

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kalibrasi Termokopel

Kalibrasi termokopel penelitian ini dilakukan pada termokopel HTF dan PCM selama proses *charging* dan *discharging* kontinu disajikan Tabel 4.1. dan 4.2. seperti sebagai berikut.

Tabel 4.1. Kalibrasi termokopel HTF

Termokopel	Kalibrasi	R ²	Keterangan
T11	$y = 1,243x - 5,882$	0,998	Vertikal atas
T12	$y = 1,222x - 5,314$	0,999	Vertikal atas-tengah
T13	$y = 1,220x - 5,247$	0,999	Horizontal kanan
T14	$y = 1,224x - 5,447$	0,999	Vertikal tengah
T15	$y = 1,222x - 5,435$	0,999	Horizontal kiri
T16	$y = 1,234x - 6,208$	0,998	Vertikal bawah-tengah
T17	$y = 1,229x - 5,465$	0,998	Vertikal bawah

Tabel 4.2. Kalibrasi termokopel PCM

Termokopel	Kalibrasi	R ²	Keterangan
T5	$y = 1,223x - 5,814$	0,999	K3
T6	$y = 1,226x - 5,927$	0,999	K3
T7	$y = 1,223x - 6,052$	0,999	K14
T8	$y = 1,227x - 6,163$	0,999	K14
T9	$y = 1,217x - 5,410$	0,999	K24
T10	$y = 1,222x - 5,02$	0,999	K24

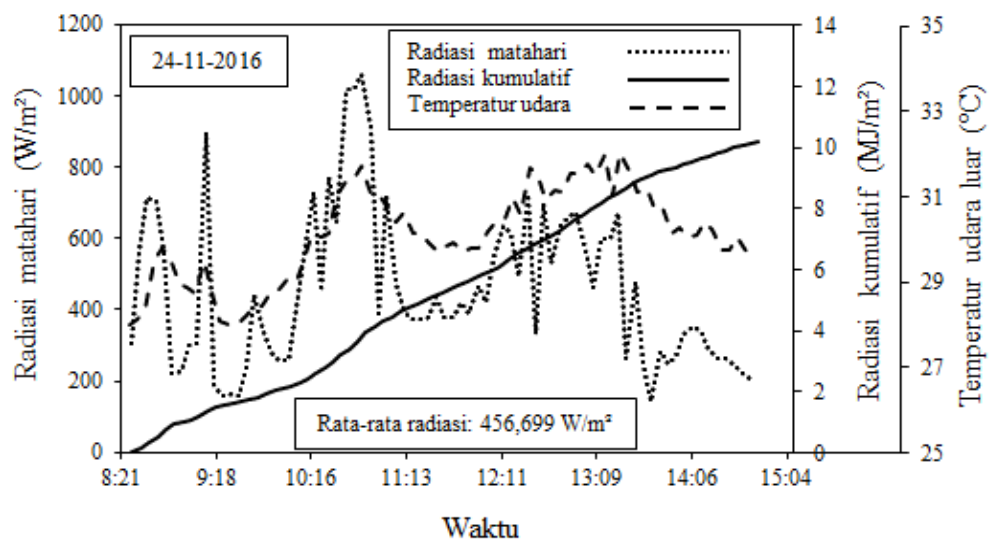
Posisi penempatan termokopel untuk HTF dan PCM disajikan seperti pada Gambar 3.2.

4.2. Pengujian Proses *Charging*

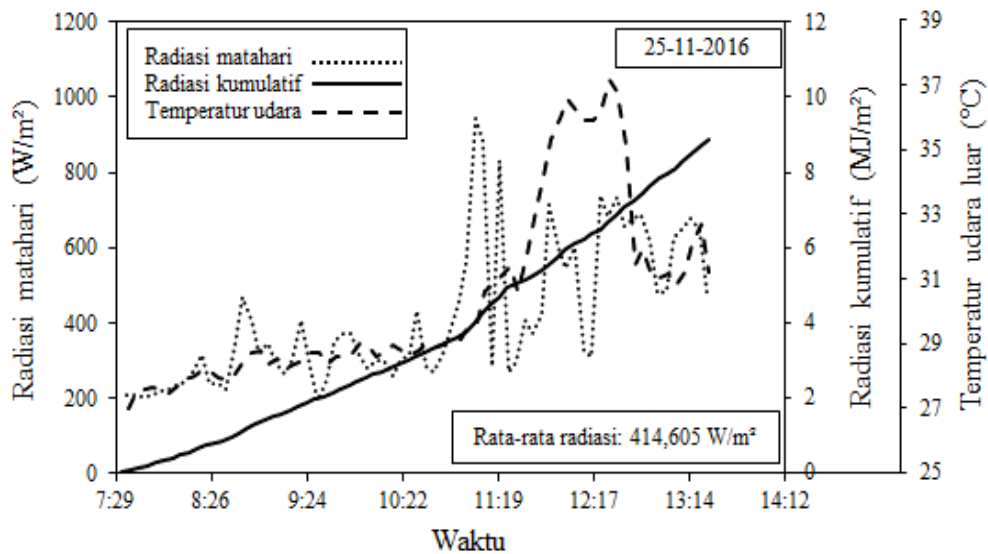
Proses *charging* merupakan proses pemanasan air menggunakan kolektor matahari dimana energinya berasal dari energi matahari.

4.2.1. Kondisi lingkungan

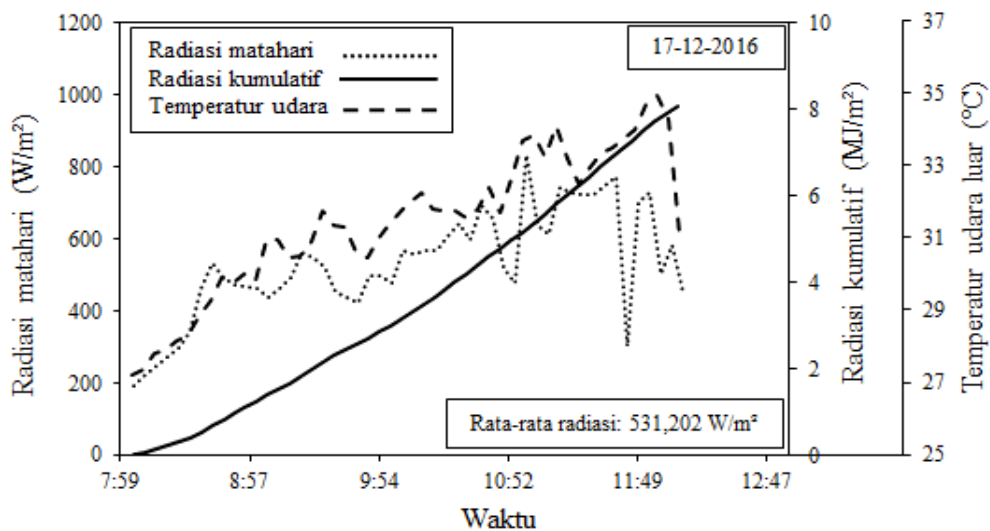
Kondisi lingkungan sekitar PATS terdapat beberapa parameter yang penting seperti, radiasi matahari dan temperatur udara luar. Intensitas radiasi matahari dan temperatur udara saat proses pengujian disajikan pada Gambar 4.1. Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.



Gambar 4.1. Intensitas radiasi matahari dan temperatur udara luar pengujian tanggal 24/11/2016



Gambar 4.2. Intensitas radiasi matahari dan temperatur udara luar pengujian tanggal 25/11/2016



Gambar 4.3. Intensitas radiasi matahari dan temperatur udara luar pengujian tanggal 17/12/2016

Hasil pengujian yang disajikan sebagaimana pada Gambar 4.1, Gambar 4.2, dan Gambar 4.3, menginformasikan bahwa ketiga Grafik tersebut terdapat kesamaan yaitu, radiasi matahari yang terjadi secara fluktuasi. Intensitas radiasi matahari tertinggi yang terjadi pada Gambar 4.1, Gambar 4.2, dan Gambar 4.3. yaitu pada pukul 10:47, pukul 11:00 dan pukul 11:00 masing-masing adalah sebesar

1059,4 W/m², 943,1 W/m² dan 834,4 W/m². Radiasi matahari pada tanggal 24 November 2016 mengalami fluktuasi sepanjang pengujian dengan nilai rata-rata intensitas 456,699 W/m² dan pada pukul 10:00 sampai 11:00 terjadi kenaikan intensitas yang cukup signifikan. Pada tanggal 25 November 2016 radiasi matahari cukup stabil meskipun ada sedikit fluktuasi di awal pengujian dan pada pukul 10:30 sampai 11:00 terjadi kenaikan intensitas yang cukup besar dimana nilai rata-rata intensitas 414,605 W/m². Pada tanggal 17 Desember 2016 radiasi matahari cukup stabil saat awal pengujian dan nilai rata-rata intensitas 531,202 W/m². Radiasi kumulatif saat pengujian baik hari pertama, hari kedua dan hari ketiga masing-masing adalah sebesar 10,213 MJ, 8,87 MJ dan 8,069 MJ. Rata-rata intensitas radiasi matahari pada ketiga pengujian di atas memberikan pengaruh terhadap radiasi kumulatif. Semakin besar rata-rata intensitasnya maka radiasi kumulatif juga besar.

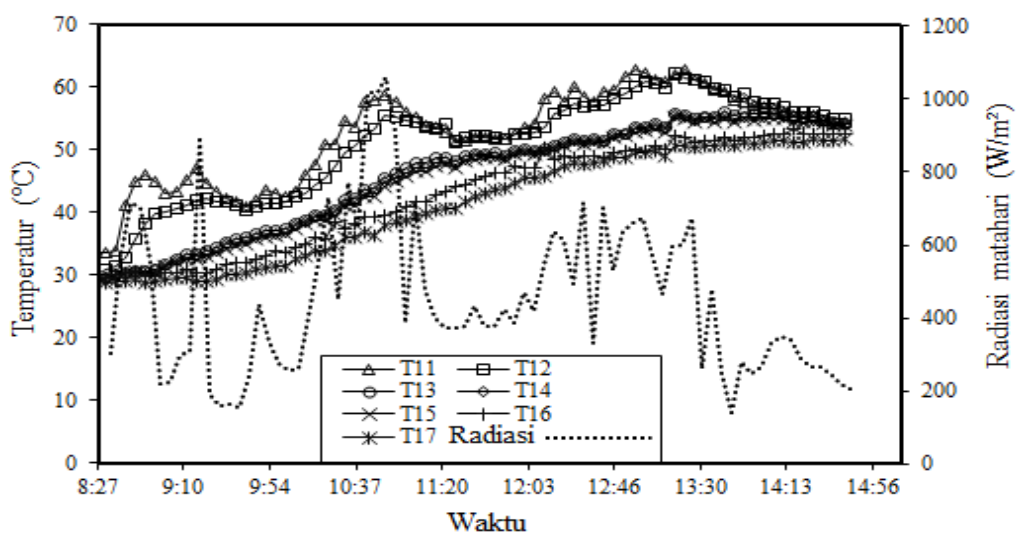
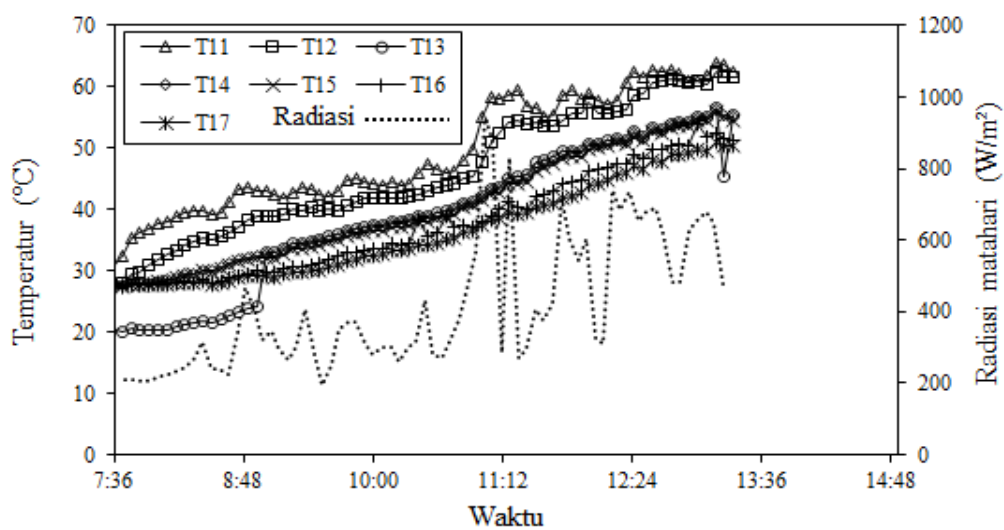
Intensitas radiasi matahari yang terjadi secara tidak tetap berpengaruh terhadap proses penyerapan kalor yang ada pada kolektor matahari dan dapat mengakibatkan proses pemanasan temperatur HTF dan PCM terjadi secara bervariasi. Ketiga Gambar untuk Gambar 4.1, Gambar 4.2, maupun Gambar 4.3. terdapat beberapa perbedaan terutama dalam hal tingginya temperatur udara luar. Pada Gambar 4.2. menunjukkan pencapaian temperatur tertinggi yaitu mencapai 37 °C terjadi pada pukul 12:30, sedangkan Gambar 4.1. dan 4.3. temperatur tertinggi masing-masing adalah 32 °C terjadi pukul 13:30 dan 35 °C terjadi pukul 12:30. Fenomena terjadinya fluktuasi kenaikan pada temperatur udara luar disebabkan oleh tinggi dan rendahnya temperatur udara luar sekitar PATS.

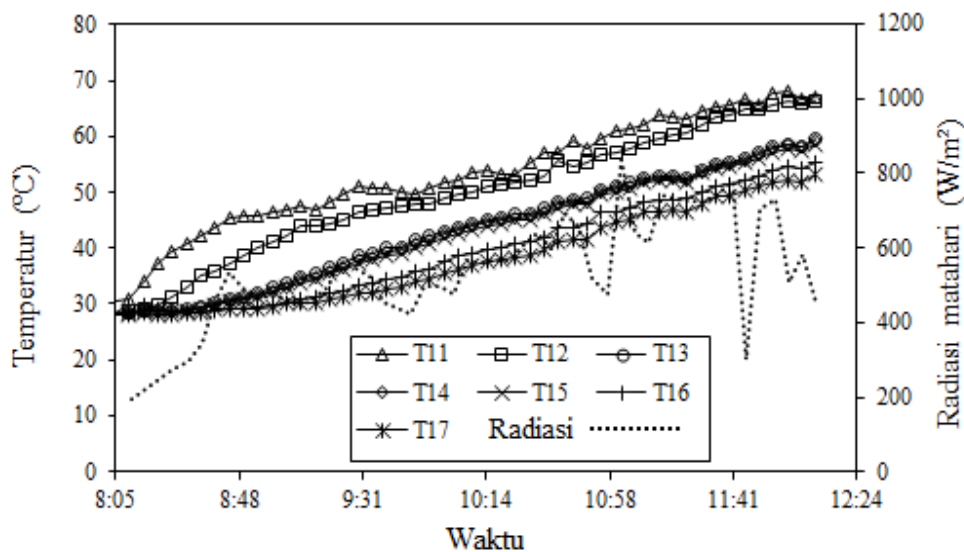
4.2.2. Distribusi temperatur HTF

Tangki TES terdapat beberapa termokopel yang digunakan untuk mengukur temperatur HTF yaitu, T11, T12, T13, T14, 15, T16 dan T17. Temperatur HTF selama pengujian yang dilakukan disajikan pada Gambar 4.4, Gambar 4.5 dan Gambar 4.6. Waktu pengujian dan lamanya pengujian disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Waktu pengujian

Tanggal	Awal <i>charging</i>	Akhir <i>charging</i>	Lama <i>charging</i>
24/11/2016	Pukul 8:27 WIB	Pukul 14:42 WIB	380 menit
25/11/2016	Pukul 7:36 WIB	Pukul 13:21 WIB	350 menit
17/12/2016	Pukul 8:05 WIB	Pukul 12:10 WIB	250 menit

Gambar 4.4. Evolusi temperatur HTF dan radiasi matahari tanggal 24/11/2016 (Proses *Charging*)Gambar 4.5. Evolusi temperatur HTF dan radiasi matahari tanggal 25/11/2016 (Proses *Charging*)



Gambar 4.6. Evolusi temperatur HTF dan radiasi matahari tanggal 17/12/2016 (Proses *Charging*)

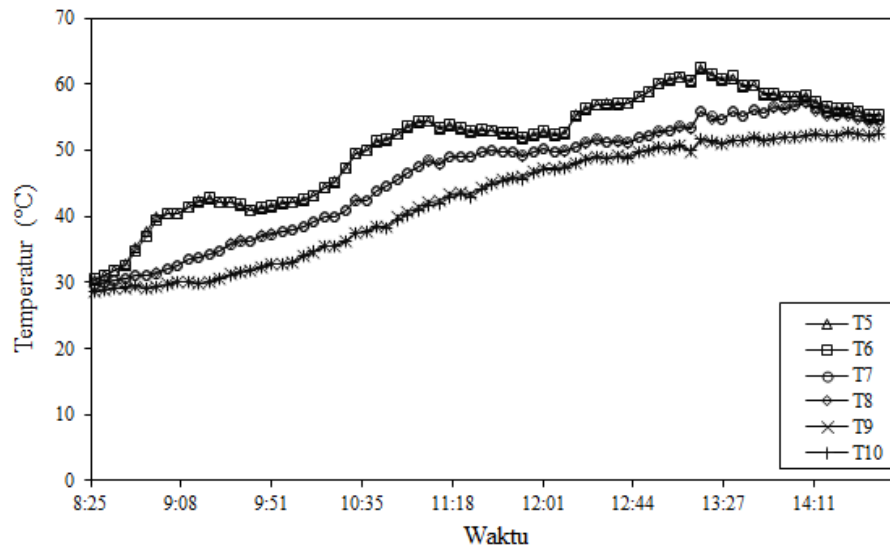
Temperatur HTF selama proses *charging* disajikan pada Gambar 4.4, Gambar 4.5, dan Gambar 4.6. memberikan informasi bahwa karakteristik naiknya temperatur yang terjadi secara perlahan-lahan karena laju aliran massanya rendah. Selain itu, yang berpengaruh adalah radiasi matahari. Laju aliran massa yang rendah memberikan mempengaruhi terhadap kenaikan temperatur HTF dan laju perpindahan kalor di dalam tangki yang terjadi selama beroperasi. Berfluktuasinya temperatur HTF selama pengujian disebabkan karena radiasi matahari yang ada di sekitar PATS terjadi secara tidak menentu, oleh karenanya memberikan dampak temperatur HTF di dalam tangki mengalami fluktuasi.

Pada tanggal 24 November 2016, temperatur awal HTF saat pengujian untuk T11 sampai dengan T17 masing-masing adalah 33 °C, 30 °C, 29 °C, 29 °C, 29 °C, 29 °C dan 28 °C. Temperatur HTF saat awal pada tanggal 25 November 2016 untuk T11 sampai dengan T17 masing-masing adalah 30 °C, 27 °C, 20 °C, 27 °C, 27 °C, 27 °C dan 27 °C. Temperatur HTF awal pada tanggal 17 Desember 2016 untuk T11 sampai dengan T17 masing-masing adalah 30 °C, 28 °C, 28 °C, 28 °C, 28 °C, 28 °C dan 28 °C. Temperatur tertinggi HTF yang terjadi pada Gambar 4.6 adalah capaian temperatur yang paling maksimal dibandingkan dengan Gambar 4.4. dan Gambar 4.5. Gambar 4.6. menunjukkan temperatur tertinggi untuk T11 sampai

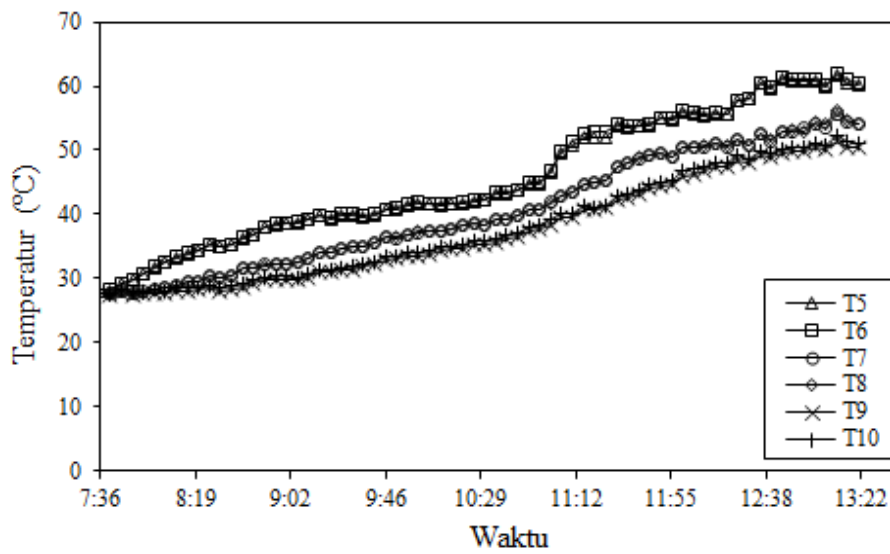
dengan T17 masing-masing adalah 66 °C, 66 °C, 59 °C, 59°C, 58 °C, 55 °C dan 53 °C terjadi saat pukul 12:10. Gambar 4.4. memperlihatkan temperatur tertinggi untuk T11 sampai dengan T17 masing-masing adalah 62 °C, 62 °C, 55 °C, 55 °C, 55 °C, 53 °C dan 51 °C terjadi pukul 13:00. Sementara Gambar 4.5 temperatur tertinggi untuk T11 sampai dengan T17 masing-masing adalah 64 °C, 62 °C, 56 °C, 56 °C, 55°C, 53 °C dan 51 °C terjadi pukul 13:00. Selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) pada tanggal 24 November 2016 masing-masing dari T11 sampai dengan T17 adalah sebesar (20 °C, 20 °C, 17 °C 17 °C 14 °C 18 °C dan 15 °C). Pada tanggal 25 November 2016, selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) masing-masing untuk T11 sampai dengan T17 adalah (27 °C, 30 °C, 23 °C, 20 °C, 18 °C, 15°C dan 15 °C). Pada tanggal 17 Desember 2016, selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) masing-masing untuk T11 sampai dengan T17 adalah (30 °C, 32 °C, 22 °C, 21 °C, 20 °C, 19 °C dan 16 °C). Dari uraian di atas, radiasi matahari yang menyinari kolektor PATS waktu pengujian memberikan pengaruh yang signifikan. Semakin tinggi intensitas radiasi matahari dapat menentukan cepatnya proses pemanasan HTF dan perpindahan kalor energinya juga besar.

4.2.3. Distribusi temperatur PCM

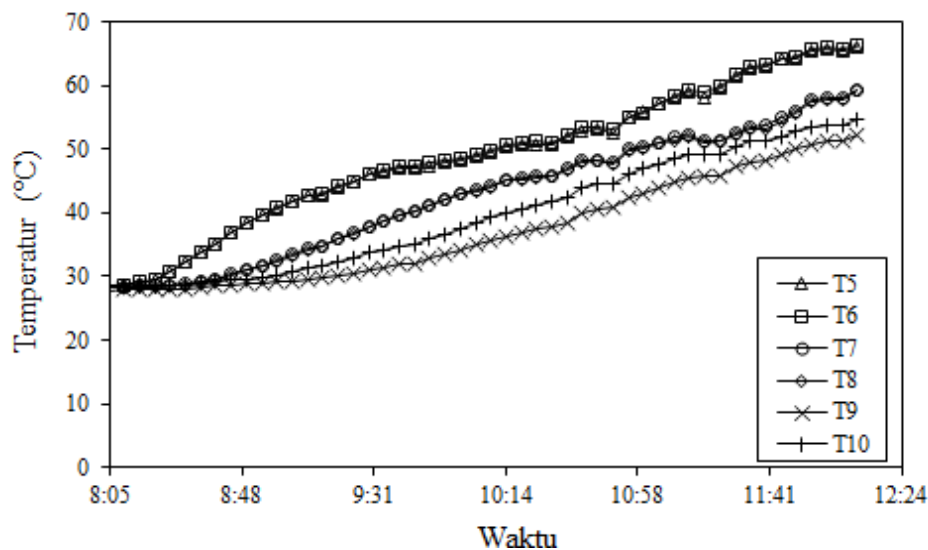
Tangki TES terdapat beberapa termokopel yang dijadikan sebagai alat ukur temperatur PCM yaitu T5, T6, T7, T8, T9 dan T10. Pengujian pada proses *charging* ada beberapa hasil temperatur PCM. Evolusi temperatur PCM disajikan pada Gambar 4.7, Gambar 4.8, dan Gambar 4.9 sebagai berikut.



Gambar 4.7. Evolusi temperatur PCM tanggal 24/11/2016
(Proses *Charging*)



Gambar 4.8. Evolusi temperatur PCM tanggal 25/11/2016
(Proses *Charging*)



Gambar 4.9. Evolusi temperatur PCM tanggal 17/12/2016 (Proses *Charging*)

Menurut Gambar 4.7, Gambar 4.8 dan Gambar 4.9, karakteristik evolusi temperatur PCM sama dengan temperatur HTF yaitu kenaikan temperatur terjadi secara lambat dikarenakan laju aliran massanya rendah dan berfluktuasinya radiasi matahari. Proses perubahan radiasi matahari yang terjadi secara fluktuasi juga memberikan dampak terhadap naik turunnya temperatur PCM. Kenaikan temperatur PCM tergantung pada besaran energi yang diserap oleh kolektor yang disirkulasikan menuju tangki TES dan kemudian ke HTF. Proses perpindahan kalor yang terjadi di dalam tangki TES antara HTF ke PCM disebabkan oleh tingginya temperatur HTF.

Pada tanggal 24 November 2016, temperatur awal PCM saat pengujian untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah 30 °C, 30 °C, 29 °C, 29 °C, 28 °C, 28 °C pada pukul 8:27. Temperatur awal PCM pada tanggal 25 November 2016 untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah 28 °C, 28 °C, 27 °C, 27 °C, 27 °C dan 27 °C pada pukul 7:36. Temperatur awal PCM pada tanggal 17 Desember 2016 untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah 28 °C, 28 °C, 28 °C, 28 °C, 27 °C dan 28 °C pada pukul 8:05. Gambar 4.7 menunjukkan temperatur tertinggi untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah 62 °C, 62 °C, 57 °C, 57 °C, 52 °C dan 52 °C terjadi saat pukul 13:00. Pada Gambar 4.8 menunjukkan

temperatur tertinggi untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah 61 °C, 62 °C, 55 °C, 56 °C, 51 °C dan 52 °C terjadi pada pukul 13:11. Temperatur PCM tertinggi pada Gambar 4.9 untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah 66 °C, 66 °C, 59 °C, 59 °C, 52 °C dan 54 °C terjadi pada pukul 12:00. Selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) pada tanggal 24 November 2016, untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah sebesar (23 °C, 19 °C, 20 °C, 21 °C, 21 °C dan 20 °C). Pada tanggal 25 November 2016, selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah (32 °C, 31 °C, 22 °C, 21 °C, 20 °C dan 19 °C). Pada tanggal 17 Desember 2016, selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah (37 °C, 36 °C, 25 °C, 20 °C, 17 °C dan 17 °C). Dari uraian di atas, intensitas radiasi yang menyinari kolektor dan evolusi temperatur HTF memberikan pengaruh signifikan. Semakin tinggi radiasi matahari dan temperatur HTF dapat menentukan cepatnya proses pemanasan temperatur PCM dan perpindahan kalor energinya juga besar.

4.2.4. Kapasitas Penyimpanan Energi Termal

Kapasitas penyimpanan energi termal merupakan jumlah energi yang dapat disimpan secara teoritis di dalam tangki TES yang dihasilkan sumbernya dari HTF, PCM dan kapsul. Kapasitas energi yang tersimpan tersebut terdiri dari kalor sensibel HTF, kalor sensibel PCM, kalor laten PCM dan kalor sensibel kapsul. Selain itu, perhitungan kapasitas penyimpanan energi termal berdasarkan pada temperatur awal dan temperatur akhir baik HTF, PCM ataupun kapsul. Kapasitas penyimpanan energi disajikan pada Gambar 4.10, Gambar 4.11 dan Gambar 4.12.

Untuk mengetahui kapasitas penyimpanan energi termal maka digunakan persamaan 2.8. Contoh langkah perhitungan adalah sebagai berikut.

Diketahui bahwa massa air (m_w) 47,83 kg, temperatur akhir air (T_w) 54,17 °C, temperatur awal air (T_{wi}) 29,91 °C, temperatur akhir PCM (T_p) 54,69 °C, temperatur awal PCM (T_{pi}) 29,51 °C, temperatur leleh PCM (T_m) 52 °C, massa PCM (m_p) 7,76 kg, massa kapsul (m_d) 11,45 kg, kalor jenis air ($c_{p,w}$) 4,183 kJ/kg.(°C), kalor jenis PCM padat ($c_{p,ps}$) 2 kJ/kg.(°C), kalor jenis PCM fasa cair ($c_{p,pl}$) 2 kJ/kg.(°C), kalor jenis dinding kapsul (c_d) 0,38 kJ/kg.(°C) dan kalor laten pelelehan (L) 173 J/kg.

$$E(t) = m_w c_{p,w} (T_w(t) - T_{w,i}) + m_p \{ c_{p,ps} (T_p(t) - T_{p,i}) + L + c_{p,pl} (T_p(t) - T_m(t)) \} + m_d c_d \{ (T_p(t) - T_{p,i}) \}$$

Q sensibel air didapatkan dengan menghitung $m_w \times C_{p,w} \times \Delta T$

Untuk mendapatkan nilai ($C_{p,w}$) dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$C_p(T) = 4,2174356 - 0,0056181625(52,774) + 0,0012992528(52,774)^{1,5} - 0,00011535353(52,774)^2 + 0,00000414964(52,774)^{2,5}$$

Nilai T berdasarkan T rata-rata dari temperatur awal dan akhir didapatkan sebesar 57 °C

$$C_p = 4,2174356 - 0,0056181625(57) + 0,0012992528(57)^{1,5} - 0,00011535353(57)^2 + 0,00000414964(57)^{2,5}$$

$$C_{p,w} = 4,1833 \text{ (kJ/kg.}^\circ\text{C)}$$

Maka :

$$\begin{aligned} Q \text{ sensibel air} &= 47,83 \times 4,1833 \times 24,26 \\ &= 4854,1164 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Q sensibel *paraffin* padat dengan menghitung $m_p \times C_{p,ps} \times \Delta T$

Maka :

$$= 7,76 \times 2 \times 22,49$$

$$= 349,04 \text{ kJ}$$

Q sensibel *paraffin* cair dengan menghitung $m_p \times C_{p,pl} \times \Delta T$

Maka :

$$= 7,76 \times 2 \times 2,69$$

$$= 41,75 \text{ kJ}$$

Q laten *paraffin* dengan menghitung $m_p \times L$

Maka :

$$= 1342,48 \text{ kJ}$$

Q sensibel tembaga dengan menghitung $m_d \times c_d \times \Delta T$

Maka :

$$= 11,45 \times 0,38 \times 24,72$$

$$= 107,5567 \text{ kJ}$$

Untuk mendapatkan Q total dengan menjumlahkan $Q_{\text{sensibel air}} + Q_{\text{sensibel paraffin padat}} + Q_{\text{sensibel paraffin cair}} + Q_{\text{laten paraffin}} + Q_{\text{sensibel tembaga}}$

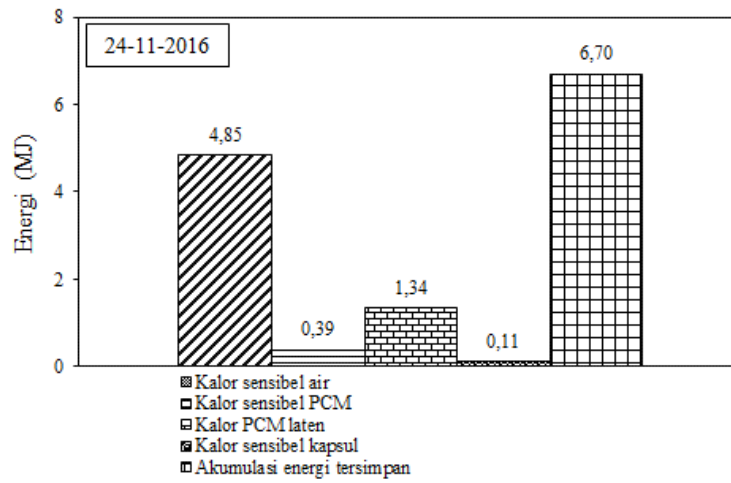
Maka :

$$E(t) = 4854,4598 + 349,4 + 41,75 + 1342,48 + 107,5567$$

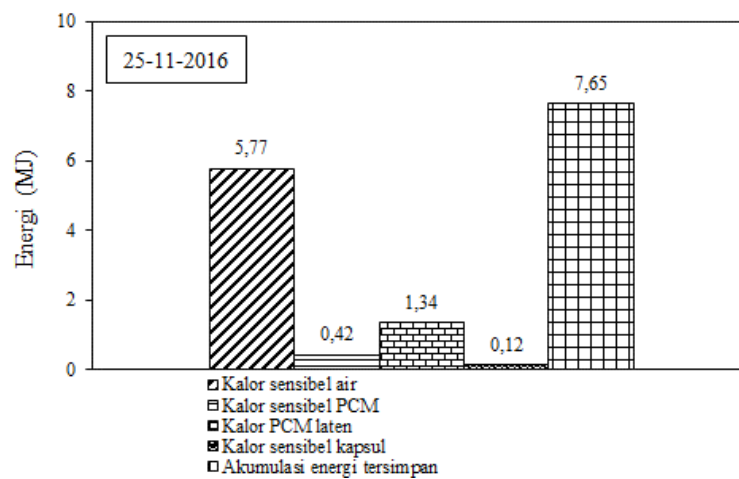
$$E(t) = 6695,6465 \text{ kJ}$$

Hasil dari perhitungan Q total dikonversikan menjadi MJ didapatkan sebesar 6,70 MJ

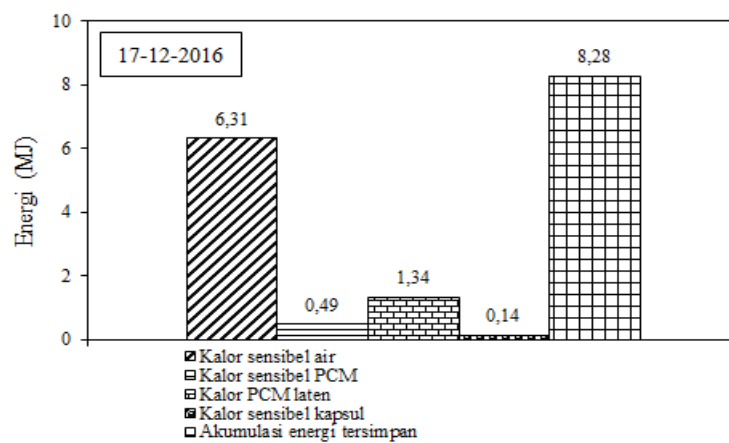
Hasil dari perhitungan nilai kapasitas penyimpanan energi termal di atas ditunjukkan pada Gambar 4.10 yaitu pengujian tanggal 24 November 2016. Hasil perhitungan selengkapnya disajikan pada Lampiran 3.



Gambar 4.10. Kapasitas penyimpanan energi teoritis tanggal 24/11/2016



Gambar 4.11. Kapasitas penyimpanan energi teoritis tanggal 25/11/2016



Gambar 4.12. Kapasitas penyimpanan energi teoritis tanggal 17/12/2016

Berdasarkan Gambar 4.10, temperatur awal dan akhir HTF masing-masing adalah 29,91°C dan 54,17°C serta temperatur awal dan akhir PCM masing-masing yaitu 29,51°C dan 54,69°C. Pada Gambar 4.11, temperatur awal dan akhir HTF masing-masing adalah 27,49 °C dan 56,33°C serta temperatur awal dan akhir PCM masing-masing yaitu sebesar 29,11°C dan 56°C. Kemudian pengujian ketiga Gambar 4.12 temperatur awal dan akhir HTF masing-masing adalah 28,68°C dan 60,19°C sedangkan pada temperatur awal dan akhir PCM masing-masing sebesar 28,30°C dan 60,11°C. Dari ketiga pengujian, hasil Gambar 4.10, Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 menyebutkan bahwa kapasitas penyimpanan energi termal total dari ketiga pengujian tersebut adalah hari pertama 6,70 MJ, hari kedua sebesar 7,65 MJ dan hari ketiga yaitu 8,28 MJ. Persentase penyimpanan kalor total di dalam tangki TES pengujian hari pertama adalah 27,50%, hari kedua sebesar 24,59% dan hari ketiga sebesar 23,84%. Nilai rata-rata radiasi matahari pada tanggal 24 November 2016 adalah 456,699 W/m². Pada tanggal 25 November 2016 rata-rata radiasi matahari sebesar 414,605 W/m². Pada tanggal 17 Desember 2016 rata-rata radiasinya sebesar 531,202 W/m². Dari uraian di atas, bahwa harga rata-rata radiasi matahari setiap pengujian memberikan pengaruh terhadap nilai persentase kontribusi PCM. Semakin tinggi rata-rata radiasi matahari maka nilai persentasenya juga besar.

4.2.5. Penyimpanan kalor sesaat

Menurut Nallusamy dkk (2007), penyimpanan kalor sesaat (*instantaneous heat stored*) merupakan harga yang didapat berdasarkan dari hasil temperatur air masuk dan temperatur air keluar sesaat di dalam tangki TES. Penyimpanan kalor tersebut mengilustrasikan kondisi energi tersimpan oleh HTF pada tangki TES setiap waktu selama pengujian *charging*. Penyimpanan kalor sesaat selama pengujian disajikan seperti pada Gambar 4.13, Gambar 4.14 dan Gambar 4.15.

Untuk menghitung nilai penyimpanan kalor sesaat maka digunakan persamaan 2.7. Contoh langkah perhitungan adalah sebagai berikut.

$$\text{Temperatur air awal } T_{w,in} = 29,9138 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatur air akhir } T_{w,out} = 30,0088 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Luas kolektor matahari $A_c = 1,9 \text{ m}^2$

Maka :

$$Q_{st} = \dot{m}_c C_{p,w} (T_{c,in} - T_{c,out})$$

$$Q_{st} = \dot{m}_c \text{ kg/detik} \times C_p \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times (30,0088 \text{ } ^\circ\text{C} - 29,9138 \text{ } ^\circ\text{C})$$

Untuk mendapatkan nilai sesaat mula-mula \dot{m} dan $C_{p,w}$, dan untuk mengetahui nilai \dot{m} menggunakan rumus laju aliran massa sebagai berikut.

$$\dot{m}_c = \frac{\eta_c I_c A_c}{C_{p,w} (T_{c,out} - T_{c,in})}$$

$$\dot{m}_c = \left(\frac{\eta_c}{100} \right) 303,1 \times 1,9$$

$$\frac{cpw(30,0088 - 29,9138)}$$

Untuk mengetahui nilai efisiensi pengumpulan kumulatif (η_c), dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\eta = \frac{m_w c_{p,w} (T_{w,2} - T_{w,1})}{Q_{incident}} = \frac{m_w c_{p,w} (T_{w,2} - T_{w,1})}{A_c \int_1^2 I_c dt} \times 100\%$$

$$a. Q_{collect} = m_w C_{p,w} (T_{w,2} - T_{w,1})$$

$$= 47,8392 \text{ kg} \times C_{p,w} \times (30,0088 \text{ } ^\circ\text{C} - 29,9138 \text{ } ^\circ\text{C})$$

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

$$0,00000414964T^{2,5}$$

T adalah rata-rata T air

$$T = (30,0088 \text{ } ^\circ\text{C} + 29,9138 \text{ } ^\circ\text{C})/2$$

$$= 29,961 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Jadi nilai $C_{p,w}$ didapatkan

$$= 4,2174356 - 0,0056181625(29,961) + 0,0012992528(29,961)^{1,5} -$$

$$0,00011535353 (29,961)^2 \times 0,00000414964 (29,961)^{2,5}$$

$$= 4,1790 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$Q_{colect} = 47,8392 \text{ kg} \times 4,1790 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times (30,0088 ^\circ\text{C} - 29,9138 ^\circ\text{C})$$

$$= 18,99 \text{ kJ}$$

$$b. Q_{incident} = A_c \int_1^2 I_C dt$$

$$= 1,9 \text{ m}^2 \times 303,1 \text{ W/m}^2 \left(\frac{60}{1000}\right)$$

$$= 34,5534 \text{ kJ}$$

Kemudian nilai efisiensi pengumpulan energi sesaat dapat diketahui.

$$\eta = \frac{Q_{colect}}{Q_{incident}} \times 100 \%$$

$$= \frac{18,99}{34,55} \times 100 \%$$

$$= 54,96 \%$$

Untuk mendapatkan nilai efisiensi pengumpulan energi kumulatif yang harus dilakukan adalah dengan mengubah nilai sesaat dari Q_{colect} dan $Q_{incident}$ menjadi nilai kumulatif dengan menambahkan data pada menit sebelumnya hingga menit yang digunakan. Contoh langkah penjumlahan data disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Perhitungan kumulatif

Waktu	Q colect (kJ)		Q incident (kJ)	
	sesaat	kumulatif	sesaat	kumulatif
8:27	0	0	25,1484	25,1484
8:28	18,9948	18,9948	34,5534	59,7018

Pada Tabel 4.4. didapatkan nilai kumulatif dari Q_{colect} dan $Q_{incident}$

$$Q_{colect} \text{ (kumulatif)} = 18,9948 \text{ kJ}$$

$$Q_{incident} \text{ (kumulatif)} = 59,7018 \text{ kJ}$$

Dapat dihitung

$$\eta = \frac{Q_{colect}}{Q_{incident}} \times 100 \%$$

$$= \frac{18,9948}{59,7018} \times 100 \%$$

$$= 31,81 \%$$

$$\dot{m}_c = \left(\frac{31,81}{100} \right) 303,1 \times 1,9$$

$$4,1790 (30,0088 - 29,9138)$$

$$\dot{m}_c = 0,00709 \text{ kg/detik}$$

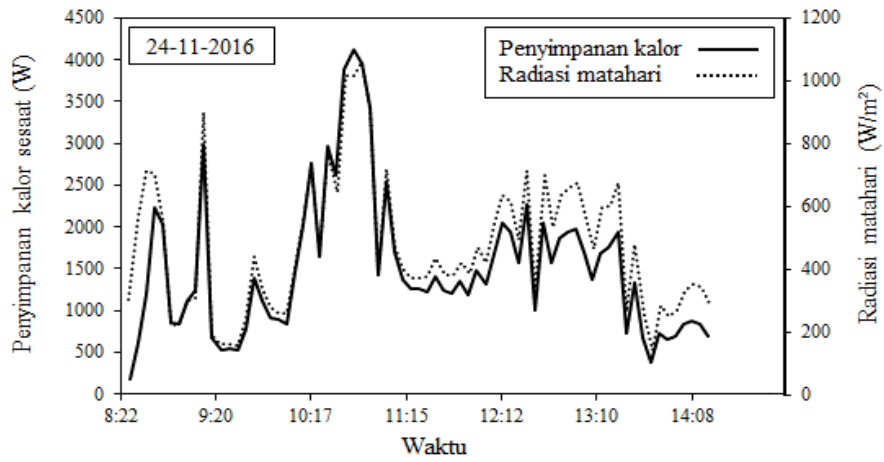
Jadi nilai penyimpanan kalor sesaat.

$$Q_{st} = \dot{m}_c C_{p,w} (T_{c,in} - T_{c,out})$$

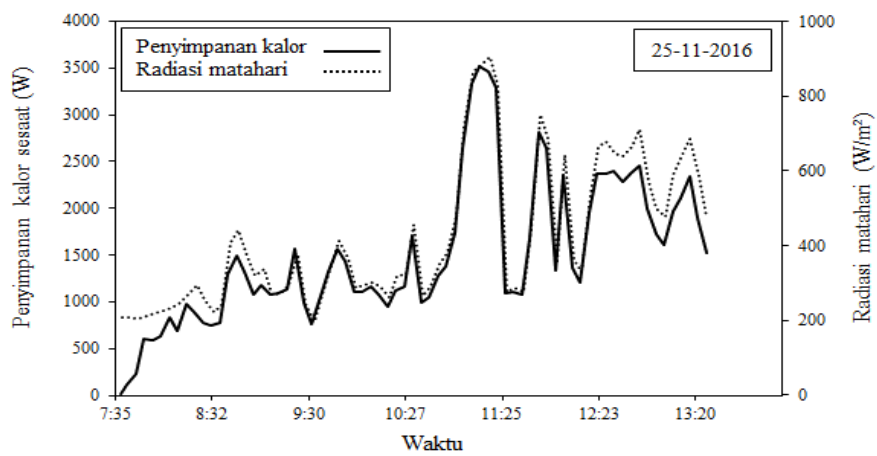
$$Q_{st} = 0,00709 \text{ kg/detik} \times 4,1790 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times (30,0088 ^\circ\text{C} - 29,9138 ^\circ\text{C})$$

$$= 183,2260 \text{ W}$$

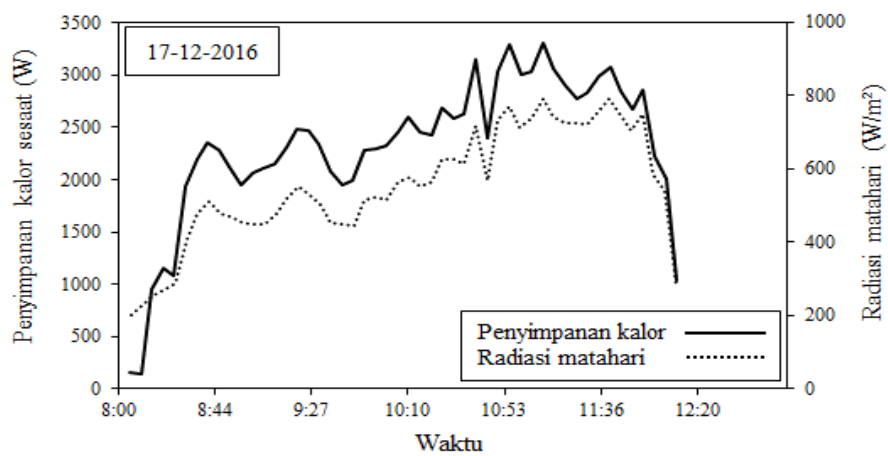
Hasil dari perhitungan nilai penyimpanan kalor sesaat di atas ditunjukkan pada Gambar 4.13. yaitu pukul 8:28. Hasil perhitungan selengkapnya disajikan pada Lampiran 4.



Gambar 4.13. Penyimpanan kalor sesaat tanggal 24/11/2016



Gambar 4.14. Penyimpanan kalor sesaat tanggal 25/11/2016



Gambar 4.15. Penyimpanan kalor sesaat tanggal 17/12/2016

Gambar 4.13, Gambar 4.14 maupun Gambar 4.15 menginformasikan bahwa intensitas radiasi matahari mempengaruhi penyimpanan kalor sesaat. Proses berfluktuasinya intensitas radiasi matahari yang terjadi saat penelitian memberikan dampak yaitu temperatur air *output* dan *input* kolektor tidak stabil sehingga mengakibatkan berubah-ubahnya penyimpanan kalor sesaat. Penyimpanan kalor sesaat dipengaruhi oleh laju aliran massa dari HTF (Nallusamy dkk, 2007). Semakin besar laju aliran massa HTF, maka penyimpanan kalor sesaat juga besar, hal itu disebabkan karena berhubungan dengan pengangkutan energi. Sirkulasi HTF pengujian ini yaitu *thermosyphon*, dimana hal tersebut memberikan dampak penyimpanan kalor sesaat rendah. Ada beberapa karakteristik kecenderungan yang dialami pada penyimpanan kalor sesaat seperti, temperatur mengalami peningkatan di awal *charging* dan seiring berjalanya waktu mengalami penurunan temperatur. Waktu awal pengujian, temperatur air panas dari kolektor mengalami kenaikan secara pelan-pelan sehingga perolehan kalor air pada tangki TES masing rendah. Meningkatnya temperatur air yang berada pada kolektor disebabkan oleh semakin bertambahnya radiasi matahari kumulatif yang menyinari kolektor.

4.2.6. Energi tersimpan kumulatif

Energi tersimpan kumulatif dihasilkan dari perkalian antara kalor yang tersimpan sesaat pada tangki TES dengan waktu dan kemudian dijumlahkan secara kumulatif. Energi tersebut mengilustrasikan akumulasi energi yang tersimpan nyata pada tangki TES. Energi tersimpan kumulatif selama proses penelitian diberikan pada Gambar 4.16.

Untuk mendapatkan nilai energi kumulatif tersimpan terlebih dahulu menentukan nilai sesaat ($Q_{p,s}$) setelah hasil diketahui kemudian dikali waktu (t). Rumus yang digunakan untuk menghitung energi yaitu persamaan 2.7. Contoh langkah perhitungan, menggunakan data pengujian tanggal 24 November 2016 pada pukul 8:28 sebagai berikut.

Luas kolektor	= 1,9 m ²
Radiasi matahari	= 303,1 W/m ²
Temperatur air awal ($T_{c,in}$)	= 34,4612 °C

$$\text{Temperatur air akhir } (T_{c,out}) = 28,2776 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Maka :

$$Q_{st} = \dot{m}_c C_{p,w} (T_{c,in} - T_{c,out})$$

$$Q_{st} = \dot{m}_c C_{p,w} (34,4612 - 28,2776)$$

Untuk mendapatkan nilai sesaat mula-mula \dot{m} dan $C_{p,w}$, untuk menghitung nilai \dot{m} digunakan rumus persamaan laju aliran massa (\dot{m}).

$$\dot{m}_c = \frac{\eta_c I_c A_c}{C_{p,w} (T_{c,out} - T_{c,in})}$$

$$\dot{m}_c = \left(\frac{31,81}{100} \right) 303,1 \times 1,9$$

$$\frac{1}{C_{p,w}(34,4621-28,2776)}$$

Untuk mendapatkan nilai C_{pw} digunakan rumus.

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

$$0,00000414964T^{2,5}$$

Nilai T berdasarkan T rata-rata dari temperatur awal dan akhir didapatkan sebesar 54,17 °C

$$C_p(T) = 4,2174356 - 0,0056181625(54,17) + 0,0012992528(54,17)^{1,5} -$$

$$0,00011535353 (54,17)^2 + 0,00000414964 \times (54,17)^{2,5}$$

$$C_p(T) = 4,1833 \text{ (kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C)}$$

$$\dot{m}_c = \left(\frac{31,81}{100} \right) 303,1 \times 1,9$$

$$\frac{1}{4,1833(34,4621-28,2776)}$$

$$\dot{m}_c = 0,007091 \text{ kg/detik}$$

Jadi hasil perhitungan penyimpanan energi termal

$$Q_{st} = \dot{m}_c C_{p,w} \times (34,4612 - 28,2776)$$

$$Q_{st} = 0,007091 \times 4,1833 \times (34,4612 - 28,2776) = 0,183 \text{ kJ/detik}$$

$$Q_{st} = 183,2260 \text{ W}$$

Menentukan perolehan energi sesaat dengan cara.

$$Q_{p,s} = Q_{st} \times t$$

$$= 183,2260 \times 60/1000$$

$$= 10,9936 \text{ kW.detik}$$

Nilai akumulasi didapatkan dari penjumlahan data awal sampai dengan data akhir. Diketahui data sebelumnya 0 jadi perolehan kumulatif nilainya sama dengan data yang digunakan 10,9936 kW.detik hasil tersebut dikonversikan ke MJ.

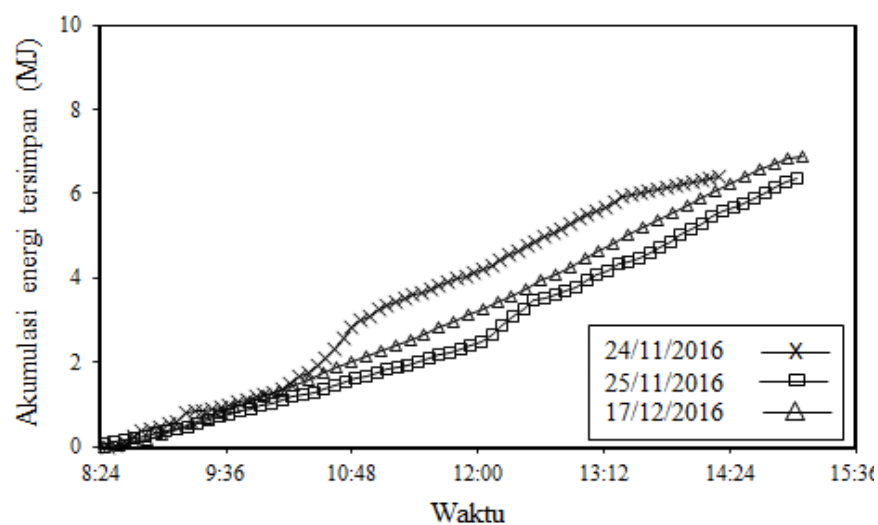
$$Q_{p,s} = Q_{p,s} / 1000$$

$$Q_{p,s} = 10,9936 \text{ kW.detik} / 1000$$

$$= 0,0110 \text{ MJ}$$

Jadi hasil energi kumulatif ketahu sebesar 0,0110 MJ.

Hasil dari perhitungan nilai energi tersimpan kumulatif di atas ditunjukkan pada Gambar 4.16 yaitu pukul 8:28. Hasil perhitungan selengkapnya disajikan pada Lampiran 4.



Gambar 4.16. Energi kumulatif tersimpan

Menurut hasil pengujian di atas, bahwa energi tersebut mengilustrasikan akumulasi energi yang tersimpan nyata tepat di dalam tangki TES. Intensitas radiasi matahari yang besar pada hari pertama, kedua dan ketiga menyebabkan akumulasi energi termal yang tersimpan tinggi. Pada tanggal 24 November 2016 menunjukkan harga akumulasi energi tersimpan adalah sebesar 6,42 MJ. Pada tanggal 25 November 2016 harga akumulasi energi tersimpan sebesar 6,38 MJ. Sedangkan, pada tanggal 17 Desember energi kumulatif tersimpan sebesar 6,93 MJ.

Kapasitas penyimpanan energi selama proses *charging*, pada tanggal 24 November 2016 adalah sebesar 6,70 MJ. Pada tanggal 25 November 2016 kapasitas penyimpan energi sebesar 7,65 MJ. Pada tanggal 17 Desember kapasitas penyimpanan energi sebesar 8,28 MJ. Selisih antara kapasitas energi tersimpan dan akumulasi energi disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Perbandingan kapasitas penyimpanan energi dan akumulasi energi tersimpan

Pengujian	Kapasitas penyimpanan energi (MJ)	Akumulasi energi tersimpan (MJ)	Selisih energi (MJ)
24/11/2016	6,70	6,42	0,28
25/11/2016	7,65	6,38	1,27
17/12/2016	8,28	6,93	1,35

Kecilnya selisih energi pada tanggal 24 November 2016 disebabkan karena kondisi temperatur udara luar rendah. Pada tanggal 25 November 2016 intensitas radiasi matahari tidak jauh berbeda dengan tanggal 24 November 2016. Pada tanggal 17 Desember 2016 selisih energi cukup besar dibandingkan dengan hari pertama dan kedua hal tersebut disebabkan karena radiasi matahari besar. Temperatur udara luar selisihnya tidak signifikan maka diduga sistem insulasi tangki TES cukup efektif.

4.3. Pengujian Proses *Discharging* Kontinyu

Discharging kontinyu adalah proses pengambilan energi termal di dalam tangki dengan cara mengalirkan air dingin secara kontinyu. Laju aliran massa air dingin yang dipakai adalah 2 LPM.

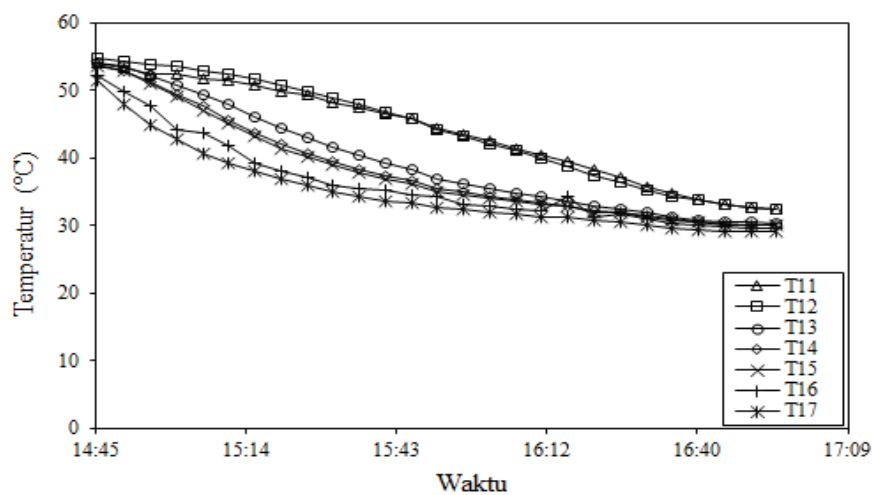
4.3.1. Distribusi temperatur HTF

Tangki TES dipasang beberapa termokopel yang digunakan untuk mengukur temperatur HTF yaitu, T11, T12, T13, T14, 15, T16 dan T17. Temperatur HTF selama pengujian disajikan pada Gambar 4.17, Gambar 4.18 dan Gambar 4.19.

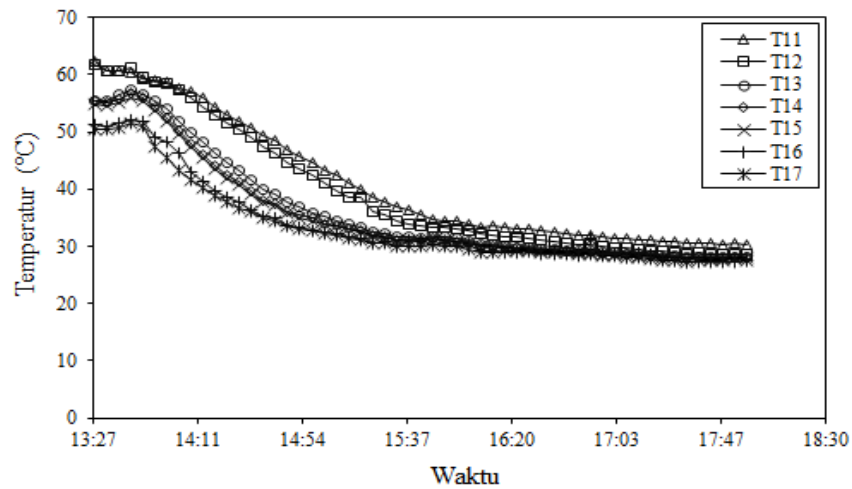
Waktu pengujian dan lamanya pengujian disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Waktu pengujian

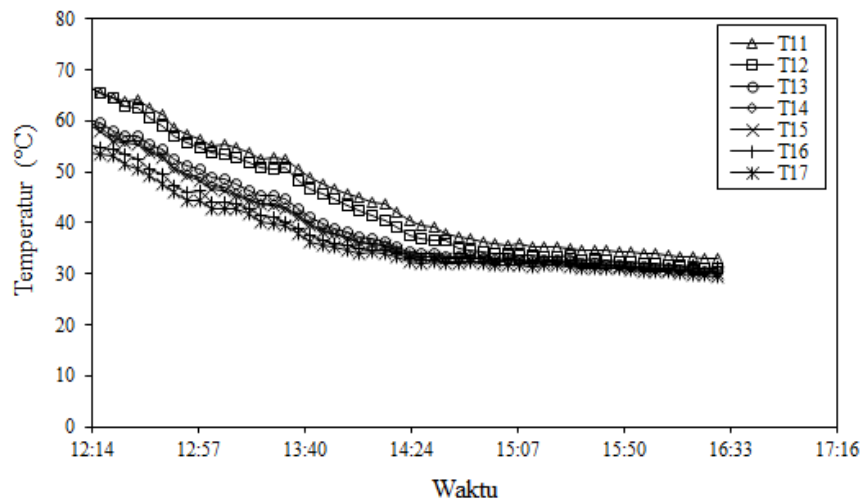
Tanggal	Awal <i>discharging</i>	Akhir <i>discharging</i>	Lama <i>discharging</i>
24/11/2016	Pukul 14:46 WIB	Pukul 16:56 WIB	135 menit
25/11/2016	Pukul 13:28 WIB	Pukul 18:00 WIB	280 menit
17/12/2016	Pukul 12:13 WIB	Pukul 16:30 WIB	270 menit



Gambar 4.17. Evolusi temperatur HTF *discharging* kontinyu tanggal 24/11/2016



Gambar 4.18. Evolusi temperatur HTF *discharging* kontinyu tanggal 25/11/2016



Gambar 4.19. Evolusi temperatur HTF *discharging* kontinyu tanggal 17/12/2016

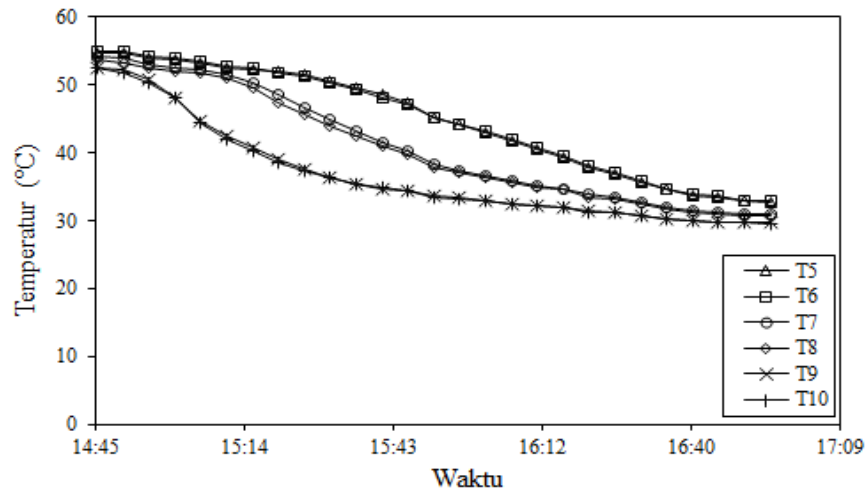
Pengujian proses *discharging* kontinyu dilakukan setelah proses *charging*. Ketiga Grafik tersebut menunjukkan bahwa penurunan temperatur HTF terjadi secara berlahan-lahan karena ada proses penambahan air dengan suhu normal. Hasil pengujian dari ketiga grafik temperatur HTF untuk tanggal 24 November 2016 memperlihatkan bahwa temperatur HTF awal rata-rata adalah 53 °C pada pukul 14:46. Pada tanggal 25 November 2016 temperatur HTF awal rata-rata sebesar 55

°C saat pukul 13:28. Temperatur awal HTF rata-rata pada tanggal 17 Desember 2016 sebesar 59 °C pada pukul 12:13. Tingginya temperatur HTF disebabkan oleh penyimpan kalor pada *paraffin* yang ada di dalam kapsul mengalami proses pelepasan kalor terhadap HTF. Pengujian *discharging* kontinyu ini grafik cenderung mengalami penurunan temperatur. Hal tersebut disebabkan karena ada proses penambahan air dingin yang masuk ke dalam tangki. Selain itu, temperatur PCM mengalami proses pendinginan. Pada tanggal 24 November 2016 menunjukkan temperatur akhir untuk T11 sampai dengan T17 masing-masing adalah 32 °C, 32 °C, 30 °C, 30 °C, 30 °C, 29 °C dan 29 °C saat pukul 16:56. Temperatur akhir pada tanggal 25 November 2016 untuk T11 sampai dengan T17 masing-masing adalah 30 °C, 28 °C, 28 °C, 27 °C, 27 °C, 27 °C dan 27 °C pada pukul 17:58. Pada tanggal 17 Desember 2016 temperatur akhir untuk T11 sampai dengan T17 masing-masing adalah 32 °C, 30 °C, 30 °C, 30 °C, 30 °C, 31 °C dan 29 °C saat pukul 16:28.

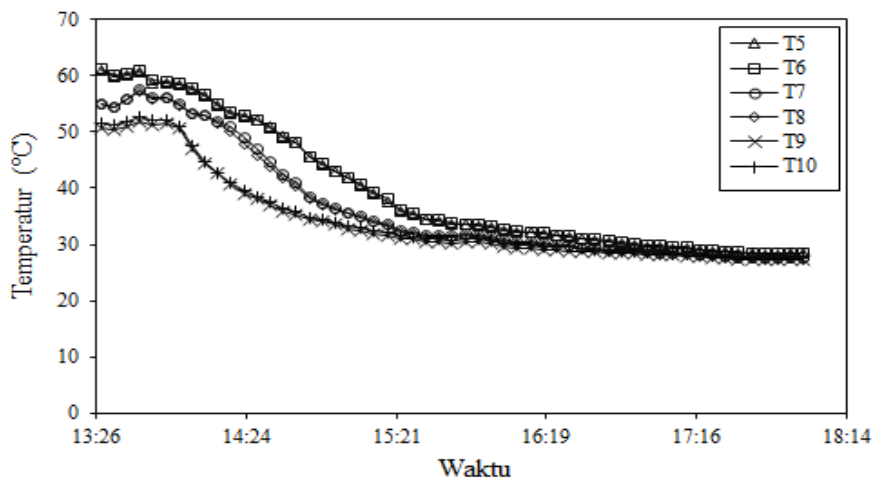
Selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) pada tanggal 24 November 2016, untuk T11 sampai dengan T17 masing-masing adalah sebesar (25 °C, 24 °C, 27 °C, 25 °C, 22 °C, 23 °C dan 22 °C). Pada tanggal 25 November 2016, selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) untuk T11 sampai dengan T17 masing-masing adalah (36 °C, 35 °C, 29 °C, 28 °C, 25 °C, 25 °C dan 26 °C). Pada tanggal 17 Desember 2016, selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) untuk T11 sampai dengan T17 masing-masing adalah (36 °C, 36 °C, 28 °C, 27 °C, 26 °C, 24 °C dan 22 °C). Dari uraian ketiga pengujian di atas, menampilkan bahwa saat awal pengujian *discharging* kontinyu penurunan temperaturnya cenderung drastis. Hal itu disebabkan adanya proses pelepasan energi yang besar dan kandungan energi di dalam tangki TES tinggi. Penurunan temperatur saat akhir cenderung landai karena kandungan energi di dalam tangki sudah berkurang. Selain itu, terdapat stratifikasi termal yang disebabkan karena setiap lapisan air memiliki kandungan energi yang berbeda.

4.3.2. Distribusi temperatur PCM

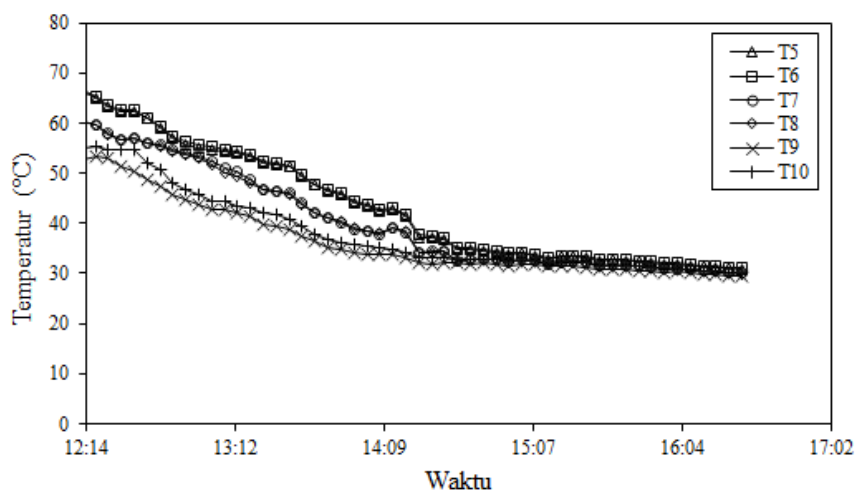
Tangki TES dipasang beberapa termokopel yang dipakai untuk mengukur temperatur PCM yaitu, T5, T6, T7, T8, T9 dan T10. Temperatur PCM selama pengujian ditampilkan pada Gambar 4.20, Gambar 4.21 dan Gambar 4.22.



Gambar 4.20. Evolusi temperatur PCM *discharging* kontinyu tanggal 24/11/2016



Gambar 4.21. Evolusi temperatur PCM *discharging* kontinyu tanggal 25/11/2016



Gambar 4.22. Evolusi temperatur PCM *discharging* kontinyu tanggal 17/12/2016

Mengamati ketiga Grafik di atas, bahwa temperatur PCM berdasarkan sifat termofisik *paraffin wax* RT52 secara umum pengujian *discharging* kontinyu ini telah terjadi proses pelelehan PCM. Namun begitu, proses pelelehan yang terjadi pada PCM tidak tampak secara jelas. Hal tersebut disebabkan adanya fluktuasi energi termal yang diterima PCM.

Pada tanggal 24 November 2016 menunjukkan temperatur PCM awal untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah 54 °C, 54 °C, 54 °C, 53 °C, 52 °C dan 52 °C saat pukul 14:46. Temperatur PCM awal pada tanggal 25 November 2016 untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing sebesar 60 °C, 61 °C, 54 °C, 54 °C, 50 °C dan 51 °C pada pukul 13:28. Temperatur PCM awal tanggal 17 Desember 2016 untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing sebesar 66 °C, 66 °C, 60 °C, 60, 52 °C dan 55 °C saat pukul 12:13. Temperatur akhir PCM pada pengujian hari pertama untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah 32 °C, 32 °C, 30 °C, 30 °C, 29 °C dan 29 °C saat pukul 16:56. Pada hari kedua temperatur akhir PCM untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah 28 °C, 28 °C, 27 °C, 27 °C, 27 °C dan 27 °C pada pukul 17:58. Hari ketiga temperatur akhir PCM untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah 30 °C, 30 °C, 29 °C, 29 °C, 29 °C dan 30 °C pada pukul 16:28.

Selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) pada tanggal 24 November 2016, untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah sebesar (22 °C, 21 °C, 23 °C, 20 °C, 22 °C dan 22 °C). Pada tanggal 25 November 2016, selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah (32 °C, 32 °C, 23 °C, 22 °C, 23 dan 23 °C). Pada tanggal 17 Desember 2016, selisih temperatur akhir dan awal (ΔT) untuk T5 sampai dengan T10 masing-masing adalah (38 °C, 38 °C, 30 °C, 28 °C, 24 °C dan 22 °C). Ketiga Grafik di atas, memperlihatkan bahwa saat awal proses pengujian *discharging* kontinyu penurunan temperatur PCM cenderung drastis. Hal itu disebabkan adanya aliran air dingin masuk ke tangki TES dan kandungan energi termal HTF juga menurun. Temperatur saat akhir pengujian cenderung landai karena kandungan energi di dalam tangki sudah berkurang.

4.3.3. Energi ekstraksi selama proses *discharging* kontinyu

Energi ekstraksi adalah energi yang dilepas oleh HTF akibat dialirkannya air dingin ke dalam tangki. Energi ini berasal dari HTF bertemperatur tinggi dan dari energi yang disimpan oleh PCM di dalam kapsul.

Harga energi ekstraksi sesaat selama proses *discharging* kontinyu pertamanya perlu diketahui terlebih dahulu ($T_{w,i}$) temperatur air awal dan ($T_{w,f}$) temperatur air akhir. Untuk menghitung energi ekstraksi maka digunakan persamaan 2.9. Contoh langkah perhitungan, menggunakan data pengujian tanggal 24 November 2016 saat pukul 14:51.

Massa air m_w	= 47,8392 kg
Temperatur air awal ($T_{w,i}$)	= 53,41 °C
Temperatur air akhir ($T_{w,f}$)	= 52,13 °C
Kalor jenis air ($C_{p,w}$)	= 4,182 (kJ/kg. °C)

Maka :

$$Q_{ex} = \frac{m_w c_{p,w} (T_{w,i} - T_{w,f})}{t}$$

$$Q_{ex} = \frac{47,8392 \text{ (kg)} \times c_{p,w} \text{ (kJ/kg. } ^\circ\text{C)} \times (53,41 \text{ } ^\circ\text{C} - 52,13 \text{ } ^\circ\text{C)}}{t}$$

Untuk mendapatkan nilai ekstraksi energi sesaat, terlebih dahulu harus mengetahui nilai ($c_{p,w}$) dengan menggunakan rumus (Cp) sebagai berikut.

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

Nilai T berdasarkan T rata-rata dari temperatur air awal dan temperatur air akhir didapatkan sebesar 52,774 °C.

$$Cp (T) = 4,2174356 - 0,0056181625(52,774) + 0,0012992528(52,774)^{1,5} - 0,00011535353 (52,774)^2 + 0,00000414964(52,774)^{2,5}$$

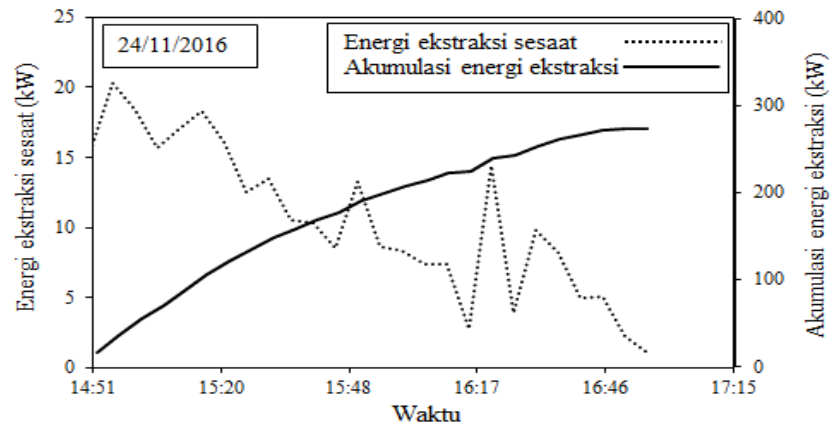
$$= 4,182 \text{ kJ/kg. } ^\circ\text{C}$$

$$Q_{ex} = \frac{m_w c_{p,w} (T_{w,i} - T_{w,f})}{t}$$

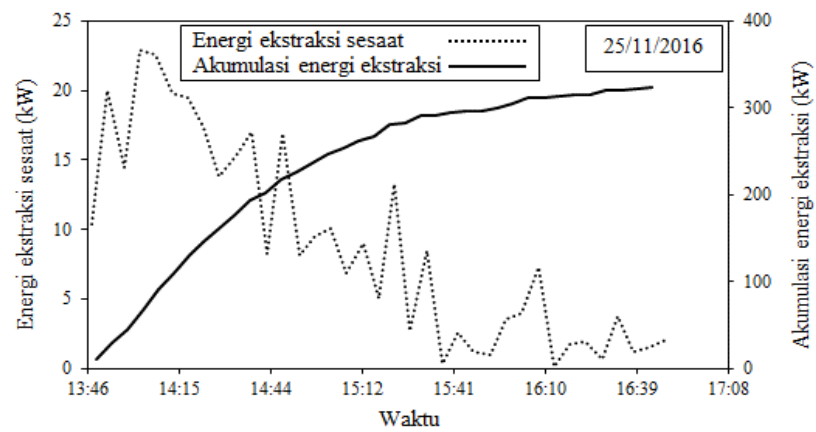
$$Q_{ex} = \frac{47,8392 \text{ kg} \times 4,182 \text{ kJ/kg. } ^\circ\text{C} \times (53,41 \text{ } ^\circ\text{C} - 52,13 \text{ } ^\circ\text{C})}{\left(\frac{60}{1000}\right)}$$

$$Q_{ex} = 15,455 \text{ kW}$$

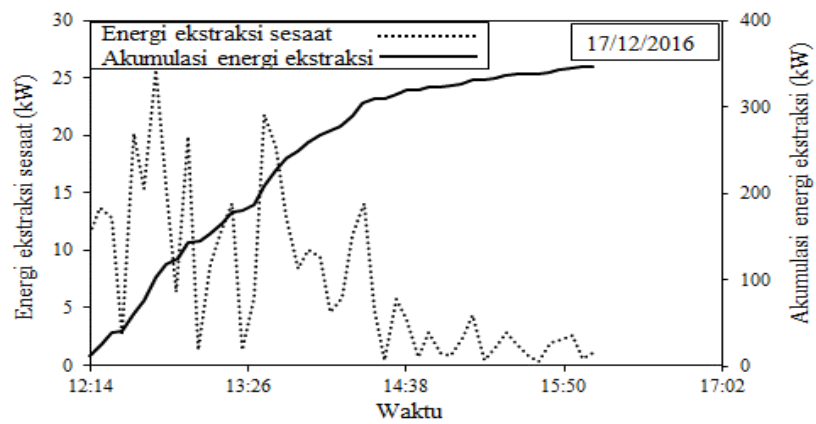
Energi ekstraksi kumulatif didapat berdasarkan dari hasil nilai energi ekstraksi sesaat, Kemudian dilakukan penjumlahan antara temperatur awal sampai dengan temperatur akhir dan didapatkan energi ekstraksi kumulatif adalah sebesar 273,884 kW. Hasil dari perhitungan nilai energi ekstraksi kumulatif di atas ditunjukkan pada Gambar 4.23 yaitu pukul 14:51. Hasil perhitungan selengkapnya disajikan pada Lampiran 15.



Gambar 4.23. Energi ekstraksi sesaat dan akumulasi energi ekstraksi *discharging* kontinyu tanggal 24/11/2016



Gambar 4.24. Energi ekstraksi sesaat dan akumulasi energi ekstraksi *discharging* kontinyu tanggal 25/11/2016



Gambar 4.25. Energi ekstraksi sesaat dan akumulasi energi ekstraksi *discharging* kontinyu tanggal 17/12/2016

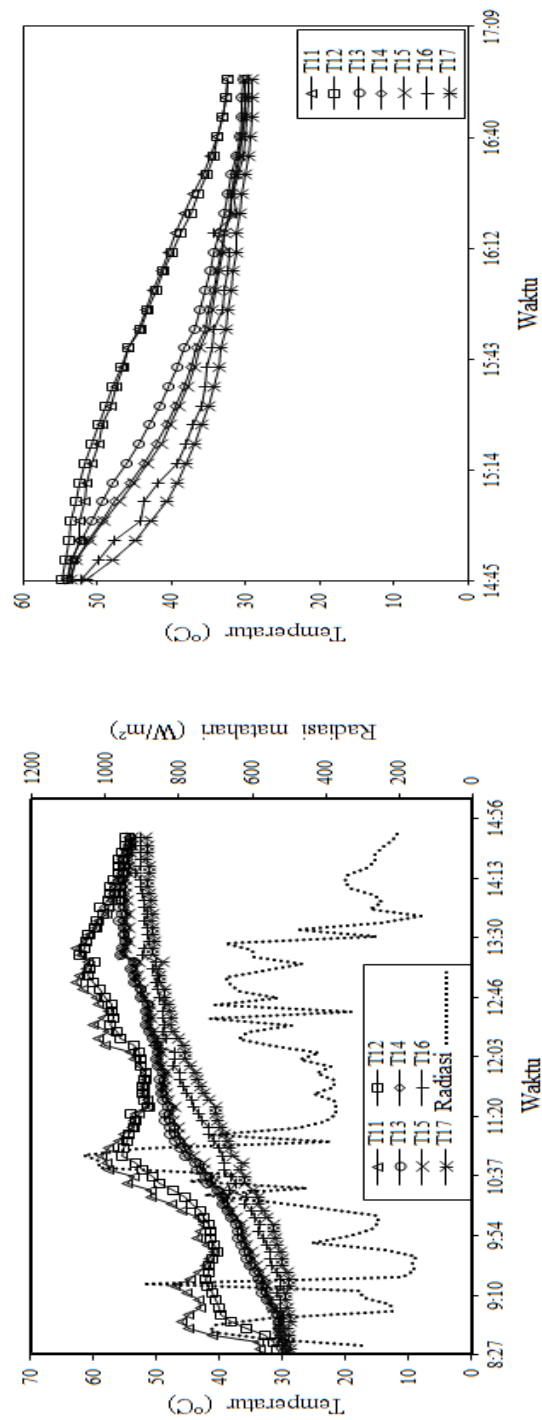
Menurut Grafik pengujian di atas, menunjukkan bahwa energi ekstraksi sesaat selama proses *discharging* kontinyu perlahan cenderung mengalami penurunan. Hal itu, disebabkan adanya proses pelepasan kalor pada HTF yang semakin lama kandungan energinya semakin habis. Selain itu, PCM juga memberikan pengaruh terhadap lama dan tidaknya proses penurunan energi ekstraksi tersebut.

Pada tanggal 24 November 2016 nilai awal energi ekstraksi sesaat adalah sebesar 15,455 kW saat pukul 14:51. Energi ekstraksi sesaat awal, pada tanggal 25 November 2016 sebesar 10,423 kW saat pukul 13:46. Energi ekstraksi sesaat awal, pada tanggal 17 Desember 2016 sebesar 11,418 kW pada pukul 12:14. Nilai akhir energi ekstraksi pada tanggal 24 November 2016 adalah sebesar 1,030 kW pada pukul 16:56. Pada tanggal 25 November 2016 energi ekstraksi sesaat akhir adalah 2,029 kW saat pukul 16:48. Pada tanggal 17 Desember 2016, energi ekstraksi sesaat akhir adalah 1,119 kW pada pukul 16:04.

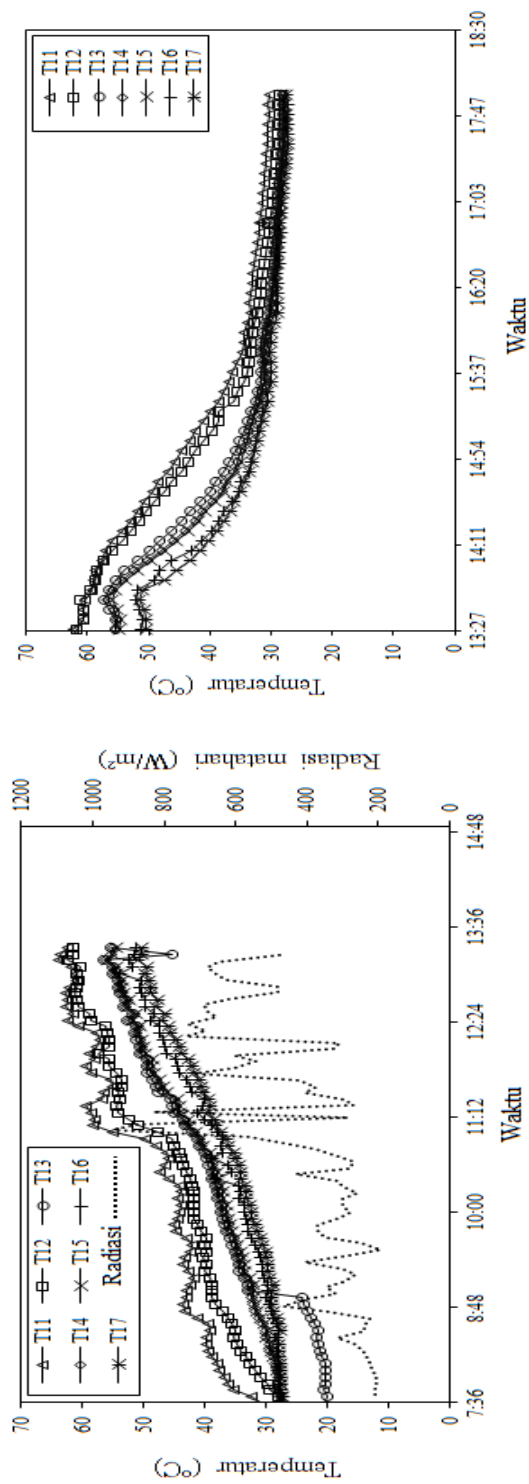
Dari uraian di atas, saat awal pengujian terlihat Grafik berfluktuasi yang disebabkan karena temperatur rata-rata air di dalam tangki yang setiap saat berubah akibat adanya transfer kalor dari PCM. Grafik semakin lama cenderung menurun diakibatkan oleh energi termal yang dikandung HTF semakin berkurang.

4.4. Perbandingan Pengujian *Charging* dan *Discharging* Kontinyu

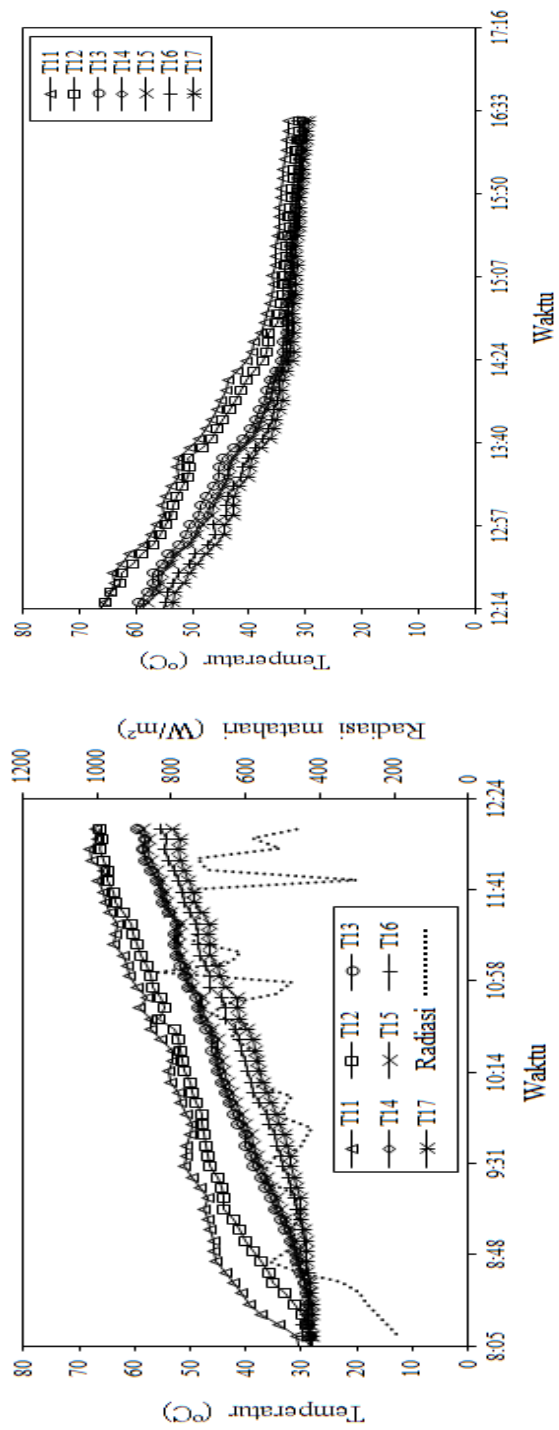
Proses *charging* dan *discharging* kontinyu ada beberapa perbedaan karakteristik termalnya yaitu, penurunan temperatur HTF dan PCM pada saat proses *discharging* kontinyu cenderung drastis, sedangkan pada proses *charging* semakin lama temperatur HTF dan PCM cenderung mengalami kenaikan. Perbandingan pengujian *charging* dan *discharging* kontinyu disajikan pada Gambar 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 dan 4.31.



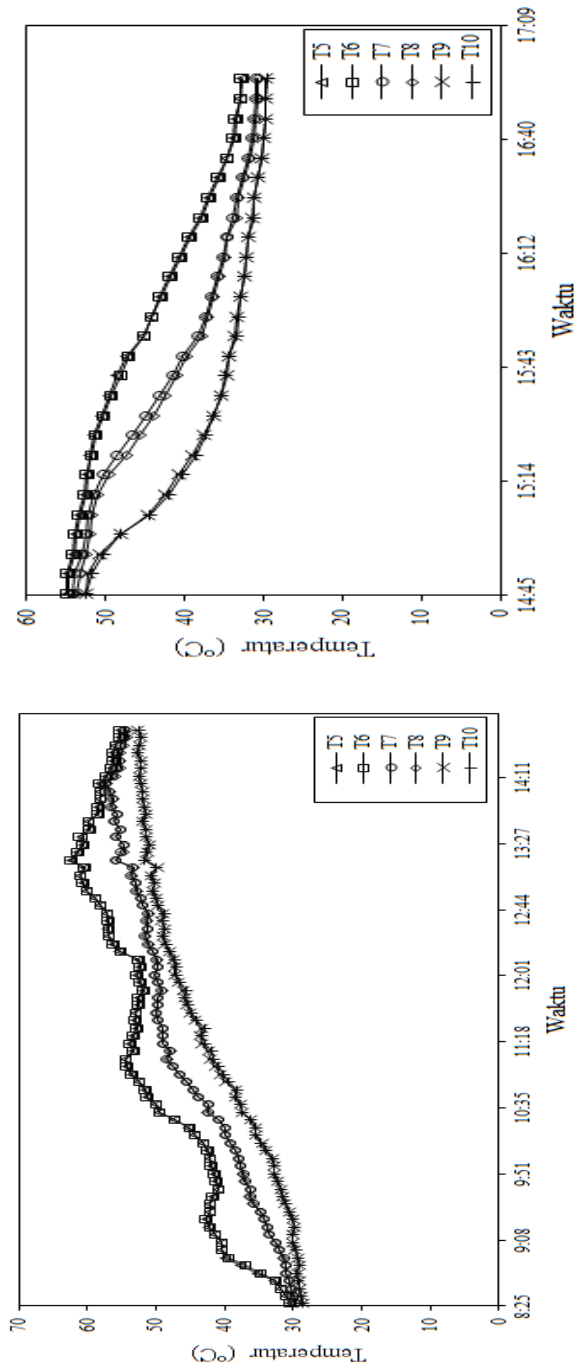
Gambar 4.26. Perbandingan evolusi temperatur HTF *charging* dan evolusi temperatur HTF *discharging* kontinyu tanggal 24/11/2016



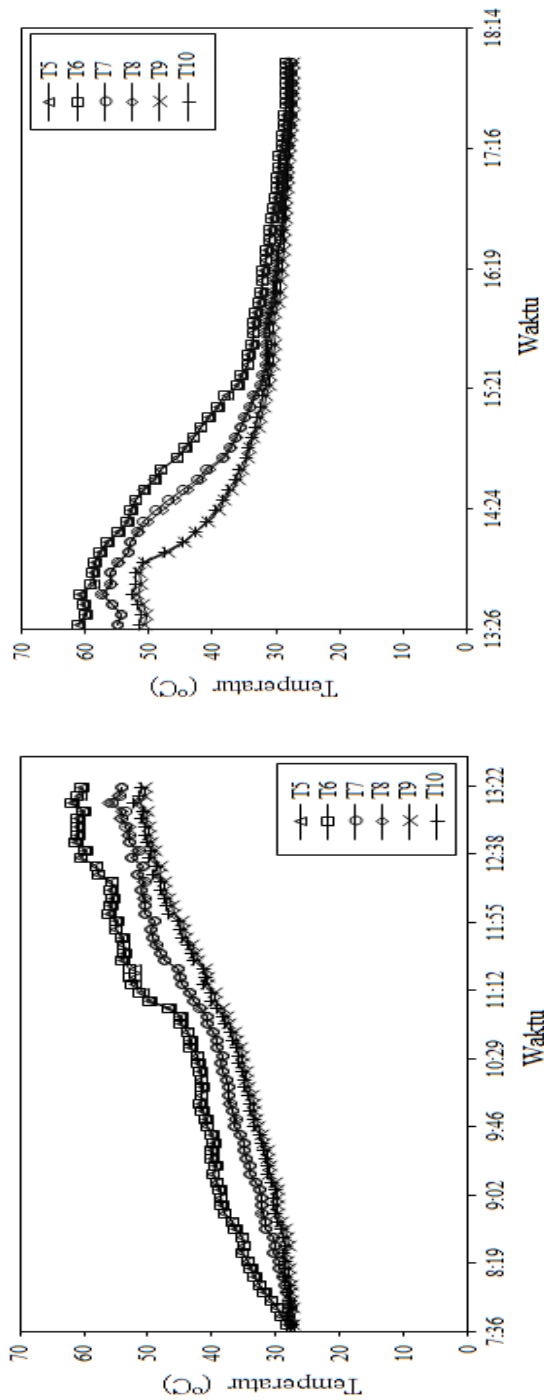
Gambar 4.27. Perbandingan evolusi temperatur HTF *charging* dan evolusi temperatur HTF *discharging* kontinyu tanggal 25/11/2016



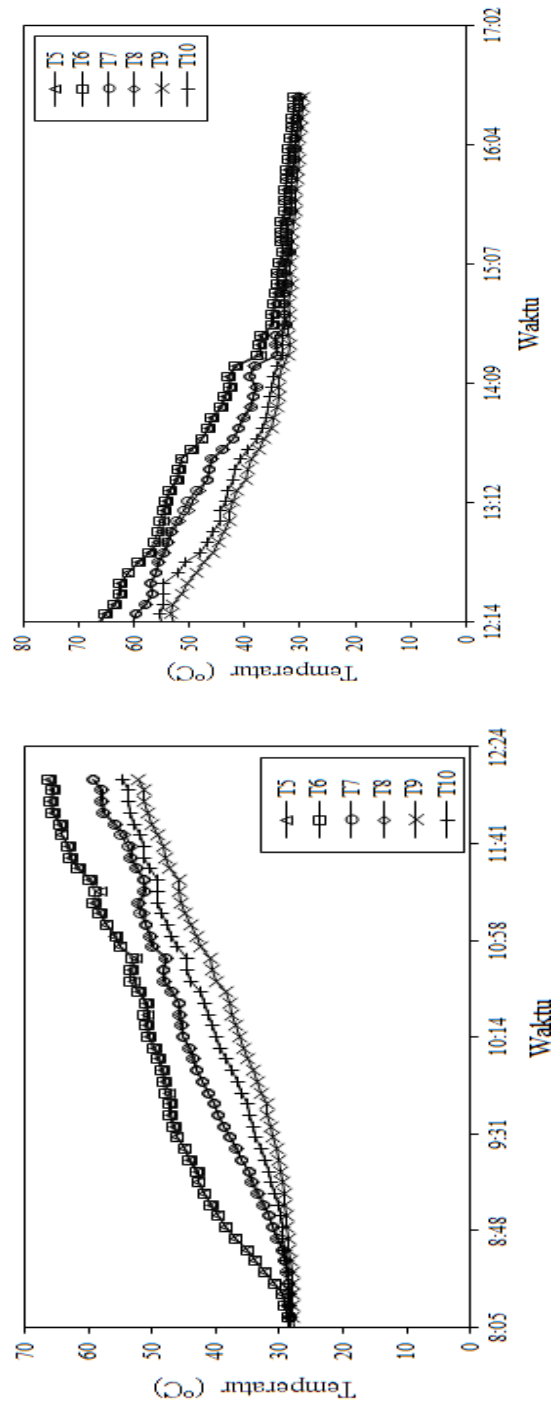
Gambar 4.28. Perbandingan evolusi temperatur HTF *charging* dan evolusi temperatur HTF *discharging* kontinu tanggal 17/12/2016



Gambar 4.29. Perbandingan evolusi temperatur PCM *charging* dan evolusi temperatur PCM *discharging* kontinu tanggal 24/11/2016



Gambar 4.30. Perbandingan evolusi temperatur PCM *charging* dan evolusi temperatur PCM *discharging* kontinu tanggal 25/11/2016



Gambar 4.31. Perbandingan evolusi temperatur PCM *charging* dan evolusi temperatur PCM *discharging* kontinu tanggal 17/12/2016