

PENGARUH JARAK ALUR TERHADAP KEKUATAN VORTEX DAN TEGANGAN GESER OSILASI ALIRAN FLUIDA BERDENYUT DALAM SALURAN BERPENAMPANG SEGIEMPAT

Prayitno Ciptoadi*

Abstract

The pulsatile fluid flow in a transverse grooved channel would become self-sustained oscillatory flow at certain critical Reynolds number. The critical Reynolds number where laminar unsteady flow changed to unsteady transitional one depends on groove distances. The objective of this research is to analyze the effect of groove distances toward the critical Reynolds number and pressure drop. This research was done by implementing a closed square cross section channel, where the bottom surface of the channel was semicircle grooved. The frequency of flow oscillation measurement was done by setting up a resistance sensor that is Wheatstone bridge and a U manometer was used to measure the static pressure, the two measurements were done together at several Reynolds numbers. From the research result it is seen that the unsteady laminar flow resulting in single frequency of vortex and the unsteady transitional one resulting in three frequencies of vortex. The critical Reynolds number becomes larger when groove distances increase that is for groove distance of $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ times its circumference is 700 while for groove distances equal to its circumference is 950. The largest vortex strength occurs at the smallest groove distance. Oscillating shear stress increases with the increase of Strouhal number. This phenomenon indicates that highly transport momentum occurs as the Strouhal number increases which it contributes to the vortex strength and fluid exchange.

Key word: Pulsatile flow, grooved channel, vortex strength, shear stress.

I. PENDAHULUAN

Pada aliran laminar di dalam saluran beralur melintang terdapat dua daerah aliran: (i) aliran utama dalam saluran dan (ii) aliran *vortex* resirkulasi dalam alur. Dua daerah tersebut dipisahkan oleh lapisan geser bebas (*free shear layer*). Dalam kondisi stedi, tidak ada pertukaran fluida antara kedua daerah ini. Salah satu kemungkinan untuk meningkatkan laju transport dalam saluran beralur adalah memperbaiki pencampuran lateral (*lateral mixing*) dengan mengganggu lapisan geser pemisah antara aliran utama dan aliran resirkulasi dalam alur (Kang, 2001). Gerakan aliran utama dari hulu ke hilir mengalami defleksi ke dalam alur pada $Re=50$ sementara aliran *vortex* di dalam alur bergerak ke hilir seiring meningkatnya Re (Adachi dan Uehara, 2003).

Gangguan lapisan geser pemisah yang terjadi seiring meningkatnya bilangan Re akan mengubah kondisi aliran dari stedi ke aliran osilasi pada bilangan Re yang lebih kecil dibandingkan jika fluida mengalir dalam saluran tanpa alur. Aliran osilasi ini dikenal sebagai aliran yang berosilasi terus-menerus (*self-sustained oscillatory flow*). Bilangan Reynolds kritis di mana permulaan *self-sustained oscillatory flow* terjadi tergantung pada panjang alur yakni menjadi lebih kecil jika panjang alur meningkat (Nishimura *et al.*, 2001).

Osilasi aliran terjadi akibat aliran stedi menjadi tidak stabil karena mengalami bifurkasi pada bilangan Reynolds kritis tertentu. Ketidakstabilan ini muncul

karena dipicu oleh munculnya *Tollmien-Schlichting wave*.

Aliran yang berosilasi menginduksi tegangan Reynolds (*Reynold stress*) dan mampu meningkatkan difusi momentum yaitu mengangkut energi dari aliran utama ke aliran osilasi dan mempertahankannya. Akibatnya rugi tekanan (*pressure drop*) dari aliran utama meningkat. Ketidakstabilan Kelvin-Helmholtz terbentuk pada tepi alur disebabkan oleh formasi pelengkungan lintasan profil kecepatan, menekan gelombang *Tollmien-Schlichting* di bagian luar alur dan memproyeksikan energi padanya. Akibat dari interaksi kompleks, menghasilkan gelombang berjalan dua dimensi (*two-dimensional traveling waves*) pada bilangan Re cukup rendah (Adachi dan Uehara, 2003).

Pada Re kritis muncul dua sampai tiga gelombang dalam satu panjang geometri periodisitas (*one geometric periodicity length*). Kondisi ini dapat meningkatkan kemampuan perpindahan panas yang dikenal sebagai peningkatan perpindahan panas resonansi (Kang, 2001). Bifurkasi aliran dari kondisi stedi ke kondisi aliran osilasi mempertinggi kemampuan perpindahan panas. Hal ini disebabkan oleh pencampuran fluida dan gangguan lapisan batas termal tetapi diikuti oleh kerugian tekanan (Adachi dan Uehara., 2001).

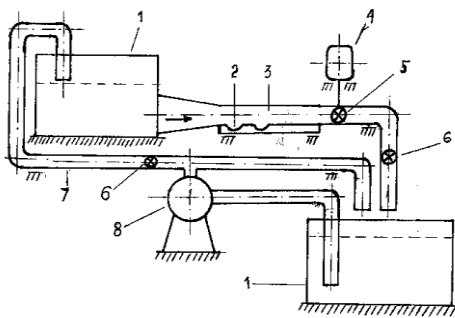
Aliran laminar dalam saluran beralur yang bertujuan untuk meningkatkan laju transport banyak dijumpai. Dalam bidang teknik seperti alat penukar kalor (*compact heat exchanger*),

* Prayitno Ciptoadi, Dosen Program Studi Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknik Unpatti

dan Uehara, 2005) dan juga dalam bidang keoksidan serta biokimia (Nishimura *et al.*, 1997). Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengetahui perilaku aliran fluida dalam saluran beralur melintang. Penelitian-penelitian tersebut dilakukan pada berbagai kondisi aliran baik kontinu maupun berdenyut dan berbagai bentuk alur seperti segiempat, segitiga atau setengah lingkaran namun jarak alur tetap. Oleh karena itu penelitian ini memberikan data perilaku aliran fluida berdenyut dalam saluran beralur melintang dengan jarak alur yang berubah-ubah.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan menggunakan peralatan seperti terlihat pada gambar 1



Gambar 1. Instalasi Penelitian

Keterangan:

1. Tandon air
2. Alur setengah lingkaran
3. Saluran
4. Motor listrik
5. Katup denyut
6. Katup pengatur aliran
7. Pipa-pipa
8. Pompa

Saluran dibuat dari bahan tembus pandang (mika) berpenampang segiempat. Ukuran saluran adalah panjang $l = 450$ mm, lebar $W = 120$ mm, tinggi $h = 14$ mm. Bagian atas saluran dibuat rata sedangkan bagian bawah diberi alur (*groove*). Alur dibuat berbentuk setengah lingkaran dengan ukuran jari-jari $r = 11,5$ mm. Jumlah alur yang digunakan dua buah dengan jarak antar alur L dibuat periodik terhadap keliling alur K yaitu $\frac{1}{2} K$ (G1), $\frac{3}{4} K$ (G2) dan K (G3) dengan $K = 72,22$ mm. Agar aliran dapat berdenyut, sebuah katup denyut yang digerakan oleh motor listrik dengan kecepatan putar 66 rpm ditempatkan pada bagian hilir saluran. Sebagai pembanding digunakan juga saluran tanpa alur (G0). Fluida kerja yang digunakan adalah air, kondisi aliran laminar dua dimensi. Variabel penelitian meliputi variabel bebas yaitu: Jarak antar alur L dan Bilangan Reynold Re sedangkan variabel terikat yaitu: frekuensi osilasi aliran serta beda tekanan statis. Tahapan pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut:

A. TEKNIK PENGAMBILAN DATA

1. Pengukuran Debit Aliran

Pengukuran debit aliran Q , berdasarkan volume air yang mengalir per satuan waktu. Volume air yang mengalir diatur melalui pembukaan katup yang ditempatkan sebelum dan sesudah saluran beralur. Data debit aliran digunakan untuk menentukan kecepatan aliran fluida dan bilangan Reynold. Kecepatan aliran fluida = debit aliran dibagi luas penampang saluran ($U = Q/A$) sedangkan bilangan Reynold Re dihitung dengan menggunakan persamaan (Nishimura *et al.*, 2001):

$$Re = \frac{U h}{\nu} \tag{1}$$

Dengan U = laju aliran, m.det⁻¹
 h = tinggi saluran, m
 ν = viskositas kinematik
 (1,007 x 10⁻⁶, m² det⁻¹)

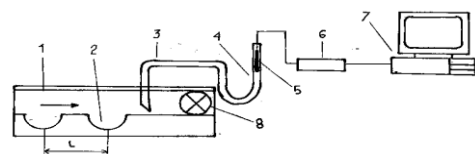
Tabel 1. Hasil Perhitungan Kecepatan Aliran dan Re

No	Re	Q, m ³ det ⁻¹	U, mdet ⁻¹
1	200	2,42 x 10 ⁻⁵	0,0144
2	450	5,44 x 10 ⁻⁵	0,032
3	700	8,46 x 10 ⁻⁵	0,050
4	950	1,15 x 10 ⁻⁴	0,068
5	1200	1,45 x 10 ⁻⁴	0,086
6	1450	1,75 x 10 ⁻⁴	0,104
7	1700	2,05 x 10 ⁻⁴	0,122

Sumber: Hasil pengukuran (data diolah)

2. Pengambilan Data Fluktuasi Kecepatan Aliran

Pengambilan data seperti terlihat pada gambar 2. Data diambil menggunakan sensor tegangan (salah satu tahanan jembatan Wheatstone) yang ditempatkan di dalam manometer yang berisi air. Manometer dihubungkan dengan saluran sedangkan sensor dihubungkan dengan ADC. Data ini ditampilkan pada monitor komputer dalam bentuk grafik dan teks kemudian disimpan dalam bentuk teks. Untuk menjamin keakuratan, jumlah data yang diambil adalah 400 data per detik dan dilakukan 5 kali pengulangan untuk tiap perlakuan. Pengambilan data ini diulangi untuk beberapa nilai variabel bebas.



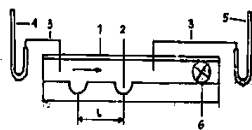
Gambar 2. Pengukuran fluktuasi Kecepatan Aliran Fluida

Keterangan:

1. Saluran
 2. Alur setengah lingkaran
 3. Pipa plastik
 4. Manometer
 5. Sensor tegangan
 6. ADC
 7. PPI card dan komputer
 8. Katup denyut
- L: Jarak antar alur

3. Pengambilan Data Tekanan Statis

Pengambilan data seperti terlihat pada gambar 3.



Gambar 3. Pengukuran Tekanan Statis

Keterangan:

1. Saluran
 2. Alur setengah lingkaran
 3. Pipa plastik
 4. Manometer 1
 5. Manometer 2
 6. Katup denyut
- L: Jarak antar alur

Tinggi kenaikan kolom air di dalam manometer 1 dibaca sebagai z_1 , sedangkan tinggi kenaikan kolom air di dalam manometer 2 dibaca sebagai z_2 .

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data fluktuasi kecepatan diolah dengan menggunakan program FFT untuk memperoleh frekuensi-frekuensi yang dominan dari tiap-tiap perlakuan. Selanjutnya dari data-data tersebut dihitung bilangan Strouhal Str dengan persamaan (White, 1991):

$$Str = \frac{f h}{U} \quad (2)$$

Dengan f = frekuensi osilasi aliran, Hz

Dari data-data tinggi kenaikan kolom air dihitung kerugian tekanan (*pressure drop*) Δp dengan persamaan (Streeter, 1983: 27)

$$\Delta p = \rho g \Delta z, \text{ kPa} \quad (3)$$

dengan:

- ρ = densitas fluida ($998,2 \text{ kg.m}^{-3}$)
- g = percepatan gravitasi ($9,806 \text{ m.det}^{-2}$)
- Δz = beda tinggi kenaikan kolom air ($z_1 - z_2$), m

koefisien gesek c_f dihitung dengan persamaan (Raisinghania, 2002: 664)

$$\tau = \frac{1}{2} c_f \rho U_c^2, \text{ kPa} \quad (5)$$

$$c_f = \frac{h}{2l} \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (4)$$

$$U_c = \omega r, \quad \omega = \frac{2\pi}{t}, \quad t = \frac{1}{f}$$

dengan: l = panjang saluran, m

Tegangan geser osilasi dihitung dengan persamaan (Raisinghania, 2002: 666)

$$U_c = \text{kecepatan keliling partikel fluida, m. det}^{-1}$$

$$\omega = \text{kecepatan sudut partikel fluida, rad.det}^{-1}$$

$$t = \text{periode osilasi, det}$$

$$r = \text{untuk saluran beralur diambil radius alur 11,5 mm, untuk saluran rata diambil radius katup denyut 11 mm.}$$

Gerakan fluida diatur oleh persamaan *Navier Stokes* yang ditulis dalam notasi vektor sebagai berikut (White, 1991: 69)

$$\rho \left[\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla) U \right] = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 U \quad (6)$$

dengan:

$$\mu = \text{viskositas dinamik, N.det.m}^{-2}$$

Didefinisikan *vorticity vector* Ω , suatu ukuran dari efek rotasi lokal elemen fluida (White, 1991: 89)

$$\Omega = \text{curl } U = 2 \times \omega \quad (7)$$

Jika diambil curl dari persamaan (5) diperoleh persamaan transport vorticity (Raisinghania, 2002: 639)

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + (U \cdot \nabla) \Omega = (\Omega \cdot \nabla) U + \nu \nabla^2 \Omega \quad (8)$$

A. Kekuatan Vortex

Kekuatan vortex digambarkan dengan Energi Kinetik yang dikandung oleh vortex, ditandai oleh amplitudo (simpangan) yaitu

Power Spectrum dari frekuensi-frekuensi vortex yang dominan.

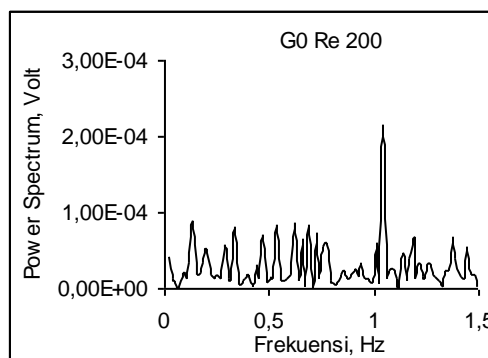
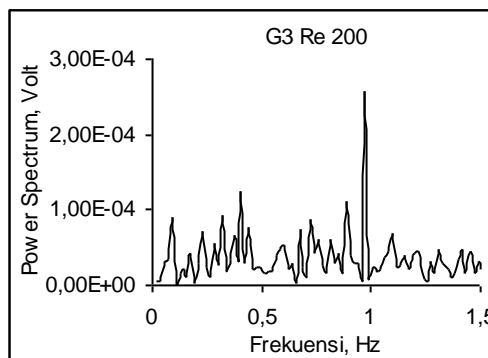
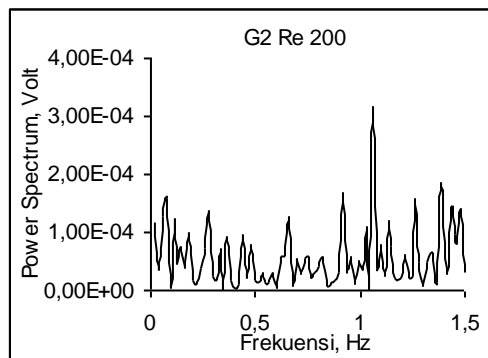
1. Grafik Frekuensi vs Power Spectrum

Power Spektrum dari frekuensi-frekuensi dominan dari tiap-tiap perlakuan pada Re tertentu dapat dilihat pada gambar 4a-4g. Dari gambar-gambar tersebut terlihat bahwa untuk perlakuan jarak antar alur $\frac{1}{2}$ kali keliling alur (G1) dan $\frac{3}{4}$ kali keliling alur (G2) pada Re 200-450 kondisi aliran adalah laminar tak stedi dengan munculnya satu vortex. Pada Re 700-1700 kondisi aliran adalah transisi tak stedi dengan munculnya tiga vortex yaitu satu vortex utama dan dua vortex tambahan.

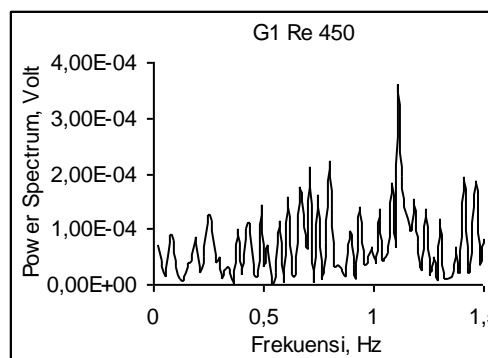
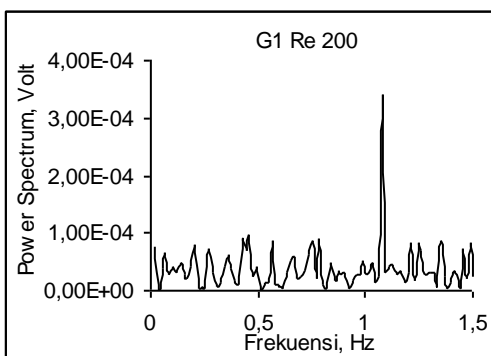
Sedangkan untuk perlakuan jarak antar alur satu kali keliling alur (G3) dan saluran tanpa alur (G0) aliran laminar tak stedi terjadi pada Re 200-700. Pada perlakuan ini aliran transisi tak stedi baru terjadi pada Re 950-1700.

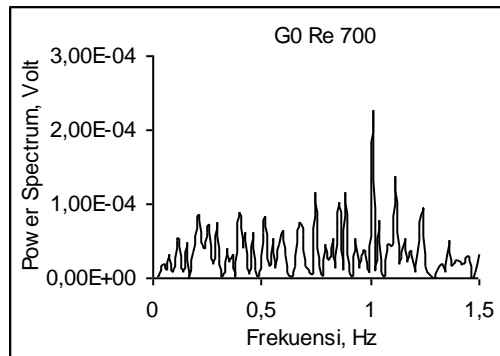
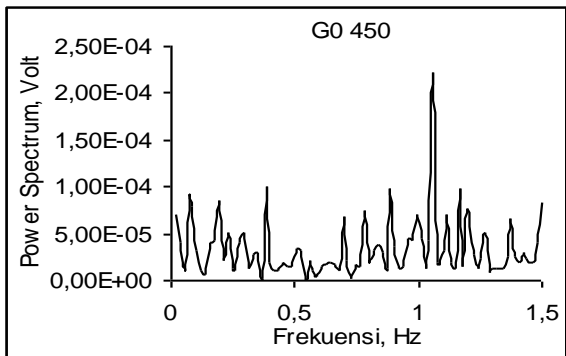
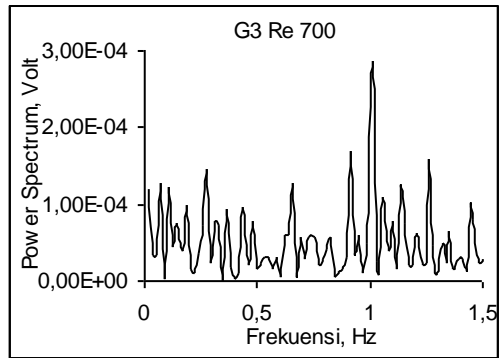
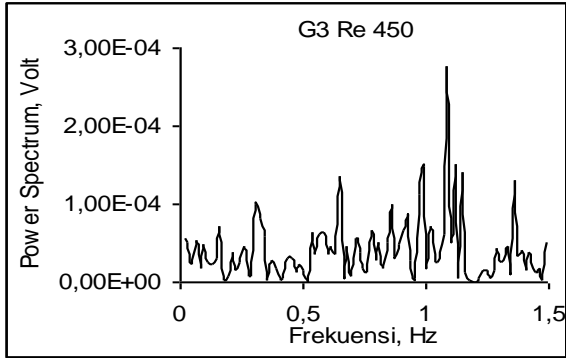
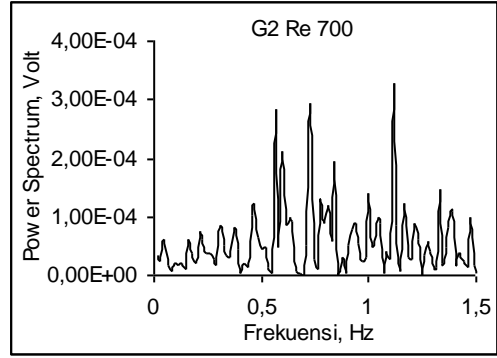
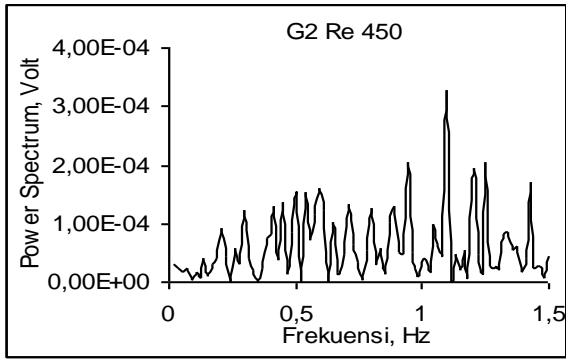
3. Grafik Kekuatan Vortex vs Bilangan Str

Pada aliran fluida laminar dalam saluran beralur akan terbentuk *shear layer* antara aliran utama dalam saluran dan aliran resirkulasi dalam alur. Untuk aliran yang berdenyut, pada fase akselerasi (katup denyut mulai membuka) *shear layer* mulai mengalami separasi. Sebuah vortex utama terbentuk dalam alur pada tepi atas sisi hulu. Pada saat laju aliran utama maksimum (katup denyut terbuka penuh) vortex utama memenuhi seluruh bagian alur. Ketika fase deselerasi (katup denyut mulai tertutup) vortex utama berkembang hingga keluar dari tepi alur. Disamping itu terbentuk vortex tambahan pada saluran rata dekat dinding bagian atas dengan tanda yang berlawanan dengan vortex utama. Kedua vortex yang berpasangan (*vortices*) tersebut memenuhi keseluruhan saluran pada saat laju aliran utama minimum (katup denyut tertutup). Setelah itu vortex tambahan menghilang. Proses ini berlangsung terus mengikuti osilasi aliran utama (Nishimura *et al.*, 1997).



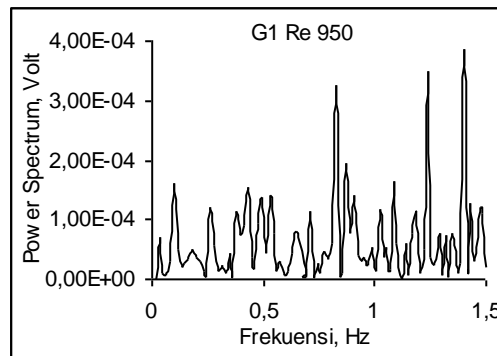
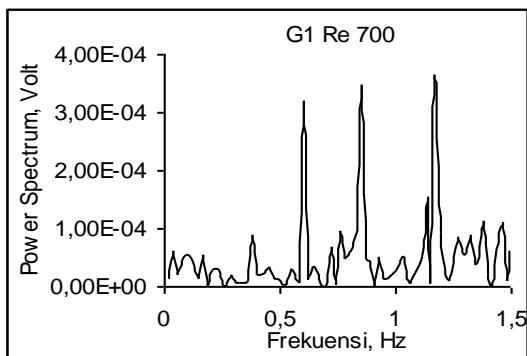
Gambar 4a. Grafik Frekuensi vs Power Spectrum Re 200

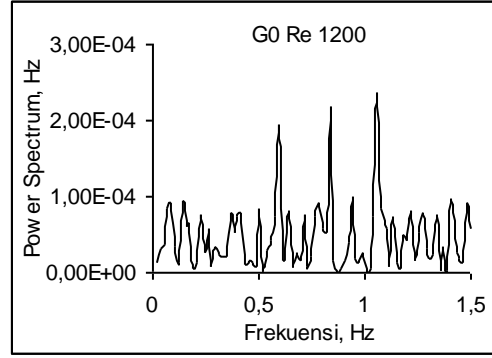
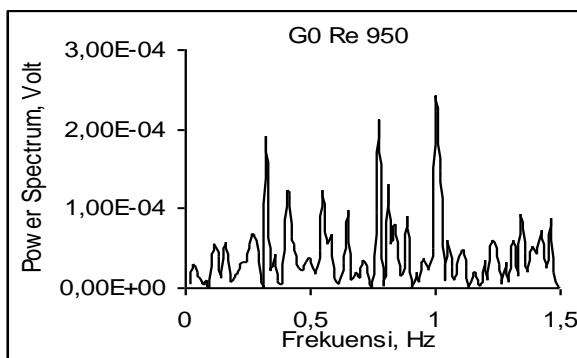
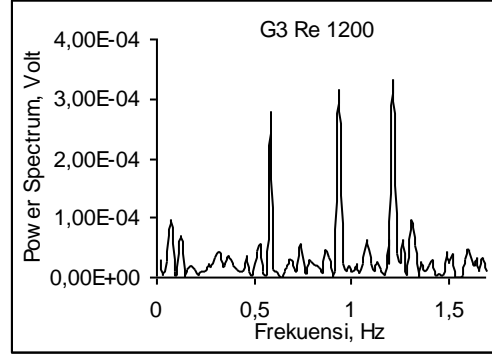
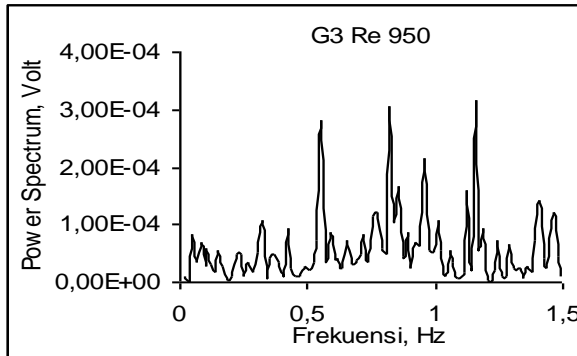
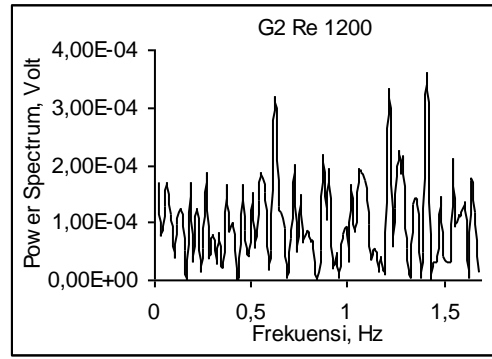
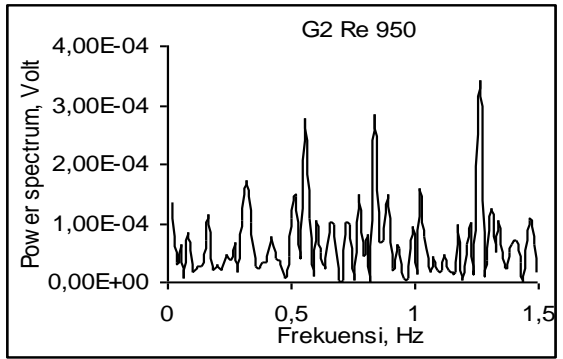




Gambar 4b. Grafik Frekuensi vs Power Spectrum Re 450

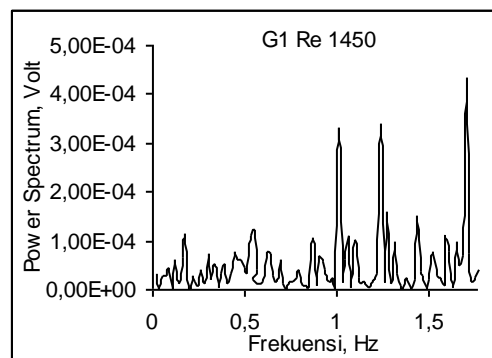
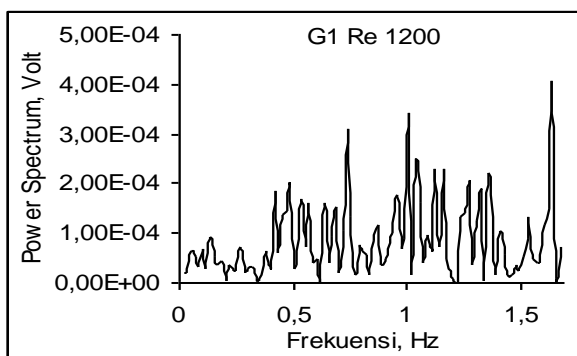
Gambar 4c. Grafik Frekuensi vs Power Spectrum Re 700

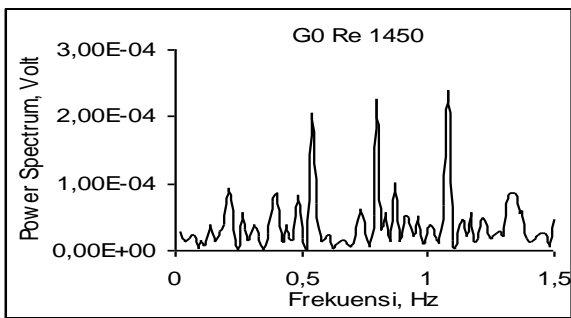
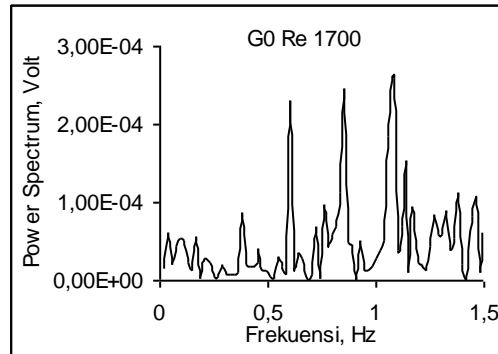
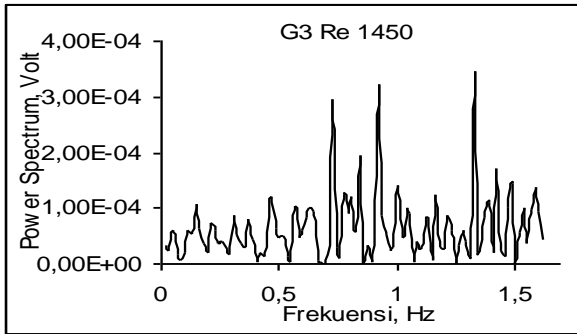
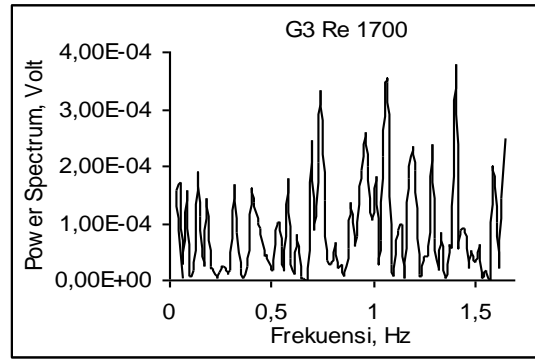
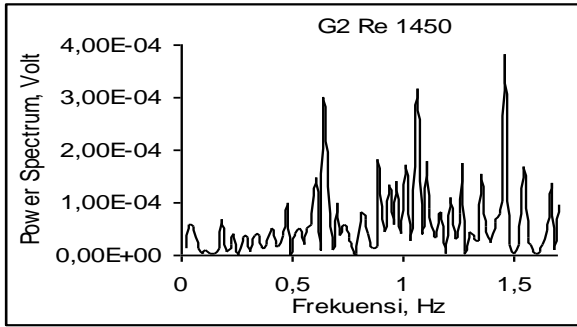




Gambar 4d. Grafik Frekuensi vs Power Spectrum Re 950

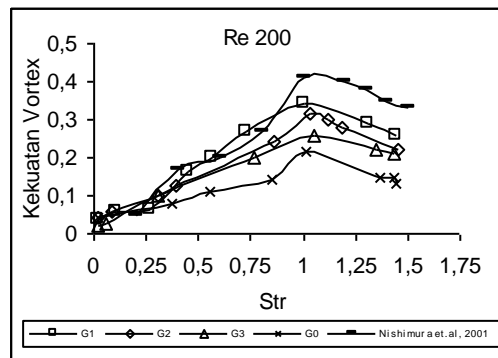
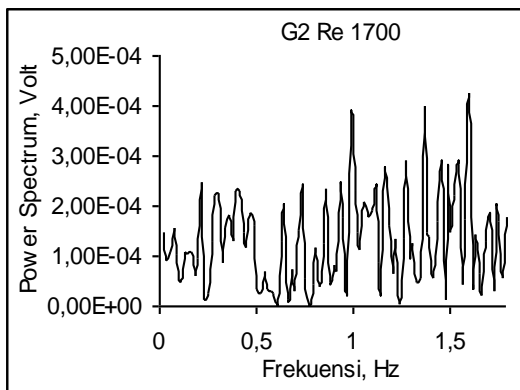
Gambar 4e. Grafik Frekuensi vs Power Spectrum Re 1200



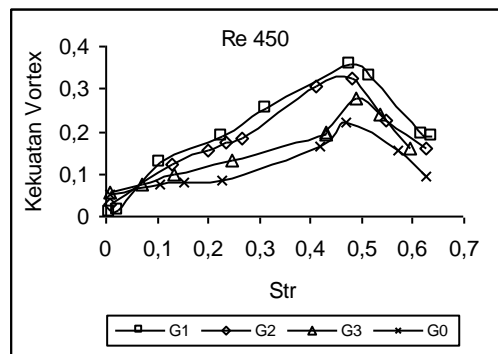


Gambar 4g. Grafik Frekuensi vs Power Spectrum Re 1700

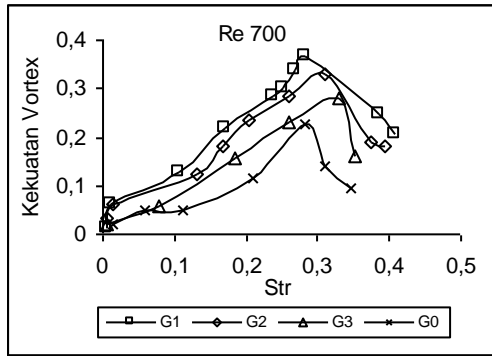
Gambar 4f. Grafik Frekuensi vs Power Spectrum Re 1450



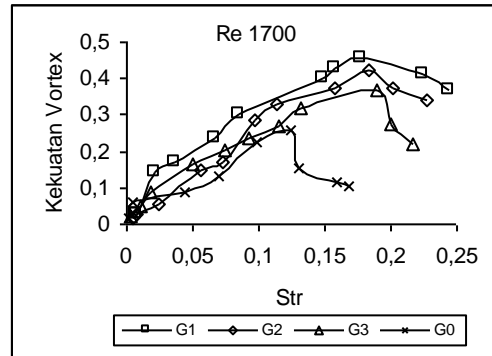
5.a.



5.b.

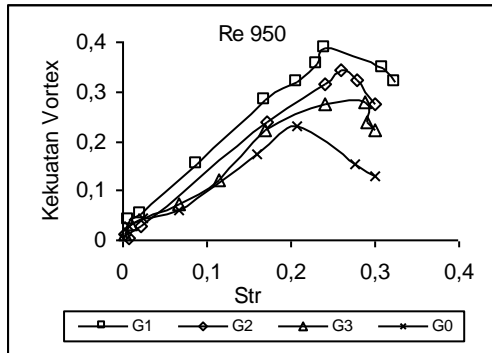


5.c.

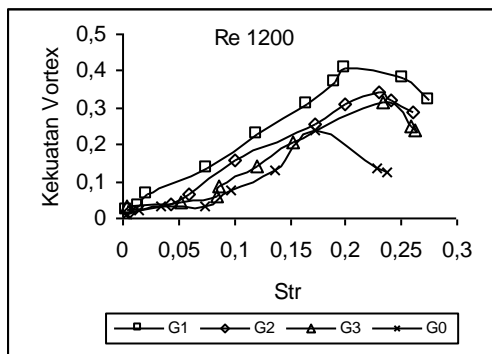


5.g.

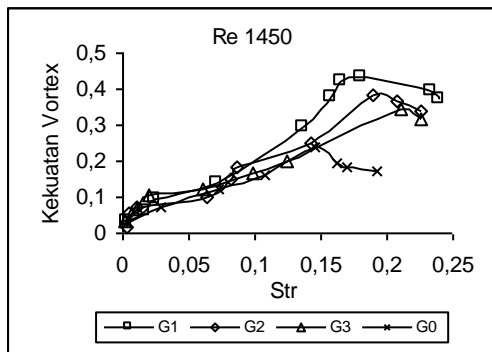
Gambar 5. Grafik Kekuatan Vortex vs Str



5.d.



5.e.



5.f.

Dari fenomena di atas dapat dilihat bahwa terjadi penggabungan (*merging*) vortex ketika laju aliran utama minimum. Proses ini didominasi oleh efek tak stedi ($\partial\Omega/\partial t$) dan efek kekentalan ($\nu V^2\Omega$) dari persamaan (7) sedangkan efek inersia non linear $(U \cdot V)\Omega$ berkurang. Pertumbuhan vortex utama di dalam alur selama fase deselerasi menimbulkan semprotan (*ejection*) fluida di dalam alur dan menghasilkan pertukaran partikel-partikel fluida antara alur dan saluran melintasi *shear layer* (Nishimura *et al.*, 2001). Interaksi antara vortex utama di dalam alur dan vortex tambahan di dalam saluran juga meningkatkan pencampuran (*mixing*) fluida yang didominasi oleh efek *vortex-stretching* $(\Omega \cdot V)U$ dari persamaan (7) (Gloerfelt *et al.*, 2002).

Pertukaran partikel-partikel fluida antara alur dan saluran dihubungkan dengan kekuatan vortex utama dan transport momentum osilasi melintasi *shear layer* tergantung pada bilangan Re dan bilangan Str. Hubungan antara kekuatan vortex dan bilangan Str untuk tiap perlakuan pada bilangan Re tertentu dapat dilihat pada gambar 5.

Dari grafik pada gambar 5 terlihat bahwa kekuatan vortex meningkat seiring meningkatnya bilangan Str. Kekuatan vortex mencapai nilai maksimum pada bilangan Str tertentu disebabkan pada nilai bilangan Str tersebut telah terjadi *self sustained oscillatory flow*. Kondisi ini dikarenakan oleh kecepatan aliran osilasi di dalam alur telah mencapai kecepatan aliran utama di dalam saluran dimana terjadi peningkatan amplitudo vortex utama dan munculnya vortex tambahan. Dari grafik juga dapat dilihat bahwa nilai bilangan Str pada mana kekuatan vortex maksimum untuk $G1 < G2 < G3$. Hal ini mengindikasikan bahwa interaksi antara *vortex-vortex* utama dalam dua alur dipengaruhi oleh jarak antar alur. Interaksi akan lebih kuat dan lebih cepat mencapai nilai maksimum pada jarak antar alur paling pendek. Untuk saluran tanpa alur kekuatan vortex hanya tergantung pada osilasi aliran utama dan nilainya kecil dibandingkan

dengan nilai kekuatan *vortex* pada saluran beralur.

Grafik bilangan Str vs kekuatan *vortex* diverifikasi dengan penelitian Nishimura *et. al*, (2001) pada bilangan Re 200. Kekuatan *vortex* (2001) pada bilangan Re 200. Kekuatan *vortex* maksimum dari Nishimura *et. al*, (2001) lebih tinggi karena faktor geometri alur. Pada penelitian mereka digunakan alur berbentuk segiempat dengan panjang alur dua kali kedalamannya.

B. Pressure Drop

Data-data pengukuran tekanan statis aliran diolah dengan persamaan (3), sehingga diperoleh nilai *pressure drop* dari setiap perlakuan pada bilangan Re tertentu dan ditabulasi pada tabel 3. Data-data *pressure drop* kemudian diolah lagi dengan persamaan (4) untuk memperoleh nilai koefisien gesek dan nilai koefisien gesek dipakai untuk menghitung tegangan geser osilasi dengan persamaan (5).

Tabel 2. Hasil Perhitungan Δp

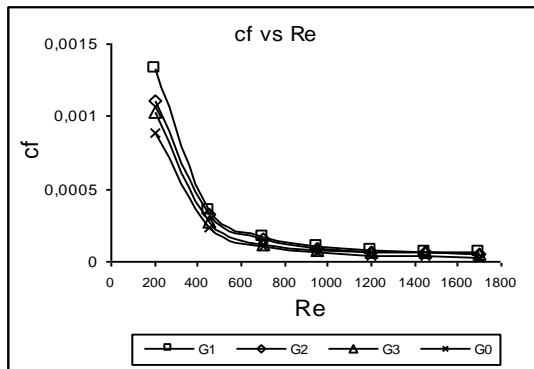
Re	Δp , kPa			
	G1	G2	G3	G0
200	0,0088	0,0073	0,0068	0,0058
450	0,0117	0,0107	0,0088	0,0078
700	0,0137	0,0127	0,0097	0,0088
950	0,0146	0,0137	0,0117	0,0097
1200	0,0185	0,0166	0,0156	0,0107
1450	0,0234	0,0225	0,0215	0,0117
1700	0,0283	0,0264	0,0254	0,0127

Sumber: Hasil pengukuran (data diolah)

1. Grafik Koefisien Gesek vs Re

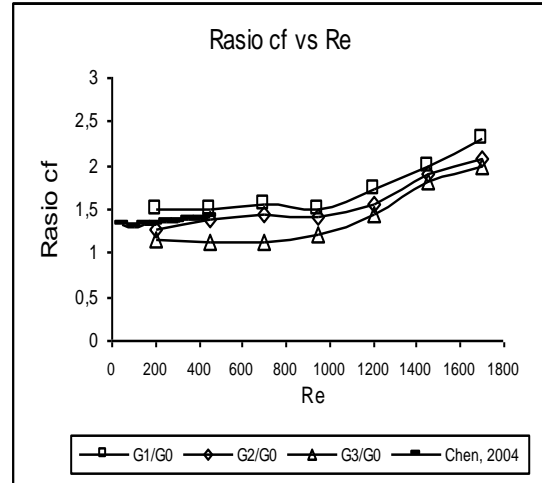
Hubungan antara koefisien gesek dan bilangan Re digambarkan dalam bentuk grafik pada gambar 6. Dari grafik tampak bahwa koefisien gesek menurun seiring meningkatnya bilangan Re. Pada bilangan Re 200-700 koefisien gesek menurun tajam. Hal ini disebabkan karena dalam interval bilangan Re ini fluktuasi kecepatan aliran mendapat

hambatan yang kuat dari gaya kekentalan. Proses transport momentum antara dinding saluran dan fluida masih lebih banyak didominasi oleh efek difusi.



Gambar 6. Grafik Koefisien Gesek vs Re

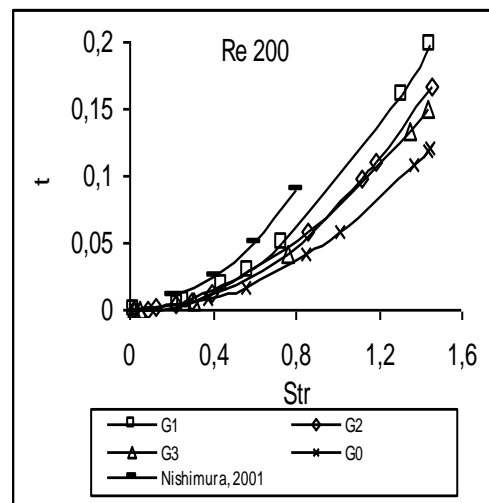
Pada bilangan Re 700-1700 penurunan koefisien gesek tidak terlalu tajam. Hal ini disebabkan karena pada interval bilangan Re ini fluktuasi kecepatan aliran mendapat hambatan yang sudah mulai lemah dari gaya kekentalan. Proses transport momentum antara dinding saluran dan fluida lebih banyak didominasi oleh efek konveksi karena efek kekentalan mulai melemah.

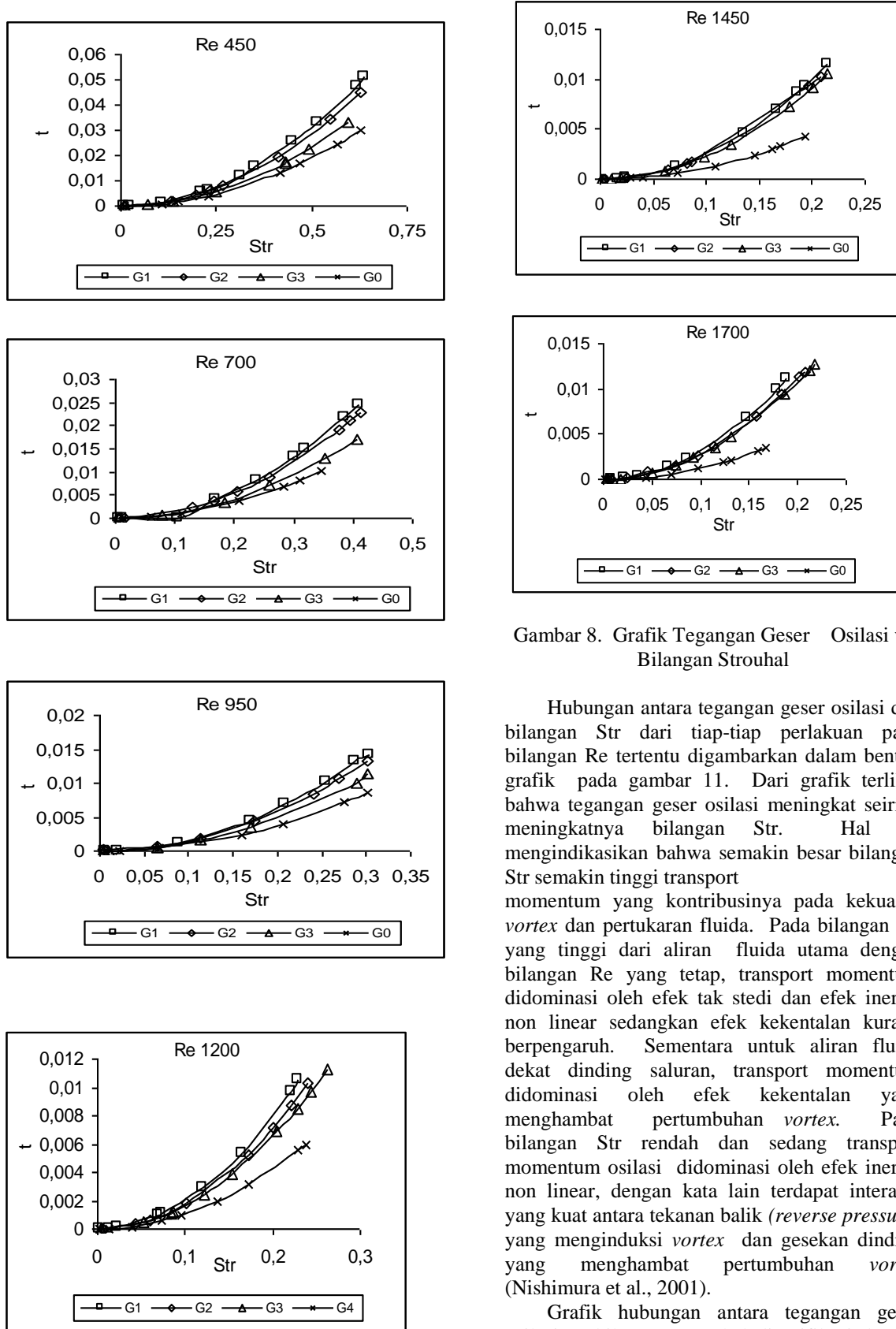


Gambar 7. Rasio Koefisien Gesek vs Re

Grafik koefisien gesek vs bilangan Re diverifikasi dengan penelitian Chen *et. al*, 2004 dalam bentuk rasio koefisien gesek (gambar 7) yaitu perbandingan antara koefisien gesek saluran beralur terhadap koefisien gesek gesek saluran tanpa alur. Penelitian Chen *et. al*, 2004 menggunakan saluran dengan alur berbentuk segitiga

2. Grafik Tegangan Geser Osilasi vs Str





Gambar 8. Grafik Tegangan Geser Osilasi vs Bilangan Strouhal

Hubungan antara tegangan geser osilasi dan bilangan Str dari tiap-tiap perlakuan pada bilangan Re tertentu digambarkan dalam bentuk grafik pada gambar 11. Dari grafik terlihat bahwa tegangan geser osilasi meningkat seiring meningkatnya bilangan Str. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin besar bilangan Str semakin tinggi transport momentum yang kontribusinya pada kekuatan *vortex* dan pertukaran fluida. Pada bilangan Str yang tinggi dari aliran fluida utama dengan bilangan Re yang tetap, transport momentum didominasi oleh efek tak stedi dan efek inersia non linear sedangkan efek kekentalan kurang berpengaruh. Sementara untuk aliran fluida dekat dinding saluran, transport momentum didominasi oleh efek kekentalan yang menghambat pertumbuhan *vortex*. Pada bilangan Str rendah dan sedang transport momentum osilasi didominasi oleh efek inersia non linear, dengan kata lain terdapat interaksi yang kuat antara tekanan balik (*reverse pressure*) yang menginduksi *vortex* dan gesekan dinding yang menghambat pertumbuhan *vortex* (Nishimura et al., 2001).

Grafik hubungan antara tegangan geser osilasi vs bilangan Strouhal diverifikasi dengan penelitian Nishimura et al., 2001 pada bilangan Reynold Re 200. Grafik menunjukkan kecenderungan yang mirip meskipun agak

berbeda nilainya dikarenakan Nishimura *et al.*, 2001 menggunakan alur berbentuk segiempat.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Aliran berdenyut dalam saluran berpenampang segiempat yang diberi alur setengah lingkaran melintang dengan jarak alur $\frac{1}{2}$ kali keliling alur (G1) dan $\frac{3}{4}$ kali keliling alur (G2) pada bilangan Re 200-450, aliran adalah laminar tak stedi dengan munculnya *vortex* frekuensi tunggal dan pada bilangan Re 700-1700 aliran adalah transisi tak stedi dengan *vortex* tiga frekuensi. Sedangkan untuk jarak antar alur satu kali keliling alur (G3) mirip dengan saluran tanpa alur (G0) yaitu pada bilangan Re 200-700 aliran adalah laminar tak stedi dengan *vortex* frekuensi tunggal dan pada bilangan Re 950-1700 aliran adalah transisi tak stedi dengan *vortex* tiga frekuensi.
2. Kekuatan *vortex* dipengaruhi oleh bilangan Re, bilangan Str dan jarak antar alur. Pada interval bilangan Re laminar tak stedi bilangan Str untuk G1, G2, G3 dan G0 mempunyai nilai yang identik sedangkan pada interval bilangan Re transisi tak stedi bilangan Str untuk G1 bernilai paling tinggi diikuti oleh G2, G3 dan G0.
3. Tegangan geser osilasi dipengaruhi oleh bilangan Re, bilangan Str dan jarak antar alur. Nilainya meningkat seiring meningkatnya bilangan Str mengindikasikan bahwa semakin besar bilangan Str semakin tinggi transport momentum yang kontribusinya pada kekuatan *vortex* dan pertukaran fluida.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhaci, T. and Uehara, H. (2001). "Correlation etween Heat Transfer and Pressure Drop in Channels With Periodically Grooved Parts", *International Journal of Heat and Mass Transfer* (44): 4333-4343.
- Adhaci, T. and Uehara, H. (2003). "Linear Stability Analisis of Flow in a Periodically rooved Channel", *International Journal for Numerical Methods in Fluids* (41): 601-613.
- Chen, Yu-Tang; Kang, Shung-Wen; Tuh, Wen-Chian and Hsiao, Tsung-Hsin, (2004). Experimental Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microchannels", *Tamkang Journal of Science and Engineering* Vol. 7: 11-16.
- Ciptoadi, P. (2006). "Pengaruh Jarak Alur Terhadap Kekuatan Vortex dan Rugi Tekanan Aliran Fluida Berde-nyut Dalam Saluran Berpenampang Segiempat", *Journal Ilmu-ilmu Teknik Diagonal*, Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang, Vol. 7 No. 1
- Gloerfelt, X.; Bogey, Ch.; Bailly, Ch. and Juve, D. (2002). "Aerodynamic Noise Induced by Laminar and Turbulent Boundary Layer Over Rectangular Cavities", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2476
- Kang, E. (2001). "Transport Enhancement for Groved Channel" <http://www.me.jhu.edu/~htl/people/eric/resrch.htm>
- Kunitsugu, T. and Nishimura, T. (2000). "The Development Process of Self-Sustained Oscillatory Flow in a Grooved Chanel", *Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University, Ube, 755-8611 Japan.*
- Nishimura, T.; Morega, A.M. and Kunitsugu, K. (1997). "Vortex Structure and Fluid Mixing in Pulsatile Flow Through Periodically Grooved Channels at Low Reynold Numbers", *JSME International Journal Series B, Vol. 40, No. 3: 377- 385.*
- Nishimura, T.; Yoshinaka, M, and Kunitsugu, K. (2001). "Oscillatory Momentum Transport and Fluid Mixing in Grooved Channels for Pulsatile Flow", *Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University, Ube, 755-8611 Japan.* Channel Flow", *Int. J. Heat and Fluid Flow* 16: 398-404.
- Raishingania, M.D. (2002). "Fluid Dynamics (With Hydrodynamics)", Fourth revised edition, New Delhi: S. Chand & Company LTD.
- Streeter, V.L. and Wylie, E.B. (1983). "Fluid Mechanics", Seventh edition. McGraw-Hill International Book Company.
- White, F.M. (1991). "Viscous Fluid Flow", Second edition, McGraw-Hill, Inc.
- Wijaya, H. (2003). "Pengaruh Osilasi A liran Pada Dinding Beralur Setengah Lingkaran Melintang Terhadap Kemampuan indah Panas", *Tesis-S2, Program Studi Teknik Mesin niversitas Brawijaya, Malang.*