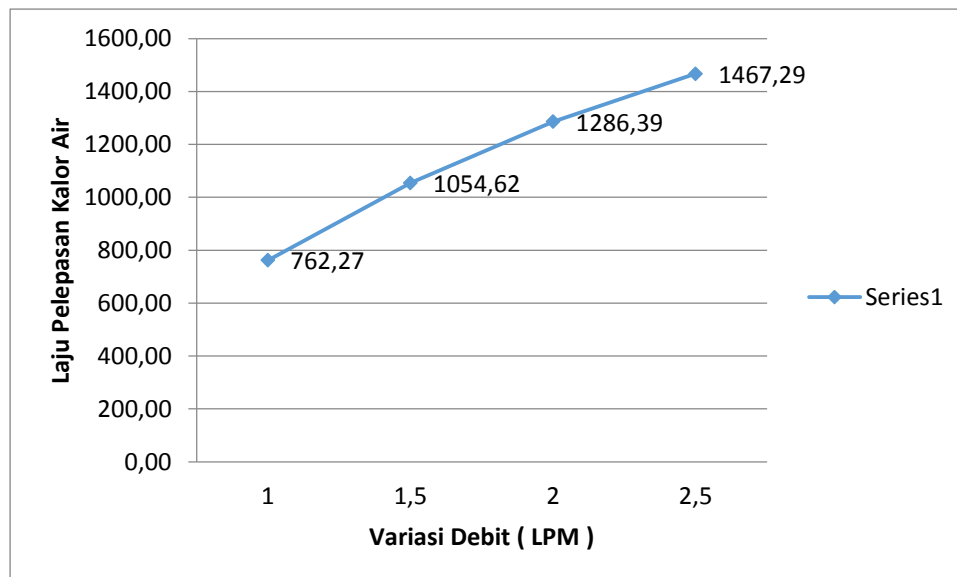
$$\dot{Q} = \frac{Q_{kumulatif}}{t_{total}} \quad (4.2)$$

$$\dot{Q} = \frac{7,001,464}{9185}$$

$$\dot{Q} = 762.27 \text{ J/s}$$

V	T1 Air	T2 Air	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 10%	\dot{Q}
LPM	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	(detik)	(J)	(J)	(J/s)
1	65.66	26.83	40.92	9185	7,001,464	537,713	762.27
1.5	65.85	30.52	35.33	6040	7,184,572	540,784	1054.62
2	66.21	25.36	40.85	5725	7,364,567	554,409	1286.39
2.5	67.18	26.60	40.58	5050	7,317,058	570,365	1467.29

Tabel 4.5 Laju Pelepasan Kalor Air



Gambar 4.29 Laju Pelepasan Kalor Air

Grafik diatas menunjukkan bahwa laju pelepasan kalor paling rendah yaitu pada variasi 1 LPM karena memiliki waktu yang paling lama 2:33 jam 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* dibawah 65°C yang membuat proses penurunan lebih cepat dari variasi yang suhu awalnya 69°C . Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 1,24 jam.

4.5.2. Laju Pelepasan Kalor *Paraffin Wax* + Cu 10% berat

Laju pelepasan kalor pada *paraffin wax* Cu 10% dapat dicari dengan persamaan 4.2:

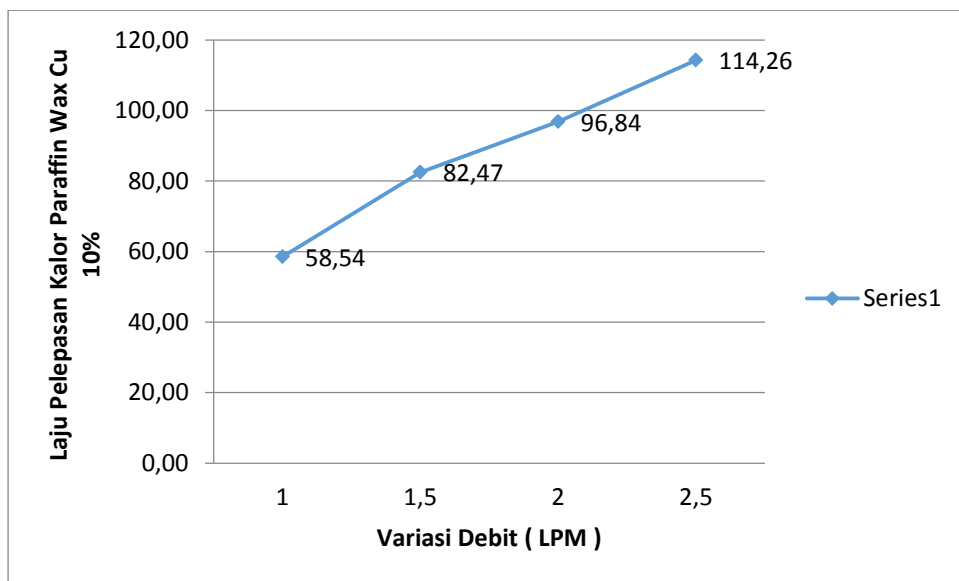
$$\dot{Q} = \frac{Q_{kumulatif}}{t_{total}}$$

$$\dot{Q} = \frac{537,713}{9185}$$

$$\dot{Q} = 58,54 \text{ J/s}$$

V	T1 PCM	T2 PCM	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 10%	\dot{Q}
LPM	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	(detik)	(J)	(J)	(J/s)
1	65.91	26.50	40.92	9185	7,001,464	537,713	58.54
1.5	65.69	30.36	35.33	6040	7,184,572	540,784	82.47
2	66.13	25.08	40.85	5725	7,364,567	554,409	96.84
2.5	67.77	26.54	40.58	5050	7,317,058	570,365	114.26

Tabel 4.6 Laju Pelepasan Kalor *Paraffin Wax* Cu 10%



Gambar 4.30 Laju Pelepasan Kalor *Paraffin Wax* + Cu 10%

Grafik diatas menunjukkan bahwa laju pelepasan kalor pada *paraffin wax* Cu 10% paling rendah yaitu pada variasi 1 LPM yaitu 58,54 J/s. Sedangkan laju pelepasan terbesar pada variasi 2,5 LPM yaitu 114,26 J/s. Variasi 2,5 LPM memiliki laju pelepasan terbesar karena menggunakan debit paling besar sehingga memiliki perubahan suhu yang cepat.

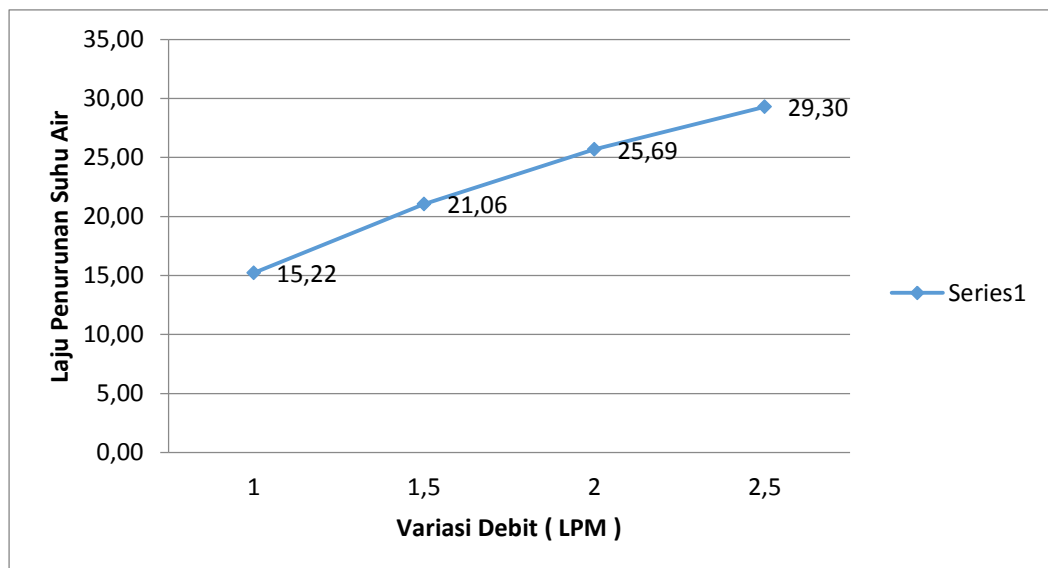
4.5.3. Laju Penurunan Suhu Air

Laju penurunan suhu pada air dapat dicari dengan persamaan 4.3.

$$\begin{aligned} \text{Laju Penurunan Suhu} &= \frac{(T_{awal} - T_{akhir}) \times 3600}{t_{total}} & (4.3) \\ &= \frac{(65,66 - 26,83) \times 3600}{9185} \\ &= 15,22 \text{ } ^\circ\text{C/jam} \end{aligned}$$

V LPM	T1 Air °C	T2 Air °C	ΔT °C	Δt (detik)	Q kum Air (J)	Q Paraffin Cu 10% (J)	Q pipa Cu (J)
1	65.66	26.83	40.92	9185	7,001,464	537,713	90,783
1.5	65.85	30.52	35.33	6040	7,184,572	540,784	92,281
2	66.21	25.36	40.85	5725	7,364,567	554,409	94,557
2.5	67.18	26.60	40.58	5050	7,317,058	570,365	94,965

Tabel 4.7 Laju Penurunan Suhu Air



Gambar 4.31 Laju Penurunan Suhu Air

Grafik diatas menunjukkan bahwa laju penurunan suhu air paling rendah 15,22 °C/jam yaitu pada variasi 1 LPM karena memiliki waktu yang paling lama 2:33 jam diantara variasi lainnya. Sedangkan laju penurunan suhu air terbesar 29.30 °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* dibawah 65°C yang membuat proses penurunan lebih cepat dari variasi yang suhu awalnya 69°C. Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 1:24 jam.

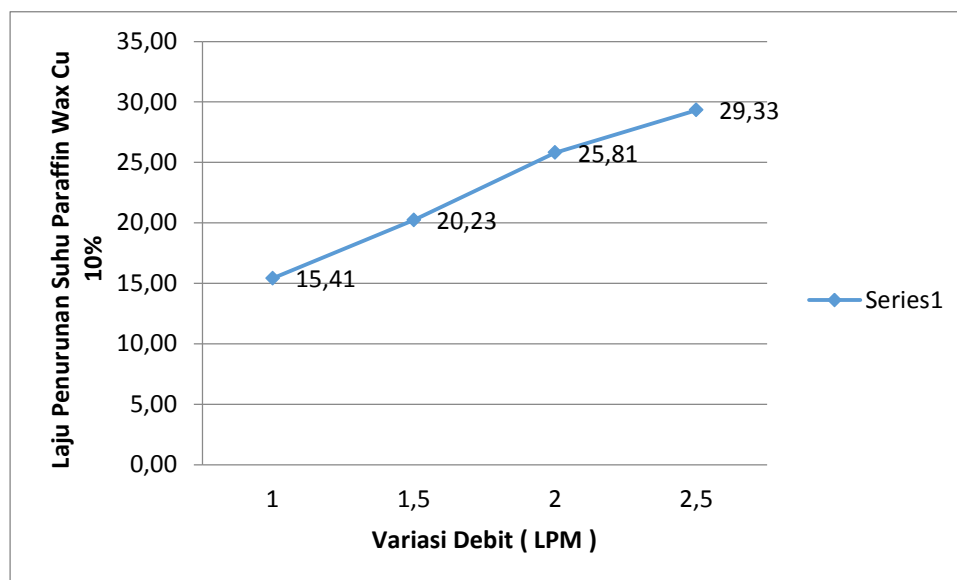
4.5.4. Laju Penurunan Suhu *Paraffin Wax* + Cu 10% berat

Laju penurunan suhu pada *paraffin wax* Cu 10% dapat dicari dengan persamaan 4.3.

$$\begin{aligned} \text{Laju Penurunan Suhu} &= \frac{(T_{awal} - T_{akhir}) \times 3600}{t_{total}} \quad (4.3) \\ &= \frac{(65,91 - 26,50) \times 3600}{9185} \\ &= 15,41 \text{ } ^\circ\text{C/jam} \end{aligned}$$

V	T1 PCM	T2 PCM	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 10%	Q pipa Cu
LPM	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	(detik)	(J)	(J)	(J)
1	65.91	26.50	39.41	9185	7,001,464	537,713	65.91
1.5	65.69	30.36	35.33	6040	7,184,572	540,784	65.69
2	66.13	25.08	41.05	5725	7,364,567	554,409	66.13
2.5	67.77	26.54	41.23	5050	7,317,058	570,365	67.77

Tabel 4.8 Laju Penurunan Suhu *Paraffin Wax* Cu 10%



Gambar 4.32 Laju Penurunan Suhu *Paraffin Wax* Cu 10%

Grafik diatas menunjukkan bahwa laju penurunan suhu *paraffin wax* Cu 10% paling rendah 15.41 $^\circ\text{C/jam}$ yaitu pada variasi 1 LPM karena memiliki waktu yang paling lama 2:33 jam diantara variasi lainnya. Sedangkan laju penurunan suhu air terbesar 29.33 $^\circ\text{C/jam}$ 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* dibawah 65 $^\circ\text{C}$ yang membuat proses penurunan

lebih cepat dari variasi yang suhu awalnya 69°C . Pengambilan data pada variasi 2,5 LPM mencapai 1:24 jam.