

## BAB IV

### PEMBAHASAN

Bab ini membahas bagaimana hasil penelitian tentang kajian kapasitas pengumpulan energi termal pada tangki pemanas air tenaga surya yang melibatkan PCM. Penelitian ini menggunakan variasi *heat flux* 800 W/m<sup>2</sup>, 1000 W/m<sup>2</sup> dan 1200 W/m<sup>2</sup> dengan debit 2 LPM.

#### 4.1. Hasil uji *solar simulator*

Hasil uji *solar simulator* dengan titik penempatan *pyranometer* dan variasi ketinggian dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil *uji solar simulator*

Posisi	Intensitas radiasi (W/m <sup>2</sup> )		
	10 cm	15 cm	22 cm
A	1256,00	1276,90	920,78
B	1110,53	975,81	705,67
C	1235,01	936,16	715,67
D	1276,90	1072,60	767,77
E	1276,90	1007,52	814,34
F	1276,90	1080,13	781,87
<b>Rata-rata</b>	1238,71	1058,19	784,35

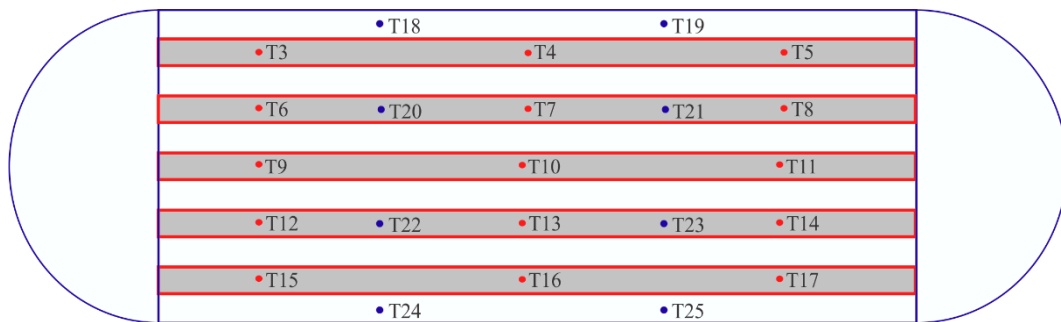
#### 4.2. Kalibrasi termokopel

Kalibrasi dilakukan untuk termokopel HTF dan PCM. Kalibrasi menunjukkan hasil yang bagus karena R<sup>2</sup> mendekati 1. Hasil kalibrasi disajikan pada Tabel 4.2.

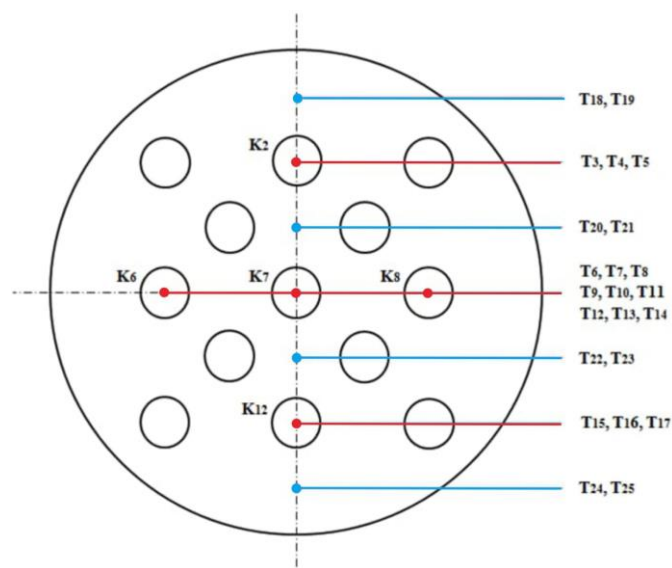
Tabel 4.2. Hasil kalibrasi termokopel

No.	Termokopel	Posisi	Persamaan regresi	R <sup>2</sup>
1	T1	<i>Input</i> tangki	$T_{1,riil} = 0,9774 T_1 + 0,1469$	0.9998
2	T2	<i>Output</i> tangki	$T_{2,riil} = 1,0144 T_2 - 0,6655$	0.9998
3	T3	PCM	$T_{3,riil} = 0,9967 T_3 + 0,0098$	0.9998
4	T4	PCM	$T_{4,riil} = 1,0251 T_4 - 0,804$	0.9994
5	T5	PCM	$T_{5,riil} = 1,0143 T_5 - 0,439$	0.9998
6	T6	PCM	$T_{6,riil} = 1,0132 T_6 - 0,5569$	0.9998
7	T7	PCM	$T_{7,riil} = 1,0227 T_7 - 0,7533$	0.9997
8	T8	PCM	$T_{8,riil} = 1,0107 T_8 - 0,4224$	0.9998
9	T9	PCM	$T_{9,riil} = 1,0167 T_9 - 0,3646$	0.9998
10	T10	PCM	$T_{10,riil} = 1,0122 T_{10} - 0,3933$	0.9998
11	T11	PCM	$T_{11,riil} = 1,0197 T_{11} - 0,7239$	0.9997
12	T12	PCM	$T_{12,riil} = 0,9768 T_{12} + 0,3779$	0.9998
13	T13	PCM	$T_{13,riil} = 0,8894 T_{13} + 7,2856$	0.9886
14	T14	PCM	$T_{14,riil} = 0,9961 T_{14} - 0,3531$	0.9998
15	T15	PCM	$T_{15,riil} = 1,0016 T_{15} - 0,5101$	0.9998
16	T16	PCM	$T_{16,riil} = 0,9778 T_{16} - 0,0113$	0.9998
17	T17	PCM	$T_{17,riil} = 0,9971 T_{17} - 0,4548$	0.9998
18	T18	HTF	$T_{18,riil} = 0,9773 T_{18} + 0,307$	0.9998
19	T19	HTF	$T_{19,riil} = 0,9957 T_{19} - 0,4572$	0.9998
20	T20	HTF	$T_{20,riil} = 0,9977 T_{20} - 0,5418$	0.9998
21	T21	HTF	$T_{21,riil} = 1,0297 T_{21} - 1,4005$	0.9998
22	T22	HTF	$T_{22,riil} = 1,0485 T_{22} - 1,9455$	0.9998
23	T23	HTF	$T_{23,riil} = 1,0256 T_{23} - 1,2854$	0.9998
24	T24	HTF	$T_{24,riil} = 0,9776 T_{24} + 0,3607$	0.9998
25	T25	HTF	$T_{25,riil} = 0,9982 T_{25} - 0,2378$	0.9998

Pemasangan termokopel pada HTF dan PCM dalam penelitian ini berjumlah 25 buah yang dipasang pada posisi yang berbeda. T1 dipasang pada sisi keluar kolektor menuju tangki TES dan T2 ditempatkan antara sisi keluar tangki TES ke kolektor. T3-T17 dipasang pada PCM dan T18-T25 dipasang pada HTF. Gambar 4.1 menunjukkan posisi termokopel di dalam tangki TES.



(a)

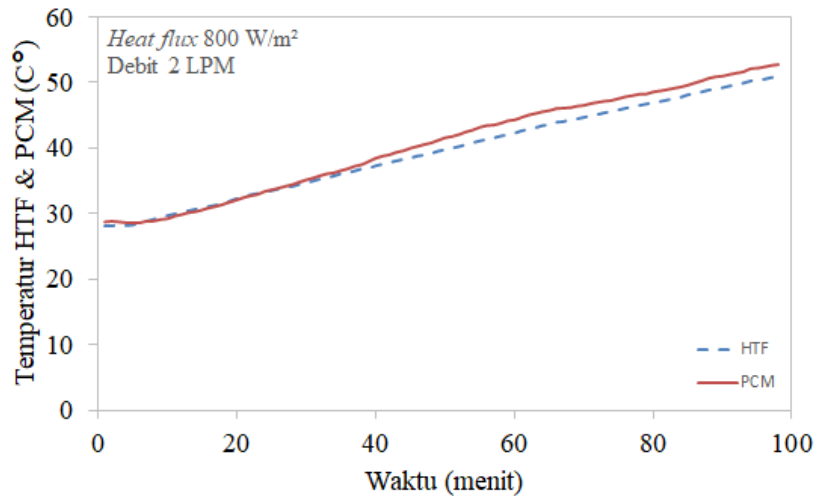


(b)

Gambar 4.1. Sketsa letak termokopel di dalam tangki TES dari (a) tampak depan (b) tampak samping

#### 4.3. Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM

Perubahan temperatur HTF dan PCM selama proses *charging* 98 menit dengan *heat flux*  $800 \text{ W/m}^2$  dan debit 2 LPM ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Evolusi temperatur HTF dan PCM

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa evolusi temperatur rata-rata HTF semakin lama maka semakin meningkat. Hal tersebut terjadi dikarenakan kalor yang diterima semakin bertambah, mengakibatkan temperatur HTF semakin tinggi seiring berjalannya waktu. Temperatur *output* kolektor semakin lama semakin meningkat, peningkatan temperatur kolektor tersebut akan meningkatkan temperatur HTF di dalam tangki, dampak dari tingginya temperatur HTF dari dalam tangki maka transfer kalor ke PCM akan semakin besar. Temperatur akhir dari HTF selama proses *charging* 98 menit sebesar 50,97 °C dan kecepatan pemanasan rata-ratanya adalah 0,237 °C /menit. Temperatur PCM dilihat dari kurva semakin lama, semakin meningkat. Pada proses *charging* di awal kurva PCM dan HTF terlihat berhimpit. Hal ini terjadi karena adanya *heat transfer* yang seimbang. Namun, mulai menit ke-40 PCM lebih tinggi, hal ini dikarenakan jumlah kalor yang disuplai dari kolektor lebih banyak di serap oleh PCM. Temperatur rata-rata PCM akhir yang tercapai selama proses *charging* adalah 52,74 °C dan kecepatan pemanasan rata-rata PCM sebesar 0,247 °C /menit.

#### 4.4. Pengumpulan energi termal akumulatif

Energi termal yang terkumpul di dalam tangki dengan variasi *heat flux* 800, 1000, 1200 W/m<sup>2</sup>, disajikan pada Gambar 4.3. Perhitungan pengumpulan energi termal akumulatif menggunakan persamaan 2.6.

Diketahui bahwa pada menit ke-20 saat proses *charging* dengan variasi *heat flux* 1000 W/m<sup>2</sup>, massa air ( $m_w$ ) 54,04 kg, massa *paraffin* ( $m_p$ ) 4,31 kg, massa kapsul ( $m_c$ ) 11,44 kg, massa tangki 90 kg, temperatur air awal ( $T_{w,i}$ ) 32,18 °C, temperatur air akhir ( $T_w(t)$ ) 32,19 °C, temperatur awal *paraffin* ( $T_{p,i}$ ) 31,31 °C, temperatur akhir *paraffin* ( $T_{p,am}(t)$ ) 31,32 °C, kalor jenis PCM padat ( $C_{p,ps}$ ) 2 kJ/kg.°C, dan kalor jenis dinding kapsul ( $C_{p,c}$ ) 0,38 kJ/kg.°C, kalor jenis tangki ( $C_{p,t}$ ) 0,49 kJ/kg.°C maka secara teoritis, kapasitas penyimpanan energi termal ( $E$ ) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$E(t) = m_w c_{p,w} \{T_w(t) - T_{w,i}\} + m_p c_{p,ps} \{T_{p,am}(t) - T_{p,i}\} + m_c c_{p,c} \{T_c(t) - T_{c,i}\} + m_t c_{p,t} \{T_t(t) - T_{t,i}\}$$

Langkah pertama pada persamaan 2.6 merupakan kalor yang tersimpan di air sehingga  $Q_{\text{sensibel air}}$  adalah

$$Q_{\text{sensibel air}} = m_w c_{p,w} \{T_w(t) - T_{w,i}\}$$

Perlu diketahui harga  $C_{p,w}$  menggunakan persamaan 2.5.

$$C_p(T) = 4,2174356 - 0,0056181625T + 0,0012992528T^{1,5} - 0,00011535353T^2 + 0,00000414964T^{2,5}$$

$$\begin{aligned} C_p(T) &= 4,2174356 - 0,0056181625(32,19) + \\ & 0,0012992528(32,19)^{1,5} - 0,00011535353(32,19)^2 + \\ & 0,00000414964(32,19)^{2,5} \\ &= 4,17 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Harga  $Q_{\text{sensibel air}}$  menjadi

$$\begin{aligned} Q_{\text{air}} &= 54,04 \cdot 4,17 (32,19 - 32,18) \\ &= 2,25 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Langkah kedua dari persamaan 2.6 yaitu kalor yang tersimpan di PCM. Penyimpanan PCM khususnya terjadi pada  $Q_{\text{sensibel paraffin padat}}$ . Harga  $Q_{\text{sensibel paraffin padat}}$  adalah

$$\begin{aligned} Q_{\text{pcm}} &= m_p c_{p,ps} \{T_{p,am}(t) - T_{p,i}\} \\ Q_{\text{pcm}} &= 4,31 \cdot 2 (31,32 - 31,31) \\ &= 0,086 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Langkah ketiga pada persamaan 2.6 merupakan kalor yang tersimpan di permukaan kapsul sehingga  $Q_{\text{sensibel kapsul}}$  didapatkan dengan persamaan berikut.

$$Q_{\text{kapsul}} = m_c c_{p,c} \{T_c(t) - T_{c,i}\}$$

Asumsi temperatur dari kapsul sama dengan rata-rata temperatur HTF dan PCM.

$$\begin{aligned} Q_{\text{kapsul}} &= 11,44 \cdot 0,38 (31,76 - 31,75) \\ &= 0,043 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Langkah keempat dari persamaan 2.6 yaitu kalor yang tersimpan di tangki sehingga  $Q_{\text{sensibel tangki}}$  adalah.

$$Q_{\text{tangki}} = m_t c_{p,t} \{T_t(t) - T_{t,i}\}$$

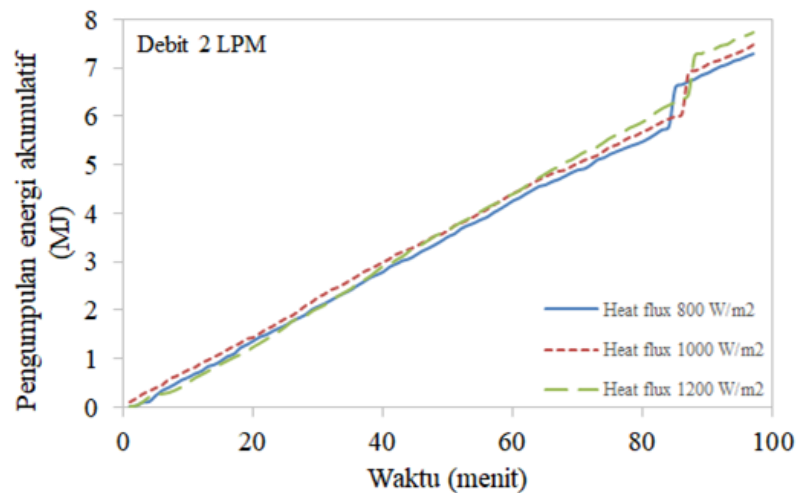
Temperatur dari tangki diasumsikan sama dengan rata-rata temperatur HTF.

$$\begin{aligned} Q_{\text{tangki}} &= 90 \cdot 0,49 (32,19 - 32,18) \\ &= 0,441 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Penjumlahan dari kalor sensibel air, sensibel PCM, sensibel kapsul dan sensibel tangki mendapatkan kapasitas penyimpanan energi termal dari tangki TES.

$$\begin{aligned}
 E(t) &= Q_{\text{sesibel air}} + Q_{\text{sesibel pcm (paraffin padat)}} + Q_{\text{sesibel kapsul}} + Q_{\text{sesibel tangki}} \\
 &= 2,25 + 0,086 + 0,043 + 0,441 \\
 &= 2.82 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

Energi termal sesaat dari tangki TES pada menit ke-20 dengan variasi *heat flux* 1000 W/m<sup>2</sup> adalah 2.82 kJ/kg.°C.



Gambar 4.3. Pengumpulan energi termal akumulatif

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa ketiga variasi mempunyai pola yang sama yaitu semakin tinggi *heat flux* maka semakin besar energi yang terkumpul. Hal ini dikarenakan semakin besar energi yang disuplai, semakin banyak energi yang terkumpul. Hal tersebut berpengaruh terhadap energi yang dikumpul oleh HTF, PCM, kapsul dan tangki semakin besar, karena energi *output* kolektor semakin lama maka semakin meningkat. Peningkatan energi dari kolektor tersebut akan meningkatkan energi yang disuplai, akibat besarnya suplai energi maka semakin banyak energi yang terkumpul tiap-tiap material.

Penambahan energi di dalam tangki mendekati konstan, hal itu ditunjukkan pada kurva yang terlihat cenderung linier. Namun, terjadi lonjakan pada setiap variasi *heat flux* setelah menit ke-80. Lonjakan tersebut disebabkan oleh energi laten yang diserap oleh PCM. Energi laten tersebut menyebabkan perubahan fasa yang tidak diikuti perubahan temperatur yang signifikan. Penyerapan ini

mengakibatkan bertambahnya energi termal yang terkumpul. Pengumpulan energi termal akumulatif terbesar terjadi pada *heat flux* 1200 W/m<sup>2</sup> sebesar 7,734 MJ. Pengumpulan energi termal saat *heat flux* 1000 W/m<sup>2</sup> dan 800 W/m<sup>2</sup> adalah 7,481 MJ dan 7,299 MJ.

#### 4.5. Kontribusi material penyimpan kalor pada pengumpulan energi termal

Kontribusi tiap-tiap material dalam menyimpan energi termal pada tangki PATS jika dipersentasekan berdasarkan variasi *heat flux* dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Rekapitulasi persentase pengumpulan energi akumulatif

Variasi <i>heat flux</i> (W/m <sup>2</sup> )	Persentase energi terkumpul (%)			
	HTF	Tangki	PCM	Kapsul
800	72,19	14,14	12,23	1,45
1000	71,93	14,08	12,57	1,42
1200	72,52	14,19	12,83	1,46

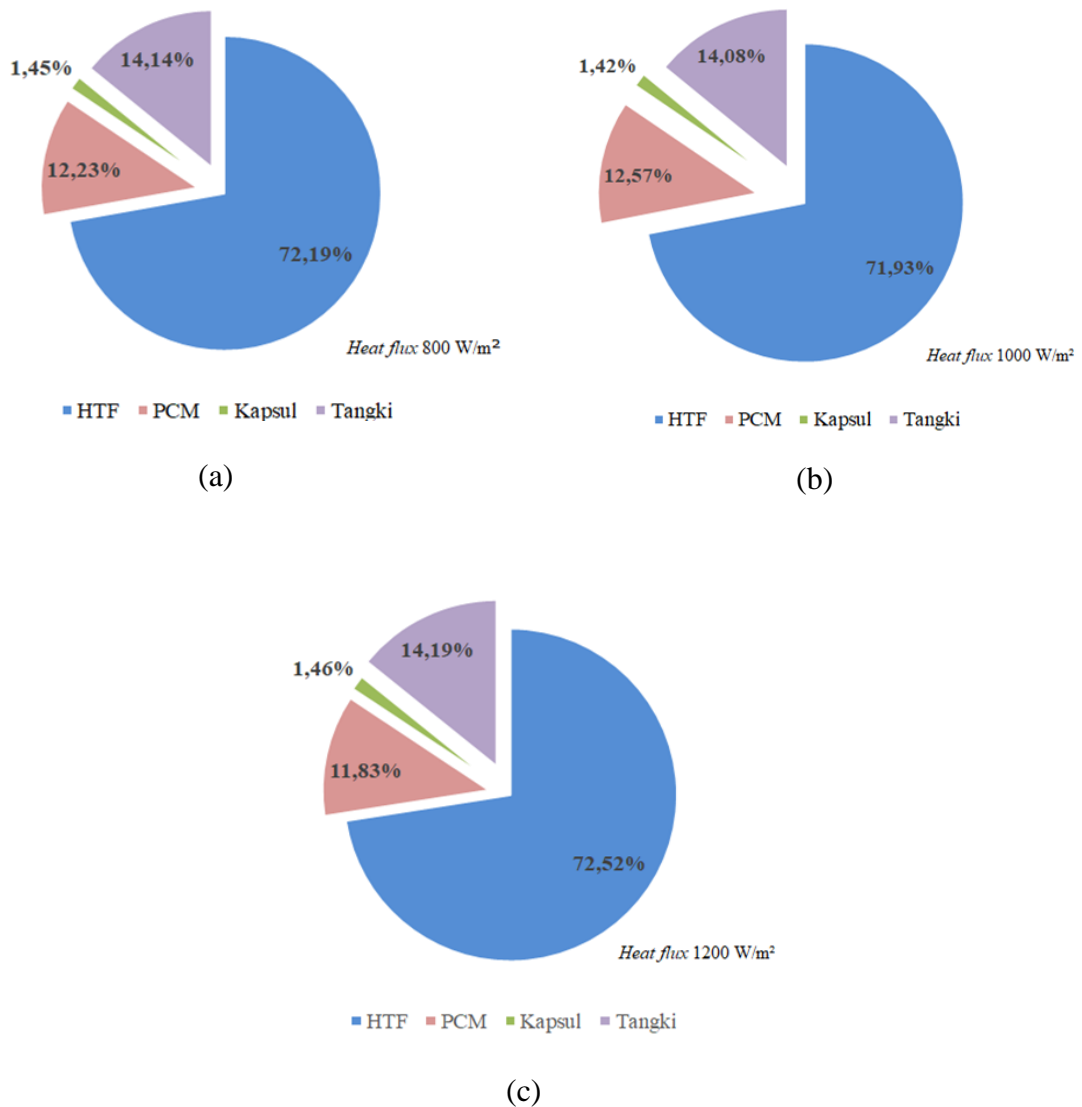
Akumulasi energi termal yang terkumpul di tiap material berdasarkan variasi *heat flux* disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Rekapitulasi pengumpulan energi akumulatif

Variasi <i>heat flux</i> (W/m <sup>2</sup> )	Akumulasi energi (kJ/kg.°C)				
	HTF	Tangki	PCM	Kapsul	Total
800	5502,341	1077,567	931,967	110,1532	7622,028
1000	5362,792	1049,668	937,5242	105,9598	7455944
1200	5860,176	1146,942	955,99	118,2	8081,309

Kontribusi pengumpulan kalor tiap material penyimpan energi termal dan tiap variasi *heat flux* diberikan pada Gambar 4.4.





Gambar 4.4. Rekapitulasi energi akumulatif (a) *heat flux* 800  $W/m^2$  (b) *heat flux* 1000  $W/m^2$  (c) *heat flux* 1200  $W/m^2$

Perolehan kontribusi pengumpulan energi dari ketiga variasi *heat flux* yang terbesar adalah HTF, tangki, PCM, dan kapsul. Urutan tersebut dipengaruhi dari besar volume tiap material. HTF memiliki peranan penting dalam instalasi ini dimana HTF mendominasi energi yang terkumpul. Hal tersebut disebabkan volume dari HTF yang lebih dominan dan memperoleh energi rata-rata 72%. PCM telah berkontribusi dalam pengumpulan energi termal dengan rata-rata 12% dari semua variasi. Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 menunjukkan energi termal tersimpan yang optimal dalam penelitian ini pada saat *heat flux* 1000  $W/m^2$ .