

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pengolahan hasil dan pembahasan didapat dari data yang diambil pada proses *charging* yang dilakukan dalam beberapa variasi. Hasil dan pembahasan akan menyajikan grafik sebagai berikut :

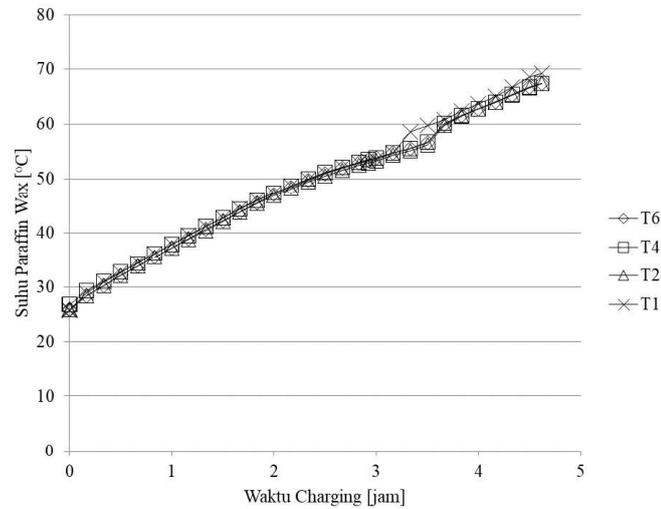
1. Grafik evolusi suhu
  - a. Arah Vertikal
  - b. Arah Horisontal
  - c. Arah Aksial
  - d. Energi kumulatif setiap variasi
2. Grafik energi kumulatif  $Q$  heater, air, *paraffin wax*, pipa Cu, dan lain – lain
3. Grafik laju penyerapan dan laju kenaikan

#### **4.1. Evolusi Suhu pada Variasi 190 Volt**

Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi Suhu arah aksial, arah vertikal, dan arah horisontal yang ada dalam tangki TES. Hasil pengamatan yang dilihat dari 26 titik termokopel yang tersebar dengan posisi Gambar 3.26 dan dilakukan dengan variasi 190 volt, 201 volt, 220 volt, dan 227 volt pada proses *charging*. Proses pengambilan data menggunakan metode *charging*, pemanasan air secara *continue* sampai suhu pada T28 mencapai 70°C. Laju penyerapan kalor pada variasi 190 volt relatif lebih lama daripada variasi lainnya karena menggunakan fluks kalor yang paling kecil.

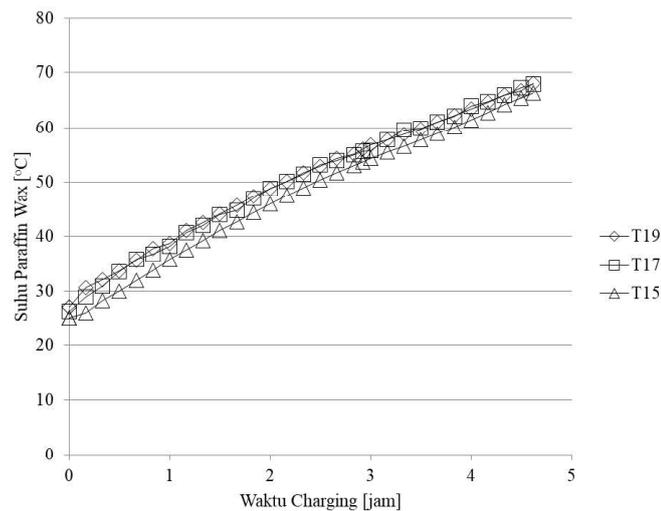
##### **4.1.1 Evolusi Suhu Arah Vertikal**

Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi suhu arah vertikal *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



Gambar 4. 1. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Vertikal

Grafik yang tersaji pada gambar 4.1 menunjukkan bahwa suhu pada keempat termokopel tidak terdapat perbedaan drastis. Pada saat suhu memasuki  $58^{\circ}\text{C}$  pada T1 mengalami kenaikan lebih cepat dibanding T2, T4 dan T6. Hal itu dipengaruhi oleh peletakan termokopel T1 yang mendekati dengan *heater*. Kenaikan suhu T2, T4 dan T6 cenderung lebih lambat terjadi setelah 3,3 jam. Peningkatan suhu yang lebih lambat dapat dipengaruhi oleh peletakan termokopel yang terlalu menumpuk sehingga menghalangi input aliran untuk melewati termokopel tersebut.

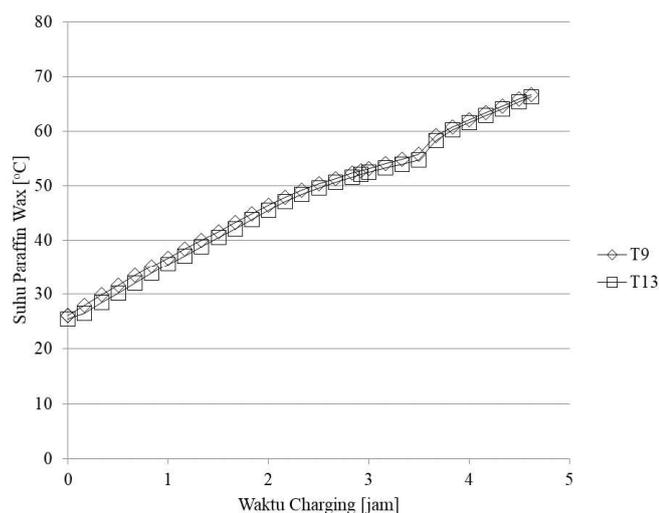


Gambar 4. 2. Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Grafik menunjukkan yang tersaji pada gambar 4.2 ketiga termokopel tidak terdapat perbedaan yang signifikan. Grafik Evolusi Suhu arah vertikal air mengalami kenaikan. Terjadi perbedaan sekitar 2 – 3 °C pada T19 dan T17 pada waktu 0,1 – 0,5 jam, 0,8 – 1 jam, dan 2,9 – 3 jam. Hal tersebut disebabkan oleh debit aliran yang naik turun pengaruh dari fluida yang masuk kedalam tangki sehingga menyebabkan gelembung – gelembung yang mempengaruhi kestabilan dari debit aliran.

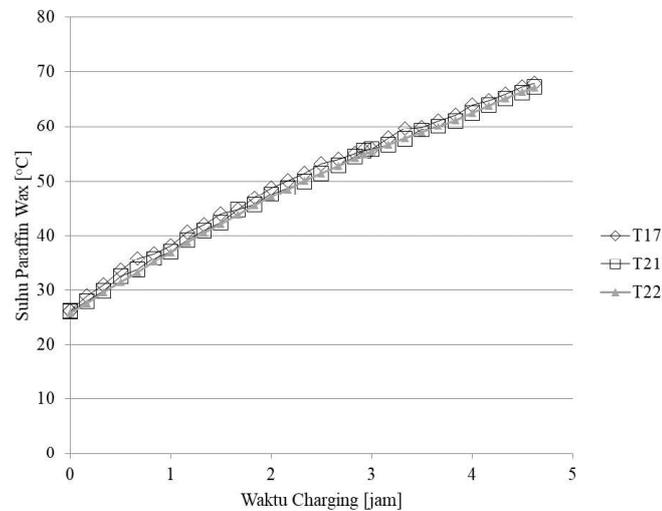
#### 4.1.2 Evolusi Suhu Arah Horisontal

Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi suhu arah horisontal *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



Gambar 4. 3. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Horisontal

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.3 tersebut suhu T9 lebih besar daripada T13 karena peletakan termokopel T9 lebih dekat dengan input tangki TES. Grafik menunjukkan bahwa T9 dan T13 mengalami kenaikan yang cenderung stabil sampai waktu pengujian mencapai 2,8 jam pengujian. Setelah pengujian 2,8 jam dan suhu mencapai 53 °C penurunan dan lonjakan pada grafik dikarenakan terjadi perubahan fasa paraffin dari padat menjadi cair. Hal tersebut merupakan terjadinya perubahan paraffin dari padat menjadi cair sehingga konduktifitas menjadi naik maka paraffin lebih cepat menyerap kalor.

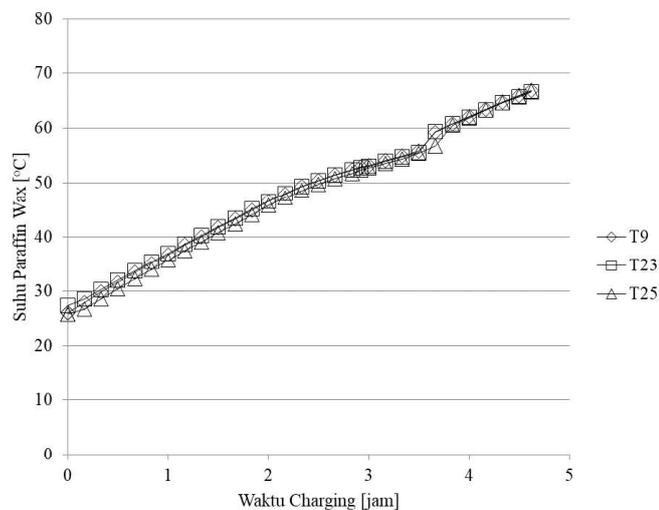


Gambar 4. 4. Evolusi Suhu Air Arah Horisontal

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa suhu T17 cenderung mengalami perbedaan kenaikan suhu dibandingkan dengan termokopel yang lainnya. Hal tersebut disebabkan oleh peletakan T17 lebih dekat dengan posisi inlet air yang berasal dari *heater*. Termokopel T17 mengalami kenaikan suhu yang kurang stabil dikarenakan adanya gejolak aliran yang disebabkan oleh peletakan termokopel yang kurang rapi sehingga menghambat laju aliran.

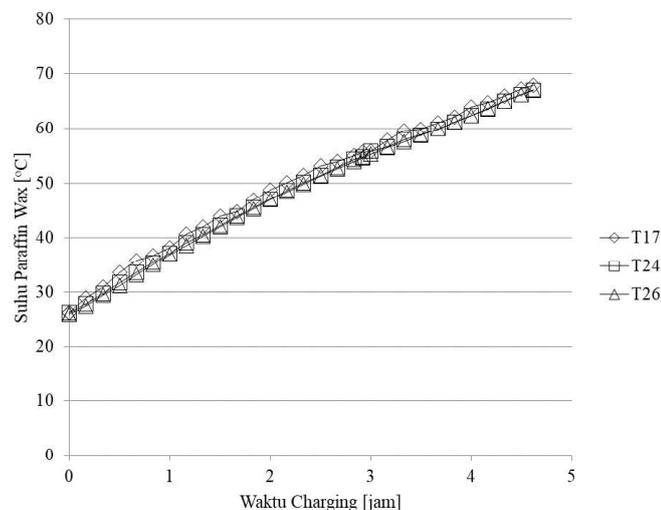
#### 4.1.3 Evolusi Suhu Arah Aksial

Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi suhu arah aksial *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



Gambar 4. 5. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Aksial

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.5 menunjukkan T25 pada waktu pengujian 0 – 2,8 jam mengalami kenaikan suhu yang cenderung lambat. Hal tersebut dikarenakan gejala aliran yang disebabkan peletakan termokopel yang kurang rapi sehingga menghambat laju aliran dari input. T9 dan T23 mengalami lonjakan pada saat suhu mencapai 53 - 60 °C dikarenakan terjadinya perubahan fasa paraffin dari padat menjadi cair. Sedangkan T25 cenderung lambat untuk mengalami perubahan fasa yaitu pada saat suhu mencapai 56 °C. Hal tersebut dikarenakan peletakan termokopel yang kurang rapi sehingga menghambat laju aliran.



Gambar 4. 6. Evolusi Suhu Air Arah Aksial

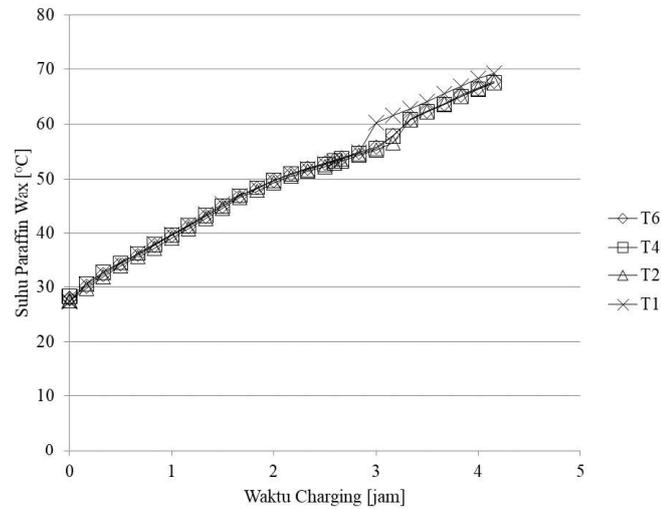
Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.6 diatas menunjukkan Temperatur air pada T17 merupakan temperatur yang paling besar dari ketiga termokopel. Hal itu terjadi karena letak T17 yang berada di tengah sedangkan T24 berada di penampang B dan T26 berada di penampang C sehingga T17 yang berada di tengah lebih dahulu terkena air inlet tangki. T24 dan T26 memiliki temperatur relatif sama pada waktu pengujian 0 – 4,6 jam. Grafik pada termokopel T17 mengalami fluktuasi yang disebabkan oleh gejolak aliran yang menghambat laju aliran.

#### 4.2. Evolusi pada Variasi 201 Volt

Penelitian laju penyerapan kalor pada variasi 201 volt yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan analisis. Analisis grafik penyerapan kalor PCM meliputi arah vertikal, arah horizontal, dan arah aksial termokopel yang terletak pada pipa tembaga dengan posisi pada Gambar 3.26. Proses pengambilan data penyerapan kalor dengan variasi 201 volt membutuhkan waktu 4 jam.

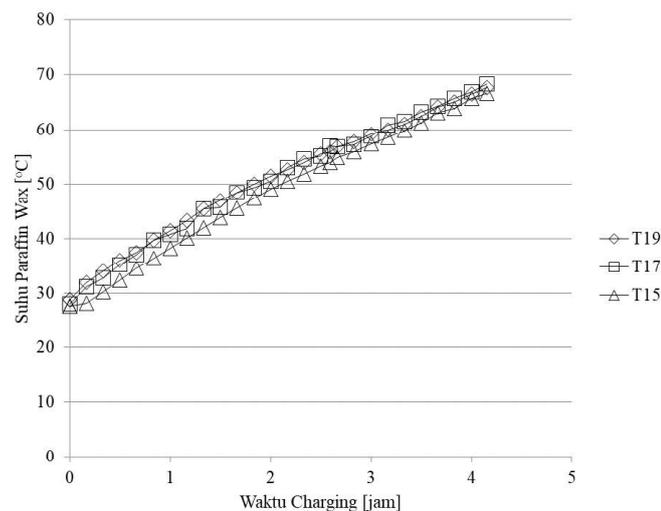
##### 4.2.1 Evolusi Suhu Arah Vertikal

Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi suhu arah vertikal *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



Gambar 4. 7. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Vertikal

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.7 menunjukkan bahwa suhu awal tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Ketika suhu mencapai angka 54°C grafik menunjukkan peningkatan suhu yang lebih lambat. Hal tersebut disebabkan karena terjadinya perubahan fasa paraffin wax dan perletakan termokopel yang terlalu menumpuk. Pada T1 mengalami kenaikan yang cukup tinggi pada waktu 3 jam menunjukkan suhu 60,21 °C. Kenaikan T1 yang cukup tinggi disebabkan oleh peletakan termokopel T1 yang dekat dengan heater.

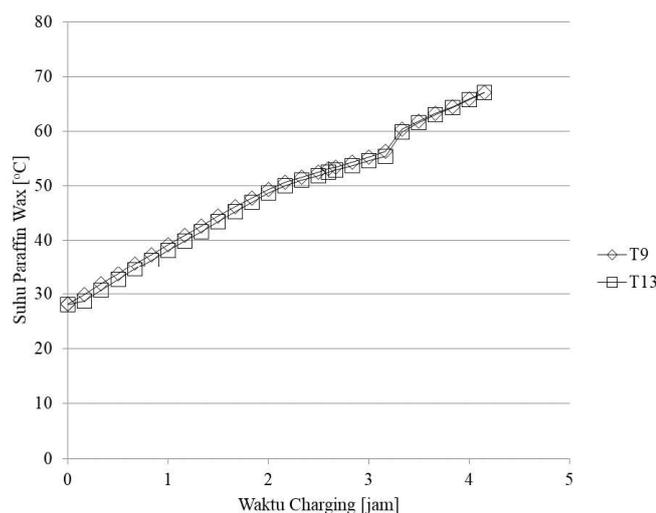


Gambar 4. 8. Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.8 diatas menunjukkan bahwa termokopel T15 terlihat lebih lambat dalam peningkatan suhu dibanding T17 dan T19. Hal tersebut disebabkan oleh peletakan termokopel yang kurang rapi sehingga menyebabkan terhambatnya laju aliran pada T15. Pada T17 terlihat pada grafik kurang stabil pada 1 jam pengujian dan 2 jam. Hal tersebut disebabkan masuknya udara pada tangki sehingga menyebabkan gelembung yang mengakibatkan debit naik turun.

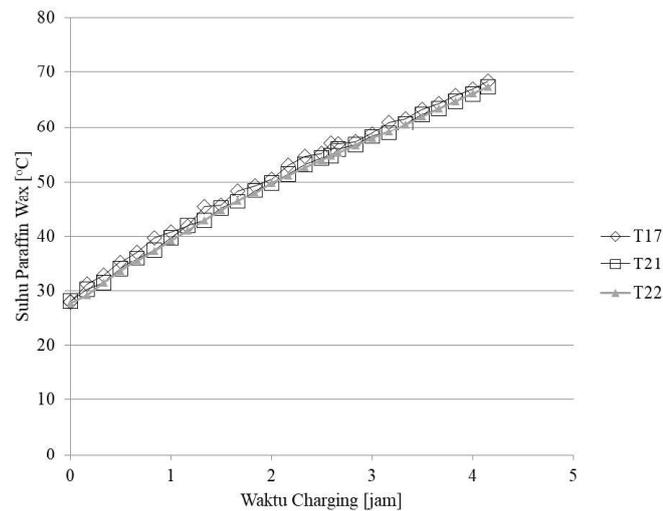
#### 4.2.2 Evolusi Suhu Arah Horisontal

Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi suhu arah horisontal *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



Gambar 4. 9. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Horizontal

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.9 diatas menunjukkan T9 menunjukkan bahwa suhu awal 28,20 °C lebih tinggi dibanding dengan T13 yang menunjukkan 28,07 °C. Peningkatan suhu yang terjadi selanjutnya T9 lebih tinggi dibanding dengan T13. Hal tersebut disebabkan oleh peletakan termokopel T19 yang mendekati dengan input tangki TES. Pada pengujian 2,5 jam grafik menunjukkan peningkatan suhu yang lambat pada suhu 52 °C mencapai 60 °C. Hal tersebut disebabkan terjadinya perubahan fasa pada paraffin wax. Setelah suhu 60 °C grafik menunjukkan stabil hingga akhir pengujian.

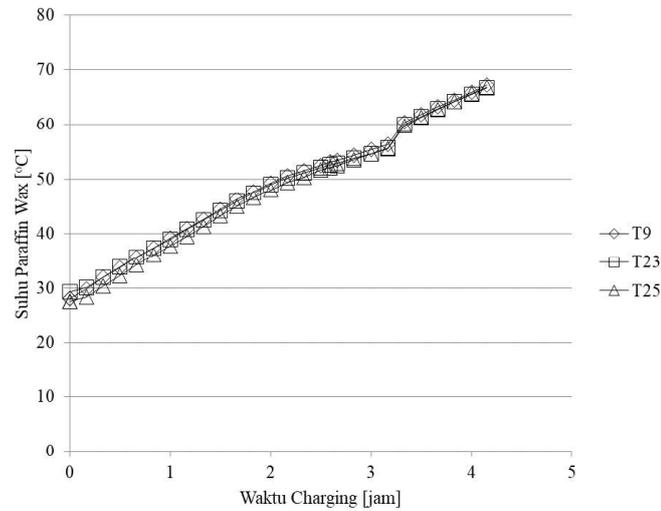


Gambar 4. 10. Evolusi Suhu Air Arah Horizontal

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.10 diatas menunjukkan bahwa ketiga termokopel cenderung stabil. Perbedaan ditunjukkan pada termokopel T17 cenderung kurang stabil dan dan suhunya lebih tinggi. Hal itu disebabkan oleh gejolak aliran yang menghambat laju aliran dan masuknya udara pada tangki yang menyebabkan debit naik turun. Sehingga pada suhu 45 °C, 55 °C mengalami percepatan dan perlambatan suhu.

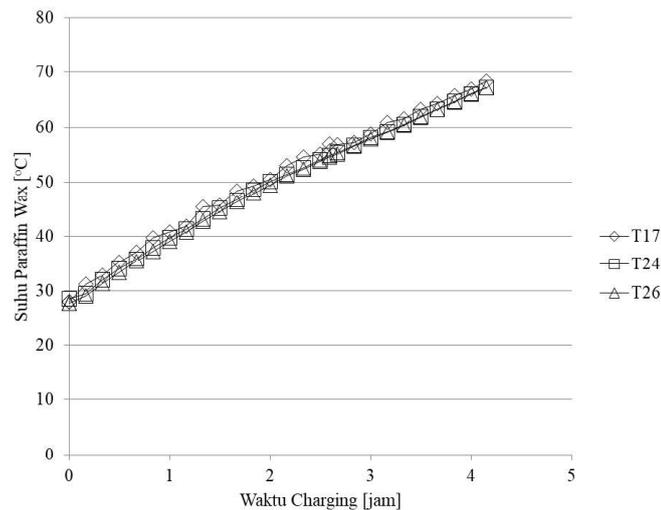
#### 4.2.3 Evolusi Suhu Arah Aksial

Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi suhu arah aksial *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



Gambar 4. 11. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Aksial

Grafik yang tersaji pada gambar 4.11 menunjukkan bahwa T25 pada pengujian 0 – 3 jam cenderung lebih lambat dibandingkan dengan termokopel yang lain. Hal tersebut disebabkan T25 mengalami gejala aliran yang disebabkan peletakan termokopel yang kurang rapi sehingga kenaikan suhu cenderung lebih lambat. Pada pengujian waktu 3 jam di suhu 52 °C – 59,75 °C ketiga termokopel mengalami perubahan fasa *paraffin wax*.



Gambar 4. 12. Evolusi Suhu Air Arah Aksial

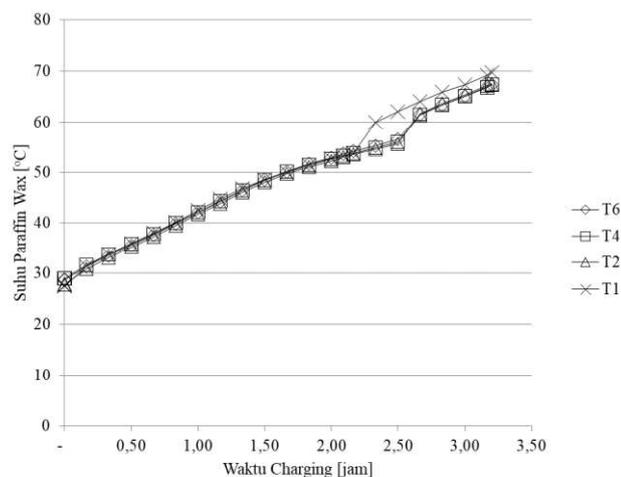
Grafik yang tersaji pada gambar 4.12 menunjukkan bahwa perubahan temperatur air di dalam tangki TES seiring dengan waktu selama proses charging. Kenaikan temperatur HTF terjadi secara perlahan dan berfluktuasi. Kenaikan temperatur dari awal proses sampai akhir pengujian terlihat cepat. Cepatnya kenaikan temperatur ini mengindikasikan bahwa laju transfer kalornya lebih besar. Hal ini disebabkan oleh besarnya kalor yang di transfer oleh heater. Fluktuasi terjadi pada T17 pada waktu pengujian 0,8 jam – 3,3 jam. Suhu pada T17 lebih besar dibanding dengan T24 dan T26, dikarenakan T17 terletak di tengah sedangkan T24 terletak pada penampang B dan T26 terletak pada penampang C. Posisi T17 juga diindikasikan menyebabkan fluktuasi karena letaknya ditengah.

#### 4.3. Evolusi Suhu pada Variasi 220 Volt

Penelitian laju penyerapan kalor pada variasi 220 volt yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan analisis. Analisis grafik penyerapan kalor PCM meliputi arah vertikal, arah horizontal, dan arah aksial termokopel yang terletak pada pipa tembaga dengan posisi pada Gambar 3.26. Proses pengambilan data penyerapan kalor dengan variasi 201 volt membutuhkan waktu 3,2 jam.

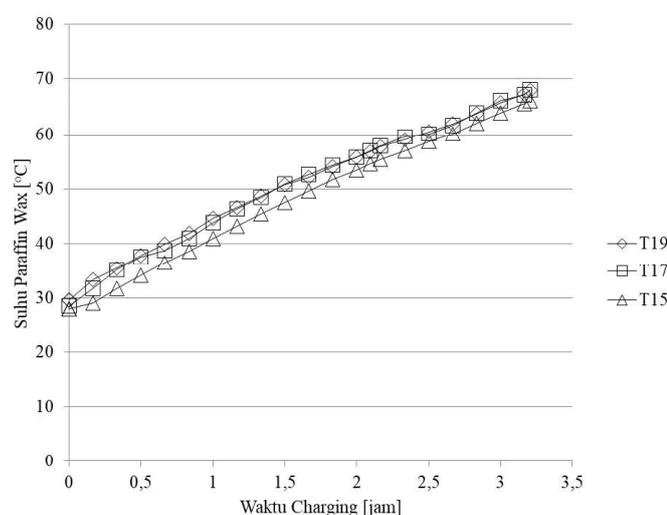
##### 4.3.1 Evolusi Suhu Arah Vertikal

Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi suhu arah vertikal *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



Gambar 4. 13. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Vertikal

Grafik yang tersaji pada gambar 4.13 menunjukkan bahwa awal kenaikan keempat termokopel sama dan cenderung stabil. Pada suhu  $53,80^{\circ}\text{C}$  terjadi sedikit perlambatan kenaikan suhu yang disebabkan perubahan fasa *paraffin wax* sampai pada suhu  $64^{\circ}\text{C}$ . Pada termokopel T1 menunjukkan perbedaan grafik dan mengalami kenaikan grafik. Kenaikan grafik yang berbeda tersebut pada suhu  $53^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ . Hal tersebut disebabkan oleh peletakan T1 yang mendekati dengan *heater* sehingga mendapat banyak kalor dari *heater*.

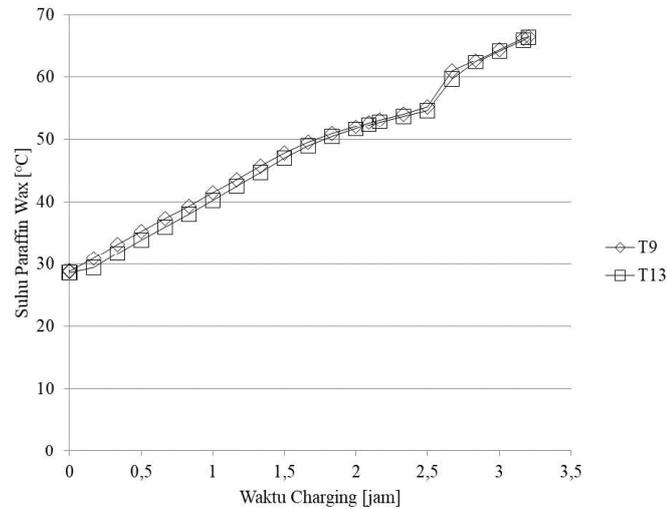


Gambar 4. 14. Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Grafik yang tersaji pada gambar 4.14 menunjukkan bahwa perubahan temperatur seiring dengan waktu pada proses charging. Kenaikan temperatur HTF terjadi secara perlahan dan berfluktuasi. Kenaikan temperatur dari awal proses sampai akhir pengujian terlihat cepat. T15 menunjukkan suhu paling rendah dibanding dengan T17 dan T19. Suhu awal T15  $27,95^{\circ}\text{C}$  sedangkan T17  $28,60^{\circ}\text{C}$  dan T19  $29,63^{\circ}\text{C}$ . Hal itu disebabkan oleh peletakan termokopel yang kurang rapi sehingga terjadi gejala aliran yang menghambat aliran. T15 terletak pada bagian bawah tangki.

#### 4.3.2 Evolusi Suhu Arah Horisontal

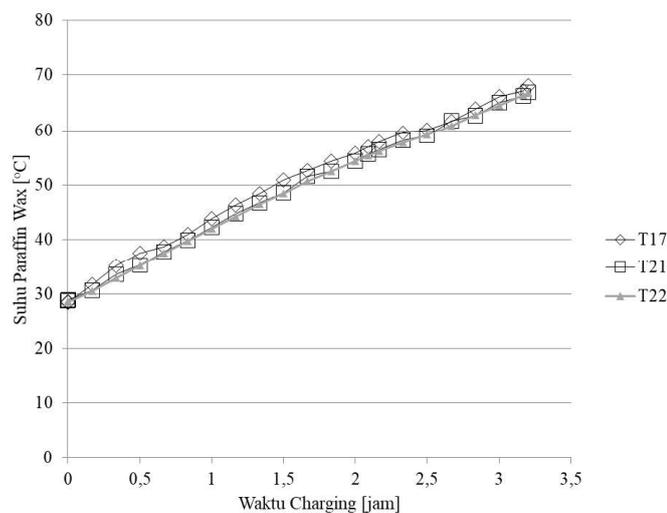
Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi suhu arah horisontal *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



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

Grafik yang tersaji pada gambar 4.15 menunjukkan bahwa suhu T9 lebih besar dibanding dengan T13. Hal tersebut dapat diamati berdasarkan letak termokopel dimana T9 lebih dekat dengan input tangki, sehingga T9 terkena air *heater* terlebih dahulu dibandingkan dengan T13 yang terletak disamping T9.

Pada waktu 2 jam suhu 51,68 °C – 62,86 °C grafik mengalami perlambatan kenaikan suhu dan lonjakan. Hal tersebut disebabkan oleh perubahan fasa paraffin dari padat menjadi cair. Lonjakan suhu terjadi karena paraffin yang mulai mencair sehingga konduktivitas menjadi naik maka paraffin lebih cepat menyerap kalor.



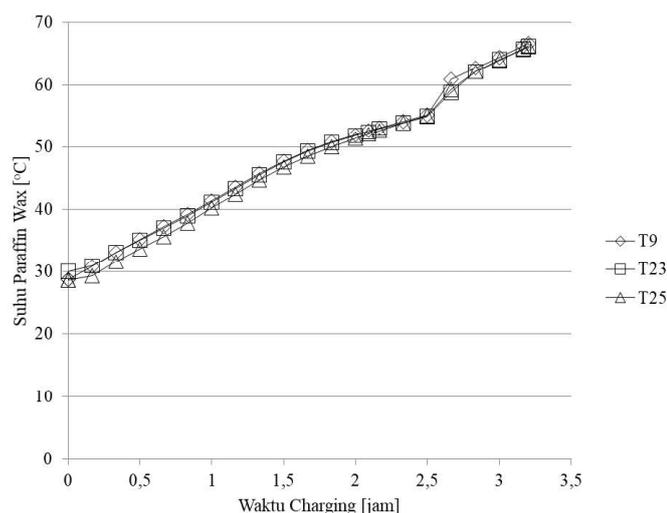
Gambar 4. 16. Evolusi Suhu Air Arah Horisontal

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.16 menunjukkan perubahan temperatur seiring dengan waktu pada proses charging. Kenaikan temperatur HTF terjadi secara perlahan dan berfluktuasi. Kenaikan temperatur dari awal proses sampai akhir pengujian terlihat cepat. Cepatnya kenaikan temperatur ini mengindikasikan bahwa laju transfer kalornya lebih besar. Hal ini disebabkan oleh besarnya kalor yang ditransfer oleh heater.

Terlihat pada grafik T17 mempunyai suhu lebih tinggi dibanding T21 dan T22. Hal ini dikarenakan adanya gejolak aliran yang disebabkan peletakan termokopel kurang rapi sehingga laju aliran air inlet dari heater terhambat. Grafik T21 dan T22 relatif sama dan stabil. Pada waktu 1,67 jam suhu  $50,60^{\circ}\text{C}$  dan pada waktu 2,67 jam suhu  $60,92^{\circ}\text{C}$  adanya lonjakan pada grafik. Hal tersebut terjadi karena adanya fluida yang masuk ke dalam tangki TES. Sehingga terdapat gelembung – gelembung udara yang mempengaruhi debit aliran yang naik turun.

#### 4.3.3 Evolusi Suhu Arah Aksial

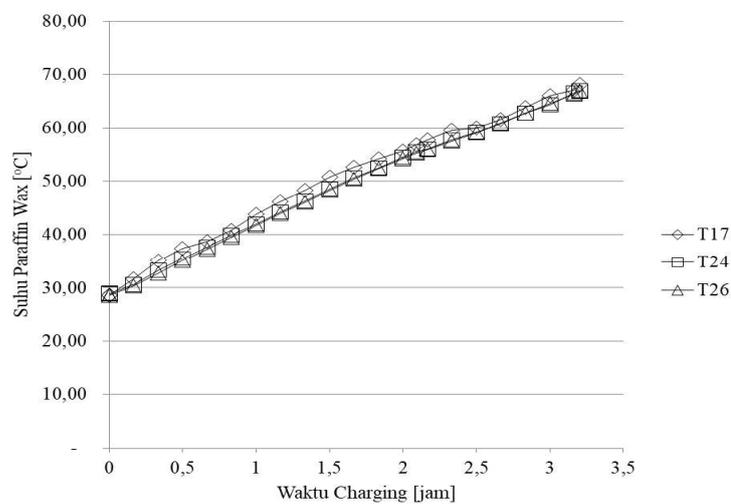
Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan evolusi suhu arah aksial *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



Gambar 4. 17. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Aksial

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.17 menunjukkan bahwa T25 dari waktu 0 – 2 jam cenderung lebih lambat dari T9 dan T23 dimana seharusnya

ketiga termokopel tersebut memiliki temperatur yang relatif sama. Hal itu dapat terjadi karena adanya gejala aliran yang disebabkan peletakan termokopel yang kurang rapi sehingga menghambat laju aliran dari input. Pada suhu  $52,86\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $62\text{ }^{\circ}\text{C}$  mengalami perlambatan dan lonjakan pada grafik. Hal tersebut dikarenakan terjadinya perubahan fasa paraffin dari padat menjadi cair. Lonjakan suhu terjadi karena paraffin yang mulai mencair sehingga konduktivitas menjadi naik maka paraffin lebih cepat menyerap kalor.



Gambar 4. 18. Evolusi Suhu Air Arah Aksial

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.18 menunjukkan perubahan temperatur seiring dengan waktu pada proses charging. Kenaikan temperatur HTF terjadi secara perlahan dan berfluktuasi. Kenaikan temperatur dari awal proses sampai akhir pengujian terlihat cepat. Cepatnya kenaikan temperatur ini mengindikasikan bahwa laju transfer kalornya lebih besar. Hal ini disebabkan oleh besarnya kalor yang ditransfer oleh heater.

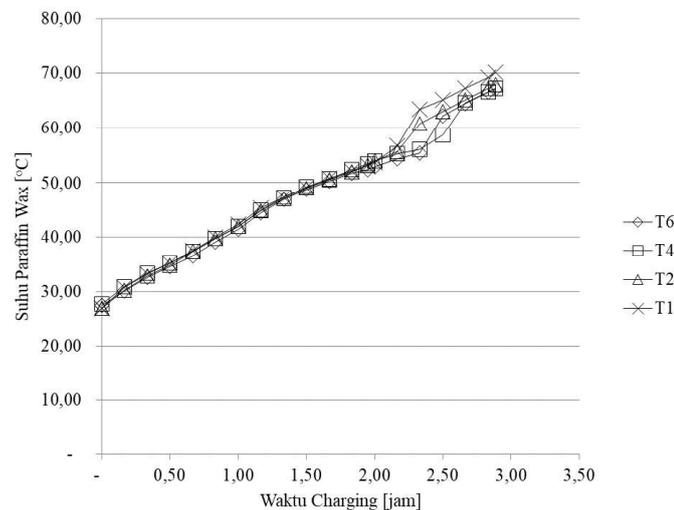
Terlihat pada grafik T17 terlihat kurang stabil. Hal ini dikarenakan adanya gejala aliran yang disebabkan peletakan termokopel kurang rapi sehingga laju aliran air inlet dari *heater* terhambat. Grafik T21 dan T22 relatif sama dan stabil. Pada waktu 2,09 jam suhu  $55,29\text{ }^{\circ}\text{C}$  adanya lonjakan pada grafik. Hal tersebut terjadi karena adanya fluida yang masuk ke dalam tangki TES. Sehingga terdapat gelembung – gelembung udara yang mempengaruhi debit aliran yang naik turun.

#### 4.4. Evolusi Suhu pada Variasi 227 Volt

Penelitian laju penyerapan kalor pada variasi 201 volt yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan analisis. Analisis grafik penyerapan kalor PCM meliputi arah vertikal, arah horizontal, dan arah aksial termokopel yang terletak pada pipa tembaga dengan posisi pada Gambar 3.26. Proses pengambilan data penyerapan kalor dengan variasi 227 volt membutuhkan waktu 2,8 jam.

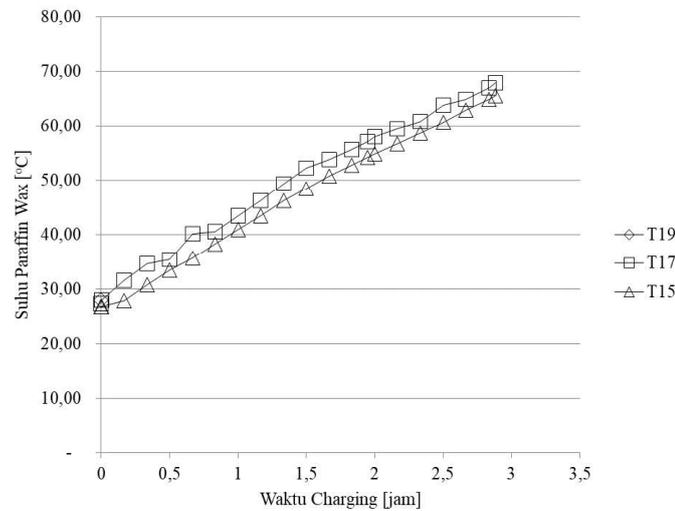
##### 4.4.1 Evolusi Suhu Arah Vertikal

Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi suhu arah vertikal *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



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

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.19 menunjukkan bahwa suhu awal tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Ketika suhu mencapai angka 53,70°C terjadi lonjakan pada grafik. Hal tersebut disebabkan adanya perubahan fasa paraffin dari padat menjadi cair. Lonjakan suhu terjadi karena paraffin yang mulai mencair sehingga konduktivitas menjadi naik maka paraffin lebih cepat menyerap kalor. Selain terjadinya perubahan fasa juga disebabkan oleh peletakan termokopel yang terlalu rapat sehingga terjadi gejolak aliran.



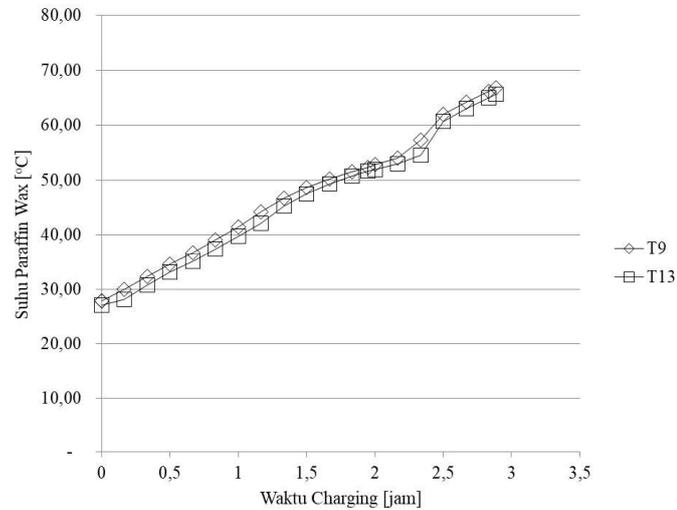
Gambar 4. 20. Evolusi Suhu Air Arah Vertikal

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.20 menunjukkan perubahan temperatur seiring dengan waktu pada proses charging. Kenaikan temperatur HTF terjadi secara perlahan dan berfluktuasi. Kenaikan temperatur dari awal proses sampai akhir pengujian terlihat cepat. Cepatnya kenaikan temperatur ini mengindikasikan bahwa laju transfer kalornya lebih besar. Hal ini disebabkan oleh besarnya kalor yang ditransfer oleh heater.

Terlihat pada grafik T17 dan T19 mempunyai suhu lebih tinggi dibanding T15. Termokopel T15 memiliki suhu yang lebih rendah disebabkan peletakan termokopel yang jauh dari input heater. Pada waktu 0,5 jam suhu 34 -40 °C grafik terlihat kurang stabil. Hal ini disebabkan adanya fluida yang masuk kedalam tangki TES sehingga menyebabkan debit air naik turun pada waktu tersebut.

#### 4.4.2 Evolusi Suhu Arah Horizontal

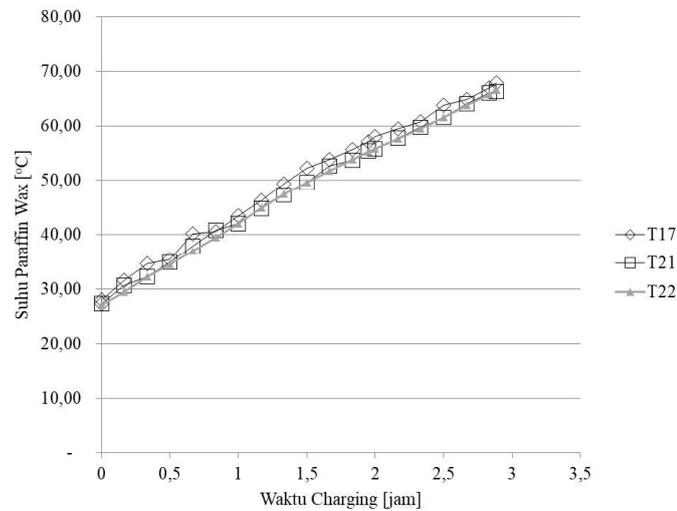
Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi suhu arah horizontal *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



Gambar 4. 21. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Horisontal

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.21 menunjukkan bahwa suhu pada T9 lebih besar daripada suhu T13. Hal tersebut dapat diamati berdasarkan letak termokopel dimana T9 lebih dekat dengan input tangki, sehingga T9 lebih dahulu terkena air heater daripada T13 yang terletak di samping T9.

Kenaikan suhu T9 dan T13 dari suhu awal dan waktu 0-2 jam tidak mengalami kenaikan suhu yang drastis. Sampai pada waktu 2,1 jam suhu T9 memasuki suhu 52,96 °C dan T13 memasuki suhu 53,97 °C mengalami lonjakan suhu dimana pada suhu tersebut terjadi perubahan fasa paraffin dari padat menjadi cair. Lonjakan suhu terjadi karena paraffin yang mulai mencair sehingga konduktifitas menjadi naik maka paraffin lebih cepat untuk menyerap kalor.



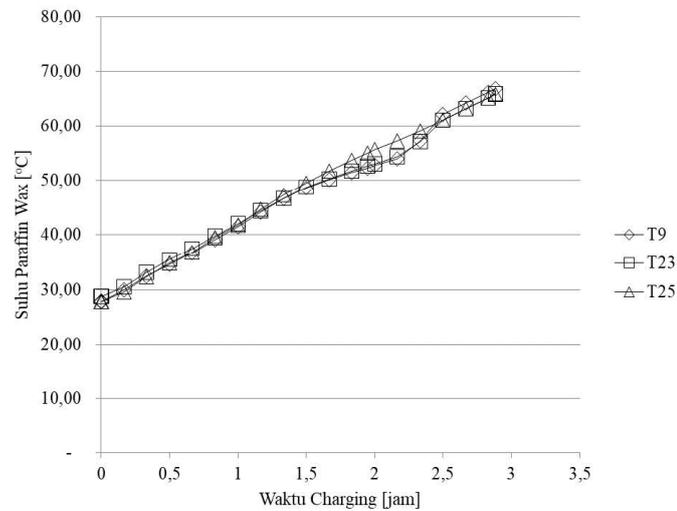
Gambar 4. 22. Evolusi Suhu Air Arah Horizontal

Grafik yang tersaji pada gambar 4.22 terdapat perbedaan kenaikan suhu air dari ketiga termokopel. Dari awal pengujian sampai akhir T17 merupakan suhu yang tertinggi dari ketiga termokopel tersebut, karena letak T17 yang lebih dekat dengan posisi inlet air yang berasal dari heater. Kenaikan temperatur HTF terjadi secara perlahan dan berfluktuasi. Kenaikan temperatur dari awal proses sampai akhir pengujian terlihat cepat. Cepatnya kenaikan temperatur ini mengindikasikan bahwa laju transfer kalornya lebih besar. Hal ini disebabkan oleh besarnya kalor yang ditransfer oleh heater.

Grafik menunjukkan T17 pada waktu 0,5 – 0,83 jam suhu 43 – 40 °C terlihat kurang stabil. Hal ini disebabkan terjadi gejolak aliran yang disebabkan peletakan termokopel yang kurang rapi sehingga laju aliran air inlet dari *heater* terhambat. T21 dan T22 terbaca relatif stabil.

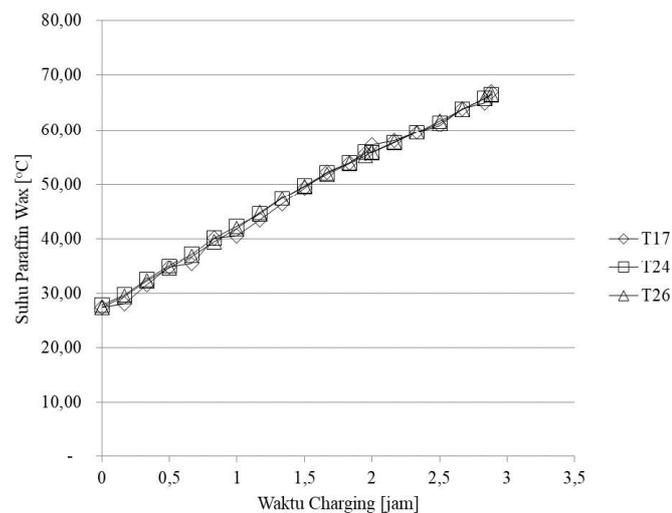
#### 4.4.3 Evolusi Suhu Arah Aksial

Penelitian laju penyerapan kalor yang terjadi dari HTF ke PCM perlu dilakukan pengamatan Evolusi suhu arah aksial *paraffin wax* dan air yang ada dalam tangki TES.



Gambar 4. 23. Evolusi Suhu *Paraffin Wax* Arah Aksial

Berdasarkan grafik yang tersaji pada gambar 4.23 menunjukkan ketiga termokopel memulai awal pengujian dengan suhu yang relatif sama. Kondisi pengujian terlihat waktu 0 – 1,8 jam relatif stabil. Pada suhu 52,69 °C terbaca pada T9 dan T23 sedangkan T25 terbaca 55,03 °C terjadi pelambatan kenaikan suhu. Hal tersebut disebabkan oleh perubahan fasa paraffin dari padat menjadi cair. Lonjakan suhu terjadi karena paraffin yang mulai mencair sehingga konduktifitas menjadi naik maka paraffin lebih cepat untuk menyerap kalor. Setelah suhu mencapai 62,08 °C terlihat stabil kembali sampai akhir pengujian.



Gambar 4. 24. Evolusi Suhu Air Arah Aksial

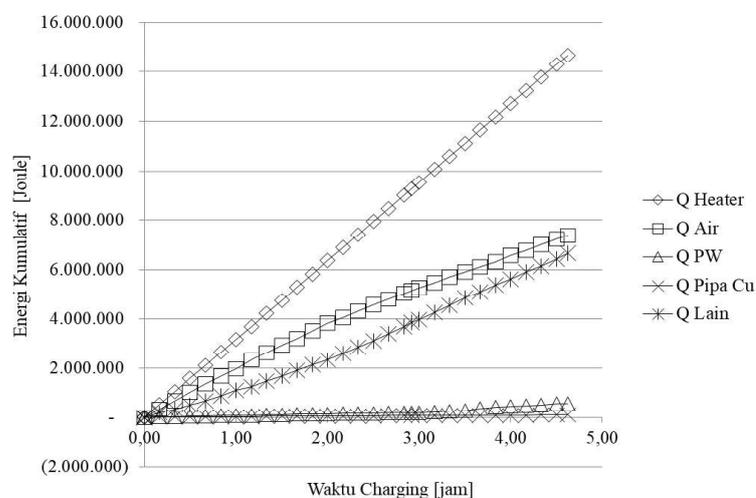
Grafik yang tersaji pada gambar 4.24 terdapat perbedaan kenaikan suhu air dari ketiga termokopel. Dari awal pengujian sampai akhir T17 merupakan suhu yang tertinggi dari ketiga termokopel tersebut, karena letak T17 yang lebih dekat dengan posisi inlet air yang berasal dari heater. Kenaikan temperatur HTF terjadi secara perlahan dan berfluktuasi. Kenaikan temperatur dari awal proses sampai akhir pengujian terlihat cepat. Cepatnya kenaikan temperatur ini mengindikasikan bahwa laju transfer kalornya lebih besar. Hal ini disebabkan oleh besarnya kalor yang ditransfer oleh heater.

Grafik menunjukkan T17 pada waktu 0,3 – 0,83 jam suhu 43 – 40°C terlihat kurang stabil. Hal ini disebabkan terjadi gejolak aliran yang disebabkan peletakan termokopel yang kurang rapi sehingga laju aliran air inlet dari *heater* terhambat. T21 dan T22 terbaca relatif stabil. Hingga akhir pengujian T17 terlihat kurang stabil.

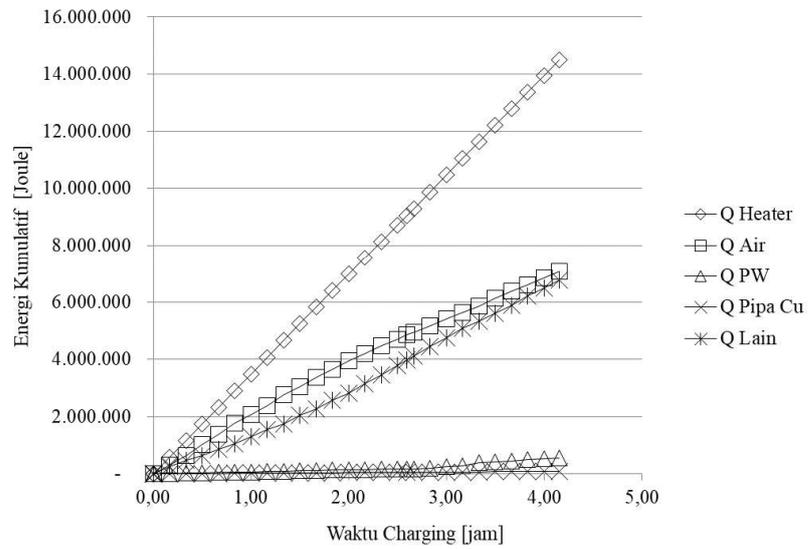
#### 4.5. Energi Kumulatif

Hasil Energi kumulatif yang dihasilkan selama proses charging perlu untuk diamatati agar mampu menentukan performa serta pengaruh dari heater sebagai pemanas; air sebagai *heat transfer fluid* (HTF); *Paraffin Wax* sebagai *phase change material* (PCM); Pipa Cu sebagai Kapsul tempat dari PCM; Energi lain-lain yang merupakan energi dari tangki dan *losses*.

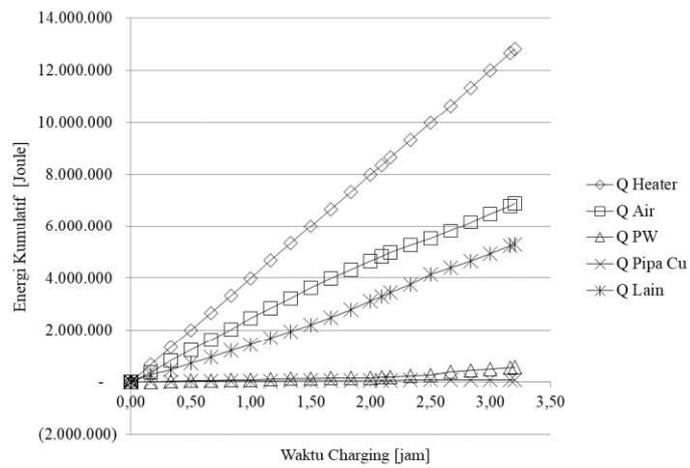
##### 4.5.1 Energi Kumulatif setiap variasi



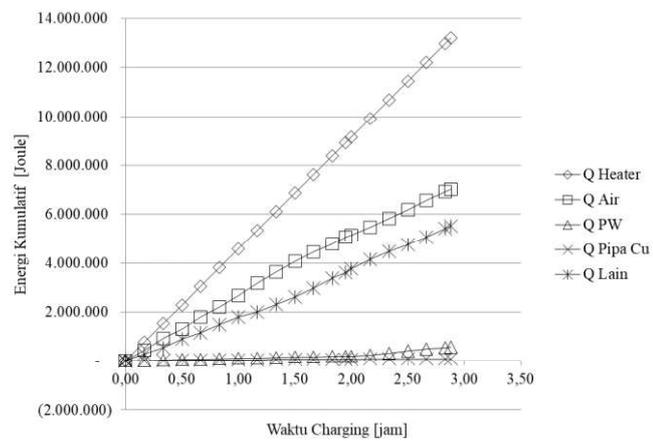
Gambar 4. 25. Grafik Energi Kumulatif Variasi 190 Volt



Gambar 4. 26. Grafik Energi Kumulatif Variasi 201 Volt



Gambar 4. 27. Grafik Energi Kumulatif Variasi 220 Volt



Gambar 4. 28. Grafik Energi Kumulatif Variasi 227 Volt

Grafik-grafik energi kumulatif diatas menunjukkan kemiripan pola disetiap variasi dimana Q Heater mempunyai energi paling tinggi, kemudian disusul oleh Q air, Q lain, Q Paraffin Wax, Q pipa Cu. Perbedaan yang cukup signifikan ini terjadi karena prosentase volume yang berbeda diluar heater yang menghasilkan energi sendiri. Perbedaan waktu lamanya pengujian juga mempunyai pengaruh terhadap jumlah energi kumulatif yang didapat. Pada variasi 190 dan 201 Volt yang mempunyai waktu pengambilan data yang lebih lama. Energi kumulatif heater mampu mencapai angka 14,6 juta joule untuk voltase 190 dan pada 14,4 juta joule untuk voltase 201. Sementara pada variasi lainnya hanya dikisaran 12 jutaan.

#### 4.5.2 Energi Kumulatif Q Heater

Energi Kumulatif yang di hasilkan selama proses chargn oleh heater. Hasil Q heater didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.1.

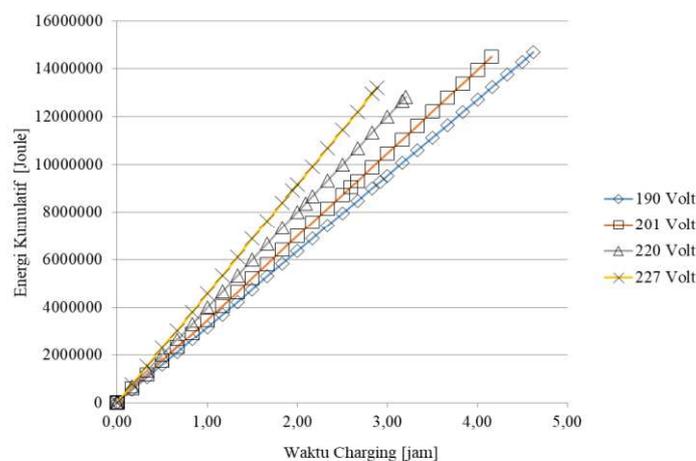
$$Q_{kum\ heater} = Q_{kumulatif\ heater} + Q_{heater\ sesaat} \quad (4.1)$$

$$Q_{kum\ heater} = 4412,62 + 4412,62$$

$$Q_{kum\ heater} = 8825,24 \text{ J}$$

Tabel 4. 1 Data Energi Kumulatif Q Heater

No Data	Q heater sesaat	Q heater kumulatif
	Joule	Joule
1	4412,62	4412,62
2	4412,62	529514,58



Gambar 4. 29. Energi Kumulatif Q Heater

Grafik diatas menunjukkan heater mampu menghasilkan energi yang relatif stabil. Perbedaan terlihat disebabkan oleh bedanya besar energi yang dihasilkan oleh heater. Besar energi dipengaruhi oleh besarnya voltase yang dihasilkan dari voltage regulator. Besarnya voltase juga mempengaruhi cepatnya waktu pengujian, semakin lama waktu pengujian semakin besar energi yang terkumpul. Energi terbesar dihasilkan oleh variasi 190 volt dan terkecil dihasilkan oleh variasi 227 volt.

#### 4.5.3 Energi Kumulatif Q Air

Hasil Q air didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.2.

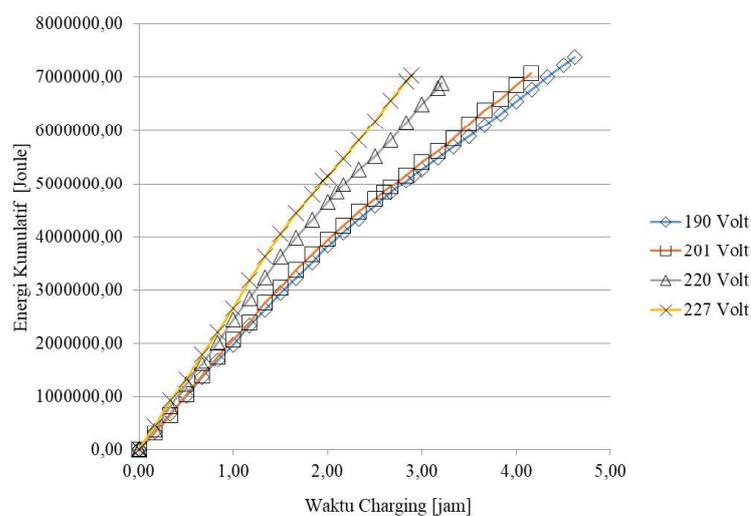
$$Q_{kum\ air} = massa_{air} * Cp_{Air} * (\Delta T) \quad (4.2)$$

$$Q_{kum\ air} = 43.13 * 4180 * (26,14 - 26.13)$$

$$Q_{kum\ air} = 1802,83\ J$$

Tabel 4. 2 Data Energi Kumulatif Q Air

No data	Cp air	Massa Air	Suhu Air rata rata	Q kumair
	[J/(kg.K)]	[kg]	°C	(J)
0	4180	43.13	26,13	-
1	4180	43.13	26,14	1802,83



Gambar 4. 30. Energi Kumulatif Q Air

Grafik menunjukkan kenaikan yang relatif stabil dengan perbedaan energi yang disebabkan oleh variasi fluks kalor. Kenaikan grafik tersebut tidak dibarengi dengan kenaikan yang konstan. Hal tersebut disebabkan oleh penurunan dari energi yang didapat dan PCM mulai mengalami perubahan fasa kemudian menyerap energi air yang disimpan oleh PCM.

#### 4.5.4 Energi Kumulatif Q PCM

Hasil Q *Paraffin Wax* didapat dengan menggunakan rumus

Kondisi Sensibel

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

$$Q_{kum \text{ sensibel}} = 3,5 * 2000 * (52,83 - 26,08)$$

$$Q_{kum \text{ sensibel}} = 187.250 \text{ J}$$

Tabel 4. 3 Data Energi Kumulatif Q PCM Sensibel

No data	Cp <i>Paraffin Wax</i>	Massa <i>Paraffin Wax</i>	Suhu <i>Paraffin Wax</i> rata rata	Q kum
	[J/(kg.K)]	[kg]	°C	(J)
0	2000	3,5	26,08	-
2102	2000	3,5	52,83	187.397,28

Kondisi Laten

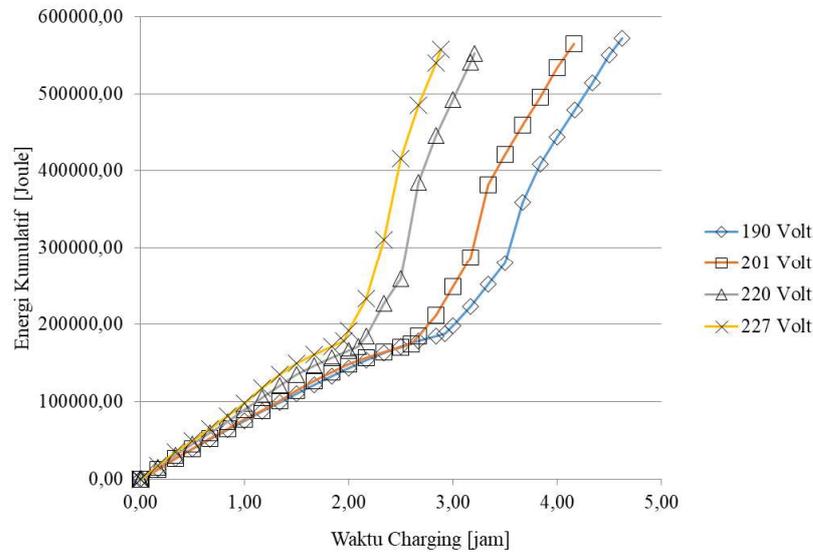
$$Q_{kum \text{ laten}} = \text{massa PCM} * \text{kalor lebur PW} * \left( \frac{T_{akhir} - T_{awal}}{T_{end} - T_{start}} \right)$$

$$Q_{kum \text{ laten}} = 3,5 * 128,64 * \left( \frac{67,14 - 52,84}{69,66 - 52,86} \right)$$

$$Q_{kum \text{ laten}} = 383,24$$

Tabel 4. 4 Data Energi Kumulatif Q PCM Laten

No data	Cp <i>Paraffin Wax</i>	Massa <i>Paraffin Wax</i>	T PW rata rata	Q kum
	[J/(kg.K)]	[kg]	°C	(J)
2103	2000	3,5	52,84	187.665,98
3328	2000	3,5	67,14	571.355,58



Gambar 4. 31. Energi Kumulatif Q Paraffin Wax

Grafik menunjukkan awal pengujian keempat variasi relative sama sampai waktu memasuki 2 - 3 jam grafik mengalami lonjakan. Lonjakan tersebut menunjukan kenaikan energi. Hal tersebut terjadi karena pada waktu tersebut PCM mengalami perubahan fasa dan mengambil energi dari air yang kemudian disimpan oleh PCM.

#### 4.5.5 Energi Kumulatif Q Pipa Cu

Hasil Q Pipa-Cu didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.4.

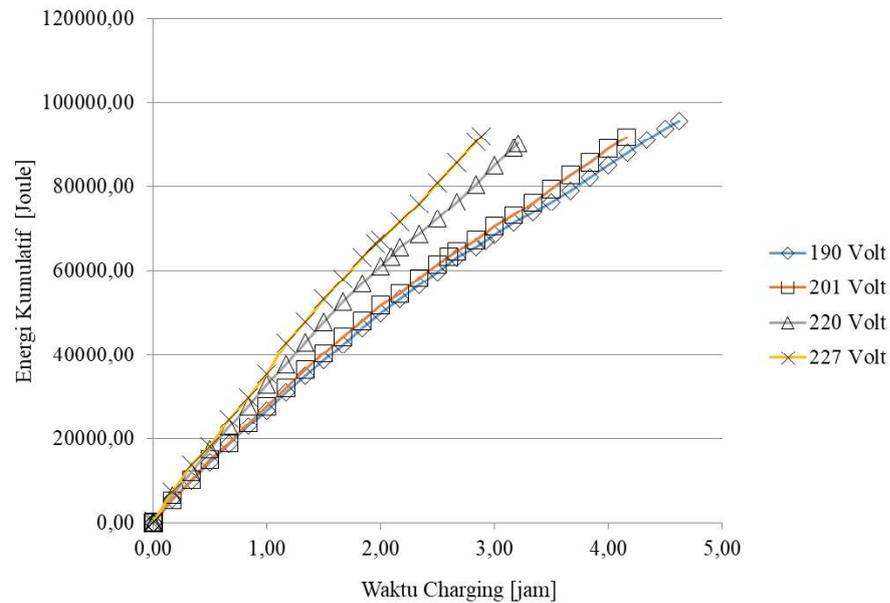
$$Q_{kum} = \text{massa Pipa Cu} * C_p \text{Pipa Cu} * (\Delta T) \quad (4.4)$$

$$Q_{kum} = 5,91 * 390 * (25,87 - 25,83)$$

$$Q_{kum} = 91,36 J$$

Tabel 4. 5 Data Energi Kumulatif Q Pipa Cu

No data	Cp Pipa Cu	Massa Pipa Cu	Suhu Pipa Cu	Q kumPipa Cu
	[J/(kg.K)]	[kg]	°C	(J)
0	390	5,91	25,83	-
4	390	5,91	25,87	91,36



Gambar 4. 32. Energi Kumulatif Pipa Cu

Grafik menunjukkan kenaikan yang relatif stabil. Grafik diatas menunjukkan energi yang didapat oleh pipa Cu. Pipa Cu memiliki fungsi sebagai kapsul untuk menempatkan PCM yang berbentuk silinder. Maka pipa Cu hanya mendapat energi yang cukup kecil selama proses charging.

#### 4.5.6 Energi Kumulatif Lain – lain

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

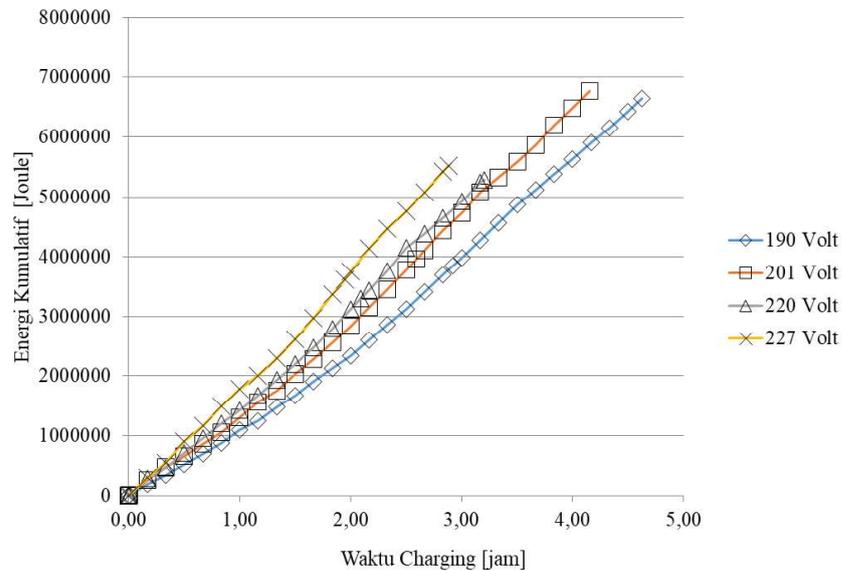
$$Q_{kum} = Q_{kum\ heater} - (Q_{kum\ air} + Q_{kum\ PCM} + Q_{pipa\ Cu}) \quad (4.5)$$

$$Q_{kum} = 17650,49 - (7949,99 + 140,12 + 91,36)$$

$$Q_{kum} = 25423.56 \text{ J}$$

Tabel 4. 6 Data Energi Kumulatif Q Lain - lain

No data	$Q_{kum\ heater}$	$Q_{kum\ air}$	$Q_{kum\ PCM}$	$Q_{pipa\ Cu}$
	J	J	J	J
4	17650,49	7949,99	140,12	91,36



Gambar 4. 33. Energi Kumulatif Q Lain – lain

Grafik menunjukkan energi yang didapat Q lain-lain. Q lain-lain didapat dengan mengurangi energi *heater* yang merupakan energi awal dikurangi energi air, energi paraffin wax, energi pipa Cu. Maka laju kenaikan grafik Q lain-lain mengikuti hasil masing-masing dari energi kumulatif tersebut.

#### 4.6. Laju Penyerapan *Paraffin Wax*

##### 4.6.1 Laju Penyerapan *Paraffin Wax* Sensibel

Hasil laju penyerapan sensibel didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.6.

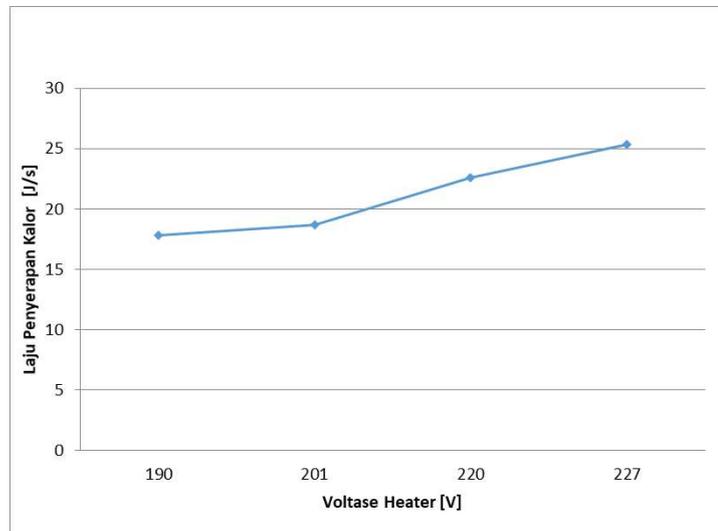
$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{Q \text{ Kumulatif sensibel}(J)}{\text{Waktu total sensibel}(s)}$$

$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{187.397,28(J)}{10510 (s)}$$

$$\text{Laju Penyerapan} = 17,83 \text{ J/s}$$

Tabel 4. 7 Data Laju Penyerapan *Paraffin Wax*

No data	<i>Q</i> kumulatif	<i>Waktu Total</i>	<i>Laju Penyerapan</i>
	J	S	J/s
2101	187.397,28	10510	17,83 J/s



Gambar 4. 34. Laju Penyerapan *Paraffin Wax* Sensibel

Grafik yang tersaji pada gambar 4.34 menunjukkan laju penyerapan kalor selama proses *charging*. Kata sensibel merupakan keadaan *paraffin wax* saat belum mencapai titik leleh atau masih dalam keadaan padat. Berdasarkan grafik, laju penyerapan memiliki trend grafik naik. Perbedaan nilai pada setiap variasi memiliki nilai tidak jauh. Nilai terendah dimiliki variasi 190 volt dengan nilai laju penyerapan sensibel 17,83 J/s. Nilai tertinggi dimiliki variasi 227 volt dengan nilai laju penyerapan sensibel 25,35 J/s.

#### 4.6.2 Laju Penyerapan *Paraffin Wax* Laten

Hasil laju penyerapan laten didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.7.

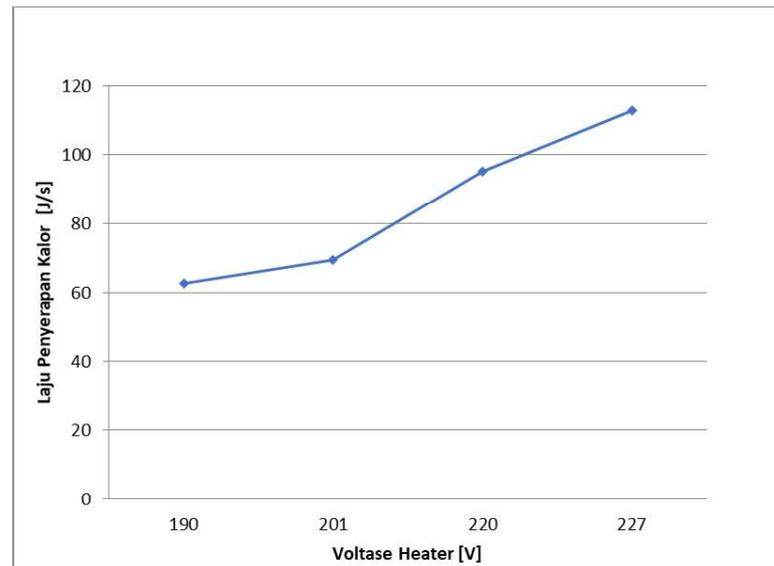
$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{\Delta Q \text{ Kumulatif laten (J)}}{\Delta \text{Waktu laten (s)}}$$

$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{571355,58 - 187655,98 \text{ (J)}}{16640 - 10510 \text{ (s)}}$$

$$\text{Laju Penyerapan} = 62,64 \text{ J/s}$$

Tabel 4. 8 Data Laju Penyerapan *Paraffin Wax* Laten

No data	<i>Q</i> <sub>kumulatif</sub>	<i>Waktu Total</i>	<i>Laju Penyerapan</i>
	J	S	J/s
2102	187665,98	10510	62,64 J/s
3328	571355,58	16640	

Gambar 4. 35. Laju Penyerapan *Paraffin Wax* Laten

Grafik yang tersaji pada gambar 4.35 menunjukkan trend yang terus naik dari variasi voltase kecil ke variasi voltase besar. Voltase 190 memiliki nilai terendah dengan laju penyerapan laten sebesar 62,64 J/s dan nilai tertinggi dimiliki oleh variasi voltase 227 dengan nilai laju penyerapan laten sebesar 112,59 J/s. Grafik laju penyerapan laten memiliki trend yang tidak jauh berbeda dengan laju penyerapan sensibel. Hal tersebut menunjukkan bahwa laju penyerapan laten dipengaruhi oleh laju penyerapan kalor paraffin wax pada saat kondisi sensibel.

#### 4.7. Laju Kenaikan *Paraffin Wax*

##### 4.7.1 Laju Kenaikan *Paraffin Wax* Sensibel

Hasil laju kenaikan *paraffin wax* laten didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.8.

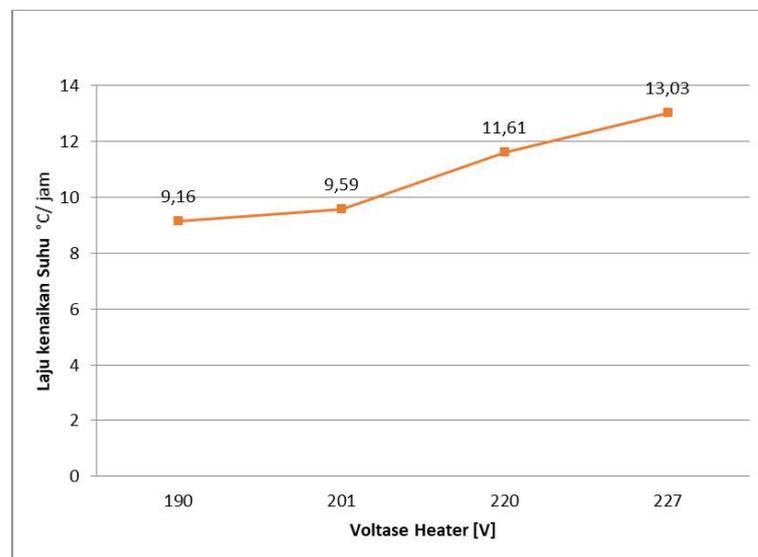
$$\text{Laju Kenaikan} = \frac{\Delta \text{Temperatur sensibel} (^{\circ}\text{C})}{\Delta \text{Waktu sensibel} (s)}$$

$$\text{Laju Kenaikan} = \frac{(52,83 - 26,08)}{(2921 - 0)}$$

$$\text{Laju Kenaikan} = 9,16 \text{ } ^{\circ}\text{C/jam}$$

Tabel 4. 9 Data Laju Kenaikan *Paraffin Wax*

No data	Temperatur	Waktu	Laju Kenaikan
	$^{\circ}\text{C}$	jam	$^{\circ}\text{C/jam}$
0	26,08	0	9,16
2101	52,83	2921	

Gambar 4. 36. Laju Kenaikan *Paraffin Wax* Sensibel

Grafik yang tersaji pada gambar 4.36 menunjukkan hasil *trendline* yang naik, relatif sama dengan laju penyerapan *paraffin wax* sensibel. Kedua grafik tersebut saling berkaitan, dimana grafik didapat dengan cara mengurangi suhu pada saat puncak sensibel dengan suhu awal. Maka jika laju penyerapan kecil hasil dari laju kenaikannya juga kecil.

#### 4.7.2 Laju Kenaikan *Paraffin Wax* Laten

Hasil laju kenaikan *paraffin wax* laten didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.9.

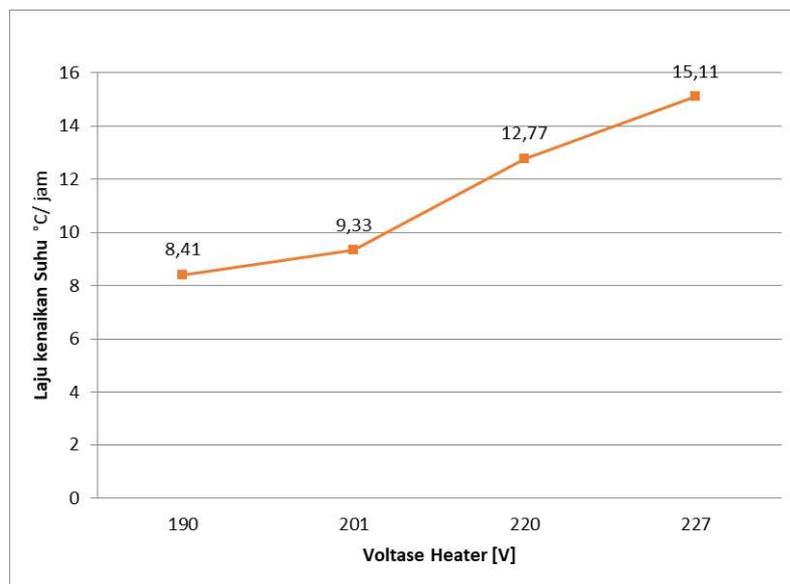
$$\text{Laju Kenaikan} = \frac{\Delta \text{Temperatur laten} (^{\circ}\text{C})}{\Delta \text{Waktu laten} (\text{s})}$$

$$\text{Laju Kenaikan} = \frac{(67,84 - 52,84)}{(4622 - 2921)}$$

$$\text{Laju Kenaikan} = 8,41 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{jam}$$

Tabel 4. 10 Data Laju Kenaikan *Paraffin Wax* Laten

No data	Temperatur	Waktu	Laju Kenaikan
	$^{\circ}\text{C}$	jam	$^{\circ}\text{C}/\text{jam}$
2102	52,84	2921	8,41
3328	67,14	4622	

Gambar 4. 37. Laju Kenaikan *Paraffin Wax* Laten

Grafik yang tersaji pada gambar 4.37 menunjukkan bahwa Hasil *trendline* dari grafik diatas hampir sama dengan grafik laju penyerapan *paraffin wax* laten. Hal ini karena kedua grafik tersebut saling berkaitan, dimana grafik ini didapat dengan cara mengurangi suhu campuran akhir yang dalam keadaan laten dengan suhu awal mulai menjadi kalor laten. Maka jika laju penyerapan kecil laju kenaikan pun juga kecil. Sehingga didapatlah hasil yang sama.

## 4.8. Laju Penyerapan dan Laju Kenaikan Kalor Air

### 4.8.1 Laju Penyerapan Kalor Air

Hasil laju penyerapan kalor air didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.10.

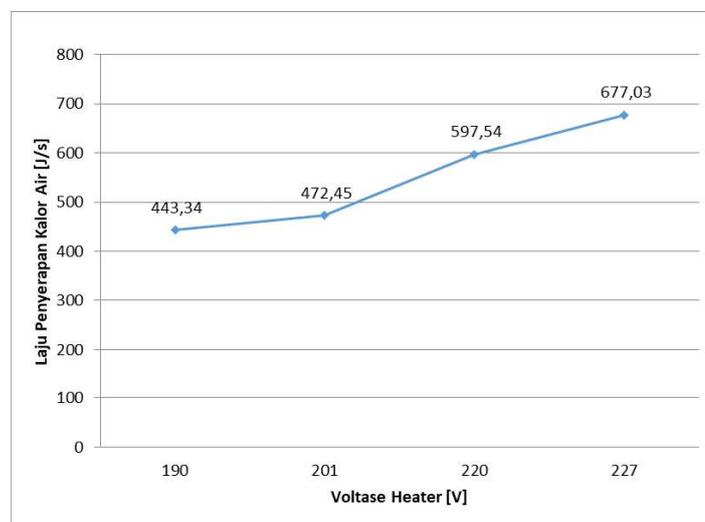
$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{Q_{\text{kum air}}(J)}{\text{Waktu total } (s)} \quad (10)$$

$$\text{Laju Penyerapan} = \frac{7377135,38(J)}{16640 (s)}$$

$$\text{Laju Penyerapan} = 443,34 \text{ J/s}$$

Tabel 4. 11. Data Penyerapan Kalor Air

No data	Q <sub>kum air</sub>	Waktu	Laju Penyerapan
	J	sec	J/s
3328	7377135,38	16640	443,34



Gambar 4. 38. Laju Penyerapan Kalor Air

Grafik yang tersaji pada gambar 4.38 menunjukkan trendline yang naik. Pada grafik diatas menunjukkan bahwa nilai laju penyerapan kalor air mendapatkan nilai berkisar dari 443,34 J/s – 677,03 J/s. Nilai tersebut jika dibandingkan dengan laju penyerapan kalor paraffin wax memiliki nilai yang jauh berbeda. Hal tersebut dikarenakan prosentase air dalam tangki lebih besar dibandingkan dengan prosentase paraffin wax.

#### 4.8.2 Laju Kenaikan Kalor Air

Hasil laju penyerapan kalor air didapat dengan menggunakan rumus persamaan 4.11.

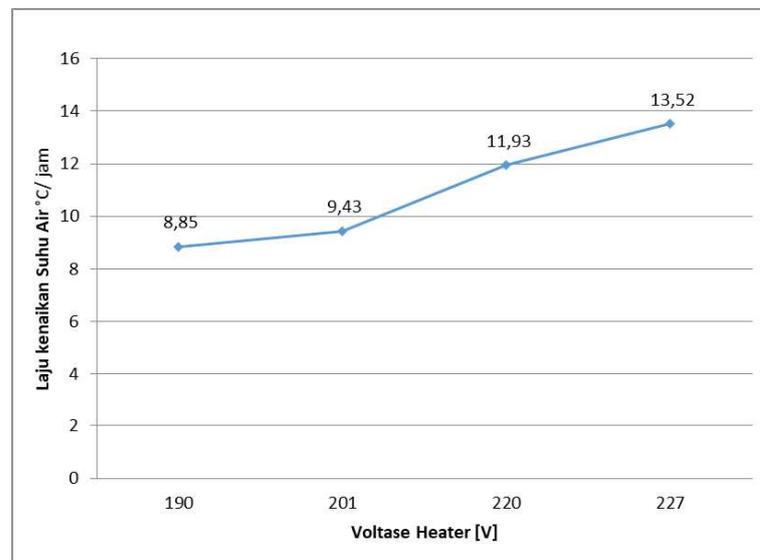
$$\text{Laju Kenaikan} = \frac{\Delta T \text{ rata-rata} (\text{°C})}{\text{Waktu total (jam)}}$$

$$\text{Laju Kenaikan} = \frac{67,05 - 26,13 (\text{°C})}{4622 \text{ (jam)}}$$

$$\text{Laju Kenaikan} = 8,85 \text{ °C/jam}$$

Tabel 4. 12 Data laju kenaikan kalor air

No data	Suhu air	Waktu	Laju Kenaikan
	°C	Jam	°C/jam
0	26,13	0	8,85
3328	67,05	4622	



Gambar 4. 39. Laju Kenaikan Suhu Air

Hasil yang ditunjukkan grafik yang tersaji pada gambar 4.39 mengalami trendline naik dari variasi voltase kecil ke variasi voltase besar. Grafik laju kenaikan sangat dipengaruhi oleh hasil yang diperoleh pada laju penyerapan. Hal tersebut karena semakin besar laju penyerapan kalor pada air maka perubahan suhu semakin cepat dan perbedaan suhu yang didapatpun semakin besar, sementara waktu konstan.