

BAB IV

PENGAMBILAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 PENGAMBILAN DATA

Dalam melakukan uji eksperimental diperoleh data berupa nilai debit (liter/jam), diameter hidrolis dari pipa, beda tekanan untuk mencari nilai faktor gesekan. Data diperoleh dengan cara mencatat debit air fluida yang mengalir dengan mengamati flowmeter dan nilai tekanan yang dihasilkan oleh *pressure gauge (manometer)* pada masing-masing *pressure tap*, dengan interval pengambilan data 10 detik sebanyak 10 kali. Pengambilan data tekanan diambil untuk bilangan Reynolds yang bervariasi antara 4×10^3 sampai dengan $2,5 \times 10^4$ dengan jarak antara *pressure tap* sebesar 60 cm. Tabel dibawah menunjukkan hasil pengambilan data untuk bilangan Reynolds 24900. Sedangkan data percobaan untuk bilangan Reynolds yang lain terdapat pada lampiran.

4.2 PENGOLAHAN DATA

Sebelum melakukan pengolahan data tekanan yang didapat dari percobaan, kita harus menentukan beberapa karakteristik fluida dan geometri objek uji yang nantinya akan berguna untuk perhitungan pengolahan data. Karakteristik fluida yang digunakan pada percobaan adalah :

- nama fluida : air
- massa jenis (ρ) : 996 kg/m^3
- viskositas dinamik (μ) : $1 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$

sedangkan geometri pipa akrilik yang diukur adalah :

- panjang : $2 \times 10^{-2} \text{ m}$
- lebar : $2 \times 10^{-2} \text{ m}$
- keliling : $8 \times 10^{-2} \text{ m}$
- luas penampang : $4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Untuk membandingkan nilai bilangan Reynolds dan faktor gesekan yang diperoleh dari percobaan dengan yang ada pada *moody diagram*, maka kita perlu mencari diameter hidrolis dengan menggunakan persamaan :

$$D_h = \frac{4A}{P}$$

$$D_h = \frac{4 (4 \times 10^{-4})}{8 \times 10^{-2}}$$

$$D_h = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Data debit diperoleh dengan menggunakan *flow meter*. Nilai yang hendak didapatkan dari data adalah bilangan Reynolds. Untuk mendapatkan nilai kecepatan fluidanya maka nilai debit dibagi dengan luas penampang pipa, sebagai berikut :

$$Q = A u$$

$$u = \frac{Q}{A}$$

$$u = \frac{1800 \times \frac{10^{-3} \text{ m}^3}{3600 \text{ s}}}{4 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$u = 1,2500 \text{ m/s}$$

Dari nilai-nilai yang sudah didapatkan diatas, maka kita dapat mencari bilangan Reynolds dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu}$$

$$Re = \frac{(996) \text{ kg/m}^3 \cdot 1,25 \text{ m/s} \cdot 2 \times 10^{-2} \text{ m}_h}{1 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2}$$

$$Re = 24900$$

Data penurunan tekanan (Δp) untuk bilangan Reynolds 24900 adalah 63,20 mmH₂O (619.78028 Pa).

Berikutnya untuk mencari nilai faktor gesekan, maka digunakan persamaan

$$f = \frac{\Delta p(D_h/L)}{\rho u^2/2}$$

$$f = \frac{619,78028 \text{ N/m}^2 \left(\frac{2 \times 10^{-2} \text{ m}}{0,6 \text{ m}} \right)}{\left(\frac{996 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,25^2 \text{ m}^2/\text{s}^4}{2} \right)}$$

$$f = 0.02655016$$

Nilai bilangan Reynolds dan faktor gesekan yang didapatkan diatas hanya untuk satu head statis saja, untuk membandingkannya dengan *moody diagram* maka akan dicari 14 nilai lainnya untuk kisaran bilangan $4000 < Re < 25000$. Dengan menggunakan cara yang sama untuk menghng nilai bilangan Reynolds dan faktor gesekan, maka didapatkan tabel-tabel sebagai berikut :



Luas Penampang	A	0.0004
Diameter hidrolis	D_h	0.02
Kekasaran permukaan	ϵ	4.80E-07
Massa Jenis Fluida	ρ	996
Viskositas dinamik	μ	0.001

Tabel 4.1 Data pengujian faktor gesekan untuk $4150 < Re < 24900$

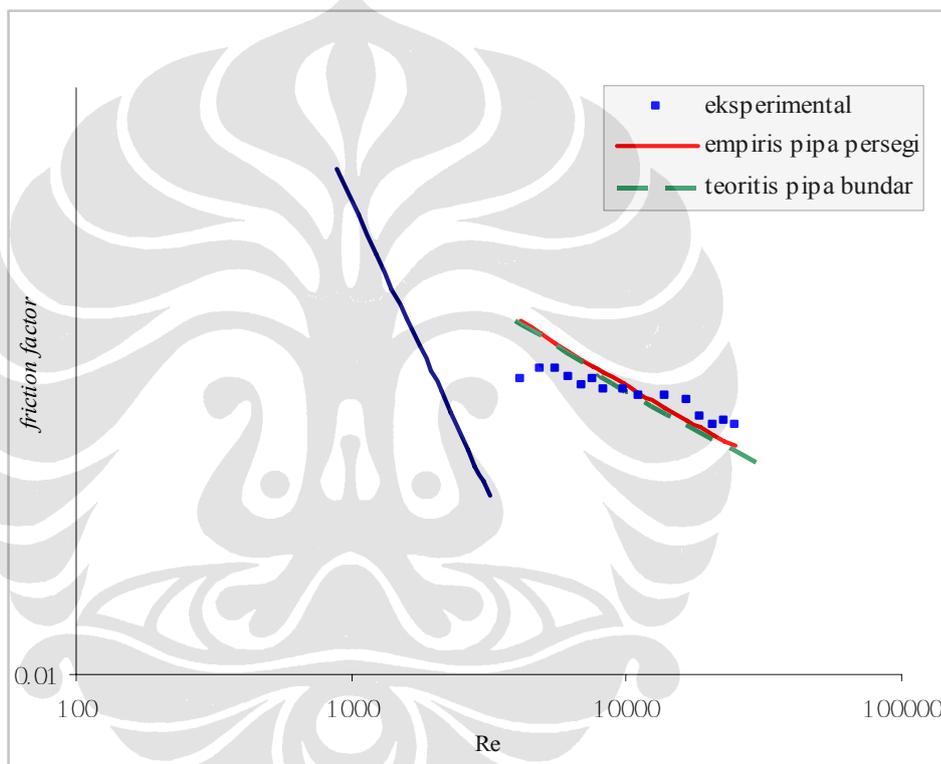
Pengolahan Data Eksperimen							
L	Q		ΔP	ΔP	R_h	u	f
m	l/h	m^3/s	mmH_2O	Pa	$\rho u D_h / \mu$	Q/A	$\Delta p(D_h/L)/(\rho u^2/2)$
0.6	1800	0.0005000	63.2	619.78028	24900.000	1.2500	0.02655016
	1650	0.0004583	54.0	529.55910	22825.000	1.1458	0.02699734
	1500	0.0004167	44.0	431.49260	20750.000	1.0417	0.02661737
	1350	0.0003750	36.9	361.86539	18675.000	0.9375	0.02755839
	1200	0.0003333	31.0	304.00615	16600.000	0.8333	0.02930180
	1000	0.0002778	22.0	215.74630	13833.333	0.6944	0.02994455
	800	0.0002222	14.0	137.29310	11066.667	0.5556	0.02977441
	700	0.0001944	11.0	107.87315	9683.333	0.4861	0.03055566
	600	0.0001667	8.1	79.43387	8300.000	0.4167	0.03062510
	550	0.0001528	7.1	69.62722	7608.333	0.3819	0.03194685
	500	0.0001389	5.7	55.89791	6916.667	0.3472	0.03103344
	450	0.0001250	4.8	47.07192	6225.000	0.3125	0.03226348
	400	0.0001111	3.9	38.24594	5533.333	0.2778	0.03317720
	350	0.0000972	3.0	29.41995	4841.667	0.2431	0.03333345
300	0.0000833	2.1	20.59397	4150.000	0.2083	0.03175937	

BAB V

ANALISIS DATA

5.1 ANALISIS DATA HASIL UJI EKSPERIMENTAL BERKENAAN DENGAN FAKTOR GESEKAN

Berdasarkan eksperimen yang dilakukan didapatkan sebuah hubungan grafik antara faktor gesekan (f) dengan bilangan Reynolds yang terjadi pada aliran turbulen, yaitu di sekitar bilangan Reynolds $4000 < Re < 25000$ sebagai berikut:



Gambar 5.1 Grafik $Re - f$ pada pipa akrilik persegi berukuran 20×20 mm

Data nilai faktor gesek empiris didapatkan dengan menggunakan persamaan pendekatan *Colebrook-White* (Miller, 1990) yang memiliki tingkat akurasi yang sangat mirip dengan persamaan *Colebrook-White* sehingga faktor gesekan dapat didapatkan secara langsung sebagai berikut :

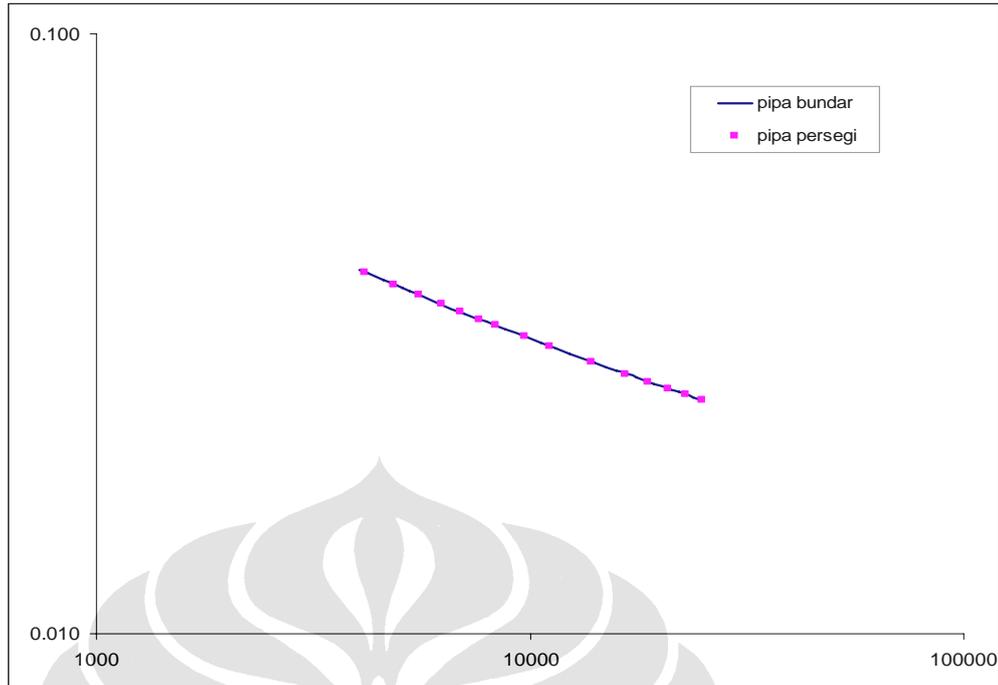
$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (5.1)$$

Dengan memasukkan $\varepsilon = Ra = 4,8 \times 10^{-7}$ m yang didapat dari pengujian kekasaran sehingga didapatkan perbandingan $\varepsilon/D = 2,4 \times 10^{-5}$. Persamaan *Colebrook-White* yang berkorelasi dengan diagram Moody, diperoleh dari hasil eksperimental yang diujikan pada saluran pipa dengan bentuk penampang bundar.

Berdasarkan hasil perhitungan yang diperlihatkan grafik, dapat dilihat kecenderungan nilai koefisien gesek turun seiring dengan bertambahnya bilangan Reynolds. Namun kecenderungan penurunan nilai koefisien gesek terhadap pertambahan bilangan Reynolds ini tidak securam penurunan nilai koefisien gesek hasil perhitungan empiris. Pada bilangan Reynolds kurang dari 11000, hasil pengukuran menunjukkan nilai koefisien gesek hasil uji eksperimental terletak di bawah nilai koefisien gesek empiris dan diatas nilai empiris pada bilangan Reynolds lebih dari 11000. Persentase perbedaan nilai koefisien gesek eksperimental dengan nilai koefisien gesek data empiris dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 5.1 Perbedaan koefisien gesek antara hasil uji eksperimental dengan perhitungan secara empiris

No	R_h	$f_{experimental}$	$f_{empiris}$	selisih koefisien gesek. (%)
1	24900.000	0.02655016	0.02451740	8.29
2	22825.000	0.02699734	0.02504285	7.80
3	20750.000	0.02661737	0.02563851	3.82
4	18675.000	0.02755839	0.02632260	4.69
5	16600.000	0.02930180	0.02712090	8.04
6	13833.333	0.02994455	0.02843143	5.32
7	11066.667	0.02977441	0.03017081	1.31
8	9683.333	0.03055566	0.03129005	2.35
9	8300.000	0.03062510	0.03266212	6.24
10	7608.333	0.03194685	0.03347716	4.57
11	6916.667	0.03103344	0.03440572	9.80
12	6225.000	0.03226348	0.03547819	9.06
13	5533.333	0.03317720	0.03673794	9.69
14	4841.667	0.03333345	0.03824947	12.85
15	4150.000	0.03175937	0.04011394	20.83
			Rata-rata	7.64



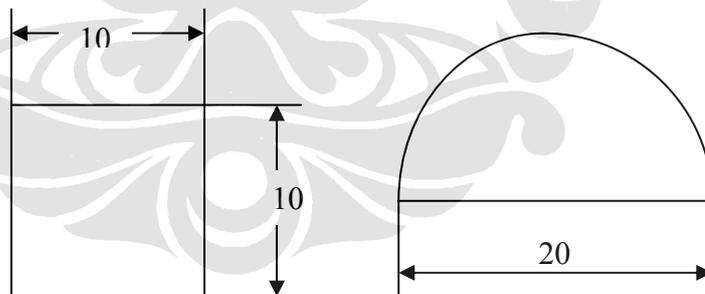
Gambar 5.2 Grafik $Re - f$ saluran berpenampang bundar dan persegi dengan menggunakan rumus eksplisit Colebrook-White

Adapun pada saat melakukan percobaan dan pengambilan data, kesalahan dan ketelitian pengujian dan alat bantu pengukuran sangat mempengaruhi hasil dari pengambilan data. Kesalahan-kesalahan yang mungkin terjadi bisa terjadi akibat beberapa faktor yang mempengaruhi, antara lain :

1. Pengukuran debit aliran dilakukan dengan menggunakan *flowmeter* yang keakuratannya kurang.
2. Faktor pengotoran berupa lumut yang dapat mengganggu dan mempengaruhi profil dari tegangan geser pada dinding saluran bagian dalam.
3. Pengambilan data tekanan jatuh yang menggunakan *manometer* dengan alat ukur penggaris yang memiliki ketelitian 1 mm. Hal ini cukup berpengaruh terhadap pengambilan data tekanan jatuh yang merupakan bagian dari variabel faktor gesekan (f), terutama pada bilangan Reynolds rendah. Pada bilangan Reynolds rendah dibutuhkan alat ukur penggaris dengan ketelitian lebih dari 1 mm agar kesalahan pembacaan tekanan jatuh tidak besar dan dapat ditolerir.

5.2 ANALISIS HASIL SIMULASI CFD BERKENAAN DENGAN FAKTOR GESEKAN

Simulasi CFD yang dilakukan bertujuan untuk menghitung nilai faktor gesek dan memperlihatkan adanya fenomena aliran sekunder (*secondary flow*) yang terjadi pada pipa akrilik berpenampang persegi yang dicurigai mempengaruhi nilai faktor gesek pada pipa persegi. Perhitungan dan visualisasi dilakukan dengan menggunakan *solver* Fluent 6.2.16. Pemilihan *solver* ini disesuaikan dengan program *pre-processor* yang digunakan (Gambit). Visualisasi dilakukan dengan menggunakan model turbulensi *Reynolds Stress*. Model ini dipilih karena bertujuan agar fenomena aliran sekunder yang terjadi di dalam penampang saluran dapat lebih terlihat. Adapun simulasi perhitungan nilai faktor gesek dilakukan dengan menggunakan model *standard k-omega* untuk bilangan Reynolds di bawah 1×10^4 dan *standard k-epsilon* untuk bilangan Reynolds di atas 1×10^4 . Simulasi dilakukan dengan memasukkan data massa jenis fluida, $\rho = 996 \text{ kg/m}^3$ dan kekasaran absolut permukaan, $\varepsilon = 0.48 \text{ }\mu\text{m}$ yang didapatkan dari hasil pengujian secara eksperimental. Perhitungan nilai faktor gesek dengan simulasi CFD juga dilakukan pada saluran berpenampang bundar dengan diameter hidrolis yang sama untuk membandingkan hasilnya.



Gambar 5.3 Potongan melintang model yang digunakan pada simulasi CFD

Pada saluran penampang persegi digunakan model penampang seperempat bagian dari penampang pipa akrilik. Sedang pada saluran bundar digunakan model setengah bagian penampang. Gambar 5.3 menunjukkan model dari penampang saluran yang digunakan pada simulasi CFD. Kedua model memiliki panjang 2.5 meter dan diameter hidrolis 20 mm, dengan sifat dan karakteristik material yang sama.

Batasan masalah yang digunakan pada simulasi ini adalah:

- a) Analisis dilakukan untuk aliran 3 dimensi
- b) Tidak ada perubahan temperatur
- c) Sifat-sifat fluida konstan
- d) Tidak ada perpindahan panas pada dinding
- e) Fluida adalah Newtonian inkompresibel

Visualisasi aliran sekunder menggunakan set-up model sebagai berikut:

- a) Model turbulensi penyelesaian: Reynolds Stress
- b) Near wall treatment: standard wall function
- c) Solver: pressure-based solver
- d) Diskretisasi: standard untuk pressure, momentum, turbulent kinetic energy, dan turbulent dissipation rate
- e) Konvergensi: 1.10^{-3}
- f) Jumlah mesh: saluran berpenampang persegi dengan Re 24900 menggunakan model dengan jumlah mesh 202500, sedang untuk Re 11067 dan 4150 menggunakan model dengan jumlah mesh 253125

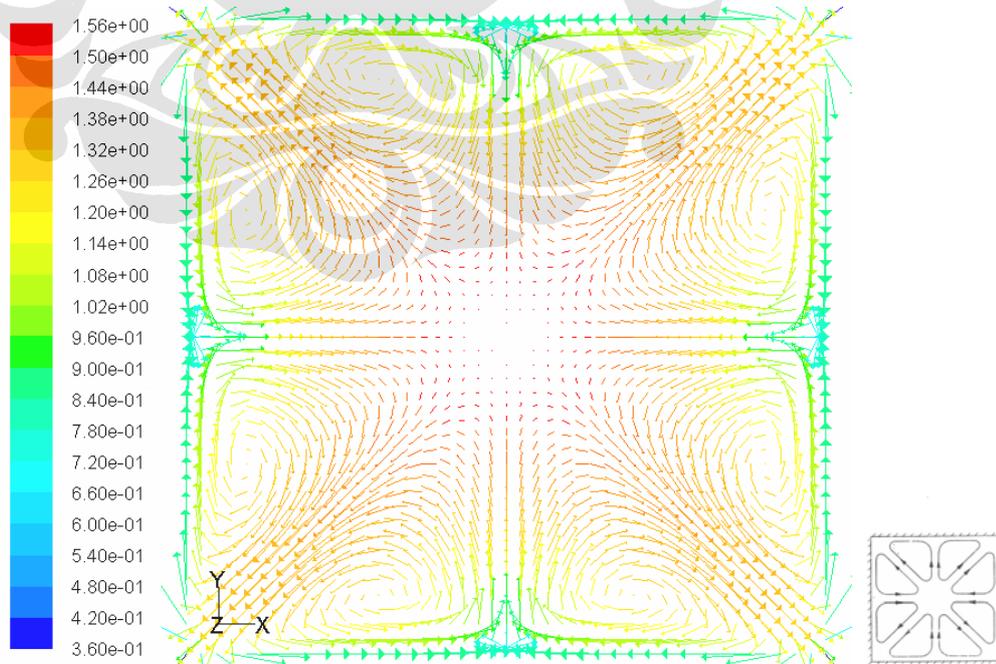
Perhitungan nilai faktor gesek menggunakan set-up model sebagai berikut:

- a) Model turbulensi penyelesaian: standard k-epsilon
- b) Near wall treatment: standard wall function
- c) Solver: pressure-based solver
- d) Diskretisasi: standard untuk pressure dan second order upwind untuk momentum, turbulent kinetic energy, dan turbulent dissipation rate
- e) Konvergensi: 1.10^{-6}
- f) Jumlah mesh: saluran berpenampang persegi dan bundar menggunakan model dengan jumlah mesh beragam seperti terlihat pada tabel 5.2 di bawah.

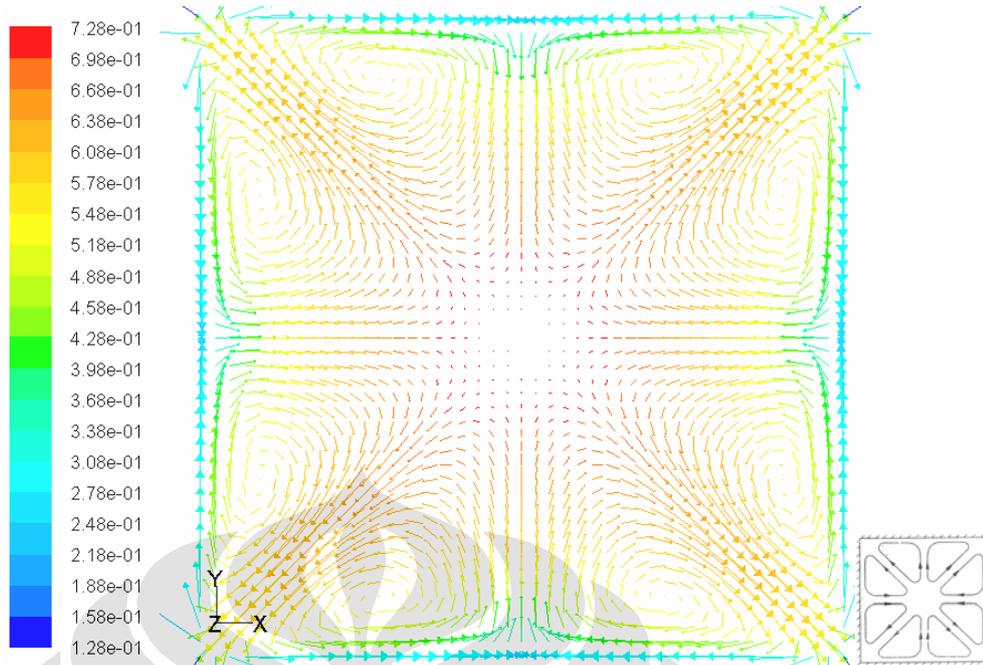
Tabel 5.2 Jumlah mesh yang digunakan pada model simulasi saluran penampang persegi dan bundar

Re	u	Jumlah Mesh model pipa persegi	Jumlah Mesh model pipa bundar
24900	1.3261	25000	32000
22825	1.1935	25000	32000
20750	1.0609	25000	32000
18675	0.8841	25000	32000
16600	0.7073	25000	32000
13833	0.6189	16000	32000
11067	0.5304	9000	32000
9683	0.4862	9000	32000
8300	0.4420	9000	32000
7608	0.3978	9000	19200
6917	0.3536	3000	19200
6225	0.3094	3000	19200
5533	0.2652	2500	19200
4842	0.2210	2400	14400
4150	0.1768	2400	14400

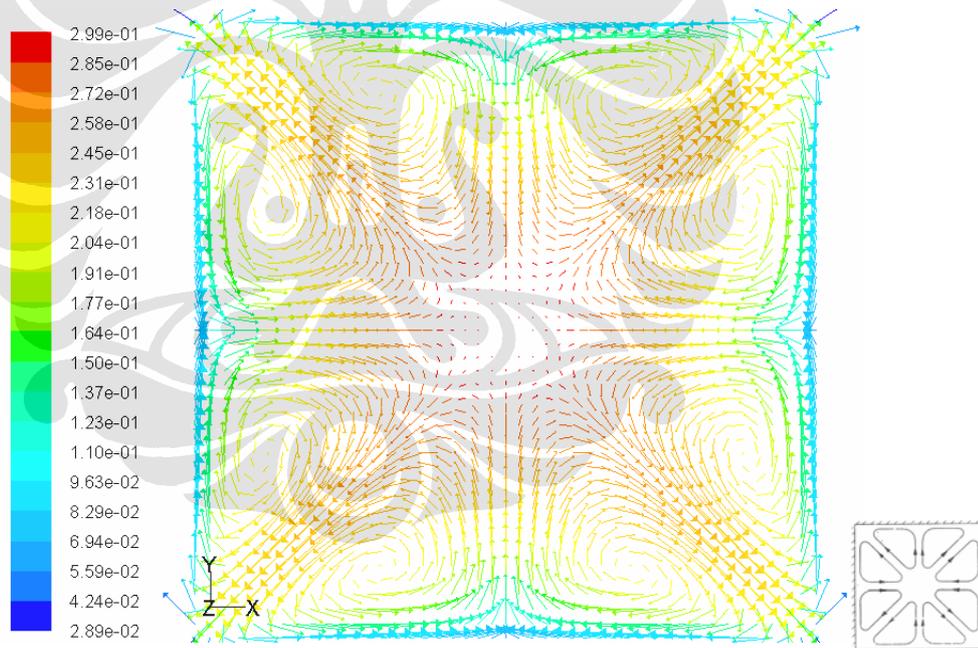
Jejak dari aliran sekunder yang didapat dari hasil simulasi CFD dengan pendekatan alat uji eksperimental dapat kita lihat seperti pada hasil simulasi berikut :



Gambar 5.4 Vektor aliran sekunder pada penampang saluran persegi pada jarak 0.5 m dari daerah aliran masuk dalam m/s, pada bilangan Reynolds 24900



Gambar 5.5 Vektor aliran sekunder pada penampang saluran persegi pada jarak 0.75 m dari daerah aliran masuk dalam m/s, pada bilangan Reynolds 11067

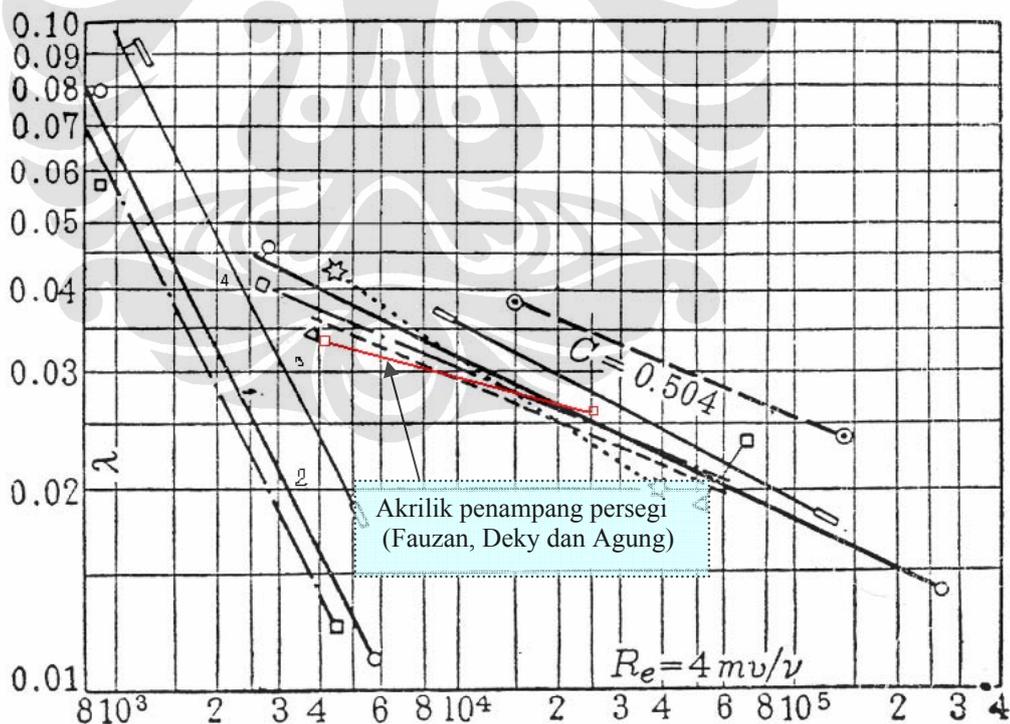


Gambar 5.6 Vektor aliran sekunder pada penampang saluran persegi pada jarak 0.75 m dari daerah aliran masuk dalam m/s, pada bilangan Reynolds 4150

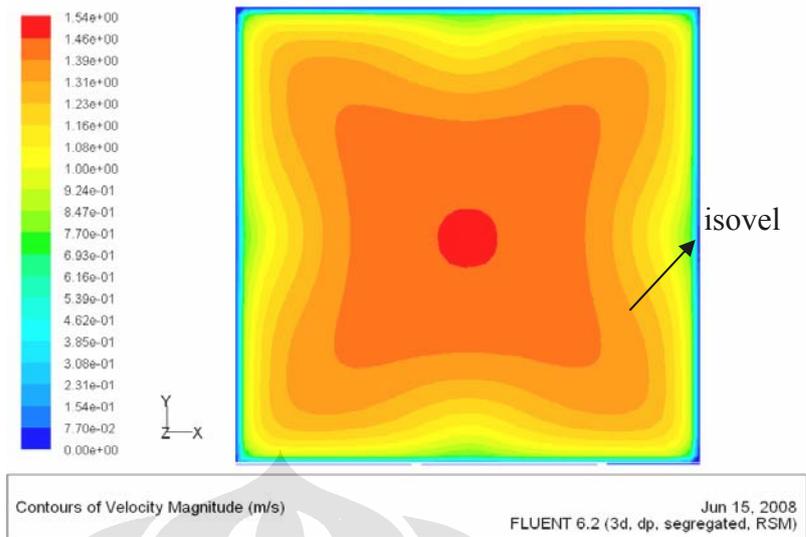
Dari hasil simulasi CFD di atas, pada setiap penampang saluran terlihat munculnya fenomena aliran sekunder. Hal ini semakin memperkuat bahwa aliran sekunder ini turut mempengaruhi karakteristik dari faktor gesekan pada saluran berpenampang segiempat. Aliran sekunder yang terjadi akibat distribusi tak merata dari tegangan geser akan mengakibatkan penurunan kecepatan aksial dari

aliran dalam saluran segiempat, walaupun imbasnya cukup kecil dimana $u_s/u = 0,01$ (Bradshaw, 1978) ($u_s =$ aliran sekunder, $u =$ kecepatan aksial). Imbas yang lebih penting dari fenomena aliran sekunder adalah gradien kecepatan yang lebih besar di ujung penampang persegi sehingga menghasilkan tegangan geser yang lebih besar (sebagai contoh faktor gesek)^[5]. Aliran sekunder pada penampang bundar lebih besar dari aliran sekunder pada penampang persegi. Sehingga faktor gesek pada pipa berpenampang persegi lebih kecil dari pada pipa berpenampang bundar pada bilangan Reynolds tertentu.

Untuk saluran dengan penampang tidak bundar digunakan diameter hidrolis, atau diameter ekuivalen, atau diameter efektif sebagai pengganti diameter pada persamaan Darcy-Weisbach. Dalam eksperimen ini kami menggunakan diameter hidrolis untuk menghitung nilai faktor gesek. Ada dugaan penggunaan parameter diameter hidrolis ini kurang tepat. Sehingga hasil perhitungan nilai faktor gesek eksperimental yang di dapat kurang tepat dengan eksperimen-eksperimen sebelumnya, seperti terlihat pada gambar berikut:



Gambar 5.7 Variasi koefisien gesek pada penampang saluran yang berbeda



Gambar 5.8 Kontur kecepatan penampang saluran segiempat pada jarak 1.00 m dari daerah aliran masuk (m/s)

Perhitungan faktor gesek dengan menggunakan simulasi CFD dilakukan pada 15 nilai bilangan Reynolds sesuai dengan bilangan Reynolds eksperimental. Dengan menghitung nilai perbedaan tekanan antara dua titik pada model simulasi, dan mengetahui nilai panjang karakteristik, L , diameter hidrolis, D_h , kecepatan, u , nilai faktor gesek dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.9. Berikut data yang diperoleh dari *solver* fluent 6.2.16 pada kasus aliran pada pipa persegi dengan nilai bilangan Reynolds 24900 :

Integral	
Total Pressure	(Pascal)(m2)
p1	0.20917782
Area	(m2)
p1	0.0001
Integral	
Total Pressure	(pascal)(m2)
p2	0.15750067

Dari data-data yang sudah didapatkan diatas, maka nilai faktor gesek dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$p_1 \text{ dalam Pascal} = 0.20917782 / 0.0001$$

$$= 2091.7782 \text{ Pascal}$$

$$p_2 \text{ dalam Pascal} = 0.15750067 / 0.0001$$

$$= 1575.0067 \text{ Pascal}$$

$$\Delta P = 2091.7782 - 1575.0067$$

$$= 516.77 \text{ Pascal}$$

$$f = \frac{\Delta p (D_h / L)}{\rho u^2 / 2}$$

$$f = \frac{516.77 \text{ N/m}^2 \left(\frac{2 \times 10^{-2} \text{ m}}{0.6 \text{ m}} \right)}{\left(\frac{996 \text{ kg/m}^3 \cdot 1.25^2 \text{ m}^2/\text{s}^4}{2} \right)}$$

$$f = 0.02213747$$

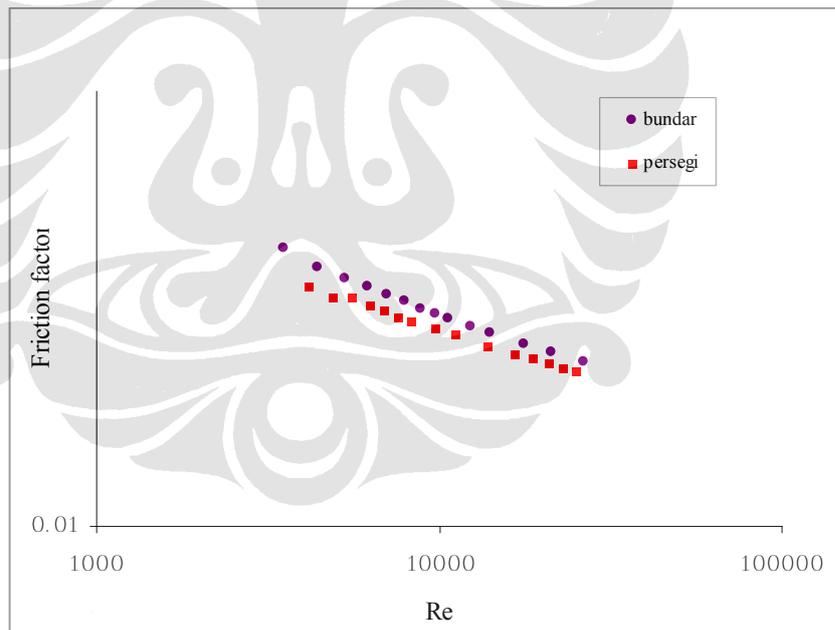
Dengan menggunakan cara yang sama pada nilai bilangan Reynolds yang lain, maka didapatkan tabel perhitungan sebagai berikut :

Tabel 5.3 Hasil perhitungan nilai faktor gesek pada pipa persegi dengan simulasi CFD

R_h	u	p_1	p_2	ΔP_{CFD}	$f_{Darcy-Weisbach}$
24900	1.2500	2091.78	1575.01	516.77	0.02213747
22825	1.1458	1780.61	1337.30	443.31	0.02260046
20750	1.0417	1488.79	1115.25	373.54	0.02304265
18675	0.9375	1225.75	915.32	310.43	0.02364102
16600	0.8333	986.83	734.29	252.53	0.02434069
13833	0.6944	704.27	521.05	183.22	0.02543044
11067	0.5556	482.84	352.65	130.19	0.02823381
9683	0.4861	380.26	276.40	103.86	0.02941828
8300	0.4167	289.19	209.02	80.17	0.03090892
7608	0.3819	247.89	178.58	69.31	0.03180028
6917	0.3472	200.47	144.96	55.51	0.03081819
6225	0.3125	166.44	119.88	46.56	0.03191386
5533	0.2778	135.32	96.93	38.39	0.03329790
4842	0.2431	107.19	76.37	30.83	0.03492806
4150	0.2083	81.85	57.94	23.91	0.03686658

Tabel 5.4 Hasil perhitungan nilai faktor gesek pada pipa berpenampang bundar dengan simulasi CFD

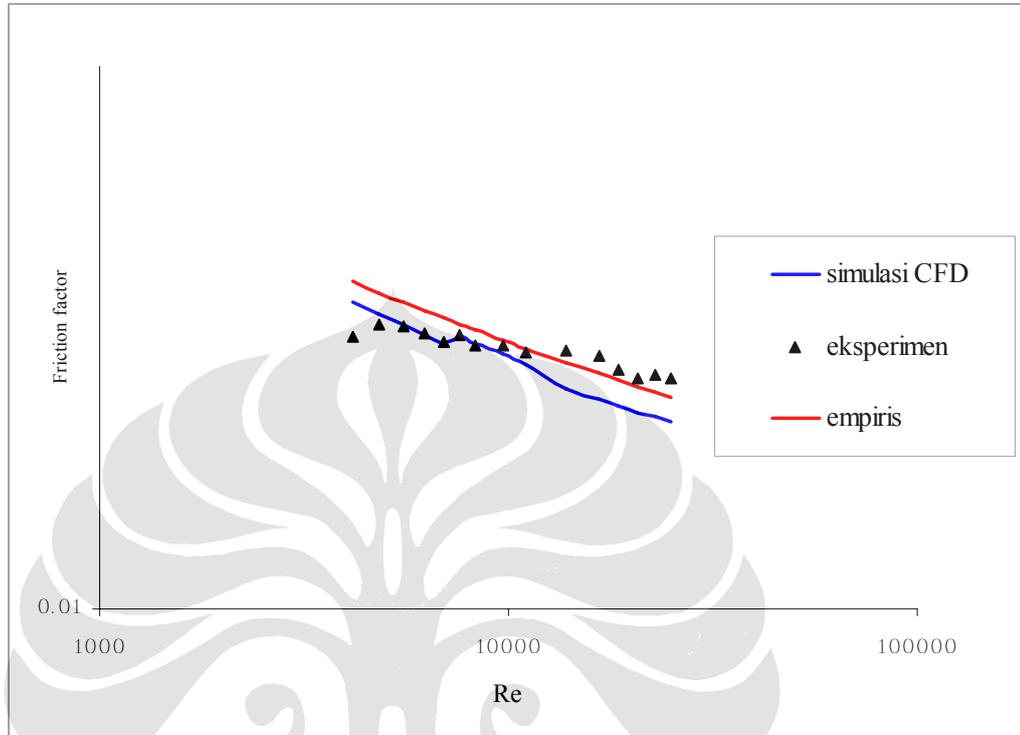
R_h	u	p_1	p_2	ΔP_{CFD}	$f_{Darcy-Weisbach}$
26416.295	1.3261	-286.2124	-913.699	627.487098	-286.2124
21133.036	1.0609	-224.3096	-647.906	423.596709	-224.3096
17610.864	0.8841	-180.9704	-488.659	307.6890639	-180.9704
14088.691	0.7073	-137.0836	-345.327	208.2434516	-137.0836
12327.604	0.6189	-115.4038	-280.401	164.9974999	-115.4038
10566.518	0.5304	-94.1610	-220.346	126.1855001	-94.1610
9685.975	0.4862	-83.8082	-192.343	108.534495	-83.8082
8805.432	0.4420	-73.7171	-165.780	92.06330323	-73.7171
7924.889	0.3978	-66.5376	-144.720	78.18209149	-66.5376
7044.345	0.3536	-56.4604	-120.355	63.89468959	-56.4604
6163.802	0.3094	-46.7823	-97.602	50.81985712	-46.7823
5283.259	0.2652	-37.6089	-76.711	39.10199278	-37.6089
4402.716	0.2210	-29.3418	-57.996	28.65431795	-29.3418
3522.173	0.1768	-22.3973	-42.695	20.29775981	-22.3973



Gambar 5.9 Grafik Re- f hasil perhitungan simulasi CFD

Gambar 5.9 menunjukkan perbandingan antara nilai faktor gesek pipa bulat dengan nilai faktor gesek pipa persegi yang memiliki diameter hidrolis yang sama, yaitu 20 mm, yang dihitung dengan menggunakan simulasi CFD. Nilai faktor gesek dihitung pada rentang nilai bilangan Reynolds $4,0 \times 10^3 < Re < 2,5 \times 10^4$. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa nilai faktor gesek pipa dengan nilai

aspek rasio penampang satu (persegi) terletak di bawah nilai faktor gesek pipa bundar pada rentang bilangan Reynolds kurang dari 25,000. Hal ini sesuai dengan penelitian-penelitian terdahulu.



Gambar 5.10 Grafik $Re-f$ hasil perhitungan eksperimental, empiris dan simulasi CFD