

# Pengukuran Laju Pelepasan Kalor pada Tangki SWH dengan Pipa Berisi Campuran *Paraffin Wax* dan Serbuk Tembaga 10% Berat

(Measurement of The Heat Release Rate in a SWH tank With a Pipe Containing a Mixture of Paraffin Wax and Copper Powder of 10% by Weight)

Tito Hadji Agung S.<sup>a</sup>, Sri Hannadhitya Farhan Yustianto<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Jalan Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia,  
<sup>a</sup>titohas@yahoo.com, <sup>b</sup>hanadityafarhan@gmail.com

## Abstrak

Pada SWH (*Solar Water Heater*) konvensional, air sebagai media penyimpanan panas di tangki. Air memiliki densitas yang besar sehingga konstruksi akan berat dan memerlukan penguatan pada rangka atap. *Paraffin wax* adalah jenis *phase change material (PCM)* yang memiliki densitas yang rendah sehingga ringan dan memiliki densitas energi yang besar sehingga dapat menampung energi yang besar untuk volume yang kecil. Namun, *paraffin wax* memiliki konduktivitas termal yang rendah sehingga perlu ditambahkan serbuk Cu untuk meningkatkan konduktivitas termalnya. Pada penelitian ini, digunakan campuran *paraffin wax* dengan serbuk Cu 10% berat. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui laju pelepasan kalor air dan campuran PCM. Penelitian ini menggunakan empat variasi debit air, yaitu 1; 1,5; 2; dan 2,5 LPM. Penelitian ini dilakukan dengan cara *discharging* bertahap. Pengambilan data dilakukan mulai pada suhu tangki 70 °C dan berakhir ketika suhu bak air penampung mencapai 35 °C. Data yang diambil saat proses *discharging* adalah suhu air pada tangki dan suhu PCM di dalam kapsul di tangki. Laju pelepasan kalor ditentukan dengan perhitungan kalor kumulatif yang dilepaskan oleh air dan campuran PCM serta waktunya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar debit air, semakin besar pula laju pelepasan kalornya. Laju pelepasan kalor air terbesar sebesar 790 J/s, sedangkan laju pelepasan kalor oleh campuran PCM dan serbuk Cu sebesar 101,44 J/s. Dari hasil ini, masih diperlukan penelitian lanjutan dengan persentase serbuk Cu yang lebih besar.

**Kata kunci:** SWH, PCM, *paraffin wax*, *discharging* bertahap

## Abstract

In conventional SWH (*Solar Water Heater*), water is used as a heat storage medium in the tank. Water has a large density, so the construction will be heavy and requires reinforcement on the roof frame. *Paraffin wax* is a type of *phase change material (PCM)* with a low density so that it is light and has a large energy density to accommodate large amounts of energy for a small volume. However, *paraffin wax* has low thermal conductivity, so it is necessary to add Cu powder to increase its thermal conductivity. In this study, a mixture of *paraffin wax* and 10% Cu powder was used. This study aimed to determine the rate of heat release of water and of the PCM mixture. This study uses four water discharge variations, namely 1; 1.5; 2; and 2.5 LPM. Data collection was carried out starting at a tank temperature of 70 °C and ending when the reservoir water temperature reached 35 °C. During the *discharging* process, the data taken are the water temperature in the tank and the PCM temperature in the capsule in the tank. Rate of heat released is determined by calculating cumulative heat released by the water and the mixture of PCM and the total time. The results showed that the greater the water discharge, the greater the rate of heat release. The largest water heat release rate was 790 J / s, while the heat release rate by a mixture of PCM and Cu powder was 101.44 J / s. From these results, further research is needed with a larger percentage of Cu powder.

**Keywords:** SWH, PCM, *paraffin wax*, discontinuous *discharging*

## 1. PENDAHULUAN

Penggunaan sistem pemanas untuk suplai air panas mencakup 75% dari konsumsi energi di perumahan, sektor komersial, dan industri [1]. Penggunaan sistem tersebut masih banyak yang menggunakan bahan bakar fosil [2]. Sumber daya bahan bakar fosil terbatas [3] sehingga diperlukan energi terbarukan yang sumbernya tidak terbatas [4]. Salah satu energi terbarukan yaitu tenaga surya [5]. *Solar Water Heater* merupakan perangkat yang memanfaatkan energi tersebut untuk memanaskan air [6]. Di sisi lain, penggunaan air memiliki kekurangan yaitu densitas yang tinggi sehingga memerlukan *Phase Change Material (PCM)* berupa *paraffin wax* untuk mengurangi densitas yang tinggi pada air. Namun, penggunaan *paraffin wax* memiliki kekurangan yaitu nilai konduktivitas termal yang rendah [7] sehingga pada penelitian ini ditambahkan serbuk tembaga fraksi dengan fraksi berat 10%. Penambahan serbuk tembaga diharapkan pada saat proses *discharging* dan *charging* akan lebih cepat.

Penelitian sebelumnya tentang *nanofluid* yaitu dengan cara menambahkan tembaga fase-nano ke dalam *Heat Transfer Fluid (HTF)* konvensional, yaitu air. Hasil penelitian yang diinginkan berupa perbandingan konduktivitas termal sebelum dan setelah penambahan tembaga fase-nano. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *nanophase* tembaga dapat menaikkan nilai konduktivitas termal dan mengurangi daya pertukaran panas secara *signifikan* [8].

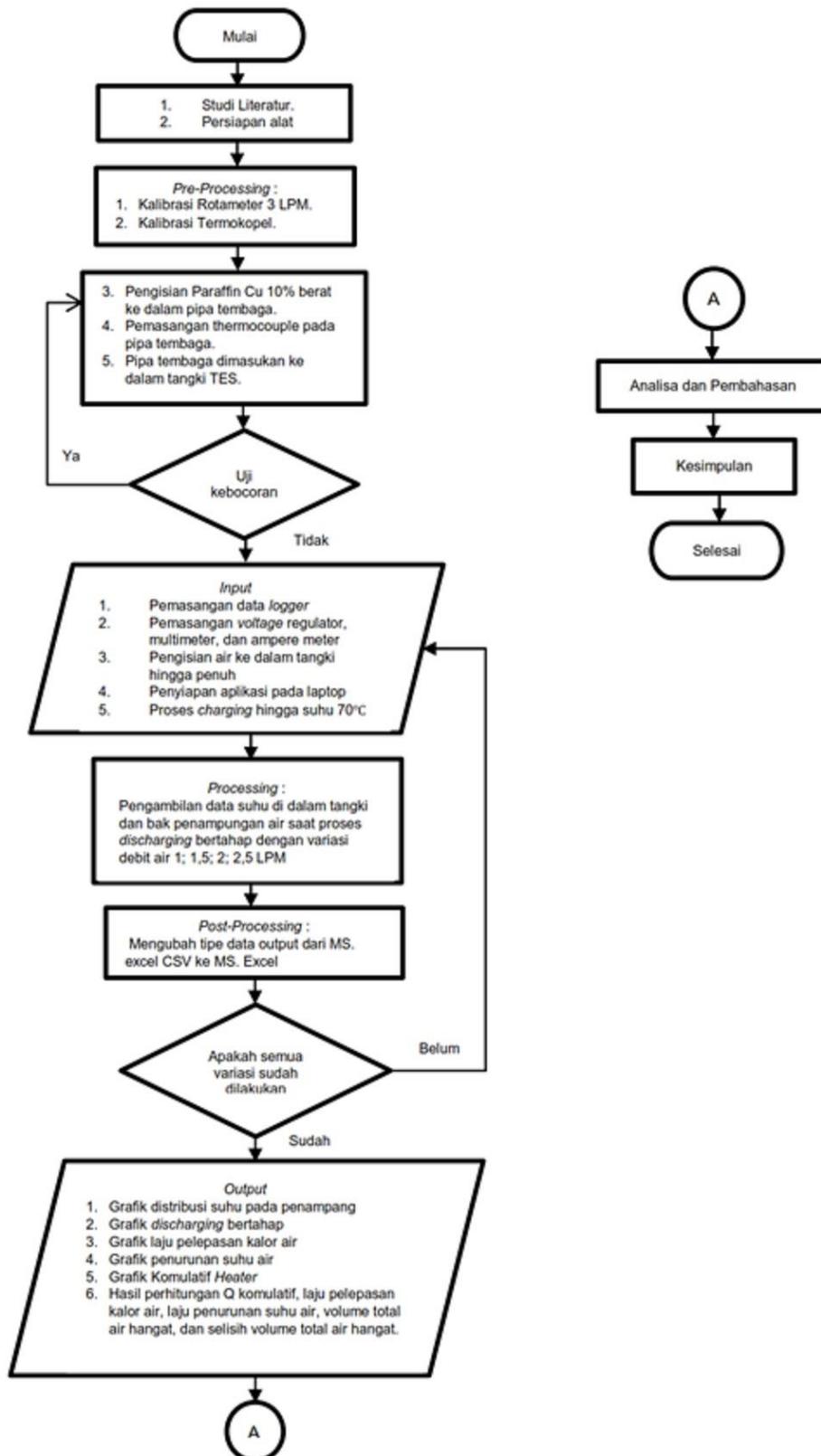
Terdapat penelitian lain juga tentang penggunaan *PCM* campuran *paraffin wax* dengan *nanomaterial* aluminium oksida dan campuran *paraffin wax* dengan *nanomaterial* CuO atau *copper oxide*. Penelitian tersebut menggunakan *paraffin wax* tipe RT-18 dan *nanomaterial* yang digunakan berukuran 50 nm. Hasil penelitian menyatakan bahwa waktu pelelehan campuran aluminium oksida dengan *paraffin wax* lebih lambat jika dibandingkan dengan campuran *copper oxide* dengan *paraffin wax* sehingga campuran *paraffin wax* dengan *nanomaterial* CuO lebih baik digunakan sebagai *PCM* [9].

Penelitian lain yang sudah dilakukan juga dengan penambahan *nanomaterial*, tetapi hanya dengan campuran tembaga. Pada penelitian ini, *nanomaterial* Cu pada *paraffin wax* sebagai *PCM*, bertujuan menaikkan nilai konduktivitas termal yang digunakan untuk tangki *Thermal Energy Storage (TES)* *Nanomaterial* Cu ini menggunakan ukuran 20 nm dan memiliki beberapa fraksi, yaitu 0.5%, 1%, 1.5%, dan 2%. Hasil penelitian yaitu konduktivitas termal naik berturut-turut sebesar 14.0%, 23.9%, 42.5% dan 46.3% [10].

Penelitian ini menggunakan peralatan uji hasil pengembangan dari peralatan uji sebelumnya [11]. Pada tangki alat uji, ditambahkan kapsul tembaga yang berisi campuran *paraffin wax* dan serbuk tembaga mesh 200 dengan fraksi berat 10%. Penelitian ini berfokus pada proses *discharging* secara bertahap yaitu pelepasan kalor oleh campuran *PCM* setelah dipanaskan pada proses *charging* sebelumnya. Proses *discharging* dimulai setelah suhu air mencapai 70 °C hingga suhu bak air penampung mencapai suhu 35 °C. Proses *discharging* dilakukan secara bertahap untuk mengetahui pengaruh kenaikan suhu air di dalam tangki saat proses tidak mengalirkan air. Hal ini tetap dilakukan karena meskipun sudah ditambahkan serbuk tembaga, konduktivitas termal campuran *PCM*-serbuk tembaga masih di bawah konduktivitas termal air. Pada penelitian ini akan ditentukan laju penurunan suhu air dan campuran *PCM* serta laju pelepasan kalor air dan campuran *PCM*.

## 2. METODE

Diagram alir proses penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1. Diagram Alir Penelitian

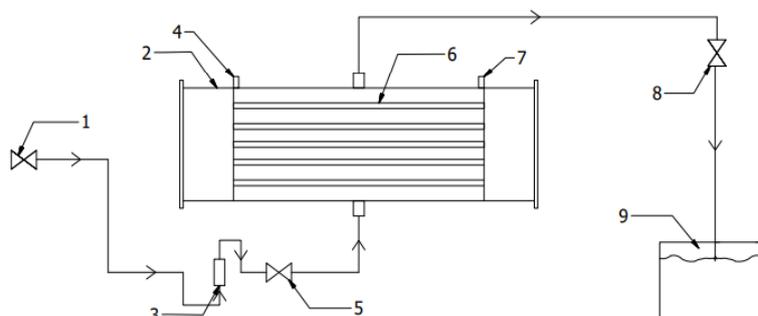
Parameter yang digunakan pada penelitian ini yaitu variasi debit air 1; 1,5; 2; dan 2 LPM. Pengambilan data pada penelitian ini dengan cara *discharging* bertahap. Setiap lima menit, air keran dibuka kemudian setelah lima menit ditutup. Pengambilan data dilakukan pada suhu di dalam tangki TES 70 °C dan berakhir ketika suhu bak air penampung mencapai 35 °C. Data yang diambil saat proses *discharging* adalah suhu air pada tangki, suhu campuran PCM dalam tangki TES dan suhu air pada bak penampungan.



Gambar 2.2. Tangki TES

### 2.1 Skema Penelitian

Skema alat SWH pada gambar 2.3 merupakan skema proses *discharging* yang terdiri atas 1 katup *inlet* yang berfungsi sebagai masuknya aliran air keran ke tangki, 3 rotameter LZT M – 15 *Instrument Company* yang dapat mengukur debit sebesar 0,2 – 3,0 LPM serta 1 – 8 GPM LZT M – 15, 2 Tangki SWH yang berisi kapsul PCM didalamnya, 8 katup *outlet* yang berfungsi sebagai keluarnya air menuju ke bak penampungan, dan 9 bak penampungan sebagai tempat menampung air yang keluar dari tangki.



Gambar 2.3. Skema Proses *Discharging* Bertahap

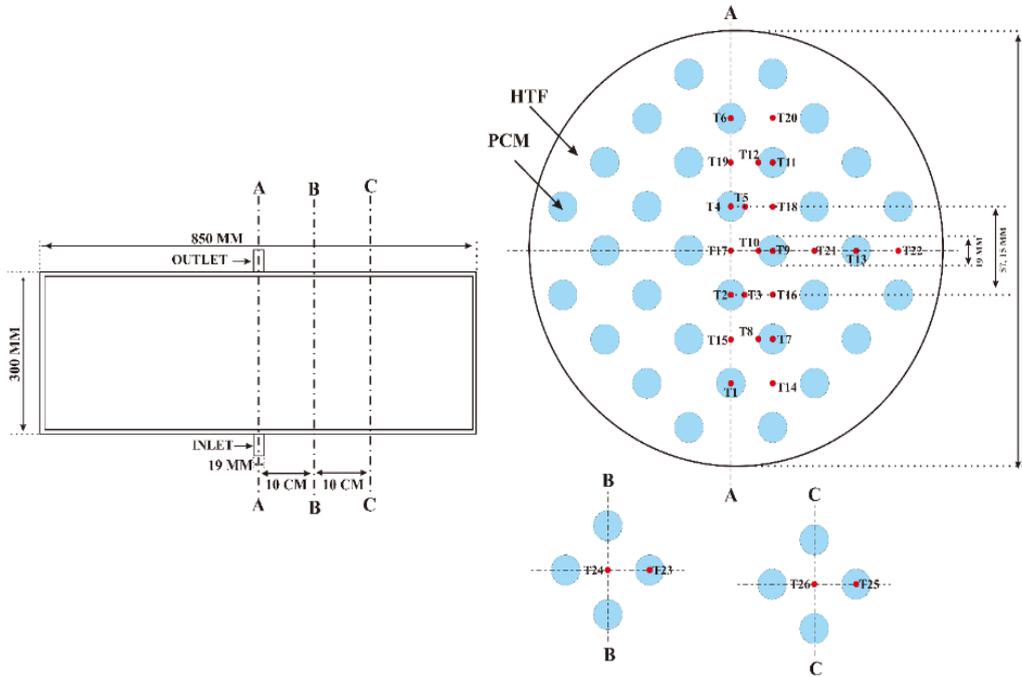
Keterangan nomor pada Gambar 2.3:

- (1) Keran air
- (2) Tangki SWH
- (3) Rotameter air
- (4) Lubang pipa masuknya termokopel
- (5) Katup masuknya air dari keran air ke tangki
- (6) Tangki berisi pipa tembaga
- (7) Lubang pipa masuknya termokopel
- (8) Katup keluarnya air dari tangka ke bak air
- (9) Bak penampung air

### 2.2 Pemasangan Termokopel

Pemasangan termokopel pada pipa tembaga dilakukan sebelum pengisian campuran *paraffin wax - Cu 10%* dengan mengebor pipa tembaga pada bagian yang sudah

ditetapkan. Termokopel yang digunakan adalah termokopel tipe K. Letak pemasangan *termocouple* mengikuti gambar desain penempatan *termocouple* yang ditunjukkan pada gambar 2.4.

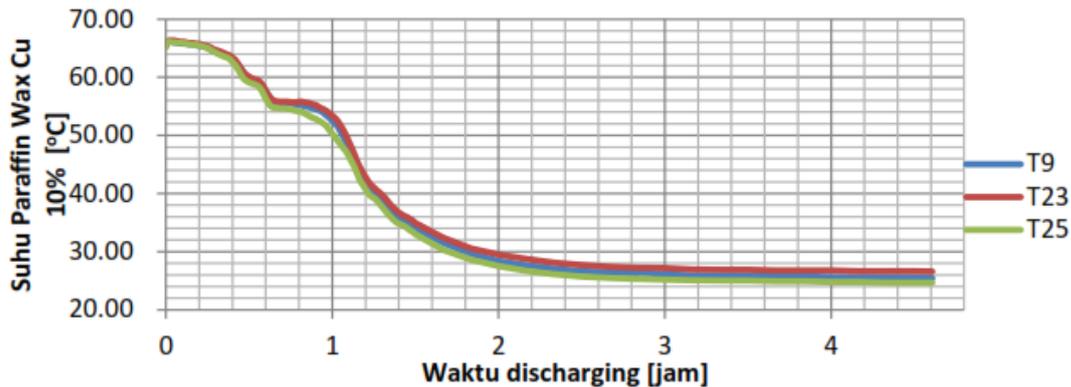


Gambar 2.4. Peletakan Termokopel

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

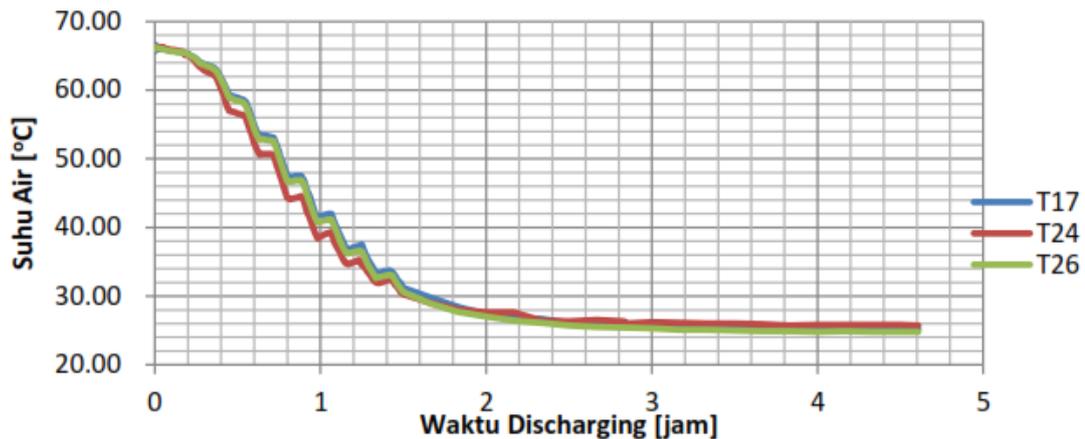
#### 3.1 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu dalam Arah Aksial

Hasil setelah pengujian pada variasi 1 LPM arah aksial terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 10% dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada campuran *PCM* dapat dilihat pada gambar 3.1 sedangkan grafik evolusi suhu air dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.1. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu dalam Arah Aksial

Grafik pada gambar 3.1. ditunjukkan bahwa suhu pada ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan, tetapi pada 0,6-0,9 jam *paraffin wax* - Cu 10% sempat menahan suhu sekitar 55 °C. Peristiwa ini disebabkan terjadinya pelepasan kalor dari *PCM* ke *HTF* sehingga suhu *HTF* mengalami kenaikan saat air kran ditutup. Setelah 1 jam pengujian ketiga termokopel mengalami penurunan secara stabil karena fase *paraffin wax* berubah menjadi *solid* saat suhu mencapai 52,86 °C.



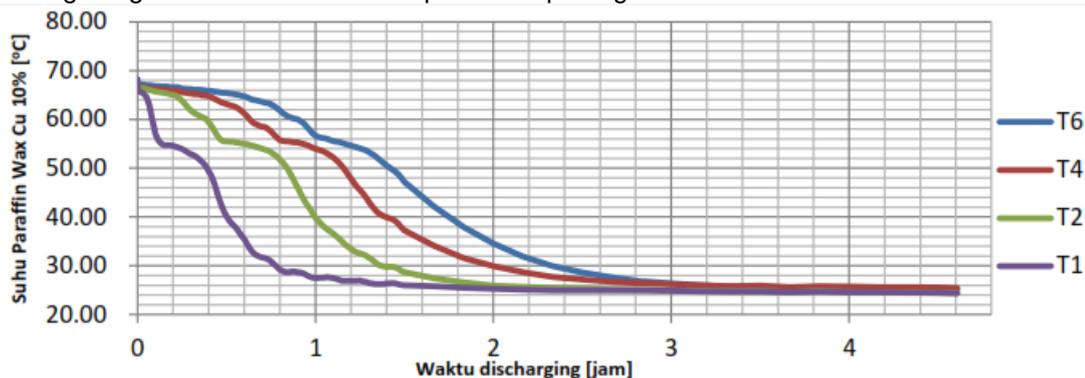
Gambar 3.2. Evolusi Suhu Air dalam Arah Aksial

Grafik pada gambar 3.3. dalam arah aksial, suhu air cenderung mengalami kenaikan suhu secara bertahap daripada gambar 3.2. Naik turun grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging* bertahap saat air keran dimatikan dan dihidupkan. Naiknya suhu terjadi karena keran air ditutup sehingga air menyerap panas dari *PCM*. Setelah keran air ditutup, 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 grafik naik turun karena terjadi pelepasan kalor dan setelah 1,5 jam, suhu dalam pipa cenderung lebih stabil tidak mengalami kenaikan karena campuran *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 karena menggunakan debit air yang kecil.

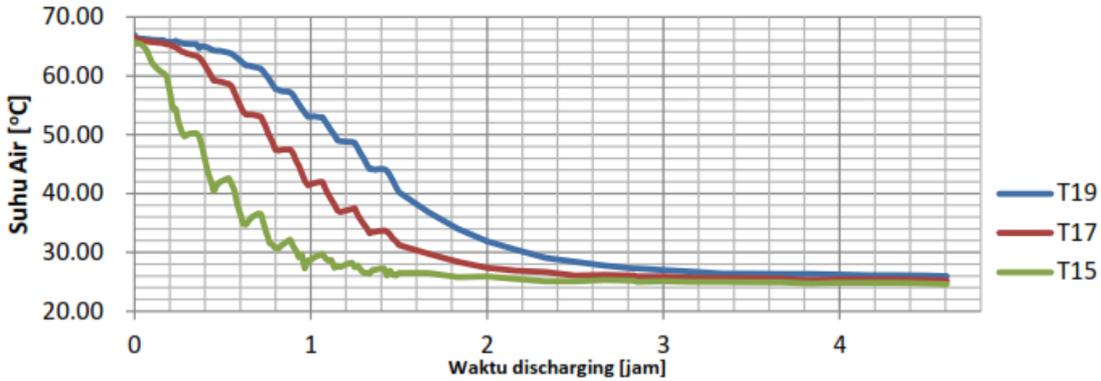
### 3.2 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu dalam Arah Vertikal

Hasil pengujian pada variasi 1 *LPM* arah vertikal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 10% dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada campuran *PCM* dapat dilihat pada gambar 3.3, sedangkan grafik evolusi suhu air dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.3. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu dalam Arah Vertikal

Suhu pada T1 ketika pengambilan data mengalami penurunan drastis daripada ketiga suhu termokopel lainnya (gambar 3.3). Rendahnya T1 dipengaruhi oleh letak pipa tembaga. Letak pipa tembaga berada pada paling dekat dengan input air keran masuk ke tangki *TES*. Sebaliknya, T6 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak pipa tembaga yang paling jauh dari input air keran. Penurunan suhu T6 pada 0-1 jam berkisar 11 °C, suhu T4 berkisar 14 °C, suhu T2 berkisar 26 °C, dan suhu T1 pada 0-1 jam berkisar 38 °C. Maka dari itu, penurunan suhu paling cepat terjadi pada T1 selama satu jam.

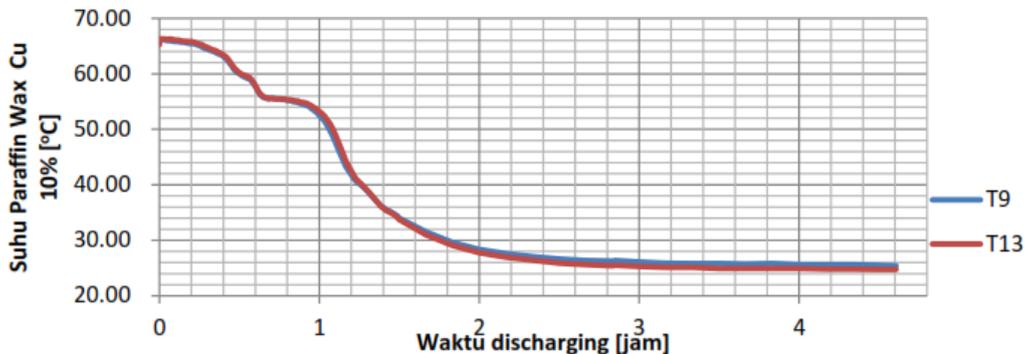


Gambar 3.4. Evolusi Suhu Air dalam Arah Vertikal

Suhu T15 mengalami penurunan drastis daripada ketiga termokopel lainnya dapat dilihat pada Gambar 3.4. Rendahnya T15 dipengaruhi oleh letak termokopel, letak T15 berada pada paling dekat dengan input air keran masuk ke tangki TES. Sebaliknya, T19 memiliki suhu yang relatif konstan karena letak yang paling jauh dari input air keran. Pada rentang waktu 0-1 jam, penurunan suhu T19 berkisar 14 C, penurunan suhu T17 berkisar 25°C, dan penurunan suhu T15 berkisar 39°C.

### 3.3 Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu dalam Arah Horizontal

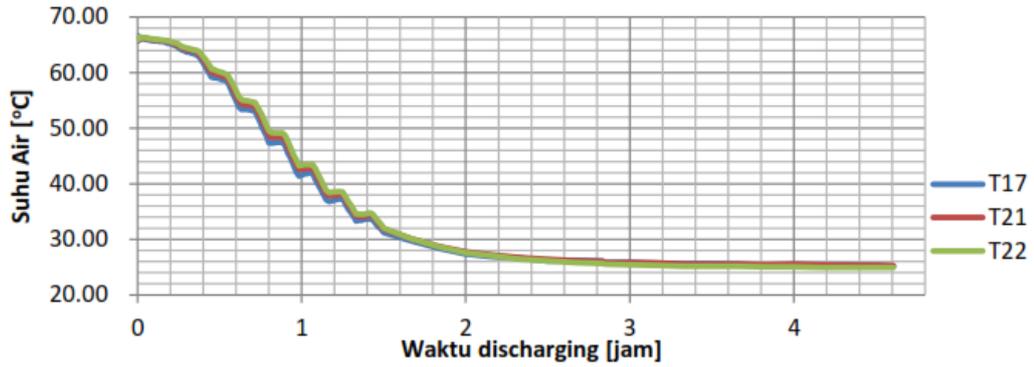
Hasil pengujian pada variasi 1 LPM arah horizontal terdapat dua grafik yaitu evolusi suhu campuran *paraffin wax* dengan serbuk tembaga fraksi berat 10% dan evolusi suhu pada air. Grafik evolusi suhu pada campuran PCM dapat dilihat pada gambar 3.5, sedangkan grafik evolusi suhu air dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.5. Evolusi Suhu Campuran PW + 10% Cu dalam Arah Horizontal

Suhu pada kedua termokopel dari 0-1 jam tidak mengalami perbedaan yang signifikan karena menggunakan debit air yang kecil dan memiliki selisih suhu tidak sampai 1 °C dapat dilihat pada Gambar 3.5. Pada rentang waktu 0-1,5 jam, suhu T13 lebih tinggi dari T9, tetapi 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 keran sehingga saat keran dibuka T9 dahulu mengenai air dari T13 yang berada pada samping T9.

Grafik pada Gambar 3.5 menunjukkan bahwa suhu pada kedua termokopel tidak mengalami kenaikan, tetapi pada 0,6-0,9 jam campuran *paraffin wax* - Cu 10% sempat tertahan suhunya pada suhu sekitar 56 °C. Peristiwa ini diduga terjadi perubahan fase dari campuran *paraffin wax* dari fase cair menjadi fase padat.



Gambar 3.6. Evolusi Suhu Air dalam Arah Horisontal

Grafik pada Gambar 3.6 menunjukkan bahwa suhu air arah horisontal cenderung terdapat kenaikan suhu daripada pada Gambar 3.5. Naik turun grafik sangat dipengaruhi oleh proses *discharging* bertahap saat air keran dimatikan dan dihidupkan. Naiknya suhu terjadi karena keran air ditutup sehingga air menyerap panas dari *PCM*. Kenaikan suhu terjadi dari 0,6-1,4 jam kemudian ketiga termokopel tidak mengalami kenaikan dan penurunan suhu stabil sampai selesai pengujian.

### 3.4 Grafik Energi Kumulatif

Energi kumulatif adalah energi yang dilepas saat proses *discharging* dari awal penelitian hingga selesai dan didapatkan dengan menggunakan Persamaan 1.

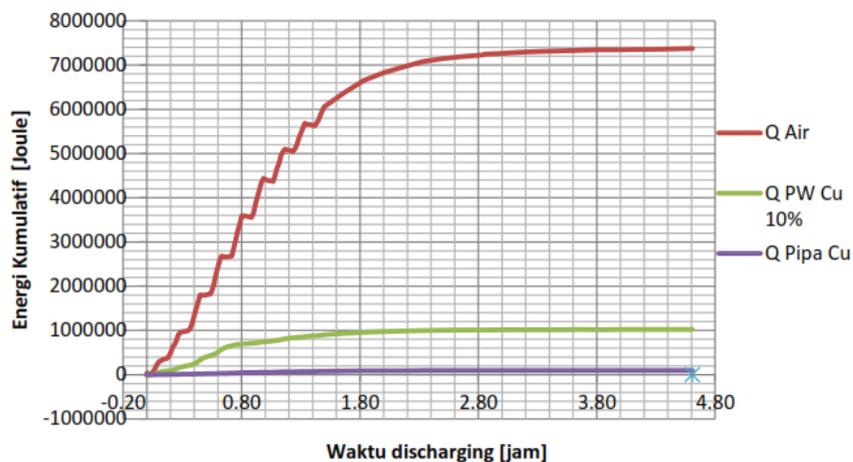
$$Q_{kum} = m \cdot cp \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$Q_{kum} = 43,13 \times 4180 \times (66,17 - 25,25)$$

$$Q_{kum} = 7.377.020,99 \text{ J}$$

Tabel 3.1 Energi Kumulatif (untuk debit air 1 LPM)

Bahan	cp [J/(kg.K)]	Massa [kg]	T1 °C	T2 °C	ΔT °C	Q kum (J)
Air	4180	43.13	66.17	25.25	40.92	7,377,020.99
Pipa Cu	390	5.91	66.72	24.90	41.83	96,338.79
PW +10%Cu	1839	6.7	66.14	25.05	41.09	1,029,378.78



Gambar 3.7. Grafik Energi Kumulatif

Grafik pada Gambar 3.7 kalor (Q) pipa *Cu* lebih rendah dari air dan campuran *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 0-0,6 jam sebanyak 5-10 kJ, setelah 0,6 jam laju kenaikan hanya sebesar 2-3 kJ dan relatif stabil. Grafik Q pipa *Cu* mengalami kenaikan relatif stabil sebesar 0,1-0,3 kJ. Kenaikan grafik paling signifikan terjadi pada Q air pada 0-1,8 jam sebesar 70-80 kJ, setelah 1,8 jam relatif mengalami kenaikan lebih stabil.

### 3.5. Laju Pelepasan Kalor dan Laju Penurunan Suhu

#### 3.5.1. Laju Pelepasan Kalor Air

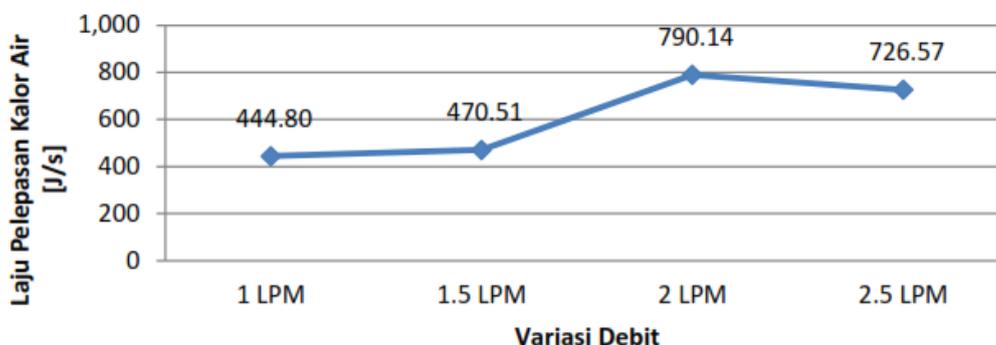
Laju pelepasan kalor pada air dapat dicari dengan persamaan 2:

$$Q = \frac{Q_{kumulatif}}{t_{total}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{7.377.020,99}{16.585} = 444,8 \frac{J}{s}$$

Tabel 3.2. Laju Pelepasan Kalor Air

V	T1 Air	T2 Air	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 10%	q
LPM	°C	°C	°C	(detik)	(J)	(J)	(J/s)
1	66.17	25.25	40.92	16585	7,377,020.99	1,029,378.78	444.80
1.5	66.85	28.15	38.69	14825	6,975,258.37	994,180.17	470.51
2	63.07	26.24	36.84	8405	6,641,135.76	835,264.46	790.14
2.5	65.09	26.03	39.06	9690	7,040,438.55	982,907.99	726.57



Gambar 3.8. Laju Pelepasan Kalor Air

Grafik pada gambar 3.8 di atas ditunjukkan bahwa laju pelepasan kalor air paling rendah yaitu pada variasi 1 LPM yaitu 444,8 J/s karena memiliki waktu yang paling lama 4,5 jam di antara variasi lainnya, sedangkan laju pelepasan terbesar pada variasi 2 LPM yaitu 790,14 J/s karena memiliki waktu yang tercepat saat pengujian. Variasi 2 LPM memiliki waktu yang tercepat 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 2,4 jam dan variasi 2 LPM memiliki perubahan suhu paling rendah daripada ketiga variasi lainnya.

#### 3.5.2. Laju Pelepasan Kalor *Paraffin Wax + Cu 10% Berat*

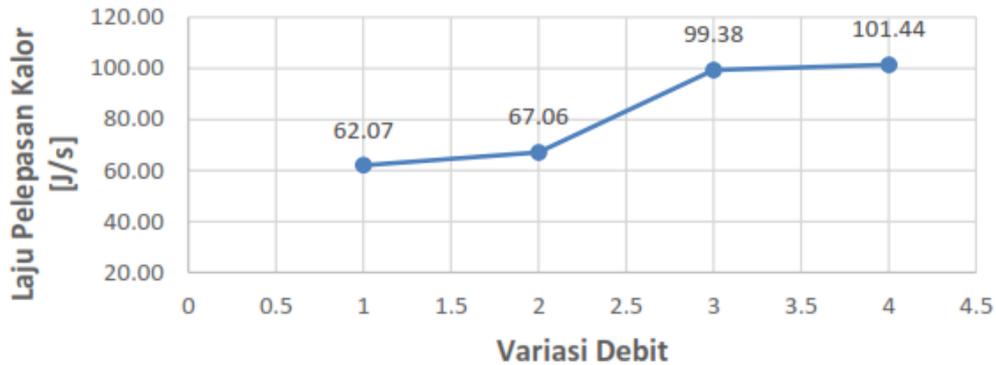
Laju pelepasan kalor pada campuran *paraffin wax Cu 10%* dapat dicari dengan persamaan 2.

$$Q = \frac{Q_{kumulatif}}{t_{total}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{1.029.378,78}{16.585} = 62,07 \frac{J}{s}$$

Tabel 3.3. Laju Pelepasan Kalor Paraffin Wax Cu 10%

V	T1 PCM	T2 PCM	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 10%	Q
LPM	°C	°C	°C	(detik)	(J)	(J)	(J/
1	66.14	25.05	41.09	16585	7,377,020.99	1,029,378.78	62.07
1.5	66.14	27.95	38.20	14825	6,975,258.37	994,180.17	67.06
2	62.50	26.07	36.43	8405	6,641,135.76	835,264.46	99.38
2.5	65.44	25.92	39.52	9690	7,040,438.55	982,907.99	101.44



Gambar 3.9. Laju Pelepasan Kalor Paraffin Wax + Cu 10%

Grafik pada gambar 3.9 di atas ditunjukkan bahwa laju pelepasan kalor pada campuran *paraffin wax - Cu 10%* paling rendah yaitu pada variasi 1 LPM yaitu 62,07 J/s. Sedangkan laju pelepasan terbesar pada variasi 2,5 LPM yaitu 101,44 J/s. Pada variasi debit air 2,5 LPM, laju pelepasan kalor terbesar karena menggunakan debit paling besar yang mengakibatkan perubahan suhu yang cepat sehingga mengalami pelepasan kalor terbesar, yaitu 101,44 *Joule per detik*.

### 3.5.3. Laju Penurunan Suhu Air

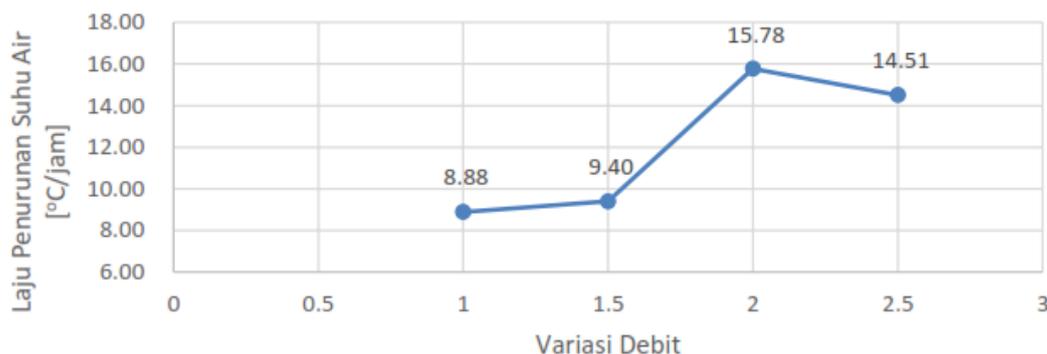
Laju penurunan suhu pada air dapat dicari dengan Persamaan 3.

$$\text{Laju Penurunan Suhu Air} = \frac{(T_{awal} - T_{akhir})}{t_{total}} \quad (3)$$

$$\text{Laju Penurunan Suhu Air} = \frac{(66,17 - 25,25) \times 3600}{16.585} = 8,88 \frac{^{\circ}C}{min}$$

Tabel 3.4. Laju Penurunan Suhu Air

V	T1 Air	T2 Air	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu	Q pipa Cu
LPM	°C	°C	°C	(detik)	(	(	(J)
1	66.17	25.25	40.92	16585	7,377,020.9	1,029,378.78	96,338.79
1.5	66.85	28.15	38.69	14825	6,975,258.3	994,180.17	90,554.78
2	63.07	26.24	36.84	8405	6,641,135.7	835,264.46	85,688.62
2.5	65.09	26.03	39.06	9690	7,040,438.5	982,907.99	89,915.17



Gambar 3.10. Laju Penurunan Suhu Air

Grafik pada Gambar 3.10 di atas menunjukkan bahwa laju penurunan suhu air paling rendah 8,88 °C/jam yaitu pada variasi 1 LPM karena memiliki waktu yang paling lama 4,5 jam diantara variasi lainnya, sedangkan laju penurunan suhu air terbesar 15,78 °C/jam pada variasi 2 LPM karena memiliki waktu yang tercepat saat pengujian. Variasi 2 LPM memiliki waktu yang tercepat 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 2,4 jam. Oleh karena itu, pada 2 LPM mengalami rata-rata penurunan suhu 15,78 °C dalam setiap jam dan pada 1 LPM mengalami rata-rata penurunan suhu 8,88 °C dalam setiap jam.

### 3.5.4. Laju Penurunan Suhu Paraffin Wax + Cu 10% Berat

Laju penurunan suhu pada *paraffin wax Cu 10%* dapat dicari dengan persamaan 3.

$$\text{Laju Penurunan Suhu Air} = \frac{(T_{awal} - T_{akhir})}{t_{total}} \tag{3}$$

$$\text{Laju Penurunan Suhu Air} = \frac{(66,14 - 25,05) \times 3600}{16.585} = 8,92 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{jam}}$$

Tabel 3.5. Laju Penurunan Suhu Paraffin Wax Cu 10%

V	T1 PCM	T2 PCM	ΔT	Δt	Q kum Air	Q Paraffin Cu 10%	Q pipa Cu
LPM	°C	°C	°C	(detik)	(J)	(J)	(
1	66.14	25.05	41.09	16585	7,377,020.99	1,029,378.78	96,338.79
1.5	66.14	27.95	38.20	14825	6,975,258.37	994,180.17	90,554.78
2	62.50	26.07	36.43	8405	6,641,135.76	835,264.46	85,688.62
2.5	65.44	25.92	39.52	9690	7,040,438.55	982,907.99	89,915.17



Gambar 3.11. Laju Penurunan Suhu Paraffin Wax Cu 10%

Grafik pada Gambar 3.11 di atas menunjukkan bahwa laju penurunan suhu *paraffin wax* Cu 10% paling rendah 8,92 °C/jam yaitu pada variasi 1 LPM karena memiliki waktu yang paling lama 4,5 jam diantara variasi lainnya, sedangkan laju penurunan suhu air terbesar 15,6 °C/jam pada variasi 2 LPM karena memiliki waktu yang tercepat saat pengujian. Variasi 2 LPM memiliki waktu yang tercepat 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 2,4 jam. Oleh karena itu, pada 2 LPM mengalami rata-rata penurunan suhu 15,6 °C dalam setiap jam dan pada 1 LPM mengalami rata-rata penurunan suhu 8,92 °C dalam setiap jam.

#### 4. KESIMPULAN

Pengukuran laju pelepasan kalor secara bertahap pada tangki *solar water heater* dengan variasi campuran *paraffin wax* dan serbuk tembaga 10% berat pada debit air 1; 1,5; 2 & 2,5 LPM telah dilakukan. Kesimpulan dari penelitian ini adalah semakin besar debit air, semakin besar pula laju penurunan suhu air. Laju penurunan suhu air paling besar terjadi pada debit air 2 LPM yaitu sebesar 15,78 °C/jam. Semakin besar debit air, semakin besar pula laju penurunan suhu campuran *paraffin wax* – serbuk Cu 10% berat. Laju penurunan suhu campuran *paraffin wax* – serbuk Cu 10% berat terjadi pada debit air 2 LPM yaitu sebesar 15,6 °C/jam. Semakin besar debit air, semakin besar pula laju pelepasan kalor air. Laju pelepasan kalor air paling tinggi terjadi pada debit air 2 LPM yaitu sebesar 790,14 J/s. Semakin besar debit air, semakin besar pula laju pelepasan kalor campuran *paraffin wax* – serbuk Cu 10% berat. Laju pelepasan kalor campuran *paraffin wax* – serbuk Cu 10% berat terjadi pada debit air 2,5 LPM yaitu sebesar 101,44 J/s.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. K. A. Sharif *et al.*, "Review of the application of phase change material for heating and domestic hot water systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 557–568, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.09.034.
- [2] H. Al-Madani, "The performance of a cylindrical solar water heater," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 11, pp. 1751–1763, 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.09.010.
- [3] H. Sasana and I. Ghozali, "The impact of fossil and renewable energy consumption on the economic growth in Brazil, Russia, India, China and South Africa," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 7, no. 3, pp. 194–200, 2017.
- [4] V. Ş. Ediger and E. Kentel, "Renewable energy potential as an alternative to fossil fuels in Turkey," *Energy Convers. Manag.*, vol. 40, no. 7, pp. 743–755, 1999, doi: 10.1016/S0196-8904(98)00122-8.
- [5] J. Zucchetto and S. Brown, "Comparison of the fossil fuel energy requirements for solar, natural gas, and electrical water heating systems," *Resour. Recover. Conserv.*, vol. 2, no. 4, pp. 283–300, 1977, doi: 10.1016/0304-3967(77)90019-1.
- [6] J. Han, A. P. J. Mol, and Y. Lu, "Solar water heaters in China: A new day dawning," *Energy Policy*, vol. 38, no. 1, pp. 383–391, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.09.029.
- [7] T. Watanabe and A. Kanzawa, "Second law optimization of a latent heat storage system with PCMS having different melting points," *Heat Recover. Syst. CHP*, vol. 15, no. 7, pp. 641–653, 1995, doi: 10.1016/0890-4332(95)90044-6.
- [8] U. S. C. Stephen and A. E. Jeffrey, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 8, no. 3, pp. 281–285, 1995, doi: 10.1021/je60018a001.
- [9] M. A. Alomair, Y. A. Alomair, H. A. Abdullah, S. Mahmud, and S. Tasnim, "Nanoparticle Enhanced Phase Change Material in Latent Heat Thermal Energy Storage System: An Experimental Study," *Proc. Int. Conf. Energy Harvest. Storage, Transf.*, no. 119, pp. 1–5, 2017, doi: 10.11159/ehst17.119.
- [10] S. C. Lin and H. H. Al-Kayiem, "Evaluation of copper nanoparticles - Paraffin wax compositions for solar thermal energy storage," *Sol. Energy*, vol. 132, pp. 267–278, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.03.004.
- [11] M. Nadjib, "Penggunaan Paraffin Wax Sebagai Penyimpan Kalor Pada Pemanas Air

Tenaga Matahari Thermosyphon,” *Rotasi*, vol. 18, no. 3, p. 76, 2016, doi: 10.14710/rotasi.18.3.76-85.