

SKRIPSI

**ANALISIS PENGARUH DEBIT TERHADAP UNJUK
KERJA PEMANAS AIR MINI TENAGA SURYA DENGAN
*PCM STORAGE***

DISUSUN OLEH

**ARIFUDDIN
D211 15 015**



**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2021**

SKRIPSI

***ANALISIS PENGARUH DEBIT TERHADAP UNJUK KERJA PEMANAS
AIR MINI TENAGA SURYA DENGAN PCM STORAGE***

**OLEH:
ARIFUDDIN
D211 15 015**

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

**DEPARTEMEN MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2021**

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH DEBIT TERHADAP UNJUK KERJA PEMANAS
AIR MINI TENAGA SURYA DENGAN *PCM STORAGE***

Disusun dan diajukan oleh

ARIFUDDIN

D211 15 015


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


Pada tanggal 24 Agustus 2021

Menyetujui,

Pembimbing Utama,


Pembimbing Pendamping,


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


Dr. Rustan Tarakka, S.T., M.T.
NIP. 19750827 200501 1 002

Ketua Departemen Teknik Mesin,




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

LEMBAR PENGESAHAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Arifuddin
NIM : D211 15 015
Departemen : Teknik Mesin
Jenjang : S-1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**“ANALISIS PENGARUH DEBIT TERHADAP UNJUK KERJA PEMANAS
AIR MINI TENAGA SURYA DENGAN *PCM STORAGE*”**

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

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

Makassar, 23 Agustus 2021

Yang membuat Pernyataan,



Arifuddin

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

DATA DIRI

Nama lengkap : Arifuddin
Nama Panggilan : Arif
Tempat / Tanggal Lahir : Bajo, 02 Maret 1997
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Agama : Islam
Golongan Darah : 0
Alamat : BTP Blok H Lama No.478 Tamalanrea
Telepon / No. HP : 082347826230
E-mail : arifuddin02@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

- SDN 29 Bajo (2003-2009)
- SMPN 1 Bajo (2009-2012)
- SMAN 1 Kamanre (2012-2015)
- Universitas Hasanuddin (2015-2020)

RIWAYAT ORGANISASI

- HMM FT-UH
- OKFT-UH

ABSTRAK

Penelitian mengenai pemanas air tenaga surya telah banyak dilakukan karena energi surya dianggap sebagai energi yang ramah lingkungan dan ketersediaannya yang tidak terbatas, oleh karena itu dilakukan penelitian guna mengembangkan efektivitas dari pemanas air tenaga surya yang sudah ada sebelumnya, penelitian ini membandingkan kinerja pelat *absorber* berbentuk-V yang diintegrasikan dengan *PCM Storage* sebagai *TES (Thermal Energy Storage)* dan pelat *absorber* datar tanpa *PCM storage*. *PCM* yang digunakan ialah *Paraffin Wax* ($C_{25}H_{52}$), Kemudian dilakukan dengan 3 variasi debit yaitu 0,5 Liter/menit, 1 Liter/menit, dan 1,5 Liter/menit. Penelitian ini dilakukan di laboratorium energi terbarukan Universitas Hasanuddin dengan menggunakan metode *Experimental Laboratory*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin besar debit maka perbedaan efisiensi termal kolektor plat V yang menggunakan *PCM Storage* dengan kolektor pelat datar tanpa *PCM* semakin besar pula. Efisiensi termal tertinggi terjadi pada debit 1,5L/m yaitu plat V dengan *PCM storage* sebesar 66,56 % dan pelat datar tanpa *PCM storage* sebesar 60,271 %.

Kata Kunci : Pemanas Air, *PCM*, *TES (Thermal Energy Storage)*

ABSTRACT

Research on solar water heaters has been carried out a lot because solar energy is considered as environmentally friendly energy and its availability is unlimited, therefore research is carried out to develop the effectiveness of pre-existing solar water heaters. V which is integrated with PCM Storage as TES (Thermal Energy Storage) and flat absorber plate without PCM storage. PCM used is Paraffin Wax ($C_{25}H_{52}$), then carried out with 3 variations of discharge, namely 0.5 Liter/minute, 1 Liter/minute, and 1.5 Liter/minute. This research was conducted in the renewable energy laboratory of Hasanuddin University using the Experimental Laboratory method. The results of this study indicate that the greater the discharge, the greater the difference in thermal efficiency of the V plate collector using PCM Storage with the flat plate collector without PCM. The highest thermal efficiency occurs at 1.5L/m discharge, namely plate V with PCM storage of 66.56% and flat plate without PCM storage of 60.271%.
Keywords: Water Heater, PCM, TES (Thermal Energy Storage)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya agar saya selaku penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini yang menjadi salah satu syarat kelulusan Departemen Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan salam serta salawat kita sampaikan kepada junjungan kita nabi Muhammad Saw yang telah membawa umat islam ke kehidupan yang lebih beradab.

saya menyadari bahwa tanpa bimbingan dan bantuan berbagai pihak adalah sangat sulit bagi penulis untuk menyelesaikan perkuliahan ini,terkhusus penyusunan tugas akhir.

Pada kesempatan ini pula perkenankan penulis menghaturkan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penelitian dan skripsi ini, ucapan terima kasih kepada:

1. Kepada Orang tua saya tercinta, ayahanda Almarhum Muhamad Sabil dan Ibu Naikma, terima kasih atas semua kasih sayang, doa dan petuahnya yang tidak pernah putus. Kalian adalah semangat penulis dalam menyelesaikan studi ini.
2. Kepada kakak saya Agus Salim ST dan adik-adikku agung, nurul dan yuli yang selalu menjadi penyemangat, terima kasih doa dan dukungannya.
3. Ibu Prof. Dwia Aris Tina Pulubuhu, selaku Rektor Universitas Hasanuddin beserta jajarannya di tingkat universitas dan fakultas.
4. Bapak Dr-Eng. Jalaluddin, ST, MT. selaku Ketua Departemen Mesin FT-UH sekaligus pembimbing I yang selalu memberi saran dan masukan serta motivasinya dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Bapak Dr. Rustan Tarakka, ST., MT selaku pembimbing II, terima kasih atas saran dan masukannya.
6. Prof.Dr.-Ing. Ir. Wahyu H. Piarah.,MSME dan Dr. Ir. Zuryati Djafar.,MT selaku dosen penguji tugas Akhir.
7. Seluruh staf administrasi Departemen Mesin (Pak Mansyur, Pak Irwan, Kak Suri serta yang lain) yang membantu mengurus administrasi penulis selama kuliah .

8. Saudara-saudara seperjuangan penulis Hydraulic 2015 yang sudah menjadi *support system* paling hebat yang selalu ada dalam suka maupun duka, yang bahkan saya tidak yakin bisa menyelesaikan penelitian ini dengan baik tanpa mereka.
9. Kepada Indayani yang telah
10. Seluruh kanda senior serta adik-adik mahasiswa mesin khususnya dinda Udin, fahrul, safiril, Dias, Kadapol dan Montu asli yang turut membantu saat pengerjaan alat penelitian.
11. Teman-teman sepemikiran, kos Lt 1 gedung Mesin ; Sulfadli Bahri (Bolobolo), Imam Adli Agil (Komeng), Hamdani (Pedrosa), Fahrul Islam (alili), Rizal Amil Aulia Kasman (Tizon jlk), Lukman Hakim, A Ilham akbar (bolang), Akbar Ali, Hasan (Jordi Aihih), Syamsu Rijal S amin, Chatib Dwi Putra, Nurul Icsan, Agim, terima kasih untuk waktu yang tersita untuk membantu menyelesaikan alat serta menemani begadang di kampus.
12. Penghuni laboratorium Energi Terbarukan, (Kak Naldi, Kak Anis, Udin, Fahrul, dan komang)
13. Keluarga besar HMM FT-UH yang menjadi tempat belajar dan bermain selama menempuh kuliah terkhusus teman-teman mengurus HMM FT-UH Periode 2018.
14. Kepada keluarga blok a, kak sandi, kak tirta, kak uga, kak fiqrah, comel, tunru, anca, haidir.
15. Semua pihak yang tidak sempat disebutkan namanya satu per satu.

Semoga Allah *swt* membalas kebaikan kalian semua baik dengan pahala ataupun rejeki. penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga penulis dengan sangat terbuka menerima keritikan dan saran yang membangun untuk memperbaiki skripsi ini kedepannya, agar berguna bagi pembaca nantinya

Gowa, 24 Agustus 2021

Penulis

ix

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	v
ABSTRAK.....	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
NOMENKLATUR.....	xv
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II	4
TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Kolektor Surya Pemanas Air	4
2.2 Perpindahan panas.....	8
2.3 Phase Change Material (PCM).....	12
2.4 Parafin Wax	14
2.5 Tahapan perhitungan mencari efisiensi kolektor tenaga surya	15
BAB III.....	21
METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	21
3.2 Alat dan Bahan yang Digunakan	21
3.3 Skema Instalasi Pengujian dan Titik Pengukuran.....	24
3.4 Tahapan Pengambilan Data.....	24
3.5 Diagram Alir Penelitian.....	25

BAB IV	26
HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Hasil	26
4.1.1 Contoh Perhitungan Efisiensi Termal Kolektor	26
4.1.2 Hubungan temperatur air pada <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> kolektor serta temperatur PCM (<i>paraffin wax</i>)	33
4.1.3 Hubungan Intensitas matahari dan kalor diserap air	36
4.1.4 Efisiensi Thermal Kolektor	39
4.2 Pembahasan	42
4.2.1 Temperatur Air Pada Inlet Dan Outlet Kolektor Serta Temperatur PCM (Paraffin wax)	42
4.2.2 Intensitas Matahari dan Kalor Diserap Air	43
4.2.3 Efisiensi Termal Kolektor	44
BAB V	46
KESIMPULAN	46
5. 1 Kesimpulan	46
5. 2 Saran	46
DAFTAR PUSTAKA	47
LAMPIRAN	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kolektor pemanas air plat V dengan <i>PCM storage</i>	5
Gambar 2.2 Pelat absorber bentuk datar	7
Gambar 2.3 Pelat absorber bentuk-V	8
Gambar 2. 4 Konduksi pada dinding dengan tebal Δx dan luas A.....	9
Gambar 2. 5 Konveksi antara balok panas dan udara.....	10
Gambar 2. 6 Konveksi paksa dan konveksi bebas.....	11
Gambar 2. 7 Perpindahan panas radiasi antara dua permukaan.....	12
Gambar 2. 8 Jala-jala thermal	15
Gambar 2. 9 Lapisan Bawah Kolektor	19
Gambar 3. 1 Pelat absorber berbentuk-V (kiri) dan Kolektor dengan pelat absorber berbentuk datar (kanan)	21
Gambar 3. 2 Dimensi Pemanas air mini tenaga surya	22
Gambar 3. 3 Tandon air	22
Gambar 3. 4 Data Logger GL820.....	22
Gambar 3. 5 Termokopel	23
Gambar 3. 6 Weather station dan komputer	23
Gambar 3. 7 Parafin Wax.....	24
Gambar 3. 8 Skema Instalasi Pengujian dan Titik Pengukuran	24
Gambar 3. 9 Diagram Alir penelitian	25
Gambar 4. 1 Hubungan temperatur air pada <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> kolektor serta temperatur PCM (<i>paraffin wax</i>) pada debit 0,5 L/m.....	33

Gambar 4. 2	Hubungan temperatur air pada <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> kolektor serta temperatur PCM (<i>Paraffin wax</i>) pada debit 1 L/m	33
Gambar 4. 3	Hubungan temperatur air pada <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> kolektor serta temperatur PCM (<i>Paraffin wax</i>) pada debit 1,5 L/m	34
Gambar 4. 4	Hubungan temperatur air pada outlet kolektor serta temperatur PCM (<i>Paraffin wax</i>) pada debit 0,5 L/m, 1 L/m, 1,5 L/m	34
Gambar 4. 5	Hubungan temperatur air pada outlet kolektor serta temperature plat datar pada debit 0,5 L/m, 1 L/m, 1,5 L/m	35
Gambar 4. 6	Kalor diserap air terhadap waktu pada debit 0,5 L/m	36
Gambar 4. 7	Kalor diserap air terhadap waktu pada debit 1 L/m	36
Gambar 4. 8	Kalor diserap air terhadap waktu pada debit 1,5 L/m	37
Gambar 4. 9	Kalor diserap air terhadap waktu pada debit 0,5 L/m, 1 L/m, 1,5 L/m.....	37
Gambar 4. 10	Kalor diserap air terhadap waktu pada debit 0,5 L/m, 1 L/m, 1,5 L/m.....	38
Gambar 4. 11	Hubungan efisiensi thermal kolektor terhadap waktu pada debit 0,5 L/m .	39
Gambar 4. 12	Hubungan efisiensi thermal kolektor terhadap waktu pada debit 1 L/m ...	40
Gambar 4. 13	Hubungan efisiensi thermal kolektor terhadap waktu pada debit 1,5 L/m	40
Gambar 4. 14	Hubungan efisiensi thermal kolektor terhadap waktu pada debit 0,5 L/m.1 L/m, 1,5 L/m	41
Gambar 4. 15	Hubungan efisiensi thermal kolektor terhadap waktu pada debit 0,5 L/m.1 L/m, 1,5 L/m	41

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Konduktivitas termal beberapa bahan kolektor matahari tertentu.....	6
Tabel 2. 2 Jenis-jenis PCM	14
Tabel 2. 3 Sifat fisik lilin.....	15

NOMENKLATUR

Simbol	Keterangan	Satuan
I_T	Intensitas Matahari	W/m^2
\dot{m}	Laju Aliran Massa	kg/s
V_w	Kecepatan Angin	m/s
ρ	Densitas Air	kg/m^3
C_p	Kalor Spesifik Udara	$kJ/kg.K$
A_c	Luas Kolektor	m^2
T_p	Temperatur Pelat Absorber	$^{\circ}C, K$
T_a	Temperatur Udara Luar	$^{\circ}C, K$
T_{in}	Temperatur Air Masuk	$^{\circ}C, K$
T_{out}	Temperatur Air Keluar	$^{\circ}C, K$
T_{c-luar}	Temperatur Kaca Luar	$^{\circ}C, K$
$T_{c-dalam}$	Temperatur Kaca Dalam	$^{\circ}C, K$
ν	Visikositas Kinematik	m^2/s
D_h	Diameter Hidrolis	m
σ	konstanta Stefan-Boltzman = $5,6697 \times 10^{-8}$	$W/m^2.K^4$
h_{cp-c}	Koefisien Konveksi Penutup-Udara Luar	$W/m^2.K$
h_{rc-a}	Koefisien Radiasi Pelat-Penutup	$W/m^2.K$
h_f	Koefisien Konveksi Pelat ke Air	$W/m^2.K$
$R1, R2$	Tahanan Termal	m^2K/W
k_p	Konduktivitas Termal Kertas	$W.m.K$

k_a	Konduktivitas Termal Alumunium	W.m.K
k_{pp}	Konduktivitas Termal Polypropylene	W.m.K
L_p	Ketebalan Kertas	m
L_a	Ketebalan Alumunium Foil	m
L_{pp}	Ketebalan Polypropylene	m
g	Percepatan Gravitasi	m/s ²
U_t	Koefisien perpindahan panas Atas	W/m ² K
U_b	Koefisien perpindahan panas Bawah	W/m ² K
U_L	Koefisien perpindahan panas Total	W/m ² K
S	Radiasi Surya Per Satuan Luas	W/m ²
q_u	Energi yang Berguna	W
η	Efisiensi	%

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara tropis yang dimana daerahnya dilalui oleh garis khatulistiwa. Sehingga setiap tahunnya indonesia menerima energi matahari yang sangat besar, namun pemanfaatan energi matahari tersebut tidak sebanding dengan banyaknya energi yang tersedia, energi matahari masih kurang pemanfaatannya di indonesia.

Berdasarkan data penyinaran matahari yang diperoleh dari 18 lokasi di Indonesia, dapat diklasifikasikan berturut-turut sebagai berikut: untuk kawasan barat dan timur Indonesia dengan distribusi penyinaran di Kawasan Barat Indonesia (KBI) sekitar $4,55 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ dan di Kawasan Timur Indonesia (KTI) sekitar $5,14 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ untuk makassar sebesar $5,79 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$. Dengan demikian, potensi penyinaran rata-rata Indonesia sekitar $4,85 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ [1].

Pada dasarnya pemanfaatan energi matahari dapat dilakukan dengan penggunaan dua macam cara: 1) pemanfaatan energi melalui *teknologi termal* yang pada umumnya di gunakan untuk pemanasan udara, air dan penegeringan lainnya, seperti pengeringan hasil-hasil pertanian: 2) penyediaan atau pembangkitan energi listrik dengan *sel fotovoltaik* yang di gunakan untuk penyediaan energi listrik yang dapat digunakan untuk penerangan, pompa, TV, dan peralatan lainnya.

Penelitian tentang sistem pemanas air tenaga matahari sangat penting karena akan meningkatkan efisiensi dan efektivitas dari teknologi pemanas air tenaga matahari terhadap produk yang ada dipasaran sekarang ini. Model-model pemanas air tenaga surya sudah banyak dikembangkan, salah satunya pemanas air dengan plat *absorber* berbentuk V, pengembangan model tersebut karena masih banyaknya energi yang tidak mampu diserap oleh plat absorber [2]. Plat *absorber* berbentuk V ini terbukti mampu meningkatkan efisiensi. Kemudian ada juga model pelat absorber V yang dilengkapi dengan Phase

Change Material (PCM) yang berperan sebagai Thermal Energy Storage (TES) yang terbukti mampu menaikkan efisiensi kolektor [3].

Pada penelitian sebelumnya Ari hamdana (2019) merancang pemanas air tenaga surya mini dengan modifikasi pelat absorber berbentuk V yang terintegrasi dengan Phase Change Material (PCM) berkapasitas 25 liter untuk kebutuhan satu orang. Penelitian ini merupakan rancangan model baru karena di pasaran kapasitas pemanas air tenaga surya yang tersedia paling rendah yaitu 100 liter, dengan jumlah pakai 4-5 orang, sehingga kurang efektif untuk pemakaian minimum 1 orang [4].

Berdasarkan hal tersebut, pengembangan tentang model baru dari sistem pemanas air mini tenaga matahari yang diusulkan ini sangat diperlukan. Penyerapan panas, kehilangan panas pada permukaan dan transfer panas ke fluida kerja serta penyimpanan panas pada *Thermal Energy Storage* (TES) adalah hal-hal yang berpengaruh pada efisiensi sistem.

Penyerapan panas, kehilangan panas pada permukaan dan transfer panas ke fluida kerja serta penyimpanan panas Thermal Energy Storage (TES) dan tangki penyimpanan adalah hal-hal yang berpengaruh pada efisiensi sistem. Untuk mengetahui secara komprehensif unjuk kerja rancang bangun sistem *solar water heater* mini dengan modifikasi pelat absorber berbentuk V yang terintegrasi dengan *Phase Change Material* (PCM). Sebelumnya telah dilakukan penelitian dengan menggunakan sistem terposipon. maka perlu dibandingkan dengan *solar water heater* mini pelat datar tanpa PCM dengan memberikan beberapa variasi debit untuk melihat perbedaan efisiensi kedua sistem tersebut.

Berdasarkan uraian latar belakang diatas maka akan dilakukan penelitian dengan judul: *Analisis Pengaruh Debit Terhadap Unjuk Kerja Pemanas Air Mini Tenaga Surya Dengan PCM storage.*

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana rancang bangun sistem pemanas air mini tenaga surya dengan modifikasi pelat absorber berbentuk-V yang terintegrasi *PCM storage*?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan *PCM storage* pada efisiensi thermal pemanas air mini tenaga surya?
3. Bagaimana pengaruh variasi debit fluida kerja (air) terhadap efisiensi thermal pemanas air mini tenaga surya?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Membuat rancang bangun sistem pemanas air mini tenaga surya dengan pelat absorber berbentuk-V yang terintegrasi dengan *PCM storage* dan pelat absorber berbentuk datar.
2. Menganalisis pengaruh penggunaan *PCM storage* terhadap efisiensi thermal pemanas air mini tenaga surya.
3. Menganalisis pengaruh variasi debit fluida kerja (air) terhadap efisiensi thermal pemanas air mini tenaga surya.

1.4. Batasan Masalah

1. Pelat absorber yang digunakan berbentuk-V dan berbentuk datar
2. *PCM* yang digunakan adalah paraffin
3. Variasi debit yang digunakan ialah 0,5 liter/menit, 1 liter/menit, dan 1,5 liter/menit

1.5. Manfaat Penelitian

1. Bagi Penulis

Sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dan mendapatkan gelar sarjana Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

2. Bagi Universitas

Dapat dijadikan sebagai bahan referensi bagi generasi Teknik Mesin yang akan datang dalam pembuatan dan penyusunan tugas akhir

3. Bagi industri

Sebagai referensi desain untuk aplikasi nyata pemanfaatan teknologi pemanas air matahari untuk kepentingan masyarakat luas.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kolektor Surya Pemanas Air

Kolektor matahari adalah sistem pengumpul radiasi matahari yang dikonversikan dalam bentuk energi panas. Panjang gelombang radiasi matahari yang dapat diserap oleh kolektor matahari adalah 0.29 sampai dengan 2.5 μm [5]. Kolektor surya pemanas air seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.1 adalah sebuah alat yang digunakan untuk mengubah energi dan radiasi matahari menjadi energi panas air. Radiasi matahari ditransmisikan melalui penutup yang transparan dan diubah menjadi energi panas pada pelat penyerap [6]. Selanjutnya, energi panas pada pelat absorber ditransfer ke air yang mengalir dalam pipa.

Kolektor surya pemanas air memiliki komponen utama yang terbuat dari selembar bahan konduktif termal yang disebut pelat penyerap (*absorber*) yang kepadanya menempel atau menjadi satu pipa-pipa pembawa cairan (Air) atau lazim disebut pipa pemanas (*riser pipe*). *Absorber* dibuat dari lembaran metal tipis dan permukaannya berwarna hitam karena benda hitam adalah penyerap radiasi yang sempurna. Penghitaman bisa dilakukan dengan pengecatan warna hitam sebagai cara yang paling mudah, atau dengan metoda yang lebih canggih dengan proses pelapisan seperti *elektroplating*, *anodizing*, dan lain-lain. Cara pelapisan canggih tersebut, misal dengan *black chrome* atau *black nickel*, dimasukkan selain untuk mempertinggi absorptivitasnya terhadap radiasi surya juga untuk memperendah emitansinya terhadap gelombang sinar inframerah [7]. Salah satu jenis kolektor adalah kolektor dengan plat absorber bentuk V yang terintegrasi dengan *PCM storage* dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2. 1 Kolektor pemanas air plat V dengan *PCM storage*

Pengujian kolektor surya pemanas air dengan pelat absorber datar dan bentuk-V telah dilakukan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa performansi kolektor dengan pelat absorber bentuk-V terhadap kolektor dengan pelat absorber datar meningkat masing- masing sebesar 2.36 % pada debit 0.5 L/min dan 4.23 % pada debit 2.0 L/min. Masih tingginya temperatur pelat absorber bentuk-V memungkinkan untuk meningkatkan efisiensi kolektor dengan peningkatan transfer panas dari pelat absorber ke air (Jalaluddin,efendy,2015). Perbedaan performa kolektor pemanas air plat V dengan PCM storage setelah dibandingkan dengan kolektor pemanas air yang ada dipasaran dengan plat datar tanpa PCM storage dengan dimensi luas kolektor (A_c) $1,63 \text{ m}^2$ diperoleh bahwa Pengaruh debit terhadap efisiensi kolektor pelat absorber dengan PCM Storage yaitu, debit 1,5 liter/menit memiliki efisiensi thermal yang lebih tinggi dibandingkan dengan 1 liter/menit dan 0,5 liter/menit, rata-rata efisiensi untuk 1,5 liter/menit adalah 68% untuk , 1 liter/menit adalah 56% dan juga untuk 0,5 liter/menit ialah 43%. Jika dibandingkan dengan pelat absorber tanpa PCM Storage yang hanya memiliki efisiensi rata-rata yaitu 1,5 liter/menit adalah 60% untuk , 1 liter/menit adalah 49% dan juga untuk 0,5 liter/menit ialah 36%. Maka kenaikan efisiensi dengan menggunakan PCM Storage sebagai TES (Thermal Energy Storage) rata-rata yaitu 7% disetiap debitnya (Juan octapiano,2017).

Selanjutnya dilakukan penelitian dengan dimensi yang sama yaitu dimensi luas kolektor (A_c) $1,63 \text{ m}^2$ dengan menggunakan sistem termosipon diperoleh performa kolektor pemanas air plat V dengan PCM storage dibandingkan dengan kolektor pemanas air yang ada dipasaran dengan plat

datar tanpa PCM storage diperoleh rata-rata efisiensi untuk pelat absorber V dengan PCM Storage selama 3 hari sebesar 58%. Jika dibandingkan dengan rata-rata efisiensi pelat datar tanpa PCM Storage yang hanya memiliki efisiensi 52,7 %. Maka kenaikan efisiensi dengan menggunakan PCM Storage rata-rata yaitu 5,7 %.(Kamil Adnan,2019).

Perbedaan performa kolektor pemanas air plat V dengan PCM storage setelah dibandingkan dengan kolektor pemanas air dengan plat datar tanpa PCM storage dengan dimensi luas kolektor (A_c) 0.3864 m^2 diperoleh efisiensi termal rata-rata untuk kolektor pelat absorber V dengan PCM Storage selama 3 hari sebesar 56,54%, sementara untuk pelat datar tanpa PCM Storage sebesar 52,63 %. Sehingga diperoleh kenaikan efisiensi termal dengan menggunakan PCM Storage sebagai TES (Thermal Energy Storage) sebesar 3,92 %.(lukman,2020)

Agar terjadi perpindahan panas yang baik dari absorber ke pipa-pipa pemanas, bahan dasar absorber harus mempunyai konduktivitas termal yang baik. Beberapa bahan dasar yang dapat dipakai sebagai absorber diberikan seperti tabel 2.1.

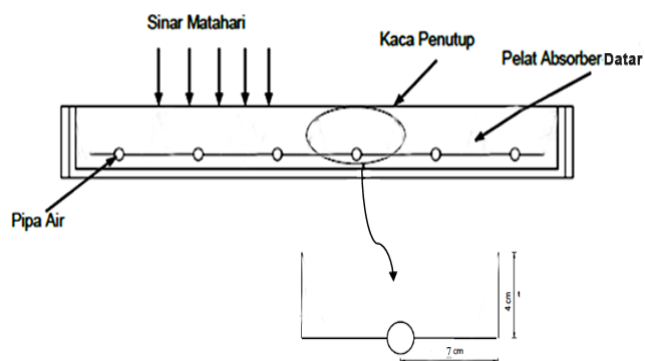
Tabel 2. 1 Konduktivitas termal beberapa bahan kolektor matahari tertentu
(Sumber : Jansen, T.J, 1995)

Bahan	Konduktivitas termal (k), W/(m.K)
Tembaga	385.0
Alumunium	211.0
Timah putih	66.0
Baja, 1% karbon	45.0
Baja tahan karat	16.0

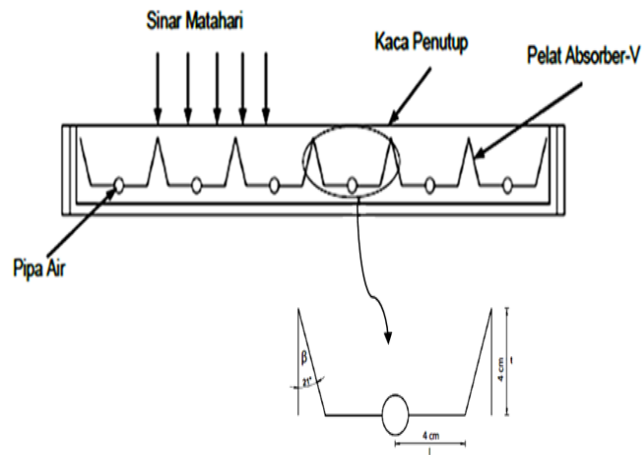
Lembaran kaca transparan dipakai sebagai penutup permukaan kolektor, berfungsi bukan sekedar sebagai alat pelindung kolektor dari perusakan oleh faktor luar (misalnya hujan), tetapi juga karena sifatnya sebagai penjebak panas atau gelombang inframerah. Seperti diketahui bahwa kaca memiliki sifat transparan terhadap gelombang ultraviolet dan cahaya tampak (kedua jenis gelombang cahaya ini mendominasi radiasi

surya), tetapi tidak transparan terhadap gelombang sinar inframerah sebagaimana yang terjadi pada efek rumah kaca, sehingga rugi-rugi panas akibat radiasi dari permukaan *absorber* keluar kolektor dapat dapat diminimumkan. Meskipun demikian masih terdapat rugi-rugi panas ke permukaan karena konveksi udara yang bergerak di dalam ruang antara *absorber* dan kaca. Rugi-rugi panas konveksi ini pada kenyataannya justru mengambil porsi yang terbesar sekitar 70%-80% dari total rugi-rugi panas ke permukaan, menyebabkan efisiensi termal kolektor rendah sekitar 20%-40% [7].

Cairan penerima panas dari absorber mengalir di dalam susunan pipa-pemanas sejajar, *header* atas dan *header* bawah yang umumnya dibuat dari tembaga. Pipa pemanas, *header* dan *absorber* dirancang sedemikian rupa sehingga merupakan satu kesatuan, adapun metoda penyatuan yang sederhana adalah dengan cara *brasing* atau cara klem dengan *rivet*. Untuk memperkecil rugi-rugi panas ke samping dan ke bawah kolektor, dipilih bahan isolator panas seperti *styrofoam*, *polyurethane*, *glass wool*, dan lain-lain. Pelat absorber berbentuk datar dan Pelat *absorber* berbentuk-V dapat dilihat pada gambar 2.2 dan 2.3



Gambar 2.2 Pelat absorber bentuk datar



Gambar 2.3 Pelat absorber bentuk-V

2.2 Perpindahan panas

Perpindahan panas adalah proses perpindahan energi kalor dari suatu medium ke medium lain baik melalui perantara ataupun tidak karena adanya perbedaan temperatur antara kedua benda tersebut.

Hal yang paling mendasar dalam terjadinya perpindahan panas ialah perbedaan temperatur, tidak akan ada perpindahan panas antara dua atau lebih medium yang memiliki temperatur yang sama, sehingga adanya perbedaan temperatur adalah syarat awal terjadinya perpindahan panas. Analisis termodinamika berkaitan dengan banyaknya perpindahan panas pada suatu sistem, yang selalu terjadi dari temperatur tinggi ke temperatur rendah hingga mencapai titik seimbang (tidak ada perbedaan temperatur).

Perpindahan panas sangat banyak ditemui dalam *Engineering system* ataupun kehidupan sehari-hari. Contohnya saja tubuh manusia yang secara terus menerus memancarkan panas untuk menjaga keseimbangan suhunya.

Dalam pengaplikasiannya perpindahan panas dibedakan menjadi 3 jenis yaitu, konduksi, konveksi dan radiasi.

a) Konduksi

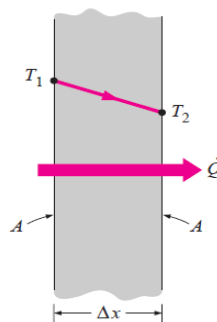
Konduksi seperti pada gambar 2.4 adalah perpindahan energi antara dua buah partikel yang saling berdekatan, dimana energi berpindah dari

partikel yang memiliki energi yang lebih tinggi ke partikel yang memiliki energi lebih rendah, konduksi dapat terjadi pada benda padat, cair ataupun gas. Dimana pada benda cair dan gas konduksi terjadi akibat tumbukan atau difusi antara partikel-partikel yang ada pada zat cair ataupun gas tersebut.

Pada benda padat konduksi terjadi akibat dari getaran molekul dan *transfer* energi antara elektron bebas. Adapun hal yang mempengaruhi besarnya perpindahan panas konduksi ialah bentuk benda, ketebalan, bahan dan juga perbedaan temperatur. Banyaknya energi yang dipindahkan dari konduksi dapat dituliskan dengan persamaan [8]:

$$Q = k \times A \frac{\Delta T}{\Delta x} \dots \dots \dots (1)$$

- Dimana:
- Q : Banyaknya energi yang dipindahkan (joule)
 - k : Konduktivitas benda (W/m.°C)
 - ΔT : perbedaan temperatur
 - Δx : Ketebalan benda (m)



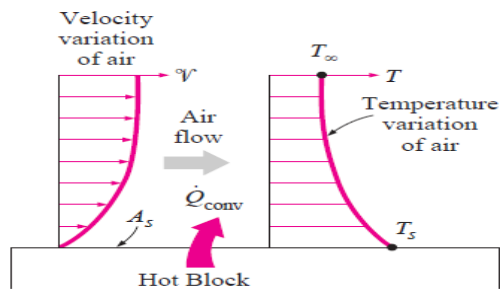
Gambar 2. 4 Konduksi pada dinding dengan tebal Δx dan luas A
(Sumber: Cengel, 2003)

b) Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas antara permukaan benda padat dengan benda cair ataupun gas yang sedang bergerak, dan merupakan hasil dari perngabungan konveksi dan pergerakan fluida. Semakin besar pergerakan fluida maka akan semakin banyak panas yang dikonveksikan, namun jika fluida sama sekali tidak bergerak maka yang terjadi ialah konduksi, adanya pergerakan fluida yang besar akan menyebabkan panas

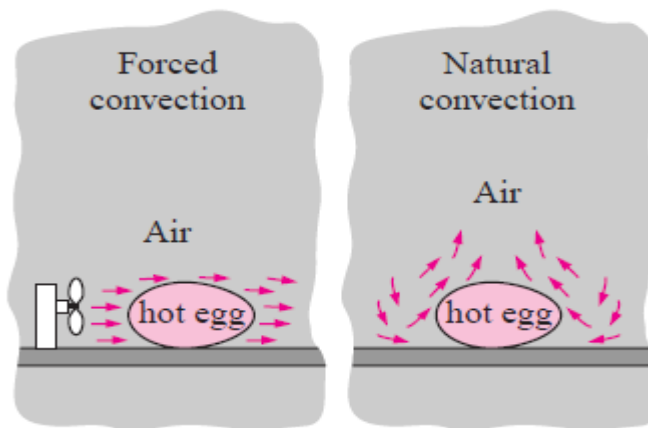
yang dikonveksikan besar pula namun akan sulit untuk menghitung besaran panas yang dikonveksikan tersebut.

Berdasarkan pendinginan balok panas oleh kipas seperti gambar 2.5, pada awalnya energi akan dikonduksikan ke lapisan udara kemudian energi ini dibawa menjauhi permukaan oleh konveksi. Sehingga karena penggabungan antara konduksi dan konveksi karena pergerakan molekul udara, sehingga molekul udara panas digantikan oleh molekul udara yang lebih dingin kemudian dibawa menjauhi permukaan balok panas tersebut [8].



Gambar 2. 5 Konveksi antara balok panas dan udara
(Sumber: Cengel, 2003)

Adapun konveksi dikatakan konveksi paksa apabila fluida di paksa bergerak (memiliki kecepatan) misalnya dengan kipas, blower ataupun kecepatan udara, dan konveksi dikatakan konveksi bebas apabila pergerakan udara diakibatkan perbedaan gaya apung yang terjadi karena perbedaan kerapatan fluida yang diakibatkan oleh variasi temperature. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6



Gambar 2. 6 Konveksi paksa dan konveksi bebas
(Sumber: Cengel, 2003)

Adapun persamaan untuk menghitung besarnya panas yang terjadi akibat konveksi ialah [8]:

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \dots\dots\dots (2)$$

- Dimana:
- Q : Besarnya kalor yang dikonveksikan (joule)
 - h : koefisien konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
 - A : luas permukaan terjadinya konveksi (m^2)
 - T_s : temperature permukaan benda padat ($^\circ C$)

T_∞ : temperature fluida yang cukup jauh ($^\circ C$)

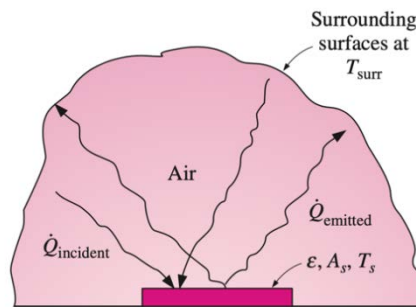
c) Radiasi

Radiasi adalah energi yang dipancarkan oleh material dalam bentuk gelombang elektromagnetik (atau cahaya) yang merupakan perubahan konfigurasi atom atau molekul. Tidak seperti konduksi dan konveksi, perpindahan energi melalui radiasi tidak memerlukan medium perantara untuk berpindah, pada faktanya energi radiasi bergerak lebih cepat dibandingkan konduksi dan konveksi (secepat cahaya) dan tetap dapat bergerak dalam hampa udara, dengan inilah panas dari matahari dapat mencapai bumi. Dalam studi perpindahan panas mengenai radiasi, dibahas bahwa radiasi dipancarkan karena adanya perbedaan suhu. Namun ini berbeda dengan gelombang elektromagnetik lainnya seperti sinar-X, sinar gamma, gelombang mikro, yang tidak memiliki thermal radiasi

Radiasi seperti pada gambar 2.7 adalah fenomena *volumetric* yang dimana semua benda baik padat cair maupun gas memancarkan dan menyerap radiasi, dan biasanya radiasi dihubungkan dengan benda padat yang buram, misalnya metal, kayu ataupun batu, adapun besarnya radiasi yang dapat diserap oleh suatu benda dapat dituliskan dalam persamaan [8]:

$$Q = \varepsilon \sigma A T_s^4 \dots\dots\dots (3)$$

- Dimana
- Q : Kalor radiasi yang diserap (joule)
 - ε : Emisivitas benda
 - σ : $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
 - T_s : Temperatur permukaan benda (K)



Gambar 2. 7 Perpindahan panas radiasi antara dua permukaan
(Sumber: (Cengel, 2003))

2.3 Phase Change Material (PCM)

Phase Change Material (PCM) Penyimpanan energi bisa dilakukan dalam bentuk panas sensibel, panas laten, atau hasil energi kimia yang dapat balik (reversibel). Energi yang disimpan tersebut tidak hanya digunakan untuk memanaskan suatu fluida, tetapi juga mampu untuk mendinginkan atau mempertahankan temperatur suatu fluida agar tetap konstan. Penyimpanan energi kimia belum digunakan secara praktis. Hal ini disebabkan biaya dan penggunaannya memerlukan perhatian khusus. Saat ini, penelitian tentang material penyimpan panas dipusatkan pada panas sensibel dan panas laten [9].

2.3.1 Panas Laten

Suatu bahan biasanya mengalami perubahan temperatur bila terjadi perpindahan panas antara benda dengan lingkungannya. Pada

suatu situasi tertentu, aliran panas ini tidak merubah temperaturnya. Hal ini terjadi bila bahan mengalami perubahan fasa. Misalnya padat menjadi cair (mencair), cair menjadi uap (mendidih) dan perubahan struktur kristal (zat padat). Energi yang diperlukan disebut panas transformasi. Energi yang diperlukan disebut kalor transformasi. Kalor yang diperlukan untuk merubah fasa dari materi bermassa m adalah [9]:

$$Q = mLe \dots\dots\dots(4)$$

- Dimana: Q : Kalor laten zat (J)
 Le : Kapasitas kalor spesifik laten (J/kg)
 M : Massa zat (kg)

2.3.2 Panas Sensibel

Tingkat panas atau intensitas panas dapat diukur ketika panas tersebut merubah temperatur dari suatu benda. Perubahan intensitas panas dapat diukur dengan termometer. Ketika perubahan temperatur didapatkan, maka dapat diketahui bahwa intensitas panas telah berubah dan disebut sebagai panas sensibel. Dengan kata lain, panas sensibel adalah panas yang diberikan atau yang dilepaskan oleh suatu jenis fluida sehingga temperaturnya naik atau turun tanpa menyebabkan perubahan fasa fluida tersebut. Material yang digunakan sebagai PCM harus memiliki panas laten yang besar dan konduktifitas termal yang tinggi. PCM tersebut juga harus memiliki temperatur titik cair yang bekerja pada rentang temperatur yang diizinkan, reaksi kimia yang stabil, biaya rendah, tidak beracun, dan tidak menyebabkan korosi. PCM diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu organik dan non organik. PCM organik merupakan PCM dari golongan hidrokarbon, asam/ester atau garam, alkohol, freon, dan polimer. Keuntungan penggunaan PCM organik adalah sifat fisik dan kimia yang stabil dan perilaku termal material yang baik. Kerugian penggunaan PCM ini adalah konduktifitas termal rendah,

massa jenis rendah, titik lebur rendah, kelembapan tinggi, mudah terbakar, dan perubahan volume. PCM non organik merupakan campuran unsur metal pembentuk garam. Keuntungan penggunaan PCM non organik adalah penyimpanan energi yang tinggi, konduktifitas termal tinggi, dan tidak mudah terbakar. Kerugian penggunaan PCM ini adalah mudah menyebabkan pengkaratan, pemisahan unsur ketika terjadi perubahan fasa, dan penurunan suhu yang drastic [9].

$$Q = mC\Delta T \dots\dots\dots(5)$$

- Dimana, Q : Kalor laten zat (J)
- C : Kapasitas kalor spesifik Sensibel (J/kg)
- m : Massa zat (kg)
- ΔT : Perbedaan suhu

Untuk mengetahui jenis material yang baik sebagai PCM dapat dilihat pada tabel tabel 2.2

Tabel 2. 2 Jenis-jenis PCM
(Sumber: Munahar.2015)

Jenis PCM	Titik leleh (°C)	Panas peleburan laten (kJ/kg)
Parafin	47,5	232
Azobenzene	67,1	121
Acetic acid	16,7	184
K ₂ HPO ₄ 6H ₂ O	14	109
Galium	30	80,3
CaCl ₂ +MgCl ₂ +6H ₂ O	14,4	140

2.4 Parafin Wax

Lilin Parafin, merupakan hidrokarbon jenuh dengan rantai terbuka dan merupakan senyawa alkana. Lilin parafin adalah campuran senyawa hidrokarbon alkana yang mengandung 21- 50 atom karbon. Ketika

pemisahan residu minyak bumi, jumlah atom karbon pada lilin parafin berkisar 40-50 atom. Komposisi dari setiap anggota senyawa alkana tersebut menyesuaikan dengan rumus C_nH_{2n+2} , yang mana n adalah jumlah atom karbon dalam molekul. Lilin parafin adalah suatu campuran dari hidrokarbon yang dipenuhi massa molekular yang tinggi, diproduksi selama penyulingan dari minyak/petroleum. Lilin parafin, terbaru dari petroleum, memiliki nilai yang paling komersial. Adapun sifat fisiknya pada tabel 2.3[7]:

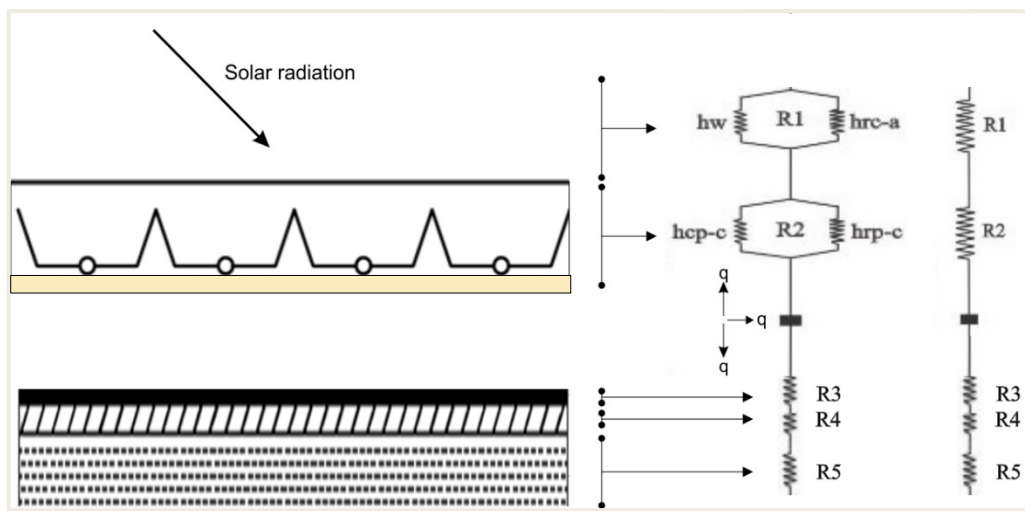
Tabel 2. 3 Sifat fisik lilin

(Sumber: Munahar.2015)

Sifat fisik	Nilai
Melting	40°C - 53°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)	0224W/m.K
ρ (density)	830 kg/m ³

2.5 Tahapan perhitungan mencari efisiensi kolektor tenaga surya

Adapun tahapan perhitungan efisiensi kolektor dapat dihitung dengan mencari koefisien perpindahan panas konveksi, konduksi, dan radiasi. Adapun skema perpindahan panas pada kolektor dapat di lihat pada gambar 2.8



Gambar 2. 8 Jala-jala thermal

Pada gambar di atas dapat dilihat perpindahan panas konveksi, konduksi, dan radiasi yang di simbolkan R setiap lapisan perpindahannya. Radiasi matahari masuk ke dalam plat absorber dan dapat diperoleh kalor yang berguna untuk memanaskan air setelah di kurangi dengan kalor yang hilang. Berikut ini analisa perhitungan perpindahan panas yang terjadi pada kolektor.

2.5.1 Analisis perpindahan panas.

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

Koefisien perpindahan panas konveksi oleh kaca penutup transparan terhadap udara luar, didasarkan pada hembusan angin di atas penutup transparan [1]:

Bilangan Reynold,

$$Re = V \frac{L}{\nu} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana: V : kecepatan angin, m/s
 ν : viskositas kinematik, m²/s
 L : Panjang karakteristik penutup, m

Bilangan Nusselt, Nu

$$Nu = 0,94 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \dots\dots\dots(7)$$

$$h_w = \frac{Nu_L \cdot k}{L} \dots\dots\dots(8)$$

Dimana: k : konduktivitas benda, W/m.K

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

Koefisien perpindahan panas radiasi antara kaca penutup terhadap udara luar [9] dapat dihitung berdasarkan:

$$h_{r_{c-a}} = \epsilon_c \frac{\sigma(T_c^4 + T_s^4)}{(T_c - T_s)} \dots\dots\dots(9)$$

Dimana: ε_c : emisivitas penutup
 σ : konstanta Stefan-Boltzman (5,6697x10⁻⁸, W/m²K⁴)
 T_c : temperatur penutup, K

T_a : temperatur udara luar, K

T_s adalah *sky temperature* yang berkaitan dengan temperatur udara luar [10], sehingga dapat dihitung berdasarkan:

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \dots\dots\dots(10)$$

C. Koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat *absorber* dengan penutup.

Koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat *absorber* dengan penutup (h_1) didekati dengan persamaan [1]:

Bilangan Nusselt, N_u

$$N_u = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1,8\beta)^{1,6}}{R_a \cos \beta} \right]^+ \left[1 - \frac{1708}{R_a \cos \beta} \right]^+ \left[\left(\frac{R_a \cos \beta}{5830} \right)^{1/2} - 1 \right]^+ \dots\dots\dots(11)$$

Dimana: β : sudut kemiringan kolektor

Rayleigh Number, R_a :

$$R_a = \frac{g \cdot \beta' \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \dots\dots\dots(12)$$

Dimana: ΔT : beda temperatur antara pelat dengan cover, K

L : jarak pelat dengan Penutup, m

A : *thermal diffusivity*, m^2/s

Sehingga diperoleh:

$$h_{c_{p-c}} = \frac{N_u \cdot k}{L} \dots\dots\dots(13)$$

Dimana: L : Panjang karakteristik penutup, m

D. Koefisien perpindahan panas radiasi pelat-penutup

Koefisien perpindahan panas radiasi pelat-penutup [1], yaitu:

$$h_{r_{p-c}} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1-\epsilon_p}{\epsilon_p} + \frac{1}{F_{1-2} \cdot A_p} + \frac{1-\epsilon_c}{\epsilon_c \cdot A_c}} \dots\dots\dots(14)$$

Dimana: ϵ_c : *emisivitas cover*

ϵ_p : *emisivitas pelat*

A_p : Luas Absorber (m^2)

A_c : Luas penutup (m^2)

E. Koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat *absorber* dengan fluida kerja.

Koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat *absorber* dengan fluida kerja yang melibatkan aliran dalam (*internal flow*) dengan asumsi *heat fluks* konstan [10], yaitu:

Untuk aliran laminer maka:

$$h_{c_{f-p}} = \frac{N_u k_f}{D_h} \dots\dots\dots (15)$$

Dimana: N_u : bilangan nusselt

D_h : diameter hidrolisis, m

D_h adalah diameter hidrolisis dari pipa [10], yaitu:

$$D_h = \frac{4.A}{P} \dots\dots\dots (16)$$

Dimana: A : Luas penampang, m^2

P : Keliling pipa, m

2.5.2 Koefisien perpindahan panas total kolektor.

Koefisien perpindahan panas kolektor yang akan dihitung yaitu [1]:

A. Koefisien perpindahan panas bagian atas kolektor atas (U_t).

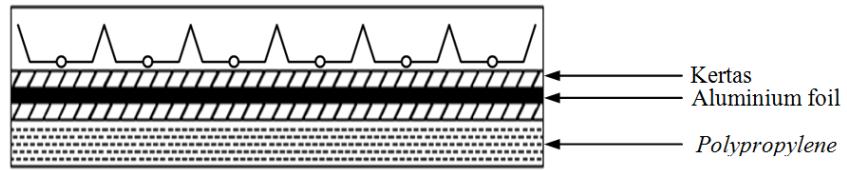
Dari rangkaian termal,

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r_{c-a}}} \dots\dots\dots (17)$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{c_{p-c}} + h_{r_{p-c}}} \dots\dots\dots (18)$$

$$U_t = \frac{1}{(R_1 + R_2)} \dots\dots\dots (19)$$

B. Koefisien perpindahan panas bagian bawah kolektor ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2. 9 Lapisan Bawah Kolektor
1

$$U_b = \frac{1}{\left[\frac{L_k}{k_k} + \frac{L_a}{L_a} + \frac{L_p}{k_p} + \frac{L_{pp}}{k_{pp}} + \frac{1}{h_f} \right]} \dots\dots\dots(20)$$

- Dimana:
- L_p : ketebalan kertas, m
 - L_a : ketebalan aluminium foil, m
 - L_{pp} : ketebalan polypropylene, m
 - k_p : konduktivitas kertas, W/mK
 - k_a : konduktivitas aluminium foil, W/mK
 - k_{pp} : konduktivitas polypropylene, W/mK
 - h_f : koefisien konveksi pelat ke air, W/m²K

Koefisien perpindahan panas total kolektor.

$$U_L = U_t + U_b \dots\dots\dots(21)$$

2.5.3 Efisiensi kolektor (Teoritis)

Efisiensi kolektor dipengaruhi oleh radiasi matahari yang diserap:

A. Faktor efisiensi kolektor (F'):

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \dots\dots\dots(22)$$

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \dots\dots\dots(23)$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L[D + (W - D)F]} + \frac{1}{\pi D_i h_{p-f}} \right]} \dots\dots\dots(24)$$

- Dimana:
- W : jarak antara pipa, m
 - D : diameter luar pipa, m

D_i : diameter dalam, m

k : konduktivitas termal *absorber*, W/m.K

δ : tebal *absorber*, m

B. *Collector flow factor* (F'') [1]:

$$F'' = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \frac{\frac{S}{U_L} - (T_{f,o} - T_a)}{\frac{S}{U_L} - (T_{f,i} - T_a)} \right] \dots\dots\dots(25)$$

Dimana: \dot{m} : laju aliran massa, kg/s

S : Radiasi surya yang diserap oleh *absorber*, W/m²

A_c : luasan absorber, m²

$T_{f,o}$: temperatur fluida keluar, K

$T_{f,i}$: temperatur fluida masuk, K

C. Faktor pelepasan panas (FR) [1]:

$$F_R = F' \cdot F'' \dots\dots\dots(26)$$

Sehingga diperoleh panas yang berguna (q_u):

$$q_u = A_c \cdot F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \dots\dots\dots(27)$$

Dan diperoleh efisiensi kolektor (η):

$$\eta = \frac{q_u}{A_c I_T} \dots\dots\dots(28)$$

I_T = intensitas matahari total, W/m²