



**PERFORMA PEMANAS AIR KOLEKTOR TABUNG  
DENGAN PENAMBAHAN SELUBUNG TRANSPARAN**

**SKRIPSI**

Oleh

**Bella Nurfadhilah**

**NIM 151910101071**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS JEMBER**

**2019**



**PERFORMA PEMANAS AIR KOLEKTOR TABUNG  
DENGAN PENAMBAHAN SELUBUNG TRANSPARAN**

**SKRIPSI**

Diajukan guna melengkapi skripsi dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1) dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

**Bella Nurfadhilah**

**NIM 151910101071**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS JEMBER**

**2019**

## PERSEMBAHAN

Dengan segala puji syukur kehadiran Allah SWT maka skripsi ini penulis persembahkan kepada:

1. Allah SWT. yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik;
2. Ayahanda Agus Yustiawan dan Ibunda Chasanah yang telah memberikan dukungan baik berupa materil dan non materil;
3. Guru-guru sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat;
4. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah memberikan sarana dan prasarana untuk menuntut ilmu.

**MOTTO**

“Jika kamu tidak sanggup menahan lelahnya belajar,  
Maka kamu harus sanggup menahan perihnya kebodohan.”

(Imam Syafi’i)

"Kesuksesan adalah 99 % dari kerja keras dan 1 % bakat."

(Thomas Alva Edison)

“If you can dream it, you can do it”

(Walt Disney)

## PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Bella Nurfadhilah

NIM : 151910101071

Menyatakan dengan sesungguhnya laporan skripsi dengan judul “Optimasi Performa Pemanas Air Kolektor Tabung dengan Penambahan Selubung Transparan” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang telah disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada instansi manapun. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanggung jawab tanpa ada unsur pemaksaan serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 02 Januari 2019

Yang Menyatakan,

Bella Nurfadhilah

151910101071

**SKRIPSI**

**PERFORMA PEMANAS AIR KOLEKTOR TABUNG  
DENGAN PENAMBAHAN SELUBUNG TRANSPARAN**

Oleh:

**Bella Nurfadhilah**

**NIM 151910101071**

Pembimbing:

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Nasrul Ilminnafik S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph. D.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “*Performa Pemanas Air Kolektor Tabung dengan Penambahan Selubung Transparan*” telah diuji dan disahkan pada:

Hari, Tanggal : Kamis, 10 Januari 2019

Tempat : Ruang Ujian II Fakultas Teknik Universitas Jember

Pembimbing,

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T.,M.T.  
NIP 19711114 199903 1 002

Mahros Darsin, S.T.,M.Sc., Ph. D.  
NIP 19700322 199501 1 001

Penguji,

Penguji I,

Penguji II,

Hary Sutjahjono, S.T.,M.T  
NIP 19681205 199702 1 002

Ir. FX. Kristianta, M.Eng.  
NIP 19650120 200112 1 001

Mengesahkan,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M. UM.  
NIP 19661215 199503 2 001



## RINGKASAN

**Performa Pemanas Air Kolektor Tabung dengan Penambahan Selubung Transparan;** Bella Nurfadhilah, 151910101071; 2019; 47 Halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Pemanfaatan energi terbarukan adalah salah satu jalan keluar untuk menangani masalah krisis energi yang sedang terjadi. Salah satu pemanfaatan energi terbarukan yang paling banyak digunakan adalah pemanfaatan energi surya untuk penghasil energi surya atau sebagai pemanas air. Energi matahari mempunyai sifat intermitten dan dipengaruhi oleh cuaca, waktu dan posisi lintang. Penyimpanan energi termal (*Thermal Energy Storage, TES*) atau penggunaan material perubahan fasa dan *Compound Parabolic Concentrator (CPC)* dianggap sangat cocok diaplikasikan untuk mengatasi masalah ini. Penggunaan kolektor adalah cara untuk memanfaatkan energi matahari sebagai pemanas air.

Kolektor tabung dianggap mempunyai keunggulan dalam kehilangan panas dibanding kolektor plat datar. Hal ini diduga karena *glass tube* dapat menghambat hilangnya panas dalam kolektor lebih baik dibanding dengan kolektor plat datar. Penelitian ini membandingkan kolektor tabung tanpa *glass tube* dan dengan *glass tube* bertujuan untuk mengetahui faktor *glass tube* pada temperatur air *outlet* dan efisiensi kolektor. Dengan proses *charging* dan *discharging* masing-masing selama 240 menit. Pengambilan data dengan interval 20 menit dan radiasi rata-rata 700 – 800 W/m<sup>2</sup>. Penelitian ini dilakukan dengan dua laju aliran massa yang berbeda yaitu 0,01 kg/s dan 0,04 kg/s.

Hasil dari penelitian ini adalah kolektor tanpa *glass tube* dapat menghasilkan temperatur *outlet* pada proses *charging* lebih besar dibanding kolektor dengan *glass tube*. Temperatur *outlet* kolektor tanpa *glass tube* dan dengan *glass tube* dengan laju aliran massa 0,01 kg/s masing-masing 52,8 °C dan 50,9 °C. Sedangkan dengan laju aliran massa 0,04 kg/s masing-masing 57,3 °C dan 54,7 °C. Namun, pada proses *discharging* kolektor dengan *glass tube* dapat menghasilkan



tempatur *outlet* lebih besar. Temperatur *outlet* saat *discharging* kolektor tanpa *glass tube* dan dengan *glass tube* dengan laju aliran massa 0,01 kg/s masing-masing 38,8 °C dan 42,2 °C. Sedangkan dengan laju aliran massa 0,04 kg/s masing-masing 41,7 °C dan 43,2 °C.

Hasil tersebut sebanding dengan efisiensi kolektor. Kolektor tanpa *glass tube* menghasilkan efisiensi kolektor saat *charging* lebih besar dibanding kolektor dengan *glass tube*. Efisiensi kolektor tanpa *glass tube* dan dengan *glass tube* dengan laju aliran massa 0,01 kg/s masing-masing 2,02 % dan 1,82 %. Sedangkan dengan laju aliran massa 0,04 kg/s masing-masing 12,96 % dan 8,64 %. Namun, saat radiasi sinar menurun kolektor dengan *glass tube* dapat mempertahankan efisiensi lebih baik dibanding dengan kolektor tanpa *glass tube*. Saat *discharging*, kolektor dengan *glass tube* menghasilkan efisiensi lebih besar dibanding kolektor tanpa *glass tube*. Efisiensi kolektor tanpa *glass tube* dan dengan *glass tube* dengan laju aliran massa 0,01 kg/s masing-masing 12,32 % dan 13,96 %. Sedangkan dengan laju aliran massa 0,04 kg/s masing-masing 38,07 % dan 42,30 %.

Kejadian tersebut membuktikan bahwa pada proses *charging* kolektor dengan *glass tube* menghasilkan tahanan termal lebih besar yang dapat menghambat panas untuk diserap oleh kolektor namun dapat menghambat panas keluar dari kolektor. Efisiensi dari kolektor juga dipengaruhi oleh radiasi sinar dan laju aliran massa. Semakin besar radiasi dan laju aliran massa maka akan menghasilkan efisiensi yang lebih besar. Efisiensi kolektor saat *discharging* lebih besar dibanding saat *charging*. Hal ini kemungkinan disebabkan karena pada proses *charging*, radiasi sinar tidak langsung diserap oleh air melainkan diserap terlebih dahulu oleh material perubahan fasa.

## SUMMARY

***Tube Collector Water Heater Performance with Addition of Glass Tube***; Bella Nurfadhilah, 151910101071; 2019; 47 pages; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

*The use of renewable energy is one way out to deal with the problem of the current energy crisis. One of the most widely used renewable energy uses is the use of solar energy for solar energy producers or as water heaters. Solar energy has intermittent properties and is influenced by weather, time and latitude position. Thermal energy storage (TES) or the use of phase change materials and Compound Parabolic Concentrator (CPC) are considered very suitable to be applied to overcome this problem. The use of collectors is a way to utilize solar energy as a water heater.*

*The tube collector is considered to have an advantage in heat loss compared to a flat plate collector. This is presumably because the glass tube can inhibit heat loss in the collector better than the flat plate collector. This study compared tube collectors without glass tubes and with glass tubes aimed to determine the glass tube factor at outlet water temperature and collector efficiency. With the charging and discharging process for 240 minutes each. Retrieving data at intervals of 20 minutes and radiation averaging 700 - 800 W/m<sup>2</sup>. This study was conducted with two different mass flow rates of 0.01 kg/s and 0.04 kg/s.*

*The results of this study are collectors without glass tubes can produce outlet temperature on the charging process is greater than the glass tube collector. Collector outlet temperature without glass tube and glass tube with mass flow rate of 0.01 kg/s are 52.8 °C and 50.9 °C, respectively. Whereas with a mass flow rate of 0.04 kg/s respectively 57.3 °C and 54.7 °C. However, in the process of discharging the collector with a glass tube can produce a larger outlet space. The outlet temperature when discharging the collector without glass tube and with a*

*glass tube with a mass flow rate of 0.01 kg/s were 38.8 °C and 42.2 °C respectively. Whereas with a mass flow rate of 0.04 kg/s each 41.7 °C and 43.2 °C.*

*The result is proportional to the efficiency of the collector. Glass tube collectors produce collector efficiency when charging is greater than glass tube collectors. The efficiency of glass tube collectors and glass tubes with a mass flow rate of 0.01 kg/s is 2.02 % and 1.82 %, respectively. Whereas the mass flow rate of 0.04 kg/s is 12.96 % and 8.64 %, respectively. However, when the radiation of the downhill beam collector with glass tube can maintain efficiency better than the collector without glass tube. When discharging, a glass tube collector produces greater efficiency than a glass tube collector. The efficiency of glass tube collectors and glass tubes with a mass flow rate of 0.01 kg/s were 12.32 % and 13.96 %, respectively. Whereas with a mass flow rate of 0.04 kg/s respectively 38.07 % and 42.30 %.*

*That case proves that the charging process with a glass tube collector produces greater thermal resistance which can inhibit heat from being absorbed by the collector but can inhibit heat from coming out of the collector. The efficiency of the collector is also influenced by light radiation and mass flow rates. The greater the radiation and mass flow rate, the greater the efficiency. Collector efficiency when discharging is greater than when charging. This is probably due to the charging process, the light radiation is not directly absorbed by water but is absorbed first by phase change material.*

## PRAKATA

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “*Optimasi Performa Pemanas Air Kolektor Tabung dengan Penambahan Selubung Transparan*”. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Dalam proses penelitian dan penyusunan skripsi ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Ibu Entin Hidayah M, UM., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Bapak Hari Arbiantara, S.T, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember;
3. Bapak Hary Sutjahjono, S.T, M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember;
4. Bapak Dr. Nasrul Ilminnafik S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama;
5. Bapak Mahros Darsin, S.T., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Anggota;
6. Ibu Hery Indria Dwi P, S.Si., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik;
7. Ayah, Ibu, kakak dan keluarga yang telah memberikan dukungan;
8. Civitas akademika Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember Teknik Mesin angkatan 2015 yang telah memberikan semangat;
9. Danny Febriansyah yang telah menemani dan membantu segala aspek;
10. Veni D Sulastri, Khamdan Khavivi, M. Farobi Tsani, dan M. Arief Wibowo yang telah menjadi kelompok yang sangat profesional.

Jember, 02 Januari 2019

Penulis

**DAFTAR ISI**

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>PERSEMBAHAN.....</b>	<b>ii</b>
<b>MOTTO .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN.....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PEMBIMBINGAN.....</b>	<b>v</b>
<b>PENGESAHAN .....</b>	<b>vi</b>
<b>RINGKASAN .....</b>	<b>vii</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>ix</b>
<b>PRAKATA .....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR SIMBOL .....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Tujuan dan Manfaat .....</b>	<b>3</b>
1.3.1 Tujuan .....	3
1.3.2 Manfaat .....	3
<b>1.4 Batasan Masalah .....</b>	<b>3</b>
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Pemanas Air Energi Surya.....</b>	<b>5</b>
2.1.1 Sirkulasi Alami ( <i>Thermosyphon</i> ).....	6
2.1.2 Sirkulasi Paksa.....	7
<b>2.2 Perpindahan Kalor .....</b>	<b>7</b>
2.2.1 Konduksi.....	8
2.2.2 Konveksi .....	8

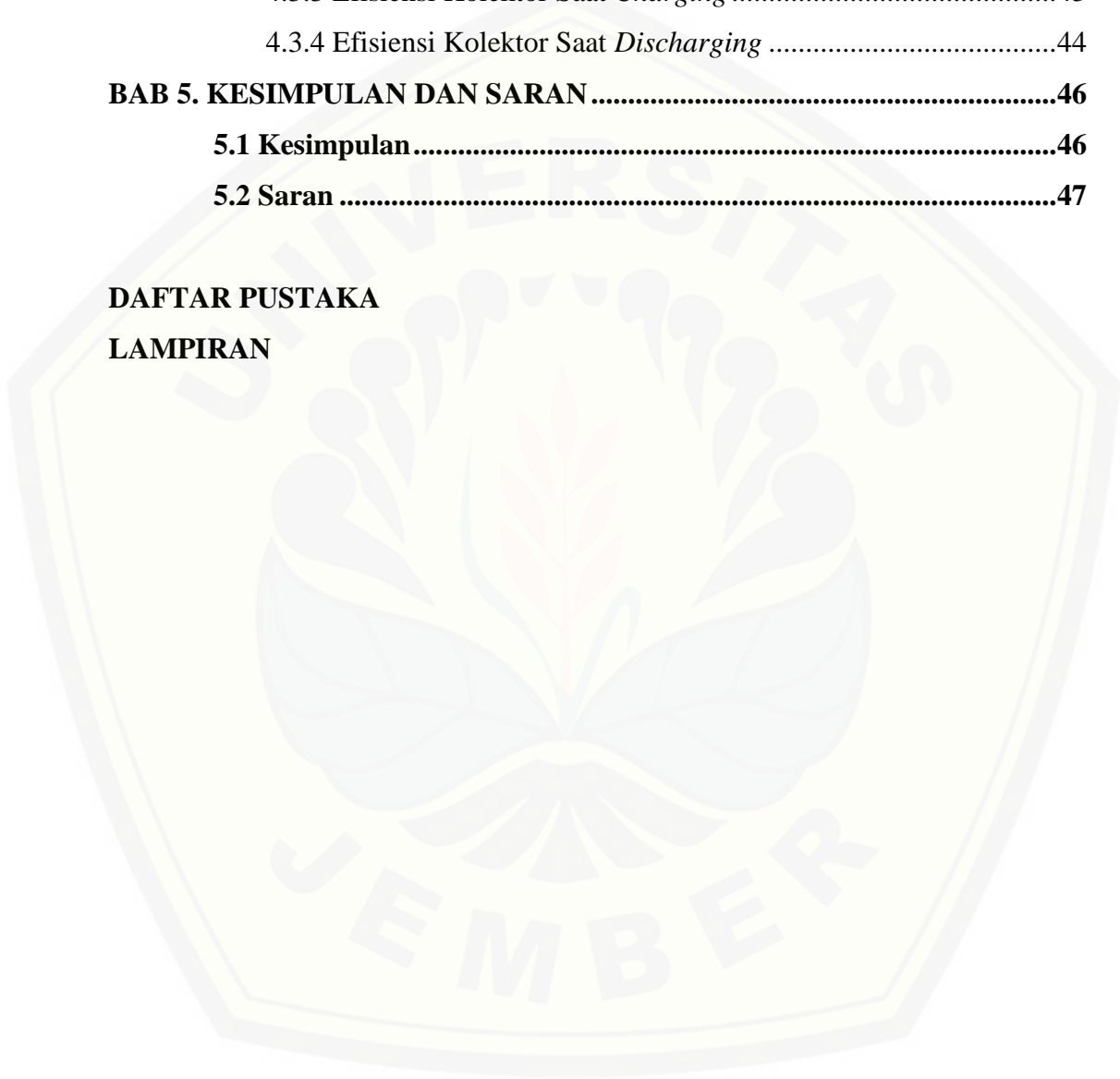


2.2.3 Radiasi .....	9
<b>2.3 Kolektor Surya .....</b>	<b>10</b>
2.3.1 Kolektor Surya Pelat Datar .....	11
2.3.2 Kolektor Surya Tabung.....	11
<b>2.4 Compound Parabolic Concentrator (CPC) .....</b>	<b>14</b>
<b>2.5 Material Perubahan Fasa (Phase Change Material, PCM).....</b>	<b>15</b>
2.5.1 Pemilihan Material Perubahan Fasa .....	16
2.5.2 Penyimpanan Panas pada Material Perubahan Fasa .....	19
<b>2.6 Glass Tube .....</b>	<b>19</b>
<b>2.7 Efisiensi Kolektor Pemanas Air.....</b>	<b>20</b>
<b>2.8 Hipotesis.....</b>	<b>21</b>
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Metode Penelitian.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Waktu dan Tempat .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Alat dan Bahan.....</b>	<b>22</b>
<b>3.4 Variabel Penelitian.....</b>	<b>25</b>
3.4.1 Variabel Bebas .....	25
3.4.2 Variabel Terikat .....	25
3.4.3 Variabel Kontrol .....	25
<b>3.5 Pengambilan Data yang Dilakukan.....</b>	<b>26</b>
<b>3.6 Tahap Penelitian .....</b>	<b>29</b>
3.6.1 Tahap Persiapan .....	29
3.6.2 Tahap Penelitian .....	30
<b>3.7 Desain Alat.....</b>	<b>31</b>
<b>3.8 Diagram Alir Penelitian .....</b>	<b>33</b>
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 Data Hasil Penelitian .....</b>	<b>34</b>
4.1.1 Temperatur Saat <i>Charging</i> .....	34
4.1.2 Temperatur Saat <i>Discharging</i> .....	36
<b>4.2 Pengolahan Data .....</b>	<b>38</b>
4.2.1 Efisiensi Kolektor Saat <i>Charging</i> .....	38

4.2.2 Efisiensi Kolektor Saat <i>Discharging</i> .....	39
<b>4.3 Analisa Data .....</b>	<b>41</b>
4.3.1 Temperatur <i>Outlet</i> Saat <i>Charging</i> .....	41
4.3.2 Temperatur <i>Outlet</i> Saat <i>Discharging</i> .....	42
4.3.3 Efisiensi Kolektor Saat <i>Charging</i> .....	43
4.3.4 Efisiensi Kolektor Saat <i>Discharging</i> .....	44
<b>BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>46</b>
<b>5.1 Kesimpulan.....</b>	<b>46</b>
<b>5.2 Saran .....</b>	<b>47</b>

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**





**DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 Daya antar (konduktivitas) bahan .....	8
Tabel 2.2 Karakteristik material PCM .....	16
Tabel 2.3 Karakteristik parafin .....	17
Tabel 2.4 Karakteristik minyak goreng.....	18
Tabel 3.1 Jadwal kegiatan .....	22
Tabel 3.2 Spesifikasi bahan.....	24
Tabel 3.3 Data temperatur pada proses <i>charging</i> (tanpa <i>glass tube</i> ) .....	27
Tabel 3.4 Data temperatur pada proses <i>charging</i> (dengan <i>glass tube</i> ) .....	27
Tabel 3.5 Data temperatur pada proses <i>discharging</i> (tanpa <i>glass tube</i> ) .....	28
Tabel 3.6 Data temperatur pada proses <i>discharging</i> (dengan <i>glass tube</i> ).....	28
Tabel 3.7 Data radiasi .....	30
Tabel 4.1 Perbandingan temperatur air proses <i>charging</i> (0,01 kg/s) .....	34
Tabel 4.2 Perbandingan temperatur air proses <i>charging</i> (0,04 kg/s) .....	35
Tabel 4.3 Perbandingan temperatur air proses <i>discharging</i> (0,01 kg/s) .....	35
Tabel 4.4 Perbandingan temperatur air proses <i>discharging</i> (0,04 kg/s) .....	36
Tabel 4.9 Efisiensi kolektor saat <i>charging</i> (0,01 kg/s) .....	37
Tabel 4.10 Efisiensi kolektor saat <i>charging</i> (0,04 kg/s) .....	38
Tabel 4.11 Efisiensi kolektor saat <i>discharging</i> (0,01 kg/s).....	39
Tabel 4.12 Efisiensi kolektor saat <i>discharging</i> (0,04 kg/s).....	39

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rumah sakit menggunakan kolektor surya (Jansen, 1995).....	5
Gambar 2.2 Sirkulasi alami (Jansen, 1995) .....	6
Gambar 2.3 Sirkulasi paksa (Dwivedi, 2009).....	7
Gambar 2.4 Radiasi sorotan dan sebaran (Jansen, 1995).....	10
Gambar 2.5 Kolektor pelat datar (Kristanto dan San, 2001).....	11
Gambar 2.6 Kolektor tabung (Mishra, 2017).....	12
Gambar 2.7 Energi yang berguna pada musim panas (Tahmineh dkk, 2017) .....	13
Gambar 2.8 Energi yang berguna pada musim dingin (Tahmineh dkk, 2017) .....	13
Gambar 2.9 Kolektor tabung dengan reflektor (Mishra dkk, 2017) .....	14
Gambar 2.10 Energi panas dengan Dan tanpa reflektor (Mishra dkk, 2017) .....	15
Gambar 2.11 Temperatur <i>outlet</i> a) proses <i>charging</i> b) proses <i>discharging</i> (Vanhas, 2017).....	17
Gambar 2.12 Kolektor tabung dengan <i>glass cover</i> (Liangdong dkk, 2010) .....	20
Gambar 3.1 Desain alat pemanas air.....	23
Gambar 3.2 Data temperatur yang diambil .....	25
Gambar 3.3 Diagram tahanan termal kolektor tabung.....	26
Gambar 3.4 Desain kolektor tabung a) tanpa b) dengan <i>glass tube</i> .....	31
Gambar 3.5 Penampang kolektor tabung a) tanpa b) dengan <i>glass tube</i> .....	31
Gambar 3.6 Dimensi kolektor tabung.....	32
Gambar 3.7 Diagram alir penelitian.....	33
Gambar 4.1 Temperatur air <i>outlet</i> saat <i>charging</i> (0,01 kg/s).....	40
Gambar 4.2 Temperatur air <i>outlet</i> saat <i>charging</i> (0,04 kg/s).....	40
Gambar 4.3 Temperatur air <i>outlet</i> saat <i>disharging</i> (0,01 kg/s).....	41
Gambar 4.4 Temperatur air <i>outlet</i> saat <i>disharging</i> (0,04 kg/s).....	42
Gambar 4.5 Efisiensi Kolektor <i>Charging</i> (0,01 kg/s).....	43
Gambar 4.6 Efisiensi Kolektor <i>Charging</i> (0,04 kg/s).....	43
Gambar 4.7 Efisiensi Kolektor <i>Discharging</i> (0,01 kg/s) .....	44
Gambar 4.8 Efisiensi Kolektor <i>Discharging</i> (0,04 kg/s) .....	45

**DAFTAR SIMBOL**

$A$	: Luas ( $m^2$ )
$c$	: Panas jenis air ( $J/kg.^{\circ}C$ )
$c_{abs}$	: Panas jenis tembaga ( $J/kg.^{\circ}C$ )
$c_{pcm}$	: Panas jenis material perubahan fasa ( $J/kg.^{\circ}C$ )
$I$	: Intensitas radiasi ( $W/m^2$ )
$\dot{m}$	: Laju aliran massa ( $kg/s$ )
$m$	: Massa ( $kg$ )
$Q_{air}$	: Kalor yang diserap air (Watt)
$Q_{pcm}$	: Kalor yang dikeluarkan material perubahan fasa (Watt)
$T_A$	: Temperatur air keluar kolektor A ( $^{\circ}C$ )
$T_{absA}$	: Temperatur absorber kolektor A ( $^{\circ}C$ )
$T_{absA0}$	: Temperatur absorber kolektor A menit ke 0 ( $^{\circ}C$ )
$T_{absA20}$	: Temperatur absorber kolektor A menit ke 20 ( $^{\circ}C$ )
$T_{absB}$	: Temperatur absorber kolektor B ( $^{\circ}C$ )
$T_B$	: Temperatur air keluar kolektor B ( $^{\circ}C$ )
$T_{gtA}$	: Temperatur <i>glass tube</i> atas kolektor A ( $^{\circ}C$ )
$T_{gtB}$	: Temperatur <i>glass tube</i> atas kolektor B ( $^{\circ}C$ )
$T_{pcmA}$	: Temperatur material perubahan fasa kolektor A ( $^{\circ}C$ )
$T_{pcmB}$	: Temperatur material perubahan fasa kolektor B ( $^{\circ}C$ )
$T_{pcmA0}$	: Temperatur material perubahan fasa kolektor A menit ke 0 ( $^{\circ}C$ )
$T_{pcmA20}$	: Temperatur material perubahan fasa kolektor A menit ke 20 ( $^{\circ}C$ )
$T_{gtbA}$	: Temperatur <i>glass tube</i> bawah kolektor A ( $^{\circ}C$ )
$T_{gtbB}$	: Temperatur <i>glass tube</i> bawah kolektor B ( $^{\circ}C$ )

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan energi terbarukan adalah salah satu jalan keluar untuk menangani masalah krisis energi yang sedang terjadi. Energi terbarukan sebagai penyedia energi yang ditujukan untuk mengurangi biaya awal dan dampak lingkungan yang diakibatkan oleh penggunaan bahan bakar fosil (Sharma dkk., 2009). Energi surya merupakan bentuk energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan guna mengurangi ketergantungan akan energi fosil yang semakin menipis. Indonesia adalah salah satu negara yang dapat memanfaatkan energi surya dengan baik, karena Indonesia berada di daerah equator yang mendapatkan sinar matahari sepanjang tahun dengan fluks rata-rata pada siang hari di musim kemarau mencapai harga di atas  $1000 \text{ W/m}^2$  dengan lama penyinaran rata-rata 12 jam/hari (Darwin, 2013). Salah satu pemanfaatan energi terbarukan yang paling banyak digunakan adalah pemanfaatan energi surya untuk penghasil energi surya atau sebagai pemanas air (Buddhi, 1997). Pemanas air domestik merupakan aplikasi yang sangat baik jika dapat digandengkan dengan penggunaan energi surya (Putra dkk., 2015).

Penyimpanan energi termal (*Thermal Energy Storage, TES*) sangat cocok digunakan untuk mengatasi masalah energi matahari yang mempunyai sifat intermitten dan dipengaruhi oleh cuaca, waktu dan posisi lintang (Sharma dkk., 2009). Penyimpanan energi termal dapat diklasifikasikan menjadi 3 macam, yaitu penyimpan energi dalam bentuk panas sensibel, panas laten dan termo-kimia. Penyimpanan panas dalam bentuk laten memberikan kapasitas penyimpanan energi per unit volume dan per unit massa jauh lebih besar dibandingkan bentuk panas sensibel (Dincer, 1999). Penyimpanan energi dalam bentuk panas laten merupakan yang paling menarik, yaitu menggunakan material perubahan fasa (*phase change material, PCM*) (Dailami dkk., 2012). Keuntungan material perubahan fasa adalah mampu menyimpan kalor dalam kapasitas besar dengan volume material kecil dan

proses penyerapan dan pengeluaran energi panas terjadi pada temperatur yang hampir konstan (Buddhi, 1997).

Masalah lain dari penggunaan energi matahari adalah ketersediaan energi matahari dan kebutuhan atas energi panas. *Compound Parabolic Concentrator* (CPC) atau biasa disebut reflektor dianggap dapat memecahkan masalah ini. Reflektor dapat memfokuskan radiasi matahari ke pipa asorber yang dapat menghasilkan temperatur PCM lebih seragam (Piotr dan Robert, 2017). Reflektor juga sangat berguna dalam pemanasan awal proses untuk industri bersuhu sangat tinggi (Mishra dkk., 2017).

Pengembangan teknologi penyimpanan energi panas dan termal matahari adalah integrasi PCM langsung di kolektor plat datar (*flat plate collectors, FPC*) (Chen dkk., 2010). Penggunaan kolektor plat datar adalah salah satu cara untuk memanfaatkan energi matahari dengan cara menangkap energi yang berupa gelombang elektromagnetik itu dengan kolektor plat datar yang kemudian diteruskan ke pipa-pipa yang berisi air. Beberapa peneliti lain mengatakan bahwa kolektor tabung (*evacuated tubular collector, ETC*) mempunyai keunggulan dalam kehilangan panas dibanding kolektor plat datar (Mishra dkk., 2015). Tahmineh (2017) menyarankan untuk menggunakan kolektor tabung dalam iklim dingin karena hasil kinerja sistem lebih besar 41 % dan pemanfaatan energi lebih besar 30% dibanding kolektor plat datar. Selain itu kolektor tabung dapat mencapai efisiensi pengisian berkisar 33 – 66 % tergantung pada intensitas radiasi matahari (Piotr dan Robert, 2017). Kolektor tabung terdiri atas pipa absorber, pipa air, selubung transparan (*glass tube*), dan reflektor. Yong dan Taebeom (2006) berpendapat kolektor tabung mempunyai efek gabungan lapisan permukaan yang selektif dan insulasi vakum dari elemen penyerap sehingga dapat memiliki ekstraksi panas yang tinggi efisiensi dibandingkan dengan kolektor pelat datar pada suhu berkisar di atas 80 °C. Hal ini diduga karena adanya *glass tube* yang dapat menghambat hilangnya panas dalam kolektor lebih baik dibanding dengan kolektor plat datar.

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat disimpulkan bahwa masih diperlukan penelitian lanjutan guna mengetahui faktor *glass tube* pada efisiensi



kerja kolektor tabung. Penelitian tersebut diarahkan pada faktor *glass tube* dan perancangan alat kolektor tabung. Penelitian ini akan membandingkan antara kolektor tabung menggunakan *glass tube* dan tanpa *glass tube*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

- a. Bagaimana pengaruh *glass tube* terhadap temperatur *outlet* pemanas air?
- b. Bagaimana pengaruh *glass tube* terhadap efisiensi pemanas air?

## 1.3 Tujuan dan Manfaat

### 1.3.1 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui pengaruh *glass tube* terhadap temperatur *outlet* pemanas air;
- b. Mengetahui pengaruh *glass tube* terhadap efisiensi pemanas air.

### 1.3.2 Manfaat

Adapun manfaat yang didapat pada penelitian ini adalah:

- a. Memberikan pengetahuan mengenai pemanas air tenaga surya dengan menggunakan kolektor tabung. Dapat dijadikan referensi untuk peningkatan sifat termal kolektor tabung;
- b. Memberikan informasi unjuk kerja kolektor yang dilengkapi *glass tube*;
- c. Memberikan suatu pengembangan alat pemanas air tenaga surya yang dapat dimanfaatkan dalam skala rumah tangga.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

- a. Sifat – sifat bahan tidak mengalami perubahan;
- b. Kondisi lingkungan pengambilan data dianggap ideal;
- c. Volume fluida pada reservoir dalam setiap percobaan dianggap konstan;
- d. Laju aliran massa pada seluruh bagian kolektor dianggap seragam;
- e. Heat loss tidak dihitung;

- f. Kondisi sistem dianggap tidak memiliki kebocoran;
- g. Bahan logam pengisi las dianggap sama dengan logam yang dilas;
- h. Perpindahan panas dianggap dalam kondisi *steady*;
- i. Sumber panas sinar matahari diganti dengan sinar lampu;
- j. Radiasi sinar lampu dianggap seragam.

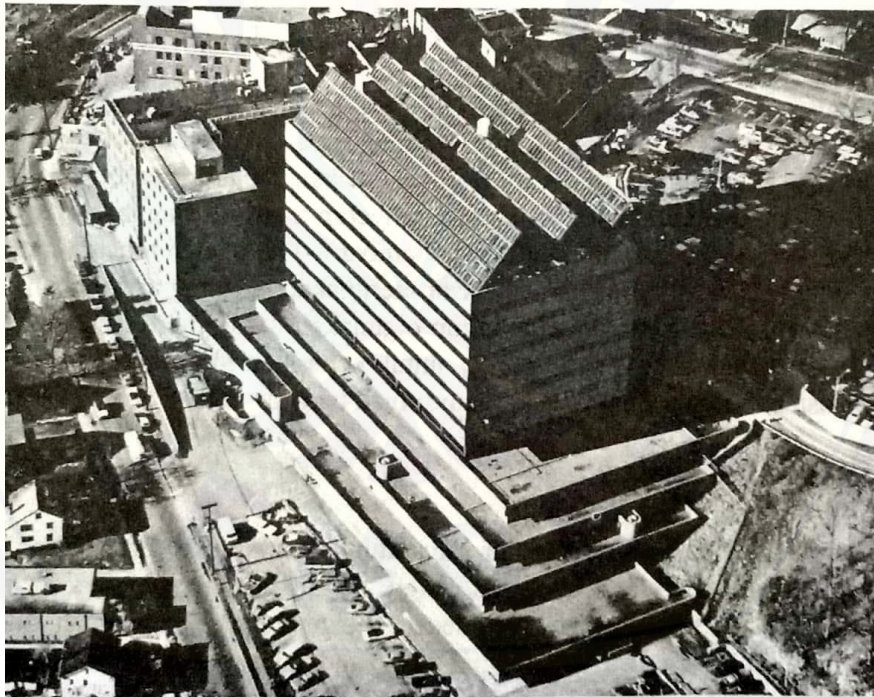




## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pemanas Air Energi Surya

Air panas diperlukan dalam jumlah yang besar untuk proses-proses industri, penatu dan kebutuhan rumah tangga (Jansen, 1995). Penggunaan energi terbesar disamping pendingin ruangan (*air conditioning*) adalah pemanas energi listrik domestik (*domestic water heater*) (Putra, 2015). Pemanas air energi surya merupakan suatu sistem yang terdiri dari kolektor panas matahari yang dipadukan dengan air sebagai fluida kerja yang dikontakkan dengan kolektor melalui pipa (Irwandi, 2015). Pada Januari 1979, salah satu rumah sakit (Gambar 2.1) telah menggunakan pemasok air panas dengan menggunakan 600 deretan panel kolektor.



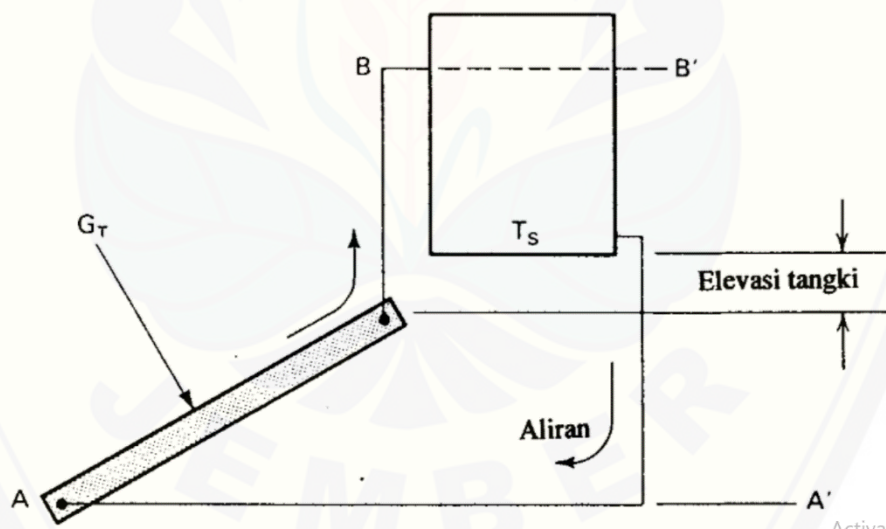
Gambar 2.1 Rumah sakit menggunakan kolektor surya (Jansen, 1995)

Sistem pemanas air energi surya populer di California, Florida, dan Australia, namun sempat surut karena munculnya minyak dan gas alam yang murah. Namun diminati kembali saat harga minyak dan gas mulai naik (Flavin dan

Lenssen, 1995). Sirkulas pemanas air energi surya dibagi menjadi dua yaitu, sirkulasi alami dan sirkulasi paksa.

### 2.1.1 Sirkulasi Alami (*Thermosyphon*)

*Thermosyphon* berasal dari bahasa Yunani, *therme* yang memiliki arti panas dan *siphon*. Mekanisme *thermosyphon* adalah dengan memanfaatkan perbedaan densitas air yang keluar dari kolektor dan air yang akan masuk ke kolektor (Soeparman, 2015). *Thermosyphon* dapat disebut juga dengan sistem pemanas air pasif. Mekanisme *Thermosyphon* (Gambar 2.2) fluida dalam kolektor (kolom AB) dipanasi oleh matahari, maka massa jenisnya turun. Adanya perbedaan massa jenis antara AB dan A'B' menghasilkan sirkulasi searah jarum jam yaitu air hangat berpindah ke tangki penyimpanan dan diganti oleh air yang lebih dingin di dasar tangki (Jansen, 1995)

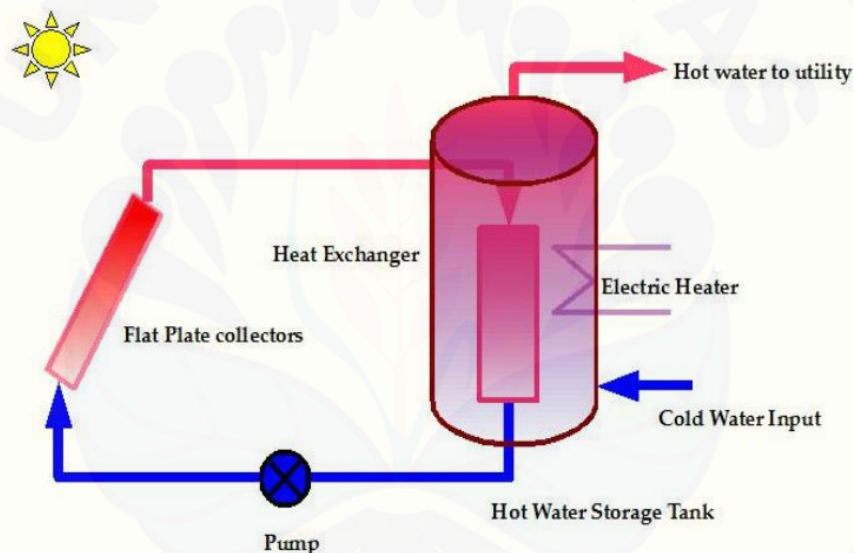


Gambar 2.2 Sirkulasi alami (Jansen, 1995)

Sirkulasi terus berlanjut hingga seluruh sistem mencapai temperatur yang seragam. Sistem ini tidak memerlukan sensor temperatur, alat-alat kontrol, dan pompa sirkulasi serta motor. Hal ini dapat menghasilkan keandalan dari sitem ini menjadi lebih tinggi.

### 2.1.2 Sirkulasi Paksa

Sirkulasi paksa merupakan sirkulasi yang mana di dalamnya membutuhkan pompa. Sirkulasi ini digunakan pada sistem pemanas air kapasitas besar atau sistem perpipaan air yang kompleks seperti penggunaan alat penukar kalor (Soeparman, 2015). Sirkulasi ini dapat disebut juga dengan sistem pemanas air aktif. Sistem ini membutuhkan pompa karena *head* yang ditimbulkan oleh perbedaan densitas air panas dan dingin lebih besar dari *head losses* pada aliran air selama bersirkulasi karena adanya belokan pipa dan katup. Mekanisme sirkulasi ini dijelaskan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sirkulasi paksa (Dwivedi, 2009)

## 2.2 Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor atau *heat transfer* adalah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi di antara benda atau material yang terjadi karena adanya perbedaan suhu. Ilmu ini tidak hanya menjelaskan bagaimana energi kalor itu berpindah, namun juga meramalkan laju perpindahan panas pada kondisi-kondisi tertentu (Holman, 1993).

### 2.2.1 Konduksi

Energi berpindah secara konduksi karena adanya perpindahan energi dari bagian yang bersuhu tinggi ke bagian yang bersuhu rendah pada suatu benda yang terdapat gradien suhu atau *temperature gradient*. Persamaan dasar konduktivitas termal disebut juga hukum Fourier (Holman, 1993).

$$q = -k A \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (2.1)$$

Dengan  $q$  adalah laju perpindahan kalor (watt),  $A$  adalah luas penampang ( $m^2$ ),  $T_2 - T_1 / x_2 - x_1$  adalah gradien suhu ke arah perpindahan kalor,  $k$  adalah konduktivitas termal dengan satuan  $W/(m.K)$ . Daya antar (konduktivitas) termal dan laju perpindahan kalor ditentukan oleh struktur molekul bahan. Semakin rapat dan tersusun rapi akan memindahkan energi semakin cepat. Konduktivitas bahan dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Daya antar (konduktivitas) bahan

Bahan	Suhu (°C)	Rapat Massa (kg/ m <sup>3</sup> )	Daya Antar (W/m.K)
Alumunium	20	2707	204
Tembaga	20	8954	386
Bata luar	20	2000	1,32
Kaca Jendela	20	2700	0,78
Air	21	997	0,604
Kayu	23	640	0,147
Udara	27	1,177	0,026

Sumber : Stoecker dan Jones, 2006.

### 2.2.2 Konveksi

Konveksi sangat penting sebagai mekanisme perpindahan energi antara permukaan benda padat dan cairan atau gas. Konveksi adalah proses perpindahan energi dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpanan energi dan gerakan mencampur (Kreith, 1997). Contoh dari konveksi adalah udara yang berhembus mengalir di atas permukaan suatu kolektor surya. Jika aliran udara disebabkan oleh sebuah blower maka terjadi konveksi paksa dan apabila



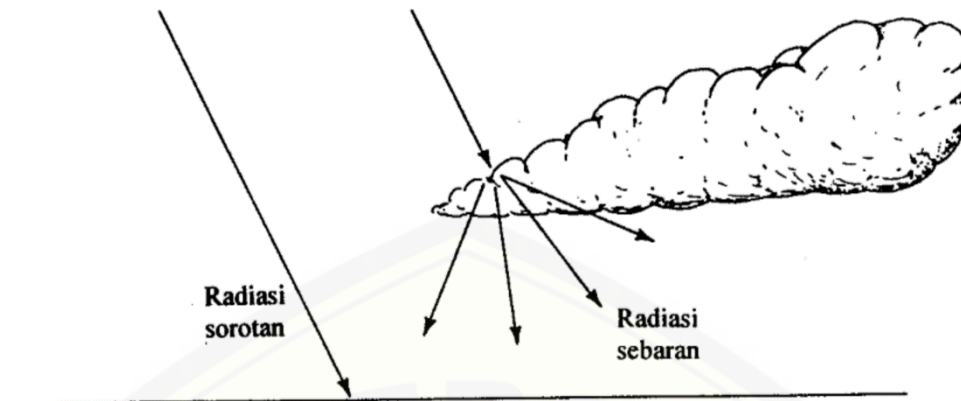
disebabkan oleh gradien massa jenis maka terjadi konveksi alamiah (Jansen, 1995). Perpindahan panas konveksi dapat dinyatakan dengan hukum pendinginan Newton, sebagai berikut:

$$q = hA (T_w - T) \quad (2.2)$$

Dengan  $q$  adalah laju perpindahan kalor (watt),  $A$  adalah luas penampang ( $m^2$ ),  $T_w$  adalah temperatur dinding ( $^{\circ}K$ ),  $T$  adalah temperatur fluida ( $^{\circ}K$ ). Umumnya konveksi  $h$  dinyatakan dengan parameter tanpa dimensi yang disebut bilangan Nusselt (Jansen, 1995).

### 2.2.3 Radiasi

Radiasi merupakan proses yang mana panas mengalir dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah bila benda tersebut terpisah di dalam ruang atau di antara benda tersebut terdapat ruang hampa. Semua benda dapat memancarkan panas radiasinya terus menerus. Intensitas pancaran tergantung pada suhu dan sifat permukaan (Kreith, 1997). Radiasi surya adalah radiasi gelombang pendek yang diserap oleh pelat penyerap sebuah kolektor surya dan diubah menjadi panas. Energi radiasi bergerak dengan kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s) di dalam ruangan hampa (Jansen, 1995). Radiasi matahari yang dipancarkan ke permukaan bumi dibagi menjadi 3 jenis, yaitu radiasi langsung (*direct radiation*), radiasi tersebar (*diffuse radiation*), dan radiasi pantulan. Radiasi langsung adalah radiasi yang diterima langsung oleh permukaan bumi yang satu garis lurus dengan arah radiasinya. Radiasi tersebar adalah radiasi yang tersebar oleh atmosfer, difusi ini menyebabkan sinar matahari menyebar ke segala arah. Radiasi pantulan merupakan radiasi yang datang dari pantulan benda yang mendapatkan radiasi langsung, benda yang dapat memantulkan sinar matahari biasanya memiliki warna yang mengkilap (Atmodigdo, 2016). Gambaran radiasi langsung dan radiasi sebaran dijelaskan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Radiasi sorotan dan sebaran (Jansen, 1995)

Sebuah benda yang dalam pada suhu berapapun dapat memancarkan dan menyerap panas semaksimal mungkin dapat disebut dengan benda hitam atau radiator ideal (Kreith, 1997). Penukaran panas netto secara radiasi termal antara dua badan ideal (hitam) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$q = \sigma A (T_w^4 - T^4) \quad (2.3)$$

Dengan  $\sigma$  adalah konstanta Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ),  $q$  adalah laju perpindahan kalor (watt),  $A$  adalah luas penampang ( $\text{m}^2$ ),  $T_w$  adalah temperatur dinding (K),  $T$  adalah temperatur fluida (K) (Jansen, 1995).

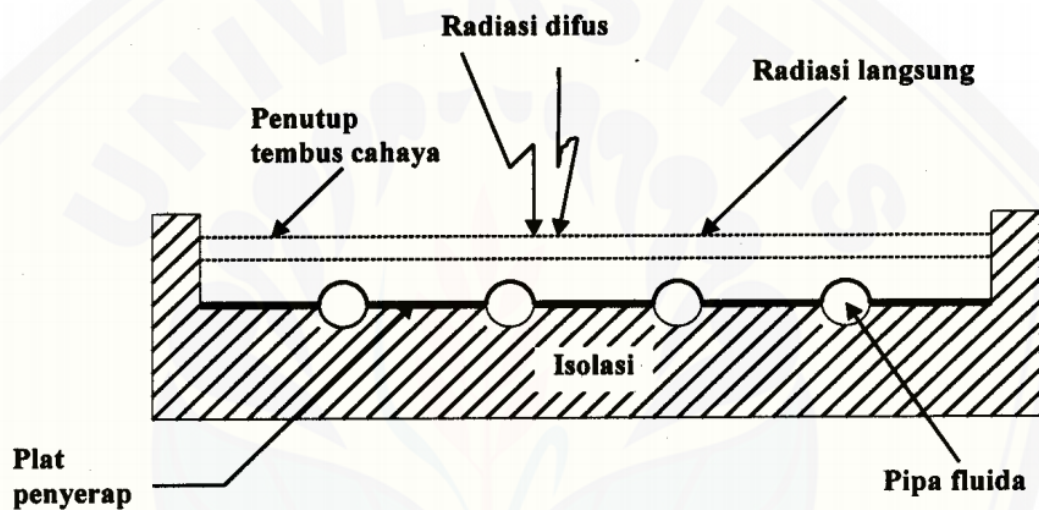
### 2.3 Kolektor Surya

Alat yang digunakan untuk mengumpulkan panas yang diperoleh dari energi radiasi matahari, energi matahari diubah menjadi panas yang bermanfaat merupakan kolektor surya. Mekanisme kerja kolektor surya adalah pengumpulan panas matahari yang berguna untuk memanaskan air. Kolektor surya terbagi dua jenis yaitu kolektor surya pelat datar dan kolektor surya tabung vakum.

#### 2.3.1 Kolektor Surya Pelat Datar

Kolektor surya pelat datar (*Flat Plate Collector, FPC*) merupakan kolektor yang menangkap dan menahan panas matahari menggunakan pelat kaca dan

diteruskan ke pipa-pipa yang berisi air. Kolektor surya pelat datar adalah jenis kolektor paling umum dengan desain sederhana yang mampu menghasilkan panas hingga  $100^{\circ}\text{C}$  di atas suhu kamar (Duffie dan Beckman, 1991). Kolektor surya pelat datar (Gambar 2.5) terdiri dari kaca penutup, pelat absorber, pipa penyerap panas dan isolator pada bawah dan samping kolektor (Soeparman, 2015). Penutup kaca digunakan untuk menghindari konveksi dan *losses* dari radiasi ke atmosfer. Begitu pun bahan isolator digunakan untuk menghindari *losses* konduksi.

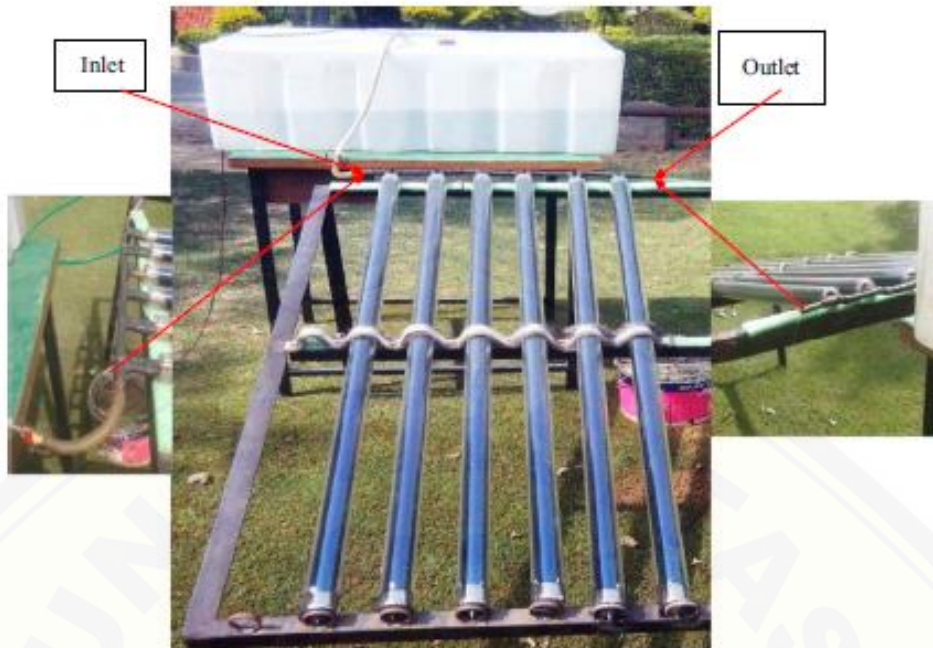


Gambar 2.5 Kolektor pelat datar (Kristanto dan San, 2001)

### 2.3.2 Kolektor Surya Tabung

Kolektor surya tabung (*Evacuated Tube Collector, ETC*) mempunyai keunggulan dalam kehilangan panas dibanding kolektor pelat datar (Mishra dkk., 2015). Kolektor tabung (Gambar 2.6) terdiri atas pipa absorber, pipa air, *glass tube*, dan reflektor. Kelebihan dari kolektor tabung yaitu dapat menghasilkan temperatur lebih tinggi dengan efisiensi lebih besar dibanding kolektor pelat datar.

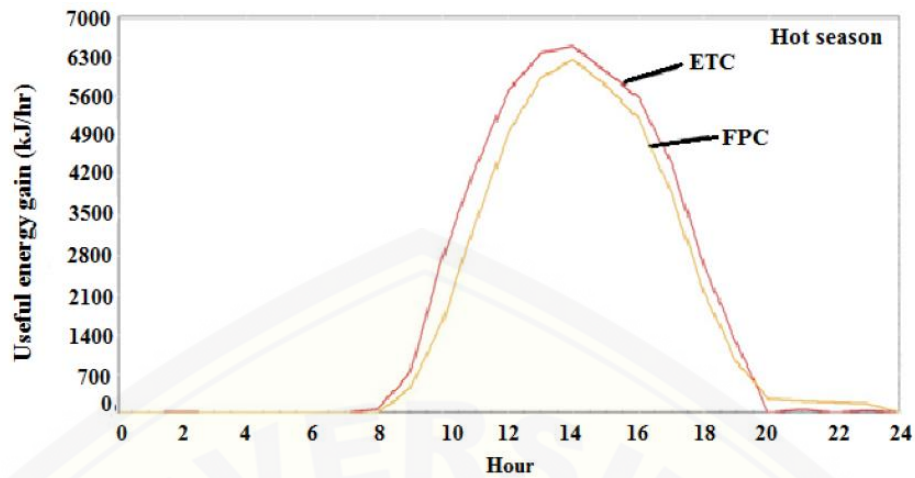




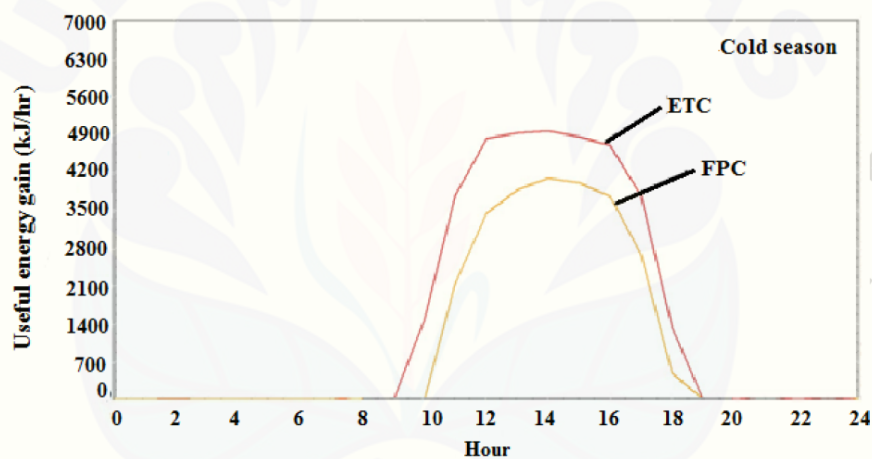
Gambar 2.6 Kolektor tabung (Mishra, 2017)

Kolektor tabung mempunyai efek gabungan lapisan permukaan yang selektif dan insulasi vakum dari elemen penyerap sehingga dapat memiliki ekstraksi panas yang tinggi efisiensi dibandingkan dengan kolektor pelat datar pada suhu berkisar di atas  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Yong dan Taebeom dkk.,2006). Kolektor tabung dapat mencapai efisiensi pengisian berkisar 33 – 66 % tergantung pada intensitas radiasi matahari (Piotr dan Robert, 2017). Tahmineh (2017) menyarankan untuk menggunakan kolektor tabung dalam iklim dingin karena hasil kinerja sistem lebih besar 41 % dan pemanfaatan energi lebih besar 30 % dibanding kolektor pelat datar.

Gambar 2.7 dan Gambar 2.8 merupakan grafik perbandingan energi yang berguna terhadap waktu dalam kondisi musim panas dan dingin antara kolektor tabung dan kolektor pelat datar. Dapat kita lihat, bahwa hasilnya adalah kolektor tabung menghasilkan energi yang berguna lebih besar dibandingkan kolektor pelat datar. Hal ini juga menunjukkan bahwa energi yang berguna turun di musim dingin menjadi 36 % untuk kolektor tabung dan 24 % untuk kolektor pelat datar.



Gambar 2.7 Energi yang berguna pada musim panas (Tahmineh dkk., 2017)



Gambar 2.8 Energi yang berguna pada musim dingin (Tahmineh dkk., 2017)

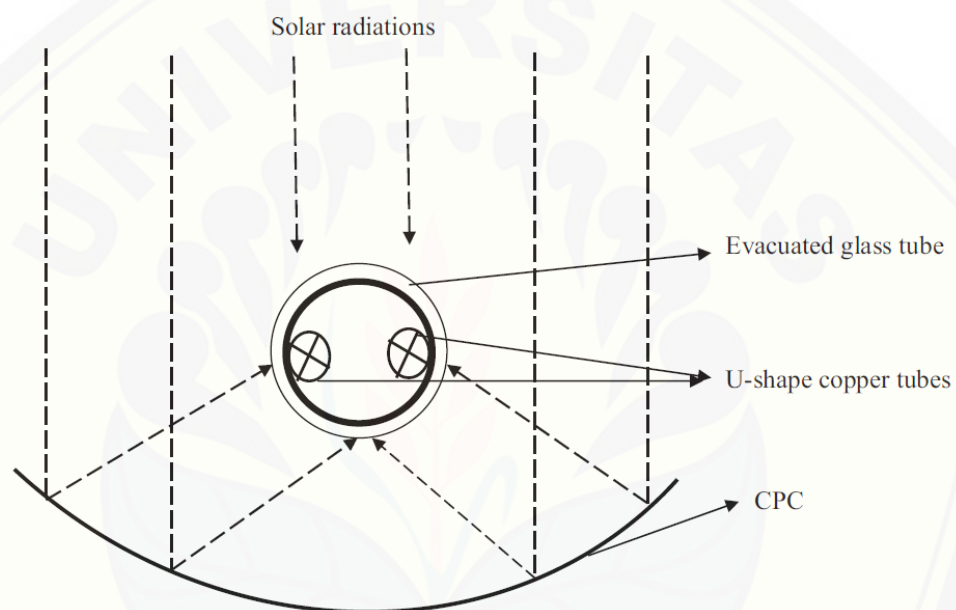
Kolektor surya merupakan media *transfer* panas, panas dari kolektor dipindahkan secara konveksi ke air menggunakan pipa. Untuk menghitung berapa besar energi yang diserap oleh air dapat dilihat dengan persamaan berikut.

$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2.4)$$

Dengan  $Q$  adalah energi yang diserap air (kJ/s),  $\dot{m}$  adalah massa jenis aliran (kg/s),  $c_p$  adalah panas jenis aliran (kJ/kg.°C),  $T_{out}$  adalah temperatur air keluar (°C) dan  $T_{in}$  adalah temperatur air masuk (°C).

#### 2.4 *Compound Parabolic Concentrator (CPC)*

*Compound Parabolic Concentrator (CPC)* atau reflektor dirancang untuk memantulkan panas matahari agar mengenai kolektor. Reflektor (Gambar 2.9) sangat berguna dalam pemanasan awal proses untuk industri bersuhu sangat tinggi (Mishra dkk., 2017). Tujuan utama dalam penambahan reflektor sebagai pengonsentrasi pada kolektor surya adalah untuk menaikkan performansi dengan mengurangi *heatloss* (Murugavel dan Devanarayanan, 2014).

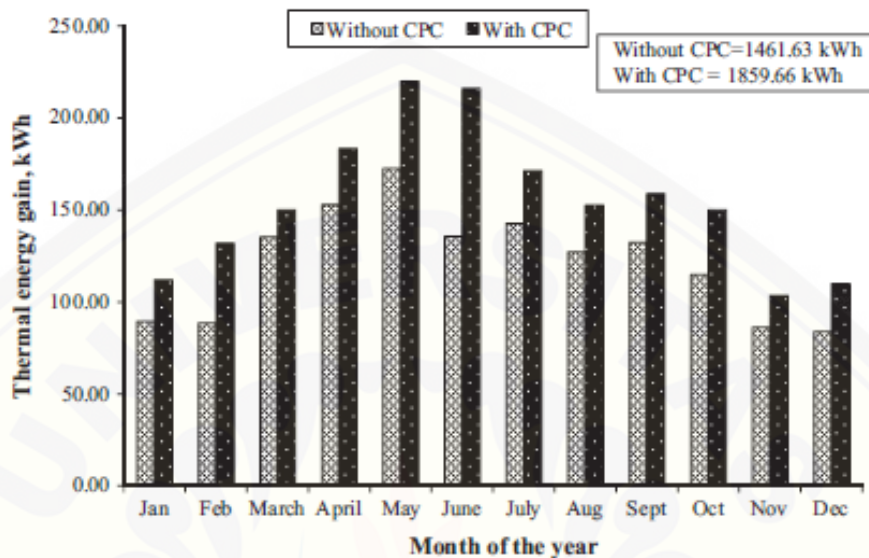


Gambar 2.9 Kolektor Tabung dengan Reflektor (Mishra dkk., 2017)

Reflektor pada kolektor tabung dapat dapat memfokuskan radiasi matahari ke pipa asorber yang dapat menghasilkan temperatur material perubahan fasa lebih seragam. Maka dari itu dapat menghasilkan suhu dan efisiensi pengisian material perubahan fasa meningkat (Piotr dan Robert, 2017). Buttinger dkk (2010) telah menciptakan kolektor dengan menggunakan reflektor dan menghasilkan efisiensi kolektor yang lebih dari 50 % saat suhu 150 °C.

Gambar 2.10 merupakan hasil penelitian yang dilakukan Mishra dkk pada tahun 2017 yang membandingkan kolektor tabung dengan reflektor dan tanpa reflektor. Dapat dilihat bahwa dalam kondisi lingkungan yang sama kolektor tabung dengan reflektor selalu menghasilkan energi panas yang lebih besar dari kolektor

tabung tanpa reflektor. Hal ini membuktikan bahwa reflektor dapat memaksimalkan energi panas yang diserap kolektor tabung dengan memantulkan panas matahari.



Gambar 2.10 Energi Panas dengan Dan Tanpa Reflektor (Mishra dkk., 2017)

## 2.5 Material Perubahan Fasa (*Phase Change Material, PCM*)

Material perubahan fasa (*Phase Change Material, PCM*) adalah material yang dapat berubah fasanya pada suhu tertentu namun struktur dan sifatnya tidak berubah. Penyimpanan energi diperlukan untuk menyiapkan energi saat ketersediaan energi matahari tidak dapat dimanfaatkan (Stoecker dan Jones, 1996). Pencairan pada material perubahan fasa ini berarti dalam kondisi penyerapan kalor dengan jumlah besar. Proses pelepasan energi termal oleh material perubahan fasa ini terjadi pada proses *discharging* dan akan mengembalikan fasa dari material tersebut atau kembali padat (Putra, 2015).

### 2.5.1 Pemilihan Material Perubahan Fasa

Elemen paling penting dalam penyimpanan kalor laten adalah material perubahan fasa (Dailami, 2012). Kontribusi material perubahan fasa dalam penyimpanan energi termal adalah 44,28 % (Nadjib dkk., 2015). Keuntungan material perubahan fasa adalah mampu menyimpan kalor dalam kapasitas besar



dengan volume material kecil dan proses penyerapan dan pengeluaran energi panas terjadi pada temperatur yang hampir konstan (Buddhi, 1997). Tabel 2.2 memuat karakteristik material yang biasa digunakan sebagai material perubahan fasa.

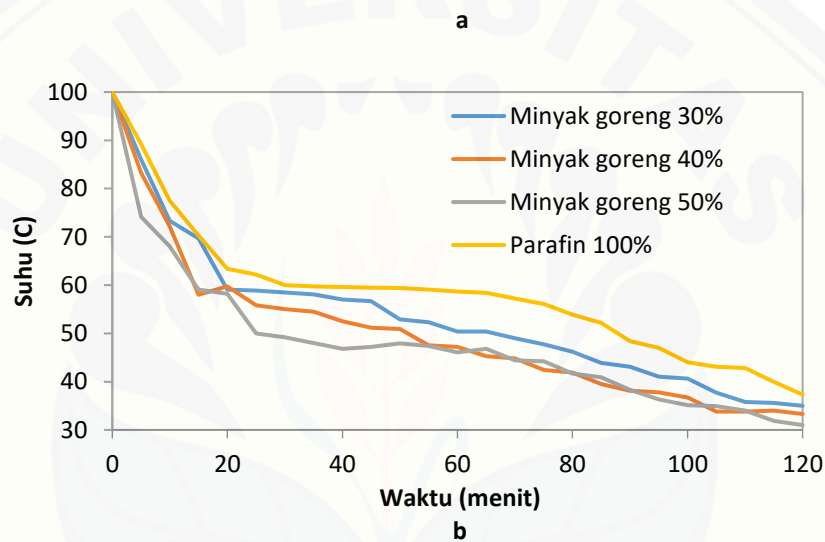
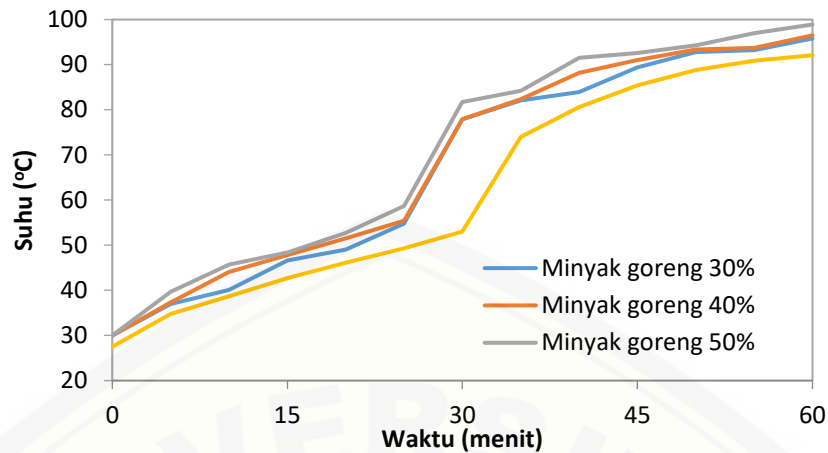
Tabel 2.2 Karakteristik material PCM

Bahan	Titik Leleh (°C)	Kalor Pembentukan (kJ/kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Kalor pembentukan per satuan volume (kJ/m <sup>3</sup> )
Garam Glauber	32	240	1100	260.000
Lilin Parafin	65	230	650	150.000

Sumber : Stoecker dan Jones, 1996

Syarat untuk pemakaian material perubahan fasa dibutuhkan satu bahan dengan titik leleh yang sesuai. Suhu ketika perubahan fasa berlangsung dan harus memenuhi suatu pemakaian tertentu atau kesanggupan kolektor yang tersedia. Kapasitas penyimpanan optimum tergantung pada pemakaian. Jika kapasitas terlalu kecil maka energi yang sudah terkumpul akan terbuang sia-sia. Begitu pula jika kapasitas terlalu besar maka biaya yang dibutuhkan akan lebih mahal dan rugi (Stoecker dan Jones, 1996).

Penambahan lilin parafin dapat meningkatkan efisiensi sistem pemanas air, efisiensi maksimum yaitu 36,6 % (Thaib dkk., 2014). Vanhas (2017) telah membuktikan bahwa penambahan minyak goreng pada lilin parafin mampu meningkatkan konduktivitas termal dapat dilihat pada Gambar 2.11. Pada kesempatan ini, material yang digunakan adalah lilin parafin 70 % dan minyak goreng 30 %. Karena pada persentase lilin parafin 70 % dan minyak goreng 30 % ini dapat menyimpan panas lebih lama dibanding lilin parafin 60 % - minyak goreng 40 % dan lilin parafin 50 % - minyak goreng 50 %. Karakteristik lilin parafin dan minyak goreng dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4.



Gambar 2.11 Temperatur outlet a) proses charging b) proses discharging (Vanhas, 2017)

Tabel 2.3 Karakteristik parafin

Properties	Parafin
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	0,88 – 0,92
Specific heat [J/kg·K]	2890
Thermal conductivity [W/m°C]	0,21 jika $T < T_{\text{solidus}}$ 0,12 jika $T > T_{\text{liquidus}}$
Latent heat [J/kg]	173,4
Melting point [°C]	47 - 65



Tabel 2.4 Karakteristik minyak goreng

Temp °C	Viscosity mPas	Heat Capacity kJ/kg-C	Conductivity W/m-C	Density kg/m <sup>3</sup>
20	106.8	1.848	0.1726	890.1
25	77.19	1.861	0.1721	887.5
30	57.85	1.875	0.1717	885
35	44.68	1.888	0.1712	882.5
40	35.41	1.902	0.1708	880
45	28.68	1.916	0.1704	877.5
50	23.68	1.930	0.1699	875.1
55	19.88	1.944	0.1695	872.6
60	16.93	1.959	0.1691	870.2
65	14.61	1.973	0.1687	867.8
70	12.75	1.988	0.1683	865.4
75	11.23	2.003	0.1679	863.1
80	9.99	2.018	0.1675	860.7
85	8.955	2.034	0.1671	858.4
90	8.087	2.049	0.1668	856.1
95	7.351	2.065	0.1664	853.8
100	6.721	2.081	0.166	851.6
105	6.179	2.097	0.1657	849.3
110	5.709	2.113	0.1653	847.1
115	5.298	2.129	0.165	844.9
120	4.937	2.146	0.1646	842.7
130	4.335	2.179	0.164	838.4
135	4.083	2.197	0.1636	836.3
140	3.857	2.214	0.1633	834.2
145	3.653	2.231	0.163	832.1
150	3.469	2.249	0.1627	830
155	3.302	2.267	0.1624	828
160	3.151	2.284	0.1621	825.9
165	3.012	2.303	0.1618	823.9
170	2.885	2.321	0.1615	821.9
175	2.769	2.339	0.1613	819.9
180	2.662	2.358	0.131	818
185	2.563	2.377	0.1607	816.1
190	2.471	2.396	0.1605	814.1
195	2.387	2.415	0.1602	812.2
200	2.308	2.434	0.16	810.4
205	2.234	2.454	0.1597	808.5
210	2.166	2.473	0.1595	806.7
215	2.102	2.493	0.1693	804.9
220	2.042	2.513	0.1591	803.1
225	1.986	2.533	0.1589	801.3

(Sumber : Chempro, 2018).

### 2.5.2 Penyimpanan Panas pada Material Perubahan Fasa

Material perubahan fasa merupakan aplikasi dari penyimpanan panas laten. Panas laten adalah jumlah panas yang diserap dan dilepaskan selama proses perubahan fasa dari material. Panas laten mempunyai dua jenis, yaitu panas laten fusi dan panas laten penguapan. Jumlah panas yang diserap atau dilepaskan ketika perubahan fase padat ke cair atau sebaliknya disebut panas laten fusi. Sedangkan panas laten penguapan adalah jumlah energi panas yang diserap atau dilepaskan ketika perubahan fase cair ke uap atau sebaliknya. Jumlah energi panas yang tersimpan dalam bentuk panas laten dalam material dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) + m \cdot \Delta h_m + m c_{sp} (T_2 - T_1)$$

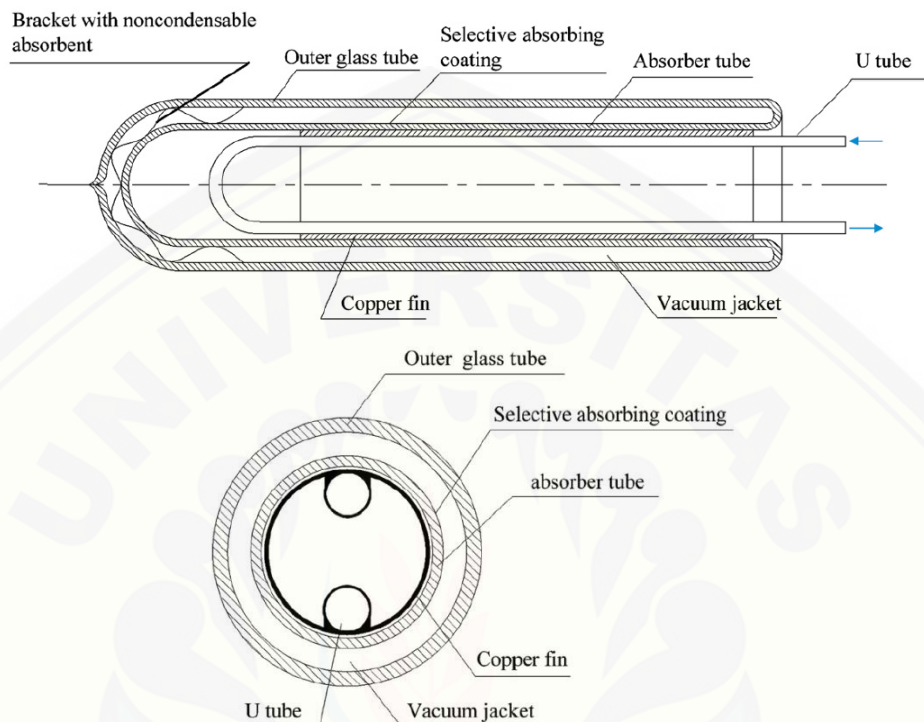
$$Q = \dot{m} [c_p (T_{out} - T_{in}) + \Delta h_m + c_{sp} (T_2 - T_1)] \quad (2.5)$$

Dengan  $Q$  adalah jumlah energi pada panas laten (kJ/s),  $\dot{m}$  adalah massa jenis aliran (kg/s),  $c_p$  adalah panas jenis aliran (kJ/kg.°C),  $T_{out}$  adalah temperatur air keluar (°C),  $T_{in}$  adalah temperatur air masuk (°C),  $\Delta h_m$  adalah panas laten fusi atau penguapan (kJ/kg),  $c_{sp}$  adalah panas jenis bahan yang digunakan untuk penyimpanan energi panas (kJ/kg.°C),  $T_2$  adalah temperatur akhir (°C) dan  $T_1$  adalah temperatur air awal (°C).

## 2.6 Glass Tube

Sinar matahari saat mengenai *glass tube* sebagian dipantulkan ke atmosfer, sebagian diserap oleh *glass tube*, sebagian diteruskan ke absorber (Soeparman, 2015). Seperti yang kita tahu kolektor tabung (*Evacuated tube Collector, ETC*) mempunyai keunggulan dalam kehilangan panas dibanding kolektor pelat datar (Mishra dkk., 2015). Hal ini diduga mempunyai hubungan yang sangat erat pada *glass tube*. Pada kolektor tabung (Gambar 2.12) telah dilakukan penyerapan udara untuk membentuk ruang hampa. Hal ini bertujuan untuk memaksimalkan penyerapan energi matahari dan meminimalisir kehilangan panas pada permukaan absorber. Dengan adanya *glass tube* suhu permukaan absorber naik 30 °C

(Liangdong dkk., 2010). Melihat dari penelitian sebelumnya, masih dibutuhkan penelitian mengenai faktor *glass tube* pada kolektor tabung.



Gambar 2.12 Kolektor tabung dengan *glass cover* (Liangdong dkk., 2010)

## 2.7 Efisiensi Kolektor Pemanas Air

Untuk mengetahui suatu sistem dapat bekerja baik atau tidak dapat dilihat dari efisiensi sistem tersebut. Mencari efisiensi dapat menggunakan persamaan 2.6. Efisiensi dari kolektor tabung saat *charging* merupakan perbandingan antara panas yang diserap oleh air sebagai fluida kerja dengan radiasi sinar yang diserap oleh luasan kolektor tersebut (Liangdong dkk., 2010).

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_2 - T_1)}{I A_{cov}}$$

(2.6)

Dengan  $\dot{m}$  adalah massa jenis aliran (kg/s),  $c$  adalah panas jenis aliran (kJ/kg.°C),  $T_2$  adalah temperatur air akhir (°C) dan  $T_1$  adalah temperatur air awal

(°C),  $A_{cov}$  merupakan luasan cover kolektor ( $m^2$ ) dan  $I$  adalah intensitas radiasi sinar ( $W/m^2$ ).

Selain menghitung efisiensi kolektor saat *charging*, dibutuhkan pula menghitung efisiensi kolektor saat *discharging*. Efisiensi dari kolektor tabung saat *discharging* merupakan perbandingan antara panas yang diserap oleh air sebagai fluida kerja dengan panas yang diserap oleh material perubahan fasa. Persamaan tersebut dapat dilihat pada persamaan 2.7 sebagai berikut.

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_2 - T_1)}{\frac{m}{t} c_p (T_{pcm2} - T_{pcm1})} \quad (2.7)$$

Dengan  $\dot{m}$  adalah massa jenis aliran ( $kg/s$ ),  $c$  adalah panas jenis air ( $kJ/kg.°C$ ),  $T_2$  adalah temperatur air akhir ( $°C$ ) dan  $T_1$  adalah temperatur air awal ( $°C$ ),  $m$  adalah massa PCM ( $kg$ ),  $C$  adalah panas jenis PCM ( $kJ/kg.°C$ ),  $T_2$  adalah temperatur PCM akhir ( $°C$ ) dan  $T_1$  adalah temperatur PCM awal ( $°C$ ) dan  $t$  adalah waktu ( $s$ ).

## 2.8 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dijabarkan di atas, maka dapat diambil hipotesis bahwa:

- a. Pada kolektor tabung dengan *glass tube* dapat menghasilkan temperatur air *outlet* lebih besar dibanding kolektor tabung tanpa *glass tube* pada proses *discharging*. Hal ini dikarenakan *glass tube* dapat menangkap dan menahan panas yang ada pada kolektor tersebut, sehingga *glass tube* mampu memperlambat proses kehilangan panas pada kolektor tabung.
- b. Kolektor tabung dengan *glass tube* dapat menghasilkan efisiensi *discharging* lebih tinggi dibanding kolektor tabung tanpa *glass tube*. Hal ini dikarenakan kolektor tabung dengan *glass tube* dapat menahan panas pada pipa absorber sehingga menghasilkan temperatur *outlet* air akan lebih tinggi dibanding kolektor tabung tanpa *glass tube*.

### BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu metode pengamatan secara langsung. Metode ini digunakan untuk membandingkan temperatur *outlet* pemanas air pada proses pendinginan perubahan fasa material dan performa kolektor tabung dengan *glass tube* dan tanpa *glass tube*. Penelitian ini mulai dari studi literatur, perencanaan alat, perancangan alat dan pengambilan data.

#### 3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Konversi Energi 1 Universitas Jember tepatnya di Jalan Slamet Riyadi No 36 Patrang Jember. Penelitian dilakukan selama satu bulan yaitu dari bulan November hingga Desember. Berikut rincian kegiatan pada penelitian dapat dilihat di Tabel 3.1.

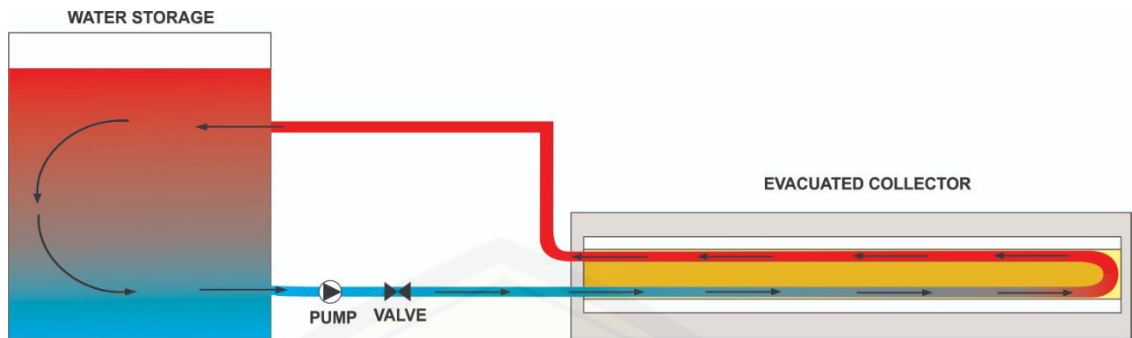
Tabel 3.1 Jadwal kegiatan

Kegiatan	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan
Studi literatur	■	■					
Perencanaan alat		■	■				
Persiapan alat dan bahan			■				
Perancangan prototype			■				
Pengujian prototype			■				
Penyusunan proposal			■	■			
Perancangan alat				■			
Pengujian alat					■	■	
Pengambilan data					■	■	
Analisa data						■	
Sidang dan revisi							■

#### 3.3 Alat dan Bahan

Penelitian ini melakukan dua proses perancangan alat, yaitu perancangan kolektor tabung dan pemanas air. Berikut adalah alat dan bahan yang digunakan.





Gambar 3.1 *Desain alat pemanas air*

a. Alat yang digunakan:

- 1) Las butana untuk melekatkan pipa tembaga satu ke yang lain.
- 2) Gerinda untuk memotong pipa tembaga dan kayu.
- 3) Meteran untuk mengukur panjang.
- 4) Busur derajat untuk menghitung sudut.
- 5) Perekat untuk melekatkan pipa dengan *valve*.
- 6) Pena untuk menulis.
- 7) Palu untuk memaku rangka.
- 8) Pompa akuarium untuk mengalirkan air.
- 9) *Phyranometer* untuk mengukur radiasi cahaya.
- 10) *Thermocouple* tipe K untuk mengukur suhu.
- 11) Gelas ukur untuk mengukur volume air.
- 12) *Stopwatch* untuk mengukur waktu.
- 13) *Data logger* untuk mencatat data yang diperoleh.
- 14) Lampu untuk memancarkan cahaya sebagai pengganti matahari.

b. Bahan yang digunakan:

- 1) Pipa tembaga berdiameter 2 1/8 inchi sebagai absorber.
- 2) Pipa tembaga berdiameter 1/2 inchi sebagai pipa air.
- 3) Akrilik diameter 8 cm sebagai *glass tube*.
- 4) *Knee* berdiameter 1/2 inchi sebagai penyambung pipa U.
- 5) Pelat lembaran *stainless steel* sebagai reflektor.
- 6) *Styrofoam* sebagai rangka reflektor.

- 7) *Reservoir* sebagai tempat air.
- 8) Selang plastik 3/8 inchi sebagai tempat mengalirkan air.
- 9) *Valve* berdiameter 3/8 inchi sebagai pengatur massa jenis aliran.
- 10) Kayu sebagai rangka alat pemanas surya.
- 11) Paku sebagai penyambung rangka.
- 12) *Glasswool* sebagai pencegah terjadinya kebocoran pada kolektor tabung.

Tabel 3.2 Spesifikasi bahan

Alat dan Bahan	Spesifikasi
<b>Pipa Absorber</b>	
Bahan	Tembaga
Diameter	0,0539 m
Panjang	1 m
Jumlah	2 buah
<b>Pipa Air</b>	
Bahan	Tembaga
Diameter	0,0127 m
Panjang	2 m
Jumlah	2 buah
<b>Glass Tube</b>	
Bahan	Akrilik
Diameter	0,08 m
Panjang	1 m
Jumlah	1 buah
<b>Knee</b>	
Bahan	Tembaga
Diameter	0,0127 m
Jumlah	4 buah
<b>Selang air</b>	
Bahan	Plastik
Diameter	0,0095 m
Panjang	0,5 m
Jumlah	4 buah
<b>Lampu</b>	
Bahan	Alumunium
Tegangan	220 - 240 Volt
Daya	1000 Watt
Jumlah	3 buah

### 3.4 Variabel Penelitian

Ada beberapa variabel dalam penelitian, yaitu variabel bebas, terikat dan kontrol. Berikut adalah variabel yang ada pada penelitian ini.

#### 3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi atau yang menjadi sebab perubahan dan timbulnya variabel terikat. Variabel bebas pada penelitian ini adalah:

- a. Penambahan *glass tube* pada kolektor tabung;
- b. Laju aliran massa air (0,01 kg/s dan 0,04 kg/s)

#### 3.4.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel *output* atau variabel yang dapat diukur nilainya yang dipengaruhi karena adanya variabel bebas. Variabel terikat pada penelitian ini adalah:

- a. Suhu antara *glass tube* dan absorber atas ( $T_{gt}$ );
- b. Suhu antara *glass tube* dan absorber bawah ( $T_{gtb}$ );
- c. Suhu absorber ( $T_{abs}$ );
- d. Suhu air keluar ( $T_{out}$ );
- e. Suhu material perubahan fasa ( $T_{pcm}$ );

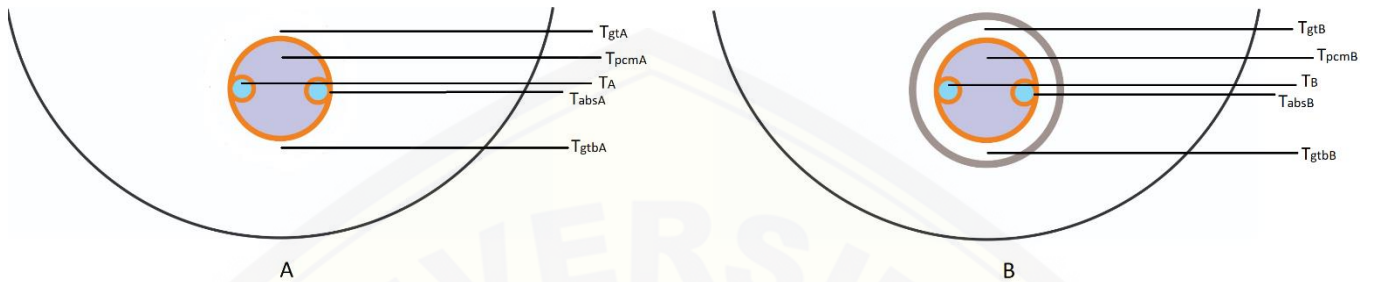
#### 3.4.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan variable yang digunakan untuk menyamakan persepsi mengenai penelitian ini. Variabel kontrol yang dipilih yaitu fluida kerja yang digunakan adalah:

- a. Fluida kerja yang digunakan adalah air;
- b. Lama waktu penyinaran oleh sinar atau *charging* dan *discharging* masing-masing selama 4 jam.

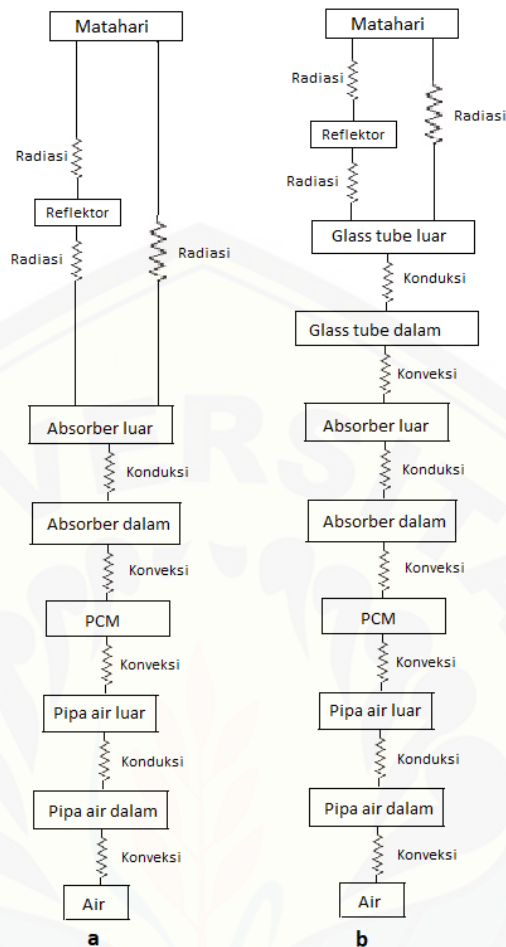
### 3.5 Pengambilan Data yang Dilakukan

Adapun parameter-parameter yang dihitung dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2 Data temperatur yang diambil

- Radiasi Lampu ( $I$ );
- Suhu antara *glass tube* dan absorber atas ( $T_{gtA}$  dan  $T_{gtB}$ );
- Suhu antara *glass tube* dan absorber bawah ( $T_{gtbA}$  dan  $T_{gtbB}$ );
- Suhu absorber ( $T_{absA}$  dan  $T_{absB}$ );
- Suhu air keluar ( $T_A$  dan  $T_B$ );
- Suhu material perubahan fasa ( $T_{pcmA}$  dan  $T_{pcmB}$ ).



Gambar 3.3 Diagram tahanan termal pada kolektor tabung (a) tanpa *glass tube* (b) dengan *glass tube*

Pada Gambar 3.3 menjelaskan tahanan termal pada kolektor tabung tanpa *glass tube* dan dengan *glass tube*. Dapat kita lihat bahwa kolektor tabung tanpa *glass tube* tahanan termal lebih sedikit dibanding kolektor tabung dengan *glass tube*. Kolektor tabung tanpa *glass tube* sinar lampu langsung mengenai absorber, sedangkan kolektor tabung dengan *glass tube* sinar lampu melewati *glass tube* terlebih dahulu lalu mengenai absorber. Selanjutnya tahanan termal dari absorber menuju material perubahan fasa lalu pipa air dan air. Hal tersebut berarti kolektor tabung dengan *glass tube* menghasilkan panas yang diserap oleh air lebih sedikit dibanding kolektor tanpa *glass tube*.



Tabel 3.3 Data temperatur pada proses *charging* (tanpa *glass tube*)

T (menit)	I (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>gtA</sub> (°C)	T <sub>gtbA</sub> (°C)	T <sub>absA</sub> (°C)	T <sub>pcmA</sub> (°C)	T <sub>A</sub> (°C)
0						
20						
40						
60						
80						
100						
120						
140						
160						
180						
200						
220						
240						

Tabel 3.4 Data temperatur pada proses *charging* (dengan *glass tube*)

T (menit)	I (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>gtB</sub> (°C)	T <sub>gtbB</sub> (°C)	T <sub>absB</sub> (°C)	T <sub>pcmB</sub> (°C)	T <sub>B</sub> (°C)
0						
20						
40						
60						
80						
100						
120						
140						
160						
180						
200						
220						
240						

Tabel 3.5 Data temperatur pada proses *discharging* (tanpa *glass tube*)

T (menit)	$T_{gtA}$ (°C)	$T_{gtbA}$ (°C)	$T_{absA}$ (°C)	$T_{pcmA}$ (°C)	$T_A$ (°C)
0					
20					
40					
60					
80					
100					
120					
140					
160					
180					
200					
220					
240					

Tabel 3.6 Data temperatur pada proses *discharging* (dengan *glass tube*)

T (menit)	$T_{gtB}$ (°C)	$T_{gtbB}$ (°C)	$T_{absB}$ (°C)	$T_{pcmB}$ (°C)	$T_B$ (°C)
0					
20					
40					
60					
80					
100					
120					
140					
160					
180					
200					
220					
240					

### 3.6 Tahap Penelitian

Penelitian ini membutuhkan dua tahap, yaitu tahap persiapan dan tahap penelitian.

#### 3.6.1 Tahap Persiapan

Tahap pertama pada penelitian ini adalah tahap persiapan. Hal yang dilakukan pada tahap persiapan ini adalah:

- a. Menyiapkan alat dan bahan yang digunakan;
- b. Mengukur jarak sinar lampu pada kolektor tabung;
- c. Membuat *prototype* kolektor tabung;
- d. Merancang kolektor tabung dan alat pemanas air;
- e. Menyiapkan material perubahan fasa;

Material perubahan fasa yang digunakan adalah campuran parafin 70 % dan minyak goreng 30 %. Tahap pertama adalah parafin dipanaskan hingga suhu 65 °C lalu dicampurkan dengan minyak dengan suhu 33 °C. Lalu campuran material perubahan fasa dipanaskan kembali hingga suhu 67 °C. Untuk menuangkan material perubahan fasa ke absorber dilakukan pada suhu 40 °C.

- f. Memposisikan alat pemanas air di tempat pengambilan data.

### 3.6.2 Tahap Penelitian

Tahap selanjutnya setelah tahap persiapan yaitu tahap penelitian. Hal yang dilakukan pada tahap persiapan ini adalah:

- a. Mengukur intensitas radiasi sinar lampu;

Radiasi sinar lampu yang digunakan antara 700 – 800 W/m<sup>2</sup> setara dengan radiasi matahari Kota Jember pada tanggal 27 September 2018 pukul 09.00 – 10.00 WIB dengan data radiasi disajikan sebagai berikut.

Tabel 3.7 Data radiasi

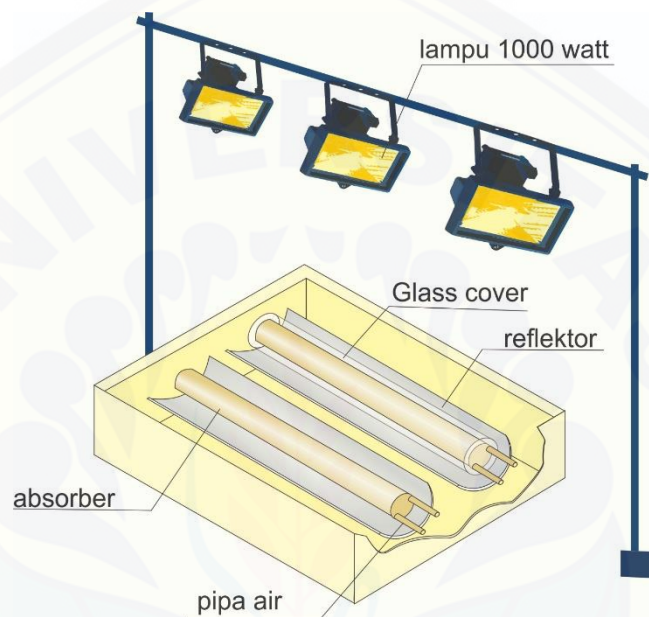
Waktu	Radiasi (W/m <sup>2</sup> )
08:00	615,8
09:00	724,6
10:00	799,7
11:00	835,3
12:00	935,7

- b. Pengambilan data dengan menepatkan kolektor tabung dengan *glass tube* dan tanpa *glass tube* di bawah sinar lampu;
- c. Mengukur data temperatur pada Tabel 3.3 hingga Tabel 3.6 pada kolektor tabung dengan *glass tube* dan tanpa *glass tube*;
- d. Proses penyinaran dengan sinar lampu terjadi selama 4 jam;

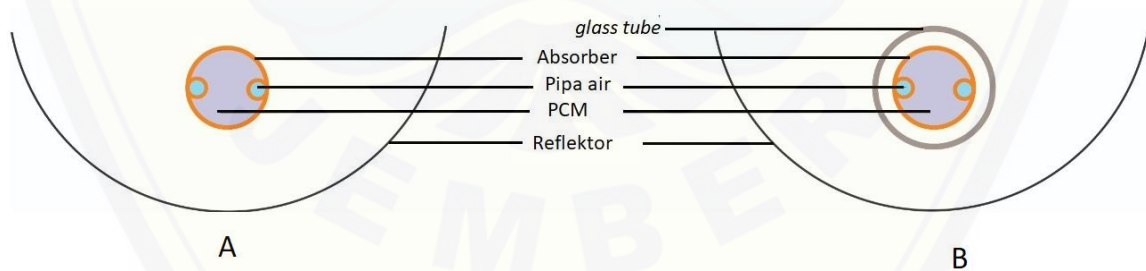
- e. Pengambilan data diambil hingga 8 jam;
- f. Pengolahan dan analisis data.

### 3.7 Desain Alat

Desain alat pada penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 3.4 Desain kolektor tabung



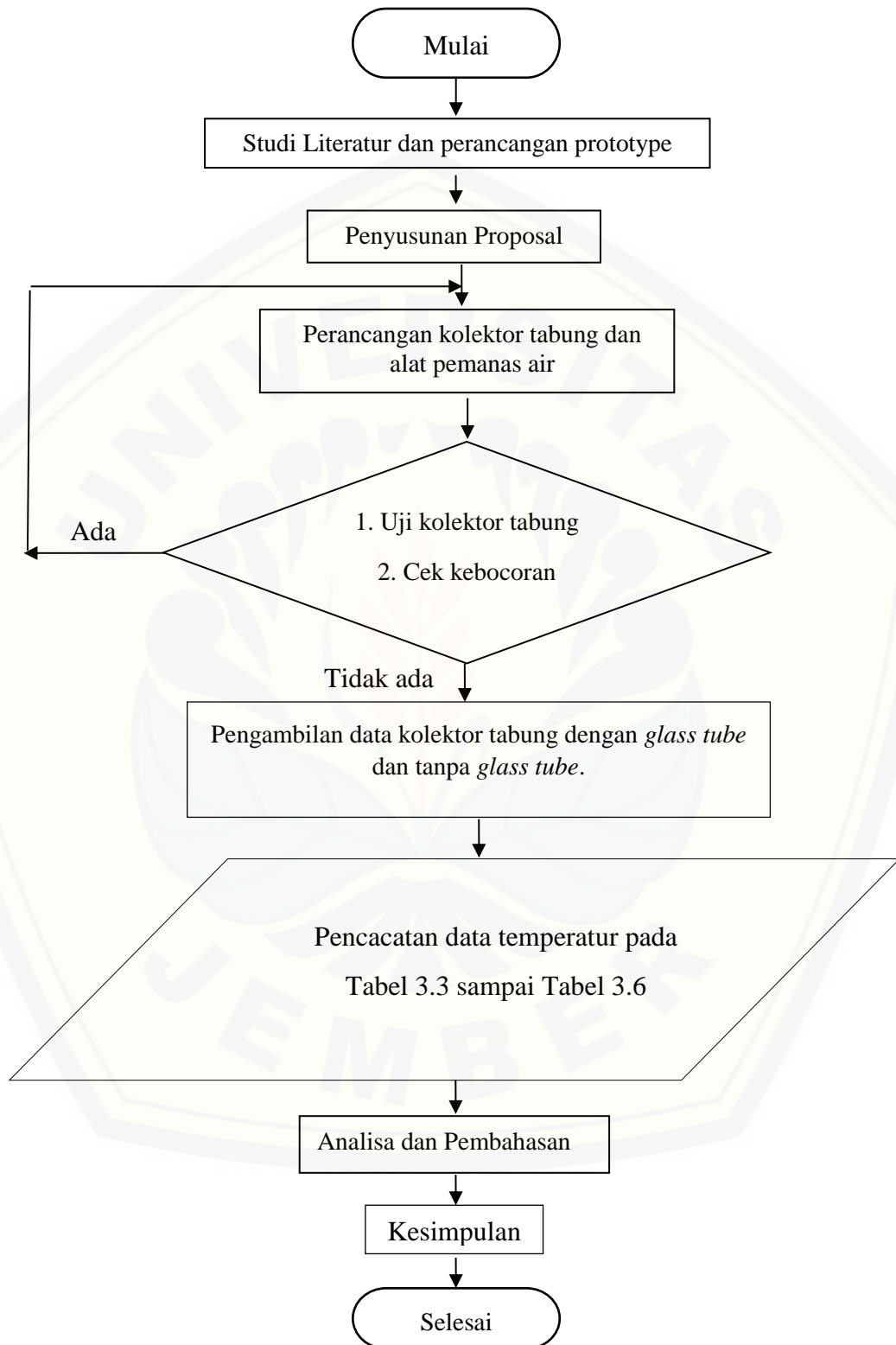
Gambar 3.5 Penampang kolektor tabung a) tanpa *glass tube* b) dengan *glass tube*



Gambar 3.6 Dimensi kolektor tabung



### 3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.7 Diagram alir penelitian

## BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Kolektor tanpa *glass tube* (A) menghasilkan temperatur *outlet* saat *charging* lebih besar dibanding kolektor dengan *glass tube* (B). Penyebab dari kejadian ini adalah panas yang diserap oleh kolektor dengan *glass tube* lebih kecil dibanding kolektor tanpa *glass tube* seperti yang digambarkan pada diagram tahanan termal. Kolektor dengan *glass tube* (B) menghasilkan temperatur *outlet* saat *discharging* lebih besar dibanding kolektor tanpa *glass tube* (A). Kejadian ini dapat terjadi karena *glass tube* dapat menghambat panas pada kolektor keluar sehingga suhu kolektor dengan *glass tube* (B) lebih panas.
- b. Efisiensi kedua kolektor saat *charging* sangat berpengaruh pada laju aliran massa dan radiasi sinar. Jika laju aliran massa dan radiasi sinar semakin besar maka akan menghasilkan efisiensi semakin besar. Kolektor dengan *glass tube* (B) mempunyai keunggulan yaitu dapat mempertahankan suhu kolektor saat radiasi turun sehingga penurunan efisiensi lebih kecil dibanding kolektor tanpa *glass tube* (A). Efisiensi kolektor saat *discharging* dengan *glass tube* (B) lebih besar dibanding kolektor tanpa *glass tube* (A). Kejadian ini mendukung pernyataan bahwa kolektor dengan *glass tube* dapat mempertahankan panas lebih baik dibanding dengan kolektor tanpa *glass tube* (A). Selain itu, efisiensi kolektor saat *discharging* sangat berpengaruh pada laju aliran massa. Pada laju aliran massa 0,04 kg/s penurunan efisiensi cenderung lebih kecil dibanding pada laju aliran massa 0,01 kg/s. Hal ini disebabkan panas pada air dapat bertahan karena dapat menyerap lebih banyak panas dari material perubahan fasa.

## 5.2 Saran

Saran yang dapat disampaikan yaitu untuk penelitian selanjutnya menambah jumlah kolektor dan mengganti *reservoir* dengan menggunakan prinsip penyimpan panas (*thermal energy storage, TES*) yang diharapkan dapat menghasilkan air keluar lebih tinggi dan dapat mempertahankan panas pada air.



**DAFTAR PUSTAKA**

- Atmodigdo, R. 2016. *Perancangan Tangki Pemanas Air Tenaga Surya Kapasitas 60 Liter dan Insulasi Termalnya*. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Buddhi, D. 1997. Thermal performance of a shell and tube PCM storage heat exchanger for industrial waste heat recovery. *Presented at solar world congress, Taejon, Korea*.
- Buttinger, F., T, Beikircher., M, Pro., dan Scho'lkopf, W. 2010. Development of a new flat stationary evacuated CPC-collector for process heat applications. *Solar Energy* 84: 1166–1174.
- Chen, Z., Gu, M., dan Peng, D. 2010. Heat transfer performance analysis of a solar flatplate collector with an integrated metal foam porous structure filled with paraffin. *Appl. Therm. Eng.* 30: 1967–1973.
- Dailami, H., A, Syuhada., dan Irwansyah. 2012. Karakteristik perpindahan panas peleburan parafin -  $Al_2O_3$  sebagai material penyimpanan panas. *Prosiding Seminar Nasional Energi Terbarukan Dan Produksi Bersih*.
- Darwin. 2013. Analisa pengaruh konfigurasi pipa pemanas air surya terhadap efisiensi. *Jurnal ROTOR*, 6(1).
- Dincer, I. 1999. Evaluation and selection of energy storage systems for solar thermal applications. *International Journal of Energy Research*, 23: 1017-1028.
- Duffie, J.A. dan Beckman, W.A. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Second Ed. 440 Wiley-Interscience, New York.
- Dwivedi, V. 2009. *Thermal Modelling and Control of Domestic Hot Water Tank*. Glasgow: University of Strathclyde.
- Flavin, C. dan Lenssen, N. 1995. *Gelombang Energi Revolusi*. Edisi pertama. Jakarta: Yayasan Obor Indonesia.
- Holman, J.P. 1993. *Perpindahan Kalor*. Edisi pertama. Jakarta: Erlangga
- Irwandi, Z. A. 2015. Pengaruh bentuk kolektor konsentrator terhadap efisiensi pemanas air surya. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)*, 20.
- Jansen, Ted D. 1995. *Teknologi Rekasa Surya*. Edisi pertama. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.

- Kalogirou, S. A. 2004. Solar thermal collectors and applications. *Energy and Combustion Science* 30: 231–295.
- Kreith, F. 1997. *Prinsip-prinsip Perpindahan Panas*. Edisi 3. Jakarta: Erlangga.
- Kristanto, P. dan San, Y. K. 2001. Pengaruh tebal plat dan jarak antar pipa terhadap performansi kolektor surya plat datar. *Jurnal Teknik Mesin* 3(2): 47 – 51.
- Liangdong, Ma., Zhen, Lu., Jili, Zhang., dan Liang, Ruobing. 2010. Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. *Building and Environment* 45: 1959-1967.
- Mishra, R.K., Garg, V., dan Tiwari, G.N. 2015. Thermal modeling and development of characteristic equations of evacuated tubular collector (ETC). *Sol. Energy* 116: 165–176.
- Mishra, R.K., Garg, V., dan Tiwari, G.N. 2017. Energy matrices of U-shaped evacuated tubular collector (ETC) integrated with compound parabolic concentrator (CPC). *Solar Energy* 153: 531–539.
- Murugavel, K. K. dan Devanarayanan, K. 2014. Integrated collector storage solar water heater with compound parabolik concentrator – development and progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39: 51-64.
- Muthukumar, P., Naik, B. K., Varshney, A. dan Somayaji, C. 2016. Modelling and performance analysis of U type evacuated tube solar collector using different working fluids. *Energy Procedia*. 90: 227-237.
- Nadjib, M., Sukamta., Novi, Caroko., dan Hadji A.S.1,d, Tito. 2015. Studi eksperimental penyimpanan energi termal pada tangki pemanas air tenaga surya yang berisi PCM. *Banjarmasin: Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)*.
- Putra, N. Adi, W., dan Amin, M. 2015. Uji eksperimental kinerja PCM beeswax sebagai thermal storage pada aplikasi pemanas air domestik. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)*.
- Piotr, F., dan Robert, S. 2017. Effect of a low cost parabolic reflector on the charging efficiency of an evacuated tube collector/storage system with a PCM. *Solar Energy* 144: 758–766.
- Piotr, F., dan Robert, S. 2017. Effect of PCM application inside an evacuated tube collector on the thermal performance of a domestic hot water system. *Energy and Building*.



- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., dan Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 318–345.
- Soeparman, S. 2015. *Teknologi Tenaga Surya*. Malang: Universitas Brawijaya Press.
- Stoecker, W. F. dan W. J. Jones. 1996. *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*. Edisi 2. Jakarta: Erlangga.
- Tahmineh, S., Alibakhsh, K., Kiana, R., Ameneh, H.H., Faezeh, A. dan Omid, M. 2017. Thermoeconomic and environmental analysis of solar flat plate and evacuated tube collectors in cold climatic conditions. *Renewable Energy*.
- Thaib, R., Hamdani., Irwansyah., dan Zaini. 2014. Investigation performance of solar water heater system using paraffin wax. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 9(10).
- Vanhas, K. 2017. Penambahan minyak goreng pada PCM paraffin guna meningkatkan karakteristik penyimpanan termal pada media penyimpan panas. *UNEJ JURNAL Teknik Mesin* 2017, 5 (11): 1-4.
- Yong, K., dan Taebeom, S. 2006. Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube. *Renewable Energy* 32: 772–795.

## Lampiran 4.1 Data hasil penelitian

Tabel 4.1. Data temperatur *charging* kolektor tanpa *glass tube* (0,01 kg/s)

T (menit)	I (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>gtA</sub> (°C)	T <sub>gtbA</sub> (°C)	T <sub>absA</sub> (°C)	T <sub>pcmA</sub> (°C)	T <sub>A</sub> (°C)
0	717,3	41	47,8	47,8	30,7	26
20	749,7	43	62	55,75	34,65	32,1
40	726,6	45	62,4	56,8	36,75	33
60	767,8	46,2	62,8	57,65	37,55	36,9
80	746	45,8	62,8	58,95	41,6	38,4
100	746,2	43,8	63	60,1	43,35	40,6
120	719,9	40,7	64,2	60,95	45,15	41,1
140	735,3	37,5	74,6	61,9	47,25	44
160	728,4	40	75,2	63,45	51,25	45,1
180	731,5	36,7	74,8	65,75	52,7	47,2
200	761,4	38,8	72,8	66,65	54,1	49,9
220	754,1	43,2	76	69,15	56,05	51
240	774	41,3	74,1	71,15	58,1	52,8

Tabel 4.2 Data temperatur *charging* kolektor dengan *glass tube* (0,01 kg/s)

T (menit)	I (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>gtB</sub> (°C)	T <sub>gtbB</sub> (°C)	T <sub>absB</sub> (°C)	T <sub>pcmB</sub> (°C)	T <sub>B</sub> (°C)
0	717,3	42,9	43,4	43,7	31,5	26
20	749,7	54	53,1	51,7	32	31,5
40	726,6	54,9	55,1	54,5	35,35	33
60	767,8	55,2	55,3	56,6	36,75	35,2
80	746	57,9	57,2	59,1	39,2	37
100	746,2	60,7	57	60,3	40,35	39,5
120	719,9	63,6	59,3	61,55	41,95	40,5
140	735,3	64	60	62,35	43,35	42,6
160	728,4	66,9	60,5	63,2	44,9	43,5
180	731,5	70	60,8	64,45	48,1	45,1
200	761,4	70,4	60,7	65,35	49,8	47,2
220	754,1	71	61	66,1	51,75	48,7
240	774	71,4	61,8	67,1	54,1	50,9

Tabel 4.3 Data temperatur *charging* kolektor tanpa *glass tube* (0,04 kg/s)

T (menit)	I (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>gtA</sub> (°C)	T <sub>gtbA</sub> (°C)	T <sub>absA</sub> (°C)	T <sub>pcmA</sub> (°C)	T <sub>A</sub> (°C)
0	717,9	41,7	44,1	47,9	30,1	29,5
20	735,5	49,9	52,2	52,35	40,25	37,1
40	716,2	45,5	52,2	54,6	42,25	40,9
60	706,5	47,2	56,6	57,35	48,7	42,5
80	681,5	42,5	47,1	58,35	44	42,9
100	719,3	45,1	52,7	60,45	47,7	46,3
120	707,4	46,3	49,5	61,5	48,15	47,1
140	712,1	51,1	52,7	63,15	53,55	50,3
160	701,7	45,7	50,5	64	51,25	51,5
180	722	38,2	51,3	65,15	54,5	53,2
200	728,8	37,2	48	66,75	52,15	56,2
220	711,8	40,8	50,8	67,8	55,85	57
240	700,2	38,1	58,7	68,65	56,75	57,3

Tabel 4.4 Data temperatur *charging* kolektor dengan *glass tube* (0,04 kg/s)

T (menit)	I (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>gtB</sub> (°C)	T <sub>gtbB</sub> (°C)	T <sub>absB</sub> (°C)	T <sub>pcmB</sub> (°C)	T <sub>B</sub> (°C)
0	717,9	49,8	36,8	38,5	27,3	29
20	735,5	60,1	45,3	41,35	27,75	35,4
40	716,2	61,9	47,8	44,25	30,15	38,3
60	706,5	63,1	48,9	46,45	32,4	40,2
80	681,5	63,4	49,1	47,95	38,1	41,4
100	719,3	67,7	54,1	49,95	42,85	43,2
120	707,4	71,9	56,8	52,25	47,3	45,1
140	712,1	69,8	53,8	54,75	47,65	47,5
160	701,7	76	59,1	56,15	51,9	48,8
180	722	78,3	60,2	57,55	51,9	50,2
200	728,8	78,9	61,5	58,75	54,55	52,3
220	711,8	79,4	61,9	60	54,95	53,7
240	700,2	80,5	62,7	61,2	55,5	54,7

Tabel 4.5 Data temperatur *discharging* kolektor tanpa *glass tube* (0,01 kg/s)

T (menit)	T <sub>gtA</sub> (°C)	T <sub>gtbA</sub> (°C)	T <sub>absA</sub> (°C)	T <sub>pcmA</sub> (°C)	T <sub>A</sub> (°C)
0	41,3	74,1	71,15	58,1	49,7
20	35,1	41,5	51,05	56,4	47,5
40	34,4	38,6	46,8	54,85	45,9
60	32	36,2	43,4	53,6	44,8
80	32	36	42,05	51,25	43,2
100	31,4	34,8	40,35	48,35	41,6
120	30,4	34,2	39,3	46,35	40,7
140	30,7	33,8	38,35	45,6	40,4
160	30,4	33,6	37,55	40,75	38,5
180	30,2	33,3	36,35	37,6	37,5
200	29,4	32,1	35,6	34,05	36,5
220	30	32	35,45	31,4	36
240	30,3	32	35,2	26,4	35,7

Tabel 4.6 Data temperatur *discharging* kolektor dengan *glass tube* (0,01 kg/s)

T (menit)	T <sub>gtB</sub> (°C)	T <sub>gtbB</sub> (°C)	T <sub>absB</sub> (°C)	T <sub>pcmB</sub> (°C)	T <sub>B</sub> (°C)
0	71,4	61,8	67,75	54,1	45,9
20	44,3	43,6	49,3	53,35	44,8
40	41,8	40,9	47,45	52,25	43,5
60	40,7	39,6	45,7	51,65	42,9
80	39,4	38,7	42,35	51,2	42,5
100	39	38	42,7	50,8	42,2
120	38,8	37,7	42,4	50,05	41,7
140	38,3	37,5	41,4	49,4	41,3
160	37,5	37,1	40,5	48,25	40,7
180	37,2	36,8	40	47,2	40,2
200	37	36,6	39,95	46,55	39,9
220	36,6	36	39,6	42,5	38,6
240	36,5	35,9	39,15	39,75	38,2

Tabel 4.7 Data temperatur *discharging* kolektor tanpa *glass tube* (0,04 kg/s)

T (menit)	T <sub>gtA</sub> (°C)	T <sub>gtbA</sub> (°C)	T <sub>absA</sub> (°C)	T <sub>pcmA</sub> (°C)	T <sub>A</sub> (°C)
0	38,1	58,7	67,8	56,75	57,3
20	33,7	37,5	46,75	56,05	56,6
40	31,9	35	43,7	53,65	54,7
60	30	34	41,95	50,65	52,5
80	31,6	35	40,9	48,25	50,8
100	30	34	40,3	46,05	49,4
120	30,7	33	36,65	42,5	47,2
140	30,1	32,6	35,05	40,7	46,1
160	29,3	31,3	34	37,75	44,4
180	29	31,3	33,75	35,65	43,2
200	30,2	31,9	33,5	34,15	42,5
220	29,4	31,7	33,9	33,05	42,1
240	29,1	32,4	33,25	31,65	41,7

Tabel 4.8 Data temperatur *discharging* kolektor dengan *glass tube* (0,04 kg/s)

T (menit)	T <sub>gtB</sub> (°C)	T <sub>gtbB</sub> (°C)	T <sub>absB</sub> (°C)	T <sub>pcmB</sub> (°C)	T <sub>B</sub> (°C)
0	80,5	62,7	69,2	55,5	54,7
20	46,5	45,4	51,2	54,15	53,2
40	41,7	41,1	46,4	52,9	52
60	40,1	39,2	44,35	50,95	50,3
80	38,5	38,2	43,5	49,05	48,7
100	38	37,3	42,45	48,55	48,3
120	37,4	37,1	41,85	47,1	47,2
140	36,9	36,4	40,95	46,15	46,5
160	36,4	35,9	40,25	45,3	45,9
180	35,9	35,5	39,8	44	45
200	35,5	35,1	39,3	43,2	44,5
220	34,1	34,8	38,95	41,65	43,7
240	34,8	34,5	38,45	40,35	43,2

## Lampiran 4.2 Perhitungan

## 1. Lama Tinggal Air Pada Kolektor (0,01 kg/s)

Diketahui : Jari-jari pipa air ( $r$ ) = 0,005 m

Panjang pipa air ( $l$ ) = 2 m

Massa jenis air ( $\rho$ ) = 1000 kg/m<sup>3</sup>

Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) = 0,01 kg/s

Ditanyakan : Lama tinggal air berada di kolektor



Dijawab :  $V_{\text{pipa}} = \pi \cdot r^2 \cdot l$   
 $V_{\text{pipa}} = (3,14) \cdot (0,005^2) \cdot (2)$   
 $V_{\text{pipa}} = 0,000187 \text{ m}^3$

$$\dot{m} = \frac{\text{massa}}{\text{waktu}}$$

$$\dot{m} = \frac{\rho \cdot V}{t}$$

$$0,01 = \frac{1000 \cdot (0,000187)}{t}$$

$$t = \frac{1000 \cdot (0,000187)}{0,01}$$

$$t = 18,7 \text{ s}$$

2. Lama Tinggal Air Pada Kolektor (0,04 kg/s)

Diketahui : Jari-jari pipa air ( $r$ ) = 0,005 m

Panjang pipa air ( $l$ ) = 2 m

Massa jenis air ( $\rho$ ) = 1000 kg/m<sup>3</sup>

Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) = 0,04 kg/s

Ditanyakan : Lama tinggal air berada di kolektor

Dijawab :  $V_{\text{pipa}} = \pi \cdot r^2 \cdot l$

$$V_{\text{pipa}} = (3,14) \cdot (0,005^2) \cdot (2)$$

$$V_{\text{pipa}} = 0,000187 \text{ m}^3$$

$$\dot{m} = \frac{\text{massa}}{\text{waktu}}$$

$$\dot{m} = \frac{\rho \cdot V}{t}$$

$$0,01 = \frac{1000 \cdot (0,000187)}{t}$$

$$t = \frac{1000 \cdot (0,000187)}{0,04}$$

$$t = 4,7 \text{ s}$$

Untuk menghitung efisiensi kolektor saat *charging* digunakan rumus pada Persamaan 2.6 dan *discharging* digunakan rumus pada Persamaan 2.7.

## 3. Luasan Absorber

Diketahui : Panjang absorber ( $l$ ) = 1 m  
Diameter absorber ( $D$ ) = 0,0539 m

Ditanyakan : Luasan absorber

Dijawab :  $A_{\text{abs}} = \pi \cdot D \cdot l$   
 $A_{\text{abs}} = (3,14) (0,0539) (1)$   
 $A_{\text{abs}} = 0,169 \text{ m}^2$

## 4. Mencari Panas Spesifik dari Material Perubahan Fasa

Diketahui : Panas spesifik minyak ( $C_{\text{minyak}}$ ) = 1909 J/kg °C  
Panas spesifik parafin ( $C_{\text{parafin}}$ ) = 2890 J/kg °C

Ditanyakan : Panas spesifik campuran 70 % parafin – 30 % minyak

Dijawab :  $C_{\text{pcm}} = (70 \% C_{\text{parafin}}) + 30 \% (C_{\text{minyak}})$   
 $C_{\text{pcm}} = (0,7 (2890)) + (0,3 (1909))$   
 $C_{\text{pcm}} = 2595,75 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

5. Efisiensi Kolektor tanpa *Glass Tube* (A) Saat *Charging* (0,01 kg/s)

Diketahui : Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) = 0,01 kg/s  
Panas spesifik ( $C$ ) = 4200 J/kg °C

Ditanyakan : Efisiensi kolektor menit ke 20 – 240 pada kolektor tanpa *glass tube*

Dijawab :

a. Efisiensi pada menit ke 20

$$\eta = \frac{Q_{\text{air}}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A20} - T_{A0})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (32,1 - 26)}{(749,7)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{256,2}{126,88} \%$$

$$\eta = 2,02 \%$$

b. Efisiensi pada menit ke 40

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A40} - T_{A20})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (33 - 32,1)}{(726,6)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{37,80}{122,97} \%$$

$$\eta = 0,31 \%$$

c. Efisiensi pada menit ke 60

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A60} - T_{A40})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (36,9 - 33)}{(767,8)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{163,80}{129,95} \%$$

$$\eta = 1,26 \%$$

d. Efisiensi pada menit ke 80

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A80} - T_{A60})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (38,4 - 36,9)}{(746)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{63}{126,26} \%$$

$$\eta = 0,50 \%$$

e. Efisiensi pada menit ke 100

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A100} - T_{A80})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (40,6 - 38,4)}{(746,2)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{92,4}{126,29} \%$$

$$\eta = 0,73 \%$$

f. Efisiensi pada menit ke 120

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A120} - T_{A100})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (41,1 - 40,6)}{(719,9)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{21}{121,84} \%$$

$$\eta = 0,17 \%$$

g. Efisiensi pada menit ke 140

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A140} - T_{A120})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (44 - 41,1)}{(735,3)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{121,80}{124,45} \%$$

$$\eta = 0,98 \%$$

h. Efisiensi pada menit ke 160

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A160} - T_{A140})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (45,1 - 44)}{(728,4)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{46,2}{123,28} \%$$

$$\eta = 0,37 \%$$

i. Efisiensi pada menit ke 180

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A180} - T_{A160})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (47,2 - 45,1)}{(731,5)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{88,2}{123,8} \%$$

$$\eta = 0,71 \%$$

j. Efisiensi pada menit ke 200

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A200} - T_{A180})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (49,9 - 47,2)}{(761,4)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{113,4}{128,86} \%$$

$$\eta = 0,88 \%$$

k. Efisiensi pada menit ke 220

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A220} - T_{A200})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (51 - 49,9)}{(754,1)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{46,2}{127,63} \%$$

$$\eta = 0,36 \%$$

l. Efisiensi pada menit ke 240

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A240} - T_{A220})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (52,8 - 51)}{(774)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{75,6}{131} \%$$

$$\eta = 0,58 \%$$

6. Efisiensi Kolektor dengan *Glass Tube* (B) Saat *Charging* (0,01 kg/s)

Diketahui : Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) = 0,01 kg/s

Panas spesifik (C) = 4200 J/kg °C



Ditanyakan : Efisiensi kolektor menit ke 20 - 240 pada kolektor dengan *glass tube*

Dijawab :

a. Efisiensi pada menit ke 20

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B20} - T_{B0})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (31,5 - 26)}{(749,7)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{231}{126,88} \%$$

$$\eta = 1,82 \%$$

b. Efisiensi pada menit ke 40

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B40} - T_{B20})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (33 - 31,5)}{(726,6)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{63}{122,97} \%$$

$$\eta = 0,51 \%$$

c. Efisiensi pada menit ke 60

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B60} - T_{B40})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (35,2 - 33)}{(767,8)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{92,40}{129,95} \%$$

$$\eta = 0,71 \%$$

d. Efisiensi pada menit ke 80

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B80} - T_{B60})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (37 - 35,2)}{(746)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{75,6}{126,26} \%$$

$$\eta = 0,60 \%$$

e. Efisiensi pada menit ke 100

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B100} - T_{B80})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (39,5 - 37)}{(746,2)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{105}{126,29} \%$$

$$\eta = 0,83 \%$$

f. Efisiensi pada menit ke 120

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B120} - T_{B100})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (40,5 - 39,5)}{(719,9)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{42}{121,84} \%$$

$$\eta = 0,34 \%$$

g. Efisiensi pada menit ke 140

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B140} - T_{B120})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (42,6 - 40,5)}{(735,3)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{88,20}{124,45} \%$$

$$\eta = 0,71 \%$$

h. Efisiensi pada menit ke 160

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B160} - T_{B140})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (43,5 - 42,6)}{(728,4)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{37,8}{123,28} \%$$

$$\eta = 0,31 \%$$

i. Efisiensi pada menit ke 180

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B180} - T_{B160})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (45,1 - 43,2)}{(731,5)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{67,2}{123,8} \%$$

$$\eta = 0,54 \%$$

j. Efisiensi pada menit ke 200

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B200} - T_{B180})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (47,2 - 45,1)}{(761,4)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{88,2}{128,86} \%$$

$$\eta = 0,68 \%$$

k. Efisiensi pada menit ke 220

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B220} - T_{B200})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (48,7 - 47,2)}{(754,1)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{63}{127,63} \%$$

$$\eta = 0,49 \%$$

1. Efisiensi pada menit ke 240

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B240} - T_{B220})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (50,9 - 48,7)}{(774)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{92,4}{131} \%$$

$$\eta = 0,71 \%$$

7. Efisiensi Kolektor tanpa *Glass Tube* (A) Saat *Charging* (0,04 kg/s)

Diketahui : Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) = 0,04 kg/s

Panas spesifik (C) = 4200 J/kg °C

Ditanyakan : Efisiensi kolektor menit ke 20 - 240 pada kolektor tanpa *glass tube*

Dijawab :

a. Efisiensi pada menit ke 20

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A20} - T_{A0})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (37,1 - 29,5)}{(735,5)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{1276,80}{124,48} \%$$

$$\eta = 10,26 \%$$

b. Efisiensi pada menit ke 40

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A40} - T_{A20})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (40,9 - 39,1)}{(716,2)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{302,40}{121,21} \%$$

$$\eta = 2,49 \%$$

c. Efisiensi pada menit ke 60

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A60} - T_{A40})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (42,5 - 40,9)}{(706,5)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{268,80}{119,57} \%$$

$$\eta = 2,25 \%$$

d. Efisiensi pada menit ke 80

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A80} - T_{A60})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (42,9 - 42,5)}{(681,5)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{67,20}{115,34} \%$$

$$\eta = 0,58 \%$$

e. Efisiensi pada menit ke 100

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A100} - T_{A80})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (46,3 - 42,9)}{(719,3)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{571,20}{121,74} \%$$

$$\eta = 4,69 \%$$

f. Efisiensi pada menit ke 120

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$



$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A120} - T_{A100})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (47,1 - 46,3)}{(707,4)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{134,40}{119,72} \%$$

$$\eta = 1,12 \%$$

g. Efisiensi pada menit ke 140

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A140} - T_{A120})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (50,3 - 47,1)}{(712,1)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{537,60}{120,52} \%$$

$$\eta = 4,46 \%$$

h. Efisiensi pada menit ke 160

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A160} - T_{A140})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (51,5 - 50,3)}{(701,7)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{201,60}{118,76} \%$$

$$\eta = 1,70 \%$$

i. Efisiensi pada menit ke 180

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A180} - T_{A160})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (53,2 - 51,5)}{(722)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{285,60}{122,2} \%$$

$$\eta = 2,34 \%$$

j. Efisiensi pada menit ke 200

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A200} - T_{A180})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (56,2 - 53,2)}{(728,8)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{504}{123,35} \%$$

$$\eta = 4,09 \%$$

k. Efisiensi pada menit ke 220

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A220} - T_{A200})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (57 - 56,2)}{(711,8)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{134,40}{120,47} \%$$

$$\eta = 1,12 \%$$

l. Efisiensi pada menit ke 240

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A240} - T_{A220})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (57,3 - 57)}{(700,2)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{50,40}{118,51} \%$$

$$\eta = 0,43 \%$$

8. Efisiensi Kolektor dengan *Glass Tube* (B) Saat *Charging* (0,04 kg/s)

Diketahui : Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) = 0,04 kg/s

Panas spesifik (C) = 4200 J/kg °C

Ditanyakan : Efisiensi kolektor menit ke 20 – 240 pada kolektor dengan *glass tube*

Dijawab :

a. Efisiensi pada menit ke 20

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B20} - T_{B0})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (35,4 - 29)}{(735,5)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{1075,20}{124,48} \%$$

$$\eta = 8,64 \%$$

b. Efisiensi pada menit ke 40

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B40} - T_{B20})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (38,3 - 35,4)}{(716,2)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{487,20}{121,21} \%$$

$$\eta = 4,02 \%$$

c. Efisiensi pada menit ke 60

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B60} - T_{B40})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (40,2 - 38,3)}{(706,5)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{319,20}{119,57} \%$$

$$\eta = 2,67 \%$$

d. Efisiensi pada menit ke 80

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B80} - T_{B60})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (41,4 - 40,2)}{(681,5)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{201,60}{115,34} \%$$

$$\eta = 0,60 \%$$

e. Efisiensi pada menit ke 100

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B100} - T_{B80})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (43,2 - 41,4)}{(719,3)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{302,4}{121,74} \%$$

$$\eta = 2,48 \%$$

f. Efisiensi pada menit ke 120

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B120} - T_{B100})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (45,1 - 43,2)}{(707,4)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{319,2}{119,72} \%$$

$$\eta = 2,67 \%$$

g. Efisiensi pada menit ke 140

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B140} - T_{B120})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (47,5 - 45,1)}{(712,1)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{403,20}{120,52} \%$$

$$\eta = 3,35 \%$$

h. Efisiensi pada menit ke 160

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B160} - T_{B140})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (48,8 - 47,5)}{(701,7)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{208,40}{118,76} \%$$

$$\eta = 1,84 \%$$

i. Efisiensi pada menit ke 180

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B180} - T_{B160})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (50,2 - 48,8)}{(722)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{235,2}{122,2} \%$$

$$\eta = 1,92 \%$$

j. Efisiensi pada menit ke 200

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B200} - T_{B180})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (52,3 - 50,2)}{(728,8)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{352,80}{123,35} \%$$

$$\eta = 0,80 \%$$

k. Efisiensi pada menit ke 220

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B220} - T_{B200})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (53,7 - 52,3)}{(711,8)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{235,2}{120,47} \%$$

$$\eta = 1,95 \%$$

## 1. Efisiensi pada menit ke 240

$$\eta = \frac{Q_{air}}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B240} - T_{B220})}{I \cdot A}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (54,7 - 53,7)}{(700,2)(0,169)}$$

$$\eta = \frac{168}{118,51} \%$$

$$\eta = 1,42 \%$$

9. Efisiensi Kolektor tanpa *Glass Tube* (A) Saat *Discharging* (0,01 kg/s)

Diketahui : Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) = 0,01 kg/s  
 Panas spesifik (C) = 4200 J/kg °C  
 Massa PCM (m) = 2,04 kg  
 Waktu (t) = 1200 s  
 Panas spesifik PCM ( $C_{pcm}$ ) = 2595,75 J/kg °C

Ditanyakan : Efisiensi kolektor menit ke 20 – 240 pada kolektor tanpa *glass tube*

Dijawab :

## a. Efisiensi pada menit ke 20

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A20} - T_{A0})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA20} - T_{pcmA0})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (50,6 - 52,8)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(56,2 - 58,1)}$$

$$\eta = \frac{-92,4}{-7,5} \%$$

$$\eta = 12,32 \%$$

## b. Efisiensi pada menit ke 40

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A40} - T_{A20})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA40} - T_{pcmA20})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (49 - 50,6)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(54,85 - 56,4)}$$

$$\eta = \frac{-67,2}{-6,84} \%$$

$$\eta = 9,82 \%$$

## c. Efisiensi pada menit ke 60



$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A60} - T_{A40})}{\frac{\dot{m}}{t} c_{pcm} (T_{pcmA60} - T_{pcmA40})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (47,9 - 49)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (53,6 - 54,85)}$$

$$\eta = \frac{-46,2}{-5,52} \%$$

$$\eta = 8,38 \%$$

d. Efisiensi pada menit ke 80

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A80} - T_{A60})}{\frac{\dot{m}}{t} c_{pcm} (T_{pcmA80} - T_{pcmA60})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (46,3 - 47,9)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (51,25 - 53,6)}$$

$$\eta = \frac{-67,2}{-10,37} \%$$

$$\eta = 6,48 \%$$

e. Efisiensi pada menit ke 100

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A100} - T_{A80})}{\frac{\dot{m}}{t} c_{pcm} (T_{pcmA100} - T_{pcmA80})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (44,07 - 46,3)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (48,35 - 51,25)}$$

$$\eta = \frac{-67,2}{-12,8} \%$$

$$\eta = 5,25 \%$$

f. Efisiensi pada menit ke 120

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A120} - T_{A100})}{\frac{\dot{m}}{t} c_{pcm} (T_{pcmA120} - T_{pcmA100})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (43,8 - 44,07)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (46,35 - 48,35)}$$

$$\eta = \frac{-37,8}{-8,83} \%$$

$$\eta = 4,28 \%$$

g. Efisiensi pada menit ke 140

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A140} - T_{A120})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA140} - T_{pcmA120})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (43,5 - 43,8)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(45,6 - 46,35)}$$

$$\eta = \frac{-12,6}{-3,31} \%$$

$$\eta = 3,81 \%$$

h. Efisiensi pada menit ke 160

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A160} - T_{A140})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA160} - T_{pcmA140})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (41,6 - 43,5)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(40,75 - 45,6)}$$

$$\eta = \frac{-79,8}{-21,4} \%$$

$$\eta = 3,73 \%$$

i. Efisiensi pada menit ke 180

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A180} - T_{A160})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA180} - T_{pcmA160})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (40,6 - 41,6)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(37,6 - 40,75)}$$

$$\eta = \frac{-42}{-13,9} \%$$

$$\eta = 3,02 \%$$

j. Efisiensi pada menit ke 200

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A200} - T_{A180})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA200} - T_{pcmA180})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (39,6 - 40,6)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(34,05 - 37,6)}$$

$$\eta = \frac{-42}{-15,67} \%$$

$$\eta = 2,68 \%$$

k. Efisiensi pada menit ke 220

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}} \\ \eta &= \frac{\dot{m} c (T_{A220} - T_{A200})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA220} - T_{pcmA200})} \\ \eta &= \frac{(0,01) (4200) (39,1 - 39,6)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (31,4 - 34,05)} \\ \eta &= \frac{-21}{-11,69} \% \\ \eta &= 1,80 \%\end{aligned}$$

l. Efisiensi pada menit ke 240

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}} \\ \eta &= \frac{\dot{m} c (T_{A240} - T_{A220})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA240} - T_{pcmA220})} \\ \eta &= \frac{(0,01) (4200) (38,8 - 39,1)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (26,4 - 31,4)} \\ \eta &= \frac{-12,6}{-22,06} \% \\ \eta &= 0,57 \%\end{aligned}$$

10. Efisiensi Kolektor dengan *Glass Tube* (B) Saat *Discharging* (0,01 kg/s)

Diketahui : Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) = 0,01 kg/s  
Panas spesifik (C) = 4200 J/kg °C  
Massa PCM (m) = 2,04 kg  
Waktu (t) = 1200 s

Panas spesifik PCM ( $C_{pcm}$ ) = 2595,75 J/kg °C

Ditanyakan : Efisiensi kolektor menit ke 20 - 240 pada kolektor dengan *glass tube*

Dijawab :

a. Efisiensi pada menit ke 20

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}} \\ \eta &= \frac{\dot{m} c (T_{B20} - T_{B0})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB20} - T_{pcmB0})} \\ \eta &= \frac{(0,01) (4200) (49,8 - 50,9)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (53,35 - 54,1)} \\ \eta &= \frac{-46,2}{-3,31} \% \\ \eta &= 13,96 \%\end{aligned}$$

b. Efisiensi pada menit ke 40

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B40} - T_{B20})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB40} - T_{pcmB20})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (48,5 - 49,8)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(52,25 - 53,35)}$$

$$\eta = \frac{-54,6}{-4,85} \%$$

$$\eta = 11,25 \%$$

c. Efisiensi pada menit ke 60

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B60} - T_{B40})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB60} - T_{pcmB40})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (47,9 - 48,5)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(51,65 - 52,25)}$$

$$\eta = \frac{-25,2}{-2,65} \%$$

$$\eta = 9,52 \%$$

d. Efisiensi pada menit ke 80

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B80} - T_{B60})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB80} - T_{pcmB60})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (47,5 - 47,9)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(51,2 - 51,65)}$$

$$\eta = \frac{-16,8}{-1,99} \%$$

$$\eta = 8,46 \%$$

e. Efisiensi pada menit ke 100

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B100} - T_{B80})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB100} - T_{pcmB80})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (47,2 - 47,5)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(50,8 - 51,2)}$$

$$\eta = \frac{-12,6}{-1,77} \%$$

$$\eta = 7,14 \%$$

f. Efisiensi pada menit ke 120

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B120} - T_{B100})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB120} - T_{pcmB100})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (46,7 - 47,2)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(50,05 - 50,8)}$$

$$\eta = \frac{-21}{-3,31} \%$$

$$\eta = 6,35 \%$$

g. Efisiensi pada menit ke 140

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B140} - T_{B120})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB140} - T_{pcmB120})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (46,3 - 46,7)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(49,4 - 50,05)}$$

$$\eta = \frac{-16,8}{-2,87} \%$$

$$\eta = 5,86 \%$$

h. Efisiensi pada menit ke 160

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B160} - T_{B140})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB160} - T_{pcmB140})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (45,7 - 46,3)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(48,25 - 49,4)}$$

$$\eta = \frac{-25,20}{-5,07} \%$$

$$\eta = 4,97 \%$$

i. Efisiensi pada menit ke 180

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B180} - T_{B160})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB180} - T_{pcmB160})}$$

$$\eta = \frac{(0,01) (4200) (45,2 - 45,7)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(47,2 - 48,25)}$$

$$\eta = \frac{-21}{-4,63} \%$$

$$\eta = 4,53 \%$$

j. Efisiensi pada menit ke 200

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}} \\ \eta &= \frac{\dot{m} c (T_{B200} - T_{B180})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB200} - T_{pcmB180})} \\ \eta &= \frac{(0,01) (4200) (44,9 - 45,2)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (46,55 - 47,2)} \\ \eta &= \frac{-12,6}{-2,87} \% \\ \eta &= 4,39 \%\end{aligned}$$

k. Efisiensi pada menit ke 220

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}} \\ \eta &= \frac{\dot{m} c (T_{B220} - T_{B200})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB220} - T_{pcmB200})} \\ \eta &= \frac{(0,01) (4200) (43,6 - 44,9)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (42,5 - 46,55)} \\ \eta &= \frac{-54,6}{-17,87} \% \\ \eta &= 3,06 \%\end{aligned}$$

l. Efisiensi pada menit ke 240

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}} \\ \eta &= \frac{\dot{m} c (T_{B240} - T_{B220})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB240} - T_{pcmB220})} \\ \eta &= \frac{(0,01) (4200) (43,2 - 43,6)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (39,75 - 42,5)} \\ \eta &= \frac{-16,8}{-12,14} \% \\ \eta &= 1,38 \%\end{aligned}$$

11. Efisiensi Kolektor tanpa *Glass Tube* (A) Saat *Discharging* (0,04 kg/s)

Diketahui : Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) = 0,04 kg/s  
 Panas spesifik (C) = 4200 J/kg °C  
 Massa PCM (m) = 2,04 kg  
 Waktu (t) = 1200 s  
 Panas spesifik PCM ( $C_{pcm}$ ) = 2595,75 J/kg °C

Ditanyakan : Efisiensi kolektor menit ke 20 – 120 pada kolektor tanpa *glass tube*

Dijawab :



a. Efisiensi pada menit ke 20

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A20} - T_{A0})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA20} - T_{pcmA0})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (56,6 - 57,3)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (56,05 - 56,75)}$$

$$\eta = \frac{-117,6}{-3,09} \%$$

$$\eta = 38,07 \%$$

b. Efisiensi pada menit ke 40

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A40} - T_{A20})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA40} - T_{pcmA20})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (54,7 - 56,6)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (53,65 - 56,05)}$$

$$\eta = \frac{-319,2}{-10,59} \%$$

$$\eta = 30,14 \%$$

c. Efisiensi pada menit ke 60

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A60} - T_{A40})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA60} - T_{pcmA40})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (52,5 - 54,7)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (50,65 - 53,65)}$$

$$\eta = \frac{-369,9}{-13,24} \%$$

$$\eta = 27,92 \%$$

d. Efisiensi pada menit ke 80

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A80} - T_{A60})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA80} - T_{pcmA60})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (50,8 - 52,5)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (48,25 - 50,65)}$$

$$\eta = \frac{-285,6}{-10,59} \%$$

$$\eta = 26,97 \%$$

e. Efisiensi pada menit ke 100

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}} \\ \eta &= \frac{\dot{m} c (T_{A100} - T_{A80})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA100} - T_{pcmA80})} \\ \eta &= \frac{(0,04) (4200) (49,4 - 50,8)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(46,05 - 48,25)} \\ \eta &= \frac{-235,2}{-9,71} \% \\ \eta &= 24,23 \%\end{aligned}$$

f. Efisiensi pada menit ke 120

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}} \\ \eta &= \frac{\dot{m} c (T_{A120} - T_{A100})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA120} - T_{pcmA100})} \\ \eta &= \frac{(0,04) (4200) (47,2 - 49,4)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(42,5 - 46,05)} \\ \eta &= \frac{-369,6}{-15,67} \% \\ \eta &= 23,59 \%\end{aligned}$$

g. Efisiensi pada menit ke 140

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}} \\ \eta &= \frac{\dot{m} c (T_{A140} - T_{A120})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA140} - T_{pcmA120})} \\ \eta &= \frac{(0,04) (4200) (46,1 - 47,2)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(40,7 - 42,5)} \\ \eta &= \frac{-184,8}{-7,94} \% \\ \eta &= 23,27 \%\end{aligned}$$

h. Efisiensi pada menit ke 160

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}} \\ \eta &= \frac{\dot{m} c (T_{A160} - T_{A140})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA160} - T_{pcmA140})} \\ \eta &= \frac{(0,04) (4200) (44,4 - 46,1)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(37,75 - 40,7)}\end{aligned}$$

$$\eta = \frac{-285,6}{-13,02} \%$$

$$\eta = 21,94 \%$$

i. Efisiensi pada menit ke 180

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A180} - T_{A160})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA180} - T_{pcmA160})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (43,2 - 44,4)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (35,65 - 37,75)}$$

$$\eta = \frac{-201,6}{-9,27} \%$$

$$\eta = 21,76 \%$$

j. Efisiensi pada menit ke 200

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A200} - T_{A180})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA200} - T_{pcmA180})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (42,5 - 43,2)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (34,15 - 35,65)}$$

$$\eta = \frac{-117,6}{-6,62} \%$$

$$\eta = 17,77 \%$$

k. Efisiensi pada menit ke 220

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A220} - T_{A200})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA220} - T_{pcmA200})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (42,1 - 42,5)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (33,05 - 34,15)}$$

$$\eta = \frac{-67,2}{-4,85} \%$$

$$\eta = 13,84 \%$$

l. Efisiensi pada menit ke 240

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{A240} - T_{A220})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmA240} - T_{pcmA220})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (41,7 - 42,1)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(31,65 - 33,05)}$$

$$\eta = \frac{-67,2}{-6,18} \%$$

$$\eta = 10,88 \%$$

12. Efisiensi Kolektor dengan *Glass Tube* (B) Saat *Discharging* (0,04 kg/s)

Diketahui : Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) = 0,04 kg/s

Panas spesifik (C) = 4200 J/kg °C

Massa PCM (m) = 2,04 kg

Waktu (t) = 1200 s

Panas spesifik PCM ( $C_{pcm}$ ) = 2595,75 J/kg °C

Ditanyakan : Efisiensi kolektor menit ke 20 – 240 pada kolektor dengan *glass tube*

Dijawab :

a. Efisiensi pada menit ke 20

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B20} - T_{B0})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB20} - T_{pcmB0})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (53,2 - 54,7)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(54,15 - 55,5)}$$

$$\eta = \frac{-252}{-5,98} \%$$

$$\eta = 42,3 \%$$

b. Efisiensi pada menit ke 40

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B40} - T_{B20})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB40} - T_{pcmB20})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (52 - 53,2)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(52,9 - 54,15)}$$

$$\eta = \frac{-201,6}{-5,52} \%$$

$$\eta = 36,55 \%$$

c. Efisiensi pada menit ke 60

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B60} - T_{B40})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB60} - T_{pcmB40})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (50,3 - 52)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(50,95 - 52,9)}$$

$$\eta = \frac{-285,6}{-8,6} \%$$

$$\eta = 33,19 \%$$

d. Efisiensi pada menit ke 80

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B80} - T_{B60})}{\frac{\dot{m}}{t} c_{pcm} (T_{pcmB80} - T_{pcmB60})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (48,7 - 50,3)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(49,05 - 50,95)}$$

$$\eta = \frac{-268,8}{-8,38} \%$$

$$\eta = 32,06 \%$$

e. Efisiensi pada menit ke 100

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B100} - T_{B80})}{\frac{\dot{m}}{t} c_{pcm} (T_{pcmB100} - T_{pcmB80})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (48,3 - 48,7)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(48,55 - 49,05)}$$

$$\eta = \frac{-67,2}{-2,21} \%$$

$$\eta = 30,46 \%$$

f. Efisiensi pada menit ke 120

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B120} - T_{B100})}{\frac{\dot{m}}{t} c_{pcm} (T_{pcmB120} - T_{pcmB100})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (47,2 - 48,3)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75)(47,1 - 48,55)}$$

$$\eta = \frac{-184,8}{-6,4} \%$$

$$\eta = 28,88 \%$$

g. Efisiensi pada menit ke 140

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B140} - T_{B120})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB140} - T_{pcmB120})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (46,5 - 47,2)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (46,15 - 47,1)}$$

$$\eta = \frac{-117,6}{-4,19} \%$$

$$\eta = 28,05 \%$$

h. Efisiensi pada menit ke 160

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B160} - T_{B140})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB160} - T_{pcmB140})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (45,9 - 46,5)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (45,3 - 46,15)}$$

$$\eta = \frac{-100,8}{-3,75} \%$$

$$\eta = 26,87 \%$$

i. Efisiensi pada menit ke 180

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B180} - T_{B160})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB180} - T_{pcmB160})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (45 - 45,9)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (44 - 45,3)}$$

$$\eta = \frac{-151,2}{-5,74} \%$$

$$\eta = 26,36 \%$$

j. Efisiensi pada menit ke 200

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B200} - T_{B180})}{\frac{m}{t} c_{pcm} (T_{pcmB200} - T_{pcmB180})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (44,5 - 45)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (43,2 - 44)}$$

$$\eta = \frac{-84}{-3,53} \%$$

$$\eta = 23,79 \%$$

k. Efisiensi pada menit ke 220



$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B220} - T_{B200})}{\frac{\dot{m}}{t} c_{pcm} (T_{pcmB220} - T_{pcmB200})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (43,7 - 44,5)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (41,65 - 43,2)}$$

$$\eta = \frac{-134,4}{-6,84} \%$$

$$\eta = 19,65 \%$$

1. Efisiensi pada menit ke 240

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{pcm}}$$

$$\eta = \frac{\dot{m} c (T_{B240} - T_{B220})}{\frac{\dot{m}}{t} c_{pcm} (T_{pcmB240} - T_{pcmB220})}$$

$$\eta = \frac{(0,04) (4200) (43,2 - 43,7)}{\frac{2,04}{1200} (2595,75) (40,35 - 41,65)}$$

$$\eta = \frac{-84}{-5,74} \%$$

$$\eta = 14,64 \%$$

Lampiran 4.3 Dokumentasi pembuatan alat



Gambar lampiran a). Pembuatan rangka



Gambar lampiran b). Penyambungan kolektor



Gambar lampiran c). Pembuatan reflektor



Gambar lampiran d). Rangka



Gambar lampiran e). Proses pencairan material perubahan fasa



Gambar lampiran f). Proses penuangan material perubahan fasa





Gambar lampiran g). Pengambilan data radiasi menggunakan *pyranometer*



Gambar lampiran h). Pengambilan data