



**ANALISIS THERMAL KOLEKTOR PEMANAS AIR MENGGUNAKAN
PHASE CHANGE MATERIAL PARAFIN – MINYAK GORENG**

SKRIPSI

Oleh:
M. Katibi Vanhas
121910101040

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2017**



**ANALISIS THERMAL KOLEKTOR PEMANAS AIR MENGGUNAKAN
PHASE CHANGE MATERIAL PARAFIN – MINYAK GORENG**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1)
dan mencapai gelar Sarjana

Oleh:

M. Katibi Vanhas
121910101040

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2017**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Kedua orang tua saya yakni M. Tamyiz dan Ngadwi S. dan kedua adik saya yakni M. Farobi dan Deedat yang telah memberikan dan mengajarkan segalanya serta menemani saya hingga saat ini
2. Bapak Dr. R. Koekoeh K.W., S.T., M.Eng selaku dosen pembimbing utama dan Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T selaku dosen pembimbing anggota atas segala bimbingan dan masukan selama saya mengerjakan tugas akhir, serta bapak Ahmad Adib Rosyadi, S.T., M.T selaku dosen penguji utama dan bapak Ir. FX. Kristianta, M.Eng selaku dosen penguji anggota yang senantiasa membantu memberi saran atas tugas akhir saya
3. Seluruh dosen Teknik Mesin Universitas Jember yang telah memberikan ilmu serta pengalaman baik di dalam maupun diluar kegiatan perkuliahan.
4. Keluarga besar Teknik Mesin angkatan 2012 yang senantiasa menjadi sahabat, teman, dan saudara.
5. Pihak – pihak yang berada di belakang saya yang senantiasa membantu baik dalam keadaan susah maupun senang.

MOTTO

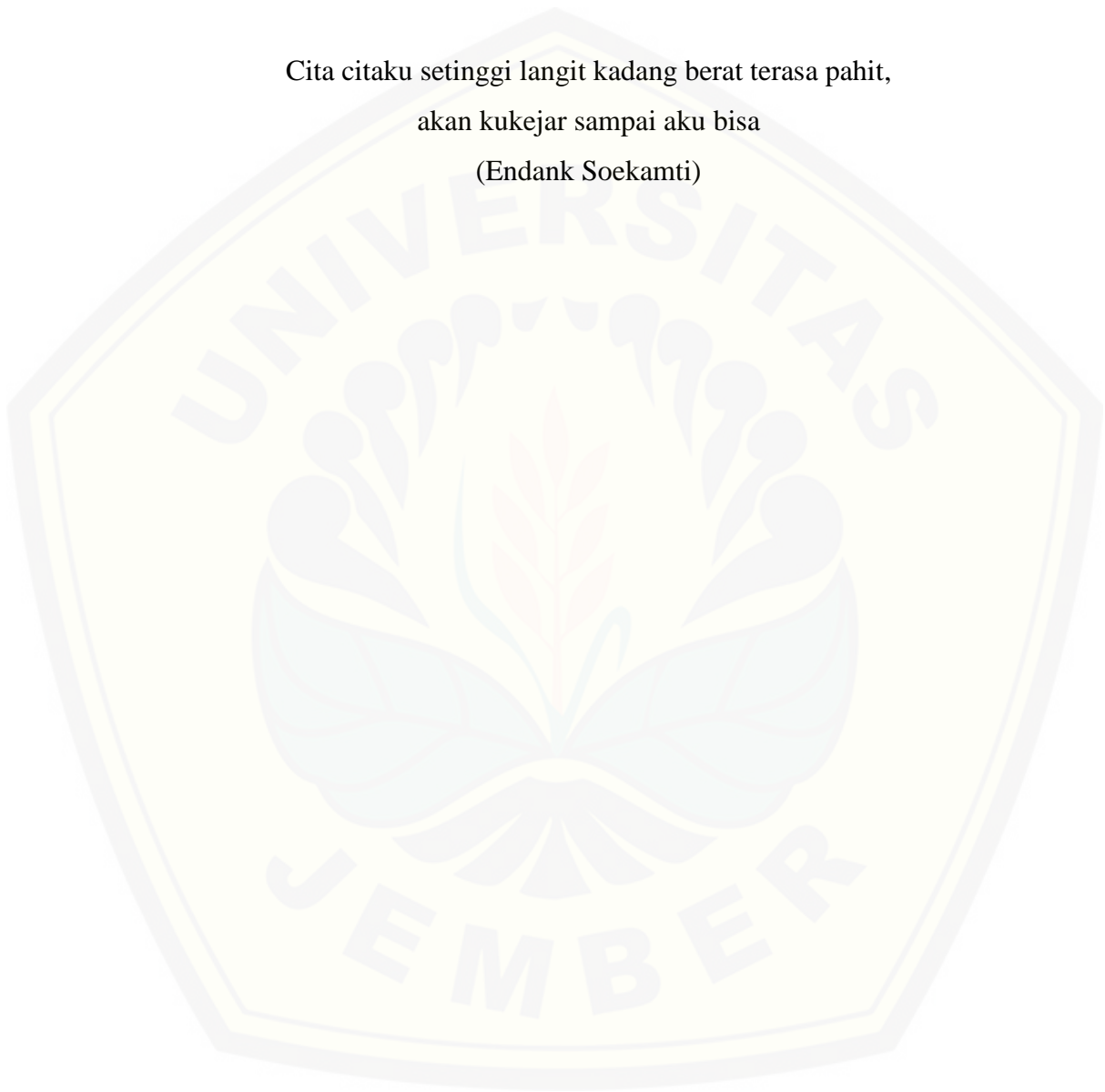
And He found you lost and guided [you]

(QS 93:7)

Cita citaku setinggi langit kadang berat terasa pahit,

akan kukejar sampai aku bisa

(Endank Soekamti)



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : M. Katibi Vanhas

NIM : 121910101040

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Analisis Thermal Kolektor Pemanas Air Menggunakan Phase Change Material Parafin – Minyak Goreng” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 5 Desember 2017
Yang menyatakan,

(M. Katibi Vanhas)
121910101040

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Analisis Thermal Kolektor Pemanas Air Menggunakan Phase Change Material Parafin – Minyak Goreng” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : Selasa, 5 Desember 2017

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji

Ketua,

Sekretaris,

Dr. R. Koekoeh K.W., S.T., M.Eng.

Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T.

NIP 19670708 199412 1 001

NIP 19711114 199903 1 002

Anggota I,

Anggota II,

Ahmad Adib Rosyadi, S.T., M.T.

Ir. FX. Kristianta, M.Eng.

NIP 19850117 201212 1 001

NIP 19650120 200112 1 001

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

Dr. Ir. Entin Hidayah M.UM.

NIP 19661215 199503 2 001

RINGKASAN

Analisis Thermal Kolektor Pemanas Air Menggunakan Phase Change Material Parafin – Minyak Goreng; M. Katibi Vanhas, 121910101040; 2017: 50 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Dalam beberapa tahun terakhir, banyak negara – negara berkembang mengalami masalah krisis energi. Banyaknya energi alternatif merupakan salah satu jalan keluar bagi masalah ini, salah satunya dengan penggunaan energi surya sebagai kolektor untuk pemanas air. Kolektor pemanas air dilengkapi dengan media penukar kalor berupa Phase Change Material (PCM) untuk mengoptimalkan kinerja kolektor.

Penelitian ini dilakukan dengan cara memanaskan kolektor pemanas air yang sudah dilengkapi dengan PCM selama 6 jam menggunakan lampu 2000 watt sebagai pengganti energi surya, setelah itu dilakukan proses pendinginan pada suhu kamar sekitar 25 °C selama 2 jam dengan radiasi sebesar 820 w/m². Bahan yang digunakan untuk PCM adalah campuran minyak goreng dan parafin dengan persentase campuran minyak goreng dan parafin sebesar 30%, 40%, dan 50% dari volume total.

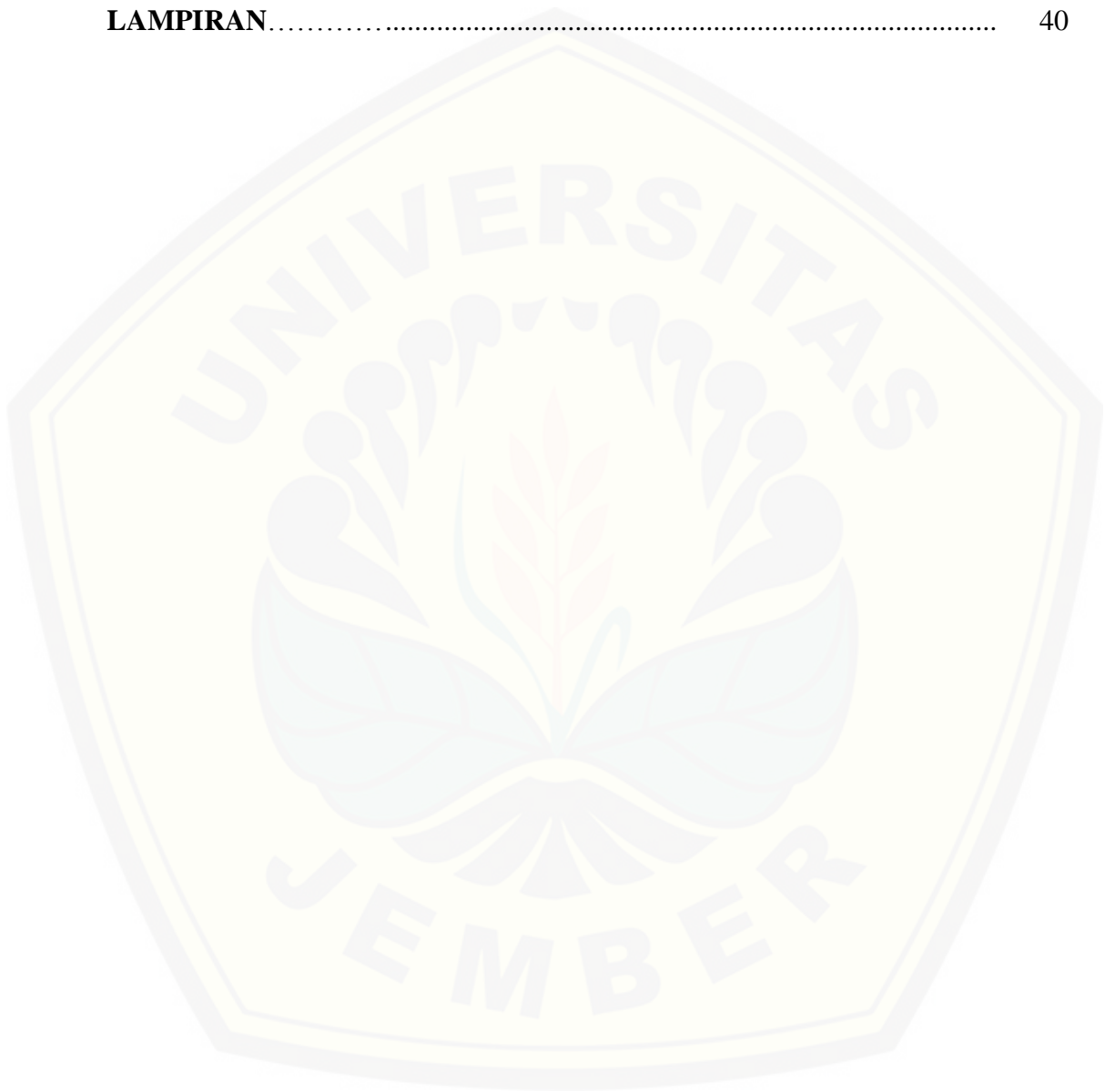
Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi terbaik dimiliki oleh PCM parafin campuran minyak goreng 50% dengan, diikuti campuran parafin minyak goreng 40%, dan yang terakhir adalah campuran 30%. Hal ini menunjukkan penambahan minyak goreng berpengaruh pada kemampuan bahan untuk menghantarkan panas.

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERSEMBAHAN | ii |
| HALAMAN MOTTO | iii |
| HALAMAN PERNYATAAN | iv |
| HALAMAN PENGESAHAN | v |
| RINGKASAN | vi |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR GAMBAR | x |
| DAFTAR TABEL | xi |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Tujuan dan Manfaat | 4 |
| 1.3.1 Tujuan | 4 |
| 1.3.2 Manfaat | 4 |
| 1.4 Batasan Masalah | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Kolektor | 5 |
| 2.2 Perpindahan Panas | 6 |
| 2.2.1 Konduksi | 6 |
| 2.2.1.1 Konduktivitas kalor dari campuran zat cair | 8 |
| 2.2.2 Konveksi | 8 |
| 2.2.2.1 Konveksi alami dalam ruang tertutup | 10 |
| 2.2.3 Radiasi..... | 12 |
| 2.3 Analisa Kerja Kolektor Termal | 12 |
| 2.3.1 Proses Perpindahan Panas pada Kolektor Termal | 12 |
| 2.3.2 Keseimbangan Laju Energi Panas Kolektor Termal..... | 14 |
| 2.3.3 Efisiensi Kolektor..... | 15 |

| | | |
|----------------|---|----|
| 2.4 | <i>Phase Change Material (PCM)</i> | 15 |
| 2.4.1 | Penyimpanan Energi Panas PCM..... | 17 |
| 2.4.2 | Pemilihan Bahan PCM..... | 18 |
| 2.5 | Hipotesis | 20 |
| BAB III | METODOLOGI PENELITIAN | 21 |
| 3.1 | Metodologi Penelitian | 21 |
| 3.2 | Waktu dan Tempat Penelitian | 21 |
| 3.3 | Alat dan Bahan Penelitian | 21 |
| 3.3.1 | Alat..... | 21 |
| 3.3.2 | Bahan | 21 |
| 3.4. | Variabel Penelitian | 22 |
| 3.4.1 | Variabel Bebas | 22 |
| 3.4.2 | Variabel Terikat | 22 |
| 3.5 | Parameter Penelitian | 22 |
| 3.6 | Prosedur Penelitian | 22 |
| 3.6.1 | Tahapan Persiapan | 22 |
| 3.6.2 | Tahapan Penelitian | 23 |
| 3.7 | Skema Alat Uji | 24 |
| 3.7.1 | Skema Kolektor Pelat Datar..... | 24 |
| 3.7.2 | Skema Pipa Tembaga dalam Kolektor Pelat Datar | 25 |
| 3.7.3 | Dimensi Kolektor Pelat Datar | 25 |
| 3.8 | Skema Pengujian | 26 |
| 3.9 | Diagram Alir Penelitian | 27 |
| BAB IV | HASIL DAN PEMBAHASAN | 28 |
| 4.1 | Karakteristik dan perubahan fasa PCM | 28 |
| 4.1.1 | Peningkatan suhu PCM..... | 28 |
| 4.1.2 | Penurunan suhu PCM..... | 29 |
| 4.2 | Laju perpindahan panas PCM pada kolektor | 30 |
| 4.3 | Efisiensi kolektor | 33 |

| | |
|-----------------------------|----|
| BAB V PENUTUP | 36 |
| 5.1 Kesimpulan | 36 |
| 5.1 Saran | 36 |
| DAFTAR PUSTAKA | 37 |
| LAMPIRAN | 40 |



DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| 2.1 Kolektor pelat datar..... | 5 |
| 2.2 Konveksi natural pada bidang horizontal..... | 10 |
| 2.3 Bilangan Nusselt rata – rata dalam pipa pendek untuk berbagai prandtl... | 11 |
| 3.1 Skema kolektor pelat datar..... | 24 |
| 3.2 Skema pipa tembaga | 25 |
| 3.3 Dimensi kolektor pelat datar | 25 |
| 3.4 Skema pengukuran suhu pipa kolektor | 26 |
| 3.5 Diagram alir penelitian..... | 27 |
| 4.1 Kenaikan suhu PCM pada proses pemanasan | 28 |
| 4.2 Penurunan suhu PCM pada proses pendinginan | 29 |
| 4.3 Laju perpindahan panas pada kolektor..... | 32 |
| 4.4 Hasil efisiensi kolektor saat proses pemanasan | 33 |
| 4.5 Hasil efisiensi kolektor saat proses pendinginan | 34 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| 2.1 Konduktivitas Termal Berbagai Bahan pada suhu 0 °C..... | 7 |
| 2.2 Konstanta untuk mencari nilangan Nusselt pada konveksi alamiah pipa Horizontal..... | 11 |
| 2.3 Karakteristik Solid – Liquid Phase Change Materials | 17 |
| 2.4 Aplikasi PCM..... | 18 |
| 2.5 Sifat fisik parafin..... | 19 |
| 2.6 Data sifat fisik dari minyak goreng..... | 20 |
| 4.1 Spesifikasi PCM | 30 |
| 4.2 Hasil Perhitungan Bilangan <i>Rayleigh</i> | 31 |
| 4.3 Hasil Perhitungan <i>Nusselt Number</i> | 31 |

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, sebagian besar negara-negara berkembang di dunia menghadapi masalah krisis energi dikarenakan besarnya jarak antara permintaan dan pasokan energi. Masalah ini dapat diminimalkan dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan. Energi surya tersedia berlimpah di dunia, meski tidak dapat digunakan secara terus menerus dikarenakan intensitas yang bergantung terhadap waktu. (Agharwal dan Sarviya, 2015).

Terkait masalah energi ini, pemerintah telah mengeluarkan undang-undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang energi yang mengamanatkan beberapa hal terkait dengan energi terbarukan diantaranya bahwa pengelolaan energi harus mengutamakan kemampuan nasional, mengutamakan penggunaan teknologi ramah lingkungan, penyediaan energi diutamakan menggunakan energi setempat yang bersumber pada energi terbarukan serta pemerintah pusat dan daerah berkewajiban untuk menyediakan energi baru dan terbarukan. Pada 2025, pemerintah menargetkan bahwa energi bauran yang dapat dicapai dari EBT adalah sekitar 17 persen. (Jubaedah dan Hamid, 2013). Salah satu pengelolaan energi terbarukan yang paling banyak digunakan adalah pengelolaan energi surya untuk penghasil energi listrik maupun pemanas air (Buddhi, 1977).

Indonesia yang berada dalam wilayah khatulistiwa mempunyai potensi energi surya yang cukup besar sepanjang tahunnya. Energi surya sangat berpotensi untuk dimanfaatkan secara langsung sebagai sumber energi alternatif. Pemanfaatan energi surya ini dapat dilakukan secara termal maupun melalui energi listrik. Pemanfaatan secara termal dapat dilakukan secara langsung dengan membiarkan objek pada radiasi matahari, atau menggunakan peralatan yang mencakup kolektor dan konsentrator surya (Septiadi dkk, 2009). Namun Indonesia sendiri belum menunjukkan memanfaatkan potensi energi surya yang ada di Indonesia secara optimal khususnya untuk kebutuhan skala rumah tangga melalui penggunaan kolektor surya. Salah satu penyebabnya adalah anggapan masyarakat tentang kolektor surya yang berteknologi sehingga harganya cukup

mahal. Hal ini perlu dikaji lebih mendalam, bagaimana mendapatkan kolektor surya sebagai pre – heater skala rumah tangga dengan biaya yang terjangkau untuk mereduksi penggunaan bahan bakar minyak yang semakin terbatas (Burhan dkk, 2001). Permasalahan lainnya adalah pemanfaatan energi surya yang bersifat *intermiten*, dan besarnya radiasi yang tersedia dipengaruhi oleh waktu, kondisi cuaca dan lain sebagainya. Untuk memecahkan permasalahan tersebut, teknologi yang dianggap sangat cocok adalah penyimpanan panas termal (*Thermal Energy Storage*) (Sharma dkk, 2009). Sistem ini terdiri dari material dengan massa tertentu yang mampu menyimpan energi termal dalam bentuk panas atau dingin (Dailami dkk, 2012).

Penyimpanan energi termal dapat diklasifikasikan menjadi penyimpanan dalam bentuk panas laten, panas sensibel, termo kimia dan gabungan antara panas sensibel dengan panas laten (Dailami dkk, 2012). Dalam sistem penyimpanan energi panas laten, salah satu elemen penting adalah material penyimpan kalor. Kebanyakan kajian dilakukan untuk pemanfaatan material penyimpan panas dari hidrat garam, parafin, dan senyawa organik (Abhat, 1981).

Medium penyimpan panas dapat dibagi atas dua bagian, yaitu penyimpanan panas sistem panas sensibel dan penyimpanan panas sistem panas laten. Pada sistem panas sensibel, energi dalam bentuk panas disimpan dalam bentuk perbedaan temperatur dan pada sistem panas laten, energi dalam bentuk panas disimpan dalam bentuk perubahan fasa. Secara umum jumlah panas yang dapat disimpan dalam sistem panas laten sensibel. Keunggulan lainnya, sistem panas laten menyimpan panas dengan temperatur yang relatif konstan, sehingga keluaran yang diharapkan dapat terjadi pada temperatur yang relatif konstan (Toruan dkk, 2013). Keunggulan material berubah fasa adalah mampu menyimpan kalor dalam kapasitas yang besar dengan volume material kecil serta pengeluaran energi panas yang terjadi pada temperatur hampir konstan (Buddhi, 1977).

Dalam sistem penyimpanan panas, 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. Kolektor surya plat datar

terdiri dari plat penyerap yang memiliki konduktivitas termal yang baik, dimana plat penyerap ini berhubungan dengan pipa-pipa yang mengalirkan cairan, sebuah atau lebih penutup tembus cahaya di bagian atas. Energi radiasi matahari yang datang, ditransmisikan melalui penutup transparan dan diubah menjadi panas oleh plat penyerap dimana bagian dasar dan sisi plat penyerap diberi isolasi. Panas yang diterima oleh plat penyerap selanjutnya dikonduksikan ke pipa-pipa untuk memanaskan cairan (Firmansyah, 2013).

Potensi untuk menghasilkan *Phase Change Materials* (PCM) yang baru yang murah dan tersedia di Indonesia masih banyak, salah satunya adalah berasal dari minyak goreng. Minyak goreng dipilih karena mempunyai nilai ekonomis yang tinggi. Selain itu meningkatnya konsentrasi larutan minyak dalam air dapat menurunkan titik leleh/beku, meminimalkan/meniadakan *supercooling*. Sifat ini membuat mereka menjadi bahan PCM potensial dengan panas laten besar dan suhu perubahan fasa yang sesuai.

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat disimpulkan bahwa masih diperlukan penelitian lanjutan guna melakukan kajian peningkatan efisiensi kolektor dengan mengembangkan material penyimpan panas. Penelitian tersebut diarahkan pada pemilihan material dan perancangan alat penukar kalor. Pada penelitian ini akan dilakukan kajian peningkatan panas laten lilin parafin sebagai material penyimpan kalor dengan cara menambahkan material penyimpan panas sensibel yaitu minyak dalam material perubah fasa lilin parafin.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik penyimpanan termal dan perubahan fasa PCM parafin dengan paduan minyak goreng 30%, 40%, dan 50% volume total?
2. Bagaimana laju perpindahan panas pada kolektor yang dilengkapi dengan PCM parafin dengan paduan minyak goreng 30%, 40%, dan 50% volume total?
3. Bagaimana pengaruh penambahan PCM parafin dengan paduan minyak goreng 30%, 40%, dan 50% volume total terhadap efisiensi kolektor?

1.3 Tujuan dan Manfaat

1.3.1 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah :

1. Mengetahui karakteristik penyimpanan termal dan perubahan fasa PCM parafin dengan paduan minyak goreng 30%, 40%, dan 50% volume total.
2. Mengetahui laju perpindahan panas pada kolektor yang dilengkapi PCM parafin dengan paduan minyak goreng 30%, 40%, dan 50% volume total.
3. Mengetahui efisiensi termal kolektor dengan penambahan minyak goreng ke dalam parafin sebagai PCM.

1.3.2 Manfaat

Adapun manfaat yang didapat pada penelitian ini adalah :

1. Dapat dijadikan referensi untuk peningkatan sifat termal parafin sebagai PCM dengan penambahan minyak goreng sebagai paduannya.
2. Memberikan referensi untuk mengetahui unjuk kerja kolektor yang dilengkapi PCM parafin dengan minyak goreng sebagai paduannya.

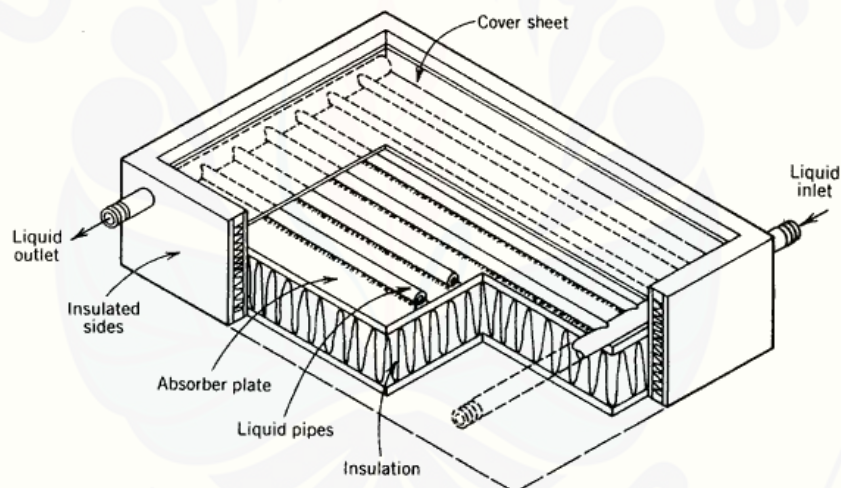
1.4 Batasan Masalah

1. Sifat – sifat bahan tidak mengalami perubahan.
2. Kondisi lingkungan pengambilan data dianggap ideal.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kolektor

Kolektor pemanas pelat datar merupakan jenis kolektor yang banyak dipakai dan banyak digunakan untuk pemanas air dan pemanas udara surya. Kolektor pemanas pelat datar terdiri dari pelat penyerap yang mempunyai konduktivitas *thermal* yang baik dan berhubungan dengan pipa – pipa (saluran) yang mengalirkan cairan pada sistem pemanas air, penutup transparan, dan insulasi. Energi radiasi yang datang diteruskan melalui penutup transparan dan diubah menjadi panas oleh pelat penyerap dimana bagian dasar pelat penyerap diberi insulasi (Burhanuddin, 2006) Berikut merupakan gambaran dari kolektor pemanas pelat datar:



Gambar 2.1 Kolektor pelat datar (Zulfri, 2014)

Komponen – komponen dari kolektor pelat datar sendiri diantaranya :

1. Penutup transparan yang digunakan untuk meneruskan energi radiasi yang ke pipa-pipa yang dialiri air didalamnya dan sebagai isolasi termal untuk mencegah panas keluar dari pipa ke lingkungan.
2. Pelat penyerap (pipa absorber) sebagai penyerap panas radiasi matahari serta tempat untuk dialiri air sebagai fluida kerja.
3. Dinding isolasi yang terdapat pada bagian dasar dan bagian samping kolektor yang digunakan untuk mengurangi *heat losses*.

2.2 Perpindahan Panas

Perpindahan panas pada alat pemanas air surya sendiri memiliki tiga cara perpindahan panas, berawal dari sumber cahaya yang memancarkan panas lalu panas diteruskan ke sepanjang pelat penyerap melalui dinding – dinding saluran, hal itu terjadi secara konduksi. Kemudian panas diteruskan ke fluida dalam saluran pipa dengan cara konveksi; apabila sirkulasi dilakukan dengan sebuah pompa, maka konveksi tersebut termasuk konveksi paksa. Sementara itu, pelat penyerap tersebut melepaskan panas ke penutup kaca dengan dua cara yaitu konveksi alami dan dengan cara radiasi. Perpindahan panas sendiri dapat didefinisikan sebagai suatu proses berpindahnya suatu energi kalor dari satu tempat ke tempat lain dikarenakan perbedaan temperatur pada daerah tersebut.

2.2.1 Konduksi

Perpindahan kalor secara konduksi terjadi saat energi kalor tersebut mengalir dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur rendah dalam suatu medium (padat, cair, gas) maupun di antara medium – medium tersebut. Laju perpindahan panas dinyatakan dengan hukum Fourier :

$$q = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) W \quad (\text{watt}) \quad (2.1)$$

Dengan q adalah laju perpindahan panas (watt), K adalah konduktivitas termal ($W/m.K$), A adalah luas penampang tegak lurus pada aliran panas (m^2), dan dT/dx adalah gradien temperatur dalam arah aliran panas (K/m).

Tetapan kesetimbangan (k) sendiri merupakan sifat fisik dari bahan atau material. Pada umumnya konduktivitas termal itu sangat bergantung terhadap suhu. Nilai konduktivitas termal berbagai bahan pada suhu $0^\circ C$ ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Konduktivitas Termal Berbagai Bahan pada suhu 0°C

| <i>Konduktivitas termal (k)</i> | | |
|----------------------------------|---------------|--------------------|
| Bahan | W/m.°C | Btu/h.ft.°F |
| <i>logam</i> | | |
| Perak (murni) | 410 | 237 |
| Tembaga (murni) | 385 | 223 |
| Alumunium (murni) | 202 | 117 |
| Nikel (murni) | 93 | 54 |
| Besi (murni) | 73 | 42 |
| Baja karbon, 1% C | 43 | 25 |
| Timbal (murni) | 35 | 20,3 |
| Baja karbon-nikel (18% C, 8% Ni) | 16,3 | 9,4 |
| <i>bukan logam</i> | | |
| Kuarsa (sejajar sumbu) | 41,6 | 24 |
| Magnesit | 4,15 | 2,4 |
| Marmar | 2,08 – 2,94 | 1,2 – 1,7 |
| Batu pasir | 1,83 | 1,06 |
| Kaca, jendela | 0,78 | 0,45 |
| Kayu maple atau ek | 0,17 | 0,096 |
| Serbuk gergaji | 0,059 | 0,034 |
| Wol kaca | 0,038 | 0,022 |

| Bahan | W/m.°C | Btu/h.ft.°F |
|---------------------|--------|-------------|
| <i>zat cair</i> | | |
| Air raksa | 8,21 | 4,74 |
| Air | 0,556 | 0,327 |
| Amonia | 0,540 | 0,312 |
| Minyak lumas,SAE 50 | 0,147 | 0,085 |
| Freon 12, 22FCCI | 0,073 | 0,042 |
| <i>gas</i> | | |
| Hidrogen | 0,175 | 0,101 |
| Helium | 0,141 | 0,081 |
| Udara | 0,024 | 0,0139 |
| Uap air (jenuh) | 0,0206 | 0,0119 |
| Karbon dioksida | 0,0146 | 0,00844 |

(Holman, 1994 hal: 7)

2.2.1.1 Konduktivitas kalor dari campuran zat cair

Konduktivitas sebagian besar zat cair organik cenderung berkurang dari harga perhitungan berdasarkan rata – rata fraksi mol (fraksi berat, fraksi volume).

Berikut ini dijelaskan beberapa persamaan konduktivitas kalor pada campuran zat cair.

Persamaan Filippov :

$$\frac{k_m - k_1}{k_2 - k_1} = Cw_2^2 + w_2(1 - C) \quad (2.2)$$

Dengan k sebagai konduktivitas thermal, w adalah fraksi mol, serta C menunjukkan fraksi volume

2.2.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas karena adanya gerakan / aliran / pencampuran dari bagian panas ke bagian dingin. Udara yang mengalir di atas suatu permukaan logam pada sebuah alat pemanas udara surya, dipanasi secara konveksi. Menurut cara menggerakkan alirannya, perpindahan konveksi

diklasifikasikan menjadi dua, yakni konveksi bebas (*free / natural convection*) dan konveksi paksa (*force convection*). Apabila aliran udara disebabkan karena adanya perbedaan kerapatan karena perbedaan suhu, maka perpindahan panasnya disebut konveksi bebas (*free / natural convection*). Apabila aliran udara disebabkan oleh gaya pemaksa / eksitasi dari luar, misalkan dengan sebuah pompa atau blower yang menggerakkan fluida sehingga fluida mengalir di atas permukaan, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa (*force convection*) (Holman, 1994). Pada umumnya, laju perpindahan panas dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$q = hA (T_w - T_f) W \quad (2.3)$$

Dengan q adalah laju perpindahan panas (W), h adalah koefisien konveksi ($W/m^2.K$), A adalah luas permukaan (m^2), T_w adalah temperatur dinding (K), dan T_f adalah temperatur fluida (K). Umumnya koefisien konveksi h dinyatakan dengan parameter tanpa dimensi yang disebut bilangan *Nusselt* (Arismunandar, 1985).

Koefisien konveksi pada bidang datar sepanjang x dapat dinyatakan (Priyono, 1986) :

$$h_c = \frac{Nu k}{x} \quad (2.4)$$

Dengan h_c adalah koefisien perpindahan panas secara konveksi ($W/m^2.K$), k adalah konduktivitas termal ($W/m.K$), dan x adalah panjang lintasan bidang datar (m), Nu adalah bilangan *nusselt*.

Untuk pemanas surya yang bekerja dalam daerah bilangan Reynolds antara 2000 sampai 10000, Shewen dan Holland telah menganjurkan nilai bilangan Nusselt sebesar (Arismunandar, 1985):

$$Nu = 0,00269 . Re \quad (2.5)$$

Bilangan Reynold di atas 2000 untuk aliran turbulen, dan di bawah 2000 untuk aliran laminer. Bilangan Reynold dapat dirumuskan (Arismunandar, 1985):

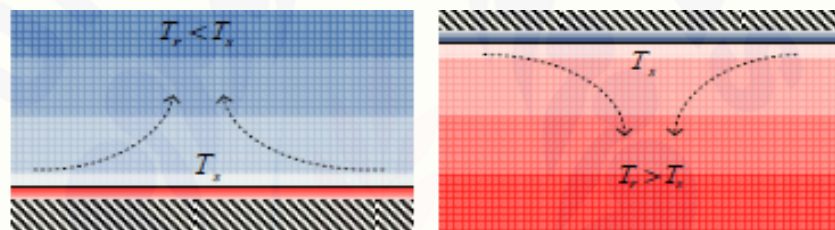
$$Re = \frac{v d_i \rho}{\mu} \quad (2.6)$$

Dengan Re adalah bilangan Reynold, v adalah kecepatan rata - rata dari fluida (m/s), d adalah diameter pipa (m), ρ adalah massa jenis (kg/m^3), μ adalah viskositas dinamik (kg/m.s).

Untuk pemanas udara surya dengan aliran turbulen, bilangan Reynolds biasanya berkisar antara 2000 dan 10000. Dimana aliran laminar adalah suatu aliran yang terjadi atas lapisan – lapisan (laminar) yang bergerak satu sama lain.

2.2.2.1 Konveksi alami dalam ruang tertutup

Pola konveksi natural pada permukaan horizontal dapat dibagi dua, masing – masing permukaan atas yang panas atau permukaan bawah yang dingin.



Gambar 2.2 Konveksi natural pada bidang horizontal

Persamaan bilangan Nu untuk kedua bagian gambar ini adalah sama. Hanya arah alirannya yang berbeda. Persamaan menghitung bilangan Nu dapat digunakan persamaan Llyod dan Moran:

Untuk $10^4 < Ra_L < 10^7$:

$$Nu = 0,54 Ra_L^{0,25} \quad (2.7)$$

Untuk $10^7 < Ra_L < 10^9$:

$$Nu = 0,15 Ra_L^{1/3} \quad (2.8)$$

Untuk bilangan Rayleigh sendiri dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Ra_L = \frac{\rho g \beta \Delta T L^3}{\alpha v} \quad (2.9)$$

Dengan,

Ra_L = Bilangan Rayleigh

$\beta = 1/Tr$

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

Tr = Temperatur referensi (°C)

L = Panjang karakteristik (m)

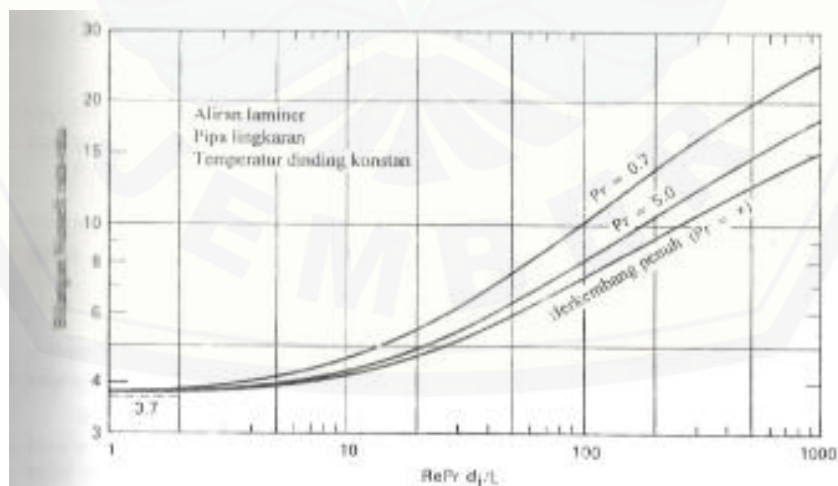
α = difusivitas termal

ν = Viskositas kinematik

ρ = Densitas bahan

Tabel 2.2 Konstanta untuk mencari nilangan Nusselt pada konveksi alamiah pipa horizontal

| Konfigurasi | $Gr_L Pr$ | Panjang karakteristik L | C | α |
|---|------------------|-------------------------|------|----------|
| Silinder Horizontal, panjang (0,002 in < D < 12 in) | | | | |
| Laminar | $< 10^4$ | D | | |
| Laminar | $10^4 - 10^9$ | D | 0,53 | ¼ |
| Turbulen | $10^9 - 10^{12}$ | D | 0,13 | 1/3 |



Gambar 2.3 Bilangan Nusselt rata – rata dalam pipa pendek untuk berbagai prandtl. (Duffie dan Beckman, 1991)

2.2.3 Radiasi

Radiasi termal adalah energi yang dilepaskan oleh benda sebagai gelombang elektromagnetik, karena adanya tumpukan energi termal pada semua benda dengan suhu di atas nol mutlak (Wikipedia, 2009). Radiasi dari matahari dapat digunakan untuk panas dan tenaga listrik (Mojiri, 2013). Tidak seperti konduksi dan konveksi, radiasi termal dapat dikumpulkan di sebuah titik kecil menggunakan kaca pemantul, kemudian dimanfaatkan untuk pembangkit listrik solar (Taylor, 2011).

Persamaan yang didapat sama dari hubungan ini dikenal sebagai hukum Stefan – Boltzmann yang berbunyi “Energi yang dipancarkan oleh suhu permukaan (A) dan sebanding dengan pangkat empat suhu mutlak permukaan itu (T^4)” dan ditulis sebagai berikut:

$$q = \sigma A (T_1^4 - T_2^4)W \quad (2.10)$$

dengan σ adalah konstanta Stefan –Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ w /m}^2 \cdot \text{K}^4$), A adalah luas bidang (m^2), dan T adalah temperatur, (K^4).

Dalam praktek , permukaan bukan merupakan pemancar ataupun penyerap yang sempurna dari radiasi termal. Permukaan “kelabu’ semacam itu ditandai oleh fraksi – fraksi dari jumlah ideal yang dipancarkan (ϵ , emisivitas) dan diserap (α , absorptivitas), untuk plat paralel

$$q = \frac{\sigma A (T_1^4 - T_2^4)}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \quad (2.11)$$

dengan ϵ_1 dan ϵ_2 adalah emisivitas dari plat penyerap dan kaca

2.3 Analisa kerja kolektor termal

2.3.1 Proses perpindahan panas pada kolektor termal

Perpindahan panas kolektor termal energi surya terdiri dari tiga proses yaitu: konduksi, konveksi, serta radiasi.

1. Konduksi pada kolektor termal

Proses konduksi pada kolektor termal energi surya terjadi pada kaca penutup dan pelat penyerap. Temperatur pelat penyerap selalu lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur kaca penutup, hal itu disebabkan

karena nilai konduktivitas bahan pelat penyerap lebih tinggi dibandingkan nilai konduktivitas bahan kaca penutup. Proses perpindahan panas berlanjut setelah terjadi konduksi pada kaca penutup dan pelat penyerap, konduksi dilanjutkan menuju isolator yang terletak pada lapisan paling bawah dari pelat penyerap. Laju perpindahan panas dari kolektor termal energi surya akan sebanding dengan konduktivitas bahan penyerap, luasan pelat penyerap serta arah dari laju aliran perpindahan panas menuju ke isolator dibawahnya. Pemberian isolator pada kolektor termal energi surya adalah untuk memperkecil laju perpindahan panas, sehingga pemilihan bahan isolator diharuskan memiliki nilai konduktivitas yang kecil.

2. Konveksi pada kolektor termal

Proses perpindahan panas secara konveksi pada kolektor pemanaspelat datar dengan satu kaca penutup terjadi pada dua tempat, yaitu antara kaca transparan dengan atmosfer dan antara pelat penyerap dengan kaca transparan.

a. Konveksi alami antara penutup dan atmosfer

Harga koefisien konveksi angin, h_w (Arismunandar, 1985) dinyatakan dengan :

$$h_w = 5,7 + 3,8 v \quad (2.12)$$

dengan h_w adalah koefisien konveksi angin (W/m^2K), v adalah kecepatan angin (m/s)

b. Konveksi antara plat penyerap dan kaca

Laju perpindahan panas melalui proses konveksi antara plat penyerap dengan kaca transparan dinyatakan dengan persamaan :

$$q_c = h_{pk} A (T_p - T_k) \quad (2.13)$$

dengan h_{pk} adalah koefisien konveksi transfer panas plat-kaca ($W/m \cdot K$), A adalah luas permukaan (m^2), T_p temperatur permukaan plat penyerap (K) dan T_k adalah temperatur permukaan kaca (K).

3. Radiasi pada kolektor termal

Proses radiasi pada kolektor termal energi surya juga terjadi di dua tempat, yaitu antara kaca transparan dengan lingkungan dan antara pelat penyerap dengan kaca transparan.

2.3.2 Kesetimbangan laju energi panas kolektor termal

Kesetimbangan laju energi panas pada kolektor termal dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$q_u = q_i - q_l \quad (2.14)$$

Dengan q_u adalah energi yang dipakai (J/s), q_i adalah energi yang masuk (J/s) dan q_l adalah energi yang hilang (J/s).

1. Laju energi panas yang masuk, q_i

Laju energi panas yang masuk pada kolektor termal energi surya (J/s) dipengaruhi oleh I_{bT} jumlah intensitas radiasi matahari pada permukaan miring (watt/m^2), A_p luas pelat penyerap kolektor termal (m^2), dan hasil kali transmivisitas kaca penutup – absorpsivitas pelat penyerap ($t.a$), sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$q_i = A_p \cdot I_{bT} \cdot (t.a) \quad (2.15)$$

2. Laju energi panas yang hilang, q_l

Tidak semua energi panas yang masuk dapat dipakai seluruhnya sebab ada faktor kerugian panas pada kolektor termal. Kerugian panas ini terjadi pada bagian atas kolektor panas surya yang disebut kerugian panas bagian atas dan pada bagian bawah kolektor panas surya disebut kerugian panas bagian bawah. Dimana jumlah dari kedua kerugian panas merupakan kerugian panas total.

A. Kerugian laju energi panas bagian atas (top loss) q_{tl}

Panas yang hilang dari bagian atas pelat penyerap disebabkan oleh konveksi natural dan radiasi dari permukaan pelat penyerap ke permukaan bagian dalam kaca transparan. Panas tersebut lalu dikonduksi oleh kaca transparan menuju permukaan bagian luarnya, yang selanjutnya dipindahkan ke atmosfer secara konveksi dan radiasi.

B. Kerugian laju energi panas bagian bawah (bottom loss) q_{bl}

Proses kehilangan panas pada bagian bawah dari pelat penyerap yang menuju ke lingkungan sebanding dengan konduksi yang melewati isolator dan juga dipengaruhi oleh konveksi, radiasi dari isolator ke lingkungan.

3. Laju energi panas yang digunakan

Laju energi panas yang keluar dari kolektor termal energi surya dapat dinyatakan dalam persamaan (Duffie dan Beckman, 1991):

$$q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_l) \quad (2.16)$$

Dimana q_u adalah laju energi panas yang keluar (J/s), \dot{m} adalah laju aliran massa udara dalam saluran kolektor termal (kg/s), C_p adalah panas jenis udara (J/kg.K), T_o adalah temperatur udara yang keluar dari kolektor termal (K), dan T_l adalah temperatur udara yang masuk kolektor termal (K).

2.3.3 Efisiensi kolektor

Prinsip dasar untuk menghitung efisiensi kolektor ini adalah dengan membandingkan besar kenaikan temperatur fluida yang mengalir di dalam kolektor dengan intensitas cahaya matahari yang diterima kolektor.

Unjuk kerja suatu kolektor pemanas biasanya dinyatakan dalam efisiensi yang didefinisikan sebagai:

$$\frac{\eta}{\dot{m}} = \frac{C_p(T_{fo} - T_{fi})}{A_c I_T} \quad (2.17)$$

Dengan \dot{m} Laju massa air/udara (kg/s), T_{fo} adalah temperatur fluida keluar ($^{\circ}\text{C}$), T_{fi} adalah Temperatur fluida masuk ($^{\circ}\text{C}$), A_c adalah Luas permukaan kolektor (m^2), I_T adalah radiasi surya (W/m^2).

2.4 Phase Change Material (PCM)

Phase Change material adalah materi yang mengalami perubahan fasa ketika menyerap dan melepaskan panas (kalor laten) dimana struktur atau susunan kimianya tidak mengalami perubahan. *Phase change material* (PCM) dapat mencair dan memadat pada suhu tertentu. Panas yang diserap atau dilepaskan ketika perubahan material dari padat menjadi cair terjadi sebaliknya; dengan demikian, PCM diklasifikasikan sebagai penyimpanan panas laten atau *latent heat*

storage laten unit (LHSU). Perubahan fasa inilah yang menjadi alasan utama penggunaan PCM karena pada kondisi ini temperatur PCM konstan.

PCM diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu *organik*, *non organik*, dan *eutectic*. PCM organik merupakan PCM dari golongan hidrokarbon, asam/ ester atau garam, alkohol, freon, dan polimer. Umumnya PCM jenis organik ini stabil, bebas dari supper cooling, bebas dari korosi, memiliki panas laten yang besar. PCM jenis ini juga murah dan memiliki densitas penyimpanan panas sebesar 120 kJ / kg hingga 210 kJ / kg. Suhu lelehnya sendiri berkisar antara 200°C hingga sekitar 700°C (Ingole *et al*, 2014).

PCM nonorganik merupakan campuran unsur metal pembentuk garam. Keuntungan penggunaan PCM non organik adalah penyimpanan energi yang tinggi, konduktifitas termal tinggi, dan tidak mudah terbakar. Kerugian penggunaan PCM ini adalah mudah menyebabkan pengkaratan, pemisahan unsur ketika terjadi perubahan fasa, dan penurunan suhu yang drastis (Toruan dkk, 2013).

Untuk eutektik sendiri memiliki titik leleh yang cukup rendah, serta densitas volumetric storagenya sedikit lebih tinggi dibandingkan PCM organik. Untuk titik leburnya sendiri berkisar antara 18 – 51 °C sedangkan titik bekunya sendiri berkisar antara 16 – 51 °C, dengan nilai entalpi gabungan sebesar 120 hingga 160 kJ/kg (Ingole *et al*, 2014). Berikut merupakan karakteristik dari *phase change materials* yang disajikan pada Tabel 2.3 (Wilson, 2005).

Tabel 2.3 Karakteristik Solid – Liquid Phase Change Materials

| Properties | Organik Paraffin | Organik non paraffin | Non organik | Eutektik |
|---|------------------|----------------------|-------------|-----------|
| h_f (kJ/kg) | 230 – 290 | 120 – 240 | 170 – 340 | 30 – 90 |
| h_{fv} ([J/m ³] $\times 10^6$) | 190 – 240 | 140 – 430 | 250 – 660 | 300 – 800 |
| ρ (kg/m ³) | ~ 810 | 900 – 1800 | 900 – 2200 | ~ 8000 |
| k (W/m.°C) | ~ 0.25 | ~ 0.2 | 0.6 – 1.2 | ~ 20 |
| Ekspansi termal | Tinggi | Sedang | Rendah | Rendah |
| Supercooling | Tidak | Tidak | Ya | Tidak |
| Korosivitas | Rendah | Terkadang | Tinggi | Terkadang |
| Tingkat Racun | Tidak beracun | Terkadang | Tinggi | Terkadang |

2.4.1 Penyimpanan energi panas PCM

Energi panas dapat disimpan dalam bentuk panas sensibel dan panas laten atau gabungan panas sensibel dan panas laten. Pada penyimpan panas sensibel energi panas disimpan dengan menaikkan temperatur suatu medium padat atau cair dengan menggunakan kapasitas panas yang dimiliki bahan. Jumlah energi panas yang tersimpan dalam bentuk panas sensibel dapat dihitung dengan :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot C_p \cdot dT$$

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i) \quad (2.13)$$

Mengacu pada persamaan (2.13) terlihat bahwa jumlah energi panas yang tersimpan

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m \cdot C_p \cdot dT + m \cdot \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m \cdot C_p \cdot dT$$

$$Q = m[C_{sp}(T_m - T_m) + \Delta h_m + C_{ip}(T_m - T_m)] \quad (2.14)$$

dalam bentuk panas sensibel tergantung pada massa, nilai panas spesifik dari bahan yang digunakan untuk menyimpan energi panas dan perubahan suhu. Pada prinsipnya penyimpan panas laten adalah menyimpan panas memanfaatkan panas laten dari bahan. Panas laten adalah jumlah panas yang diserap atau dilepaskan selama perubahan fasa dari material penyimpan panas. Ada dua jenis panas laten, panas laten fusi dan panas laten penguapan. Panas laten fusi adalah jumlah panas yang diserap atau dilepaskan ketika perubahan fase padat ke fase cair material atau sebaliknya, sedangkan panas laten penguapan adalah jumlah energi panas yang diserap atau dilepaskan ketika perubahan fase cair ke fase uap material atau sebaliknya.

2.4.2 Pemilihan bahan PCM

Pemilihan suatu PCM yang tepat untuk setiap aplikasi PCM membutuhkan untuk memiliki suhu mencair dalam kisaran praktis aplikasi. Dapat dilihat bahwa sebagian besar penelitian tentang masalah perubahan fasa telah dilakukan dalam kisaran suhu 0-65°C cocok untuk domestik *heating / cooling* (Tabel 2.3).

Minyak goreng adalah minyak atau lemak yang berasal dari pemurnian bagian tumbuhan, hewan, atau dibuat secara sintetik yang dimurnikan dan biasanya digunakan untuk menggoreng makanan (Sitepoe, 2008). Minyak goreng memiliki konduktivitas termal sebesar 3.548 W/m.K. Minyak goreng juga memiliki nilai flash point berkisar pada 323,889 °C (Broaddus, 2016).

Tabel 2.4. Aplikasi PCM

| Jarak temperatur °C | PCM/ Temperatur leleh (°C) | Area pengaplikasian PCM |
|---------------------|--|---|
| 0 - 65°C | Parafin (-3 - 64°C), water/es (0), stearic acid (41 - 43°C), n-octadecane (27,7°C) | Penyimpanan Panas/ pendinginan lokal (tabel 2.2). Penyimpanan pasif di <i>bio - climatic</i> arsitektu. Pengaplikasian pendinginan dan pemanasan di off - peak listrik. |
| 80 - 120°C | Erytritol (117,7°C), RT100 (99°C), MgCl ₂ - 6H ₂ O (116,7) °C. | Penyimpanan untuk sistem pendingin LiBr/H ₂ O dengan generator dan temperatur yang diterima kurang dari 100°C (Agyenim <i>et al</i> , 2009) |

Berikut adalah beberapa dasar pemilihan parafin sebagai PCM adalah sebagai berikut :

1. Titik leburnya tidak jauh berbeda dengan temperatur air panas untuk mandi (40-53°C)
2. Reaksi fisik stabil, artinya ketika mengalami perubahan fasa strukturnya tidak mengalami perubahan.
3. Tidak beracun dan tidak berbahaya, parafin tidak mengandung unsur yang menyebabkan keracunan dan apabila kontak dengan kulit tidak menyebabkan iritasi.
4. Tidak mudah terbakar.
5. Tidak menyebabkan korosi, karena termasuk golongan PCM non organik.

Akan tetapi dengan konduktifitas termal parafin yang sebesar 0.12 – 0.21 W/m°C diperlukan campuran agar kinerja perpindahan panas lebih baik. Hal tersebut menunjukkan perbedaan penggunaan PCM berdasarkan temperatur leleh yang ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Potensi untuk mendapatkan PCM baru yang murah dan tersedia di Indonesia masih banyak, salah satunya adalah berasal dari minyak nabati (Irsyad, 2015). Minyak goreng sendiri merupakan senyawa hidrokarbon, minyak goreng dapat berikatan senyawa dengan lilin parafin. Hal ini merujuk pada sifat parafin dan minyak goreng pada Tabel 2.5 dan Tabel 2.6.

Tabel 2.5 Sifat fisik parafin

| Properties | Parafin |
|------------------------------|---|
| Density [kg/m ³] | $\frac{750}{0,001 (T - 319) + 1}$ |
| Spesific heat [J/kg·K] | 2890 |
| Thermal conductivity [W/m°C] | 0,21 jika $T < T_{\text{solidus}}$ 0,12 jika $T > T_{\text{liquidus}}$ |
| Laten heat [J/kg] | 173,4 |
| Melting point [°C] | 52,3 |
| Flash point [°C] | > 370 °C |

Tabel 2.6 Data sifat fisik dari minyak goreng

| PALM OIL PROPERTIES | | | | | |
|---------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| Tempde g. C | ViscositymPas | Heat Capacity KJ/kg-C | Conductivity W/m-C | Density kg/m3 | ViscositycS T |
| 20 | 106.8 | 1.848 | 0.1726 | 890.1 | 119.99 |
| 25 | 77.19 | 1.861 | 0.1721 | 887.5 | 86.97 |
| 30 | 57.85 | 1.875 | 0.1717 | 885 | 65.37 |
| 35 | 44.68 | 1.888 | 0.1712 | 882.5 | 50.63 |
| 40 | 35.41 | 1.902 | 0.1708 | 880 | 40.24 |
| 45 | 28.68 | 1.916 | 0.1704 | 877.5 | 32.68 |
| 50 | 23.68 | 1.93 | 0.1699 | 875.1 | 27.06 |
| 55 | 19.88 | 1.944 | 0.1695 | 872.6 | 22.78 |
| 60 | 16.93 | 1.959 | 0.1691 | 870.2 | 19.46 |
| 65 | 14.61 | 1.973 | 0.1687 | 867.8 | 16.84 |
| 70 | 12.75 | 1.988 | 0.1683 | 865.4 | 14.73 |
| 75 | 11.23 | 2.003 | 0.1679 | 863.1 | 13.01 |
| 80 | 9.99 | 2.018 | 0.1675 | 860.7 | 11.61 |
| 85 | 8.955 | 2.034 | 0.1671 | 858.4 | 10.43 |
| 90 | 8.087 | 2.049 | 0.1668 | 856.1 | 9.45 |
| 95 | 7.351 | 2.065 | 0.1664 | 853.8 | 8.61 |
| 100 | 6.721 | 2.081 | 0.166 | 851.6 | 7.89 |
| 105 | 6.179 | 2.097 | 0.1657 | 849.3 | 7.28 |

(Chempro, 2014)

2.5 Hipotesis

Kolektor pemanas dengan PCM parafin serta penambahan minyak goreng dengan kadar 30%, 40%, dan 50% dari *Volume Total* dapat meningkatkan konduktifitas termal bahan yang menyebabkan koefisien konveksi juga meningkat. Dengan meningkatnya konduktifitas dan panas laten termal pada PCM maka penyimpanan panas energi surya pada PCM lebih baik dan diharapkan dapat meningkatkan efisiensi kolektor pemanas.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu suatu metode yang digunakan untuk menganalisis karakteristik termal PCM parafin – minyak goreng, serta perpindahan panas yang terjadi pada PCM dalam kolektor.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Fakultas Teknik Mesin Universitas Jember yang meliputi pengambilan sample data nilai perpindahan kalor radiasi matahari ke kolektor dalam pemanasan air. Penelitian juga dilakukan di Workshop Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember pembuatan kolektor beserta pengujian. Waktu penelitian berlangsung selama 3 bulan yaitu dimulai dari bulan Mei 2017 sampai dengan bulan Juli 2017.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Pada penelitian kali ini terdapat alat dan bahan yang digunakan, diantaranya:

3.3.1 Alat

1. Kabel Termokopel Tipe T
2. Data *logger*
3. *Pyranometer*

3.3.2 Bahan

1. Parafin
2. Minyak goreng
3. Pipa Tembaga Ø 28,66 mm dan Ø 12,7 mm
4. Kaca dengan ketebalan ± 3 mm
5. Air
6. Lampu sorot halogen 1000 watt @2 buah

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas dari penelitian ini adalah penambahan persentase campuran minyak goreng sebanyak 30%, 40%, dan 50% dari total volume PCM dalam pipa kolektor.

3.4.2 Variabel Terikat

Variabel terikat dari penelitian ini adalah

1. Konduktifitas termal bahan.
2. Radiasi kolektor

3.5 Parameter Penelitian

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

1. Suhu lingkungan.
2. Radiasi warm lamp dengan *Pyranometer*.
3. Konveksi antara pipa luar dengan Material PCM
4. Konduksi pada material PCM dengan pipa dalam
5. Konveksi antara pipa dalam dengan air menggunakan
6. Laju perpindahan panas keseluruhan.
7. Efisiensi kolektor

3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Tahapan Persiapan

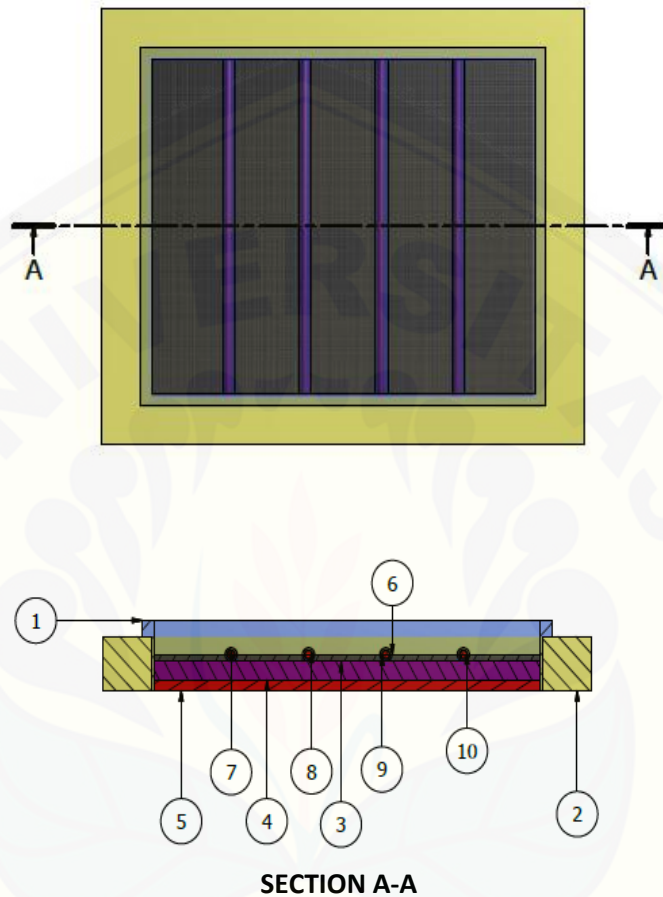
1. Mempersiapkan bahan PCM dengan variasi campuran 30%, 40%, dan 50% Volume Total Parafin dan minyak goreng.
2. Mengukur suhu lingkungan.
3. Menganalisa karakteristik PCM menggunakan gelas ukur dengan variasi PCM 100% parafin, PCM campuran parafin – minyak goreng 30%, 40%, dan 50% Volume Total dengan suhu 100°C.

3.6.2 Tahapan Penelitian

1. Pengambilan data dilakukan dengan menempatkan kolektor di bawah sinar lampu.
2. Memasang rangkaian untuk mengukur temperatur air masuk ke kolektor, temperatur air keluar dari kolektor, temperatur PCM, temperatur pipa bagian luar, temperatur pipa bagian dalam dan temperatur kaca penutup.
3. Intensitas radiasi lampu diukur dengan *pyranometer*.
4. Mencatat hasil pengukuran pada tiap interval waktu setiap 15 menit.
5. Menghitung Laju perpindahan panas yang terjadi di dalam kolektor
 - a. Laju perpindahan panas konveksi antara pipa 1 dengan material PCM
 - b. Laju perpindahan panas konduksi antara material PCM dengan Pipa 2
 - c. Laju perpindahan panas konveksi antara pipa 2 dengan air yang mengalir didalamnya
6. Menghitung laju perpindahan keseluruhan
7. Menganalisa tiap laju perpindahan panas
8. Menghitung efisiensi kolektor dilengkapi PCM
9. Menganalisa grafik antara efisiensi dengan perbedaan temperatur.

3.7 Skema Alat Uji

3.7.1 Skema Kolektor Pelat Datar

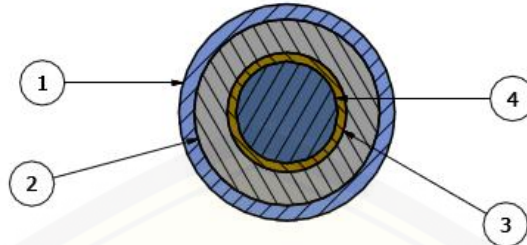


Gambar 3.1 Skema kolektor pelat datar

Keterangan :

- | | | |
|------------------|---|--|
| 1 = Kaca | 5 = Glass Woll | 9 = Paraffin – Minyak Goreng (40 % VT) |
| 2 = Kayu | 6 = Pipa | 10 = Paraffin – Minyak Goreng (50 % VT) |
| 3 = Plat Tembaga | 7 = Paraffin | |
| 4 = Sterofoam | 8 = Paraffin – Minyak Goreng (30 % VT) | |

3.7.2 Skema Pipa Tembaga Dalam Kolektor Pelat Datar



Gambar 3.2 Skema pipa tembaga

Keterangan :

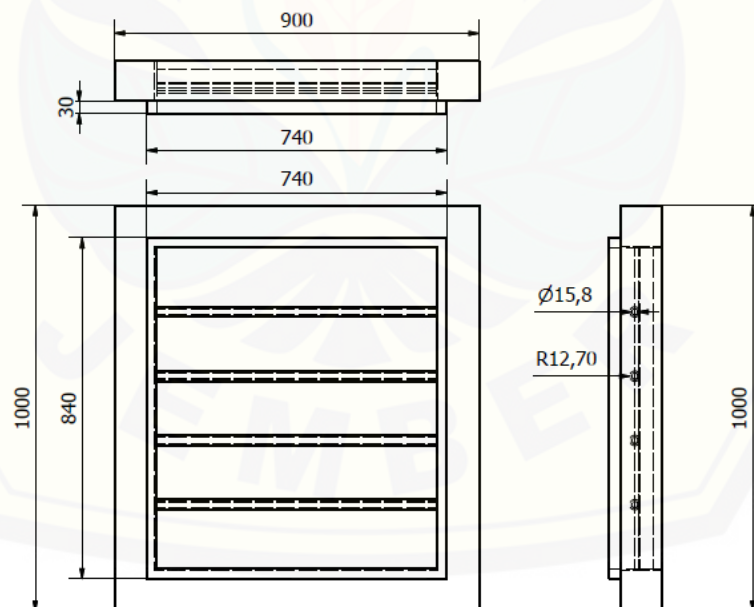
1 = Pipa Tembaga Luar

3 = Pipa Tembaga Dalam

2 = PCM

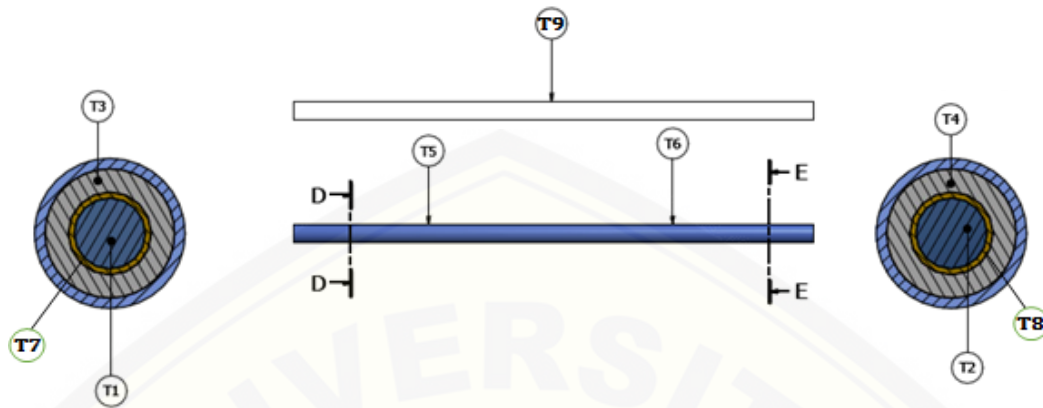
4 = Air

3.7.3 Dimensi Kolektor Pelat Datar



Gambar 3.3 Dimensi kolektor pelat datar

3.8 Skema Pengujian



Gambar 3.4 Skema pengukuran suhu pipa kolektor

Keterangan :

T1 = Suhu air in

T2 = Suhu air out

T3 = suhu PCM 1

T4 = Suhu PCM 2

T5 = Suhu pipa bagian luar 1

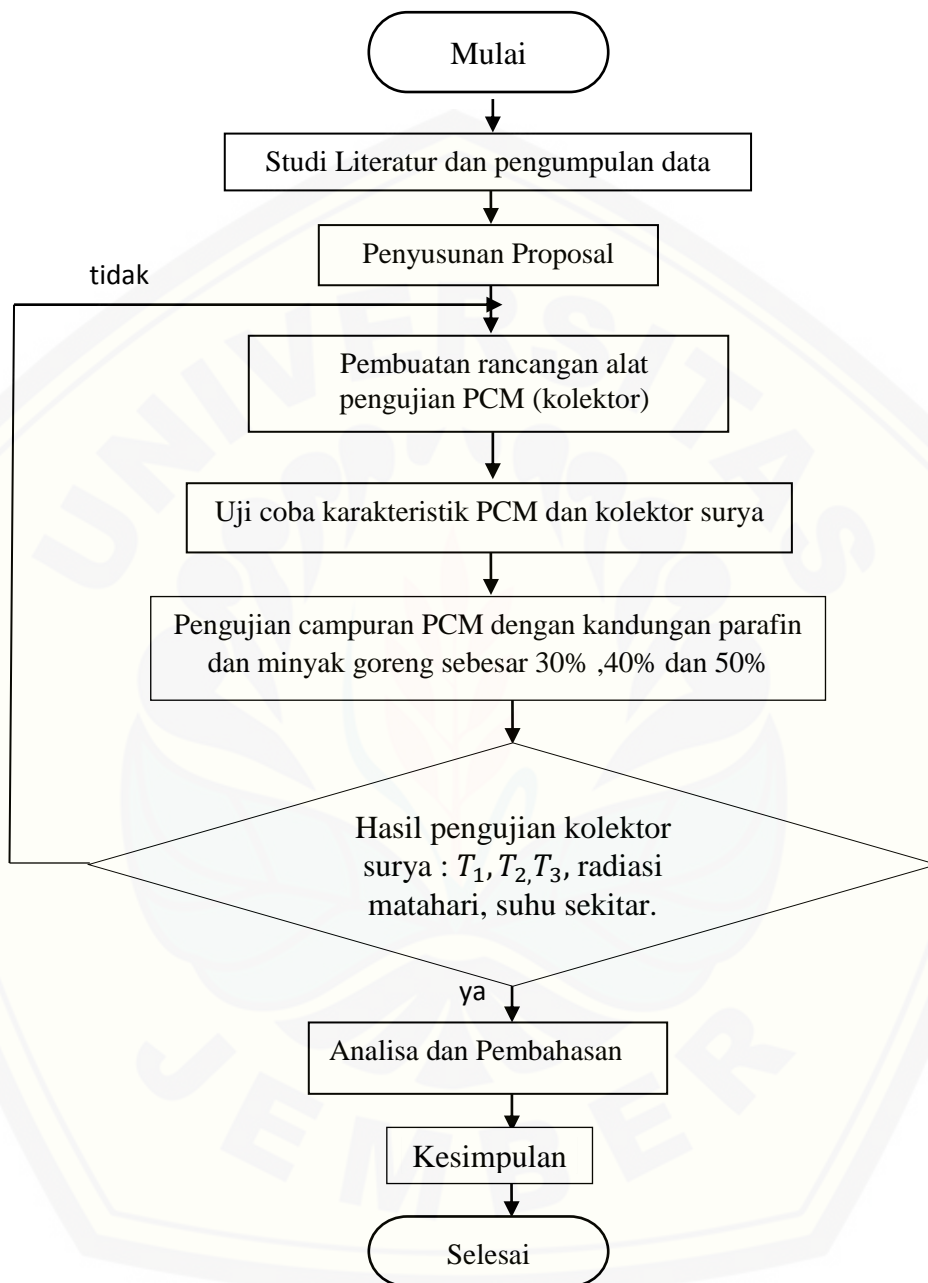
T6 = Suhu pipa bagian luar 2

T7 = Suhu pipa bagian dalam 1

T8 = Suhu pipa bagian dalam 2

T9 = Suhu kaca

3.9 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.5 Diagram alir penelitian

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Karakteristik pengujian PCM untuk proses pemanasan terbaik didapat oleh PCM campuran parafin – minyak goreng 50% dikarenakan meningkatnya nilai konduktivitas termal akibat pencampuran minyak goreng pada PCM. Sedangkan untuk pengujian PCM pada proses pendinginan terbaik didapat oleh PCM parafin 100% karena mampu menahan panas lebih lama daripada PCM campuran lainnya.
2. Pengujian perpindahan panas PCM campuran parafin – minyak goreng menghasilkan PCM campuran parafin - minyak goreng 50% sebagai yang paling baik diikuti oleh PCM campuran parafin - minyak goreng 40% dan yang terakhir adalah PCM campuran parafin - minyak goreng 30%.
3. Efisiensi kolektor terbaik ditunjukkan oleh PCM campuran parafin – minyak goreng 50% diikuti PCM campuran parafin – minyak goreng 40% dan PCM campuran parafin – minyak goreng 30%.

5.2 Saran

Menurut hasil penelitian tentang “Analisis Thermal Kolektor Pemanas Air Menggunakan PCM Parafin – Minyak Goreng”, maka disarankan hal – hal sebagai berikut:

1. Penggunaan kolektor yang lebih proporsional agar penyerapan panas lebih maksimal dan hal – hal yang tidak diinginkan tidak terjadi seperti kebocoran pipa yang menyebabkan kinerja termokopel tidak bekerja dengan maksimal.
2. Untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan material lain sebagai campuran PCM sebagai material penyimpan panas.

DAFTAR PUSTAKA

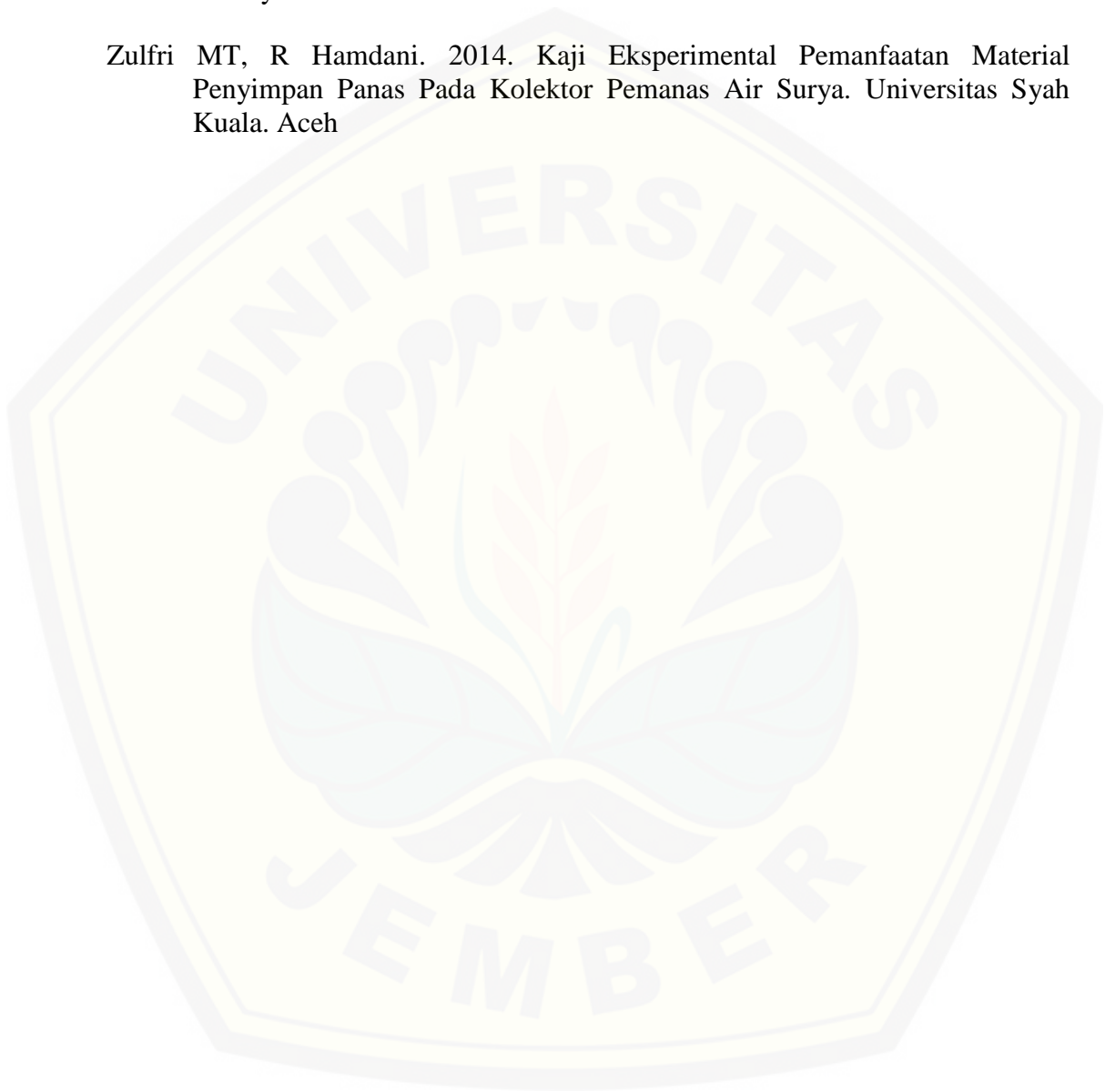
- Abhat, A. 1981. *Performance studies of a finned heat pipe latent heat thermal energy storage system*. Sun, NY: Pergamon Press; pp. 541–546.
- Agharwal, A., Sarviya, R.M. 2015. *An experimental investigation of shell and tube latent heat storage for solar dryer using paraffin wax as heat storage material*. Elsevier.
- Arismunandar W. 1985. *Teknologi Rekayasa Surya*. Jakarta : P.T. Pradnya Paramita.
- Burhan M., Anis S., Karnowo. 2001. *Pemanfaatan Kolektor Surya Pemanas Air dengan Menggunakan Seng Bekas sebagai Absorber untuk Mereduksi Pemakaian Bahan Bakar Minyak Rumah Tangga*. Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
- Burhanuddin, A. 2006. *Karakteristik Kolektor Surya Plat Datar dengan Variasi Jarak Kaca Penutup dan Sudut Kemiringan Kolektor*. Skripsi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret Surakarta.
- Buddhi D. 1977. *Thermal performance of a shell and tube PCM storage heat exchanger for industrial waste heat recovery*. Presented at solar world congress, Taejon, Korea.
- Chempro. 2014. *Palm Oil Properties*. <https://www.chempro.in/palmoilproperties.htm> [diakses, 25 September 2017]
- Dailami, Hamdani, Syuhada A., Irwansyah. 2012. *Karakteristik perpindahan panas peleburan Parafin – Al₂O₃ sebagai material penyimpan panas*. Teknik Mesin Universitas Syah Kuala.
- Defri I., Kristiawan B., Budiana E.P. 2013. *Studi Eksperimental Perpindahan Kalor Al₂O₃/Ethylene Glycol pada Circular Tube di bawah Kondisi Fluks Kalor Konstan*. Jurusan Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret
- Duffie J.A., Beckman W.A. 1991, *Solar Engineering of Thermal Processes, First Edition*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- Firmansyah Dwi S. 2013. *Rancang bangun alat pemisah garam dan air tawar bertingkat menggunakan tenaga surya*. Skripsi. Bogor (ID) : Institut Pertanian Bogor.

- Kreith F. 1991, *Prinsip – Prinsip Perpindahan Panas*, Edisi Ketiga. Alih Bahasa oleh Arko Prijono, MSc. Jakarta : Erlangga.
- Herlina N., Ginting M.H.S. 2002, *Lemak dan Minyak*. Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Kimia, Universitas Sumatera Utara.
- Holman J.P. 1994. *Experimental Methods for Engineers*. New York : Mcgraw-Hill College.
- Ingole P.R., Mohod, T.R., Gaddamwar S.S. 2014. *Use of Phase Change Materials in Construction of Buildings: A Review*. *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.* 2, 624–628.
- Jubaedah, E., Hamid A.H. 2013. *Kajian Roadmap Pengembangan Energy Storage untuk Smart Grid System*. Jakarta. PTKKE – BPPT.
- Mojiri A. 2013. *Spectral beam splitting for efficient conversion of solar energy — A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 28*, December 2013, Pages 654–663. Elsevier.
- Seidelmann P.K. 1992. *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. University Science Books, Mill Valley, CA. p. 724. ISBN 0-935702-68-7.
- Septiadi D., Nanlohy P. Souissa M., Rumlawang F.Y. 2009. *Proyeksi Potensi Energi Surya sebagai Energi Terbarukan (Studi Wilayah Ambon dan Sekitarnya)*. Bandung : Program Doktor Sains Kebumihan
- Sharma S., Tahir A., Reddy K.S., Mallick T.K. 2016. *Performance enhancement of a Building-Integrated Concentrating Photovoltaic system using phase change material*. Elsevier
- Sherma A., Tyayogi V.V., C.R Chen D. Buddhi. 2009. *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (318 – 345)
- Toruan H.F.L., Sitepu T., Ambarita H., Gultom M.S. 2013. *Pengujian Proses Charging Sebuah Pemanas Air Energi Surya Tipe Kotak Sederhana Yang Dilengkapi Pcm (Phase Change Material) Dengan Luas Permukaan Kolektor 2 M²*. Medan : Teknik Mesin, Universitas Sumatra Utara.
- Taylor R.A., Phelan P.E., Otanicar T., Walker C.A., Nguyen M. 2011 *Applicability of Nanofluids in High Flux Solar Collectors*. Los Angles : Loyola Marymount University

Wilson J. 2005. *Phase Change Material Thermal Properties*, <https://www.electronics-cooling.com/2005/05/phase-change-material-thermal-properties/> [diakses, 21 Agustus 2017]

Wiranto Arismunandar. 1985. *Teknologi Rekayasa Surya*, edisi pertama. PT Pradnya Paramita. Jakarta

Zulfri MT, R Hamdani. 2014. Kaji Eksperimental Pemanfaatan Material Penyimpan Panas Pada Kolektor Pemanas Air Surya. Universitas Syah Kuala. Aceh



LAMPIRAN

Lampiran A

A.1a Tabel karakteristik PCM pemanasan

| waktu (menit) | T | | | |
|------------------|------------|------------|------------|---------|
| | minyak 30% | minyak 40% | minyak 50% | parafin |
| 0 | 30 | 30 | 30 | 27,5 |
| 5 | 35 | 36,3 | 39,7 | 34,8 |
| 10 | 39,1 | 42,1 | 43,7 | 38,7 |
| 15 | 44,6 | 45,8 | 47,4 | 42,7 |
| 20 | 49 | 50,5 | 52,7 | 46,1 |
| 25 | 53,8 | 55,4 | 57,7 | 49,3 |
| 30 | 74,9 | 76,9 | 79,7 | 53 |
| 35 | 80,1 | 81,4 | 83,2 | 74 |
| 40 | 83,9 | 86,2 | 88,5 | 80,6 |
| 45 | 88,4 | 89 | 90,6 | 85,4 |
| 50 | 91,8 | 92,4 | 93,3 | 88,8 |
| 55 | 92,2 | 93,7 | 95 | 90,9 |
| 60 | 95,8 | 96,5 | 98,9 | 92,1 |

A.1b Tabel karakteristik PCM pendinginan

| waktu (menit) | T | | | |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------|
| | minyak 30% | minyak 40% | minyak 50% | parafin |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 5 | 88 | 84,2 | 77,1 | 89,2 |
| 10 | 76,3 | 73,2 | 70 | 77,5 |
| 15 | 69,7 | 62 | 60,1 | 70,3 |
| 20 | 61,1 | 60,7 | 58,2 | 63,4 |
| 25 | 58,9 | 55,8 | 50 | 62,2 |
| 30 | 58,5 | 55 | 49,2 | 60 |
| 35 | 58,1 | 54,5 | 49 | 59,7 |
| 40 | 58 | 53,5 | 48,8 | 59,6 |
| 45 | 57,7 | 52,2 | 48,2 | 59,5 |
| 50 | 55,9 | 50,9 | 47,9 | 59,4 |
| 55 | 54,3 | 49,5 | 47,4 | 59,1 |
| 60 | 53,4 | 48,2 | 47,1 | 58,7 |
| 65 | 52,4 | 46,3 | 46,8 | 58,4 |
| 70 | 50 | 44,8 | 45,4 | 57,2 |
| 75 | 48,7 | 43,4 | 44,2 | 56,1 |
| 80 | 46,2 | 41,9 | 42,7 | 53,9 |
| 85 | 43,9 | 40,5 | 40,9 | 52,2 |
| 90 | 43,1 | 39,1 | 38,3 | 48,4 |
| 95 | 41 | 37,8 | 36,3 | 47 |
| 100 | 40,6 | 36,7 | 35,1 | 44 |
| 105 | 38,7 | 35,8 | 34,9 | 43,1 |
| 110 | 37,8 | 34,8 | 34 | 42,8 |
| 115 | 36,6 | 34 | 32,9 | 40 |
| 120 | 36 | 33,3 | 32 | 37,3 |

A.2a Tabel data percobaan kolektor campuran

PCM parafin – minyak goreng 50 %

| t | T1 | T2 | $\frac{xT1}{T2}$ | T3 | T4 | $\frac{xT3}{T4}$ | T5 | T6 | $\frac{xT5}{T6}$ | T7 | T8 | T9 | T10 |
|-----|----|----|------------------|----|----|------------------|----|----|------------------|----|----|----|-----|
| 0 | 29 | 30 | 29,5 | 29 | 31 | 30 | 31 | 30 | 30,5 | 29 | 29 | 30 | 28 |
| 30 | 68 | 68 | 68 | 70 | 70 | 70 | 59 | 61 | 60 | 37 | 58 | 76 | 28 |
| 60 | 68 | 69 | 68,5 | 70 | 70 | 70 | 61 | 62 | 61,5 | 39 | 60 | 79 | 28 |
| 90 | 69 | 69 | 69 | 71 | 71 | 71 | 61 | 59 | 60 | 43 | 65 | 81 | 28 |
| 120 | 69 | 69 | 69 | 72 | 71 | 71,5 | 62 | 60 | 61 | 44 | 65 | 81 | 29 |
| 150 | 69 | 68 | 68,5 | 71 | 71 | 71 | 62 | 59 | 60,5 | 44 | 65 | 81 | 29 |
| 180 | 69 | 68 | 68,5 | 72 | 71 | 71,5 | 63 | 60 | 61,5 | 45 | 65 | 83 | 29 |
| 210 | 70 | 70 | 70 | 74 | 74 | 74 | 63 | 60 | 61,5 | 55 | 69 | 83 | 29 |
| 240 | 71 | 71 | 71 | 74 | 74 | 74 | 63 | 60 | 61,5 | 55 | 70 | 84 | 29 |
| 270 | 72 | 72 | 72 | 76 | 75 | 75,5 | 62 | 60 | 61 | 57 | 74 | 89 | 27 |
| 300 | 73 | 72 | 72,5 | 76 | 76 | 76 | 63 | 61 | 62 | 59 | 75 | 89 | 27 |
| 330 | 73 | 73 | 73 | 77 | 76 | 76,5 | 63 | 61 | 62 | 59 | 75 | 89 | 27 |
| 360 | 74 | 73 | 73,5 | 79 | 74 | 76,5 | 63 | 61 | 62 | 60 | 77 | 90 | 28 |
| 30 | 45 | 42 | 43,5 | 51 | 51 | 51 | 47 | 47 | 47 | 39 | 50 | 27 | 28 |
| 60 | 38 | 38 | 38 | 43 | 40 | 41,5 | 40 | 40 | 40 | 38 | 45 | 27 | 28 |
| 90 | 36 | 36 | 36 | 39 | 39 | 39 | 37 | 36 | 36,5 | 37 | 36 | 27 | 29 |
| 120 | 36 | 35 | 35,5 | 37 | 37 | 37 | 35 | 35 | 35 | 35 | 30 | 27 | 29 |

A.2b Tabel data percobaan kolektor campuran

PCM parafin – minyak goreng 40 %

| t | T1 | T2 | $\frac{xT1}{T2}$ | T3 | T4 | $\frac{xT3}{T4}$ | T5 | T6 | $\frac{xT5}{T6}$ | T7 | T8 | T9 | T10 |
|-----|----|----|------------------|----|----|------------------|----|----|------------------|----|----|----|-----|
| 0 | 29 | 30 | 29,5 | 29 | 31 | 30 | 31 | 30 | 30,5 | 29 | 29 | 30 | 28 |
| 30 | 64 | 64 | 64 | 66 | 66 | 66 | 58 | 57 | 57,5 | 35 | 58 | 76 | 28 |
| 60 | 65 | 64 | 64,5 | 66 | 66 | 66 | 58 | 58 | 58 | 36 | 60 | 79 | 28 |
| 90 | 65 | 65 | 65 | 67 | 66 | 66,5 | 59 | 58 | 58,5 | 39 | 65 | 81 | 28 |
| 120 | 65 | 65 | 65 | 67 | 67 | 67 | 59 | 59 | 59 | 40 | 65 | 81 | 29 |
| 150 | 65 | 64 | 64,5 | 67 | 67 | 67 | 59 | 59 | 59 | 40 | 65 | 81 | 29 |
| 180 | 65 | 64 | 64,5 | 67 | 67 | 67 | 60 | 59 | 59,5 | 40 | 65 | 83 | 29 |
| 210 | 67 | 66 | 66,5 | 70 | 70 | 70 | 61 | 61 | 61 | 51 | 69 | 83 | 29 |
| 240 | 67 | 67 | 67 | 70 | 70 | 70 | 61 | 61 | 61 | 52 | 70 | 84 | 29 |
| 270 | 68 | 68 | 68 | 72 | 71 | 71,5 | 61 | 62 | 61,5 | 53 | 74 | 89 | 27 |
| 300 | 68 | 69 | 68,5 | 72 | 72 | 72 | 62 | 61 | 61,5 | 55 | 75 | 89 | 27 |
| 330 | 69 | 69 | 69 | 73 | 72 | 72,5 | 61 | 62 | 61,5 | 55 | 75 | 89 | 27 |
| 360 | 69 | 69 | 69 | 75 | 70 | 72,5 | 61 | 61 | 61 | 56 | 77 | 90 | 28 |
| 30 | 48 | 48 | 48 | 54 | 54 | 54 | 49 | 48 | 48,5 | 41 | 50 | 27 | 28 |
| 60 | 44 | 42 | 43 | 47 | 46 | 47 | 42 | 40 | 41 | 40 | 45 | 27 | 28 |
| 90 | 39 | 39 | 39 | 41 | 41 | 41 | 39 | 39 | 39 | 38 | 36 | 27 | 29 |
| 120 | 38 | 38 | 38 | 39 | 40 | 39 | 36 | 37 | 36,5 | 36 | 30 | 27 | 29 |

A.2c Tabel data percobaan kolektor campuran

PCM parafin – minyak goreng 30 %

| t | T1 | T2 | $\frac{xT1}{T2}$ | T3 | T4 | $\frac{xT3}{T4}$ | T5 | T6 | $\frac{xT5}{T6}$ | T7 | T8 | T9 | T10 |
|-----|----|----|------------------|----|----|------------------|----|----|------------------|----|----|----|-----|
| 0 | 29 | 30 | 29,5 | 29 | 31 | 30 | 31 | 30 | 30,5 | 29 | 29 | 30 | 28 |
| 30 | 62 | 61 | 61,5 | 63 | 63 | 63 | 56 | 56 | 56 | 33 | 58 | 76 | 28 |
| 60 | 62 | 62 | 62 | 63 | 63 | 63 | 57 | 57 | 57 | 34 | 60 | 79 | 28 |
| 90 | 63 | 62 | 62,5 | 64 | 63 | 63,5 | 57 | 57 | 57 | 35 | 65 | 81 | 28 |
| 120 | 63 | 63 | 63 | 65 | 65 | 65 | 58 | 57 | 57,5 | 38 | 65 | 81 | 29 |
| 150 | 63 | 63 | 63 | 66 | 65 | 65,5 | 59 | 58 | 58,5 | 39 | 65 | 81 | 29 |
| 180 | 64 | 63 | 63,5 | 68 | 65 | 66,5 | 59 | 59 | 59 | 39 | 65 | 83 | 29 |
| 210 | 63 | 64 | 63,5 | 67 | 67 | 67 | 58 | 59 | 58,5 | 49 | 69 | 83 | 29 |
| 240 | 64 | 63 | 63,5 | 67 | 67 | 67 | 59 | 59 | 59 | 50 | 70 | 84 | 29 |
| 270 | 65 | 64 | 64,5 | 69 | 68 | 68,5 | 60 | 59 | 59,5 | 51 | 74 | 89 | 27 |
| 300 | 65 | 64 | 64,5 | 69 | 69 | 69 | 60 | 60 | 60 | 53 | 75 | 89 | 27 |
| 330 | 65 | 64 | 64,5 | 70 | 69 | 69,5 | 60 | 60 | 60 | 53 | 75 | 89 | 27 |
| 360 | 65 | 65 | 65 | 72 | 67 | 69,5 | 60 | 60 | 60 | 54 | 77 | 90 | 28 |
| 30 | 50 | 49 | 49,5 | 59 | 57 | 58 | 52 | 52 | 52 | 44 | 50 | 27 | 28 |
| 60 | 48 | 47 | 47,5 | 55 | 56 | 55,5 | 44 | 43 | 43,5 | 43 | 45 | 27 | 28 |
| 90 | 44 | 42 | 43 | 50 | 49 | 49,5 | 40 | 41 | 40,5 | 39 | 36 | 27 | 29 |
| 120 | 40 | 40 | 40 | 46 | 43 | 44,5 | 39 | 40 | 39,5 | 38 | 30 | 27 | 29 |

Keterangan :

T1 = Temperatur PCM 1 (°C)

T7 = Temperatur Air Keluar (°C)

T2 = Temperatur PCM 2 (°C)

T8 = Temperatur Kaca (°C)

T3 = Temperatur Pipa Luar 1 (°C)

T9 = Temperatur Plat (°C)

T4 = Temperatur Pipa Luar 2 (°C)

T10 = Temperatur air masuk (°C)

T5 = Temperatur Pipa Dalam 1 (°C) t = Waktu (menit)

T6 = Temperatur Pipa Dalam 2 (°C)

A.3a Tabel spesifikasi PCM campuran parafin – minyak 30%

| Waktu (Menit) | Densitas Minyak (Kg/m ³) | Densitas Parafin (Kg/m ³) | Densitas Campuran (Kg/m ³) | Viskositas Parafin (Ns/m ²) | Viskositas Campuran (Ns/m ²) | Konduktivitas Campuran (W/m ² C) |
|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|---|--|---|
| 0 | 875,1 | 1055,594652 | 1001,446256 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 30 | 875,1 | 1003,344482 | 964,8711371 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 60 | 875,1 | 1006,036217 | 966,7553521 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 90 | 875,1 | 1001,335113 | 963,4645794 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 120 | 875,1 | 999,3337775 | 962,0636442 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 150 | 875,1 | 998,6684421 | 961,5979095 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 180 | 875,1 | 998,003992 | 961,1327944 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 210 | 875,1 | 996,6777409 | 960,2044186 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 240 | 875,1 | 996,6777409 | 960,2044186 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 270 | 875,1 | 996,0159363 | 959,7411554 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 300 | 875,1 | 995,35501 | 959,278507 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 330 | 875,1 | 995,35501 | 959,278507 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 360 | 875,1 | 992,7200529 | 957,4340371 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 30 | 875,1 | 1012,829169 | 971,5104186 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 60 | 875,1 | 1023,890785 | 979,2535495 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 90 | 875,1 | 1031,636864 | 984,6758047 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |
| 120 | 875,1 | 1043,841336 | 993,2189353 | 0,00000878 | 0,000015365 | 0,1488 |

A.3a Tabel spesifikasi PCM campuran parafin – minyak 40%

| Waktu (Menit) | Densitas Minyak (Kg/m ³) | Densitas Parafin (Kg/m ³) | Densitas Campuran (Kg/m ³) | Viskositas Parafin (Ns/m ²) | Viskositas Campuran (Ns/m ²) | Konduktivitas Campuran (W/m ² C) |
|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|---|--|---|
| 0 | 875,1 | 1055,594652 | 983,396791 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 30 | 875,1 | 1003,344482 | 952,046689 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 60 | 875,1 | 1006,036217 | 953,6617304 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 90 | 875,1 | 1001,335113 | 950,8410681 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 120 | 875,1 | 999,3337775 | 949,6402665 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 150 | 875,1 | 998,6684421 | 949,2410652 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 180 | 875,1 | 998,003992 | 948,8423952 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 210 | 875,1 | 996,6777409 | 948,0466445 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 240 | 875,1 | 996,6777409 | 948,0466445 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 270 | 875,1 | 996,0159363 | 947,6495618 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 300 | 875,1 | 995,35501 | 947,253006 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 330 | 875,1 | 995,35501 | 947,253006 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 360 | 875,1 | 992,7200529 | 945,6720318 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 30 | 875,1 | 1012,829169 | 957,7375017 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 60 | 875,1 | 1023,890785 | 964,374471 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 90 | 875,1 | 1031,636864 | 969,0221183 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |
| 120 | 875,1 | 1043,841336 | 976,3448017 | 0,00000878 | 0,00001756 | 0,2272 |

A.3c Tabel spesifikasi PCM campuran parafin – minyak 50%

| Waktu (Menit) | Densitas Minyak (Kg/m ³) | Densitas Parafin (Kg/m ³) | Densitas Campuran (Kg/m ³) | Viskositas Parafin (Ns/m ²) | Viskositas Campuran (Ns/m ²) | Konduktivitas Campuran (W/m ² C) |
|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|---|--|---|
| 0 | 875,1 | 1055,594652 | 965,3473258 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 30 | 875,1 | 1003,344482 | 939,2222408 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 60 | 875,1 | 1006,036217 | 940,5681087 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 90 | 875,1 | 1001,335113 | 938,2175567 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 120 | 875,1 | 999,3337775 | 937,2168887 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 150 | 875,1 | 998,6684421 | 936,884221 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 180 | 875,1 | 998,003992 | 936,551996 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 210 | 875,1 | 996,6777409 | 935,8888704 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 240 | 875,1 | 996,6777409 | 935,8888704 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 270 | 875,1 | 996,0159363 | 935,5579681 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 300 | 875,1 | 995,35501 | 935,227505 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 330 | 875,1 | 995,35501 | 935,227505 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 360 | 875,1 | 992,7200529 | 933,9100265 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 30 | 875,1 | 1012,829169 | 943,9645847 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 60 | 875,1 | 1023,890785 | 949,4953925 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 90 | 875,1 | 1031,636864 | 953,3684319 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |
| 120 | 875,1 | 1043,841336 | 959,4706681 | 0,00000878 | 0,000019755 | 0,32 |

A.4 Tabel koefisien konveksi (h) dan Nusselt

| Waktu (Menit) | h minyak 30 % (W/m ²) | h minyak 40 % (W/m ²) | h minyak 50 % (W/m ²) | Nusselt number minyak 30% | Nusselt number minyak 40% | Nusselt number minyak 50% |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0 | 126,4866484 | 185,941949 | 253,1160021 | 13,51571041 | 13,0126628 | 12,57670135 |
| 30 | 137,2530932 | 214,924167 | 288,5254111 | 14,66615713 | 15,04090781 | 14,33610636 |
| 60 | 123,831747 | 199,7053318 | 268,1077944 | 13,23202135 | 13,97585729 | 13,32160603 |
| 90 | 123,4780351 | 199,1726233 | 287,3973907 | 13,19422552 | 13,93857707 | 14,28005785 |
| 120 | 146,4954339 | 213,9573081 | 303,8046814 | 15,65374596 | 14,97324471 | 15,09529511 |
| 150 | 154,8813118 | 226,64565 | 304,3305467 | 16,54981759 | 15,86120526 | 15,12142404 |
| 180 | 161,7646071 | 226,6218491 | 318,4948028 | 17,285331 | 15,85953962 | 15,82521052 |
| 210 | 168,0797064 | 244,5835314 | 340,3362931 | 17,96012992 | 17,11654115 | 16,91045956 |
| 240 | 168,0797064 | 234,8968671 | 315,5974626 | 17,96012992 | 16,43864519 | 15,68124892 |
| 270 | 173,0869697 | 243,1979498 | 326,8234937 | 18,49518024 | 17,01957483 | 16,23904234 |
| 300 | 178,23794 | 242,7275382 | 326,2297271 | 19,04558634 | 16,98665431 | 16,20953957 |
| 330 | 182,9951278 | 242,2866145 | 325,669674 | 19,55391487 | 16,9557974 | 16,18171193 |
| 360 | 177,8086075 | 242,1854565 | 312,7133659 | 18,99971008 | 16,94871812 | 15,53794537 |
| 30 | 223,9577384 | 304,4018669 | 449,5144247 | 23,93096802 | 21,30277149 | 22,33524798 |
| 60 | 223,3179636 | 283,2158112 | 384,8628867 | 23,86260498 | 19,82012059 | 19,12287468 |
| 90 | 217,6633544 | 244,3334654 | 375,7349431 | 23,25838263 | 17,09904093 | 18,66932999 |
| 120 | 202,6049978 | 207,1872807 | 317,5669938 | 21,64932436 | 14,49946199 | 15,77911 |
| rata-rata | 170,0013523 | 232,7050153 | 323,4603467 | 18,16546708 | 16,28525415 | 16,07193598 |

A.5a Tabel efisiensi dan perhitungan PCM
parafin – minyak goreng 30%

| Waktu | m | Cp | ΔT | R (hambatan) | Q | Effisiensi (%) | Gt |
|-------|---------|------|------------|--------------|-------------|----------------|-----|
| 0 | 0,00333 | 4200 | 1 | 0,163721583 | 6,107930187 | 2,42 | 820 |
| 30 | 0,00333 | 4200 | 30 | 0,156494947 | 191,6994807 | 12,09 | 820 |
| 60 | 0,00333 | 4200 | 29 | 0,165696744 | 175,0185268 | 14,50 | 820 |
| 90 | 0,00333 | 4200 | 28,5 | 0,165966306 | 171,7216025 | 16,92 | 820 |
| 120 | 0,00333 | 4200 | 27 | 0,151138627 | 178,643941 | 21,76 | 820 |
| 150 | 0,00333 | 4200 | 26,5 | 0,146831813 | 180,4785998 | 24,17 | 820 |
| 180 | 0,00333 | 4200 | 27,5 | 0,143630379 | 191,4636742 | 24,17 | 820 |
| 210 | 0,00333 | 4200 | 18 | 0,140923853 | 127,7285541 | 48,34 | 820 |
| 240 | 0,00333 | 4200 | 17 | 0,140923853 | 120,6325233 | 50,76 | 820 |
| 270 | 0,00333 | 4200 | 17,5 | 0,13891822 | 125,9733965 | 58,01 | 820 |
| 300 | 0,00333 | 4200 | 16 | 0,136972612 | 116,8116729 | 62,85 | 820 |
| 330 | 0,00333 | 4200 | 16,5 | 0,135273034 | 121,9755303 | 62,85 | 820 |
| 360 | 0,00333 | 4200 | 15,5 | 0,137130472 | 113,0310408 | 62,85 | 820 |
| 30 | 0,00333 | 4200 | 14 | 0,123626069 | 113,2447233 | 36,00 | 820 |
| 60 | 0,00333 | 4200 | 12,5 | 0,123775132 | 100,9895917 | 35,50 | 820 |
| 90 | 0,00333 | 4200 | 10,5 | 0,125130709 | 83,91225529 | 34,00 | 820 |
| 120 | 0,00333 | 4200 | 6,5 | 0,129109699 | 50,34478477 | 33,50 | 820 |

A.5b Tabel efisiensi dan perhitungan PCM
parafin – minyak goreng 40%

| Waktu | m | Cp | ΔT | R (hambatan) | Q | Effisiensi (%) | Gt |
|-------|---------|------|------------|--------------|-------------|----------------|-----|
| 0 | 0,00333 | 4200 | 1 | 0,134263856 | 7,448020861 | 2,42 | 820 |
| 30 | 0,00333 | 4200 | 31 | 0,125813019 | 246,3973933 | 16,92 | 820 |
| 60 | 0,00333 | 4200 | 30 | 0,1299448 | 230,8672613 | 19,34 | 820 |
| 90 | 0,00333 | 4200 | 27,5 | 0,130100863 | 211,3744626 | 26,59 | 820 |
| 120 | 0,00333 | 4200 | 27 | 0,126058028 | 214,1870727 | 26,59 | 820 |
| 150 | 0,00333 | 4200 | 27 | 0,123009002 | 219,4961303 | 26,59 | 820 |
| 180 | 0,00333 | 4200 | 27 | 0,123014402 | 219,4864955 | 26,59 | 820 |
| 210 | 0,00333 | 4200 | 19 | 0,119238256 | 159,3448326 | 53,18 | 820 |
| 240 | 0,00333 | 4200 | 18 | 0,121202976 | 148,5112051 | 55,60 | 820 |
| 270 | 0,00333 | 4200 | 18,5 | 0,119509698 | 154,7991534 | 62,85 | 820 |
| 300 | 0,00333 | 4200 | 17 | 0,119602558 | 142,1374285 | 67,68 | 820 |
| 330 | 0,00333 | 4200 | 17,5 | 0,119689924 | 146,2111375 | 67,68 | 820 |
| 360 | 0,00333 | 4200 | 16,5 | 0,119710013 | 137,8330814 | 67,68 | 820 |
| 30 | 0,00333 | 4200 | 13 | 0,109875785 | 118,3154236 | 34,50 | 820 |
| 60 | 0,00333 | 4200 | 7 | 0,112739409 | 62,09008966 | 34,00 | 820 |
| 90 | 0,00333 | 4200 | 3 | 0,119287018 | 25,1494258 | 33,50 | 820 |
| 120 | 0,00333 | 4200 | 3 | 0,127837663 | 23,46726256 | 32,50 | 820 |

A.5c Tabel efisiensi dan perhitungan PCM
parafin – minyak goreng 50%

| Waktu | m | Cp | ΔT | R (hambatan) | Q | Effisiensi (%) | Gt |
|-------|---------|------|------|--------------|-------------|----------------|-----|
| 0 | 0,00333 | 4200 | 1 | 0,117632208 | 8,501073131 | 2,42 | 820 |
| 30 | 0,00333 | 4200 | 33 | 0,111982243 | 294,6895785 | 21,76 | 820 |
| 60 | 0,00333 | 4200 | 31 | 0,115057931 | 269,4294931 | 26,59 | 820 |
| 90 | 0,00333 | 4200 | 28 | 0,112140762 | 249,6861938 | 36,26 | 820 |
| 120 | 0,00333 | 4200 | 27,5 | 0,109951033 | 250,1113378 | 36,26 | 820 |
| 150 | 0,00333 | 4200 | 27 | 0,109884756 | 245,7119716 | 36,26 | 820 |
| 180 | 0,00333 | 4200 | 26,5 | 0,108181905 | 244,9577866 | 38,68 | 820 |
| 210 | 0,00333 | 4200 | 19 | 0,105833882 | 179,5266286 | 62,85 | 820 |
| 240 | 0,00333 | 4200 | 19 | 0,108517793 | 175,086495 | 62,85 | 820 |
| 270 | 0,00333 | 4200 | 18,5 | 0,107249527 | 172,4949326 | 72,52 | 820 |
| 300 | 0,00333 | 4200 | 17 | 0,107314422 | 158,4130042 | 77,35 | 820 |
| 330 | 0,00333 | 4200 | 17,5 | 0,107375849 | 162,9789207 | 77,35 | 820 |
| 360 | 0,00333 | 4200 | 16,5 | 0,108858327 | 151,5731544 | 77,35 | 820 |
| 30 | 0,00333 | 4200 | 12 | 0,097517882 | 123,0543545 | 33,50 | 820 |
| 60 | 0,00333 | 4200 | 3,5 | 0,101872599 | 34,35663807 | 33,00 | 820 |
| 90 | 0,00333 | 4200 | 2 | 0,102608155 | 19,4916281 | 33,00 | 820 |
| 120 | 0,00333 | 4200 | 2 | 0,108288799 | 18,46913094 | 32,00 | 820 |

Lampiran B

B.1 Data perhitungan koefisien perpindahan panas konveksi PCM

a) Perhitungan densitas campuran (Defri *et. al*, 2013)

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi)\rho_{bf}$$

Dengan rumus diatas dapat dicari densitas PCM campuran parafin – minyak goreng 50% sebagai berikut :

$$\rho_{nf} = 0,5 \times 875,1 + (1 - 0,5) 1003,34$$

$$\rho_{nf} = 939,2222408$$

Perhitungan konduktivitas campuran menggunakan persamaan Filippov

$$\frac{k_m - k_1}{k_2 - k_1} = Cw_2^2 + w_2 (1 - C)$$

Dengan rumus diatas dapat diperoleh konduktivitas PCM campuran parafin – minyak goreng 50% sebagai berikut :

$$\frac{k_m - 0,12}{0,17 - 0,12} = 0,72 \times 0,5^2 + 0,5 (1 - 0,5) \rightarrow k_m = 0,32 \text{ W/m}^{20}\text{C}$$

- b) Perhitungan nilai koefisien konveksi menggunakan bilangan Nusselt sebagai berikut

$$Nu = 0,54 Ra_L^{0,25}$$

Rumus diatas digunakan untuk perhitungan bilangan Nusselt untuk perpindahan panas konveksi yang terjadi pada PCM campuran parafin – minyak goreng 50% dengan mencari bilangan Rayleigh terlebih dahulu

$$Ra_L = \frac{\rho g \beta \Delta L^3}{\alpha \nu} \rightarrow Ra_L = 496763,6605$$

$$Nu = 0,54 \times 392446,5112^{0,25} \rightarrow Nu = 14,33610636$$

Perhitungan diatas merupakan perhitungan bilangan Nusselt pada PCM campuran parafin – minyak goreng 50% pada menit – 30. Untuk hasil perhitungan lainnya dilampirkan pada lampiran A.4

Dari bilangan Nusselt dapat kita cari koefisien konveksi dari PCM campuran parafin – minyak goreng 50% :

$$h = \frac{Nu km}{Dh} = \frac{14,33 \times 0,32}{0,0159} \rightarrow h = 288,5254111 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

- c) Perhitungan jumlah perpindahan panas

Jumlah perpindahan panas pada PCM campuran parafin – minyak goreng 50% dihitung pada menit – 30. Untuk hasil perhitungan lainnya dilampirkan pada lampiran A.5

$$Q_{tot} = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{k_1 A_1} + \frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{k_2 A_2} + \frac{1}{m \cdot Cp}} \rightarrow Q_{tot} = 294,69 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$$

- d) Perhitungan efisiensi kolektor pemanas

Berikut perhitungan efisiensi kolektor surya pada PCM campuran parafin – minyak goreng 50% pada menit – 30 pada saat pemanasan.

$$\text{Temperatur air keluar (T7)} = 28^\circ\text{C} \quad C_p \text{ air} = 4200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatur air masuk (T10)} = 37^\circ\text{C} \quad \text{Radiasi (Gt)} = 820 \text{ W/m}^2$$

$$\Delta T = 37^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C} = 9^\circ\text{C} \quad \text{Luas permukaan (A)} = 0,7056 \text{ m}^2$$

$$\dot{m} = 0,00333 \text{ L/s}$$

Dengan rumus perhitungan

$$\text{Efisiensi} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A G t} = \frac{125,874}{578,592} = 0,2176 \times 100 \% \rightarrow \text{Effisiensi} = 21,76\%$$

Untuk perhitungan efisiensi lainnya dilampirkan pada lampiran A.5

Lampiran C



Kolektor pemanas air pada proses charging



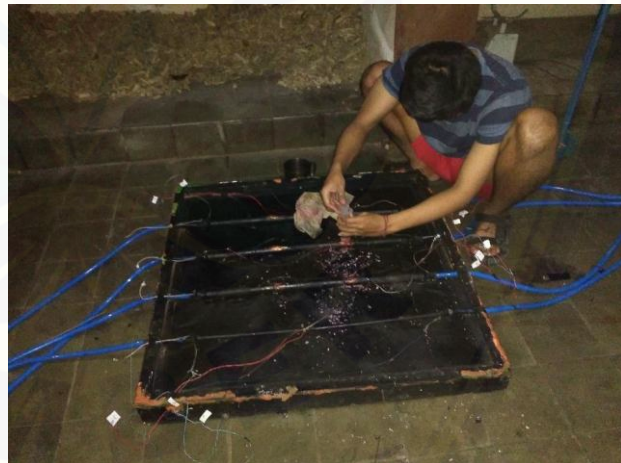
Pyranometer



Uji coba karakteristik material PCM



Bak penampung air



Proses pengisian PCM pada pipa kolektor