



**ANALISIS THERMAL KOLEKTOR PEMANAS AIR YANG
DILENGKAPI PCM PARAFIN – MENTEGA**

SKRIPSI

**Adhe Reza Firmansyah
NIM 121910101081**

**PROGRAM STUDI STRATA 1
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**



**ANALISIS THERMAL KOLEKTOR PEMANAS AIR YANG
DILENGKAPI PCM PARAFIN – MENTEGA**

SKRIPSI

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

Oleh
Adhe Reza Firmansyah
121910101081

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**

PERSEMBAHAN

Proyek Akhir ini saya persembahkan untuk:

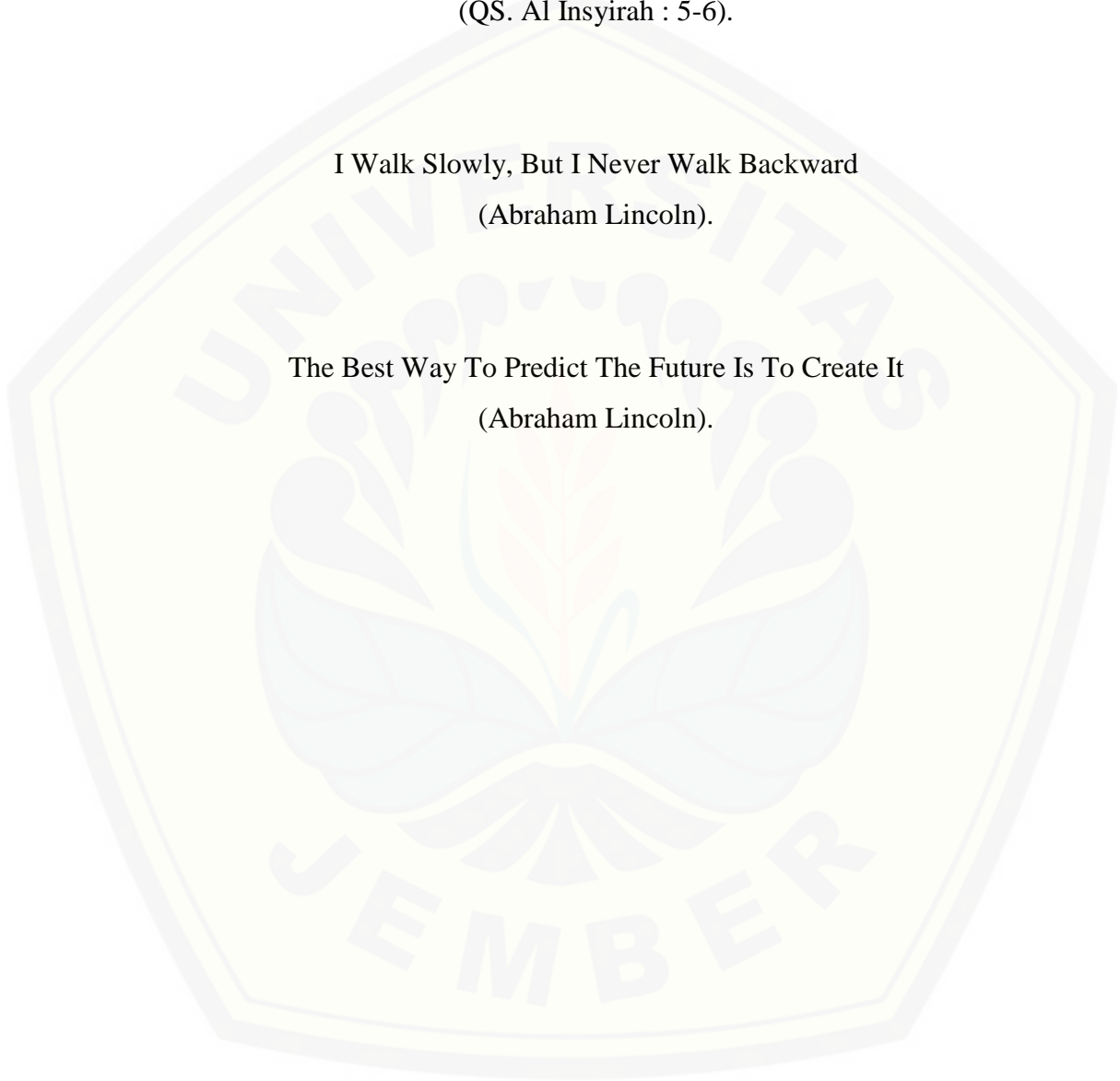
1. Bapak M. Zazuli dan ibu Djum'atin yang tercinta, terima kasih atas pengorbanan, usaha, kasih sayang, dorongan, nasehat dan air mata yang menetes dalam setiap untaian do'a yang senantiasa mengiringi setiap langkah bagi perjuangan dan keberhasilan penulis;
2. Seluruh keluarga besar dari bapak M. Zazuli dan ibu Djum'atin yang senantiasa memberikan do'a dan semangat bagi penulis;
3. Guru-guru sejak TK hingga SMA, dosen, dan seluruh civitas akademika Universitas Jember khususnya Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin yang telah menjadi tempat menimba ilmu dan telah membimbing penulis dengan penuh kesabaran;
4. Teman-teman TK, SMP, SMA, Teknik Mesin Universitas Jember, dan teman satu perkumpulan ngopi di Jombang dan Surabaya yang selalu mendukung setiap langkah penulis;
5. Almamater Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember.

MOTTO

Sesungguhnya Sesudah Kesulitan Pasti Ada Kemudahan
(QS. Al Insyirah : 5-6).

I Walk Slowly, But I Never Walk Backward
(Abraham Lincoln).

The Best Way To Predict The Future Is To Create It
(Abraham Lincoln).



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Adhe Reza Firmansyah

NIM : 121910101081

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul "Analisis Thermal Kolektor Pemanas Air Yang Dilengkapi PCM Parafin-Mentega" adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang telah saya sebutkan 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 dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 10 Juli 2018

Yang Menyatakan,

Adhe Reza Firmansyah
121910101081

SKRIPSI

**ANALISIS THERMAL KOLEKTOR PEMANAS AIR YANG
DILENGKAPI PCM PARAFIN – MENTEGA**

oleh
Adhe Reza Firmansyah
NIM 121910101081

Pembimbing:

Dosen Pembimbing Utama : Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Agus Triono, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul ” Analisis Thermal Kolektor Pemanas Air yang dilengkapi PCM Parafin - Mentega” telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada :

hari, tanggal : Selasa, 10 Juli 2018

tempat : Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin

Pembimbing

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T.
NIP. 19681207 199512 1 002

Dr. Agus Triono, S.T.,M.T.
NIP. 19700807 200212 1 001

Penguji

Penguji I,

Penguji II,

Ahmad Adib Rosyadi, S.T.,M.T
NIP 19850117 201212 1 001

Ir. Ahmad Syuhri, M.T.
NIP 19670123 199702 1 001

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

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

RINGKASAN

**ANALISIS THERMAL KOLEKTOR PEMANAS AIR YANG
DILENGKAPI PCM PARAFIN – MENTEGA**

Adhe Reza Firmansyah, 121910101081; 2018; 49 halaman; Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Energi merupakan suatu kebutuhan yang penting dalam kehidupan manusia. Kebutuhan energi semakin meningkat dengan adanya kemajuan teknologi di dunia. Karena kebutuhan energi yang meningkat maka membuat usaha manusia untuk mengeksploitasi sumber energi tersebut juga meningkat. Mengingat terbatasnya persediaan sumber energi tersebut, manusia mulai memanfaatkan sumber energi lain seperti energi angin, energi air, ataupun energi matahari, dll.

Indonesia merupakan negara yang memiliki berbagai jenis sumber daya energi dalam jumlah yang cukup melimpah. Letak Indonesia yang berada pada 6° LU dan 11° LS daerah katulistiwa, maka wilayah Indonesia akan selalu disinari matahari selama 10 - 12 jam dalam sehari. Potensi sumber energi matahari di Indonesia sebagai sumber energi listrik alternatif sangat perlu dikembangkan mengingat, total intensitas penyinaran rata - rata 4,5 kWh per meter persegi perhari.

Sejauh ini, salah satu pemanfaatan energi matahari yaitu untuk pemanas air. Pemanas air dengan menggunakan tenaga matahari atau lebih dikenal dengan *Solar Water Heater* (SWH) terus dikembangkan. Untuk dapat secara langsung memanfaatkan energi panas matahari untuk memanaskan air digunakan suatu perangkat yang dapat mengumpulkan energi matahari yang sampai ke permukaan bumi dan mengubahnya kembali menjadi energi kalor yang berguna. Perangkat ini disebut dengan kolektor surya. Namun, ada beberapa masalah dalam pemanfaatan energi surya adalah sifat radiasi surya yang *intermiten*, dan besarnya radiasi yang tersedia dipengaruhi oleh waktu, kondisi cuaca dan posisi lintang. Untuk pemecahan permasalahan tersebut, teknologi yang dianggap sangat cocok

adalah penyimpanan energi termal (*Thermal Energy Storage*, TES) (Sharma dkk, 2009).

Beberapa kajian dilakukan untuk pemanfaatan material penyimpan panas dari hidrat garam, parafin, dan senyawa organik (Abhat,1981). Parafin wax merupakan salah satu PCM yang memiliki sifat antara lain: densitas energinya cukup tinggi (~200 kJ/kg) dan konduktivitas termalnya rendah (~0,2 W/m.°C), sifat termalnya stabil di bawah 500°C, tidak berbahaya dan tidak reaktif (Nadjib dkk, 2015). Namun parafin memiliki konduktivitas termal yang rendah sehingga perlu waktu untuk proses peleburan dan pepadatan. yang mengurangi daya keseluruhan dari perangkat penyimpanan panas dan dengan demikian akan membatasi aplikasi (Buddhi D, 1977). Untuk mengatasi masalah ini, perlu dilakukan kajian ulang penambahan material yang dapat meningkatkan panas laten parafin. Mentega merupakan salah satu material penyimpan energi termal dalam bentuk panas laten. Mentega memiliki panas spesifik sebesar 2300 J/kgK dengan kisaran temperatur diatas 40°C dan konduktivitas termal 0,29 W/mK (I.H. Tavman dan S. Tavman, 1999).

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan penambahan mentega pada PCM parafin dapat meningkatkan karakteristik PCM meliputi peningkatan panas spesifik PCM (C_p), densitas (ρ), viskositas (ν), dan konduktivitas (k), yang bertujuan untuk meningkatkan laju perpindahan panas yang terdapat pada PCM di dalam kolektor surya. Peningkatan laju perpindahan panas pada kolektor akan meningkatkan kinerja kolektor dari segi energi berguna dan efisiensi kolektor.

Energi berguna pada proses pemanasan yang paling besar terdapat pada pipa kolektor surya non PCM, hal ini terjadi karena radiasi langsung disalurkan oleh plat dan pipa absorber yang terbuat dari bahan tembaga langsung ke air. Untuk pipa yang dilengkapi PCM energi berguna terbesar didapat oleh PCM parafin-mentega 20%. Kemudian PCM parafin-mentega 20% dan yang terendah PCM parafin 100%. Sedangkan pada proses pendinginan energi berguna terbesar terdapat pada PCM parafin 100%.

Efisiensi kolektor surya terbaik terdapat pada kolektor surya yang tidak dilengkapi PCM yaitu sebesar 101,41 %. sedangkan kolektor surya dengan penambahan PCM campuran parafin-mentega 20%, 10% dan parafin murni adalah sebesar: 82,09%, 74,85 %, 62,78%. Meskipun memiliki efisiensi yang cukup tinggi kolektor surya tanpa dilengkapi PCM tidak bisa melepaskan panas pada saat proses pendinginan sehingga saat proses tersebut energi berguna pada kolektor surya tanpa PCM sangat kecil. Sedangkan pada kolektor surya yang dilengkapi PCM energi berguna yang dihasilkan pada saat proses pendinginan masih besar.

SUMMARY

THERMAL ANALYSIS OF WATER HEATER COLLECTOR USING PCM PARAFIN - BUTTER

Adhe Reza Firmansyah, 121910101081; 2018; 49 pages; Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember.

Energy is an important need in human life. Energy needs are increasing with the advancement of technology in the world. Due to the increasing energy demand, human efforts to exploit these energy sources also increase. Given the limited supply of energy sources, humans began to use other energy sources such as wind energy, water energy, or solar energy, etc.

Indonesia is a country that has various types of energy resources in abundance. The location of Indonesia which is at the 60LU and 110 LS of the equator, the territory of Indonesia will always be illuminated by the sun for 10-12 hours a day. The potential of solar energy sources in Indonesia as an alternative source of electrical energy needs to be developed considering that the total intensity of irradiation averages 4.5 kWh per square meter per day.

So far, one of the utilization of solar energy is for water heater. Solar water heater or better known as Solar Water Heater (SWH) continues to be developed. To be able to directly utilize solar thermal energy to heat water is used a device that can collect solar energy that reaches the earth's surface and convert it back into useful heat energy. This device is called a solar collector. However, there are some problems in the use of solar energy is the nature of intermittent solar radiation, and the amount of radiation available is influenced by time, weather conditions and latitude positions. For solving these problems, the technology that is considered very suitable is thermal energy storage (TES) (Sharma et al., 2009).

Several studies have been carried out to utilize heat storage materials from salt, paraffin and organic compounds (Abhat, 1981). Paraffin wax is one PCM having properties such as: high energy density (~ 200 kJ / kg) and low thermal

conductivity ($\sim 0.2 \text{ W / m} \cdot \text{°C}$), its thermal properties are stable below 500°C , harmless and not reactive (Nadjib et al, 2015). However, paraffin has a low thermal conductivity, so it takes time for smelting and compaction processes, which reduces the overall power of the heat storage device and thus limits the application (Buddhi D, 1977). To overcome this problem, it is necessary to review the addition of material that can increase the latent heat of paraffin. Butter is one of the thermal energy storage materials in the form of latent heat. Butter has a specific heat of 2300 J / kgK with a temperature range above 400C and a thermal conductivity of 0.29 W / mK (I.H. Tavman and S. Tavman, 1999).

Based on the results of research that has been done the addition of butter to PCM paraffin can improve PCM characteristics include increase of specific heat of PCM (C_p), density (ρ), viscosity (ν), and conductivity (k), which aims to increase the rate of heat transfer found in PCM inside the solar collector. Increasing the rate of heat transfer in the collector will improve the collector's performance in terms of useful energy and collector efficiency.

Energy is useful in the heating process is the largest in the non-PCM solar pipe collector, this happens because the radiation directly channeled by the plate and absorber pipe made of copper directly into the water. For pipes equipped with PCM the most useful energy is obtained by 20% paraffin-butter PCM. Then PCM paraffin-butter 20% and the lowest PCM paraffin 100%. While in the process of cooling the most useful energy is found in PCM paraffin 100%.

The efficiency of the best solar collectors is found in solar collectors that are not equipped with PCM, which is 101.41%. while the solar collector with the addition of PCM paraffin-butter mixture 20%, 10% and pure paraffin are: 82.09%, 74.85%, 62.78%. Although having a high enough efficiency of solar collectors without PCM equipped can not release heat during the cooling process so that when the process is useful energy in solar collectors without PCM is very small. While for solar collectors equipped with PCM, the useful energy produced during the cooling process is still large.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian sekaligus penyusunan skripsi yang berjudul "Analisis Thermal Kolektor Pemanas Air Yang Dilengkapi PCM Parafin - Mentega". Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Dalam penulisan ini tentunya banyak pihak yang telah memberikan bantuan baik moril maupun materil. Oleh karena itu penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dekan Fakultas Teknik Universitas Dr. Ir. Entin Hidayah, M, U. M. atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyelesaikan proyek akhir ini;
2. Ketua Jurusan Teknik Mesin Hari Arbiantara Basuki S.T., M.T. atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyelesaikan proyek akhir ini;
3. Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Dr. Agus Triono, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang penuh kesabaran memberi bimbingan, dorongan, meluangkan waktu, pikiran, perhatian dan saran kepada penulis selama penyusunan tugas akhir ini sehingga dapat terlaksana dengan baik;
4. Ahmad Adib Rosyadi, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji I dan Ir. Ahmad Syuhri, M.T. selaku Dosen Penguji II, terima kasih atas saran dan kritiknya;
5. Sumarji, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang selalu memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis selama kuliah;
6. Seluruh Dosen Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember yang telah memberikan ilmu, bimbingan, pengorbanan, saran dan kritik kepada penulis;

7. Kedua orang tua saya Bapak M. Zazuli, Ibu Djum'atin, adik Ryan Maulana, dan M. Rizaldi Ardiansyah yang telah memberikan segalanya kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan studi S1;
8. Teman satu proyek skripsi atau Team PCM yang selalu membimbing dan memberi saran kepada penulis;
9. Teman-temanku seperjuangan Teknik Mesin yang selalu memberi *support* dan saran kepada penulis;
10. Teman-teman bengkel dan teman ngopi kedai 81 (JBG & SUB Fams) yang selalu mendukung penulis dalam pendidikan perkuliahan sampai titik akhir;
11. Bapak, Ibu, dan Teman-teman Kos Dewa yang selalu memberi semangat dan saran kepada penulis;
12. Teman-teman seperjuangan TK, SD, SMP, dan SMA yang selalu menemani, dan memberi *support* kepada penulis
13. Pakde Angkringan, Pak Kholik, dan Bu Kholik yang selalu memberikan tempat dan pelayanan yang baik untuk ngopi bagi penulis;
14. Pihak lain yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan tugas akhir ini. Akhirnya penulis berharap, semoga tulisan ini dapat bermanfaat.

Jember, 10 Juli 2018

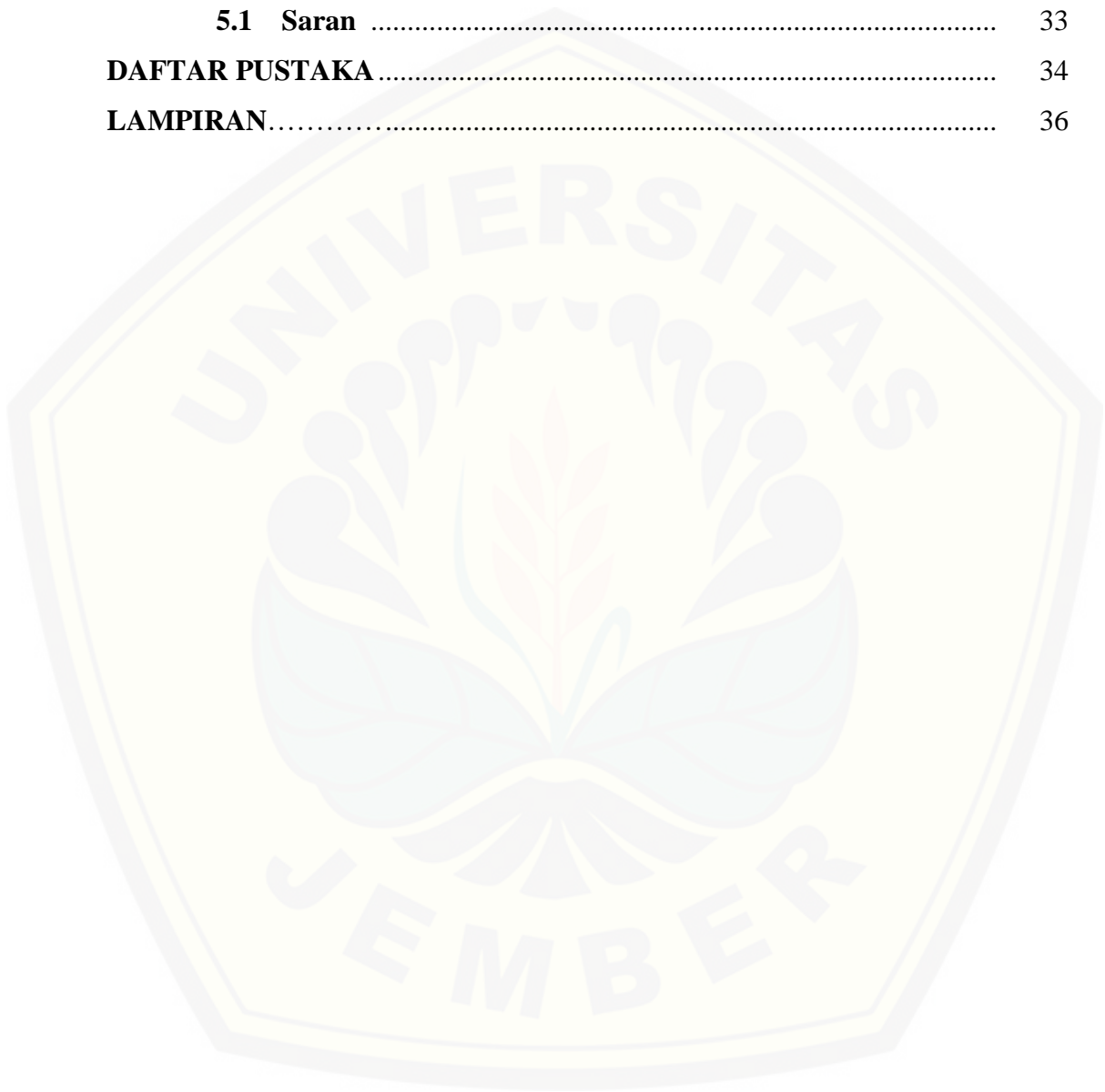
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN.....	v
HALAMAN PEMBIMBINGAN.....	vi
HALAMAN PENGESAHAN.....	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	xi
PRAKATA.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan dan Manfaat.....	3
1.3.1 Tujuan	3
1.3.2 Manfaat	4
1.4 Batasan Masalah	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kolektor Surya	5
2.2 Perpindahan Panas Kolektor Surya.....	6
2.2.1 Konduksi	7
2.2.2 Konveksi	7
2.2.3 Radiasi.....	8
2.3 Material Penyimpan Panas	9
2.3.1 Penyimpan Panas Sensibel	9
2.3.2 Penyimpan Panas Laten	10

2.4	<i>Phase Change Material (PCM)</i>	11
2.5	Mentega Sebagai Campuran PCM.....	13
2.6	Efisiensi Kolektor Surya.....	14
	2.6.1 Energi yang Diberikan ke Air (Energi Berguna)	14
	2.6.2 Energi yang Diterima Kolektor	15
	2.6.3 Efisiensi Kolektor Surya	15
2.7	Hipotesis	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		17
3.1	Metodologi Penelitian	17
3.2	Waktu dan Tempat Penelitian	17
3.3	Alat dan Bahan Penelitian.....	17
	3.3.1 Alat.....	17
	3.3.2 Bahan	17
3.4.	Variabel Penelitian.....	18
	3.4.1 Variabel Bebas	18
	3.4.2 Variabel Terikat	18
3.5	Parameter Penelitian	18
3.6	Prosedur Penelitian.....	18
	3.6.1 Tahapan Persiapan	18
	3.6.2 Tahapan Penelitian.....	19
3.7	Skema Alat Uji	20
	3.7.1 Tabel Pengukuran Suhu Percobaan.....	20
	3.7.2 Skema Pipa Tembaga dalam Kolektor Pelat Datar	21
	3.7.3 Dimensi Kolektor Pelat Datar	21
3.8	Skema Pengujian.....	22
3.9	Diagram Alir Penelitian.....	23
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		24
4.1	Karakteristik dan perubahan fasa PCM	24
	4.1.1 Peningkatan suhu PCM.....	24
	4.1.2 Penurunan suhu PCM.....	24

4.2 Energi Berguna	27
4.3 Efisiensi kolektor	28
BAB V PENUTUP.	32
5.1 Kesimpulan	32
5.1 Saran	33
DAFTAR PUSTAKA	34
LAMPIRAN	36

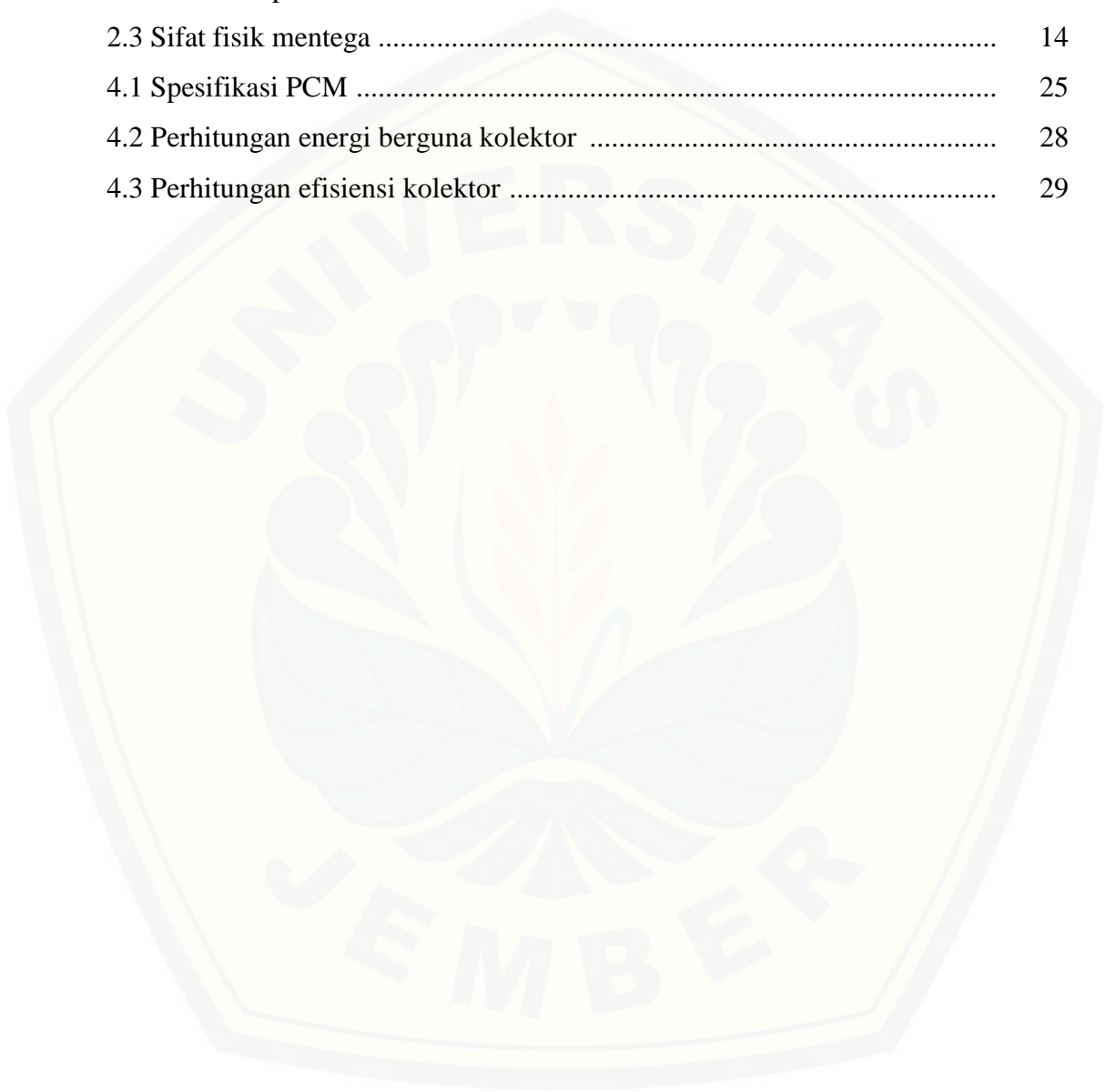


DAFTAR GAMBAR

2.1 Kolektor pelat datar.....	5
2.2 Skema kolektor surya pelat datar.	6
2.3 Bilangan Nusselt rata – rata dalam pipa pendek untuk berbagai prandtl...	8
2.4 Klasifikasi penyimpan panas	9
3.1 Skema kolektor pelat datar.....	20
3.2 Skema pipa tembaga	21
3.3 Dimensi kolektor pelat datar	21
3.4 Skema pengukuran suhu pipa kolektor	22
3.5 Diagram alir penelitian.....	23
4.1 Kenaikan suhu PCM pada proses pemanasan	24
4.2 Penurunan suhu PCM pada proses pendinginan	25
4.3 Perubahan fasa pada PCM	26
4.4 Energi berguna dari kolektor surya yang diserap air	27
4.5 Hasil efisiensi kolektor saat proses pemanasan	28
4.6 Hasil efisiensi kolektor saat proses pendinginan	30

DAFTAR TABEL

2.1 Karakteristik beberapa bahan penyimpan panas	10
2.2 Sifat fisik parafin	13
2.3 Sifat fisik mentega	14
4.1 Spesifikasi PCM	25
4.2 Perhitungan energi berguna kolektor	28
4.3 Perhitungan efisiensi kolektor	29



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan suatu kebutuhan yang penting dalam kehidupan manusia. Kebutuhan energi semakin meningkat dengan adanya kemajuan teknologi di dunia. Sumber energi yang banyak dipakai seperti minyak, dan gas bumi. Karena kebutuhan energi yang meningkat maka membuat usaha manusia untuk mengeksploitasi sumber energi tersebut juga meningkat. Mengingat terbatasnya persediaan sumber energi tersebut, manusia mulai memanfaatkan sumber energi lain seperti energi angin, energi air, ataupun energi matahari, dll.

Indonesia merupakan negara yang memiliki berbagai jenis sumber daya energi dalam jumlah yang cukup melimpah. Letak Indonesia yang berada pada 6° LU dan 11° LS daerah katulistiwa, maka wilayah Indonesia akan selalu disinari matahari selama 10 - 12 jam dalam sehari. Potensi sumber energi matahari di Indonesia sebagai sumber energi listrik alternatif sangat perlu dikembangkan mengingat, total intensitas penyinaran rata - rata 4,5 kWh per meter persegi perhari, matahari bersinar berkisar 2000 jam per tahun, sehingga tergolong kaya sumber energi matahari. Data Ditjen Listrik dan Pengembangan Energi pada tahun 1997, kapasitas terpasang listrik tenaga surya di Indonesia mencapai 0,88 MW dari potensi yang tersedia $1,2 \times 10^9$ MW (Widodo dkk, 2009).

Sejauh ini, salah satu pemanfaatan energi matahari yaitu untuk pemanas air. Pemanas air dengan menggunakan tenaga matahari atau lebih dikenal dengan *Solar Water Heater* (SWH) terus dikembangkan. Untuk dapat secara langsung memanfaatkan energi panas matahari untuk memanaskan air digunakan suatu perangkat yang dapat mengumpulkan energi matahari yang sampai ke permukaan bumi dan mengubahnya kembali menjadi energi kalor yang berguna. Perangkat ini disebut dengan kolektor surya. Kolektor surya adalah sistem perpindahan panas yang menghasilkan energi panas dengan memanfaatkan radiasi sinar matahari sebagai sumber energi utama. Namun, ada beberapa masalah dalam pemanfaatan energi surya adalah sifat radiasi surya yang *intermiten*, dan besarnya radiasi yang tersedia dipengaruhi oleh waktu, kondisi cuaca dan posisi lintang. Untuk

pemecahan permasalahan tersebut, teknologi yang dianggap sangat cocok adalah penyimpanan energi termal (*Thermal Energy Storage*, TES) (Sharma dkk, 2009). Sistem ini terdiri dari material dengan massa tertentu yang mampu menyimpan energi termal dalam bentuk panas atau dingin.

Media penyimpan energi panas dapat dibagi atas dua bagian, yaitu penyimpan panas sistem panas sensibel dan penyimpan 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 (Gultom, 2013). Diantara jenis penyimpan energi panas, yang paling menarik adalah penyimpanan energi dalam bentuk panas laten menggunakan material berubah fasa (PCM) yang memiliki banyak keuntungan diantaranya mampu menyimpan energi panas dalam kapasitas besar dengan volume material yang kecil.

Beberapa kajian dilakukan untuk pemanfaatan material penyimpan panas dari hidrat garam, parafin, dan senyawa organik (Abhat,1981). Parafin wax merupakan salah satu PCM yang memiliki sifat antara lain: densitas energinya cukup tinggi (~200 kJ/kg) dan konduktivitas termalnya rendah (~0,2 W/m.°C), sifat termalnya stabil di bawah 500°C, tidak berbahaya dan tidak reaktif, dan temperatur leleh beberapa produk parafin wax bervariasi antara 8 sampai 106°C (Nadjib dkk, 2015). Namun parafin memiliki konduktivitas termal yang rendah sehingga perlu waktu untuk proses peleburan dan pepadatan. yang mengurangi daya keseluruhan dari perangkat penyimpanan panas dan dengan demikian akan membatasi aplikasi (Buddhi D, 1977). Untuk mengatasi masalah ini, berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengidentifikasi konsep-konsep peningkatan laju perpindahan panas, diantaranya menggunakan pengaduk, atau mengalirkan slurry dalam alat penukar panas (Dailami dkk, 2012).

Dailami dkk melakukan penelitian mengenai penambahan Al_2O_3 dalam parafin sebagai PCM guna meningkatkan laju perpindahan panas dengan variasi fraksi volume. Penambahan Al_2O_3 yang memiliki konduktivitas termal 36 W/m°C menyebabkan naiknya konduktivitas termal tetapi, menurunkan panas laten parafin sehingga panas akan cepat hilang (Dailami dkk, 2012). Oleh karena itu,

perlu dilakukan kajian ulang penambahan material yang dapat meningkatkan panas laten parafin. Mentega merupakan salah satu material penyimpan energi termal dalam bentuk panas laten. Mentega memiliki panas spesifik sebesar 2300 J/kgK dengan kisaran temperatur diatas 40⁰C dan konduktifitas termal 0,29 W/mK (I.H. Tavman dan S. Tavman, 1999).

Berdasarkan pertimbangan diatas dapat disimpulkan bahawa masih diperlukan penelitian lanjutan guna melakukan kajian peningkatan efisiensi kolektor surya dan material penyimpan panas. Penelitian tersebut diarahkan pada pemilihan material penyimpan panas, dan perancangan alat penukar kalor. Pada penelitian ini akan dilakukan kajian peningkatan panas laten lilin parafin (*paraffin wax*) sebagai material penyimpan kalor dengan cara menambahkan material penyimpan panas laten lainnya yaitu mentega dalam material berubah fasa parafin. Untuk memperoleh optimasi kehandalan parafin – mentega sebagai material penyimpan panas akan dirancang alat uji berupa alat penukar panas untuk mengetahui laju aliran yang optimal dan kemampuan penyimpanan kalor melalui siklus termal penyerapan dan pengeluaran kalor.

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik penyimpan termal dan perubahan fasa PCM parafin dengan campuran mentega?
2. Bagaimana pengaruh pencampuran PCM parafin dengan mentega terhadap energi berguna saat proses *charging* serta *discharging*?
3. Bagaimana pengaruh pencampuran PCM parafin dengan mentega terhadap efisiensi kolektor surya?

1.3 Tujuan dan Manfaat

1.3.1 Tujuan

Dari perumusan masalah diatas, dapat diambil tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Mengetahui karakteristik penyimpanan termal dan perubahan fasa PCM parafin dengan campuran mentega.

2. Mengetahui pengaruh PCM campuran parafin – mentega terhadap energi berguna saat dilakukan proses *charging* serta *discharging*.
3. Mengetahui efisiensi termal kolektor surya dengan penambahan mentega ke dalam parafin sebagai PCM.

1.3.2 Manfaat

Adapun manfaat yang didapat pada penelitian ini adalah :

1. Dapat menambah referensi mengenai karakteristik penyimpanan termal PCM campuran parafin-mentega
2. Memberikan referensi untuk mengetahui unjuk kerja kolektor surya yang dilengkapi PCM parafin dengan mentega sebagai paduannya.

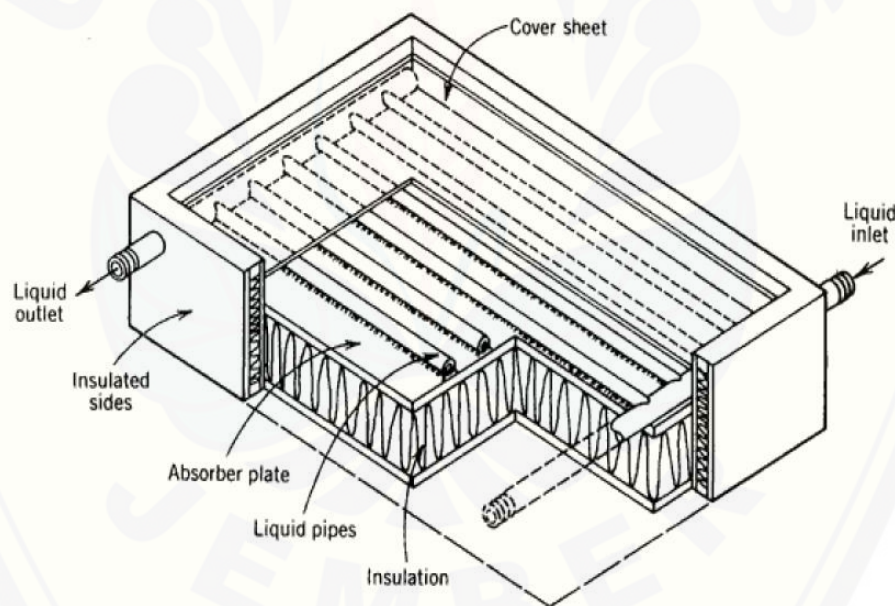
1.4 Batasan Masalah

1. Konduksi lingkungan dianggap ideal.
2. Sifat-sifat bahan tidak mengalami perubahan.
3. Tidak membahas *losses* kolektor surya.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kolektor Surya

Kolektor surya merupakan suatu alat yang dapat menyerap panas dari radiasi yang dipancarkan oleh matahari. Panas yang diserap kemudian disalurkan ke fluida kerja oleh komponen-komponen kolektor surya sehingga panas yang diserap dapat dimanfaatkan. Jenis kolektor surya yaitu stasioner (diam) dan kolektor surya yang menggunakan pengarah matahari (A. Soteris dalam Mahmud Jamil dkk, 2016). Kolektor surya pelat datar (Gambar 2.1) merupakan contoh dari jenis kolektor stasioner. Kolektor surya pelat datar digunakan untuk keperluan temperatur keluaran dibawah 100°C . Dalam aplikasinya kolektor surya pelat datar digunakan untuk memanaskan air dan udara. (Goswami, 1999).



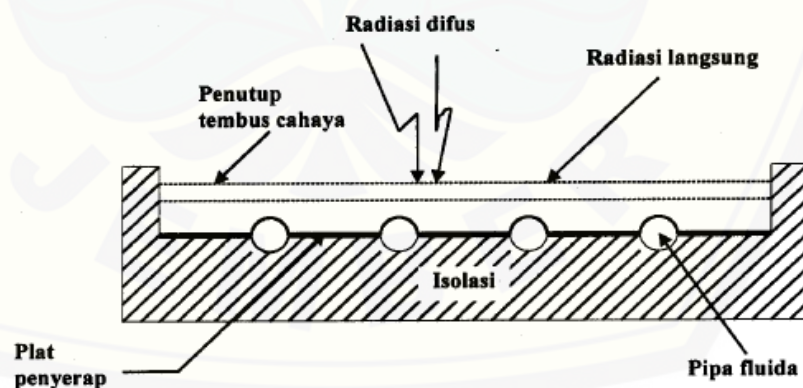
Gambar 2.1 Kolektor surya pelat datar.
(Fabio Struckman, 2008)

Menurut NK Caturwati dkk (2014) kolektor surya pelat datar terdapat komponen-komponen utama yang terdiri dari :

1. Kaca penutup digunakan untuk meneruskan radiasi yang dipancarkan oleh matahari sampai pada permukaan pelat absorber dan pipa

absorber yang dialiri air di dalamnya, dan sebagai isolasi thermal yang mencegah panas keluar dari pipa, pelat absorber ke lingkungan.

2. Pelat absorber atau yang disebut dengan pelat penyerap berfungsi menyerap radiasi matahari yang diteruskan kaca penutup dan kemudian dikonversi menjadi energi panas. Energi panas dialirkan melalui fluida kerja udara secara konveksi. Bahan yang dipakai untuk pelat penyerap biasanya yang memiliki konduktivitas termal tinggi, dan absorpsivitas tinggi, contohnya: aluminium, tembaga, kuningan, dan baja.
3. Pipa-pipa absorber digunakan untuk menyerap panas dari radiasi matahari yang kemudian disalurkan ke fluida, dan tempat untuk aliran air sebagai fluida kerja. Pemilihan bahan untuk pipa absorber sama dengan pelat absorber yaitu bahan yang memiliki konduktivitas termal tinggi, dan absorpsivitas tinggi.
4. Dinding isolator digunakan untuk memperkecil kerugian panas yang keluar ke samping, dan bawah kolektor. Jika kerugian panas yang keluar besar maka kinerja dari kolektor surya pelat datar sendiri juga berkurang.



Gambar 2.2 Skema kolektor surya pelat datar

2.2 Perpindahan Panas Pada Kolektor Surya

Perpindahan panas yang terjadi pada kolektor surya pelat datar antara lain : radiasi, konduksi, dan konveksi. Panas dari cahaya yang dipancarkan matahari

diserap oleh pipa dan pelat absorber secara radiasi, kemudian panas dari pelat dan pipa berpindah secara konveksi dan konduksi ke udara, isolator, dan fluida kerja.

2.2.1 Konduksi

Konduksi merupakan proses perpindahan panas dari temperatur tinggi ke temperatur lebih rendah melalui benda penghubung. Besar kecinya perpindahan panas dipengaruhi oleh karakteristik zat atau benda yang dilalui panas. Laju perpindahan panas konduksi dinyatakan dengan hukum Fourier :

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

Dimana k adalah konduktivitas thermal ($W/m.K$), A adalah luas penampang yang tegak lurus pada aliran pemanas (m^2), dan dT/dx gradien temperatur dalam arah aliran panas (K/m).

2.2.2 Konveksi

Konveksi adalah proses perpindahan panas dari temperatur tinggi ke temperatur rendah melalui aliran fluida disekitarnya. Perpindahan panas konveksi dinyatakan dalam hukum pendinginan Newton :

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

Dimana h adalah koefisien konveksi ($W/m^2.^0C$), A adalah luas permukaan kolektor (m^2), T_w adalah temperatur dinding, dan T_f adalah temperatur fluida (K).

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

$$h_c = \frac{N_u k}{x} \quad (2.3)$$

Dengan h_c adalah koefisien perpindahan panas secara konveksi ($W/m^2.^0C$), k adalah konduktivitas thermal ($W/m.^0C$), x adalah panjang lintasan bidang datar, dan N_u adalah bilangan *nusselt*.

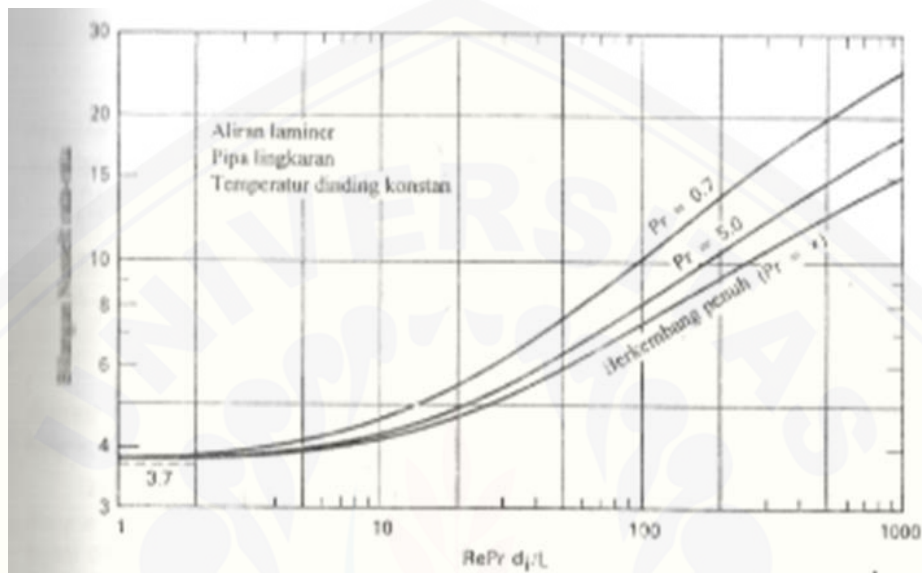
Untuk pemanas surya yang digunakan dalam daerah bilangan Reynolds antara 2000 sampai 1000, Shewen dan Holland menganjurkan nilai bilangan *nusselt* sebesar (Arismunandar, 1985) :

$$N_u = 0,00269.Re \quad (2.4)$$

Bilangan Reynolds diatas 2000 untuk aliran turbulen, dan dibawah 2000 untuk aliran laminer. Bilangan Reynolds dapat dirumuskan (Arismunandar, 1985):

$$Re = \frac{v d_i \rho}{\mu} \quad (2.5)$$

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



Gambar 2.3 Bilangan *Nusselt* rata-rata dalam pipa pendek untuk berbagai prandtl (Duffie dkk, 1991)

2.2.3 Radiasi

Radiasi adalah perpindahan panas dari temperatur tinggi ke temperatur lebih rendah tanpa zat perantara melalui gelombang elektromagnetik. Radiasi dari sinar matahari dapat digunakan untuk panas dan tenaga listrik. Perhitungan panas netto secara radiasi thermal antara dua badan ideal (hitam) dinyatakan :

$$q = \sigma A (T_1^1 - T_2^1)W \quad (2.6)$$

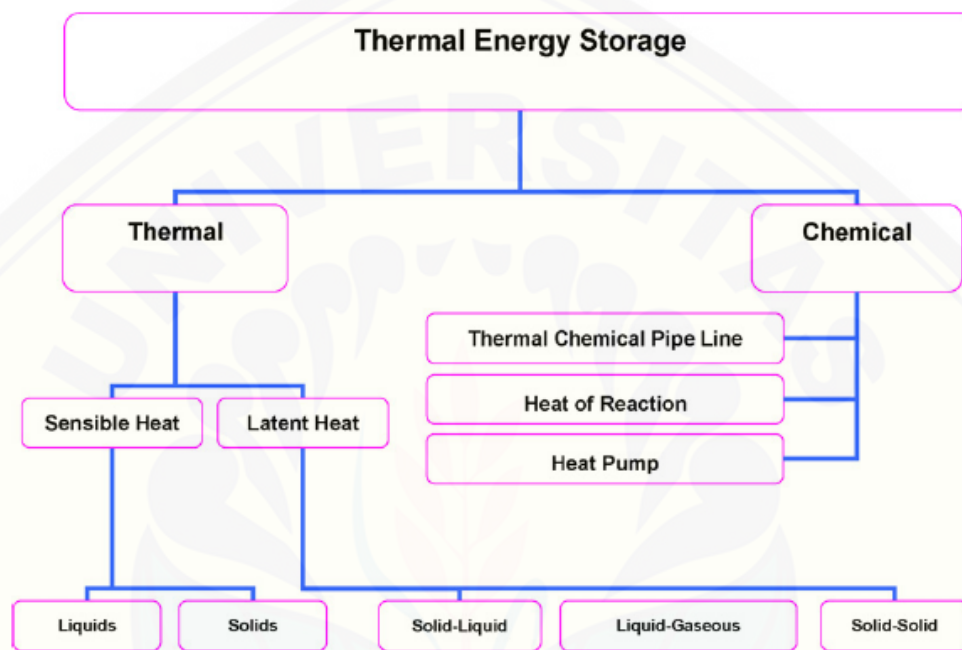
Dimana σ adalah konstanta Stefan – Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), A adalah luas penampang (m^2), T adalah derajat kelvin pangkat 4 (K^4). Sedangkan perhitungan panas untuk pelat paralel yang hilang pada kolektor surya dinyatakan dengan :

$$q = \frac{\sigma A (T_1^1 - T_2^1)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (2.7)$$

Dimana ϵ_1 adalah emisivitas pelat dan ϵ_2 adalah emisivitas kolektor.

2.3 Material Penyimpan Panas

Energi panas dari radiasi yang dipancarkan matahari dapat disimpan dalam bentuk panas laten, dan panas sensibel atau gabungan panas sensibel dan panas laten. Menurut J. P Holman (1993) material yang bagus untuk menyimpan energi panas yaitu material yang memiliki kapasitas kalor yang tinggi (Mulyanef, 2012).



Gambar 2.4 Klasifikasi penyimpanan panas (Sharma dkk, 2009)

2.3.1 Penyimpanan Panas Sensibel

Penyimpanan panas sensibel energi panas disimpan dengan menaikkan temperatur suatu media padat atau cair dengan menggunakan kapasitas panas yang dimiliki media tersebut. Jumlah energi panas yang tersimpan dalam bentuk panas sensibel dapat diketahui dengan persamaan :

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

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i) \quad (2.8)$$

Mengacu pada persamaan (2.8) dapat dilihat bahwa jumlah energi panas yang disimpan dalam bentuk panas sensibel tergantung pada massa, nilai panas spesifik dari bahan yang digunakan untuk menyimpan panas, dan perubahan suhu.

Tabel 2.1 Karakteristik beberapa bahan penyimpan panas sensibel

Phase	Medium	Temperature	Density	Specific Heat
		Range [°C]	Kg/m ³	J/kg K
Solid	Rock	7-27	2560	879
	Brick	17-37	1600	840
	Concrete	7-27	2100	880
	Sand	7-27	1550	800
	Soil	7-27	2040	1840
Liquid	Water	7-97	1000	4180
	Engine Oil	Up to 157	888	1880
	Ethanol	Up to 77	790	2400
	CaloriaHT 43	12-260	867	2200
	Butanol	Up to 118	809	2400
	Other Organic	Up to 420	800	2300

Sumber : (Sharma dkk, 2009)

2.3.2 Penyimpan Panas Laten

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 fasa padat ke cair material atau sebaliknya, sedangkan panas laten penguapan adalah jumlah energi panas yang diserap atau dilepaskan ketika perubahan fasa cair ke fasa uap material atau sebaliknya. Jumlah energi panas yang disimpan dalam bentuk panas laten dalam suatu material dapat dihitung dengan :

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

$$Q = m [C_{sp}(T_m - T_m) + \Delta h_m + C_{lp}(T_m - T_m)] \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) menjelaskan bahwa jumlah energi yang tersimpan sebagai panas laten tergantung pada massa dan nilai panas laten dari bahan yang digunakan. Bahan yang digunakan untuk menyimpan energi panas dalam bentuk panas laten disebut material berubah fasa (*phase change material, PCM*).

2.4 Phase Change Material (PCM)

Phase Change Material adalah material yang mengalami perubahan fasa ketika menyerap atau melepaskan panas (panas laten) dimana struktur kimianya tidak mengalami perubahan. Material yang digunakan sebagai PCM harus memiliki panas laten yang besar dan konduktifitas thermal yang tinggi.

PCM diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu *organik* dan *non organik*. PCM organik merupakan PCM dari golongan hidrokarbon, asam / ester, garam, alkohol, freon, dan polimer. Keuntungan penggunaan PCM *organik* adalah sifat fisik dan kimia yang stabil dan perilaku thermal material yang baik. Namun kerugiannya adalah konduktifitas thermal rendah, massa jenis rendah, titik lebur rendah, kelembaban tinggi, mudah terbakar dan perubahan volume.

PCM *non organik* merupakan campuran unsur metal pembentuk garam. Keuntungan PCM *non organik* adalah penyimpanan energi yang tinggi, konduktifitas thermal 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).

Kriteria utama untuk mengatur pemilihan bahan PCM adalah (Abhat, 1981):

1. Titik leleh PCM dalam kisaran suhu operasi yang diinginkan (kisaran suhu aplikasi).
2. Memiliki panas laten fusi yang tinggi per satuan massa, sehingga jumlah energi yang lebih dari bahan penyimpanan dapat disalurkan.
3. Panas spesifik tinggi untuk memberikan tambahan efek penyimpanan panas sensibel yang signifikan.
4. Konduktivitas termal yang tinggi, sehingga gradien temperatur untuk pengisian dan pemakaian bahan penyimpanan kecil.

5. Perubahan volume kecil selama fase transisi atau perubahan fasa, sehingga wadah dan penukar panas geometri sederhana dapat digunakan.
6. Menunjukkan sedikit atau tidak ada subcooling selama pembekuan.
7. Memiliki stabilitas kimia, tidak ada dekomposisi kimia dan ketahanan korosi dengan bahan konstruksi.
8. Tidak beracun, tidak mudah terbakar dan tidak berpotensi menyebabkan ledakan elemen / senyawa.
9. Mudah didapatkan dengan biaya terjangkau.

Berdasarkan kriteria, pemilihan PCM yang tepat untuk pengaplikasian adalah dengan melihat apakah temperatur PCM mencair dalam kisaran praktis aplikasi. Menurut Abhat (1981) kebanyakan kajian aplikasi penggunaan PCM menggunakan parafin, hidrat garam, dan senyawa organik lainnya. Namun, material tersebut memiliki konduktifitas thermal yang rendah sehingga membutuhkan waktu yang cukup untuk peleburan dan pemadatan sehingga mengurangi daya keseluruhan dari perangkat penyimpan panas dan dengan demikian akan membatasi aplikasi (Budhi, 1977).

Lilin parafin (paraffin Wax) adalah suatu hidrokarbon alkan dengan rumus kimia C_nH_{2n+2} (Wikipedia, 2010). Parafin merupakan salah satu material yang cocok sebagai material penyimpan panas. Data sifat – sifat fisik atau spesifikasi dari lilin parafin (paraffin wax) terdapat pada Tabel 2.2.

Untuk pengaplikasian PCM sebagai pemanas air tenaga surya, parafin dinilai sesuai dengan kriteria PCM yang dibutuhkan untuk aplikasi tersebut. Titik lebur parafin sesuai untuk temperatur air panas untuk mandi yaitu berkisar antara $55^{\circ}C$ - $64^{\circ}C$. Reaksi fisik parafin stabil, artinya ketika mengalami perubahan fasa strukturnya tidak mengalami perubahan. Parafin juga tidak mengandung unsur yang menyebabkan keracunan dan apabila kontak fisik dengan kulit tidak menyebabkan iritasi. Parafin tidak menyebabkan korosi, karena termasuk dalam golongan PCM non organik. Parafin juga mudah didapatkan dengan harga yang terjangkau sehingga tidak perlu mengeluarkan biaya yang tinggi. Akan tetapi dengan konduktifitas termal yang rendah, diperlukan

campuran pada PCM parafin untuk meningkatkan konduktifitas termal PCM parafin agar perpindahan panasnya lebih baik.

Berikut ini adalah tabel spesifikasi atau sifat-sifat fisik yang terdapat pada parafin wax :

Tabel 2.2 Sifat fisik parafin

<i>Properties</i>	Parafin
<i>Density</i> [kg/m^3]	947
Specific heat [$\text{J/kg}^\circ\text{K}$]	2890
Thermalconductivity [$\text{W/m}^\circ\text{K}$]	0.21 jika $T < T_{\text{solidus}}$ 0.12 jika $T > T_{\text{liquidus}}$
Laten Heat [J/kg]	178
Melting Point [$^\circ\text{C}$]	46,7

Sumber : (Zulfri dkk, 2014)

2.5 Mentega Sebagai Campuran PCM

Mentega adalah produk yang berasal dari lemak hewani (lemak susu), bukan lemak nabati. Mentega merupakan emulsi air-dalam-minyak, kebalikan dari krim. Mentega tetap padat saat didinginkan, tetapi meleleh secara konsisten pada suhu tertentu. Komposisi mentega umumnya terdiri dari lemak susu 82,5%, air 14%, garam 2,5% dan mineral 1%. Karena berasal dari lemak hewani, mentega juga mengandung vitamin A, D, E, dan K (wikipedia, 2015).

Dasar pemilihan mentega sebagai campuran PCM parafin adalah sebagai berikut :

1. Mentega merupakan penyimpan panas laten yang memiliki *basic* yang berbeda dengan parafin.
2. Reaksi fisik stabil, artinya ketika mengalami perubahan fasa strukturnya tidak mengalami perubahan.
3. Tidak beracun dan tidak berbahaya, mentega tidak mengandung unsur yang menyebabkan keracunan apabila terjadi kontak secara langsung dengan kulit dan tidak menyebabkan iritasi.
4. Tidak mudah terbakar.

5. Mentega mudah didapatkan dan harganya terjangkau.

Berikut ini adalah tabel spesifikasi atau sifat-sifat fisik yang terdapat pada mentega :

Tabel 2.3 Sifat fisik mentega

<i>Properties</i>	Mentega
<i>Density</i> [kg/m ³]	942,3 kg /m ³
Specific heat [J/kg ^{-K}]	2300
Thermal conductivity [W/m ^{°K}]	0,29
Laten Heat [kJ/kg]	60
Melting Point[°C]	-

Sumber : (Watson, 1974)

Dengan penambahan mentega yang memiliki spesifikasi pada tabel 2.3 sebagai campuran dengan kadar 10% dan 20% dari volume total PCM dapat meningkatkan karakteristik PCM. Peningkatan karakteristik PCM meliputi peningkatan panas spesifik PCM (C_p), densitas (ρ), viskositas (ν), dan konduktifitas (k), yang bertujuan untuk meningkatkan laju perpindahan panas yang terdapat pada PCM di dalam kolektor surya.

2.6 Efisiensi Kolektor Surya

Efisiensi dari kolektor dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara panas yang berguna dari kolektor ke air dengan energi yang diterima kolektor. Prinsip dasar untuk menghitung efisiensi kolektor adalah dengan membandingkan besar kenaikan temperatur fluida yang mengalir di dalam kolektor dengan intensitas cahaya matahari yang diterima kolektor. Untuk mendapatkan nilai efisiensi dari kolektor surya dapat menggunakan persamaan berikut:

2.6.1 Energi yang diberikan kolektor ke air (Energi berguna)

Energi panas yang diserap oleh air dari kolektor dapat diketahui dari persamaan di bawah ini:

$$q = m \times C_p \times (T_{fo} - T_{fi}) \quad (2.10)$$

dimana :

q = panas yang diserap air (j/s) atau (W)

m = laju aliran air (kg/s)

C_p = panas spesifik air (J/kg.K)

T_{fo} = Temperatur fluida output [K]

T_{fi} = Temperatur fluida input [K]

Laju aliran massa dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\dot{m} = \tilde{V} \times \rho \quad (2.11)$$

dimana :

\dot{m} = laju aliran massa (Kg/s)

\tilde{V} = debit aliran air (m³/s)

ρ = massa jenis air (Kg/m³)

2.6.2 Energi yang diterima kolektor

Energi panas yang diterima kolektor dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{q}_{in} = A_k \times I_g \quad (2.12)$$

dimana :

q_{in} = panas yang diterima kolektor (J/s) atau (W)

A_k = luas penampang kolektor (m²)

I_g = pancaran radiasi matahari (Kwh/m²)

2.6.3 Efisiensi kolektor surya (%)

Efisiensi dari kolektor surya dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara panas yang berguna dari kolektor dengan intensitas dari radiasi cahaya.

$$\eta = \frac{m \times C_p \times T_{fo} - T_{fi}}{A_k \times I_g} \quad (2.13)$$

Dengan demikian efisiensi per laju aliran massa dapat ditulis :

$$\frac{\eta}{m} = \frac{C_p \times T_{fo} - T_{fi}}{A_k \times I_g} \quad (2.14)$$

2.7 Hipotesis

Pengujian karakteristik PCM pada proses pemanasan dan pendinginan menunjukkan penambahan mentega dengan kadar 10%, dan 20% dari volume total pada PCM dapat meningkatkan konduktivitas termal PCM sehingga mampu meningkatkan energi berguna yang dihasilkan oleh kolektor surya, dan hal ini juga dapat memperbesar nilai efisiensi kolektor surya.



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 – mentega, serta perpindahan panas yang terjadi pada PCM dalam kolektor surya, guna mengetahui efisiensi kolektor surya yang paling maksimal.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratium Konversi Energi Fakultas Teknik Mesin Universitas Jember yang meliputi pengambilan sampel data nilai perpindahan kolektor radiasi matahari ke kolektor surya dalam laju aliran pemanas air. Pembuatan kolektor surya beserta pengujian, dan pengambilan data dilakukan di Workshop Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Jember. Waktu penelitian berlangsung selama 1 bulan yaitu dimulai bulan Maret 2017 sampai dengan April 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. *Termoreader*
3. *Pyranometer*
4. 2 lampu 1000 watt

3.3.2 Bahan

1. Parafin Wax
2. Mentega
3. Pipa Tembaga Ø12,7 mm dan Ø25,6 mm
4. Air

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas dari penelitian ini adalah penambahan persentase campuran mentega sebanyak 10% dan 20% dari volume total PCM dalam pipa kolektor surya.

3.4.2 Variabel Terikat

Variabel terikat dari penelitian ini adalah

1. Karakteristik penyimpan termal dan perubahan fasa PCM campuran parafin dengan mentega.
2. Energi berguna kolektor surya.
3. Efisiensi kolektor surya.

3.5 Parameter Penelitian

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

1. Suhu lingkungan .
2. Radiasi warm lampu dengan *Pyranometer*.
3. Konduksi antara pipa luar dengan Material PCM dengan Persamaan 2.1.
4. Konduksi pada Material PCM dengan pipa dalam dengan Persamaan 2.1.
5. Konveksi antara pipa dalam dengan air menggunakan Persamaan 2.2.
6. Energi berguna kolektor surya secara keseluruhan menggunakan Persamaan 2.10.
7. Efisiensi kolektor surya dengan menggunakan Persamaan 2.13.

3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Tahap Persiapan

1. Mempersiapkan bahan PCM dengan variasi campuran mentega 10% dan 20% dari volume total PCM parafin.

2. Mengukur suhu lingkungan.
3. Menganalisa karakteristik PCM menggunakan gelas ukur dengan variasi PCM 100% parafin, PCM campuran parafin – mentega 10%, dan 20% dari volume total dengan suhu 100°C.

3.6.2 Tahap Penelitian

1. Pengambilan data dilakukan dengan menempatkan kolektor di bawah sinar lampu 2000 watt.
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 kaca bagian penutup.
3. Intensitas radiasi lampu diukur dengan sensor *pyranometer* (820 W/m²).
4. Mencatat hasil pengukuran pada tiap interval waktu setiap 30 menit.
5. Pengukuran dilakukan pada kondisi lampu dihidupkan (*proses charging*) selama 360 menit dan kondisi lampu dimatikan (*proses discharging*) selama 120 menit.
6. Memasukkan data ke dalam tabel 3.1 hingga tabel 3.9
7. Menghitung energi berguna yang dihasilkan kolektor surya.

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p (T_{f0} - T_{f1})$$

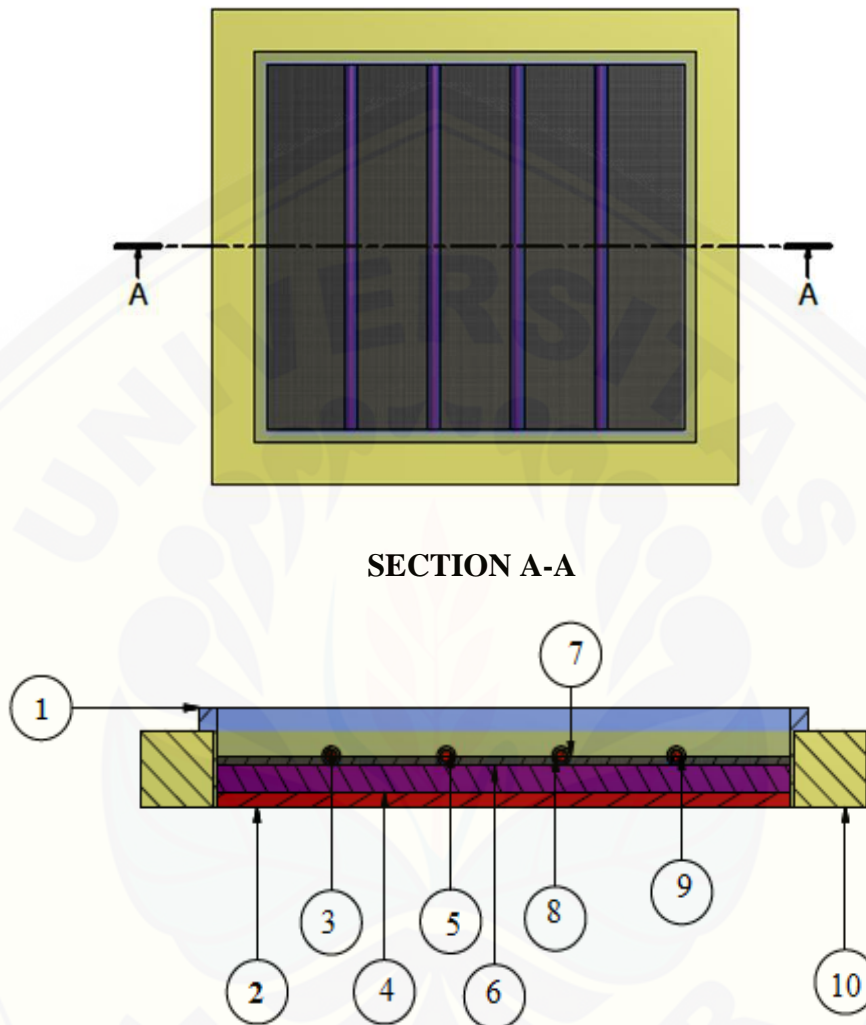
8. Menghitung efisiensi kolektor surya dilengkapi PCM

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot C_p (T_{f0} - T_{f1})}{A_c \cdot I_T}$$

9. Menganalisa grafik antara efisiensi berdasarkan laju aliran air dengan perbedaan temperatur.

3.7 Skema Alat Uji

3.7.1 Skema Kolektor Surya Pelat Datar



Gambar 3.1 Skema kolektor surya pelat datar

Keterangan :

1 = Kaca

6 = Plat tembaga

2 = Glaswol

7 = Pipa

3 = Air

8 = Parafin – Mentega (10% VT)

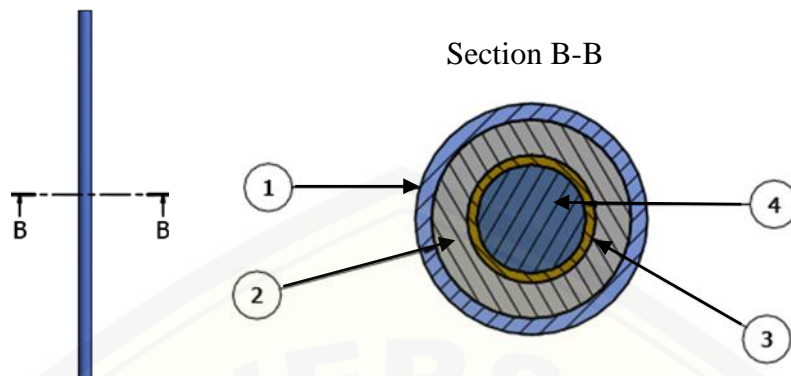
4 = Sterofoam

9 = Parafin – Mentega (20% VT)

5 = Parafin

10 = Kayu

3.7.2 Skema Pipa Tembaga Dalam Kolektor Surya Pelat Datar

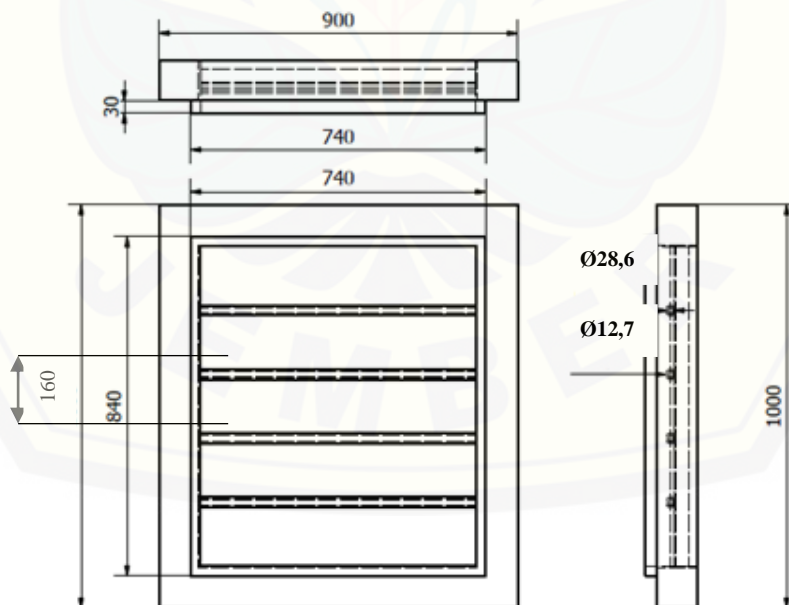


Gambar 3.2 Skema pipa tembaga

Keterangan :

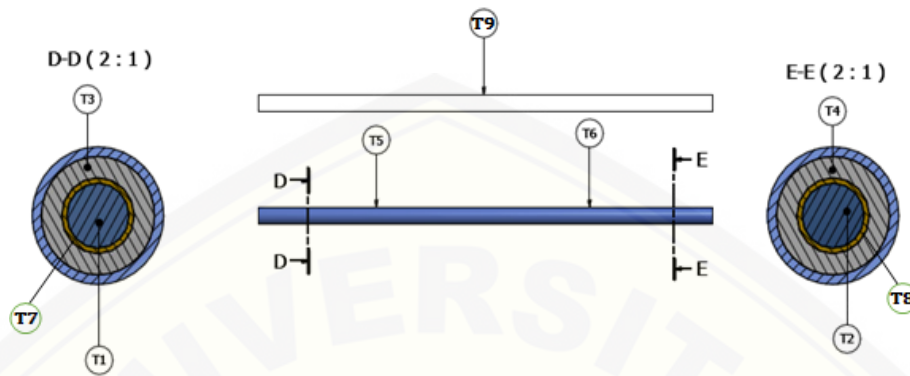
- 1 = Pipa Tembaga Luar 3 = Pipa Tembaga Dalam
- 2 = PCM 4 = Air

3.7.3 Dimensi Kolektor Surya Pelat Datar



Gambar 3.3 Dimensi kolektor surya pelat datar

3.8 Skema Pengujian



Gambar 3.4 Skema pengukuran suhu pipa kolektor

Keterangan :

T1 = Suhu air in

T6 = Suhu pipa bagian luar 2

T2 = Suhu air out

T7 = Suhu pipa bagian dalam 1

T3 = suhu PCM 1

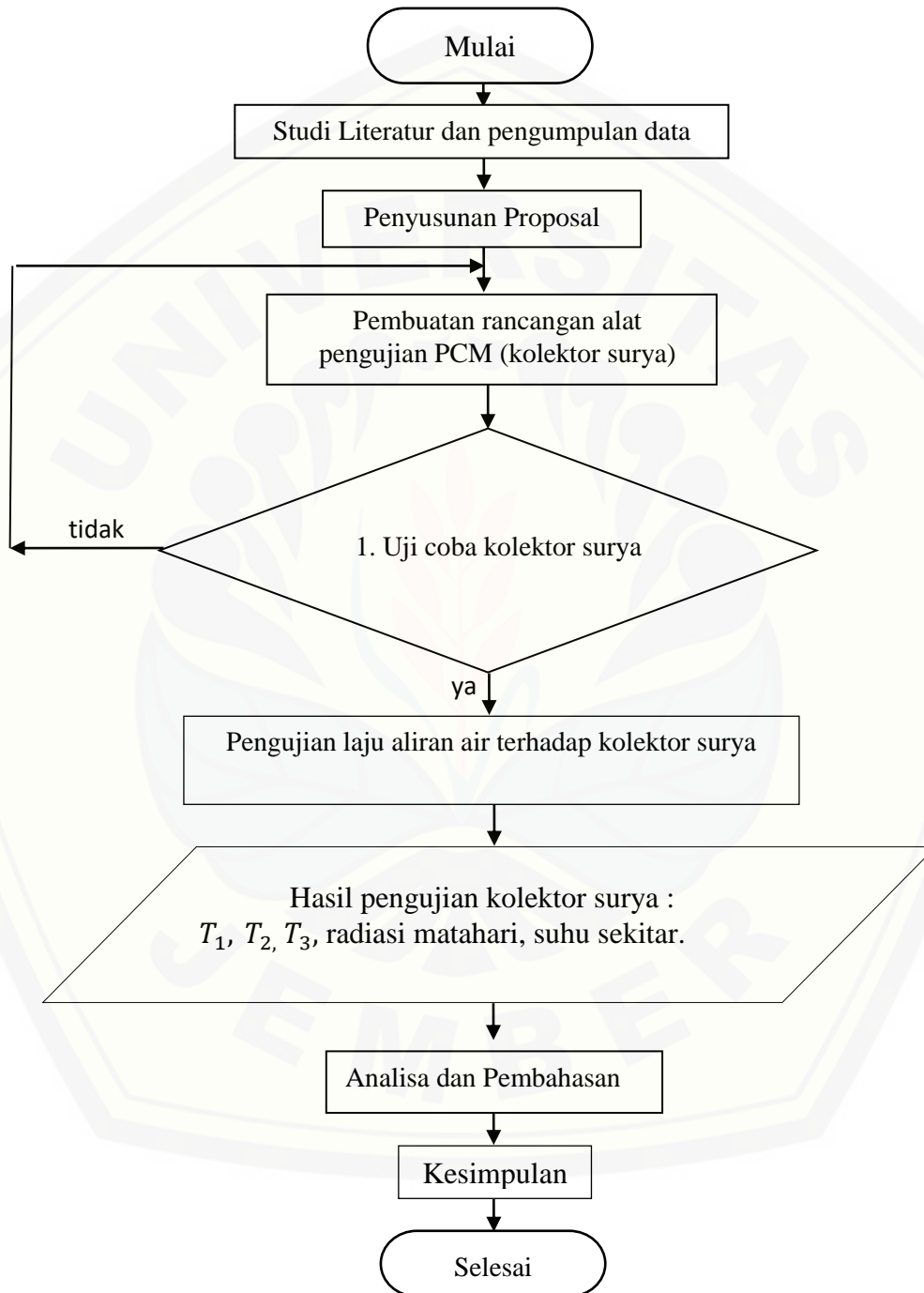
T8 = Suhu pipa bagian dalam 2

T4 = Suhu PCM 2

T9 = Suhu kaca

T5 = Suhu pipa bagian luar

3.9 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.5 Diagram alir penelitian



BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

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

1. Karakteristik pegujian PCM pada proses pemanasan terbaik didapatkan oleh PCM campuran parafin-mentega 20%, hal itu dikarenakan memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi. Sedangkan pada proses pendinginan PCM yang mampu menahan panas lebih lama terdapat pada PCM parafin 100%.
2. Energi berguna pada proses pemanasan yang paling besar terdapat pada pipa kolektor surya non PCM, hal ini terjadi karena radiasi langsung disalurkan oleh plat dan pipa absorber yang terbuat dari bahan tembaga langsung ke air. Untuk pipa yang dilengkapi PCM energi berguna terbesar didapat oleh PCM parafin-mentega 20%. Kemudian PCM parafin-mentega 20% dan yang terendah PCM parafin 100%. Sedangkan pada proses pendinginan energi berguna terbesar terdapat pada PCM parafin 100%.
3. Efisiensi kolektor surya terbaik terdapat pada kolektor surya yang tidak dilengkapi PCM yaitu sebesar 101,41 %. sedangkan kolektor surya dengan penambahan PCM campuran parafin-mentega 20%, 10% dan parafin murni adalah sebesar: 82,09%, 74,85 %, 62,78%. Meskipun memiliki efisiensi yang cukup tinggi kolektor surya tanpa dilengkapi PCM tidak bisa melepaskan panas pada saat proses pendinginan sehingga saat proses tersebut energi berguna pada kolektor surya tanpa PCM sangat kecil. Sedangkan pada kolektor surya yang dilengkapi PCM energi berguna yang dihasilkan pada saat proses pendinginan masih besar.
4. PCM yang cocok digunakan pada kolektor surya adalah PCM dengan penyerapan panas yang cepat yaitu PCM campuran parafin-mentega 20%, sedangkan PCM parafin 100% cocok digunakan sebagai termal *storage* pada tempat penampung air hasil pemanasan kolektor surya.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian tentang “Analisis Thermal Kolektor Surya Yang Dilengkapi PCM Campuran Parafin - Mentega”, maka disarankan hal-hal sebagai berikut:

1. Kolektor surya yang lebih proposional supaya dapat bekerja lebih maksimal dalam penyerapan panas, dan pengambilan data.
2. Persiapan lebih untukantisipasi hal yang tidak diinginkan seperti kebocoran pada pipa kolektor, termokopel yang kurang akurat, dan sebagainya.
3. Untuk penelitian selanjutnya masih banyak bahan penyimpan panas lain selain parafin yang bisa digunakan sebagai PCM.

DAFTAR PUSTAKA

- Abhat, A. Performance studies of a finned heat pipe latent heat thermal energy storage system. Sun, NY: Pergamon Press; 1981. pp. 541–546.
- Agyenim, F., N. Hewitt, P. Eames, dan M. Smyth. 2010. A review of material, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 : 615-628.
- Arismunandar, W. 1985. *Teknologi Rekayasa Surya*. Jakarta : PT Pradnya Paramita.
- Djoko Adi Widodo, Suryono, Tatyantoro A., Tugino. 2009. Pemberdayaan Energi Matahari sebagai Energi Listrik Lampu Pengatur Lalu Lintas. Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
- 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, 24-30 Agustus 1977.
- Caturwati, N.K., S. Agung, dan C. Dwi. 2014. Sudut pasang solar water heater dalam optimalisasi penyerapan radiasi matahari di daerah cilegon. *Proceedings Seminar Nasional teknik Mesin Universitas Trisakti*. 20 Februari 2014. KE-03: 1-8.
- M. Syahril Gultom. 2013. Perancangan dan Pengujian Pemanas Air Tenaga Surya yang disertai Material Berubah Fasa (PCM) sebagai Medium Penyimpan Panas. Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara
- Dailami, Hamdani, A. Syuhada, dan Irwansyah. 2012. Karakteristik perpindahan panas peleburan parafin – Al_2O_3 sebagai material penyimpan panas. Teknik Mesin Universitas Syah Kuala.
- Irawan D., B. Kristiawan, dan E. P. Budiman. 2013. Studi eksperimental perpindahan kalor konveksi fluida nano Al_2O_3 / ethylene glycol pada circular tube dibawah Kondisi Fluks Kalor Konstan. *Mekanika* 11(2): 101-108.
- Muhammad Nadjib, Sukamta, Novi Caroko, dan Tito Hadji A.S. 2015. Studi Eksperimental Penyimpan Energi Termal pada Tangki Pemanas Air Tenaga Surya yang Berisi PCM. Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

- Mulyanef, Melda Sari, Wira Mario, dan Henry Nasution. 2012. Kaji Eksperimental untuk Meningkatkan Performasi Destilasi Surya Basin Tiga Tingkat menggunakan beberapa Bahan Penyimpan Panas. Teknik Mesin Universitas Bung Hatta.
- Muhammad Zulfri, Razali Thaib, dan Hamdani. 2014. Kaji Eksperimental Pemanfaatan Material Penyimpan Panas pada Kolektor Pemanas Air Surya. Proceedings Seminar Nasional Teknik Mesin Universitas Trisakti. 20 Februari 2014. KE20 : 1-6.
- I.H. Tavman, S. Tavman. 1999. Measurement of thermal conductivity of dairy products. *Journal of Food Engineering*. Elsevier.
- E. L. Watson. 1975. Thermal Properties of Butter. *Canadian Agricultural Engineering*. 12(17) : 68-71
- Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi. 2015. *Outlook Energi Indonesia 2015*. Jakarta : BPPT.
- Sharma, A., V. V. Tyayogi, C. R Chen, dan 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., T. Sitepu, H. Ambarita, dan M. S. Gultom. 2013. Pengujian proses *charging* sebuah pemanas air energi surya tipe kotak sederhana yang dilengkapi PCM (phase change material) dengan luas permukaan kolektor 2 M². *Jurnal Dinamis*. 2(12): 34-42.
- “Butter”. 2008. <http://www.gcca.org/wp-content/uploads/2012/09/Butter.pdf>

LAMPIRAN

Lampiran A

A.1a Tabel karakteristik PCM pemanaan

Waktu (menit)	Temperatur (⁰ C)		
	Parafin 100%	Parafin- Mentega 10%	Parafin- Mentega 20%
0	29	29	29
5	34,5	34,7	35,1
10	38,2	40,5	44,5
15	43,1	45,1	56,4
20	46,4	50,9	70,1
25	49,4	66,2	79,4
30	53	79,8	86,7
35	73,5	86,2	91,4
40	80,2	91,3	94,6
45	84,8	95,2	97,8
50	88,1	98,3	99,5
55	91,4	99,7	100
60	93,2	100	100

A.1b Tabel karakteristik PCM pendinginan

Waktu (menit)	Temperatur (°C)		
	Parafin 100%	Parafin-mentega 10%	Parafin-mentega 20%
0	100,0	100	100
5	86,4	87,7	88,3
10	74,8	75,9	77,2
15	65,3	66,7	68,2
20	61,3	59,8	60,4
25	60,7	58,5	57,9
30	59,9	58,2	57,4
35	59,7	58,1	57,2
40	59,5	57,9	56,7
45	59,4	57,6	56
50	59,1	57,3	55,4
55	58,8	56,7	54,1
60	58,5	56	53
65	58,1	55,2	51,2
70	57,4	53,8	49,5
75	56,2	52,1	47,2
80	54,7	50,5	45,9
85	51,1	47,8	44,3
90	48,4	45,9	42,8
95	46,1	43,8	41,1
100	44,4	42,4	39,3
105	42,7	40,8	38
110	41,5	39,5	36,8
115	39,3	38,1	35,4
120	37,8	36,6	34,7

A.2a Tabel data percobaan untuk PCM parafin 100%

w	T1 (°C)	T2 (°C)	x T1- T2	T3 (°C)	T4 (°C)	x T3- T4	T5 (°C)	T6 (°C)	x T5- T6	T7 (°C)	T8 (°C)	T9 (°C)	T10 (°C)
0	28	29	28,5	30	29	29,5	29	30	29,5	29	28	30	30
30	60	60	60	62	64	63	50	47	48,5	37	28	58	76
60	63	61	62	70	70	70	50	48	49	42	28	60	79
90	66	65	65,5	72	70	71	50	51	50,5	42	28	64	80
120	67	69	68	72	73	72,5	51	54	52,5	43	28	64	81
150	69	69	69	74	73	73,5	53	54	53,5	44	27	64	83
180	69	70	69,5	74	75	74,5	53	55	54	46	27	65	83
210	71	70	70,5	75	75	75	54	55	54,5	47	27	67	84
240	71	70	70,5	77	76	76,5	57	58	57,5	49	27	69	86
270	72	71	71,5	78	76	77	57	58	57,5	51	28	69	89
300	73	72	72,5	79	80	79,5	57	60	58,5	52	28	69	90
330	73	74	73,5	79	80	79,5	58	60	59	52	28	70	91
360	73	74	73,5	79	81	80	59	61	60	53	27	72	91
390	65	69	67	61	62	61,5	54	55	54,5	48	27	40	27
420	51	52	51,5	48	47	47,5	47	46	46,5	43	27	39	27
450	47	45	46	39	39	39	41	40	40,5	38	27	32	27
480	38	37	37,5	34	34	34	35	33	34	33	27	30	27

A.2b Tabel data percobaan untuk PCM paraffin – mentega 10%

w	T1 (°C)	T2 (°C)	x T1- T2	T3 (°C)	T4 (°C)	x T3- T4	T5 (°C)	T6 (°C)	x T5- T6	T7 (°C)	T8 (°C)	T9 (°C)	T10 (°C)
0	28	28	28	30	29	29,5	29	30	29,5	29	28	30	30
30	68	69	68,5	70	71	70,5	50	47	48,5	40	28	58	76
60	71	71	71	73	72	72,5	54	55	54,5	43	28	60	79
90	72	71	71,5	75	76	75,5	59	58	58,5	45	28	64	80
120	74	72	73	76	76	76	59	60	59,5	47	28	64	81
150	74	73	73,5	76	76	76	60	60	60	48	27	64	83
180	75	73	74	77	76	76,5	61	60	60,5	49	27	65	83
210	75	74	74,5	78	77	77,5	61	61	61	50	27	67	84
240	75	75	75	78	79	78,5	62	61	61,5	52	27	69	86
270	76	77	76,5	79	79	79	63	61	62	53	27	69	89
300	77	76	76,5	80	81	80,5	62	62	62	54	27	69	90
330	76	77	76,5	80	82	81	63	63	63	56	28	70	91
360	78	79	78,5	83	85	84	63	64	63,5	58	27	72	91
390	63	62	62,5	54	53	53,5	54	55	54,5	44	27	40	27
420	50	48	49	44	41	42,5	42	44	43	38	27	39	27
450	44	42	43	36	36	36	37	34	35,5	34	27	32	27
480	35	35	35	33	34	33,5	32	33	32,5	32	27	30	27

A.2c Tabel data percobaan untuk PCM parafin – mentega 20%

w	T1 (°C)	T2 (°C)	x T1- T2	T3 (°C)	T4 (°C)	x T3- T4	T5 (°C)	T6 (°C)	x T5- T6	T7 (°C)	T8 (°C)	T9 (°C)	T10 (°C)
0	28	28	28	30	29	29,5	29	30	29,5	29	28	30	30
30	72	73	72,5	75	76	75,5	56	54	55	42	28	58	76
60	73	73	73	75	75	75	57	54	55,5	44	28	60	79
90	74	75	74,5	77	76	76,5	60	60	60	46	28	64	80
120	76	77	76,5	78	79	78,5	60	61	60,5	50	28	64	81
150	77	77	77	78	80	79	61	61	61	51	27	64	83
180	79	77	78	81	81	81	63	61	62	51	27	65	83
210	80	78	79	82	81	81,5	64	63	63,5	53	27	67	84
240	80	79	79,5	82	83	82,5	64	65	64,5	55	27	69	86
270	81	78	79,5	83	83	83	66	66	66	57	28	69	89
300	81	80	80,5	84	85	84,5	67	66	66,5	58	28	69	90
330	82	80	81	84	86	85	68	67	67,5	60	28	70	91
360	83	80	81,5	85	87	86	68	69	68,5	61	27	72	91
390	60	59	59,5	44	45	44,5	50	53	51,5	43	27	40	27
420	49	47	48	37	39	38	41	40	40,5	35	27	39	27
450	41	42	41,5	36	34	35	36	35	35,5	31	27	32	27
480	32	33	32,5	30	31	30,5	31	31	31	30	27	30	27

A.2d Tabel data percobaan kolektor non PCM

w	T1 (°C)	T2 (°C)	x T1- T2	T3 (°C)	T4 (°C)	x T3- T4	T5 (°C)	T6 (°C)	x T5- T6	T7 (°C)	T8 (°C)	T9 (°C)	T10 (°C)
0							31	30	30,5	29	28	30	30
30							67	67	67	46	28	58	76
60							69	71	70	50	28	60	79
90							72	71	71,5	53	28	64	80
120							72	74	73	56	28	64	81
150							73	75	74	60	27	64	83
180							74	76	75	63	27	65	83
210							75	77	76	64	27	67	84
270							75	77	76	64	27	69	86
240							75	78	76,5	65	28	69	89
300							76	79	77,5	65	28	69	90
330							77	79	78	67	28	70	91
360							77	80	78,5	69	27	72	91
390							43	40	41,5	34	27	40	27
420							33	32	32,5	30	27	39	27
450							32	31	31,5	28	27	32	27
480							32	31	31,5	27	27	30	27

Keterangan :

T1 = Suhu PCM 1 ($^{\circ}\text{C}$)

T6 = Suhu pipa bagian dalam 2 ($^{\circ}\text{C}$)

T2 = Suhu PCM 2 ($^{\circ}\text{C}$)

T7 = Suhu air keluar ($^{\circ}\text{C}$)

T3 = suhu pipa luar 1 ($^{\circ}\text{C}$)

T8 = Suhu air masuk ($^{\circ}\text{C}$)

T4 = Suhu pipa luar 2 ($^{\circ}\text{C}$)

T9 = Suhu kaca ($^{\circ}\text{C}$)

T5 = Suhu pipa dalam 1 ($^{\circ}\text{C}$)

T10 = Suhu plat ($^{\circ}\text{C}$)

W = waktu (menit)

A.3a Tabel spesifikasi PCM parafin 100%

waktu (menit)	Density parafin (kg/m^3)	ViskositasParafin (Ns/m^2)	k parafin ($\text{w}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)
0	1057,082452	0,00000878	0,12
30	1004,016064	0,00000878	0,12
60	999,3337775	0,00000878	0,12
90	999,3337775	0,00000878	0,12
120	999,3337775	0,00000878	0,12
150	998,6684421	0,00000878	0,12
180	998,003992	0,00000878	0,12
210	998,003992	0,00000878	0,12
240	998,003992	0,00000878	0,12
270	996,0159363	0,00000878	0,12
300	995,35501	0,00000878	0,12
330	992,7200529	0,00000878	0,12
360	990,0990099	0,00000878	0,12
390	1002,673797	0,00000878	0,12
420	1023,890785	0,00000878	0,12
450	1031,636864	0,00000878	0,12
480	1043,841336	0,00000878	0,12

A.3b Tabel spesifikasi PCM campuran
parafin – mentega 10%

waktu (menit)	densitas mentega (kg/m ³)	densitas parafin (kg/m ³)	densitas campuran (kg/m ³)	viskositasParafin (Ns/m ²)	viskositas campuran (Ns/m ²)	k campuran (w/m ^{°C})
0	942,3	1057,082452	1045,604207	0,00000878	0,00001098	0,1359
30	942,3	1004,016064	1005,161174	0,00000878	0,00001098	0,1359
60	942,3	999,3337775	1002,709139	0,00000878	0,00001098	0,1359
90	942,3	999,3337775	998,4496919	0,00000878	0,00001098	0,1359
120	942,3	999,3337775	995,4316021	0,00000878	0,00001098	0,1359
150	942,3	998,6684421	994,23	0,00000878	0,00001098	0,1359
180	942,3	998,003992	993,6303997	0,00000878	0,00001098	0,1359
210	942,3	998,003992	992,4335928	0,00000878	0,00001098	0,1359
240	942,3	998,003992	992,4335928	0,00000878	0,00001098	0,1359
270	942,3	996,0159363	991,2399668	0,00000878	0,00001098	0,1359
300	942,3	995,35501	990,049509	0,00000878	0,00001098	0,1359
330	942,3	992,7200529	988,8622068	0,00000878	0,00001098	0,1359
360	942,3	990,0990099	988,8622068	0,00000878	0,00001098	0,1359
390	942,3	1002,673797	996,6364171	0,00000878	0,00001098	0,1359
420	942,3	1023,890785	1015,731706	0,00000878	0,00001098	0,1359
450	942,3	1031,636864	1022,703177	0,00000878	0,00001098	0,1359
480	942,3	1043,841336	1033,687203	0,00000878	0,00001098	0,1359

A.3c Tabel spesifikasi PCM campuran
parafin – mentega 20%

waktu (menit)	densitas mentega (kg/m ³)	densitas parafin (kg/m ³)	Densitas campuran (kg/m ³)	ViskositasParafin (Ns/m ²)	v campuran (Ns/m ²)	k campuran (w/m°C)
0	942,3	1057,082452	1034,125962	0,00000878	0,00001317	0,1544
30	942,3	1004,016064	991,6728514	0,00000878	0,00001317	0,1544
60	942,3	999,3337775	987,927022	0,00000878	0,00001317	0,1544
90	942,3	999,3337775	987,927022	0,00000878	0,00001317	0,1544
120	942,3	999,3337775	987,927022	0,00000878	0,00001317	0,1544
150	942,3	998,6684421	987,3947537	0,00000878	0,00001317	0,1544
180	942,3	998,003992	986,8631936	0,00000878	0,00001317	0,1544
210	942,3	998,003992	986,8631936	0,00000878	0,00001317	0,1544
240	942,3	998,003992	986,8631936	0,00000878	0,00001317	0,1544
270	942,3	996,0159363	985,272749	0,00000878	0,00001317	0,1544
300	942,3	995,35501	984,744008	0,00000878	0,00001317	0,1544
330	942,3	992,7200529	982,6360424	0,00000878	0,00001317	0,1544
360	942,3	990,0990099	980,5392079	0,00000878	0,00001317	0,1544
390	942,3	1002,673797	990,5990374	0,00000878	0,00001317	0,1544
420	942,3	1023,890785	1007,572628	0,00000878	0,00001317	0,1544
450	942,3	1031,636864	1013,769491	0,00000878	0,00001317	0,1544
480	942,3	1043,841336	1023,533069	0,00000878	0,00001317	0,1544

A.4 Tabel koefisien konveksi (h) dan Nusselt

waktu (menit)	h parafin 100% (W/m ² C)	h mentega 10% (W/m ² C)	h mentega 20% (W/m ² C)	Nu parafn 100%	Nu mentega 10%	Nu mentega 20%
0	142,6122507	169,3271808	183,29927	18,89612321	19,81091	18,87602586
30	153,8220162	144,0606343	170,0481792	20,38141714	16,85478	17,51143815
60	194,7345669	132,7863738	153,2470306	25,80233011	15,53571	15,78126805
90	174,9036296	169,2082658	152,4697594	23,17473092	19,79699	15,70122522
120	164,7951306	156,5323103	151,4633033	21,8353548	18,31393	15,59758111
150	164,1674379	149,2575895	151,1964483	21,75218552	17,46281	15,57010057
180	168,2171236	148,9823533	166,7650235	22,28876887	17,43061	17,17334115
210	163,2599848	155,6209814	158,8278055	21,63194799	18,20731	16,3559722
240	175,4342707	161,4650754	165,9727682	23,24504087	18,89106	17,09175528
270	170,9706515	147,6610271	172,4242775	22,65361133	17,27601	17,75612702
300	180,9361491	166,0219106	177,6973424	23,97403976	19,4242	18,29914342
330	173,3857931	170,931953	177,327456	22,97361759	19,99866	18,26105279
360	176,7734321	178,5701006	182,2485306	23,42247975	20,89231	18,76782148
390	174,0614997	214,2280583	267,0866106	23,06314871	25,06421	27,50438542
420	172,5708476	210,8752507	255,7365776	22,8656373	24,67194	26,33556726
450	204,5538218	222,3291143	238,4982449	27,10338139	26,01202	24,56037625
480	181,5551823	159,6815093	189,276282	24,05606165	18,68238	19,49153422
Rata-rata	172,7502228	168,0905699	183,1520535	22,88940452	19,66623	18,86086561

A.5a Tabel efisiensi dan perhitungan PCM
parafin 100%

waktu (menit)	\dot{m}	C_p	ΔT	R(hambatan)	Q	η	Gt
0	0,00333	4200	1,5	0,153229911	9,789211466	-	-
30	0,00333	4200	26	0,147280733	176,5336131	21,73171	820
60	0,00333	4200	28	0,131379503	213,1230474	33,80488	820
90	0,00333	4200	29	0,138158057	209,9045148	33,80488	820
120	0,00333	4200	29,5	0,142241056	207,3944112	36,21951	820
150	0,00333	4200	29,5	0,142511172	207,0013144	41,04878	820
180	0,00333	4200	27,5	0,140803912	195,3070739	45,87805	820
210	0,00333	4200	28	0,142905351	195,9338806	48,29268	820
240	0,00333	4200	27,5	0,13795672	199,3378786	53,12195	820
270	0,00333	4200	26	0,139689275	186,1273891	55,53659	820
300	0,00333	4200	27,5	0,135938787	202,2969359	57,95122	820
330	0,00333	4200	27,5	0,138740762	198,2113953	57,95122	820
360	0,00333	4200	26	0,137453988	189,1542067	62,78049	820
390	0,00333	4200	13,5	0,1384801	97,48693138	-	-
420	0,00333	4200	5,5	0,139057852	39,55188363	-	-
450	0,00333	4200	3	0,128509624	23,34455519	-	-
480	0,00333	4200	2	0,135719397	14,73628709	-	-

A.5b Tabel efisiensi dan perhitungan PCM
parafin – mentega 10%

waktu (menit)	\dot{m}	C_p	ΔT	R(hambatan)	Q	η	Gt
0	0,00333	4200	1,5	0,140350196	10,6875519	-	-
30	0,00333	4200	30,5	0,152409149	200,11922	28,97561	820
60	0,00333	4200	29,5	0,159270742	185,2192037	36,21951	820
90	0,00333	4200	30,5	0,140398515	217,2387645	41,04878	820
120	0,00333	4200	29	0,145970256	198,6706119	45,87805	820
150	0,00333	4200	28	0,149595286	187,1716735	50,70732	820
180	0,00333	4200	27,5	0,149739388	183,6524136	53,12195	820
210	0,00333	4200	27,5	0,146405806	187,8340804	55,53659	820
240	0,00333	4200	26,5	0,143698071	184,4144446	60,36585	820
270	0,00333	4200	26	0,150438658	172,8279175	62,78049	820
300	0,00333	4200	26,5	0,141719029	186,9897089	65,19512	820
330	0,00333	4200	25	0,139704691	178,9488941	67,60976	820
360	0,00333	4200	26	0,136791347	190,0705017	74,85366	820
390	0,00333	4200	9,5	0,125939414	75,43309652	-	-
420	0,00333	4200	5,5	0,126803471	43,37420687	-	-
450	0,00333	4200	2	0,123959234	16,1343365	-	-
480	0,00333	4200	1,5	0,144503434	10,38037613	-	-

A.5c Tabel efisiensi dan perhitungan PCM
parafin – mentega 20%

waktu (menit)	m	Cp	ΔT	R(hambatan)	Q	η	Gt
0	0,00333	4200	1,5	0,13510925	11,10212662	-	-
30	0,00333	4200	33,5	0,140058674	239,1854723	33,80488	820
60	0,00333	4200	31	0,14756471	210,0773285	38,63415	820
90	0,00333	4200	30,5	0,147951996	206,147945	43,46341	820
120	0,00333	4200	28,5	0,148459383	191,9716986	53,12195	820
150	0,00333	4200	28	0,148595047	188,4315839	57,95122	820
180	0,00333	4200	30	0,141406551	212,1542451	57,95122	820
210	0,00333	4200	28,5	0,144895322	196,6937205	62,78049	820
240	0,00333	4200	27,5	0,141739792	194,0174992	67,60976	820
270	0,00333	4200	26	0,1391152	186,8954649	70,02439	820
300	0,00333	4200	26,5	0,137111561	193,2732718	72,43902	820
330	0,00333	4200	25	0,137248223	182,1517211	77,26829	820
360	0,00333	4200	25	0,135475439	184,5352936	82,09756	820
390	0,00333	4200	4,5	0,115184114	39,06788727	-	-
420	0,00333	4200	2	0,1171187	17,07669231	-	-
450	0,00333	4200	2	0,120409132	16,61003585	-	-
480	0,00333	4200	1,5	0,133103564	11,26942025	-	-

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 – mentega 20% sebagai berikut :

$$\rho_{nf} = 0,2 \times 942,3 + (1 - 0,2) 990,09$$

$$\rho_{nf} = 980,5392079$$

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 – mentega 20% sebagai berikut :

$$\frac{k_m - 0,12}{0,29 - 0,12} = 0,72 \times 0,2^2 + 0,2 (1 - 0,72) \rightarrow k_m = 0,1544 \text{ W/m}^2\text{C}$$

- 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 – mentega 20% dengan mencari bilangan Rayleigh terlebih dahulu

$$Ra_L = \frac{\rho g \beta \Delta L^3}{\alpha \nu} \rightarrow Ra_L = 1459084,405$$

$$Nu = 0,54 \times 1459084,405^{0,25} \rightarrow Nu = 18,76782148$$

Perhitungan diatas merupakan perhitungan bilangan Nusselt pada PCM campuran parafin – mentega 20% pada menit ke – 360. Untuk hasil perhitungan lainnya dilampirkan pada lampiran A.4

Dari bilangan Nusselt dapat kita cari koefisien konveksi dari PCM campuran parafin – mentega 20% :

$$h = \frac{Nu km}{Dh} = \frac{18,76 \times 0,15}{0,0159} \rightarrow h = 182,2485306 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

- c) Perhitungan jumlah perpindahan panas

Jumlah perpindahan panas pada PCM campuran parafin – mentega 20% dihitung pada menit ke– 360. Untuk hasil perhitungan lainnya dilampirkan pada lampiran A.5

$$Q_{tot} = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{k_1 A_1} + \frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{k_2 A_2} + \frac{1}{m.Cp}} \rightarrow Q_{tot} = 184,53 \text{ (W/m}^2\text{C)}$$

- d) Perhitungan efisiensi kolektor pemanas

Berikut perhitungan efisiensi kolektor surya pada PCM campuran parafin – mentega 20% pada menit ke– 360 pada saat pemanasan.

$$\text{Temperatur air keluar (T7)} = 61^\circ\text{C} \quad C_p \text{ air} = 4200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

Temperatur air masuk (T_{10}) = 27 °C Radiasi (G_t) = 820 W/m²

ΔT = 61 °C - 27 °C = 34 °C

Luas permukaan (A) = 0,7056 m²

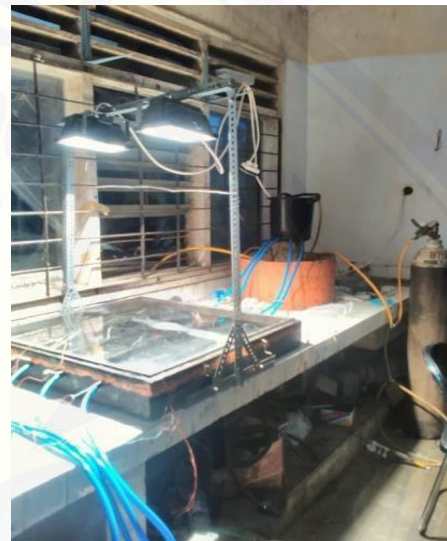
\dot{m} = 0,00333 L/s

Dengan rumus perhitungan

$$\text{Efisiensi} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A G_t} = \frac{471,24}{574} = 0,8209 \times 100 \% \rightarrow \text{Efisiensi} = 82,09\%$$

Untuk perhitungan efisiensi lainnya dilampirkan pada lampiran A.5

Lampiran C



Kolektor pemanas air pada proses charging



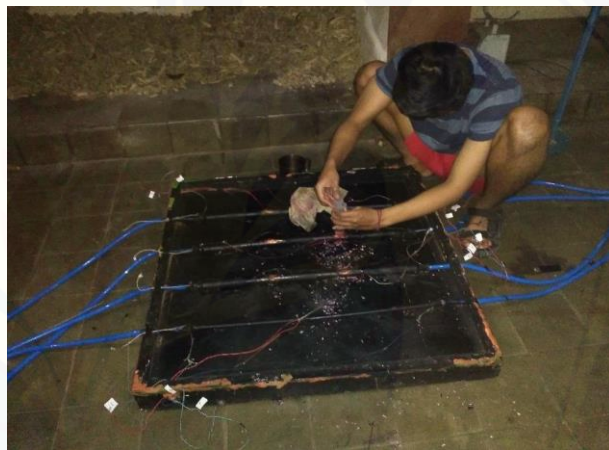
Pyranometer



Uji coba karakteristik material PCM



Bak penampung air



Pengisian PCM pada pipa kolektor