# UNJUK KERJA KOLEKTOR SURYA PELAT DATAR ALIRAN SERPENTINE BERDASARKAN JARAK PIPA DAN JENIS ELBOW

(TESIS)

Oleh

**ISMAIL** 



PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITSA LAMPUNG BANDAR LAMPUNG 2017

# UNJUK KERJA KOLEKTOR SURYA PELAT DATAR ALIRAN SERPENTINE BERDASARKAN JARAK PIPA DAN JENIS ELBOW

Oleh

**ISMAIL** 

**Tesis** 

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar MAGISTER TEKNIK

**Pada** 

Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung



PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITSA LAMPUNG BANDAR LAMPUNG 2017

#### **ABSTRAK**

# UNJUK KERJA KOLEKTOR SURYA PELAT DATAR ALIRAN SERPENTINE BERDASARKAN JARAK PIPA DAN JENIS ELBOW

# Oleh

#### **ISMAIL**

Energi surya merupakan energi alternatif yang baru dan terbarukan. Kolektor surya pelat datar merupakan alat yang digunakan untuk memanfaatkan energi surya dengan cara menyerap radiasi matahari yang masuk lalu mengubahnya menjadi panas dan memindahkan panas tersebut ke fluida yang mengalir.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui unjuk kerja kolektor surya pelat datar tipe aliran serpentin baik secara termal maupun *pressure drop* yang terjadi berdasarkan jarak antara pipa (W), jenis sambungan (*short elbow* 90<sup>0</sup> dan *U-bend* 180<sup>0</sup>), dan arah rangkaian pipa riser (vertikal dan horizontal). Pengujian dilakukan pada kondisi steady sesuai standar EN 12975 menggunakan *solar simulator*. Pada penelitian ini telah dilakukan pengujian terhadap empat jenis rangkaian kolektor surya tipe serpentin (sambungan *short elbow* 90<sup>0</sup> dengan jarak pipa 80 mm / vertikal, sambungan *short elbow* 90<sup>0</sup> dengan jarak pipa 80 mm / horizontal, sambungan *U-bend* 180<sup>0</sup> dengan jarak pipa 40 mm / vertikal).

Hasil penelitian diperoleh kolektor surya dengan sambungan *short elbow* 90<sup>0</sup> jarak pipa 80 mm aliran vertikal memiliki unjuk kerja terbaik dari sisi koefisien kerugian panas dan pressure drop, pada laju aliran standar 0,009 Kg/s nilai koefisien rugi-rugi panas sebesar 2,0168 W/(m<sup>2</sup> K) dan nilai pressure drop 803 N/m<sup>2</sup>. Kolektor surya dengan sambungan *short elbow* 90<sup>0</sup> jarak pipa 40 mm aliran vertikal memiliki unjuk kerja thermal terbaik dari sisi effisiensi perpindahan panas, dimana nilai effisiensi zero 51,17%

Kata Kunci: energi surya, kolektor surya pelat datar, serpentine, EN 12975

#### **ABSTRACT**

# EXPERIMENTAL TESTING OF A SERPENTINE FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR BASED ON TUBE SPACING AND ELBOW TYPES

 $\mathbf{B}\mathbf{v}$ 

#### **ISMAIL**

Solar energy is a renewable energy which is produced from an infinite energy source. Meanwhile flat plate collectors are the most common solar collector for solar water heating systems.

The objective of this research is to know the performance of flat plate solar collectors in terms of heat transfer and pressure drop according to EN 12975. The experiment was carried out at a constant mass flow rate of 0.009 Kg/s under steady condition using a solar simulator based on direction of riser pipes (vertical and horizontal), tube spacing (W) and connection type (*short elbow* 90 $^{0}$  dan *U-bend* 180 $^{0}$ ). This study has focused on four types of solar collectors (short elbow 90 $^{0}$  with tube spacing 80 mm / vertical , short elbow 90 $^{0}$  with tube spacing 80 mm / horizontal, return elbow / U-bend 180 $^{0}$  with tube spacing 40 mm / vertical, and short elbow 90 $^{0}$  with tube spacing 40 mm / vertical).

Test result showed that the solar collector using short elbow  $90^{0}$  with tube spacing 80~mm / vertical has the best values of  $2.0168~\text{W/(m}^2~\text{K)}$  for heat loss coefficient and  $803~\text{N/m}^2$  for pressure drop respectively. In terms of the thermal efficiency, the solar collector using short elbow  $90^{0}$  with tube spacing 40~mm / vertical has the best value of 51.17%.

Keywords: solar energy, flat plate solar collector, serpentine, EN 12975

JudulTesis

:UNJUK KERJA KOLEKTOR SURYA PELAT DATAR ALIRAN SERPENTINE BERDASARKAN

JARAK PIPADAN JENIS ELBOW

NamaMahasiswa

: ISMAIL

NomorPokokMahasiswa

: 1425021006

Program Studi

: Magister TeknikMesin

Fakultas

: Teknik

Menyetujui

1. KomisiPembimbing

Dr Amrizal, S.T., M.T. NIP. 19700202 199803 1 004

Dr.Amrul, S.T., M.T. NIP. 197103311999031003

2. Ketua Program PascaSarjana

Dr. Amrizal, S.T., M.P. NIP. 19300202 199803 1 004

# MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Pembimbing I : Dr. Amrizal, S.T., M.T.

Pembimbing II: Dr. Amrul, S.T., M.T.

Penguji

(Bukan Pembimbing): Dr. Elida Purba, S.T., M.Sc.

Dekan Fakultas Teknik

ASTEProf. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.

NIP. 19620717 198703 1 002 4

Rur Program Pasca Sarjana

smas Lampung

Prof. Dr. Sudjarwo, M.S.

NIP. 19530528 198103 1 002

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 15 Mei 2017



# KEMENTRIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI RI UNIVERSITAS LAMPUNG FAKULTAS TEKNIK

# PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN

Jalan prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No.1, Gedong Meneng - Bandar Lampung 35145

# SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

- Tesis dengan judul "Unjuk Kerja Kolektor Surya Pelat Datar Aliran Serpentine Berdasarkan Jarak Pipa Dan Jenis Elbow" adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan atas karya penulis lain dengan cara yang tidak sesuai dengan etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut plagiatisme.
- Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan kepada saya; saya bersedia dan sanggup dituntut sesuai dengan hukum yang berlaku.

TERAL

Bandar Lampung, 15 Mei 2017

486 A

g Membuat

Ismail, S.T NPM. 1425021006

#### **RIWAYAT HIDUP**



Penulis dilahirkan di Tanjung Balai Kabupaten Asahan Provinsi Sumatera Utara pada tanggal 09 Desember 1979 sebagai anak kempat dari empat bersaudara, dari Bapak M. Yusuf MS dan Ibu Halimah.

Pendidikan sekolah dasar di SD N1 Tanjung Gading diselesaikan pada tahun 1992, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di Madrasah Tsanawiyah Nurul Hakin Tembung-Deli Serdang selesai pada tahun 1995, Sekolah Menengah Atas di Madrasah Aliah Nurul Hakim Tembung- Deli Serdang selesai tahun 1998 serta Pendidikan S-1 di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin di Universitas Lampung selesai di tahun 2004. Tahun 2014, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Pasca Sarjana Universitas Lampung pada Program Magister Teknik Jurusan Magister Teknik Mesin. Penulis memiliki pengalaman pekerjaan di PT. Nestle Indonesia – Panjang Factory pada tahun 2005 sampai dengan 2009, dan saat ini Penulis bekerja sebagai Kayawan di PT. Perkebunan Nusantara VII.

# Motto

"Barang siapa yang bersungguh-sungguh pasti mendapat"

Barang siapa yang bertaqwa kepada Allah,
niscaya Dia akan mengadakan baginya jalan keluar,
dan memberinya rezeki dari arah yang tiada disangkasangka. Dan barang siapa yang bertawakkal kepada Allah,
niscaya Allah akan mencukupkan (keperluan)nya.
Sessungguhnya Allah melaksanakan urusan (yang
dikehendaki)-Nya. Sesungguhnya Allah telah mengadakan
ketentuan bagi tiap-tiap sesuatu.

(At-Tholag:2-3)

# PERSEMBAHAN

Dengan puji syukur kehadirat Allah SWT, Penulis persembahkan karya ini untuk:

- Orang tuaku Alm. H. M. Yusuf MS dan Hj. Halimah serta Alm. H. Ali Umar Pulungan dan Hj. Siti Aisiyah.
- ➤ Istri ku, tercinta Nurmardhiyan Pulungan, S.E., terima kasih selalu mengisi harihariku dengan penuh motivasi.
- Anak-anakku, Fatih Arizki Nurismail, Fathia Humaira Nurismail, dan Furqon
   Hanif Nurismail, kalian salah satu alasan ku melanjutkan pendidikan magister ini.

#### KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, atas segala karunia dan ridho-NYA, sehingga tesis dengan judul "Unjuk Kerja Kolektor Surya Pelat Datar Aliran Serpentine Berdasarkan Jarak Pipa Dan Jenis *Elbow*" ini dapat diselesaikan. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang keahlian Teknik Mesin Universitas Lampung.

Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya, kepada :

- 1. Dr. Amrizal, S.T., M.T., selaku Ketua Program Magister Teknik Mesin sekaligus dosen pembimbing utama atas arahan dan waktu yang telah diluangkan kepada penulis untuk berdiskusi dalam proses penyelesaian Tesis ini.
- 2. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Dosen pembimbing kedua atas bimbingan dan arahan dalam proses penyelesaian Tesis ini.
- 3. Dr. Elida Purba, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan masukan demi penyempurnaan tesis ini selama proses pengujian.
- 4. Orang tuaku Alm. H. M. Yusuf MS dan Hj. Halimah serta Alm. H. Ali Umar Pulungan dan Hj. Siti Aisiyah yang telah mendidik, membesarkan, mendewasakanku dalam bersikap.

5. Istri ku, tercinta Nurmardhiyan Pulungan, S.E., serta anak-ankaku Fatih Arizki

Nurismail, Fathia Humaira Nurismail, dan Furqon Hanif Nurismail, terima kasih

selalu mengisi hari-hariku dengan penuh keceriaan dan kebahagiaan.

6. Kawan-kawan seperjuangan Angkatan I Magister Teknik Mesin Universitas

Lampung (Asep, Udin, Beni, Haryanto dan Zulfa), terimaskasih atas segala

bantuan dan kekompakannya.

Akhir kata, penulis menyadari akan kekurangan dan kelemahan dalam penyajian

Tesis ini, oleh karena itu Penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak

yang sifat membangun dan sangat demi perbaikan di masa yang akan datang. Penulis

berharap semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 03 Juni 2017

Penulis

Ismail, S.T

# **DAFTAR ISI**

			Halaman
HA	LA]	MAN JUDUL	i
AF	BSTF	RAK	ii
LE	MB	AR PENGESAHAN	v
SU	RA	Γ PERNYATAAN	vi
DA	<b>\FT</b> A	AR RIWAYAT HIDUP	vii
M	OTT	O	viii
PE	RSE	MBAHAN	ix
KA	ΛTA	PENGANTAR	X
DA	<b>S</b> FT <i>A</i>	AR ISI	xii
DA	<b>S</b> FT <i>A</i>	AR TABEL	XV
DA	<b>AFT</b>	AR GAMBAR	xix
I.	PE	NDAHULUAN	
	1.1	Latar Belakang Masalah	1
	1.2	Tujuan Penelitian	2
	1.3	Manfaat Penelitian	3
	1.4	Batasan Masalah	3
II.	TIN	NJAUAN PUSTAKA	
	2.1	State of the Art Kolektor Surya	5
	2.2	Dasar Teori Kolektor Surya	9
		2.2.1 Kolektor Surya Plat Datar	11
		2.2.2 Stationary compound parabolic collector (CPC)	14
		2.2.3 Evacuated Tube Collectors	14
	2.3	Perpindahan Panas	15
		2.3.1 Pernindahan Panas Konduksi	15

	2.3.2 Perpindahan Panas Konveksi	16
	2.3.3 Perpindahan Panas Radiasi	17
	2.4 Persamaan Dasar Keseimbangan Energi flat plate collector	19
	2.5 Koefisien Efektif Transmittance-Absorptance $(\tau \alpha)_{\dot{e}}$	24
	2.6 Koefisien Kerugian Panas Menyeluruh	25
	2.7 Elbow	28
	2.8 Pressure Drop dan Head Loss	30
	2.8.1 Piezometer Tube	33
	2.8.2 U-Tube Manometer	34
	2.8.3 Inclined-Tube Manometer	35
	2.9 Pengujian Efisiensi Pada Kondisi Steady State	36
	2.10 Prosedur Pengujian time constant	37
	2.11 Multiple linier Regression	38
	2.12 Komputasi Dinamika Fluida	39
III.	METODOLOGI PENELITIAN	
	3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	40
	3.2 Alat Dan Bahan	40
	3.2 Alat Dan Bahan	40 46
	3.3 Prosedur Penelitian	46
	3.3 Prosedur Penelitian	46 47
	3.3 Prosedur Penelitian	46 47 50
	3.3.1 <i>Design</i> Solar Kolektor  3.3.2 Pembuatan Solar Kolektor  3.3.3 Tahap Pengujian	46 47 50
	3.3.1 <i>Design</i> Solar Kolektor  3.3.2 Pembuatan Solar Kolektor  3.3.3 Tahap Pengujian  3.3.3.1 Pengujian Efisiensi Pada Kondisi <i>Steady-State</i>	46 47 50 51
	3.3 Prosedur Penelitian  3.3.1 Design Solar Kolektor  3.3.2 Pembuatan Solar Kolektor  3.3.3 Tahap Pengujian  3.3.3.1 Pengujian Efisiensi Pada Kondisi Steady-State  Menggunakan Solar Simulator	46 47 50 51
IV.	3.3.1 Design Solar Kolektor  3.3.2 Pembuatan Solar Kolektor  3.3.3 Tahap Pengujian  3.3.3.1 Pengujian Efisiensi Pada Kondisi Steady-State  Menggunakan Solar Simulator  3.3.3.2 Simulasi Multiple Linear Regression	46 47 50 51 52 53
IV.	3.3.1 Design Solar Kolektor  3.3.2 Pembuatan Solar Kolektor  3.3.3 Tahap Pengujian  3.3.3.1 Pengujian Efisiensi Pada Kondisi Steady-State  Menggunakan Solar Simulator  3.3.3.2 Simulasi Multiple Linear Regression  3.3.3.3 Simulasi Komputasi Dinamika Fluida	46 47 50 51 52 53

4.1.2 Data Pengujian <i>Pressure drop</i>	66
4.2 Pembahasan	73
4.3 Uji Hipotesis	80
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	82
5.2 Saran	83
DAFTAR PUSTAKA	

# **DAFTAR TABEL**

	Hala	man
1.	Ukuran pipa yang lazim digunakan	26
2.	Selisih parameter yang diizinkan saat pengujian	35
3.	Hasil perhitungan pengujian kolektor surya I	59
4.	Hasil perhitungan multiple linier regression kolektor surya I	60
5.	Hasil perhitungan multiple linier regression kolektor surya II	61
6.	Hasil perhitungan multiple linier regression kolektor surya III	61
7.	Hasil perhitungan multiple linier regression kolektor surya IV	62
8.	Hasil perhitungan multiple linier regression kolektor surya III	
	dengan laju aliran 0,009167 Kg/s tanpa kaca penutup	63
9.	Hasil nilai perhitungan menggunakan multiple linier regression	
	kolektor surya III, laju aliran 0,0075 Kg/s, dengan kaca penutup	64
10	. Hasil nilai perhitungan menggunakan multiple linier regression	
	kolektor surya III, laju aliran 0,0075 Kg/s, tanpa kaca penutup	64
11	. Hasil pengujian <i>pressure drop</i> Kolektor surya I	66
12	. Hasil pengujian <i>pressure drop</i> kolektor surya II	68
13	. Hasil pengujian <i>pressure drop</i> kolektor surya III	69
14	. Hasil pengujian <i>pressure drop</i> kolektor surya IV	71
15	Summary output fungsi Multiple Linear Regression kolektor surva I	79

# **DAFTAR GAMBAR**

	Hala	man
1.	Kolektor surya pelat datar/ flat-plate collectors (FPC)	12
2.	Distribusi temparatur pada pelat datar	13
3.	Kolektor surya tipe aliran serpentine	13
4.	Evacuated tube flat plat collectors	14
5.	Perpindahan panas konduksi	15
6.	Perpindahan panas konveksi	17
7.	Perpindahan panas radiasi	18
8.	Radiasi masuk dan <i>heat loss</i> pada kolektor pelat datar	19
9.	Faktor efisiensi kolektor terhadap jarak pipa	24
10.	Jaringan termal kerugian untuk kolektor satu kaca penutup	
	dengan dan tanpa absorptance di cover	24
11.	Jenis – jenis elbow	29
12.	Piezometer tube	33
13.	U-Tube manometer	34
14.	Inclined tube manometer	35
15.	Alat ukur temperatur (a) Termoucouple (b) Multi chanel thermometer	
	data Logger	41
16.	Solari meter	41
17.	Pompa	42
18.	Lampu simulator	42
19.	Kaca penutup	43
20.	Isolasi glasswool	43
21.	Pelat tembaga	44
22.	Pipa dan elbow	44

23.	Rangkaian pipa tembaga	45
24.	Detil elbow	46
25.	Design kolektor surya I	47
26.	Design kolektor surya II	48
27.	Design kolektor surya III	48
28.	Design kolektor surya IV	49
29.	Assembling pipa dan pelat kolektor surya	50
30.	Satu set alat pengujian solar koleketor	51
31.	Diagram alur prosedur penelitian	52
32.	Skema pengujian	53
33.	Hasil Simulasi <i>pressure drop</i> kolektor surya I ( $\dot{m} = 0.0025 \text{ kg/s}$ )	66
34.	Grafik perbandingan pressure drop Kolektor surya I	67
35.	Hasil Simulasi pressure drop kolektor surya II ( $\dot{m} = 0.009167 \text{ kg/s}$ )	68
36.	Grafik perbandingan pressure drop Kolektor surya II	69
37.	Hasil Simulasi pressure drop kolektor surya III ( $\dot{m}=0.009167~{\rm kg/s}$ )	69
38.	Grafik perbandingan pressure drop kolektor surya III	70
39.	Hasil Simulasi pressure drop kolektor surya IV	70
40.	Grafik perbandingan pressure drop kolektor surya IV	71
41.	Perbandingan unjuk kerja Kolektor surya serpentin rangkaian vertikal	
	dengan horizontal	72
42.	Perbandingan unjuk kerja kolektor surya serpentin rangkaian vertikal	
	jarak pipa (W) 80 mm dengan 40 mm	74
43.	Perbandingan unjuk kerja kolektor surya serpentin menggunakan	
	sambungan <i>short elbow</i> 90 <sup>0</sup> dan sambungan <i>u-bend</i> 180 <sup>0</sup>	76
44.	Perbandingan unjuk kerja kolektor surya serpentin rangkaian vertikal	
	jarak pipa (W) 40 mm menggunakan sambungan short elbow 90°	
	variasi laju aliran, dan buka kaca.	77

#### I. PENDAHULUAN

#### 1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan tingkat ekonomi, hal ini mendorong manusia untuk mencari energi alternatif yang baru dan terbarukan. Untuk mengatasi masalah tersebut maka digunakan salah satu energi alternatif yaitu energi matahari atau energi surya yang tersedia tidak terbatas serta ramah lingkungan.

Indonesia merupakan negara yang terletak di daerah tropis dan khatulistiwa sehingga bumi Indonesia mendapatkan sinar matahari dengan intensitas yang dapat dikatakan konstan dan cukup tinggi. Potensi energi panas matahari di Indonesia sekitar 4,8 kWh/m² per hari atau setara dengan 112 ribu GWp. Namun, saat ini energi matahari yang sudah dimanfaatkan hanya sekitar 49MWp. Ini berarti, potensi energi matahari yang sudah dimanfaatkan masih jauh dari angka 1% (Renstra KESDM 2015-2019, 2015).

Untuk memanfaatkan energi matahari dibutuhkan suatu alat yang dikenal dengan kolektor surya. Kolektor surya pelat datar merupakan salah satu jenis kolektor yang banyak digunakan karena memiliki konstruksi yang relatif lebih sederhana dibandingkan dengan jenis yang lain. Kelebihan kolektor jenis ini dapat memanfaatkan komponen radiasi matahari melalui sorotan

langsung dan sebaran, tidak memerlukan *tracking* matahari, desainnya yang sederhana, sedikit memerlukan perawatan dan biaya pembuatan yang murah.

Berdasarkan bentuk susunan pipa dan distribusi aliran fluida pada kolektor surya pelat datar dibedakan menjadi rangkaian paralel dan seri / serpentine. Rangkain pipa serpentine sangat baik karena tidak memiliki potensi masalah distribusi aliran yang tidak merata. James Allan, dkk (2015) melakukan pengujian unjuk kerja kolektor surya tipe pararel dan tipe serpentine dengan hasil unjuk kerja kolektor surya tipe serpentine lebih baik.

Berbagai macam penelitian tentang kolektor surya aliran *serpentine* telah dilakukan untuk menghasilkan performansi yang baik. Teknologi rekayasa yang dilakukan juga bervariasi baik penelitian mengenai pengaruh material kolektor, variasi sudut datang radiasi, penggunaan kaca, dan faktor lainnya.

Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap kolektor surya dengan dengan luas dan posisi pelat kolektor yang sama namun divariasikan terhadap susunan aliran pipa riser (vertikal dan horizontal terhadap *plate absobsrber*), jarak pipa, dan jenis sambungan *elbow*.

# 1.2. Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian dilakukan untuk mengetahui karakteristik unjuk kerja kolektor surya pelat datar tipe aliran serpentin baik secara termal maupun *pressure drop* yang terjadi berdasarkan radius pipa elbow dan jarak antara pipa riser (W).

Penelitian ini terbagi dalam beberapa tujuan khusus diantaranya:

- 1. Mengetahui pengaruh susunan aliran pipa riser (vertikal dan horizontal terhadap pelat absorber) terhadap unjuk kerja kolektor surya.
- 2. Mengetahui pengaruh jarak antara pipa riser terhadap unjuk kerja kolektor surya.
- 3. Mengetahui pengaruh jenis sambungan *short elbow*  $90^{0}$  dan *return elbow*  $180^{0}$ / *u- bend* terhadap unjuk kerja kolektor surya.
- 4. Memvalidasi hasil simulasi *pressure drop* kolektor surya yang telah diperoleh menggunakan *software* paket program solidwork.

#### 1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

- Menghasilkan rekomendasi jarak pipa (W) kolektor surya yang memberikan unjuk kerja tinggi.
- Mendapatkan arah aliran susunan pipa yang memberikan unjuk kerja thermal tinggi.

#### 1.4. Batasan Masalah

Untuk menentukan arah penelitian yang baik, ditentukan batasan masalah sebagai berikut:

- Pengujian dilakukan dengan menggunakan sumber panas radiasi dari solar simulator.
- 2. Kolektor surya yang diuji adalah kolektor tipe aliran pipa *serpentine*.

- 3. Fluida yang digunakan dalam penelitian adalah air.
- 4. Pengujian dilakukan pada laju aliran konstan.
- 5. Pengujian dilakukan dengan dua variasi sambungan yaitu *short elbow* 90<sup>0</sup> dan *elbow* 180<sup>0</sup> (*U-bend*) serta dua variasi rankaian susunan pipa (vertikal dan horizontal terhadap *plate absorber*).
- Variabel yang diamati pada pengujian adalah temperatur air masuk dan keluar.
- 7. Luas pelat datar kolektor surya yang diuji adalah 0,45 m² dengan ukuran panjang 875 mm dan lebar 520 mm.

#### II. TINJAUAN PUSTAKA

# 2.1 State of The Art Penelitian Kolektor Surya

Penelitian tentang kolektor surya bukanlah ide baru dalam dunia teknologi rekayasa surya, sebelumnya banyak peneliti yang telah meneliti hal ini. Teknologi rekayasa yang dilakukan juga bervariasi baik penelitian mengenai pengaruh per komponen kolektor, material, geometri, variasi sudut datang radiasi dan lainnya, dengan tujuan meningkatkan unjuk kerja dari kolektor surya.

Penelitian ini dilakukan untuk menguji karakteristik kolektor surya pelat datar tipe serpentine berupa efisiensi thermal dan pressure drop berdasarkan pengaruh arah aliran fluida pada pipa riser, jarak antar pipa riser (W) dan jenis sambungan elbow yang digunakan. Pengkajian ini penting karena efisiensi thermal yang tinggi menunjukkan besarnya kalor yang dapat ditransfer oleh kolektor sedangkan pressure drop (P) yang tinggi membutuhkan kinerja pompa yang besar sehingga butuh daya listrik yang besar pula.

Berbagai macam penelitian tentang kolektor surya telah dilakukan diantaranya: A. James, dkk. (2015) melakukan pengujian *performance* terhadap *thermal dan Photovoltaic thermal* (PVT) kolektor surya menggunakan solar simulator. Pada penelitian ini telah telah dibandingkan unjuk kerja antara kolektor surya tipe *serpentine* dengan tipe pararel, hasil yang diperoleh kolektor surya tipe pararel

dengan konstruksi pipa *riser* dan *header* memiliki efisiensi lebih kecil dengan koefisien kehilangan menyeluruh meningkat 34%.

Q. Tang, dkk. (2011) meneliti unjuk kerja *thermal* sebuah solar kolektor pelat datar tipe *serpentine*, penelitian dilakukan untuk memperoleh nilai kerja aliran fluida, kecepatan angin, *pressure drop*, temperatur fuida masuk dan keluar. Penelitian ini hanya menguji satu jenis dan ukuran kolektor dengan luasan 1.71 m². Hasil penelitian menunjukkan nilai *pressure drop* tidak berubah terhadap waktu dan terjaga konstan selama pengujian karena nilai laju aliran fluida dijaga konstan. Temperatur masuk dan keluar berubah terhadap waktu pengujian bergantung pada radiasi matahari / *solar irradiance* dan kecepatan angin.

H. Shafrqat dan S.J. Horrison (2015) melakukan penelitian eksperimental dan kajian numerik pendinginan udara pasif pada kolektor surya pelat datar dalam kondisi stagnan. Jenis pipa yang diuji pada penelitian ini menggunakan pipa aliran serpentine. Pada penelitian ini diuji kemiringan 20° sampai dengan 45° dengan hasil perbedaan temperatur kemiringan 20° lebih baik dibandingkan dengan kemiringan 25° sampai dengan 45°. Faktanya adalah kemiringan sudut optimal bergantung pada garis lintang daerah setempat. Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh B. Auliya (2006), yang telah melakukan penelitian karakteistik kolektor surya pelat datar dengan variasi jarak kaca penutup dan sudut kemiringan kolektor, dengan variasi kemiringan 10°, 20°, 30°, 40°, dengan hasil perbedaan temperatur lebih besar pada kemiringan 10°, karena sudut 10° lebih mendekati sudut zenith dibandingkan dengan sudut lainnya.

- S.N. Agbo dan C.E. Okeke, (2007) meniliti hubungan antara unjuk kerja kolektor dengan variasi jarak pipa riser pada berbagai material pelat *absorber*. Hasil penelitiannya menujukkan bahwa efisiensi semakin turun seiring dengan penambahan jarak antar pipa. Jarak optimal antar pipa riser tidak melebihi 10 cm dengan efisiensi mencapai 80 %.
- D. M. Ghamari dan R. A. Worth (1992) melakukan penelitian tentang pengaruh jarak pipa terhadap efektifitas biaya pembuatan kolektor surya. Penelitian ini memasukkan faktor biaya pembuatan kolektor untuk mencari jarak yang optimum antar pipa riser. Hasil penelitiannya jarak optimum antara pipa riser diperoleh pada jarak 160 mm. Namun jarak pipa tersebut akan berubah tergantung pada wilayah pengujian.
- Q. Tang, dkk. (2011) melakukan penelitian terhadap unjuk kerja *thermal* sebuah solar kolektor pelat datar tipe *serpentine*. Penelitian dilakukan untuk memperoleh nilai kerja aliran fluida, *pressure drop*, temperatur fuida masuk dan keluar. Penelitian ini hanya menguji satu jenis dan ukuran kolektor dengan luasan 1.71 m². Hasil penelitian menunjukkan nilai *pressure drop* tidak berubah terhadap waktu dan terjaga konstan selama pengujian karena nilai laju aliran fluida dijaga konstan. Temperatur masuk dan keluar berubah terhadap waktu pengujian bergantung pada radiasi matahari dan kecepatan angin.
- Z. He-Fei dan L. Zalman (1985) melakukan penelitian tentang unjuk kerja panas plate absorber tipe serpentine untuk menganalisa solusi removal factor dengan jumlah segmen serpentine (N) 3 dan 4. Penelitian ini merupakan penelitian

lanjutan yang telah dilakukan oleh Abdel-Khalik (1976) tentang faktor panas yang hilang pada solar kolektor pelat datar pipa tipe *serpentine*. Dengan hasil penelitian diperoleh persamaan rumus untuk menghitung *heat factor removal* (F<sub>R</sub>) yang valid untuk berapapun jumlah segmen belokan.

Sulaeman dan M. Darul (2013) melakukan analisa terhadap efisiensi kolektor surya pelat datar dengan debit aliran fluida 3 - 10 liter/menit. Hasil penelitian kerja kolektor paling optimal pada aliran fluida 7,5 liter/menit. Dengan demikian masyarakat dapat memanfaatkan dan menggunakan alat ini sebagai solusi untuk penggunaan energi yang mudah didapat dan diperbarui.

D.C. Davide, dkk (2013) meneliti unjuk kerja thermal pelat datar kolektor surya dengan pelat yang dibentuk atau ditekut sesuai bentuk / roll-bond sesuai bentuk dan ukuran pipa yang digunakan dibandingkan dengan pelat datar yang tidak ditekuk sesuai bentuk pipa. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi pelat datar yang dibentuk atau ditekuk sesuai bentuk pipa lebih baik bila dibandingkan dengan pelat datar yang tidak ditekuk.

D. Rojas, dkk, (2007) melakukan penelitian tentang pengujian unjuk kerja kolektor surya pelat datar dengan judul. Penelitian ini membandingkan hasil yang diperoleh menggunakan standar EN 12975-2 dan hasil yang diperoleh dengan standar ASHRAE 93. Salah satu hasil penelitiannya menjelaskan bahwa kedua satndar ini cocok diterapkan pada kolektor pelat datar *single cover*.

Richa´rd Kicsiny (2014) melakukan penelitian tentang pemodelan unjuk kerja kolektor surya berdasarkan *Multiple linear regression*. Penelitian ini membandingkan model fisika dan model MLR dalam analisa kolektor. Hasilnya model MLR memberikan hasil yang lebih akurat.

Berdasarkan beberapa literature penelitian di atas maka pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap unjuk kerja kolektor surya pelat datar tipe serpentine dengan variasi arah aliran rangkaian pipa *riser*, jarak pipa riser (W) dan jenis sambungan *elbow* yang digunakan. Kolektor surya yang dirancang mengikuti beberapa hasil penelitian di atas seperti; Pelat tembaga yang di tekuk / *roll bond* mengikuti bentuk pipa agar permukaan pipa menempel sempurna pada pelat; Metode pengujian mengikuti standar EN 12975; Analisa perhitungan berdasarkan *Multiple linear regression*.

# 2.2 Dasar Teori Kolektor Surya

Kolektor surya merupakan komponen utama dari sistem Kolektor energy surya. Perangkat kolektor surya berfungsi menyerap radiasi matahari yang masuk, mengubahnya menjadi panas, dan memindahkan panas ke fluida yang mengalir melalui kolektor, umumnya fluida berbentuk udara, air, atau minyak.

Pada dasarnya ada dua jenis kolektor surya; pertama jenis *non-concentrating* collector (tidak berkonsentrasi) atau stasioner yang memiliki wilayah yang sama untuk menangkap dan menyerap radiasi matahari, dan jenis yang ke-dua yaitu concentrating collector (berkonsentrasi) merupakan kolektor surya yang cocok

untuk aplikasi pada temperatur yang tinggi. Kolektor surya juga dapat dibedakan berdasarkan jenis fluida perpindahan panas yang digunakan seperti; air, cairan yang tidak beku, udara, atau minyak (Kalogirou, 2003).

Kolektor surya dapat didefinisikan sebagai sistem perpindahan panas yang menghasilkan energi panas dengan memanfaatkan radiasi sinar matahari sebagai sumber energi utama. Ketika cahaya matahari menimpa pelat penyerap pada kolektor surya, sebagian cahaya akan dipantulkan kembali ke lingkungan, sedangkan sebagian besarnya akan diserap dan dikonversi menjadi energi panas, lalu panas tersebut dipindahkan kepada fluida yang bersirkulasi di dalam kolektor surya untuk kemudian dimanfaatkan guna berbagai aplikasi (Duffie, 2013).

Kolektor surya yang pada umumnya memiliki komponen-komponen utama, yaitu:

- Penutup transparan / Cover berfungsi untuk mengurangi rugi panas secara konveksi menuju lingkungan.
- 2. Absorber berfungsi untuk menyerap panas dari radiasi cahaya matahari.
- 3. Kanal berfungsi sebagai saluran transmisi fluida kerja.
- 4. *Isolator* berfungsi meminimalisasi kehilangan panas secara konduksi dari absorber menuju lingkungan.
- 5. Frame berfungsi sebagai struktur pembentuk dan penahan beban kolektor

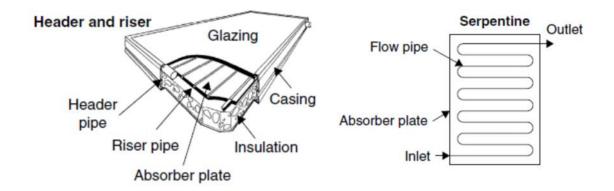
Berdasarkan posisi dan geraknya kolektor surya dapat dikategorikan pada sistem tetap (*stationer*), *single-axis tracking*, dan *two-axistracking*. Kolektor surya sistem *stationer* adalah kolektor permanen atau tetap di posisi dan tidak melacak matahari. Ada tiga jenis utama yang termasuk dalam kategori kolektor ini:

- 1. Flat-plate collector (FPC).
- 2. Stationary compound parabolic collector (CPC).
- 3. Evacuated tube collector (ETC).

# 2.2.1 Kolektor Surya Pelat Datar / Flat-Plate Collectors (FPC)

Sebuah kolektor surya pelat datar ditunjukkan pada Gambar 2.1. Ketika radiasi matahari melewati penutup transparan dan menembus sampai permukaan pelat penyerap / absorber plate, sebagian besar energi diserap oleh pelat dan ditransfer pipa, yang akan terbawa oleh fluida yang mengalir dalam pipa untuk disimpan atau digunakan. Bagian bawah dari pelat absorber dan kedua belah sisinya diisolasi untuk mengurangi kehilangan panas / losses akibat perpindahan panas konduksi. Pipa dapat dilas ke pelat menyerap / absorber plate atau dapat menjadi bagian yang menyatu (terintegrasi) dengan pelat penyerap / absorber plate. Kedua ujung pipa terhubung dengan pipa berdiameter lebih besar yang disebut header, header dan riser collector merupakan design untuk tipe pelat datar collector susunan pararel.

Selain susunan pipa pararel ada alternative susunan pipa seri atau *serpentine*. Tipe susunan pipa alairan seri / *serpentine* sangat baik karena tidak memiliki potensi masalah distribusi aliran yang tidak merata di berbagai tipe pipa. Fluida yang dipanaskan berupa cairan minyak , oli, dan udara.

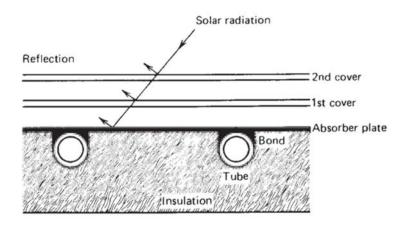


Gambar 2.1. Kolektor Surya Pelat Datar / Flat-Plate Collectors (FPC) (Kalogirou, 2003)

Keuntungan utama dari sebuah kolektor surya pelat datar adalah memanfaatkan radiasi matahari melalui sorotan langsung dan sebaran, tidak memerlukan tracking matahari dan juga desainnya yang sederhana, hanya sedikit memerlukan perawatan serta biaya pembuatan yang murah. Pada umumnya kolektor jenis ini digunakan untuk memanaskan ruangan dalam rumah, pengkondisian udara, dan proses-proses pemanasan dalam industri. (Duffie, 2013).

Tipe ini dirancang untuk aplikasi yang membutuhkan energi panas pada temperatur di bawah 100°C. Spesifikasi tipe ini dapat dilihat dari *absorber*-nya yang berupa pelat datar yang terbuat dari material dengan konduktivitas termal tinggi, dan dilapisi dengan cat berwarna hitam. Kolektor pelat datar memanfaatkan radiasi matahari langsung dan terpencar (*beam* dan *diffuse*), tidak membutuhkan pelacak matahari, dan hanya membutuhkan sedikit perawatan. Aplikasi umum kolektor tipe ini antara lain digunakan untuk pemanas air, pemanas gedung, pengkondisian udara, dan proses panas industri. Komponen penunjang yang terdapat pada kolektor pelat datar antara lain; *transparant cover*, *absorber*, insulasi, dan kerangka / *frame*.

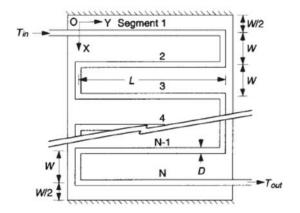
Distribusi temperatur pada konstruksi solar kolektor dapat dilihat pada gambar di bawah:



Gambar 2.2. Distribusi temparatur pada Pelat datar (Duffie, 2013)

Sebagian dari energi yang datang diserap oleh pelat yang kemudian ditransfer melalui perpindahan konduksi sepanjang pelat ke area pipa.

Salah satu alternatif desain pelat pemanas pada pelat datar adalah adalah tipe susunan pipa seri / serpentine sebagaimana terlihat pada gambar di bawah :



Gambar 2.3 Solektor surya tipe aliran *serpentine* (Duffie, 2013)

Kolektor surya yang memiliki pipa fluida seri berkelok ini memiliki satu aliran fluida pada pipa panjang yang dibentuk fleksibel. Pada bentuk ini tidak ada permasalahan dalam perbedaan laju aliran fluida. Pada proses pembuatannya,

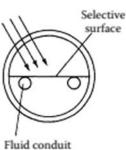
yang perlu diperhatikan adalah saat menekuk (*bending*) bagian pipa agar jangan sampai material menjadi rusak.

# 2.2.2. Stationary Compound Parabolic Collector (CPC)

Kolektor jenis *compound parabolic collector* (CPC) merupakan *non-imaging collector*. Kolektor surya jenis ini mampu memfokuskan energi radiasi cahaya matahari pada suatu *receiver*, sehingga dapat meningkatkan kuantitas energi panas yang diserap oleh *absorber*. Spesifikasi jenis ini dapat dikenali dari adanya komponen konsentrator yang terbuat dari material dengan transmisivitas tinggi.

#### 2.2.3 Evacuated Tube Collectors

Kolektor jenis ini dirancang untuk menghasilkan energi panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan dua jenis kolektor surya sebelumnya. Keistimewaannya terletak pada efisiensi transfer panasnya yang tinggi tetapi faktor kehilangan panasnya yang relatif rendah. Hal ini dikarenakan fluida yang terjebak diantara absorber dan cover-nya dikondisikan dalam keadaan vakum, sehingga mampu meminimalisasi kehilangan panas yang terjadi secara konveksi dari permukaan luar absorber menuju lingkungan.



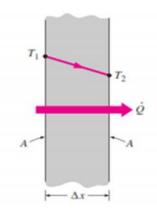
Gambar 2.4. Evacuated Tube Flat pelat Collectors (Goswani, 2015)

# 2.3 Perpindahan Panas

Proses perpindahan panas yang terjadi pada sebuah pelat kolektor surya ada tiga metode, yaitu; perpindahan panas secara konduksi sepanjang pelat penyerap / flat absorber dan melalui dinding. Kemudian perpindahan panas dengan cara konveksi dimana panas berpindah ke fluida dalam saluran pipa, kemudian perpindahan secara radiasi dari pelat penyerap / flat absorber ke pelat penutup.

# 2.3.1. Perpindahan panas konduksi

Konduksi dapat digambarkan sebagai proses perpindahan energi dari energi yang lebih besar kebagian energi yang lebih kecil yang disebabkan kedua bagian saling berinterkasi, sehingga dapat didefinisikan dengan suatu proses perpindahan panas dimana panas mengalir dari daerah yang bersuhu lebih tinggi menuju daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam satu media (padat, cair dan gas), atau antara mediamedia yang berlainan yang bersinggungan secara lansung.



Gambar 2.5. Perpindahan panas Konduksi (Cengel, 2002)

Untuk menghitung laju aliran secara konduksi dapat dijabarkan dalam suatu persamaan yang dinyatakan dengan hukum Fourier (J. P Holman., 1997), yaitu:

$$q_{kond} = -kA(dt/dx) \qquad \dots (2.1)$$

Dimana:

 $q_{kond}$ : Laju perpindahan panas konduksi, (W)

k : Konduktivitas thermal, (W/m.K)

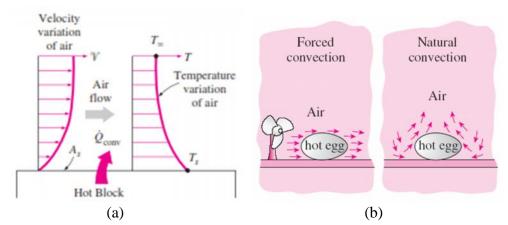
A: Luas penampang tegak lurus pada aliran panas, (m²)

dt/dx: Gradien temperatur dalam arah aliran panas

# 2.3.2. Perpindahan panas konveksi

Perpindahan panas konveksi adalah suatu proses perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir disekitarnya, dengan menggunakan media penghantar berupa fluida (cair / gas). Panas secara konveksi menurut cara pergerakannya dibagi dua bagian yaitu:

- 1. Konveksi alamiah (*natural convection*) terjadi apabila gerakan pencampuran berlansung semata-mata akibat dari perbedaan kerapatan yang disebabkan oleh gradien massa jenis.
- Konveksi paksa (forced convection) terjadi apabila gerakan pencampuran di sebabkan oleh suatu alat dari luar seperti pompa atau kipas.



Gambar. 2.6 : a. Perpindahan panas konveksi b. Perpindahan panas konveksi paksa dan konveksi alami. (Cengel, 2002)

Pada umumnya, perpindahan panas dengan cara konveksi antara suatu permukaan dengan suatu fluida dapat dihitung dengan suatu persamaan (J. P Holman., 1997), yaitu:

$$q_c = hA(T_w - T_f) \tag{2.2}$$

Dimana:

 $q_c$ : Laju perpindahan panas konveksi, (W)

A: Luas permukaan perpindahan panas, (m<sup>2</sup>)

h: Koefesien perpindahan panas konveksi, (W/m<sup>2</sup>.K)

 $T_f$ : Temperatur fluida, (K)

 $T_w$ : Temperatur dinding, (K)

# 2.3.3 Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi karena pancaran/ radiasi gelombang elektro-magnetik, tanpa memerlukan media perantara, oleh karenanya proses perpindahan panas radiasi dapat mengalir dari benda bersuhu tinggi menuju ke suatu benda yang bersuhu lebih rendah pada ruangan terpisah. Laju pancaran radiasi pada suatu permukaan dapat digunakan persamaan sebagai berikut (J. P Holman., 1997):

$$q_r = \varepsilon \sigma A(T^4) \qquad \dots (2.3)$$

Dimana:

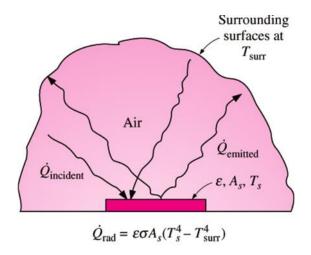
 $q_r$ : Laju perpindahan kalor radiasi, (W)

: Emisivitas benda,

: Konstanta Stefan-Boltzznann, 5,67 x 10-8  $\text{W/(m}^2\text{.K)}$ 

 $T^4$ : Perpindahan temperatur, (K)

A: Luas permukaan bidang, (m<sup>2</sup>)



Gambar 2.7. Perpindahan panas radiasi (Cengel, 2002)

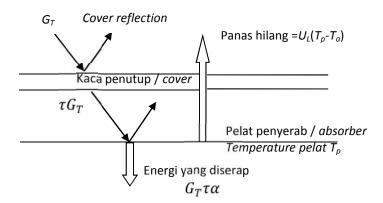
Pada kenyataannya, permukaan bukan merupakan pemancar atau pun penyerap yang sempurna dari radiasi termal. Permukaan tersebut ditandai oleh fraksi-fraksi dari jumlah ideal yang dipancarkan (, emisivitas) dan diserap (, absorbsivitas). Perpindahan panas yang terjadi dalam sebuah kolektor surya adalah perpindahan panas radiasi dari pelat penyerap ke pelat penutup kaca.

Radiasi termal adalah radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh permukaan sebuah benda berdasarkan temperaturnya yang melalui ruangan dengan kecepatan cahaya. Radiasi termal akan dipengaruhi oleh panjang gelombang dan arah nya. Namun dengan definisi bahwa benda hitam adalah penyerap radiasi yang sempurna, maka radiasi yang diserap pada benda hitam tidak dipengaruhi oleh panjang gelombang atau arah insiden radiasi.

## 2.4. Persamaan Dasar Keseimbangan Energi Flat Plate Collector

Performan kolektor surya digambarkan dengan keseimbangan energi yang menunjukkan distribusi energi surya datang kemudian dikonversi menjadi energi yang berguna dan panas yang hilang / termal losses.

Pada kondisi *steady state*, jumlah nilai panas berguna dikirim oleh kolektor surya sama dengan jumlah energi panas yang diserap oleh fluida dikurangi dengan panas yang hilang / *losses* dari permukaan ke lingkungan.



Gambar 2.8. Radiasi masuk dan heat loss pada kolektor pelat datar

Dari gambar di atas radiasi panas yang diserap adalah  $G_T \tau \alpha$ , energi panas yang hilang dari kolektor ke lingkungan disebabkan konduksi, konveksi, dan radiasi

dapat direpresentasikan dengan koefisien kehilangan panas menyeluruh ( $U_L$ ).  $T_p$  adalah temperatur pelat, dan  $T_a$  merupakan temperatur lingkungan.

Radiasi matahari diserap oleh kolektor per satuan luas *absorber* S adalah perbedaan antara radiasi matahari datang dan kerugian optik. Energi panas yang hilang dari kolektor ke lingkungan dengan konduksi, konveksi, dan radiasi dapat direpresentasikan sebagai produk dari koefisien perpindahan panas  $U_L$  waktu yang berbeda antara temperatur tengah *plate absorber*  $T_{pm}$  dan suhu lingkungan  $T_a$ . Dalam kondisi *steady* output energi yang berguna dari kolektor dengan luas penampang  $A_c$  adalah perbedaan antara radiasi matahari diserap dan kehilangan panas / *thermal losses*. (Duffie, 2013)

$$Q_U = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)]$$
 (2.4)

Yang menjadi permasalahan pada persamaan di atas adalah tempertur pelat absorber rata-rata sulit untuk dihitung atau diukur karena merupakan fungsi dari desain kolektor, surya insiden radiasi, dan kondisi fluida masuk. oleh karena itu perhitungan persamaan diatas dapat dinyatakan saat temperatur fluida masuk dan parameter yang disebut faktor penghapus / removal factor kolektor panas, yang dapat dievaluasi secara analitis dari prinsip-prinsip dasar atau diukur secara eksperimen. Oleh karena itu persamaan untuk panas berguna dari kolektor menjadi (Kalogirou, 2003):

$$Q_U = A_c F_r [G_t(\alpha \tau) - U_L (T_{fi} - T_a)] \qquad \dots$$
 (2.5)

Dimana:

 $A_c$ : Luas kolektor (m<sup>2</sup>)

 $F_r$ : Removal Factor pemindahan panas kolektor

 $U_L$ : koefisien kehilangan panas menyeluruh kolektor (Watt/m<sup>2</sup>.K)

 $T_{fi}$ : temperatur fluida masuk (K)

 $T_a$ : temperatur udara lingkungan (K)

Energi berguna juga dapat dihitung menggunakan temperatur fluida rata-rata ( $T_{fm}$ ) persamaan sebagai berikut:

$$Q_U = A_c F' \left[ (\tau \alpha)_{\dot{e}} S - U_L \left( T_{fm} - T_a \right) \right] \tag{2.6}$$

Untuk nilai energi berguna yang diberikan kolektor ke fluida dapat dicari menggunakan

$$Q_U = \dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi}) \qquad (2.7)$$

Efisiensi performan sebuah kolektor didefinisikan dengan rasio energi yang berguna berguna selama periode waktu tertentu terhadap energi surya yang datang / *incident* radiasi selama periode waktu yang sama:

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_C \int G_T dt} \qquad (2.8)$$

Pada kondisi konstan selama periode tertentu, efisiensi dapat dihitung dengan persamaan:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} \tag{2.9}$$

Dimana:

: efisiensi

 $Q_u$ : energi berguna

 $I_T$ : incident solar radiation

 $A_c$ : Luas kolektor

Analisa nilai faktor efisiensi pelat (F') dan heat factor removal ( $F_R$ ) untuk kolektor surya tipe serpentine akan dipengaruhi oleh jumlah belokan pipa yang akan dipisahkan menjadi beberapa segment. Persamaan heat factor removal ( $F_R$ ) pada tiga parameter tak berdimensi  $F_1$ ,  $F_2$ , dan  $F_3$  (untuk parameter  $F_4$ ,  $F_5$ , dan  $F_6$  adalah fungsi dari  $F_2$ ) dapat diperoleh dengan persamaan berikut [Duffi, 1981):

$$F_R = F_1 F_2 F_5 \left[ \frac{2F_4}{F_6 exp \left[ -\sqrt{1 - F_2^2 / F_3} \right] + F_5} - 1 \right]$$
 (2.10)

Persamaan untuk parameter F<sub>1</sub> sampai dengan F<sub>6</sub>:

$$F_1 = \frac{k}{U_L W} \frac{kR(1+\gamma)^2 - 1 - \gamma - kR}{[kR(1+\gamma) - 1]^2 - (kR)^2}$$
 (2.11)

$$F_2 = \frac{1}{kR(1+\gamma)^2 - 1 - \gamma - kR} \tag{2.12}$$

$$F_3 = \frac{mc_p}{F_1 U_L A_c} \tag{2.13}$$

$$F_4 = \left(\frac{1 - F_2^2}{F_2^2}\right)^{1/2} \tag{2.14}$$

$$F_5 = \frac{1}{F_2} + F_4 - 1 \tag{2.15}$$

$$F_6 = 1 - \frac{1}{F_2} + F_4 \tag{2.16}$$

$$k = \frac{(k\delta U_L)^{1/2}}{\sinh[(W-D)(U_L/k\delta)^{1/2}]} \qquad ..... (2.17)$$

$$\gamma = -2 \cosh \left[ (W - D) \left( \frac{U_L}{k \delta} \right)^{1/2} \right] - \frac{D U_L}{k}$$
 (2.18)

$$R = \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \tag{2.19}$$

Persamaan  $F_R$  diatas valid untuk berapapun jumlah belokan / *elbow* jika nilai  $\dot{m}C_p/F_1U_LA_c$  lebih besar dari 1.

#### Dimana:

L : Panjang antara segment satu serpentine (m)

W : Jarak antara pipa (m)

N : Jumlah segments

: tebal pelat (mm)

D : diameter luar pipa (mm)

D<sub>i</sub> : diameter luar pipa (mm)

K : Konduktifitas thermal pelat (W/m <sup>0</sup>C)

 $U_L$ : Koefisien kehilangan panas menyeluruh (W/m<sup>2.0</sup>C)

m : Jumlah aliran massa fluida (kg/s)

*Cp* : Spesifik panas fluida (J/kg <sup>0</sup>C)

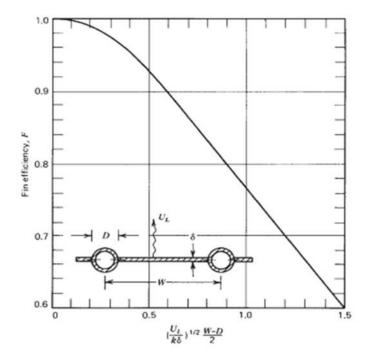
hfi : Koefiesien perpindahan panas dari fluida ke pipa (W/m² °C)

Cb : Bond conductance ( W/m  $^{0}C$ ).

Faktor efisiensi kolektor dapat didefinisikan melalui persamaan :

$$F' = \frac{1/U_L}{W\left[\frac{1}{U_L\left[D + (W - D)\,F\right]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi\,D_ih_{fi}}\right]}$$

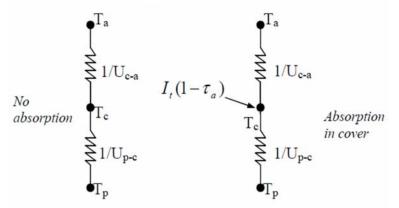
Berdasarkan persamaan tersebut disajikan hubungan faktor efisiensi terhadap jarak pipa (*W*) dalam bentuk grafik pada gambar 2.9 . Faktor effisiensi kolektor berkurang seiring dengan bertambahnya jarak antar pipa (*W*), dan faktor effisiensi kolektor meningkat dengan menambah ketebalan pelat dan konduktifitas panas.



Gambar 2.9. Grafik faktor efisiensi kolektor terhadap jarak pipa (Duffie, 2013).

## 2.5. Koefisien Efektif Transmittance-Absorptance $(\tau \alpha)_{\dot{e}}$

Koefisien efektif transmittance-absorptance  $(\tau \alpha)_{\dot{e}}$  adalah suatu yang berdasarkan pemodelan penyerapan radiasi matahari oleh kaca penutup dan nilainya sedikit lebih besar dari nilai  $(\tau \alpha)$ . Sebagaimana terlihat pada gambar 2.10, energy surya yang diserap oleh kaca adalah  $I_t(1-\tau_a)$ 



Gambar 2.10. Jaringan termal kerugian untuk kolektor satu kaca penutup dengan dan tanpa *absorptance* di cover. (Duffie, 2013)

Koefisien efektif *transmittance-absorptance*  $(\tau \alpha)_e$  dengan kaca penutup dapat diperoleh menggunakan pendekatan (Duffie, 2013):

$$(\tau \alpha)_e = (\tau \alpha) + (1 - \tau_a) \frac{u_t}{u_{c-a}}$$
 ..... (2.20)

Secara umum transmittance-absorptance  $(\tau \alpha)_e$  dengan kaca penutup dapat didekati dengan  $(\tau \alpha)_e \cong 1.02 \ (\tau \alpha)$ .

Sedangkan untuk koefisien efektif *transmittance-absorptance*  $(\tau \alpha)_e$  kolektor tanpa kaca penutup adalah  $(\tau \alpha)_e \cong 1.01 \ (\tau \alpha)$ 

### 2.6 Koefisien Kerugian Panas Menyeluruh

Koefisien kerugian panas menyeluruh adalah fungsi secara kompleks dari rancangan konstruksi dan kondisi pengoperasian sebuah kolektor. Kerugian kalor dari kolektor terjadi pada sisi bagian atas, bawah dan samping kolektor, yang digambarkkan pada persamaan berikut [Kalogirou, 2003]:

$$U_L = U_t + U_b + U_e (2.21)$$

Dimana:

 $U_L$  = koefisien kerugian kalor total;

 $U_t$  = koefisien kerugian kalor bagian atas;

 $U_b$  = koefisien kerugian kalor bagian bawah;

 $U_e$  = koefisien kerugian kalor bagian tepi / samping.

Kerugian kalor bagian atas kolektor adalah panas yang hilang dari bagian atas pelat *absorber* karena adanya proses perpindahan panas konveksi alami dan radiasi dari pelat kolektor bagian dalam ke permukaan kaca. Dan panas ini dikonduksikan melalui kaca ke permukaan luarnya yang kemudian dipindahkan

ke atmosfer luar secara konveksi dan radiasi. Untuk kerugian kalor secara konduksi pada pelat kolektor dapat diabaikan karena tebal cover dan sirip pelat *absorber* kecil sehingga perbedaan temperatur tidak begitu signifikan.

Nilai koefisien kerugian kalor bagian atas untuk kolektor dengan 2 (dua) lapis kaca / cover secara teori dapat didekati dengan persamaan berikut :

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \tag{2.22}$$

Tahanan kaca penutup / cover terhadap lingkungan  $R_I$  dan tahanan antara 2 (dua) kaca penutup dapat diperoleh dengan persamaan :

$$R_1 = \frac{1}{h_W + h_{r,c2-a}} \tag{2.23}$$

$$R_2, R_3 = \frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} \tag{2.24}$$

Dimana:

 $U_t$ : Kerugian kalor bagian atas

 $R_1$ : Tahanan / resistance kaca terhadap lingkungan

 $R_2, R_3$ : Tahanan antara kaca / cover

 $h_w$ : Koefisien perpindahan panas konfeksi

 $h_{r,c2-a}$ : Koefisien perpindahan panas radiasi antara kaca / cover kedua dengan lingkungan

 $h_{c,p-c}$ : Koefisien perpindahan panas konveksi antara pelat dan kaca / cover

 $h_{r,p-c}$ : Koefisien perpindahan panas radiasi antara pelat dan kaca / cover

Untuk kolektor yang menggunakan satu kaca penutup / cover persamaan (21) menjadi:

$$U_t = \left(\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_{r,c-a}}\right)^{-1}$$
 (2.25)

Kerugian kalor pada bagian bawah terjadi secara konduksi dari pelat *absorber* ke panel bagian bawah, dan untuk kerugian panas konveksi dan radiasi diabaikan sebab nilainya lebih kecil dibandingkan kerugian panas konduksi.

Nilai koefisien kerugian kalor bagian bawah dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$U_b = \frac{\kappa}{L} \tag{2.26}$$

Dimana:

K = konduktivitas termal insulator bagian bawah

L =tebal insulator.

kerugian kalor dari bagian tepi kolektor dapat diperkirakan dengan asumsi satu dimensi aliran panas ke samping di sekeliling sistem kolektor. Kerugian melalui bagian samping harus dirujuk terhadap luas kolektor  $A_c$ . sehingga kerugian kalor melaui bagian tepi dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$U_e = \frac{(UA)_{edge}}{A_c}$$
 ..... (2.27)

Dimana:

 $(UA)_{edge}$ : Luas Koefisien panas hilang dari samping

k/L x keliling kolektor x ketebalan kolektor.

 $A_c$ : Luas permukaan kolektor (m<sup>2</sup>)

### 2.7. *Elbow*

Elbow adalah jenis *fitting* pada pipa, *elbow* berfungsi untuk membelokkan arah aliran fluida. Umumnya sudut *elbow* terdiri dari tiga jenis yaitu 45, 90 dan 180 derajat.

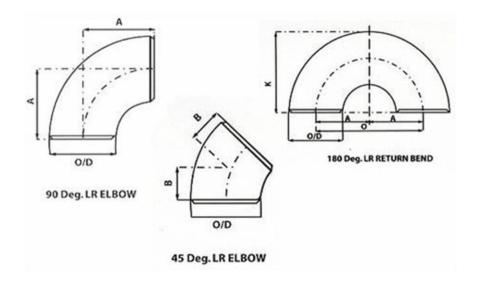
Ukuran pipa tembaga yang umum tersedia di pasar sebagaimana pada table 2.1 berikut :

Tabel. 2.1. Ukuran pipa yang lazim digunakan

	Diameter Luar	
No	inch	mm
1	1/4	6.4
2	3/8	9.5
3	1/2	12.7
4	5/8	15.9
5	3/4	19.1
6	7/8	22.2
7	1	25.4
8	1 1/8	28.6
9	1 1/4	31.8
10	1 3/8	34.9
11	1 ½	38.1
12	1 5/8	41.3

Berdasarkan sudut pembelokannya, elbow dibagi menjadi:

- a.  $Elbow 45^{\circ}$  ( untuk sudut pembelokan  $45^{0}$ )
- b.  $Elbow 90^{\circ}$  (untuk sudut pembelokan  $90^{0}$ )
- c.  $Elbow~180^{\circ}$  (untuk sudut pembelokan  $180^{\circ}$ , elbow dikenal dengan nama return bend atau U-bend)



Gambar 2.11. Jenis – jenis elbow

Berdasarkan radius, elbow digolongkan menjadi:

1) LR (Long Radius)

Radius dari centerline elbow sebesar: 1.5 NPS (nominal pipe size).

2) SR (Short Radius)

Radius dari centerline elbow sebesar 1.0 NPS (nominal pipe size).

Selain jenis di atas ada jenis *elbow* yang dibuat dari pipa lurus yang dibengkokkan sehingga terdapat sedikit penipisan tebal dinding pada bagian belokan / *bend*. Penipisan ini menyebabkan tekanan operasi dan ukuran yang sama, *elbow* lebih kuat dari *bend*. Berdasarkan radius *bending*, *bend* dibedakan menjadi :

- a. *Bend* 3R (3xNPS).
- b. Bend 5R (5xNPS).

### 2.8. Pressure Drop dan Head Loss

Kerugian yang terdapat di dalam aliran fluida terdiri dari kerugian tekanan (pressure drop) atau kerugian head (head loss). Pressure drop merupakan istilah yang digunakan untuk mendeskripsikan penurunan tekanan dari satu titik didalam sistem ke titik yang lain yang mempunyai tekanan lebih rendah. Pressure drop juga merupakan hasil dari gaya-gaya friksi terhadap fluida yang mengalir didalam pipa, yang disebabkan oleh tahanan fluida untuk mengalir.

Faktor yang mempengaruhi kerugian di dalam aliran fluida antara lain kecepatan aliran, luas penampang saluran, faktor friksi, viskositas, densitas fluida. Persamaan matematis kerugian tekanan di dalam saluran sirkuler :

$$\Delta P = f \frac{l}{d} ... \left(\frac{V^2}{2}\right) \tag{2.28}$$

Dengan hubungan antara head dan tekanan:

$$P = \dots g.h \tag{2.29}$$

Kerugian head (head loss)

$$\Delta h = f\left(\frac{l}{d}\right)\left(\frac{V^2}{2g}\right) \tag{2.30}$$

Dimana:

UP = kerugian tekanan

d = diameter pipa

V = kecepatan aliran

f = faktor friksi

l = panjang pipa

g = grafitasi

h = head

Harga faktor friksi (f) untuk pipa-pipa tertentu dapat dicari dengan menggunakan diagram Moody dengan terlebih dahulu menghitung bilangan Reynolds.

Pressure drop dapat terjadi jika fluida mengalir dalam pipa, belokan-belokan (elbow), katup-katup (valves) dan tee, maka akan terjadi hambatan. Hambatan tersebut akan mengurangi tekanan. Koefisien perpindahan panas dan penurunan tekanan udara yang mengalir melalui perforated plate adalah suatu yang penting dalam merancang kolektor surya. Kutscher, 1994. Telah mengembangkan Korelasi udara yang mengalir melalui susunan lubang tertutup (diatur sebagai segitiga sama sisi):

$$Nu_D = 2.75 \left(\frac{P}{D}\right)^{-1.21} Re_D^{0.43}$$
 .... (2.31)

Dimana:

P: Jarak antara lubang

D; Diameter lubang

Bilangan Reynolds di dalam sebuah saluran dapat dihitung melalui persamaan (Munson, 2004) :

$$Re = \left(\frac{\rho VD}{\mu}\right) \qquad \dots \tag{2.32}$$

Sedang untuk koefisien gesek aliran turbulen diperoleh dengan diagram Moody, Batasan bilangan Reynolds untuk aliran aliran laminer jika nilai Re < 2000, dan nilai Re antara 2000 sampai dengan 2300 adalah aliran transisi, serta nilai Re > 2300 adalah aliran turbulen.

Kecepatan dalam jumlah Reynolds adalah kecepatan udara rata-rata di dalam lubang. Korelasi perbandingang jarak pipa terhadap diameter pipa secara eksperimen telah diuji dan diverifikasi kisaran P/D dari nilai 5 sampai dengan nilai 40:

$$0.25 < \left(\frac{P}{D}\right)^{-1.21} Re_D^{0.43} < 1.4$$
 ..... (2.33)

Untuk *pressure drop* yang melalui lubang pada solar kolektor dapat diperoleh melalui hubungan persamaan sebagai berikut (Duffie, 2013):

$$\frac{\Delta P}{\rho V^2/2} = 6.82 \left(\frac{1-\sigma_p}{\sigma_p}\right)^2 Re_D^{-0.236} \qquad (2.34)$$

Maka persamaan pressure drop adalah:

$$\Delta P = \frac{\rho V^2}{2} 6.82 \left(\frac{1 - \sigma_p}{\sigma_p}\right)^2 Re_D^{-0.236}$$
 (2.35)

Dimana  $\sigma_p$  adalah kemapuandaya serap / porosity yang didefinisikan sebagai luas lubang pipa dibandingkan luas kolektor.

$$\sigma_{\mathbf{P}} = \frac{A_{\text{holes}}}{A_{\text{c}}} \qquad (2.36)$$

Dengan nilai  $\sigma_p$ antara

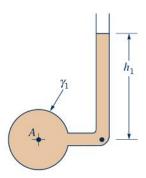
$$0 < \left(\frac{1-\sigma}{\sigma}\right)^2 Re_D^{-0.236} < 0.52 \qquad \dots \tag{2.37}$$

Sebuah teknik standar untuk mengukur tekanan dapat menggunakan kolom cair dalam tabung dengan posisi vertikal atau miring. Alat ukur tekanan berdasarkan teknik ini disebut manometer. Manometer adalah alat ukur tekanan yang sangat sederhana dimana perbedaan tekanan dapat dilihat dari tabung yang sudah diskalakan. Manometer adalah suatu alat ukur tekakan zat cair di dua titik yang

berlawanan. Barometer merkuri adalah contoh dari satu jenis manometer, tetapi ada banyak konfigurasi lain yang mungkin tergantung pada aplikasi penggunaan tertentu. Ada tiga jenis manometer yang umum yaitu; *piezometer tube*, *U-tube manometer*, dan *inclined-tube manometer*.

### 2.8.1. Piezometer Tube

Jenis yang paling sederhana dari manometer terdiri dari sebuah tabung vertikal yang terbuka di bagian atasnya dan dihubungkan melekat dengan wadah yang ingin diketahui tekanannya.



Gambar 2.11. *Piezometer Tube* (Munson, 2013)

Manometer melibatkan kolom-kolom fluida dalam keadaan diam, tekanan pada setiap elevasi dalam sebuah fluida yang homogen  $P_0$  dan h adalah jarak vertikal antara  $P_0$  dengan P. Sehingga tekanan pada area A ( $P_A$ ) dapat dihitung dengan mengukur ketinggian  $h_1$ .

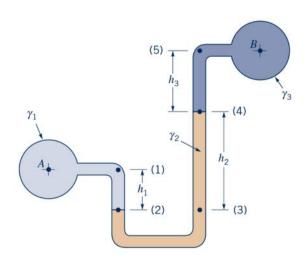
$$P_A = \gamma_1 h_1 \tag{2.38}$$

Dimana  $\gamma_1$ adalah berat spesifik fluida yang ekivalen dengan perkalian density dari fluida dikalikan dengan gravitasi.

$$\gamma = \rho. g \tag{2.39}$$

## 2.8.2. U-tube Manometer

Jenis manometer yang kedua adalah *U-tube* manometer, manometer ini adalah jenis manometer yang umum digunakan untuk mengukur tekanan. Cairan dalam manometer disebut cairan pengukur atau *gage fluid*. Manometer digunakan untuk mengukur tekanan tera yang terdiri dari sebuah tabung yang berbentuk U yang berisi cairan, umumnya mercury (air raksa) atau air. Tekanan p yang terukur adalah berhubungan dengan perbedaan tinggi permukaan air antara dua sisi tabung. Tekanan dapat diukur dengan mengukur perbedaan ketinggian pada kolom yang satu dengan kalom sisi lainnya.



Gambar 2.12. *U-tube* Manometer (Munson, 2013)

Persamaan pressure drop dapa diperoleh dengan persamaan berikut:

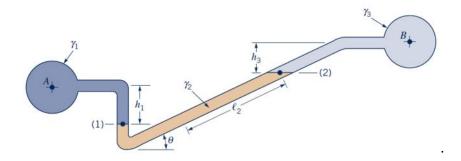
$$P_A - P_A = \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3 - \gamma_1 h_1 \tag{2.40}$$

Untuk *U-tube* dengan fuida yang sama pada kolom tabung A dan kolom tabung B maka perbedaan tekanan dapat menggunakan rumus:

$$P_A - P_B = (\rho_1 - \rho_2)g.h \qquad (2.41)$$

### 2.8.3. Inclined-Tube Manometer

Manometer tipe *inclined-tube manometer* adalah manometer yang sering digunakan untuk mengukur perubahan tekanan yang kecil. Salah satu pipa pad posisi miring terhadap sudut dan perbedaan ketinggian kemiringan  $\ell_2$  yang diukur sepanjang pipa miring.



Gambar 2.13. *Inclined-Tube Manometer* (Munson, 2013)

Perbedaan tekanan dapat dihitung menggunakan rumus:

$$P_A - P_B = \gamma_2 l_2 \sin \theta \qquad (2.42)$$

## 2.9. Pengujian Efisiensi Pada Kondisi Steady State

Pada prakteknya sulit untuk mendapatkan radiasi surya yang seragam pada saat pengujian dilakukan di luar dengan radiasi langsung dari matahari, dikarenakan iklim cuaca yang dapat berubah-ubah setiap saat. Untuk pengujian efisiensi dari rancangan kolektor surya ini menggunakan simulator radiasi surya, pengujian dilakukan pada kondisi *steady state*.

Prosedur pengukuran pada kondisi *steady state* dilakukan berdasarkan EN 12975 bab. 6 bagian 6.1.5. Berdasarkan standar tersebut untuk pengujian indoor menggunakan simulator radiasi surya, kolektor surya diuji menggunakan media simulator lampu. Lampu simulator harus dapat menghasilkan penyinaran sampai ke celah / lobang kolektor paling sedikit 700 Wm<sup>-2</sup>. Nilai diantara 300 Wm<sup>-2</sup> sampai dengan 1000 Wm<sup>-2</sup> juga dapat digunakan untuk pengujian khusus.

Tabel 2.2. Selisih parameter diukur yang diizinkan saat pengujian.

Parameter	Selisih yang dizinkan dari nilai
	tengah
Sinar surya diuji (global)	$\pm 50 \text{ Wm}^{-2}$
Temperatur udara sekitar (indoor)	± 1 K
Temperatur udara sekitar (outdoor)	± 1,5 K
Laju aliran massa fluida	± 1 %
Temperatur fluida pada saat masuk kolektor	± 0,1 K

Sudut kemiringan insiden simulator harus diatur minimal 80% dari radiasi surya yang diuji, di mana variasi sudut kolektor minimal  $\pm$  2% dari nilai pada kondisi normal. Untuk kolektor pelat datar, kondisi ini biasanya akan sesuai saat kemiringan 80% dari simulasi radiasi surya yang diterima pada setiap titik kolektor yang diuji.

Kolektor harus dipasang tidak kurang dari 0,5 m di atas permukaan lantai. Aliran udara panas, seperti yang melewati dinding bangunan, tidak diizinkan untuk melewati kolektor. Dan jika kolektor diuji di atap sebuah gedung, harus terletak minimal 2 m dari tepi atap. Salah satu pengujian jika memungkinkan temperatur masuk ditetapkan pada kondisi ± 3 K dari temperatur sekitar. Jika air sebagai fluida perpindahan panas, suhu maksimum harus paling sedikit sekitar 80° C.

Kondisi lampu simulator pada umumnya akan menghasilkan nilai radiasi yang berbeda pada waktu tertentu, variasi waktu biasanya diebabkan oleh supply listrik yang fluktuasi, oleh karena itu pengujian hendaknya dilakukan setelah lampu beroperasi dalam kondisi stabil, umumnya lampu akan beropeerasi dalam kondisi stabil setelah menyala lebih dari 30 menit. Pyranometer dapat digunakan untuk mengukur radiasi dari solar simulator.

#### 2.10. Prosedur Pengujian Time Constant.

Pengujian dengan waktu konstan dilakukan untuk menentukan data pada periode waktu tertentu. Perpindahan panas pada fluida yang disirkulasikan pada kolektor harus sama dengan laju aliran yang digunakan saat pengujian efisiensi termal, dan tempeartur perpindahan panas fluida masuk ditetapkan kurang lebih sama dengan suhu udara sekitar. Ketika kondisi *steady state* telah tercapai, penutup / *cover* dilepas dan pengukuran berlanjut sampai kondisi kembali *steady state* lagi. Tujuan pengujian ini, kondisi *steady state* diasumsikan tetap ada ketika suhu keluar fluida bervariasi kurang dari 0,05 K per menit.

Waktu T<sub>c</sub> konstan kolektor didefinisikan sebagai waktu yang telah dilalui antara penutup / *cover* dilepas dan titik di mana suhu keluar kolektor naik ke 63,2% dari total peningkatan.

## 2.11. Multiple Linier Regression

Regresi linier adalah salah satu teknik analisis statistik yang digunakan untuk mengestimasi hubungan fungsional di antara dua variable atau lebih, yaitu antara variabel terikat / dependen variable disebut respon yang dilambangkan "Y" dengan satu atau lebih variabel bebas / independen variable disebut penduga / predictor dengan lambang "X". Apabila hanya menggunakan satu variabel bebas untuk memprediksi respons, disebut sebagai regresi linier sederhana, sedangkan apabila terdapat lebih dari 1 variabel bebas, disebut sebagai regresi linier berganda (multiple linear regression).

Tujuan analisis regresi linier berganda adalah untuk mengukur intensitas hubungan antara dua variabel atau lebih dan membuat prediksi perkiraan nilai atas. Secara umum model regresi linier berganda untuk populasi adalah sebagai berikut:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 \beta_3 + \dots + \beta_n X_n \qquad (2.43)$$

Dimana:

Y = variabel terikat / depend variable

 $\beta_0$  = Taksiran bagi parameter konstanta

 $\beta_1, \beta_2, \beta_n$  = Taksiran bagi parameter koefisien regresi

 $X_1, X_2, X_n = \text{variabel bebas } / \text{ independen variable}$ 

### 2.12. Komputasi Dinamika Fluida

Komputasi Dinamika Fluida atau sekarang yang lebih dikenal sebagai *Computational fluid dynamics* (CFD) adalah sekumpulan metodologi yang menggunakan komputer untuk melakukan simulasi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena aliran lainnya.

Komputasi Dinamika Fluida adalah salah satu disiplin ilmu yang mengkaji perilaku dari zat cair dan gas dalam keadaan diam ataupun bergerak dan interaksinya dengan benda padat. Dinamika fluida sering dikatakan sebagai persoalan fisika klasik terbesar yang belum terpecahkan. Kajian dinamika fluida mambahas bebagai karakteristik fluida, maka perlu gambaran karakteristik-karakteristik secara kualitatif dan kuantitatif. Aspek kualitatif berfungsi untuk mengidentifikasikan sifat dasar atau jenis dari karakteristik tersebut (seperti panjang, waktu, tegangan dan kecepatan), sementara aspek kuantitatif memberikan ukuran numerik dari karakterisik tersebut.

Sistem suatu aliran dinamis atau dinamika fluida membutuhkan penyelesaian bantuan komputer yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk memecahkan dan menganalisa masalah-masalah yang melibatkan aliran fluida. Komputer digunakan untuk melakukan jutaan penghitungan yang diperlukan untuk mensimulasikan interkasi antara cairan dan gas dengan benda padat. Solid work adalah salah satu program *software* yang memiliki fasilitas untuk simulasi aliran fluida dinamik secara komputasi.

#### III. METODOLOGI PENELITIAN

Metode pengujian sistem panas surya dan komponen-komponen kolektor surya dilakukan untuk memperoleh nilai unjuk kerja kolektor, pengujian berdasarkan standar EN 12975-2 dengan tahapan mulai studi literatur, perancangan dan pembuatan alat kolektor surya, melakukan pengujian sampai dengan menganalisa data hasil pengujian sehingga diperoleh suatu kesimpulan.

## 3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dari bulan Mei sampai dengan bulan Desember 2016 bertempat di Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

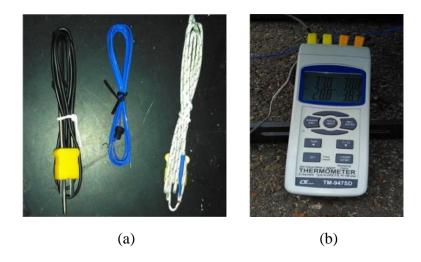
#### 3.2. Alat Dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

### 1. Termokopel.

Termokopel merupakan alat ukur berupa kabel sensor yang berfungsi mengukur temperatur fluida masuk dan keluar kolektor serta temperatur lingkungan. Termokopel ini dihubungkan ke *Multi chanel thermometer data* 

Logger sehingga sinyal analog dari termokopel diubah menjadi sinyal digital, dan temperatur yang diukur dapat dibaca dan direkam.



Gambar 3.1. Alat ukur temperatur (a) *Termoucouple* (b) *Multi chanel thermometer data Logger* 

## 2. Solari Meter.

Solari meter berfungsi untuk mengukur intensitas cahaya sumber energi radiasi. Solari meter ini diletakkan dibagian atas kolektor surya dengan tujuan agar intensitas radiasi solar simulator yang diterima oleh Sensor Solari meter sama dengan intensitas radiasi solar simulator yang diterima oleh kolektor.



Gambar 3.2. Solari meter

## 3. Pompa sirkulasi.

Pompa sirkulasi berfungsi mendistribusi fluida ke sepanjang pipa *riser* kolektor surya, laju aliran air yang keluar dari pompa merupakan fluida masuk ke dalam pipa *riser* kolektor. Untuk mengatur laju aliran air tersebut digunakan sebuah *regulator* voltase dan kran.



Gambar 3.3. pompa

## 4. Lampu simulator.

Lampu simulator merupakan suatu perangkat yang menyediakan pencahayaan mendekati sinar matahari alami. Tujuan penggunaan dari solar simulator adalah sebagai sumber radiasi pengganti matahari sehingga penggujian suatu perangkat dapat dikerjakan di dalam ruangan. Lampu simulator yang digunakan adalah *Philips Halolite Floodlight* - QVF135 lengkap dengan lampu halogen R7s daya 500 Watt.



Gambar 3.4. Lampu Simulator

## 5. Triplek.

Triplek 5 mm digunakan sebagai *casing* paling luar. Triplek tersebut dibentuk menyesuaikan luas pelat kolektor yang telah diisolasi menggunakan *glasswoll* atau busa.

### 6. Kaca.

Kaca berfungsi sebagai *cover* untuk mengurangi rugi panas secara konveksi menuju lingkungan dan mentransmisikan energi surya ke pelat penyerap. Kaca yang digunakan sebagai *cover* adalah kaca bening tebal 5 mm.



Gambar 3.5. Kaca penutup

### 7. Isolasi.

untuk meminimalisasi kehilangan panas secara konduksi dari absorber menuju lingkungan digunakan isalolasi berbahan *glasswoll*, dengan ketebalan isolasi 50 mm.



Gambar 3.6. Isolasi glasswool

## 8. Pelat tembaga.

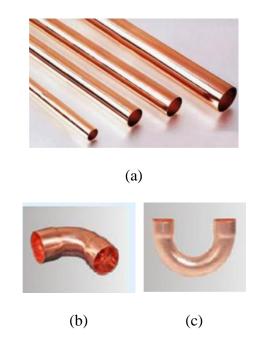
Pelat penyerap menggunakan bahan tembaga untuk menyerap panas dari radiasi lampu simulator, pelat yang digunakan adalah pelat tembaga tebal 0,5 mm.



Gambar 3.7. Pelat tembaga

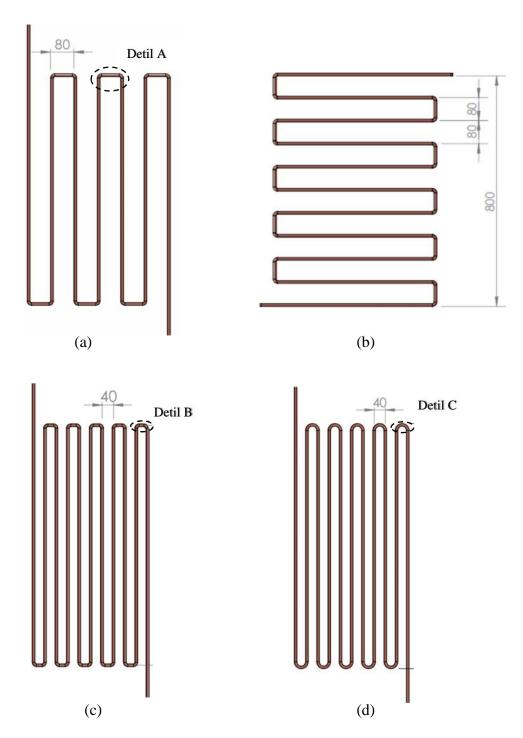
## 9. Pipa dan elbow.

Rangakaian kolektor surya menggunakan pipa tembaga ukuran diameter luar 9,5 mm dan tebal 0,5 mm. Sambungan yang digunakan adalah elbow jenis  $short\ elbow\ 90^0$  atau  $elbow\ 180^0\ (U-bend)$ 



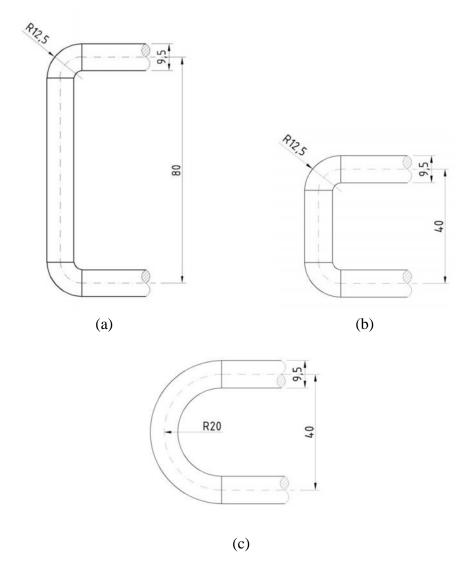
Gambar 3.8. (a). Pipa, (b). *elbow* 90<sup>0</sup>, (c). *elbow* 180<sup>0</sup> atau *U-bend* 

Kemudian pipa 3/8" dan sambungan *short elbow*  $90^0$  dan sambungan *U-bend* dirangkai menjadi pipa *riser*.



Gambar 3.9. Rangkaian Pipa Tembaga. (a). Rangkaian pipa I (W = 80 mm, *short elbow* 90°, vertikal). (b). Rangkaian pipa II (W = 80 mm, *short elbow* 90°, horizontal). (c). Rangkaian pipa III (W = 40 mm, *short elbow* 90°, vertikal). (d). Rangkaian pipa IV (W = 40 mm, *U-bend* 180°, vertikal)

Gambar di bawah menunjukkan detil jari-jari *elbow* pada *design* pipa kolektor surya.



Gambar 3.10. Gambar detil *elbow*; (a) pipa dengan sambungan *short elbow* 90<sup>0</sup> jarak pipa 80 mm, (b) pipa dengan sambungan *short elbow* 90<sup>0</sup> jarak pipa 40 mm, (c) pipa dengan sambungan *U-bend* 180<sup>0</sup> jarak pipa 40mm.

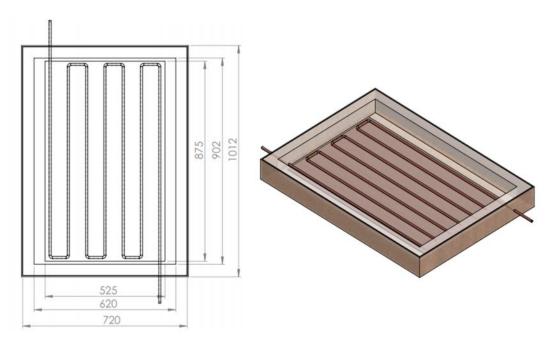
### 3.3. Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini secara garis besar dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu *design* dan pembuatan alat, pengujian, serta analisa data pengujian kolektor.

## 3.3.1. Design Kolektor surya

Pembuatan kolektor surya divariasikan empat jenis berdasarkan susunan rangkaian aliran pipa, jarak antara pipa (W), dan jenis sambungan *elbow* yang digunakan.

1. Kolektor surya I (W = 80 mm, short elbow  $90^{\circ}$ , vertikal).



Gambar 3.11. Design kolektor surya I

Kolektor surya terdiri dari pelat tembaga yang ditekuk / *roll bond* mengikuti bentuk pipa dengan spesifikasi sebagai berikut:

Ukuran pelat tembaga :  $0.875 \text{ m} \times 0.525 \text{ m} \times 0.0005 \text{ m}$ 

Tebal pelat : 0,005 m

Diameter luar pipa riser : 0.009 m

Jumlah segment pipa : 7

Panjang pipa total : 6.554 m

Panjang pipa pada pelat : 6,125 m

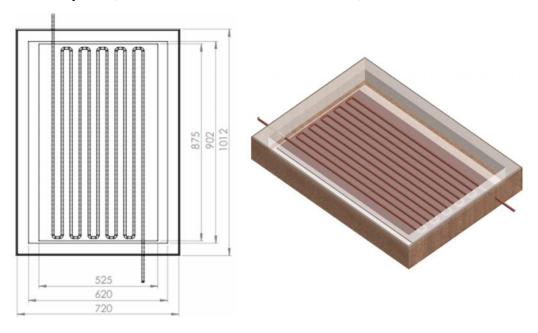
525 620

2. Kolektor surya II (W = 80 mm, short elbow  $90^{\circ}$ , horizontal).

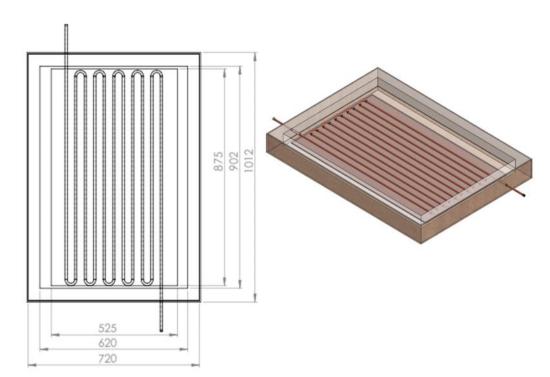
Gambar 3.12. Design kolektor surya II.

Dengan luasan pelat tembaga yang sama susunan pipa *riser* dirangkai horizontal terhadap pelat. Pada rangkaian kolektor surya II jumlah segmen sebelas, panjang total pipa 6.709 m dan panjang pipa yang bersentuhan pelat adalah 5.775 m.

3. Kolektor surya III (W = 40 mm, short elbow  $90^{\circ}$ , vertikal).



Gambar 3.13. *Design* kolektor surya III



4. Kolektor surya IV (W = 40 mm, *U-bend*  $180^{\circ}$ , vertikal).

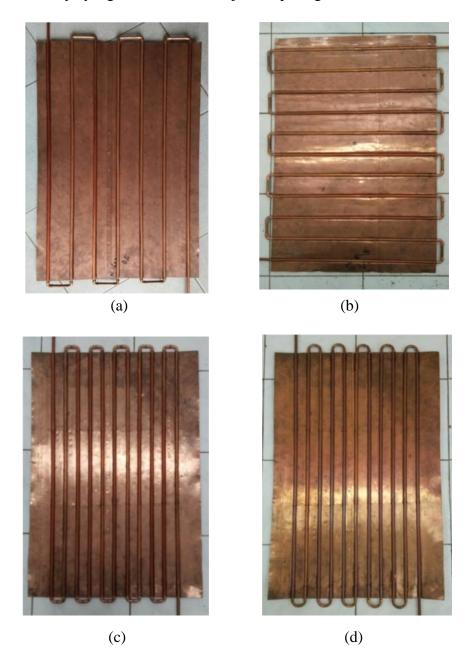
Gambar 3.14. Design kolektor surya IV

Pada rangkaian kolektor surya III dan IV pipa *riser* dirancang vertikal terhadap pelat, sama dengan rangkaian kolektor surya I namun jarak pipa (W) lebih rapat yaitu 40 mm.

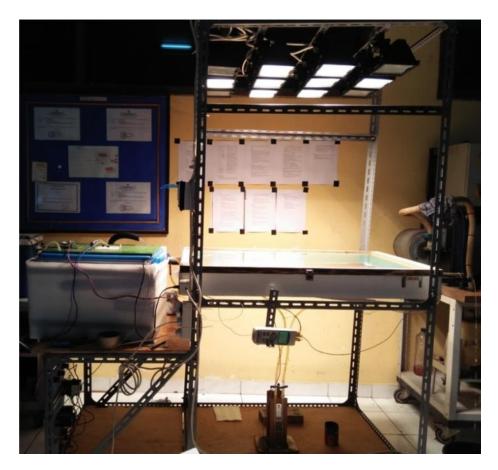
Kolektor surya III memiliki panjang total pipa 10.159 m dan kolektor surya IV memiliki panjang total pipa 10.053 m. Untuk panjang pipa yang bersentuhan pelat kedua kolektor ini sama yaitu 9.625 m. Hal ini disebabkan oleh *elbow* dan U-bend yang diletakkan pada sisi bagian luar pelat *absorber*.

## 3.3.2. Pembuatan Kolektor surya

Pada tahapan ini, kolektor surya dirakit sesuai *design* yang telah ditentukan. Kolektor surya yang telah dirakit ditunjukkan pada gambar berikut:



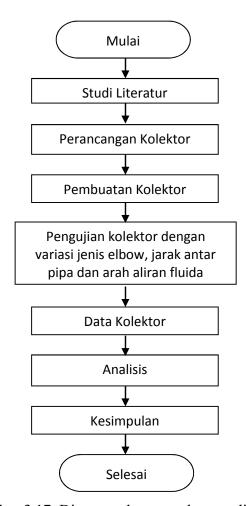
Gambar 3.15. *Assembling* pipa dan pelat kolektor surya. (a). W = 80 mm, *short elbow*  $90^{0}$ , vertikal. (b). W = 80 mm, *short elbow*  $90^{0}$ , horizontal. (c). W = 40 mm, *short elbow*  $90^{0}$ , vertikal. (d). W = 40 mm, *U-bend*  $180^{0}$ , vertikal).



Gambar 3.16. Satu set alat pengujian kolektor surya

## 3.3.3 Tahap Pengujian

Pengujian dilakukan berdasarkan standar EN 12975-2 yang dipublikasikan oleh komite standarisasi eropa/ *Comite Europeenne De Normalization* (CEN) pada tahun 2001 yang kemudian direvisi pada tahun 2006. EN 12975-2 adalah standar yang berkaitan dengan metode pengujian system panas surya dan komponen-komponen kolektor surya.



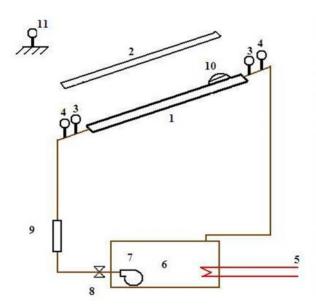
Langkah kerja dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.17

Gambar 3.17. Diagram alur prosedur penelitian

# 3.3.3.1 Pengujian Efisiensi Pada Kondisi Steady-State Menggunakan Solar Simulator

- 1. Pengujian dilakukan pada 4 (empat) variasi temperatur fluida inlet ( $T_{\rm fi}$ ) berbeda yakni mulai dari temperature mendekati nilai temperatur lingkungan sampai dengan mendekati nilai temperatur keluar, dan masing-masing dilakukan 4 (empat) kali pengujian.
- 2. Pengukuran Temperatur *fluida outlet* (T<sub>fo</sub>) disetiap pengujian

- Pengukuran Solar Irradiation Simulator disetiap pengujian menggunakan Pyranometers, dengan waktu pengkondisian sebelum pengujian selama 20 menit.
- 4. Pengukuran udara lingkungan.
- 5. Pengukuran pressure drop



Gambar 3.18. Skema Pengujian: 1. Kolektor 2. *Solar Simulator* 3. *Inlet* dan *Outlet Pressure Gauge* 4. *Inlet* dan *Outlet Sensor Temperature* 5. *Heater* 6. *Storage Tank* 7. Pampa Sirkulasi 8. Katup 9. Flowmeter 10. Pyranometer 11. *Ambient Sensor Temperature* 

### 3.3.3.2 Simulasi Multiple Linear Regression

Dari data hasil pengujian kolektor pelat datar kondisi steady yang didapat kemudian dianalisa menggunakan regresi linear berganda. Analisis regresi linier berganda adalah hubungan secara linear antara dua atau lebih variabel independen (x1, x2,....xp) dengan variabel dependen (Y). Analisis ini untuk mengetahui arah hubungan antara variabel independen dengan variabel dependen apakah masingmasing variabel independen berhubungan positif atau negatif dan untuk

memprediksi nilai dari variabel dependen apabila nilai variabel independen mengalami kenaikan atau penurunan. Data yang digunakan biasanya berskala interval atau rasio.

Persamaan regresi linear berganda sebagai berikut:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_p x_p \qquad \dots \qquad (3.1)$$

Dari model regresi linear di atas, untuk menentukan parameter panas pada persamaan energi berguna (persamaan 5) jika parameter dimasukkan ke dalam model regresi (persamaan 31) maka:

$$Y = Q_{II}$$

 $\beta_0 = Konstanta$ 

$$\beta_1 = F'(\tau \alpha)_{\dot{e}}$$

$$\beta_3 = C_2$$

$$\beta_n = C_5$$

$$X_1 = S$$

$$X_2 = T_{fm} - T_a$$

$$X_3 = \left(T_{fm} - T_a\right)^2$$

$$X_n = \left(\frac{dT_{fm}}{dt}\right)$$

Untuk mengevaluasi hasil regresi linear yang diperoleh terhadap data pengujian dilakukan uji hipotesa dengan menggunakan metode uji T rasio atau Uji- t (*t-test*). Nilai T statistic (T<sub>Stat</sub>) akan menjadi kriteria yang digunakan untuk menentukan hipotesa nol ditolak atau diterima. Jika nilai T statistic lebih besar dari nilai T kritis maka hipotesa nol ditolak, dan jika nilai T statistic lebih kecil dari T kritis

maka hipotesa nol diterima. Hipotesa nol ditolak atau diterima menunjukkan ada atau tidak ada hubungan antara satu variable dengan variabel lainnya.

## 3.3.3 Simulasi Komputasi Dinamika Fluida

Pada penelitian ini simulasi dilakukan dengan menggunakan program Komputasi Dinamika Fluida (CFD) yang ada dalam software solid work, kemudian hasil yang diperoleh divalidasi dengan hasil pengujian unjuk kerja termal kolektor berdasarkan beberapa variasi laju aliran massa fluida dan tingkat intensitas radiasi yang berbeda dan mengukur pressure drop yang terjadi.

#### V. KESIMPULAN DAN SARAN

## 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian unjuk kerja kolektor surya plat datar tipe serpentin dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1. Unjuk kerja thermal dan *pressure drop* kolektor surya susunan aliran pipa riser vertikal lebih baik dibandingkan dengan aliran horizontal.
- 2. Kolektor surya jarak pipa riser (W) 40 mm memiliki unjuk kerja thermal (effisiensi perpindahan panas) lebih baik dari pada jarak pipa riser (W) 80 mm, namun tidak lebih baik dalam hal *pressure drop*.
- 3. Unjuk kerja thermal kolektor surya menggunakan sambungan elbow 90<sup>0</sup> lebih baik dari pada sambungan *U-bend* 180<sup>0</sup>, namun perbedaan unjuk kerja tidak terlalu signifikan, terutama dari segi unjuk kerja thermal rugirugi panas dan *pressure drop*.
- 4. Unjuk kerja thermal kolektor surya meningkat dan lebih baik saat laju aliran 0,0075 Kg/s dan menggunakan kaca penutup.
- 5. Hasil uji statistik menunjukkan bahwa hipotesa nol ditolak, artinya ada keterkaitan antara parameter mlai koefisien rugi-rugi ( $F'U_L$ ) dan effisiensi terhadap Energi berguna ( $Q_u$ ).
- 6. Nilai *Pressure drop* yang diperoleh melalui pengujian mendekati dan ada kesamaan dengan pressure drop hasil simulasi, dimana nilai *pressure drop* hasil pengujian masuk dalam *range* nilai *output* simulasi yang terdiri dari

banyak iterasi. Dalam hal perubahan desain dan rangkaian kolektor surya dapat dianalisa menggunakan simulasi aliran pada program solid work.

## 5.2 Saran

Berdasarkan pengujian dan analisa yang telah dilakukan, maka untuk pengembangan penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut terhadap unjuk kerja termal kolektor surya berupa perbandingan hasil pengujian dan hasil simulasi melalui program komputasi fluida.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- 1. Abdel-Khalik S.I., 1976. *Heat removal factor for a flat-plate solar collector with a serpentine tube. Solar Energy* Vol.18, 59-64. Elsevier.
- Auliya Burhanuddin, 2006. Karakteristik kolektor surya plat datar dengan variasi jarak kaca penutup dan sudut kemiringan kolektor. Skripsi Universitas Sebelas Maret.
- 3. Biro Perencanaan dan Kerja Sama (2015). *Renstra KESDM 2015-2019*. Kementerian Energi Sumber Daya Mineral.
- 4. Bruce R. Munson, et al., 2013. Fundamentals of fluid mechanics, 7th edition : John Wiley & Sons, Inc.
- 5. Davide Del Col, Andrea Padovan, Matteo Bortolato, Marco Dai Prè, Enrico Zambolin., 2013. *Thermal performance of flat plate solar collectors with sheet-and-tube and roll-bond absorbers. Energy* Vol 58, 258e269. Elsevier.
- 6. Duffie, John and William Beckman. John Wiley & Sons, Inc., 1991.

  Solar Engineering of Thermal Processes. New York. John Wiley & Sons, Inc.
- 7. D. Rojas. et al., 2007, "Thermal Performance Testing of Flat-Plate Collectors", *Solar Energy* 82 (2008) 746–757.
- 8. EN 12975-2. Thermal solar systems and components e solar collector part 2: test methods. Brussels: CEN; 2006.

- 9. Frang P Incropera., 2007. Fundamentals of Heat and mass transfer, 6<sup>th</sup> Edition, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- 10. Ghamari, D.M., Worth, R.A., 1992. "The effect of tube spacing on the cost effectiveness of a flat-plate solar collector". *Renewable Energy* 2, 603–606.
- 11. Goswami D. Yogi., 2015. *Principles Of Solar Engineering*, Taylor & Francis Group, LLC.
- 12. He-Fei Zhang dan Z. Lavan, 1985. *Thermal performance of serpentine absorber plate*. Solar Energy Vol.34, 175-177. Elsevier.
- 13. J. P Holman., 1997. Perpindahan Kalor. Erlangga., Jakarta.
- 14. James Allan., D. Zahir. S. Siniska, dan Mauricette. L, 2015. Performance testing of thermal and photovoltaic thermal solar collectors, Energy Science & Engineering published by the Society of Chemical Industry dan John Wiley & Sons Ltd.
- 15. Razika I et al, 2013. The effects of volumetric flow rate and inclination angle on the performance of a solar thermal collector. Energy Convers Manage, Elsevier.
- 16. Richa´rd Kicsiny, 2014, "Multiple Linear Regression Based Model For Solar Collectors", *Solar Energy* 110 (2014) 496–506.
- 17. Shafrqat Hussain., Stefphen J. Horrison., 2015. Experimental and numerical investigations of passive air cooling of a residential flat-plat solar collector under stagnation conditions. Solar energy 122 (2015) 1023 1036, Elsevier.
- 18. Soteris A. Kalogirou., 2003. *Solar Energy Engineering, Processes and Systems*. 2<sup>nd</sup>Edition, Elsevier.

- 19. S.N. Agbo dan C.E. Okeke. 2007. "Correlations Between Collector Performance and Tube Spacing for Various Absorber Plate Material in Natural Circulation Solar Water Heater" *Trends in Applied Sciences Research* 2 (3): 251-254,2007.
- 20. Sulaeman dan Darul Mapasid, 2013. Analisa efisiensi kolektor surya plat datar dengan debit aliran fluida 3 -10 liter/menit. JurnalTeknik Mesin Vol.3, No.1, 29-32.
- 21. Tang Qianyu., Wang Hua., Wang Huitao., Qing Shan., 2011. Serpentine flat plate collector thermal performance testing. Advanced material research vols 261-263. Trans Tech Publications, Switzerland.
- 22. Yunus A. Cengel. 2002. *Heat and Mass Transfer A Practical Approach*, *Third Edition*. McGraw-Hill.