

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Uji *Solar Simulator*

Hasil uji *solar simulator* dengan 6 titik penempatan *pyranometer* dan 3 variasi ketinggian ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil uji *solar simulator*

Posisi	Intensitas radiasi (W/m ²)		
	Jarak 10 cm	Jarak 15 cm	Jarak 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
Rata-rata	1238,71	1058,19	784,35

Pada pengujian ini, *heat flux* 1000 W/m² didapatkan pada ketinggian 15 cm dengan tegangan sebesar 210 V. Hasil uji *solar simulator* dapat menjadi acuan untuk pengujian selanjutnya pada pengujian PATS-PCM metode *indoor*. Tabel 4.2. menunjukkan bukti bahwa uji PATS-*solar simulator* telah dilakukan dengan detail pengujian sebagai berikut.

Tabel 4.2. Detail pengujian PATS-*solar simulator*

Detail pengujian PATS- <i>solar simulator</i>	
<i>Heatflux</i>	1000 W/m ²
Debit	2 LPM
Lama waktu pengujian	98 menit

4.2. Kalibrasi Termokopel

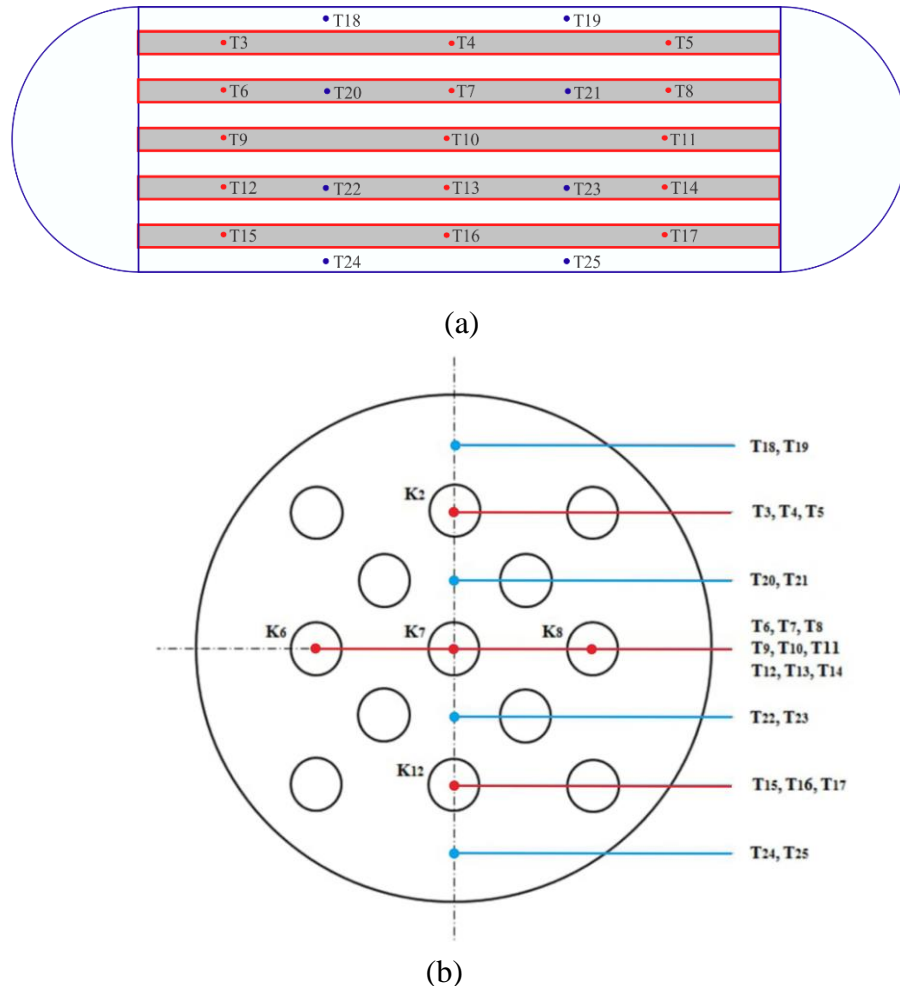
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan variasi *heat flux* 800, 1000, dan 1200 W/m² dan debit air 2 LPM. Kalibrasi bertujuan untuk mendapatkan harga riil dari temperatur yang dibaca oleh termokopel dengan hasil seperti pada Tabel 4.3. Tabel hasil kalibrasi menunjukkan hasil yang baik dengan nilai R² mendekati 1.

Tabel 4.3. Kalibrasi Termokopel

No.	Termokopel	Posisi	Persamaan regresi	R ²
1	T1	Masuk tangki	$T_{1,riil} = 0,9774 T1 + 0,1469$	0,9998
2	T2	Keluar tangki	$T_{2,riil} = 1,0144 T2 - 0,6655$	0,9998
3	T3	PCM	$T_{3,riil} = 0,9967 T3 + 0,0098$	0,9998
4	T4	PCM	$T_{4,riil} = 1,0251 T4 - 0,804$	0,9994
5	T5	PCM	$T_{5,riil} = 1,0143 T5 - 0,439$	0,9998
6	T6	PCM	$T_{6,riil} = 1,0132 T6 - 0,5569$	0,9998
7	T7	PCM	$T_{7,riil} = 1,0227 T7 - 0,7533$	0,9997
8	T8	PCM	$T_{8,riil} = 1,0107 T8 - 0,4224$	0,9998
9	T9	PCM	$T_{9,riil} = 1,0167 T9 - 0,3646$	0,9998
10	T10	PCM	$T_{10,riil} = 1,0122 T10 - 0,3933$	0,9998
11	T11	PCM	$T_{11,riil} = 1,0197 T11 - 0,7239$	0,9997
12	T12	PCM	$T_{12,riil} = 0,9768 T12 + 0,3779$	0,9998
13	T13	PCM	$T_{13,riil} = 0,8894 T13 + 7,2856$	0,9886
14	T14	PCM	$T_{14,riil} = 0,9961 T14 - 0,3531$	0,9998
15	T15	PCM	$T_{15,riil} = 1,0016 T15 - 0,5101$	0,9998
16	T16	PCM	$T_{16,riil} = 0,9778 T16 - 0,0113$	0,9998
17	T17	PCM	$T_{17,riil} = 0,9971 T17 - 0,4548$	0,9998
18	T18	HTF	$T_{18,riil} = 0,9773 T18 + 0,307$	0,9998
19	T19	HTF	$T_{19,riil} = 0,9957 T19 - 0,4572$	0,9998
20	T20	HTF	$T_{20,riil} = 0,9977 T20 - 0,5418$	0,9998
21	T21	HTF	$T_{21,riil} = 1,0297 T21 - 1,4005$	0,9998
22	T22	HTF	$T_{22,riil} = 1,0485 T22 - 1,9455$	0,9998
23	T23	HTF	$T_{23,riil} = 1,0256 T23 - 1,2854$	0,9998
24	T24	HTF	$T_{24,riil} = 0,9776 T24 + 0,3607$	0,9998
25	T25	HTF	$T_{25,riil} = 0,9982 T25 - 0,2378$	0,9998

Penelitian dilakukan dengan memasang termokopel pada HTF dan PCM. Letak dari ke-25 termokopel dipasang pada posisi yang berbeda-beda. T1 dan T2 masing-masing dipasang pada sisi masuk tangki TES dari kolektor dan sisi keluar tangki TES ke kolektor, sedangkan sisanya berada di dalam tangki TES. T3–T17

dipasang pada PCM dan T18-T25 dipasang pada HTF. Posisi termokopel di dalam tangki TES dapat dilihat pada Gambar 4.1.



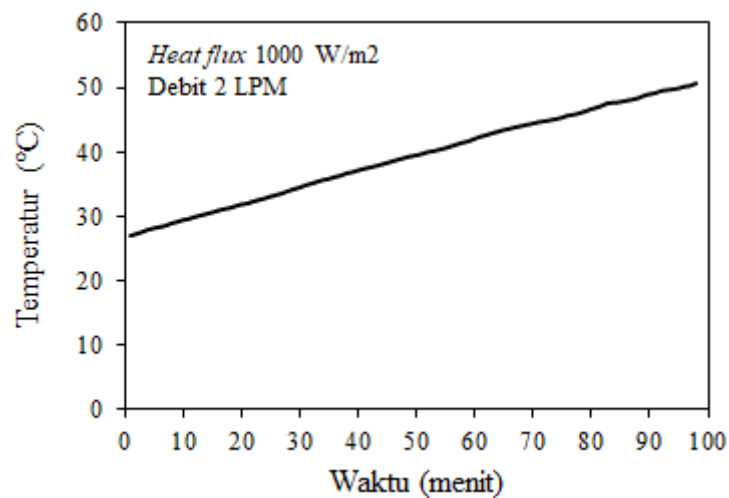
Gambar 4.1. Sketsa letak termokopel di dalam tangki TES dari (a) tampak depan (b) tampak samping

4.3. Evolusi temperatur rata-rata HTF

Eksperimen dengan metode *charging* dilakukan pada tanggal 26 Juli, 28 Juli, dan 4 Agustus 2019 untuk mendapatkan variasi *heat flux* dari parameter yang berbeda. Variasi *heat flux* yang dipancarkan *solar simulator* secara urut dari pengambilan data pertama adalah 1000 W/m^2 , 1200 W/m^2 , dan 800 W/m^2 .

Pada proses *charging*, energi termal secara radiasi dari *solar simulator* dipancarkan dan ditransmisikan oleh kaca kolektor. Kemudian energi termal ditransfer ke plat absorber secara konveksi dan radiasi. Setelah itu, energi termal diteruskan secara konduksi dan konveksi ke pipa riser. Selanjutnya energi termal

di-*transfer* secara konveksi ke dalam tangki TES melalui HTF yang terus bersirkulasi di dalam sistem PATS. Di dalam tangki TES, sebagian energi termal di-*transfer* ke PCM. Perekaman terhadap evolusi temperatur HTF di dalam tangki TES dilakukan pada 8 termokopel, yaitu T18, T19, T20, T21, T22, T23, T24 dan T25 yang ditampilkan pada Gambar 4.2. Durasi waktu proses *charging* adalah 98 menit untuk variasi *heat flux* 1000 W/m^2 dan debit 2 LPM.

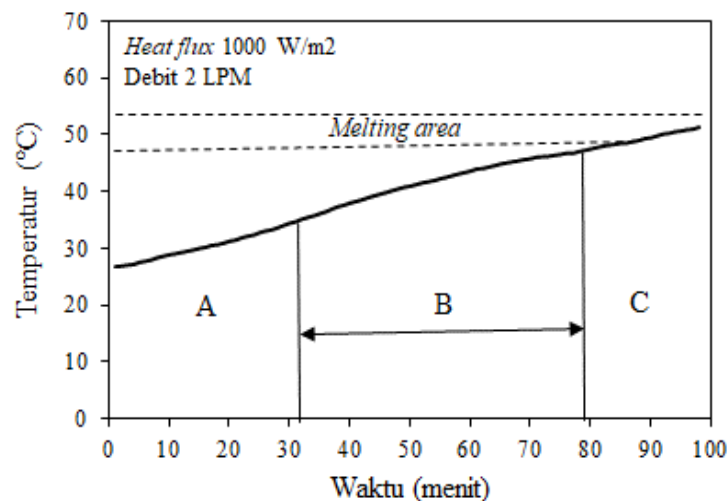


Gambar 4.2. Evolusi temperatur rata-rata HTF selama proses *charging*

Berdasarkan Gambar 4.2., temperatur rata-rata HTF tertinggi yang dapat dicapai pada tanggal 26 Juli 2019 sebesar $50,69 \text{ }^\circ\text{C}$ sedangkan temperatur rata-rata HTF terendah $26,88 \text{ }^\circ\text{C}$ pada variasi *heat flux* 1000 W/m^2 dan debit 2 LPM. Seiring dengan bertambahnya waktu *charging*, evolusi temperatur rata-rata HTF semakin meningkat. Hal ini disebabkan adanya suplai energi ke dalam tangki. Semakin lama waktu *charging* maka temperatur *inlet* semakin tinggi karena adanya transfer kalor ke HTF.

4.4. Evolusi temperatur rata-rata PCM

Penelitian ini menggunakan 13 buah kapsul, 5 buah kapsul diantaranya dipasang termokopel. Jumlah termokopel yang dipasang pada tiap kapsul adalah 3 buah. Pemasangan termokopel seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.3. Evolusi temperatur rata-rata PCM selama proses *charging*

Evolusi temperatur rata-rata PCM selama proses *charging* menunjukkan bahwa rata-rata temperatur PCM terendah adalah 26,82 °C dan tertinggi 51,64 °C. Selama waktu *charging* 98 menit grafik *solar simulator* menunjukkan kinerja secara konstan. Semakin lama waktu penyinaran *solar simulator* terhadap kolektor maka semakin tinggi penyimpanan energi yang di serap oleh PCM. Selama proses *charging*, PCM mengalami perubahan fase dari *solid-liquid*. Perubahan fase inilah yang membuktikan bahwa *paraffin wax* RT 52 mampu bekerja dengan baik sebagai PCM.

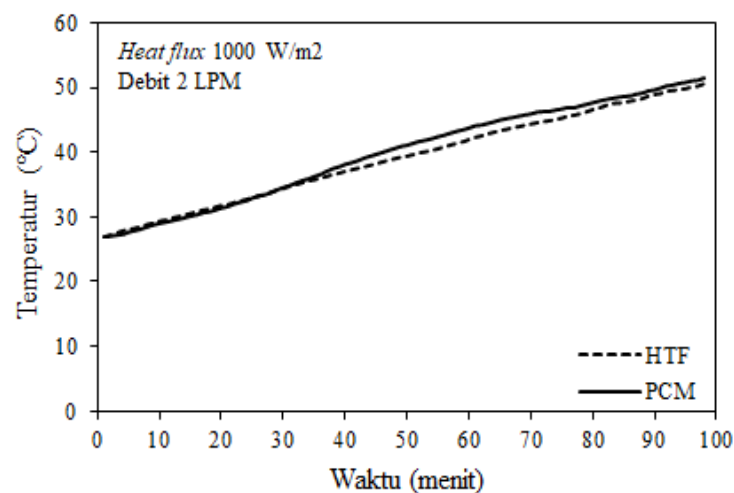
Menurut Gambar 4.3., dapat dijelaskan bahwa pada area B transfer kalor yang terjadi meningkat sehingga *slope* kurva lebih besar daripada *area* A. Transfer kalor naik akibat dari meningkatnya beda temperatur antara HTF dan PCM. Transfer kalor diawali dari HTF yang berada di luar kapsul, kemudian diteruskan ke PCM melewati dinding kapsul sehingga akan menaikkan temperaturnya dari kondisi awal sampai temperatur tertentu. Saat awal proses *charging*, kalor sensibel ditransfer dari dinding pipa dalam ke PCM padat secara konduksi dimana temperatur PCM naik dengan cepat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.3.

Transfer kalor sensibel di awal proses adalah besar karena adanya perbedaan temperatur yang tinggi antara dinding kapsul dengan PCM padat. Walaupun konduktivitas termal PCM rendah, transfer kalor terjadi dengan cepat akibat tingginya gradien temperatur. Ketika kalor sensibel diterima PCM, mulailah

terbentuk lapisan tipis cairan di daerah antara dinding pipa dalam dan PCM padat. Semakin besar transfer kalor yang terjadi maka semakin banyak fraksi cairan yang terbentuk dan transfer kalor secara konveksi alamiah mulai terjadi. Setelah transfer kalor meningkat pesat, PCM mulai memasuki fase pelelehan dengan tetap terjadi kenaikan temperatur walaupun rendah.

4.5. Perbandingan evolusi temperatur HTF dan PCM

Temperatur rata-rata HTF dan PCM akhir yang dicapai pada pengambilan data tanggal 26 Juli 2019 dengan variasi 1000 W/m^2 masing-masing adalah $50,69 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $51,64 \text{ }^\circ\text{C}$. Gambar 4.4. menunjukkan bahwa temperatur rata-rata HTF dan PCM berjalan seiring dengan bertambahnya waktu.



Gambar 4.4. Evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM selama proses *charging*

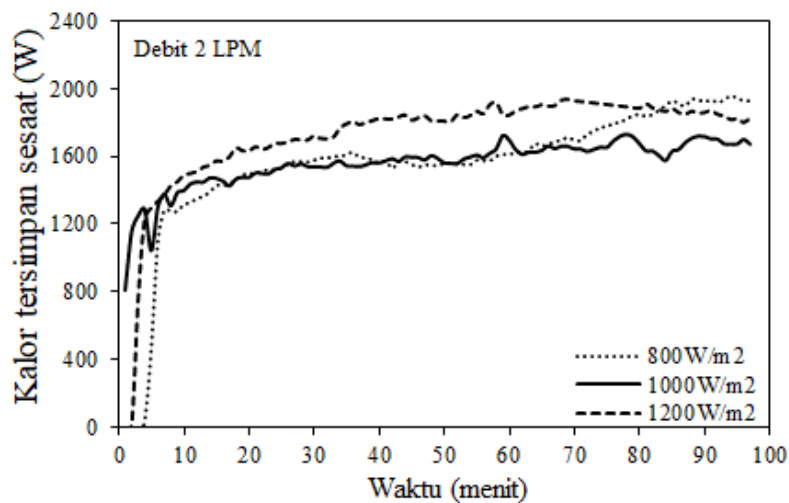
Semakin lama waktu *charging* maka temperatur HTF dan PCM semakin meningkat. Hal ini terjadi karena akumulasi energi termal dari *solar simulator* meningkat secara stabil hingga akhir proses *charging*. Gambar 4.4. menunjukkan perubahan temperatur HTF dan PCM seiring dengan waktu pada proses *charging* selama 98 menit dan debit air 2 LPM. Temperatur HTF lebih awal bersinggungan dengan temperatur *inlet* sehingga pada awal *charging* temperatur HTF lebih *leading*. Pada menit ke-40 temperatur PCM naik yang ditandai dengan meningkatnya kecepatan pemanasan rata-rata. Hal ini terjadi bahwa pada menit ke-40 suplai energi dari kolektor meningkat, dikarenakan energi termal yang disimpan

pada kolektor besar. Semakin lama akumulasi energi termal yang diterima kolektor maka semakin tinggi temperatur *inlet* yang dihasilkan. Temperatur *inlet* yang besar menyebabkan transfer kalor yang diterima PCM besar akibatnya terjadi beda temperatur HTF dan PCM yang tinggi, sehingga transfer kalor meningkat yang menghasilkan temperatur HTF dan PCM meningkat. Berhimpitnya kedua kurva HTF dan PCM membuktikan bahwa proses transfer kalor antara temperatur HTF dari kolektor ke temperatur HTF di tangki dan dari temperatur HTF tangki ke PCM terjadi keseimbangan. Hal ini menunjukkan bahwa alat penukar kalor yang berupa susunan kapsul telah berfungsi dengan baik.

4.6. Penyimpanan kalor sesaat

Penyimpanan kalor sesaat (*instantaneous heat stored*) diestimasi berdasarkan temperatur air masuk dan temperatur air keluar sesaat pada tangki TES. Penyimpanan kalor ini menggambarkan kondisi energi yang tersimpan oleh HTF di dalam tangki TES setiap waktu selama proses *charging*. Energi tersimpan sesaat merupakan kalor yang tersimpan sesaat di dalam tangki sebelum bersikulasi menuju kolektor.

Gambar 4.5. menunjukkan bahwa penyimpanan kalor sesaat dipengaruhi oleh *heat flux* dari *solar simulator*. Variasi *heat flux* dari *solar simulator* yang semakin tinggi maka akumulasi energi termal pada kolektor semakin tinggi. Hal ini mengakibatkan terjadinya beda temperatur antara temperatur *inlet* dan *outlet* yang semakin lama menyebabkan kenaikan perbedaan temperatur, sehingga penyimpanan kalor sesaat semakin tinggi. Selama waktu *charging*, ketiga variasi *heat flux* dari *solar simulator* menunjukkan bahwa semakin tinggi *heat flux* maka semakin besar energi kalor tersimpan sesaat pada tangki TES.



Gambar 4.5. Kalor tersimpan sesaat selama proses *charging*

Berdasarkan Gambar 4.5. penyimpanan kalor sesaat mempunyai kecenderungan meningkat secara drastis di awal *charging* kemudian kenaikannya melambat seiring dengan waktu. Saat awal *charging*, temperatur air panas dari kolektor naik secara perlahan sehingga perolehan kalor air di dalam tangki masih rendah. Seiring dengan bertambahnya radiasi kumulatif yang mengenai kolektor maka temperatur air keluar kolektor meningkat. Hal ini berkontribusi terhadap penambahan perbedaan temperatur antara temperatur *inlet* dan temperatur HTF di dalam tangki TES. Meningkatnya perbedaan temperatur inilah yang menyebabkan perolehan kalor sesaat air di dalam tangki TES meningkat sehingga efisiensi pengumpulan kumulatifnya bertambah besar. Perbedaan temperatur yang tinggi tersebut disebabkan transfer kalor dari temperatur *inlet* ke HTF di dalam tangki TES. Walaupun temperatur air panas dari kolektor naik namun temperatur air di dalam tangki semakin lama semakin meningkat sehingga terjadi penurunan perbedaan temperatur yang menyebabkan kenaikan penyimpanan kalor sesaat berkurang.

Diketahui bahwa pada awal *charging* untuk ketiga variasi *heat flux*, massa air (m_w), luas permukaan kolektor yang digunakan (A_c), temperatur air masuk ($T_{w,in}$), temperatur air keluar ($T_{w,out}$). Sebelum mencari harga energi tersimpan sesaat (Q_{st}), perlu diketahui terlebih dahulu harga $C_{p,c}$ dan $C_{p,w}$ dengan persamaan 2.6. seperti pada rumus berikut ini.

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

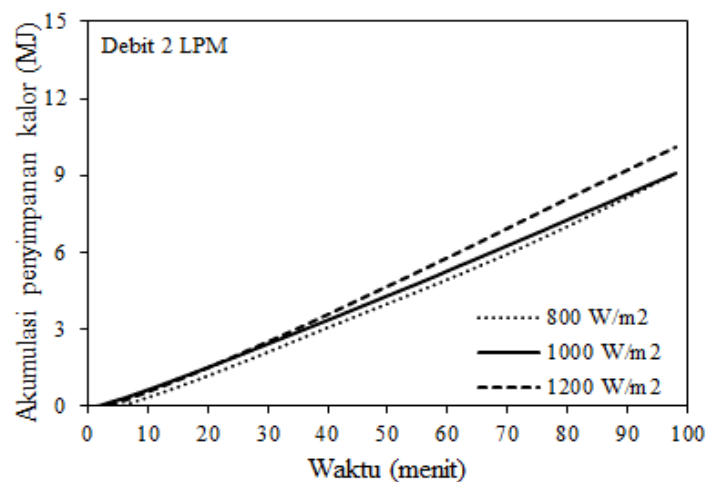
Persamaan digunakan kembali dengan mengganti harga $T_{w,in}$ dan $T_{w,out}$ masing- masing dengan $T_{w,1}$ dan $T_{w,2}$ sehingga harga $C_{p,w}$ diketahui. Kemudian, untuk mengetahui penyimpanan kalor sesaat (Q) digunakan seperti pada persamaan 2.4.

$$Q(t) = \dot{m}c_{p,w}(T_{w,in}(t) - T_{w,out}(t))$$

Laju aliran massa air panas (\dot{m}) dalam kg/dt dan kalor jenis air panas ($c_{p,w}$) dalam (kJ/kg.°C).

4.7. Akumulasi penyimpanan kalor

Energi tersimpan kumulatif (*cumulative heat stored*) diperoleh dari perkalian antara kalor tersimpan sesaat di dalam tangki dengan waktu dan dijumlahkan secara kumulatif. Energi tersimpan kumulatif selama penelitian ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Akumulasi penyimpanan kalor selama proses *charging*

Gambar 4.6. memberikan informasi bahwa akumulasi penyimpanan kalor pada variasi *heat flux* 800 W/m² adalah 9,0938 MJ, akumulasi penyimpanan kalor pada variasi *heat flux* 1000 W/m² adalah 9,0835 MJ, dan akumulasi penyimpanan kalor pada variasi *heat flux* 1200 W/m² sebesar 10,0722 MJ selama waktu *charging* 98 menit. Semakin tinggi *heat flux* yang dipancarkan *solar simulator* maka semakin

banyak kalor yang diserap oleh kolektor, sehingga beda temperatur antara temperatur *inlet* dan HTF semakin besar. Seiring dengan bertambahnya radiasi kumulatif yang mengenai kolektor maka temperatur air keluar kolektor meningkat. Hal ini berkontribusi terhadap penambahan perbedaan temperatur antara temperatur *inlet* dan HTF di dalam tangki TES. Meningkatnya perbedaan temperatur inilah yang menyebabkan perolehan kalor sesaat air di dalam tangki meningkat sehingga pengumpulan kumulatifnya bertambah besar. Oleh karena itu *heat flux* memberikan kontribusi yang signifikan terhadap akumulasi penyimpanan kalor pada tangki.