

SKRIPSI

**ANALISIS EFISIENSI *SOLAR WATER HEATER* DENGAN
VARIASI KETEBALAN PCM *THERMAL STORAGE* PADA
PELAT ABSORBER BERBENTUK DATAR**

Disusun dan diajukan oleh:

**FERDIANTO DWI PUTRA LANGSA
D021181308**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK
FAKULTAS TEKNIK DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS EFISIENSI *SOLAR WATER HEATER* DENGAN VARIASI KETEBALAN PCM *THERMAL STORAGE* PADA PELAT ABSORBER BERBENTUK DATAR

Disusun dan diajukan oleh

FERDIANTO DWI PUTRA LANGSA
NIM D021181308

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

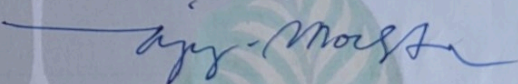
Pada tanggal:
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

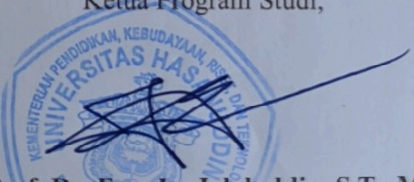
Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping


Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, S.T., M.T.
NIP. 19720825 200003 1 001


Dr. Eng. Ir. Andi Amijovo Mochtar, S.T., M. Eng
NIP. 19760216 201012 1 002

Ketua Program Studi,


Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, S.T., M.T.
NIP. 19720825 200003 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : FERDIANTO DWI PUTRA LANGSA
NIM : D021181308
Program Studi : Teknik Mesin
Jenjang : S-1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

*“ANALISIS EFISIENSI SOLAR WATER HEATER DENGAN VARIASI
KETEBALAN PCM THERMAL STORAGE PADA PELAT ABSORBER
BERBENTUK DATAR”*

Adalah karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggung jawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 8 Mei 2023

Yang membuat Pernyataan,



FERDIANTO DWI PUTRA LANGSA

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari dalam menyelesaikan skripsi dan penelitian ini tidaklah mudah, banyak hambatan dan masalah yang dihadapi hingga sampai ke titik ini. Namun berkat doa dan dukungan dari berbagai pihak akhirnya penelitian dan skripsi ini telah selesai.

Dengan Tugas Akhir yang berjudul "**ANALISIS EFISIENSI SOLAR WATER HEATER DENGAN VARIASI KETEBALAN PCM *THERMAL STORAGE* PADA PELAT ABSORBER BERBENTUK DATAR**", ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan pembaca dan juga kepada penulis dalam memahami penggunaan *solar water heater*.

Penyusunan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bimbingan, petunjuk dan perhatian dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.** selaku Rektor Universitas Hasanuddin beserta jajaran staffnya.
2. Bapak **Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak **Prof. Dr.Eng. Ir. Jalaluddin Haddada, ST., MT** selaku ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan sebagai pembimbing Pertama yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. Bapak **Dr. Eng. Ir. Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.Eng** selaku pembimbing kedua, yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.

5. Seluruh dosen penguji, bapak **Prof. Dr. Ing. Ir. Wahyu Haryadi Piarah, MSME** dan Ibu **Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT** yang telah memberikan masukan untuk menyempurnakan skripsi saya.
6. Seluruh staff administrasi Departemen Teknik Mesin yang membantu mengurus dan memudahkan perjalanan berkas menuju Rektorat.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Aris Rombe Langsa'** dan ibunda terkasih **Herlin Lundu** atas doa, kasih sayang, dan segala dukungan dan kebaikan selama ini, baik spritiual maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.
2. Saudara tercinta **Yudit, Dimas, dan Vinsa** atas doa, kasih sayang, segala dukungan dan kebaikan selama ini.
3. **Modesta Kurnia Bone** yang telah menemani dan memberikan dukungan berupa semangat, motivasi, serta inspirasi untuk terus berjuang menyelesaikan tugas akhir.
4. Keluarga **KMKO MESIN** dan **KMKO Teknik**, terkhusus angkatan 2018 dan Teman – teman **PPGT Jemaat Efata Bilawaiyah** yang senantiasa memberikan dukungan dan doa dalam penyelesaian tugas akhir ini.
5. Seluruh teman–teman mahasiswa Jurusan Mesin khususnya Angkatan **18 REACTOR**. Terima kasih atas bantuan dan dukungannya serta semangat yang diberikan.
6. Teman – teman **KKN TORUT 1** yang selalu memberikan dukungan serta doa dan motivasi dalam penyusunan
7. Teman-Teman seperjuangan di Labolatorium Energi Terbarukan yang setia menemani selama masa masa pengambilan data dan penulisan tugas akhir.
8. Tim Anggota Riset di laboratorium Energi Terbarukan, (Bapak **Dr. Muhammad Hasan Basri, ST., MT** dan **Muh. Anis Ilahi R, ST., MT**)
9. Kanda-kanda Senior serta Adik-adik yang telah memberi bantuan selama proses perkuliahan maupun masukan dalam menyelesaikan tugas akhir.
10. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu dengan semua bantuan dan dukungan hingga penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini banyak kekurangan dan memerlukan perbaikan. Oleh karena itu, dengan segala keterbukaan penulis mengharapkan masukan dari semua pihak. Akhir kata semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Mesin.

Makassar, 8 Mei 2023

Penulis,

ABSTRAK

FERDIANTO DWI PUTRA LANGSA, *Anlisis Efisiensi Solar Water Heater Dengan Variasi Ketebalan PCM Thermal Storage Pada Pelat Absorber Berbentuk Datar* (dibimbing oleh Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin. S.T., M.T dan Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, S.T., M.Eng)

Penggunaan energi fosil secara terus menerus akan berdampak serius bagi lingkungan. Hal tersebut dapat diatasi dengan mengembangkan sumber energi terbarukan yang dapat menggantikan energi fosil dan tidak habis pakai dengan memanfaatkan sumber energi alternatif disekitar kita. Berbagai macam penelitian dilakukan untuk mengembangkan komponen yang dapat meningkatkan performa termal pemanas air tenaga surya, salah satunya adalah dengan memodifikasi Pelat absorber dari kolektor surya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu suatu metode yang digunakan dengan dua kali percobaan untuk menguji pengaruh penggunaan *Phase Change Material (Paraffin Wax)* sebagai *Thermal Storage* terhadap efisiensi kolektor solar water heater, percobaan pertama tanpa menggunakan material *Phase Change Material*, percobaan kedua dengan menggunakan variasi ketebalan *Phase Change Material*, dengan parameter *flowrate* yaitu 10 liter/jam, dengan sudut kolektor 0° serta volume *Thermal Storage* yaitu 4 mm, 8 mm dan 12 mm dengan memperhatikan temperatur inlet dan temperatur outletnya. Hasil penelitian menunjukkan perbandingan efisiensi antara Pelat kolektor standar dengan variasi ketebalan *Phase Change Material*. Dimana efisiensi pelat kolektor datar standar sebesar 79.84%, sedangkan untuk efisiensi pelat dengan variasi ketebalan PCM, nilai dari variasi ketebalan 4 mm sebesar 83.93%, untuk efisiensi pelat kolektor dengan variasi ketebalan 8 mm sebesar 81.29% dan untuk nilai efisiensi pelat kolektor dengan variasi ketebalan 12 mm sebesar 82.30%.

Kata Kunci: Kolektor Surya, Efisiensi, *Phase Change Material*, *Paraffin Wax*, *Thermal Energy Storage*.

ABSTRACT

FERDIANTO DWI PUTRA LANGSA, *Efficiency Analysis of Solar Water Heater With Variation of PCM Thermal Storage Thickness on a Flat-Shaped Absorber Pelate* (supervised by Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin. S.T., M.T and Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, S.T., M.Eng).

The continuous use of fossil energy will have a serious impact on the environment. This can be overcome by developing renewable energy sources that can replace fossil and non-consumable energy by utilizing alternative energy sources around us. Various kinds of research are carried out to develop components that can improve the thermal performance of solar water heaters, one of which is by modifying the absorber Pelate of the solar collector. The method used in this study is an experimental method, which is a method used with two experiments to test the effect of using Phase Change Material (Paraffin Wax) as Thermal Storage on the efficiency of the solar water heater collector, the first experiment without using Phase Change Material material, the second experiment using Phase Change Material, with flowrate parameters of 10 liters / hour, with a collector angle of 0o and a Thermal Storage volume of 4 mm, 8 mm and 12 mm by paying attention to the inlet temperatur and outlet temperatur. The results showed an efficiency comparison between standard collector plates with variations in the thickness of the Phase Change Material. Where the efficiency of standard flat collector plates is 79.84%, while for plate efficiency with PCM thickness variations, the value of 4 mm thickness variation is 83.93%, for collector plate efficiency with 8 mm thickness variation is 81.29% and for collector plate efficiency value with 12 mm thickness variation is 82.30%.

Keywords: Solar Collector, Efficiency, Phase Change Material, Paraffin Wax, Thermal Energy Storage.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
DAFTAR SINGKATAN ARTI SIMBOL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Batasan Masalah	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Sistem pemanas air tenaga matahari.....	5
2.2. Kolektor Surya (<i>Solar Collector</i>)	9
2.3. Kolektor Pelat Datar, <i>Flat Plate Collector</i> (FPC)	10
2.4. Pelat absorber berbentuk datar.....	11
2.5. Penyimpan Energi Termal (<i>Thermal Energy Storage, TES</i>).....	12
2.6. <i>Phase Change Material</i> (PCM)	14
2.7. Paraffin Wax	17
2.8. Kesetimbangan Energi pada Kolektor	18
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	24
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	24
3.2. Peralatan dan Bahan yang Digunakan	24
3.3. Prosedur Penggunaan Alat Laboratorium Gunt ET-202.....	28
3.4. Metode Penelitian	29
3.5. Variabel Penelitian.....	29

3.6. Tahap Pengambilan Data	30
3.7. <i>Flowchart</i> Penelitian	32
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1. Analisa Hasil Pengujian Eksperimental.....	33
4.2. Pembahasan	51
BAB 5 PENUTUP	58
5.1. KESIMPULAN.....	58
5.2. SARAN.....	59
DAFTAR PUSTAKA	60

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Sifat fisik lilin paraffin	18
Tabel 2. Tabel parameter pengukuran efisiensi solar kolektor	29

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	<i>Solar water heating system</i>	5
Gambar 2.	<i>Open – loop active system</i>	6
Gambar 3.	<i>Closed – loop active system</i>	7
Gambar 4.	<i>Closed – loop active system</i>	7
Gambar 5.	Sistem Termosifon	8
Gambar 6.	Kolektor Pelat datar	10
Gambar 7.	<i>Flat Pelate Solar Water Collector</i>	11
Gambar 8.	<i>A Passive Solar Water Heater</i>	12
Gambar 9.	Berbagai jenis penyimpanan termal.....	14
Gambar 10.	Daftar bahan yang paling mungkin digunakan untuk penyimpanan panas laten	15
Gambar 11.	Sketsa evolusi temperatur selama selama proses peleburan (<i>Melting</i>) dan pepadatan (<i>solidification</i>) PCM ideal dengan <i>subcooling</i> ..	17
Gambar 12.	Tahanan Termal pada kolektor.	21
Gambar 13.	<i>Solar Thermal Energy Gunt ET – 202</i>	24
Gambar 14.	Skema Penelitian.....	24
Gambar 15.	MIDI LOGGER GL – 820.....	25
Gambar 16.	Termokopel	25
Gambar 17.	Komputer	26
Gambar 18.	Panel Kolektor	26
Gambar 19.	Air	27
Gambar 20.	<i>Flowchart</i> Penelitian.....	32
Gambar 21.	Temperatur Inlet dan Outlet pada Pelat kolektor	52
Gambar 22.	Energi kalor yang diserap antara Pelat standar dengan PCM 4 mm, 8 mm, dan 12 mm.....	53
Gambar 23.	Temperatur pada variasi ketebalan PCM <i>Thermal Storage</i>	55
Gambar 24.	Perbandingan Efisiensi kolektor pada Pelat standar dan 4 mm, 8 mm, 12 mm	56

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Tabel <i>Properties of miscellaneous material</i>	62
Lampiran 2.	Tabel <i>Properties of insulating material</i>	63
Lampiran 3.	Tabel <i>Properties of air at 1 atm pressure</i>	64
Lampiran 4.	Tabel <i>Properties of saturated water</i>	65
Lampiran 5.	Tabel pengambilan data pelat kolektor standar	66
Lampiran 6.	Tabel pengambilan data pelat kolektor dengan ketebalan PCM 4 mm.....	68
Lampiran 7.	Tabel pengambilan data pelat kolektor dengan ketebalan PCM 8 mm.....	70
Lampiran 8.	Tabel pengambilan data pelat kolektor dengan ketebalan PCM 12 mm.....	72
Lampiran 9.	Tabel hasil perhitungan pelat kolektor standar.....	74
Lampiran 10.	Tabel hasil perhitungan pelat kolektor dengan ketebalan PCM 4 mm.....	75
Lampiran 11.	Tabel hasil perhitungan pelat kolektor dengan ketebalan PCM 8 mm.....	76
Lampiran 12.	Tabel hasil perhitungan pelat kolektor dengan ketebalan PCM 12 mm.....	77
Lampiran 13.	Dokumentasi.....	78

DAFTAR SINGKATAN ARTI SIMBOL

Simbol	Arti Singkatan
o	Derajat suhu
Θ	Derajat kemiringan
%	Presentase
V_w	Kecepatan Angin
ρ	Densitas Air
C_p	Panas Spesifik
A_c	Luas permukaan benda
\dot{V}	Laju aliran massa
C	Celsius
ETC	Evacuated Tube Collector
ET 202	Energy Thermal Seri 202
FPC	Flat Pelate Collector
PCM	Phase Change Material
PTC	Parabolic Through Collector
T	Temperatur
TES	Thermal Energy Storage
ν	Visikositas Kinematik
W	Watt
Σ	konstanta Stefan-Boltzman = $5,6697 \times 10^{-8}$
R	Radiation / Radiasi
IT	Intensitas Cahaya
L/h	Liter per hour
J	Joule
Liquid	Cairan
Solid	Padatan
SWH	Solar Water Heater
g	Percepatan Gravitasi
m	Meter
mm	Milimeter

ICS	Integral Collector Storage
Kg	Kilogram
S	Radiasi Per Satuan Luas
Qu	Energi yang Berguna
η	Efisiensi
K	Kelvin
α	Absorbsivitas rata-rata
ϵ_p	Emisivitas pelat absorber
ϵ_c	Emisivitas kaca
τ	Transmivitas kaca penutup

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Kebutuhan energi di dunia semakin meningkat dari tahun ke tahun hal ini searah dengan meningkatnya laju pertumbuhan ekonomi hingga pesatnya perkembangan disektor industri. Hal ini menjadikan penggunaan energi fosil sebagai sumber energi utama yang belum sepenuhnya tergantikan oleh sumber energi alternatif. Penggunaan energi fosil secara terus menerus akan berdampak serius bagi lingkungan seperti polusi udara, efek rumah kaca, hujan asam dan pemanasan global. Hal tersebut dapat diatasi dengan mengembangkan sumber energi terbarukan yang dapat menggantikan energi fosil dan tidak habis dipakai dengan memanfaatkan sumber energi alternatif disekitar kita. Di Indonesia sendiri banyak sekali cadangan sumber energi alternatif yang dapat kita jumpai misalnya energi matahari, energi angin, energi air dan lain sebagainya. Dari sekian banyak sumber energi tersebut, energi matahari merupakan sumber energi alternatif yang paling berpotensi untuk digunakan sebagai pengganti sumber energi fosil (Widayana, 2012).

Matahari merupakan sumber energi yang sangat penting bagi semua makhluk hidup. Matahari yang memasuki atmosfer memiliki kerapatan daya rata-rata $1,2 \text{ kW/m}^2$, tetapi permukaan bumi hanya dapat menyerap 560 W/m^2 . Berdasarkan angka tersebut, energi surya yang dapat dihasilkan untuk seluruh daratan di Indonesia yang memiliki luas sekitar 2 juta km^2 adalah sebesar 5×10^8 Mega Watt (Ngurah et al., 2005).

Pada saat cuaca cerah, permukaan bumi menerima sekitar 1000 Watt/m^2 energi surya. Energi tersebut dipantulkan kembali ke luar angkasa kurang dari 30%, dikonversikan menjadi panas sebesar 47% dan sisanya digunakan untuk siklus kerja yang terdapat dibumi. Sehingga bisa diasumsikan sumber energi surya merupakan sumber segala energi. Energi surya dapat dimanfaatkan dalam berbagai macam hal seperti pemanas air tenaga surya, fotovoltaik surya, pembangkit listrik tenaga surya, fotosintesis buatan dan lain sebagainya.

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki iklim tropis dengan temperatur udara yang relatif panas, tetapi pada kasus tertentu kebutuhan Indonesia

akan air panas masih sangat diperlukan. Misalnya pada sektor pariwisata seperti pemandian air panas dan hotel, demikian juga dengan skala rumah tangga, rumah sakit dan berbagai macam sektor industri.

Berdasarkan fakta tersebut negara Indonesia memiliki cadangan sumber energi matahari yang cukup besar untuk menjadi sumber energi alternatif serta kebutuhan manusia untuk menghasilkan air panas, maka penggunaan energi surya sebagai sumber energi alternatif sangat tepat untuk menghasilkan air panas. Pemanfaatan energi surya diaplikasikan dengan menggunakan teknologi pemanas air surya yang memerlukan panas matahari sebagai energi untuk menghasilkan air panas yang mana biasanya disebut *Solar Water Heater (SWH)* atau Pemanas Air Tenaga Matahari.

Berbagai macam penelitian dilakukan untuk mengembangkan komponen yang dapat meningkatkan performa termal pemanas air tenaga surya, salah satunya adalah dengan memodifikasi Pelat absorber dari kolektor surya. (Jalaluddin et al., 2016), melakukan penelitian menggunakan dua sistem pemanas air surya yaitu dengan Pelat absorber datar dan Pelat absorber berbentuk – V. pada kedua sistem pemanas air surya tersebut diuji pada aliran laju rendah yaitu 0,5 L/Menit dan laju aliran tinggi L/Menit. Dari hasil pengujian tersebut diketahui bahwa sistem pemanas air surya dengan Pelat absorber berbentuk – V memiliki efisiensi 3,6 – 4,4% lebih tinggi dibandingkan sistem dengan Pelat absorber. Hal ini disebabkan penggunaan Pelat absorber berbentuk – V dalam pemanas air surya mampu meningkatkan daya serap pada Pelat absorber.

Walaupun demikian, temperatur tinggi pada permukaan Pelat absorber berbentuk – V mengakibatkan kerugian panas semakin makin besar. Maka dari itu dibutuhkan komponen penyimpan energi panas (*Thermal Energy Storage*) untuk mengatasi kerugian tersebut. Hal tersebut bertujuan agar panas yang diserap oleh Pelat absorber dapat diteruskan dan disimpan dalam jangka waktu tertentu sebelum panas tersebut dipindahkan pada fluida kerja. Untuk itu, penyimpanan panas pada pemanas air surya dilakukan dengan memanfaatkan media penyimpanan berbasis *Phase Change Material (PCM)*, seperti *Paraffin Wax*. Material yang bersifat PCM mampu menyimpan dan melepaskan energi panas yang besar. Penyerapan atau pelepasan panas terjadi Ketika perubahan fasa dari padat ke cair ataupun

sebaliknya, dengan demikian material PCM dikategorikan sebagai sebagai bahan penyimpan panas laten. Material yang digunakan sebagai PCM harus memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan juga memiliki temperatur titik cair yang bekerja pada rentang temperatur tertentu.

Berdasarkan uraian dari latar belakang tersebut maka akan dilakukan penelitian dengan judul: ***“ANALISIS EFISIENSI SOLAR WATER HEATER DENGAN VARIASI KETEBALAN PCM THERMAL STORAGE PADA PELAT ABSORBER BERBENTUK DATAR”***

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi ketebalan PCM sebagai *Thermal Storage* pada pelat absorber berbentuk datar terhadap efisiensi *Solar Water Heater*?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan PCM sebagai *Thermal Storage* pada pelat absorber berbentuk datar terhadap efisiensi *Solar Water Heater*?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, penelitian ini bertujuan antara lain:

1. Menemukan pengaruh variasi ketebalan PCM sebesar 4 mm, 8 mm, dan 12 mm sebagai *Thermal Storage* pada pelat absorber berbentuk datar terhadap unjuk kerja *Solar Water Heater*.
2. Menentukan efisiensi *Solar Water Heater* menggunakan PCM dengan variasi ketebalan 4 mm, 8 mm, dan 12 mm sebagai *Thermal Storage* pada pelat absorber berbentuk datar.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan penulis dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai tugas akhir yang merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan studi di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Menjadi referensi untuk penelitian serupa dimasa yang akan datang.

3. Menggunakan panas matahari sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan membantu mengurangi konsumsi bahan bakar fosil.
4. Menjelaskan pengaruh variasi ketebalan PCM sebagai *Thermal storage* pada efisiensi *Solar Water Heater*.

1.5. Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan kondisi sebagai berikut:

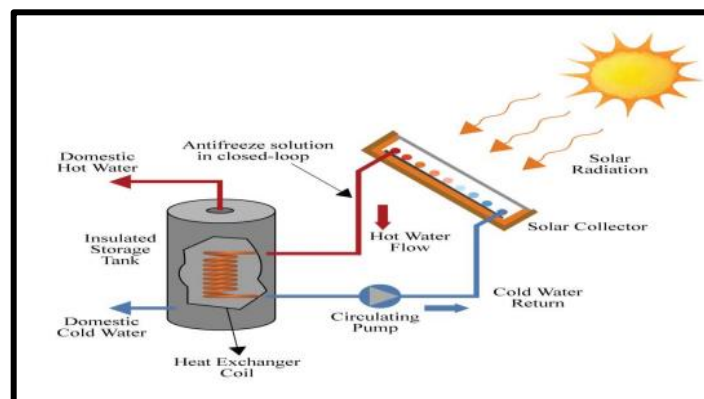
1. Bentuk pelat absorber yang digunakan pada pengujian ini adalah pelat absorber berbentuk datar.
2. Material pelat absorber yang digunakan adalah pelat tembaga dengan ketebalan 0,5 mm.
3. Penggunaan material *Thermal Storage* yang digunakan berbasis PCM dengan jenis *Paraffin Wax* yang berdimensi 290 x 300 mm dengan ketebalan 4 mm, 8 mm dan 12 mm.
4. Laju aliran yang digunakan sebesar 10 Liter/jam.
5. Sudut kemiringan panel kolektor surya berbasis PCM yaitu 0^0 .
6. Alat uji yang dipakai adalah *Solar Thermal Energy Gunt ET – 202*.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem pemanas air tenaga matahari

Sistem pemanas air tenaga matahari adalah cara termurah dan ramah lingkungan untuk mendapatkan air panas dan mengkonsumsi sekitar 20% dari total konsumsi energi keluarga. Sistem pemanas air matahari digunakan untuk mengubah energi matahari menjadi energi panas melalui berbagai jenis kolektor panas matahari untuk mendapatkan energi panas, bukan listrik. Ada banyak jenis kolektor surya yang ada di dunia; di antara mereka, kolektor surya pelat datar dan kolektor tabung yang dievakuasi telah digunakan dalam aplikasi domestik dan industri. Khususnya, permintaan domestik terbagi menjadi air panas matahari dan tujuan pemanasan ruang surya. Sistem pemanas air tenaga surya sederhana dan menggabungkan dengan fluida kerja yang melewati kolektor surya dengan mengambil panas dan disimpan dalam tangki penyimpanan untuk digunakan nanti (Kalogirou, 2009).

Fluida kerja dikontakkan dengan permukaan hitam yang terkena cahaya matahari dimana menyebabkan temperatur pada fluida naik. Fluida kerja ini dapat berbentuk air yang dipanaskan secara langsung, atau biasa disebut sistem langsung (*direct system*), atau dapat pula berbentuk fluida perpindahan panas (*heat transfer fluid*) seperti campuran glikol/air yang melewati beberapa bentuk penukar panas (*heat exchanger*) yang disebut sistem tidak langsung (*indirect system*) (Patel et al., 2012). Sistem pemanas air matahari yang khas adalah sebagai berikut:



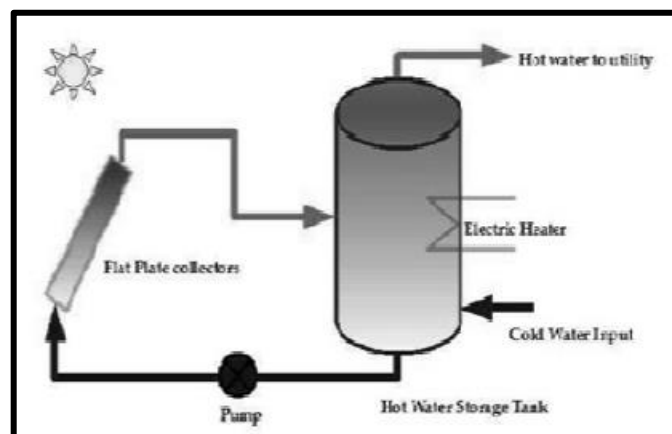
Gambar 1. *Solar water heating system* (Kalogirou, 2009).

2.1.1. Sistem pemanas air surya aktif

Sistem pemanas air surya aktif menggunakan pompa listrik, katup, dan pengontrol untuk meng sirkulasi aliran air atau fluida perpindahan panas lainnya melalui kolektor. Jadi, sistem Aktif juga disebut sistem sirkulasi paksa dan dapat langsung atau tidak langsung. Sistem aktif dibagi lagi menjadi dua kategori:

1. Sistem sirkulasi langsung (*Open – loop system*)

Sistem ini mengedarkan air dari tangki penyimpanan ke kolektor surya dan mengembalikannya lagi dengan bantuan pompa. Dalam metode ini, energi panas dari matahari ditransfer ke sirkulasi air minum langsung melalui kolektor dan tangki. Itulah sebabnya disebut sistem sirkulasi langsung atau sistem loop terbuka. Anti-freeze dapat digunakan dalam sistem ini. Ini juga menggunakan berbagai pengontrol untuk merasakan suhu yang diperlukan mengenai menyalakan dan mematikan pompa ketika diperlukan dan memiliki satu atau lebih kolektor yang dipasang di atap dan tangki penyimpanan yang terletak sesuai di gedung (Kalogirou, 2009).

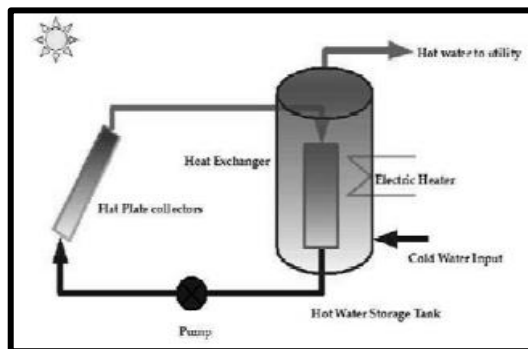


Gambar 2. *Open – loop active system* (Patel et al., 2012).

2. Sistem sirkulasi tidak langsung (*Closed – loop system*)

Sistem ini cocok untuk negara-negara yang lebih dingin, di mana kondisi pembekuan dapat terjadi. Cairan kerja dan penukar panas telah membutuhkan fitur tersebut. Dengan cara ini, panas dari matahari ditransfer ke larutan fluida kerja dan mengedarkan cairan kerja ini dari kolektor ke tangki penyimpanan, dan penukar panas mentransfer panas dari fluida kerja ke air tangki penyimpanan sebelum mengembalikannya lagi dengan bantuan

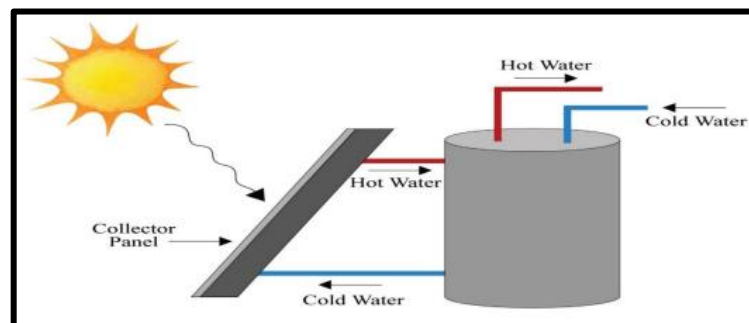
pompa. Biasanya, penukar panas berdinding ganda diperlukan ketika menggunakan cairan kerja beracun. Perpindahan panas terjadi dalam siklus loop tertutup; itulah sebabnya disebut sistem sirkulasi tidak langsung atau sistem loop tertutup. Loop ini termasuk kolektor, pipa penghubung, pompa, tangki ekspansi, penukar panas, dan pengontrol. Perlu diingat bahwa koil penukar panas harus ditempatkan di bagian bawah tangki penyimpanan untuk mengubah panas secara akurat (Kalogirou, 2009).



Gambar 3. *Closed – loop active system* (Patel et al., 2012).

2.1.2. Sistem pemanas air tenaga matahari pasif

Sistem pasif hanya mengalirkan air atau fluida perpindahan panas dengan konveksi alami antara kolektor dan tangki penyimpanan yang ditinggikan (di atas kolektor). Prinsipnya sederhana, karena cairan memanaskan kepadatannya berkurang. Cairan menjadi lebih ringan dan naik ke atas kolektor di mana ia ditarik ke tangki penyimpanan. Cairan yang telah mendingin di kaki tangki penyimpanan kemudian mengalir kembali ke kolektor. Sistem pasif bisa lebih murah daripada sistem aktif, tetapi mereka juga bisa kurang efisien. Sistem thermosiphon adalah contoh terbaik dari sistem pasif (Patel et al., 2012).



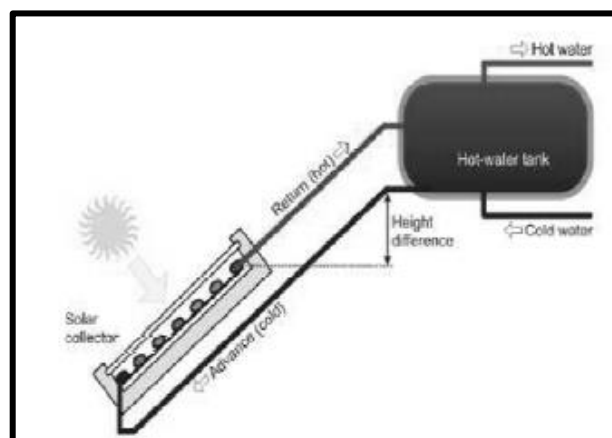
Gambar 4. *Closed – loop active system* (Kalogirou, 2009).

1. *Integral – Collector Storage (ICS) system*

Integral – Collector Storage system atau ICS system adalah salah satu jenis sistem pemanas air surya pasif yang paling populer. Dalam sistem ini, kolektor dianggap sebagai sistem penyimpanan air panas. Ketika kolektor dipanaskan oleh matahari, air dingin dari luar mengalir secara progresif melalui kolektor dan dipanaskan. Akhirnya, air panas dari atas ditarik ke tangki penyimpanan untuk penggunaan lebih lanjut, dan di bagian bawah, air pengganti mengalir terus menerus. Pompa dan pengontrol tidak digunakan dalam sistem sederhana ini, tetapi katup perlindungan beku tipe flush diperlukan di perpipaan atas dekat kolektor untuk melindungi dari pembekuan (Kalogirou, 2009).

2. Sistem Termosiphon

Sistem thermosiphon relatif lebih rumit daripada sistem penyimpanan kolektor integral. Dalam sistem ini, pompa dan pengontrol yang beredar tidak digunakan. Air minum mengalir langsung ke tangki yang dipasang pada kolektor, dipanaskan dari kolektor, dan mengembang sedikit dan menjadi lebih ringan daripada air dingin tangki. Karena gravitasi dan air yang disebutkan di atas properti, air dingin mendorong air panas melalui outlet kolektor dan menyimpan air panas ke bagian atas tangki. Air panas ini kemudian mengalir dari tangki atap ke tangki cadangan, dipasang di permukaan tanah setiap kali permintaan air panas diperlukan di gedung (Kalogirou, 2009).



Gambar 5. Sistem termosifon (Patel et al., 2012)

2.2. Kolektor Surya (*Solar Collector*)

Kolektor surya merupakan salah satu bagian penting dari sistem pemanas air matahari. Ini dapat digunakan sebagai penukar panas. Mereka mengumpulkan energi dalam bentuk radiasi dari matahari, mengubahnya menjadi panas, dan kemudian mentransfer panas itu ke fluida yang lebih dingin (biasanya air atau udara). Energi ini dapat digunakan untuk pemanasan ruang perumahan atau komersial dan air panas domestik, pemanas kolam surya, dan lain – lain. Pemilihan kolektor surya yang cocok tergantung pada beberapa faktor. Di Kanada, perlu untuk memilih kolektor surya yang dapat dilindungi dari pembekuan (Kalogirou, 2009).

Metode perhitungan untuk mendapatkan area kolektor surya adalah sebagai berikut :

$$\text{Collector area, } a1 = Q_{demand}/Q_{solar1} \quad (1)$$

Di sini, Q_{demand} = Permintaan energi bulanan rumah dari BE opt dan Q_{solar1} = Radiasi matahari bulanan dari area yang dipilih dari Layar RET (3,06 KWh/m²/hari). Area kolektor awal, $a1$, dihitung dengan menggunakan persamaan (1), dan menggunakan area kolektor ini, Q_{solar2} baru dihitung dari persamaan (2) dan menentukan kelebihan energi minimum dari (3).

$$Q_{solar2} = a1 \times Q_{solar1} \quad (2)$$

$$Q_{Excess} = Q_{solar2} - Q_{demand} \quad (3)$$

Setelah itu, beberapa asumsi telah diambil dari literatur seperti efisiensi kolektor $\eta = 50\%$, kehilangan tangki cadangan penyimpanan terisolasi = 0,05 kWh/jam, dan kehilangan sirkulasi melalui pipa terisolasi = 5%. Dengan menggunakan persamaan (4), Q_{solar3} ditemukan.

$$Q_{solar3} = \eta \times Q_{solar2} - \eta \times Q_{solar2} \times 0,05 - 0,05 \quad (4)$$

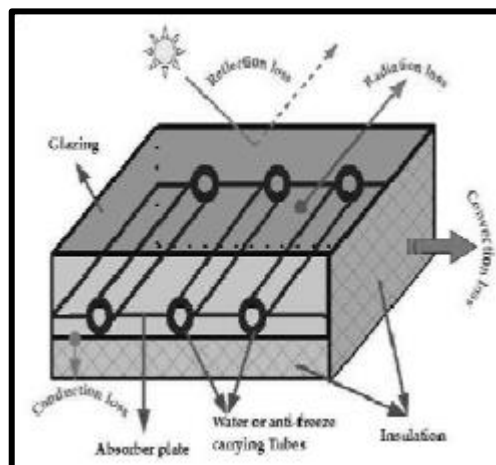
$$\text{Collector area, } a2 = Q_{demand}/Q_{solar3} \quad (5)$$

Akhirnya, dengan menggunakan persamaan (5) ditemukan area kolektor baru, yang lebih besar dari yang sebelumnya. Dengan mengikuti prosedur yang sama, area kolektor surya yang diinginkan dengan parameter lain seperti area kolektor akhir, $a2 = 16 \text{ m}^2$, dan jumlah energi berlebih: 0,150 kWh ditemukan. Untuk sistem yang diusulkan, kolektor pelat datar dipilih, dan model kolektor yang

dipilih adalah kolektor Honeycomb HC1-A, produsen: TIGI Ltd., standar pengujian: Amerika Utara, sumber data: SRCC. Selain itu, jumlah total kolektor dan susunan yang digunakan, masing-masing 9 dan 8. Sudut kemiringan kolektor dan orientasi adalah 47° dan 0° . Jenis kolektor ini tersedia di pasar dengan biaya terjangkau.

2.3. Kolektor Pelat Datar, *Flat Plate Collector (FPC)*

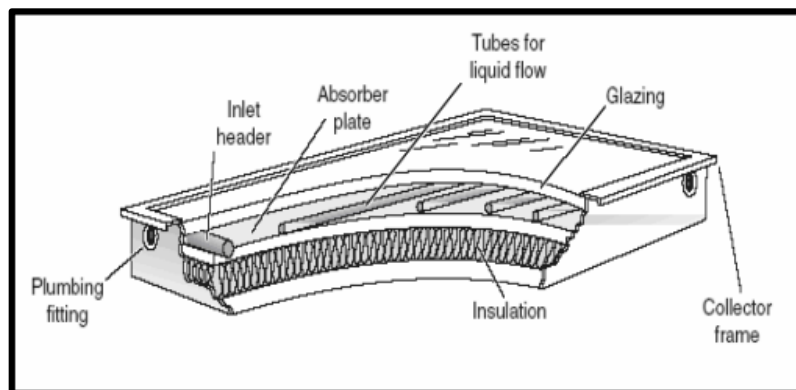
Kolektor pelat datar digunakan secara luas untuk aplikasi pemanas air domestik. Ini sederhana dalam desain dan tidak memiliki bagian yang bergerak sehingga membutuhkan sedikit perawatan. Ini adalah kotak terisolasi dan tahan cuaca yang berisi pelat penyerap gelap di bawah satu atau lebih penutup transparan. Mereka mengumpulkan radiasi langsung dan difus. Kesederhanaan mereka dalam konstruksi mengurangi biaya awal dan pemeliharaan sistem. Gambaran yang lebih rinci tentang sistem ini menarik dan disajikan di bagian berikut (Patel et al., 2012).



Gambar 6. Kolektor pelat datar (Patel et al., 2012)

Kotak terisolasi mengurangi kehilangan panas dari bagian belakang dan sisi kolektor. Penelitian dalam tesis ini berkaitan dengan peningkatan efisiensi kolektor surya pelat datar menggunakan teknik perpindahan panas yang hemat biaya. Ini diperiksa oleh desain model kolektor yang memanfaatkan paket *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dan oleh desain dan konstruksi rig uji eksperimental. Penggunaan model yang melibatkan parameter lumped memungkinkan keakuratan hasil model komputer untuk dievaluasi dan data eksperimental yang akan direkam.

Penggunaan media berpori sebagian di dalam saluran kolektor adalah sarana untuk meningkatkan perpindahan panas (Iordanou, 2009).



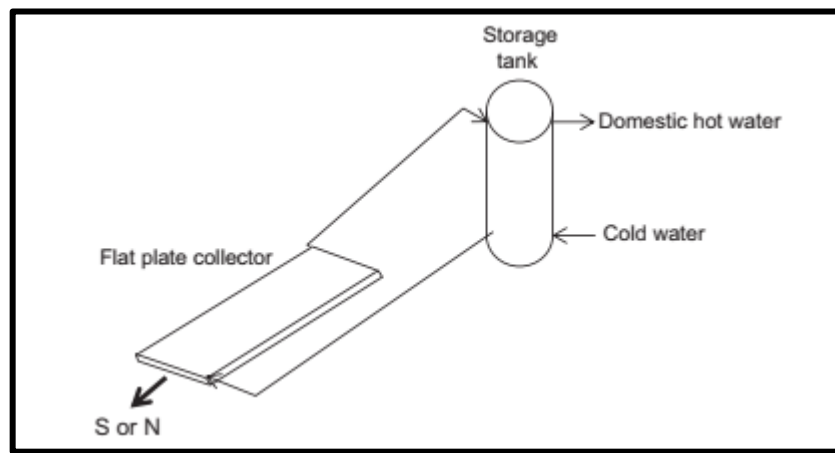
Gambar 7. *Flat Plate solar water collector* (Iordanou, 2009)

Kolektor surya pelat datar biasanya diperbaiki secara permanen dalam posisi, dan karena itu perlu berorientasi dengan tepat. Kolektor surya pelat datar yang khas biasanya terdiri dari penutup kaca, pelat penyerap, lapisan isolasi, tabung penyembuhan (diisi dengan cairan perpindahan panas) dan pembantu lainnya. Kaca terbuat dari satu atau beberapa lembar kaca atau bahan lain dengan transmisivitas tinggi radiasi gelombang pendek dan transmisivitas rendah radiasi gelombang panjang. Ini tidak hanya mengurangi kerugian konveksi dari pelat penyerap, tetapi juga mengurangi kerugian iradiasi dari kolektor karena efek rumah kaca. Kaca besi rendah dianggap sebagai bahan kaca yang diinginkan karena transmitansi yang relatif tinggi untuk radiasi matahari (sekitar 0,85-0,87) dan pada dasarnya transmisi nol untuk radiasi termal gelombang panjang ($5,0\mu\text{m}$ - $50\mu\text{m}$) (Tian & Zhao, 2013).

2.4. Pelat absorber berbentuk datar

Kolektor pelat datar adalah jenis kolektor surya yang digunakan untuk mengumpulkan energi panas matahari dan terdiri dari pelat penyerap konduktif termal yang biasanya memiliki satu atau dua penutup transparan di bagian atas yang berfungsi untuk mencegah konveksi panas ke udara sekitarnya. Dengan insulasi termal di belakangnya untuk mengurangi kehilangan panas saluran tabung yang digunakan untuk mengalirkan fluida panas ke tangki penyimpanan dan perumahan, untuk melindungi kolektor dari debu dan kelembaban dan juga untuk memberikan ketahanan mekanis pada rakitan. Sistem kolektor pasif mentransfer

panas dari kolektor ke tangki dengan prinsip konveksi alami, juga disebut *thermosiphon*, yaitu tanpa bantuan pompa listrik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4. Karena intensitas radiasi matahari (W/m^2) bervariasi menurut lokasi, musim dan langit berawan, di iklim sedang dan dingin sumber panas gas atau listrik biasanya dipasang sebagai sistem tambahan di dalam atau di luar tangki air. Untuk mencapai suhu yang diinginkan ($45-50^\circ C$ atau bahkan lebih tinggi). Dapat dicampur dengan air dingin, mencapai sekitar $38^\circ C$ untuk memberikan mandi atau pancuran yang nyaman (Prado & Sowmy, 2016).



Gambar 8. A passive solar water heater (Prado & Sowmy, 2016)

2.5. Penyimpanan Energi Termal (*Thermal Energy Storage, TES*)

Penyimpanan energi telah menjadi bagian penting dari sistem teknologi energi terbarukan. *Thermal Energy Storage (TES)* adalah teknologi yang menyimpan energi panas dengan memanaskan atau mendinginkan media penyimpanan sehingga energi yang tersimpan dapat digunakan di lain waktu untuk aplikasi pemanasan pendinginan dan pembangkit listrik. Sistem TES digunakan terutama di gedung dan dalam proses industri. Keuntungan menggunakan TES dalam sistem energi termasuk peningkatan efisiensi keseluruhan dan keandalan yang lebih baik, dan dapat mengarah pada ekonomi yang lebih baik, pengurangan investasi dan biaya operasional, dan lebih sedikit polusi lingkungan, yaitu, lebih sedikit emisi karbon dioksida (CO_2). Sistem termal surya, tidak seperti sistem fotovoltaik dengan efisiensi yang berjuang, matang secara industri dan memanfaatkan sebagian besar energi panas Matahari di siang hari. Namun, ia tidak memiliki cadangan (termal) yang cukup untuk terus beroperasi selama jam radiasi

matahari yang rendah atau tidak ada sama sekali. TES menjadi sangat penting untuk penyimpanan listrik dalam kombinasi dengan memusatkan pembangkit tenaga surya di mana panas matahari dapat disimpan untuk produksi listrik ketika sinar matahari tidak tersedia. Bahan-bahan baru dipilih, dikarakterisasi, dan ditingkatkan dalam sifat termo-fisiknya untuk melayani tujuan operasi 24 jam dalam sistem TES yang efisien (Sarbu & Sebarchievici, 2018).

Penyimpanan energi panas memungkinkan penyimpanan energi digunakan untuk pemanasan atau pendinginan untuk digunakan nanti. Proses penyimpanan ini terjadi dalam tiga langkah:

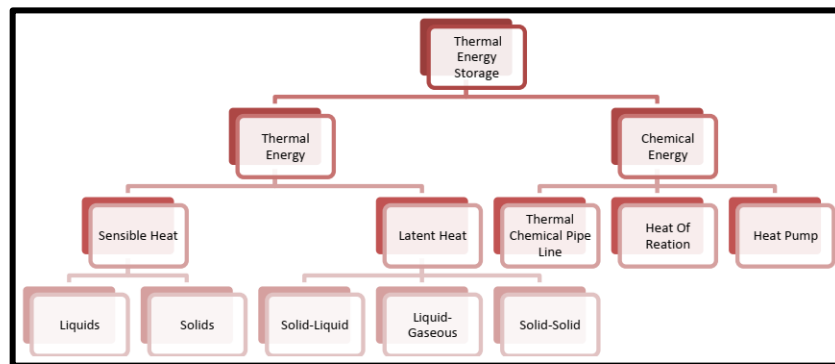
- 1) mengisi media penyimpanan dengan energi berlebih,
- 2) menyimpan energi yang diisi,
- 3) pemakaian ketika energi yang disimpan diperlukan.

Sistem penyimpanan energi panas biasa terdiri dari tiga bagian yaitu: bahan penyimpanan, penukar panas untuk mengisi dan mengeluarkan bahan, serta wadah yang menutupi media penyimpanan. Efisiensi, dengan demikian biaya sistem penyimpanan energi panas tergantung pada beberapa faktor seperti kepadatan energi (kapasitas penyimpanan) dan stabilitas bahan penyimpanan, perpindahan panas antara cairan pengisian atau pemakaian dan bahan penyimpanan, reversibilitas sistem, dan jumlah kehilangan (Ugur & Tezel, 2013).

Penyimpanan energi termal adalah salah satu teknologi yang berkembang dan dilakukan dengan tiga metode berbeda: penyimpanan panas yang masuk akal, penyimpanan panas laten, dan penyimpanan panas termo-kimia. Dalam sistem penyimpanan panas yang masuk akal, bahan, seperti batu, dipanaskan dalam wadah berinsulasi. Metode penyimpanan ini saat ini merupakan proses yang paling banyak digunakan karena kelayakan ekonominya. Namun, karena ada kehilangan panas terus menerus terhadap lingkungan selama periode penyimpanan, itu tidak dapat diterapkan untuk penyimpanan energi jangka Panjang. Metode lain yang digunakan adalah penyimpanan panas laten. Dalam sistem penyimpanan panas laten, energi yang dilepaskan selama perubahan fase suatu bahan digunakan. Metode ini memiliki banyak keunggulan seperti memiliki kepadatan energi hingga 500 kWh/m³, dan pemakaian energi panas yang tersimpan pada suhu yang hampir

konstan. Namun, proses ini dirancang untuk proses suhu tinggi seperti produksi uap dan tidak dapat diterapkan untuk proses perumahan (Ugur & Tezel, 2013).

Energi panas dapat disimpan sebagai perubahan energi internal suatu bahan sebagai panas yang masuk akal, panas laten atau termokimia atau kombinasi dari ini. Penyimpanan panas yang masuk akal adalah karena perubahan suhu material sementara penyimpanan panas laten disebabkan oleh transformasi fase baik itu padat-cair, cair-gas atau padat padat (Avghad et al., 2016).



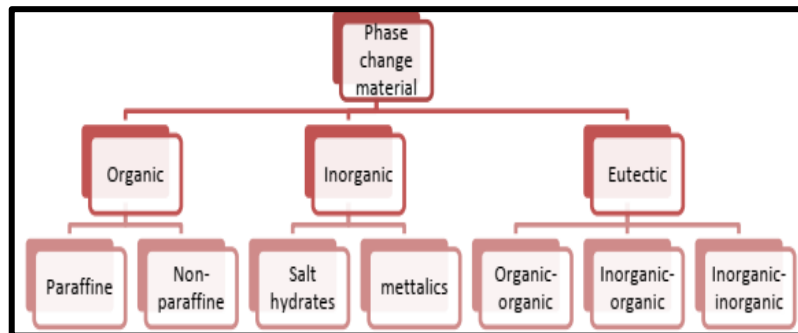
Gambar 9. Berbagai jenis penyimpanan termal energi matahari (Avghad et al., 2016).

2.6. Phase Change Material (PCM)

Phase Change Material adalah material perubahan fase (gas-cair-padat), ada penyerapan/pelepasan panas pada suhu yang hampir konstan. Untuk penyimpanan energi, perubahan fase cair-padat adalah satu-satunya yang praktis, dan bahan tersebut harus memiliki panas laten yang besar dan konduktivitas termal yang tinggi. Bahan perubahan fase menyimpan energi panas 5 hingga 14 kali lebih banyak per satuan volume daripada bahan penyimpanan konvensional (air, pasangan bata, dan batuan). Ada sejumlah besar bahan perubahan fase dalam kisaran suhu dari -5°C hingga 190°C . Bahan organik seperti parafin dan asam lemak memiliki perubahan fase dalam kisaran ini. Beberapa masalah dengan menggunakan bahan perubahan fase adalah stabilitas sifat termal di bawah siklus yang diperpanjang dan kadang-kadang pemisahan fase dan subcooling. Panas fusi untuk air adalah $333,6 \text{ kJ/kg}$ atau $319,8 \text{ MJ/m}^3$. Ingat, kepadatan es kurang dari itu untuk air, jadi wadah harus memiliki ruang untuk ekspansi air dalam fase padat. Contoh penyimpanan perubahan fase untuk gedung perkantoran adalah es yang

dibuat di musim dingin, disimpan di reservoir bawah tanah, dan kemudian digunakan untuk pendinginan selama musim panas (Nelson, 2009).

Secara umum, penyimpanan panas laten adalah yang paling menjanjikan di antara berbagai metode penyimpanan energi panas. Dalam tes panas laten; energi disimpan dalam bahan perubahan fase (PCM) melalui perubahan suatu zat dari satu fase ke fase lainnya.



Gambar 10. Daftar bahan yang paling mungkin digunakan untuk penyimpanan panas laten (Avghad et al., 2016).

Ketika temperatur meningkat, bahan berubah dari fase padat menjadi cair dan menyerap panas dalam proses endotermik. Ketika suhu berkurang, bahan mengalami perubahan fase dari cair ke padat dan melepaskan panas. Karena PCM menyimpan energi dalam bentuk panas laten fusi, tidak ada penurunan temperatur yang signifikan dalam proses pelepasan panas. Penyimpanan energi harus melalui beberapa transisi fase: padat-padat, padat-cair, padat-gas dan cair-gas. Dalam transisi padat-padat, energi disimpan oleh transformasi kristal material. Transisi ini mengandung panas laten yang jauh lebih kecil dan perubahan volume kecil. Akibatnya, PCM padat-padat memiliki keuntungan dari persyaratan kontainer yang kurang ketat yang memungkinkan fleksibilitas desain yang lebih besar. Di sisi lain, transformasi padat-cair memainkan peran penting dalam TES panas laten karena memberikan kepadatan penyimpanan energi yang tinggi dan memiliki panas fusi laten yang jauh lebih tinggi. Berbeda dengan transisi fase padat-padat dan padat-cair, transisi padat-gas dan gas cair memiliki keuntungan dari panas fusi laten yang lebih tinggi, tetapi perubahan volumenya yang besar selama proses perubahan fase meningkatkan kesulitan dan kompleksitas sistem penyimpanan. Secara keseluruhan, jumlah energi yang disimpan dalam perangkat TES panas laten

tergantung pada panas penyerapan atau pelepasan selama perubahan fase, yang dapat dihitung sebagai:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_p dT + Ma_m \Delta h_m \quad (6)$$

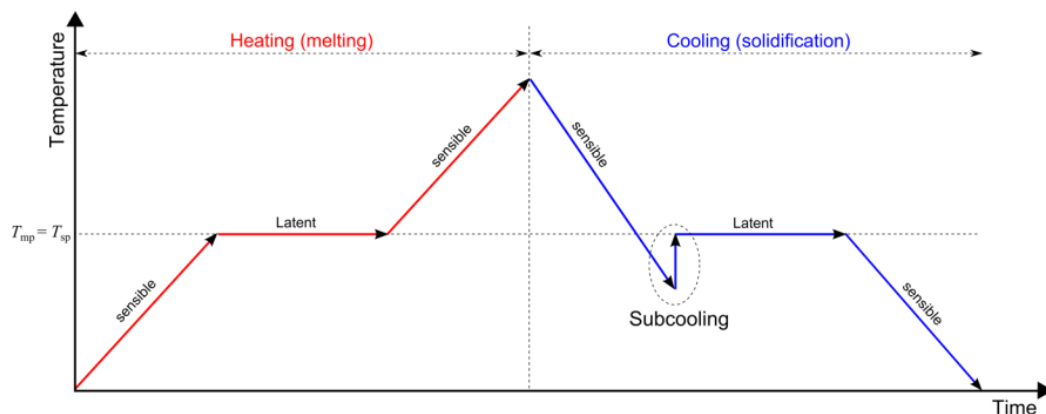
Di mana m dan C_p menunjukkan massa dan panas spesifik dari bahan penyimpanan, masing-masing, $(T_m - T_i)$ adalah perbedaan suhu antara suhu awal dan suhu leleh bahan penyimpanan, Ma_m adalah tingkat konversi, dan Δh_m is panas laten fusi bahan penyimpanan. Dibandingkan dengan TES panas yang masuk akal, TES panas laten memiliki manfaat kepadatan penyimpanan panas yang lebih tinggi, ukuran sistem yang kecil, pengurangan pemisahan komponen, perubahan kecil dalam struktur selama transisi fase berulang, dan biaya rendah. Namun, beberapa kelemahan dalam TES laten seperti tingkat perpindahan panas yang buruk, stabilitas jangka pendek, efek pendinginan super yang tinggi, dan konduktivitas termal yang rendah, telah mencegahnya dari penggunaan komersial yang luas (Avghad et al., 2016).

Kapasitas penyimpanan PCM ideal dapat dicirikan melalui empat parameter utama, yaitu kapasitas panas fase padat dan cair, panas laten fusi dan suhu puncak leleh. Namun, untuk PCM umum, lebih dari menentukan variabel-variabel ini, kurva suhu entalpi $h(T)$ harus disediakan, karena menggambarkan materi dengan lebih presisi. Oleh karena itu, hubungan entalpi-suhu $h(T)$ adalah salah satu sifat PCM yang paling penting karena mencakup banyak informasi tentang proses perubahan fase.

Dalam situasi ideal, kurva entalpi-suhu $h(T)$ harus sama selama siklus pengisian reversibel (*Melting*) dan pemakaian (*Solidification*). Namun, kurva $h(T)$ dapat dipengaruhi oleh fenomena lain seperti *subcooling*, histeresis dan stabilitas berbeda. Gambar 11. menunjukkan variasi suhu selama peleburan dan pepadatan PCM ideal dengan *subcooling*. Ketika *subcooling* (juga disebut *supercooling*) diverifikasi, suhu secara signifikan di bawah suhu pepadatan PCM harus dicapai untuk memulai kristalisasi dan melepaskan panas laten yang tersimpan dalam material (Soares, 2015).

Jika panas yang dilepaskan pada pepadatan lebih besar dari panas yang masuk akal yang hilang karena *subcooling*, suhu naik lagi ke suhu pepadatan PCM,

T_{sp} , yang idealnya harus sama dengan T_{mp} . Namun, jika ini tidak terjadi, atau jika laju panas yang hilang ke sekitar lebih besar dari laju panas yang dilepaskan selama kristalisasi, suhu tidak akan naik ke suhu pemadatan lagi, dan histeresis nyata akan disebabkan oleh *subcooling*. Oleh karena itu, *subcooling* dapat menyebabkan efek negatif saat melakukan eksperimen dinamis, dan ini bisa menjadi masalah serius dalam aplikasi teknis PCM. *Subcooling* dapat bergantung pada ukuran sampel PCM dan juga pada jenis dan bentuk wadah yang digunakan dalam pendekatan skala makro.



Gambar 11. Sketsa evolusi temperatur selama selama proses peleburan (*Melting*) dan pemadatan (*solidification*) PCM ideal dengan *subcooling* (Soares, 2015).

2.7. Paraffin Wax

Lilin parafin adalah campuran hidrokarbon jenuh yang biasanya terdiri dari campuran alkana yang berbeda. Mereka dicirikan oleh rantai karbon lurus atau bercabang dengan rumus generik C_nH_{2n+2} ($C_{20}H_{42}$ hingga $C_{40}H_{82}$), dan memiliki suhu leleh mulai dari 23 hingga 67°C. Mereka adalah padatan putih, semi-transparan, hambar dan tidak berbau dengan sifat umum seperti tekstur halus, anti air, toksisitas rendah, bebas dari bau dan warna yang tidak menyenangkan. Mereka mudah terbakar dan memiliki sifat dielektrik yang baik. Mereka larut dalam benzena, ligroin, alkohol hangat, kloroform dan karbon disulfida, tetapi tidak larut dalam air dan asam. Mereka digunakan untuk campuran lilin, lapisan kertas, sealant pelindung untuk produk makanan dan minuman, persiapan pembersihan kaca, dukungan karpet panas-meleleh, mulsa biodegradable, pelumas, dan sumbat untuk botol asam, serta isolasi listrik. Mereka digunakan sebagai bahan perubahan fase

untuk aplikasi penyimpanan termal, karena mereka memiliki sebagian besar sifat yang diperlukan. Mereka memiliki panas laten fusi yang tinggi, pendinginan super yang dapat diabaikan, tekanan uap rendah dalam keadaan cair, mereka secara kimiawi lembam, memiliki stabilitas kimia, nukleasi diri, tersedia secara komersial, tidak berbahaya secara ekologis, tersedia dan murah. Kapasitas panas spesifik mereka adalah sekitar $2,1 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, dan entalpi mereka terletak antara 180 dan 230 kJ kg^{-1} , cukup tinggi untuk bahan organik. Kombinasi kedua nilai ini menghasilkan kepadatan penyimpanan energi yang sangat baik. Karena karakteristik yang diinginkan inilah lilin parafin digunakan sebagai PCM dalam penelitian ini. Lilin parafin dikatakan sebagai PCM padat-cair konvensional, dan karenanya tidak nyaman digunakan secara langsung sebagai bahan perubahan fase. Ini berarti bahwa lilin parafin perlu dienkapsulasi untuk mencegah, misalnya, kebocoran lilin parafin cair selama transisi fase. Mereka memiliki konduktivitas termal yang rendah dan perubahan volume yang besar selama transisi fase. Penerapan bahan perubahan fase telah menemukan pentingnya dalam berbagai sistem mulai dari penyimpanan energi hingga perlindungan termal (Mngomezulu M.E., 2009).

Tabel 1. Sifat fisik lilin paraffin

Sifat Fisik	Nilai
Melting	$40^{\circ}\text{C} - 53^{\circ}\text{C}$
Heat Of Fusion (Hf)	251 kJ/kg
Cp (solid)	1,92 kJ/kg.K
Cp (liquid)	3,26 kJ/kg.K
k (solid)	0,514W/m.K
k (liquid)	0,224W/m.K
ρ (density)	830 kg/m ³

2.8. Kesenjangan Energi pada Kolektor

Untuk kondisi *steady*, kinerja sebuah kolektor ditentukan oleh kesetimbangan energi melalui distribusi energi matahari sebagai sumber kalor (*energi gain*), kehilangan termal (*thermal losses*), dan kehilangan optikal (*optical*

losses). Besarnya energi yang berguna pada kolektor dinyatakan dengan persamaan (Beckman et al., 2021):

$$Q_u = A_c \cdot [S - U_L(T_{pm} - T_a)] \quad (7)$$

Dimana:

- Q_u = Kalor yang berguna (kW)
- A_c = Luas Kolektor (m^2)
- S = Radiasi Cahaya yang diserap per satuan luas (kW/m^2)
- U_L = Koefisien Perpindahan panas ($kW/m^2.K$)
- T_{pm} = Temperatur rata-rata pelat (K)
- T_a = Temperatur Ambien (K)

Selain itu, besarnya energi berasal dari fluida kerja melalui perbedaan temperatur masuk dan keluar pada kolektor yaitu:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (8)$$

Dimana:

- Q_u = Kalor yang berguna (kW)
- \dot{m} = Laju aliran massa air (kg/s)
- C_p = Panas spesifik air (kJ/kg.K)
- T_{in} = Temperatur air masuk ke kolektor (K)
- T_{out} = Temperatur air keluar dari kolektor (K)

Sedangkan, efisiensi kolektor pada periode waktu yang konstan dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T \cdot A_c} \quad (9)$$

Dimana:

- η = Efisiensi (%)
- I_T = intensitas matahari total pada periode waktu sama (kW/m^2)
- Q_u = panas yang berguna (kW)
- A_c = Luas Kolektor (m^2)

Adapun tahap perhitungan dalam mencari kerugian kalor sebagai berikut:

Analisis perpindahan panas:

a) Perpindahan panas antara penutup dengan udara luar.

Setelah sumber energi kalor dihidupkan, energi kalor ditransfer secara radiasi dimana energi kalor dipancarkan melalui gelombang elektromagnetik menuju ke permukaan *cover* (penutup kaca) yang kemudian energi kalor tersebut di refleksikan kembali secara konveksi dimana energi kalor di transfer dari *cover* ke udara sebagai Q losses dan sebagiannya lagi di teruskan ke permukaan pelat absorber secara radiasi. (Wurzbacher et al., 2016).

b) Perpindahan panas antara Penutup dengan pelat absorber.

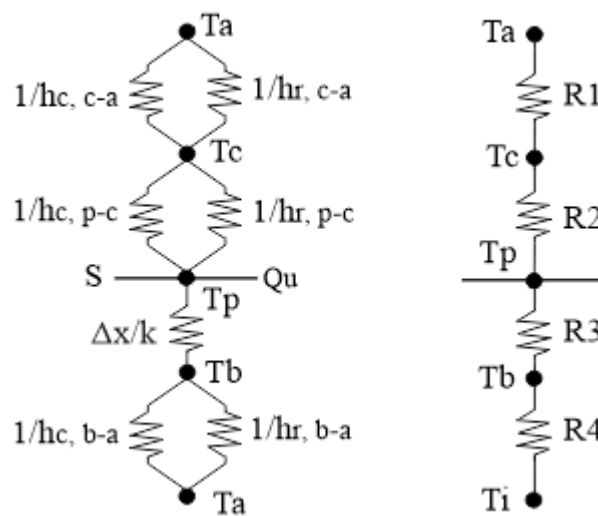
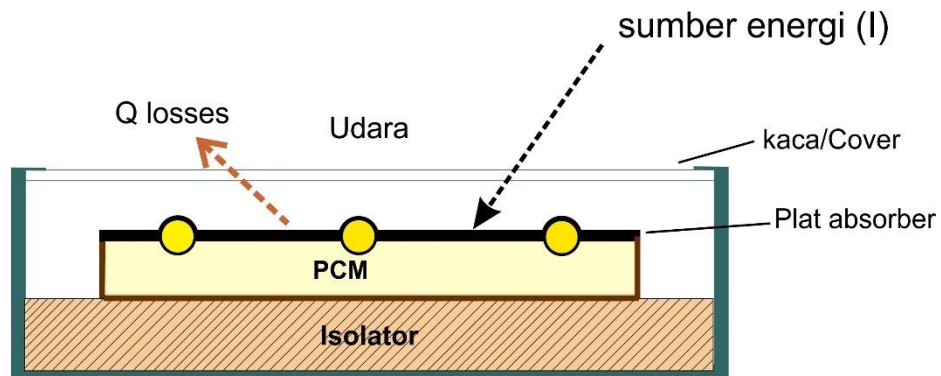
Pada perpindahan panas ini terjadi proses perpindahan panas radiasi dan konveksi, perpindahan panas radiasi terjadi saat sumber energi kalor memancarkan gelombang elektromagnetik yang kemudian menembus lapisan penutup menuju permukaan pelat absorber. Sedangkan perpindahan panas konveksi terjadi ketika transfer energi antara permukaan absorber dengan udara yang berada dalam kolektor (Wurzbacher et al., 2016).

c) Perpindahan panas antara pelat absorber dengan fluida kerja.

Pada proses ini terjadi perpindahan panas secara konveksi, dimana energi kalor yang di transfer dari pelat absorber ke fluida kerja. Perpindahan panas ini merupakan konveksi bebas yang melibatkan aliran fluida dalam pipa (Rahmadhani, 2022).

d) Perpindahan panas antara pelat absorber dengan *thermal storage*.

Perpindahan panas ini terjadi antara pelat absorber dengan PCM *thermal storage* dimana energi kalor dari pelat di transfer ke PCM. Proses perubahan fasa padat menjadi cair di sebabkan efek perpindahan panas konveksi alami pada PCM cair, hal ini merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi proses transisi fase (Soares, 2015).



Gambar 12. Tahanan termal pada kolektor

1. Koefisien perpindahan panas konveksi antara kaca penutup dengan udara luar.

$$h_w = 0,86Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (10)$$

Dimana:

Re = Bilangan Reynolds

Pr = Bilangan Prandtl

2. Koefisien perpindahan panas radiasi antara kaca penutup dengan udara luar.

$$h_{r_{c-a}} = \varepsilon_c \sigma (T_c^2 + T_s^2) (T_c + T_s) \quad (11)$$

$$T_s = 0,5552T_a^{1,5} \quad (12)$$

Dimana:

$h_{r_{c-a}}$ = koefisien perpindahan panas radiasi (penutup dan udara luar)
(W/m².K)

ε_c = Emisivitas penutup

σ = konstanta Stefan-Boltzman ($5,6697 \times 10^{-8}$, W/m²k⁴)

T_c = temperatur penutup (K)

T_s = temperatur sky (K)

T_a = temperatur lingkungan (K)

3. Koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat absorber dengan kaca penutup.

$$h_{c_{p-c}} = \frac{Nu \cdot K}{L} \quad (13)$$

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1,8\beta)^{1,6}}{Ra \cos \beta} \right] \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (14)$$

Dimana:

Ra = Bilangan Rayleigh

β = sudut kemiringan (°)

L = panjang karakteristik penutup (m)

4. Koefisien perpindahan panas radiasi pelat-penutup.

$$h_{r_{p-c}} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (15)$$

Dimana:

$h_{r_{p-c}}$ = Koefisien perpindahan panas radiasi pelat-penutup (W/m².K)

ε_c = emisivitas penutup

ε_p = emisivitas pelat

T_p = temperatur pelat

T_c = temperatur penutup

5. Koefisien perpindahan panas total kolektor.

$$U_t = \left(\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} \right)^{-1} \quad (16)$$

$$U_b = \frac{1}{\frac{L_C}{k_C} + \frac{L_{PCM}}{k_{PCM}} + \frac{L_{Besi}}{k_{Besi}} + \frac{L_i}{k_i}} \quad (14)$$

$$U_L = U_t + U_b \quad (17)$$

Dimana:

U_t = koefisien perpindahan panas bagian atas kolektor atas (W/m².K).

U_b = koefisien perpindahan panas bagian bawah kolektor (W/m².K).

U_L = koefisien perpindahan panas total kolektor (W/m².K).

L_C = ketebalan pelat tembaga penutup material penyimpanan panas (m).

k_C = konduktivitas pelat tembaga penutup material penyimpanan panas (W/m.K).

L_{PCM} = ketebalan material *Paraffin Wax* (m).

k_{PCM} = konduktivitas termal *Paraffin Wax* (W/m.K).

L_{Besi} = ketebalan pelat besi *casing* material penyimpanan panas (m).

k_{Besi} = konduktivitas pelat besi *casing* material penyimpanan panas (W/m.K).

L_i = ketebalan isolator (m).

k_i = konduktivitas termal isolator (W/m.K).

6. Kerugian panas kolektor

$$Q_{loss} = U_L(T_i - T_a) \quad (18)$$

Dimana:

Q_{loss} = Panas yang terbuang (W/m²)

U_L = koefisien perpindahan panas total kolektor (W/m².K).

T_i = temperatur *inlet* (K).

T_a = temperatur Udara (K).