

## PERBANDINGAN FAKTOR GESEKAN PADA KOLEKTOR ENERGI SURYA JENIS PLAT DATAR DENGAN SALURAN BERBELOK-BELOK DAN LURUS

Nursubyakto, FA Widiharsa, Rusdijanto<sup>1</sup>, Heris Pamuntjar<sup>2</sup>

### Abstraksi

Setiap fluida yang mengalir melewati saluran, umumnya saluran berbentuk pipa atau *duct*, selalu mengalami faktor gesekan (*friction factor*). Semakin besar faktor gesekan maka semakin besar pula energi yang diperlukan untuk menggerakkan fluida tersebut melewati saluran. Ditinjau dari rezim aliran terlihat aliran turbulen akan menimbulkan faktor gesekan yang lebih besar dibandingkan terhadap aliran laminar. Suatu fluida yang melewati saluran lengkung akan menimbulkan turbulensi pada aliran yang laminar di mana aliran tersebut disebut dengan aliran sekunder. Aliran sekunder (*secondary flow*) adalah aliran yang berpusar. Aliran ini terjadi pada aliran fluida yang melewati saluran yang melengkung atau berbelok dan profil aliran adalah kembar dan saling berlawanan arah. Terjadinya aliran sekunder ini diakibatkan oleh keseimbangan antara tekanan dan gaya sentrifugal di dinding sisi luar saluran. Perlakuan pemanasan pada dinding saluran akan menimbulkan orientasi aliran sekunder pada sumbu simetri aliran di mana sumbu simetri akan berputar berlawanan arah jarum jam. Jika saluran berbelok disambung secara seri maka aliran sekunder akan terus berputar-putar (*spiral*) melewati saluran. Keuntungan dengan adanya aliran sekunder yang berputar ini adalah laju perpindahan panas meningkat meskipun aliran ini akan menimbulkan kerugian tekanan jika dibandingkan dengan saluran dengan pipa lurus. Kerugian tekanan digambarkan dengan faktor gesekan, semakin besar nilai faktor gesekan maka kerugian tekanan juga akan naik. Dimensi pipa yang diuji baik untuk pipa berbelok maupun lurus adalah 0,0127 m, panjang pipa 1,161 m untuk pipa lurus dan 1,81 m bagi pipa berbelok, serta jari-jari kelengkungan pipa berbelok adalah 0,225 m. Dimensi kolektor yang digunakan baik untuk pipa lurus maupun berbelok adalah 1,0 m panjang, 0,5 m lebar dan tinggi 0,4 m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengoperasian kolektor antara jam 09:45 sampai 11:30 faktor gesekan kolektor surya plat datar dengan saluran berbelok atau lengkung memberikan nilai lebih tinggi dibandingkan dengan jenis pipa lurus. Hal ini memberi peluang bahwa pemakaian saluran dengan pipa lengkung akan memberikan hasil yang lebih baik pada jam di mana intensitas matahari mencapai puncaknya, yaitu sekitar tengah hari.

**Kata Kunci:** Kolektor Surya, Aliran Sekunder, Saluran Lengkung, Faktor Gesekan

### PENDAHULUAN

Pipa lengkung atau pipa berbelok digunakan secara luas dalam peralatan industri seperti penukar kalor spiral, mesin-mesin pendingin, reaktor-reaktor pembangkit panas dan banyak ditemui pula pada mesin-mesin panas. Aliran pada saluran lengkung dikarakteristikan dengan bilangan Dean dengan ditunjukkan oleh pusaran kembar yang berputar berlawanan arah yang tegak lurus pada aliran utama. Pusaran kembar yang berputar berlawanan arah ini umumnya disebut dengan aliran sekunder. Timbulnya aliran sekunder ini disebabkan oleh adanya gaya sentrifugal sewaktu aliran melewati belokan. Pola aliran yang sama dapat pula disebabkan oleh gaya apung pada arah gravitasi atau medan putaran. Pola tersebut dibangkitkan karena adanya gaya apung atau gaya Coriolis.

Pengaruh gaya apung pada Aliran Sekunder sebagai akibat dari adanya pengaruh temperatur yang dapat merubah kerapatan fluida menyebabkan orientasi sumbu simetri Aliran Sekunder akibat gaya sentrifugal tidak lagi terjadi pada sumbu datarnya. Aliran Sekunder ini dapat berubah posisinya karena posisi sumbu bergerak secara melingkar atau

<sup>1</sup> Dosen Jurusan Mesin Fakultas Teknik Unmer Malang

<sup>2</sup> Dosen Jurusan Teknik Informatika Fakultas Teknologi Informasi Unmer Malang

berputar dengan dorongan dari gaya apung terhadap posisi sumbu simetrisnya sesuai dengan tempat kedudukan aliran sekunder pada saluran lengkung.

## **KAJIAN PUSTAKA**

Aliran sekunder pertama kali dianalisa oleh Dean (Dean 1928) yang menggunakan teori pertubasi dalam studi teoritisnya pada gerakan fluida yang melewati saluran lengkung. Dia mengemukakan karakteristik pusaran kembar dari aliran sekunder dan dia menunjukkan bahwa keserupaan dinamika aliran yang mana aliran sekunder muncul sebagai aliran turbulen di dalam aliran yang laminar sekalipun. Munculnya aliran sekunder adalah akibat dari kesetimbangan antara gaya sentrifugal dan tekanan saat fluida mengenai dinding sisi luar. Aliran semacam itu didefinisikan dengan bilangan tanpa dimensi  $K = Re (d/D)^{1/2}$ , dan sekarang dinamai dengan bilangan Dean, di mana  $Re$  adalah bilangan Reynolds,  $d$  adalah diameter pipa, dan  $D$  adalah jari-jari kelengkungan pipa. Pengertian secara fisik dari bilangan Dean adalah perbandingan akar dari perkalian gaya inersia dengan gaya sentrifugal terhadap gaya hambat.

Saat ini telah menjadi jelas bahwa, karakteristik aliran panas dan aliran fluida pada saluran lengkung secara nyata dipengaruhi oleh gerakan aliran sekunder. Tingkat pengaruh oleh tambahan pusaran Dean sejauh ini masih tetap belum jelas. Penelitian sampai saat ini telah dibuat untuk menunjukkan bahwa pola aliran yang mirip dengan aliran sekunder dapat muncul pada saluran yang dipanasi meskipun tanpa adanya gaya sentrifugal dalam pipa lengkung.

Pada aliran yang melewati saluran lurus kemudian dikenai pemanasan yang tidak seragam dan intensitas berbeda dapat menyebabkan gaya apung yang dapat menimbulkan arus konvektive di dalam aliran. Peristiwa ini dapat menghasilkan aliran sekunder dalam aliran. Kontribusi aliran sekunder sebagai akibat dari gaya apung ini bukan lagi memperkuat aliran sekunder akibat gaya sentrifugal bila kedua aliran terjadi bersamaan. Namun aliran sekunder akibat gaya apung akan merubah orientasi aliran sekunder akibat gaya sentrifugal sehingga kesimetrisan aliran sekunder akibat gaya sentrifugal tidak terletak pada sumbu horisontal.

Begitu pula bila aliran fluida melewati saluran lurus pada sekeliling dinding pipa dikenai panas maka aliran sekunder akibat gaya apung dapat terjadi. Kemudian penelitian ini menjadi perhatian utama pada kerja eksperimental dengan penelaahan lebih difokuskan pada pipa yang dipanasi secara seragam umumnya pemanasan seragam sekeliling dinding pipa.

Berbagai jenis kolektor surya adalah kolektor jenis plat datar, terpusat, dan terpantul. Umumnya kolektor surya jenis plat datar terbuat dari pipa lurus yang disusun secara paralel. Energi surya yang dapat diterima oleh kolektor dapat berupa energi datang

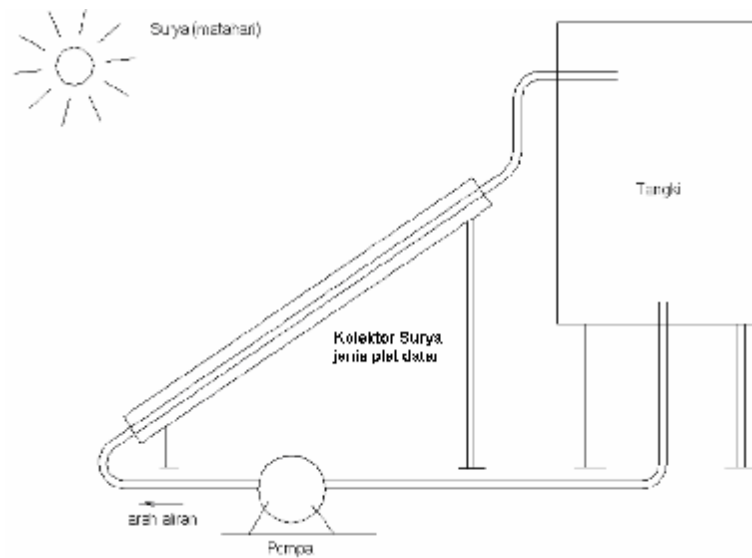
secara radiasi lurus (*beam*), terpencah (*diffused*), dan terpantul (*reflected*). Kolektor plat datar dapat menangkap ketiga jenis radiasi ini dibandingkan dengan jenis kolektor yang lain.

Adanya aliran di dalam pipa di mana pipa terpanasi sebagian atau seluruhnya akan timbul aliran sekunder. Kolektor surya, tanpa terkecuali, akan mengalami aliran sekunder. Cheng (Cheng and Akiyama 1970) dengan menggunakan analisa numerik menunjukkan adanya aliran sekunder dari fluida yang melewati pipa lengkung atau pipa berbelok. Soh (Soh and Berger 1987) telah menunjukkan variasi kelengkungan terhadap aliran sekunder dan cenderung makin kuat pada kelengkungan yang kecil. Secara eksperimental, Cheng (Cheng and Mok 1970) mendapatkan bahwa aliran sekunder akibat ketidakstabilan gaya sentrifugal dapat terjadi pada aliran yang melewati lengkung. Pengaruh pemanasan pada pipa yang melengkung ternyata juga menimbulkan aliran sekunder seperti yang diteliti oleh Cheng (Cheng and Yuen 1987). Aliran sekunder dalam aliran fluida selain disebabkan oleh gaya sentrifugal aliran tersebut dapat juga ditimbulkan oleh gaya coriolis bila aliran fluida itu melewati saluran lengkung. Aliran ini dapat juga ditimbulkan oleh perbedaan densitas karena adanya perbedaan temperatur dalam aliran fluida Lee (Lee, Simon et al. 1985).

Mempelajari dari kerja beberapa peneliti di atas maka dapat disimpulkan bahwa aliran sekunder dapat terjadi karena aliran melewati saluran lengkung, perbedaan densitas di dalam pipa karena adanya pengaruh panas dan karena adanya gaya coriolis. Bila tidak ada gaya coriolis maka pipa berarti tidak berputar. Sesuai dengan penelitian ini pipa aliran dalam kondisi diam maka aliran sekunder akan terjadi karena fluida melewati pipa berbelok dan fluida mengalami perbedaan densitas dengan adanya pemanasan dari luar pipa.

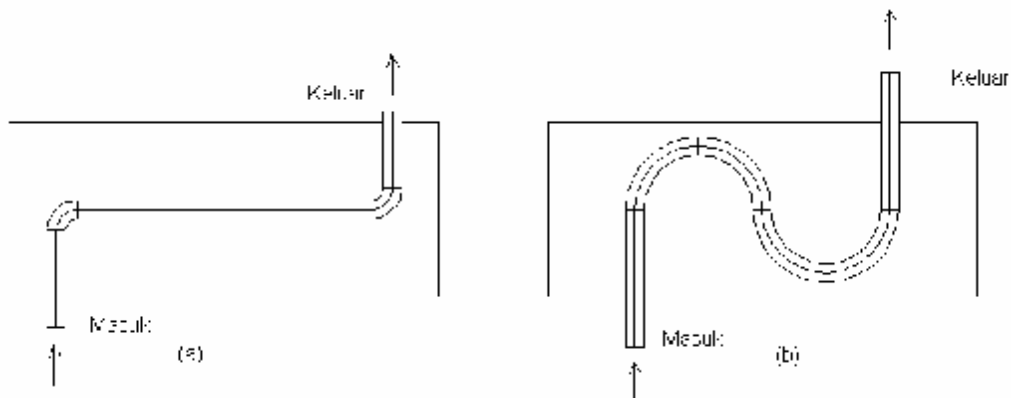
Di dalam penelitian ini aliran sekunder disebabkan oleh aliran bebas sebagai akibat dari perbedaan densitas karena fluida mengalir di dalam kolektor plat datar tenaga surya mengalir secara konveksi bebas. Perbedaan densitas (kerapatan) akan menimbulkan gaya apung (Lee, Simon et al. 1985) dan menimbulkan gerakan aliran.

Bilangan Dean adalah perkalian bilangan Reynolds dengan akar dari perbandingan diameter pipa dan diameter kelengkungan. Semakin besar diameter kelengkungan maka pipa lengkung akan identik dengan pipa lurus dan karakteristiknya dapat diasumsikan mengikuti pipa lurus. Oleh karena itu untuk menimbulkan aliran sekunder yang disebabkan oleh gaya sentrifugal maka perbandingan kelengkungan harus terbatas. Aliran sekunder yang timbul pada saluran persegi, secara teoritis dibahas oleh Hwang (Hwang and Chao 1991) serta oleh Chandratilleke (Chandratilleke and Nursubyakto 2003). Secara eksperimental, aliran sekunder dengan penampang persegi diteliti oleh Sturgis (Sturgis and Mudawar 1999). Hasil kerja mereka menunjukkan bahwa pengaruh pemanasan pada saluran dapat meningkatkan laju perpindahan panas. Hasil ini memperkuat bahwa pengaruh panas dari luar terhadap pipa dapat mempengaruhi aliran.



**Gambar 1. Skets Proses Pemanasan Dengan Tenaga Surya Pada Kolektor Plat Datar**

Aliran sekunder berputar telah diteliti oleh Mokrani (Mokrani, C. et al. 1997). Agar aliran sekunder dapat berputar maka pipa yang dialiri air perlu dibengkokkan dan dipuntir. Seluruh permukaan pipa dipanasi secara merata/seragam. Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Mokrani menunjukkan adanya peningkatan proses perpindahan panas yang cukup signifikan. Dengan asumsi bahwa aliran sekunder yang berputar dapat meningkatkan proses perpindahan panas maka cara demikian akan diikuti dalam penelitian ini. Perbedaan yang mencolok dari penelitian yang dilakukan oleh Mokrani dan penelitian ini adalah cara memperlakukan pipa dan proses pemanasan. Di dalam penelitian ini pipa cukup dibengkokkan setengah lingkaran dan disambungkan dengan setengah lingkaran yang lain secara seri. Untuk proses pemanasan, pipa yang disambung-sambung tadi menjadi berbelok-belok dan seluruh dari separuh bagian atasnya dipanasi dengan separuh bagiannya terbenam atau terisolasi. Proses pemanasan demikian sering dijumpai pada kolektor tenaga surya jenis plat datar, lihat gambar 2.



**Gambar 2. Skets Kolektor Surya Dengan Saluran Pipa Berbelok Dan Pipa Lurus**

## **METODOLOGI**

Metode penelitian eksperimental adalah metode penelitian yang digunakan dalam melaksanakan penelitian ini. Metode penelitian eksperimental dibangun dengan membuat alat penelitian di mana diharapkan hasil penelitian dengan menggunakan metode ini sesuai dengan fenomena alam yang sesungguhnya.

Sketsa pengujian dapat ditunjukkan pada Gambar 2. Dimensi yang digunakan untuk pipa lurus adalah diameter pipa 12,7 mm dan panjang 1610 mm sedangkan bagi pipa berbelok-belok diameter 12,7 mm dan panjang pipa adalah 1810 mm dengan diameter kelengkungan sebesar 225 mm. Letak kemiringan kolektor di atas rangka pendukung adalah  $11^\circ$  untuk menyesuaikan dengan kondisi lapangan kota Malang. Peralatan telah diuji coba pada 26 Agustus 2007 sampai September 2007. Pada bulan-bulan tersebut intensitas panas matahari cukup memadai.

Dalam perhitungan dari hasil eksperimental beberapa asumsi ditentukan sbb :

1. Aliran steady.
2. Air sebagai fluida kerja dalam kondisi cairan jenuh.
3. Temperatur plat adalah seragam di seluruh plat absorber.
4. Sifat-sifat fluida konstan.

### **Prosedur Pengujian Eksperimental**

Kolektor surya yang telah dirakit dibawa ke udara terbuka diharapkan bahwa kolektor tersebut dapat langsung terkena matahari. Atur kemiringan kolektor  $11^\circ$  agar radiasi matahari beam dapat tegak lurus dengan permukaan plat absorber. Kemiringan tersebut menyesuaikan dengan letak kota Malang guna radiasi beam dapat mencapai tegak lurus ke plat absorber. Setelah peletakan kolektor sesuai dengan kondisi maksimal maka pengujian dilakukan berurutan sebagai berikut,

1. Pasang model pipa saluran, model pipa lurus, pada kolektor surya.
2. Isi tangki penampung air sampai  $\frac{3}{4}$  bagian kemudian tutup.
3. Buka seluruh kran air lalu jalankan pompa agar air dapat mengisi secara penuh pipa yang melekat dengan plat absorber. Setelah beberapa menit dan dipandang pipa telah terisi oleh air maka matikan pompa dan biarkan kolektor terkena sinar matahari.
4. Dengan selang waktu yang telah ditentukan catat intensitas radiasi, temperatur air masuk, temperatur air keluar, temperatur plat absorber, dan temperatur air di dalam tangki.
5. Catat beda tekanan pipa pada pipa U.
6. Suntikkan cairan berwarna pada bagian pipa transparan dan ukur waktu yang diperlukan cairan berwarna mencapai jarak 5 cm dengan stop watch untuk mencatat kecepatan air yang mengalir di dalam pipa.

7. Tunggu 10 menit dan lanjutkan prosedur 4-6 untuk merekam data berikutnya. Pencatatan dilakukan mulai jam 09:00 sampai 14:00.
8. Setelah seluruh rangkaian pencatatan data selesai bongkar model pipa saluran dengan model lain, pipa berbelok-belok, kemudian letakkan pada kolektor surya.
9. Ulangi prosedur 2-7 untuk pencatatan data satu model kolektor.

### **Faktor Gesekan**

Aliran fluida melalui pipa dikategorikan ke dalam dua rezim yaitu aliran laminar dan aliran turbulen. Karakteristik aliran tersebut dibedakan dari besarnya bilangan Reynolds (Re). Transisi aliran dari laminar ke turbulen suatu aliran di dalam pipa sebesar  $Re_c = 2300$ .

Di dalam penelitian ini akibat adanya aliran sekunder, yang berarti aliran turbulen terjadi di dalam aliran laminar, maka sulit menentukan besaran transisi bilangan Reynoldnya. Oleh karena itu transisi aliran tidak lagi tergantung pada bilangan Reynolds sendiri namun melibatkan perbandingan antara diameter pipa dan diameter kelengkungan. Perkalian bilangan Reynolds dengan perbandingan diameter pipa dan diameter tersebut disebut dengan bilangan Dean. Penurunan tekanan adanya belokan secara umum ditulis dengan,

$$\frac{\Delta P}{\rho} = f \frac{L}{D} \frac{\bar{W}^2}{2} \quad (1)$$

Dari persamaan (1) maka faktor gesekan dapat dihitung berdasarkan,

$$f = 2 \frac{\Delta P}{\rho} \frac{D}{L \bar{W}^2} \quad (2)$$

Di mana  $\Delta P$  adalah perbedaan tekanan pada sisi masuk dan keluar pipa,  $\rho$  merupakan kerapatan fluida, L sebagai panjang pipa, D adalah diameter pipa, dan  $\bar{W}$  adalah besaran kecepatan rata-rata pipa.

Hasil perhitungan kemiringan kolektor sumbu timur-barat dengan persamaan diatas untuk kota Malang yang terletak pada  $11^\circ$  Lintang Selatan dan  $112^\circ$  Bujur Timur dan termasuk wilayah waktu Indonesia Barat (WIB) dengan garis bujur standar adalah  $95^\circ$ BT. Sehingga peletakan kolektor surya sumbu barat-timur di Malang untuk mendapatkan radiasi matahari yang terbaik pada tanggal pengujian yaitu 25 Agustus 2007 adalah sudut kemiringan  $19,4^\circ$  menghadap ke utara dan tanggal 26 September 2007 adalah  $5,8^\circ$  menghadap ke utara.

### **Data Hasil Pengujian Eksperimental**

Data hasil pengujian dapat dilihat pada Data Tabel 1 dan Tabel 2. Hasil pengujian untuk kolektor dengan pipa yang dilingkupi oleh plat abosrber berupa pipa lurus dapat dilihat pada Tabel 1. Waktu menunjukkan saat pengujian berlangsung,  $T_{in}$  temperatur air masuk pipa,  $T_{plat}$  temperatur permukaan plat absorber,  $T_{out}$  temperatur air keluar pipa,  $T_{tangki}$

temperatur air di dalam tangki penampung air,  $T_{\text{uar}}$  temperatur udara lingkungan,  $t$  5 cm merupakan ukuran zat berwarna menempuh 5 cm yang diukur dalam detik,  $V_{\text{angin}}$  adalah kecepatan angin lingkungan sekitar kolektor,  $\Delta P$  adalah beda ketinggian air raksa dalam pipa U dan Intensitas matahari yang masih diukur dalam mili Volt. Kesemua data hasil pengujian merupakan data mentah yang masih perlu diolah lagi sesuai dengan kajian teori.

**Tabel 1. Pengujian Kolektor Surya Dengan Pipa Lurus (25 Agustus 2007)**

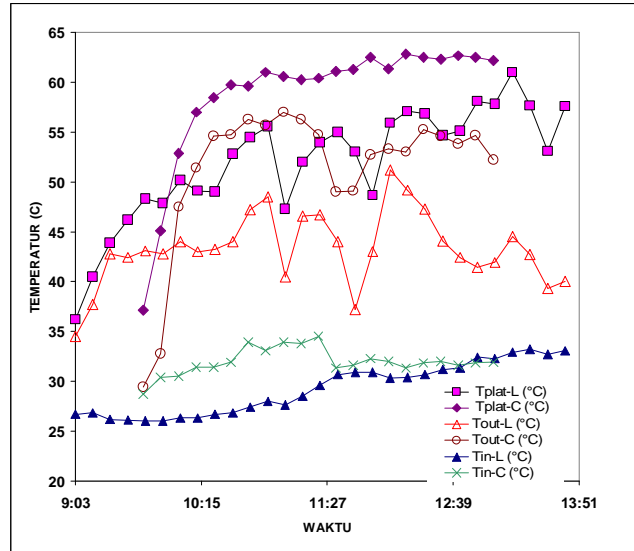
Waktu	Tin (°C)	Tplat (°C)	Tout (°C)	Ttangki (°C)	T luar (°C)	t 5 cm (s)	V angin (m/s)	ΔP	Intensitas (mV)
9:04	26,7	36,2	34,5	23,9	25,7	7,28	0	0	15,9
9:14	26,8	40,5	37,7	23,8	22,4	7,13	0,8	0	15,9
9:24	26,2	43,9	42,8	24,1	20,7	5,36	2,4	0	16,2
9:34	26,1	46,2	42,4	24,1	20,5	5,8	2,1	0	15,2
9:44	26	48,3	43,1	24,1	20,5	4,23	1,9	0	17,8
9:54	26	47,9	42,8	24,4	20,5	4,19	3	0	5
10:04	26,3	50,2	44	24,4	22,9	4,26	2,2	1	14,5
10:14	26,3	49,1	43	24,6	20,5	3,47	1,4	1	11,7
10:24	26,7	49	43,2	24,5	23,5	3,51	1,7	1	9,1
10:34	26,8	62,8	44	24,9	25,5	2,7	2	1	16,6
10:44	27,4	54,5	47,2	25,4	25,4	2,92	2	1	17,3
10:54	28	55,6	48,5	25,5	24	5,21	1,6	1	16,6
11:04	27,6	47,3	40,5	25,7	25,4	5,73	1,2	1	14,3
11:14	28,5	52	46,6	25,5	27,7	10,57	1,2	1	7,2
11:24	29,6	54	46,7	25,5	28,8	5,64	0,9	1	18,9
11:34	30,7	55	44	25,8	26,6	5,55	1	1	16,2
11:44	30,9	53	37,2	27,4	25,6	5,21	2,4	1	13,6
11:54	30,9	48,7	43	27,6	25,6	5,51	2,3	1	15,2
12:04	30,3	55,9	51,2	27,7	23,5	7,16	1,2	1	15,9
12:14	30,4	57,1	49,2	27,6	25,7	7,34	1,9	1	14,5
12:24	30,7	56,9	47,3	28	29,1	12,15	2,5	1	18,6
12:34	31,2	54,7	44,1	29	24,2	11,6	1,4	1	20,6
12:44	31,3	55,1	42,4	28,3	23,5	12,51	1,8	1	5,6
12:54	32,4	58,1	41,4	28,1	25	12,4	2	1	17,2
13:04	32,3	57,8	41,9	30,3	29,1	12,55	1,4	1	17,9
13:14	32,9	61	44,5	30,5	26	10,11	1,7	1	18,6
13:24	33,2	57,7	42,7	32,6	25,9	13,82	1,2	1	5,6
13:34	32,7	53,1	39,3	31,8	26,6	7,94	0	1	5,3
13:44	33,1	57,6	40	30,5	23,1	8,8	1,1	1	14,8

**Tabel 2. Pengujian Kolektor Surya Dengan Pipa Berbelok (26 September 2007)**

Waktu	Tin (°C)	Tplat (°C)	Tout (°C)	Ttangki (°C)	T luar (°C)	t 5 cm (s)	V angin (m/s)	ΔP	Intensitas (mV)
9:43	28,7	37,1	29,4	26,2	32	20,93	1,3	0	17,7
9:53	30,4	45,1	32,8	26,2	26,9	4,63	0	0	17,7
10:03	30,5	52,9	47,5	26,3	26,6	5,38	1,3	0	17,3
10:13	31,4	57	51,4	26,5	27,1	5,8	0	0	17,8
10:23	31,4	58,5	54,6	26,6	26,6	5,92	3,7	0	17,8
10:33	31,9	59,8	54,8	26,6	26	8,02	2,4	1	18
10:43	33,9	59,6	56,3	27,6	35	5,64	1,2	1	17,7
10:53	33,1	61	55,7	27,8	26,3	8,54	1,4	1	17,8
11:03	33,9	60,6	57	31,2	24,9	8,06	1,2	1	17,3
11:13	33,8	60,3	56,3	31,2	32,8	5,7	0,7	1	17,6
11:23	34,5	60,4	54,8	31,4	35,1	3,86	3,1	1	16,5
11:33	31,3	61,1	49	32,9	35,6	4,57	0,8	1	17,7
11:43	31,6	61,3	49,1	36,9	33	3,81	1,6	1	18,1
11:53	32,3	62,5	52,7	36,1	33	4,16	0,18	1	18
12:03	32	61,4	53,3	35,8	34,1	6,08	0	1	18,1
12:13	31,3	62,8	53	35	26,3	3,58	1	1	18,2
12:23	31,8	62,5	55,3	39,3	37,1	3,18	1,3	1	18
12:33	32	62,3	54,6	39,4	35,2	3,65	0,7	1	17,6
12:43	31,6	62,7	53,8	39,4	33,1	3,75	2,2	1	17,9
12:53	31,8	62,5	54,7	39,6	34,2	3,85	0,8	1	18
13:03	31,9	62,2	52,2	39,2	34	4,65	1,6	1	18

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan di lokasi laboratorium Energi Surya dan Angin Universitas Merdeka Malang. Cuaca pada tanggal tersebut sangat cerah meskipun beberapa saat diliputi mendung. Mendung yang menutupi sinar matahari sangat mempengaruhi intensitas dan temperatur yang mengenai plat absorber.



**Gambar 3. Hasil Pengukuran Temperatur Terhadap Waktu**

Hasil pengukuran temperatur dapat dilihat pada Gambar 3. Temperatur plat diukur dari permukaan temperatur plat absorber,  $T_{out}$  merupakan temperatur air keluar pipa saluran dan  $T_{in}$  adalah temperatur air masuk pipa saluran. Perbedaan temperatur plat absorber tergantung dari temperatur dan intensitas matahari yang mengenai permukaan plat. Untuk pengukuran pipa lurus disimbolkan dengan singkatan L sedang untuk pipa belok dengan C.

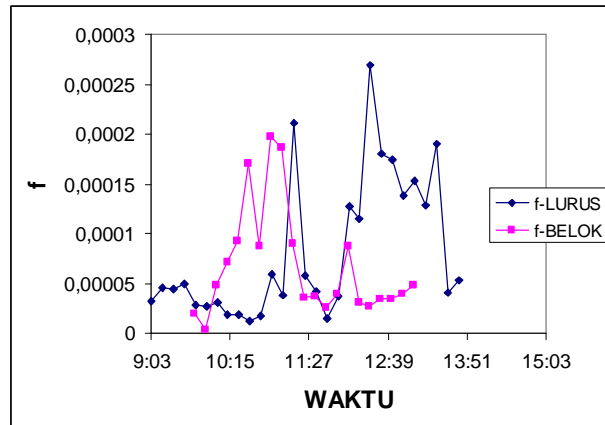
Berdasarkan temperatur plat, grafik menunjukkan bahwa temperatur plat saluran berbelok menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan temperatur plat saluran lurus selama pengujian dari kira-kira jam 10:00 sampai jam 13:00. Fluktuasi kedua temperatur tidak terlalu tajam bagi saluran berbelok namun sebaliknya bagi saluran lurus. Namun, temperatur sisi keluar dari kedua saluran menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan dan temperatur air keluar bagi saluran berbelok lebih tinggi dari temperatur saluran lurus. Perbedaan temperatur masuk justru temperatur bagi saluran lurus lebih tinggi daripada bagi saluran lengkung. Peran aliran sekunder sangat berpengaruh pada temperatur terutama pada temperatur sisi keluar.

Temperatur sisi keluar merupakan hasil dari proses pemanasan yang diberikan dari sinar matahari ke air sebagai fluida kerja. Perbedaan temperatur ini bisa juga ditimbulkan karena perbedaan pengujian di mana pada hari yang berbeda dapat memberikan intensitas matahari dan panas yang berbeda pada kolektor. Oleh karena itu diperlukan ukuran yang sama agar interpretasi yang sangat valid. Analisa dimensional memberikan



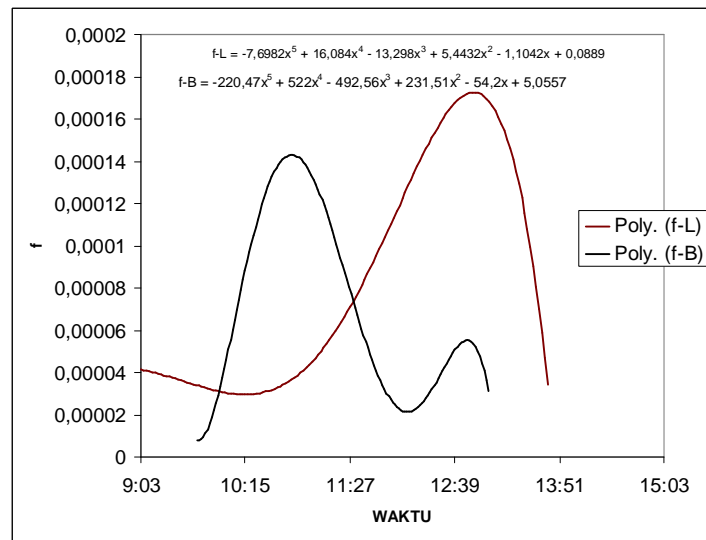
pemahaman yang baik untuk menjelaskan perbedaan tersebut sehingga pengaruh aliran sekunder dapat diprediksi secara nyata.

Dengan menggunakan persamaan (1) dan (2) maka faktor gesekan dapat diinterpretasikan pada gambar 4 baik untuk kolektor dengan pipa lurus maupun kolektor dengan pipa berbelok-belok atau lengkung.



**Gambar 4. Perbandingan Faktor Gesekan Antara Pipa Belok Dan Pipa Lurus**

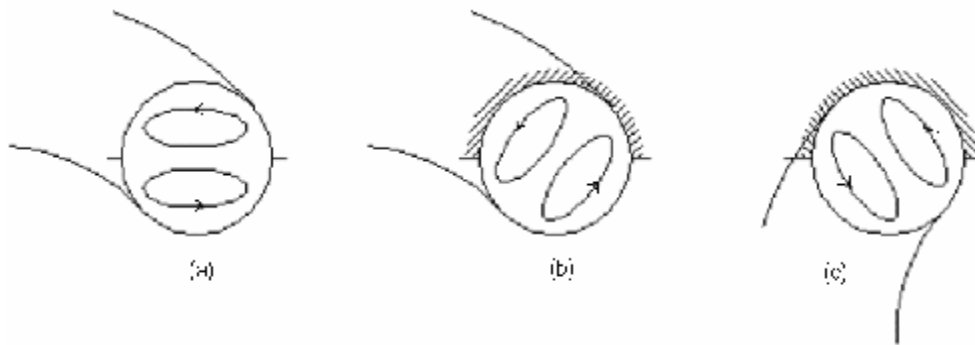
Faktor gesekan adalah wakil bagaimana aliran fluida berlangsung melewati suatu saluran. Semakin tinggi faktor gesekan maka semakin seret fluida melewati saluran. Faktor gesekan yang tinggi tidak diharapkan karena faktor hambatan aliran menjadi tinggi pula atau akan menimbulkan fluida sulit mengalir. Demikian pula bila fluida melewati saluran lengkung faktor gesekan akan meningkat dan faktor ini merupakan kerugian.



**Gambar 5. Karakteristik Faktor Gesekan Pipa Lengkung Dan Pipa Lurus**

Pada gambar 5 f-L menunjukkan faktor gesekan bagi Kolektor Surya pipa lurus sedang f-B bagi pipa Berbelok atau lengkung. x menunjukkan waktu saat pengukuran dilakukan. Grafik regresi ditentukan dengan pangkat 5 karena faktor determinasi masuknya data pada grafik lebih baik jika dibandingkan dengan polinomial lain.

Dari gambar 5 tampak bahwa kira-kira antara jam 9:45 sampai jam 11:30 faktor gesekan Kolektor Surya Plat Datar dengan saluran berbelok memiliki nilai lebih besar dibandingkan dengan pipa lurus. Hal ini menunjukkan bahwa peran aktif aliran sekunder akibat gaya sentrifugal dan gaya apung di dalam saluran berbelok lebih besar daripada pada saluran lurus. Namun sebaliknya, peran aliran sekunder akibat gaya apung pada pipa lurus memberikan tambahan faktor gesekan yang lebih besar pada pipa lurus.



**Gambar 6. Profil Aliran Dilihat Pada Potongan Yang Berbeda**

Perkiraan profil aliran yang terjadi pada saluran berbelok atau lengkung dapat dilihat pada gambar 6 di mana profil aliran dengan adanya aliran sekunder akibat gaya sentrifugal dan gaya apung. Aliran sekunder ini selalu muncul pada aliran fluida yang melewati belokan seperti Gambar 6 (a), normal. Pusaran kembar dan saling berlawanan arah ini adalah aliran sekunder yang ditimbulkan oleh gaya sentrifugal. Karakteristik aliran ditunjukkan oleh perbandingan gaya hambat terhadap gaya sentrifugal atau biasa disebut dengan bilangan Dean ( $K$ ) dan ditulis sebagai berikut,  $K = Re \sqrt{\frac{d}{D}}$  di mana  $Re$  adalah bilangan Reynolds,  $D$  merupakan diameter kelengkungan atau belokan, dan  $d$  adalah diameter pipa.

Apabila panas dikenakan pada sebagian di sisi atas (cara pemanasan ini akan dialami oleh penyerap panas kolektor surya jenis plat-datar) maka profil aliran akan berputar dan berpasangan yang saling berlawanan arah, peristiwa ini disebut aliran sekunder, akan berputar berlawanan jarum jam sebagai akibat adanya perbedaan kerapatan fluida. Peristiwa ini terjadi pada separuh lengkung, lihat gambar 2 (b). Kemudian bila fluida mengalir berlanjut sampai separuh lingkaran sisanya seperti pada gambar 2 (b) maka profil aliran akan berputar lagi seperti pada Gambar 6 (c). Dengan demikian aliran air di dalam pipa yang berbelok-belok dan dipanasi oleh matahari separuh di bagian atasnya akan berputar dan berputar. Proses aliran ini mirip dengan aliran yang diteliti oleh Mokrani tetapi pipa tidak perlu dipuntir-puntir dan hanya perlu sebagian pemanasan.

## SIMPULAN

Pipa berbelok-belok yang dimanfaatkan untuk menyalurkan fluida guna meningkatkan laju perpindahan panas jika dibandingkan dengan saluran pipa lurus dapat ditemukan beberapa kesimpulan,

1. Antara jam 9:45 sampai jam 11:30 faktor gesekan Kolektor Surya Plat Datar dengan saluran berbelok memiliki nilai lebih besar dibandingkan dengan pipa lurus.
2. Peran aliran sekunder pada pipa berbelok-belok lebih dominan karena diakibatkan oleh adanya peran aktif dari perubahan temperatur yang menimbulkan gaya apung sehingga aliran sekunder dapat berputar sedang ketidakseimbangan gaya sentrifugal akibat lengkungan pipa lebih berperan pada penambahan aliran turbulen yang terjadi di dalam aliran laminar.

### Catatan:

Penelitian ini merupakan Penelitian Hibah Bersaing yang didanai oleh DIKTI melalui DP2M dengan no. kontrak: 186/SP2H/PP/DP2M/III/2007

## DAFTAR PUSTAKA

- Chandratilleke, T. and Nursubyakto (2003). *Numerical Prediction of Secondary Flow and Convective Heat Transfer Characteristics in Externally Heated Curved Rectangular Ducts*, International Journal of Thermal Sciences 42: pp 187-198.
- Cheng, K. C. and M. Akiyama (1970), *Laminar Forced Convection Heat Transfer In Curved Rectangular Channels*, International Journal of Heat and Mass Transfer 13(3): 471-90.
- Cheng, K. C. and S. Y. Mok (1970), *Flow Visualisation Studies On Secondary Flow Patterns And Centrifugal Instability Phenomena In Curved Tubes*.
- Cheng, K. C. and F. P. Yuen (1987), *Flow Visualisation Experiment On Secondary Flow Patterns In An Isothermally Heated Curved Pipe*, Transaction ASME Journal of Heat Transfer 109: 55-61.
- Dean, W. R. (1928), *The Stream-Line Motion Of Fluid In A Curved Pipe*, Philosophical Magazine.
- Hwang, G. J. and C. H. Chao (1991), *Forced Laminar Convection in a Curved Isothermal Square Duct*, Trans. of the ASME 113: 48-55.
- Lee, J., H. Simon, et al. (1985), *Buoyancy In Developed Laminar Curved Tube Flows*, Int. Journal Heat Mass Transfer volume 28: hal. 631-640.
- Mokrani, A., C. C., et al. (1997), *The Effects Of Chaotic Advection On Heat Transfer*, Int. Journal Heat & Mass Transfer Vol. 40: hal. 3089-3104.
- Soh, W. Y. and S. A. Berger (1987), *Fully Developed Flow In A Curved Pipe Of Arbitrary Curvature Ratio*, International Journal for numerical methods in fluid 7: 733-755.
- Sturgis, J. C. and I. Mudawar (1999), *Critical Heat Flux In A Long, Curved Channel Subjected To Concave Heating*, International Journal of Heat and Mass Transfer 42(20): 3831-48.

