

PENGARUH JARAK ALUR TERHADAP KEKUATAN VORTEX DAN BILANGAN REYNOLD KRITIS 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 Reynold number. The critical Reynold 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 vortex strength and the critical Reynold number. 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 manometer and a U manometer was used to measure the static pressure, measurement was done together at several Reynold number. From the research result it is seen that the largest vortex strength occurs at the smallest groove distance with the increase of pressure drop. The critical Reynold number becomes larger when groove distances increase that is for groove distance of $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ time its circumference is 700 while for groove distances equal its circumference is 950.

Key word: Pulsatile flow, grooved channel, laminar flow, vortex strength, critical Reynold number

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 Reynold 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 Reynold kritis tertentu. Ketidakstabilan ini muncul karena dipicu oleh munculnya *Tollmien-Schlichting wave*. Aliran yang berosilasi menginduksi tegangan Reynold (*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).

^{*)} Prayitno Ciptoadi; Dosen Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Unpatti

Kekuatan *vortex* dihubungkan dengan pertukaran fluida antara alur dan saluran dan transport momentum osilasi melintasi *shear layer* (Nishimura *et al.*, 2001). Pada aliran fluida berdenyut di dalam saluran beralur melintang, *vortex* utama muncul dalam alur pada dinding bagian bawah saluran selama fasa deselerasi (*deceleration phase*) dan suatu *vortex* tambahan dibangkitkan dekat dinding rata pada bagian atas saluran. Proses pengisian dan pengosongan *vortex* utama menimbulkan pertukaran fluida antara alur dan saluran (Nishimura *et al.*, 1997).

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. 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).

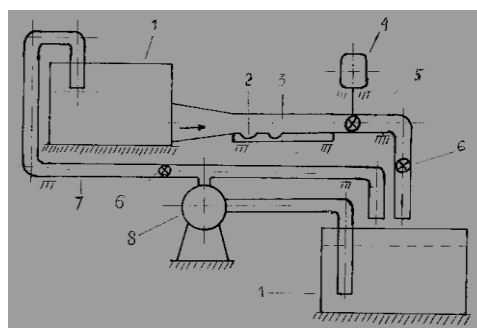
Aliran tak stedi yang berkembang di dalam daerah beralur berlangsung juga dalam daerah saluran rata (tanpa alur di sebelah hilir) hingga mencapai beberapa kali panjang alur. Hal ini mengakibatkan peningkatan perpindahan panas lokal dan rugi tekanan pada aliran stedi di dalam saluran rata (Greiner *et al.*, 2000). Hal yang sama dilaporkan oleh Obi *et al.* (1995) bahwa perpindahan panas dalam saluran beralur meningkat sebagai konsekuensi dari gerakan turbulen fluida, tetapi tidak dapat dihindari rugi tekanan akibat berkurangnya tinggi saluran. Intensitas turbulensi meningkat seiring berkurangnya tinggi saluran.

Aliran laminar dalam saluran beralur yang bertujuan untuk meningkatkan laju transport banyak dijumpai. Dalam bidang teknik seperti alat penukar kalor (*compact heat exchanger*), sistem pendingin mikroelektronik (Adachi dan Uehara, 2003) dan juga dalam bidang kedokteran 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 kontinyu 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 pada gambar 1.



Gambar 1. Instalasi Penelitian

Kerangan:

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

digerakkan 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: Bilangan Reynold Re dan Jarak antar alur L sedangkan variabel terikat yaitu: frekuensi osilasi aliran serta beda tekanan statis. Tahapan pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Teknik Pengambilan data

a. 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)

Hasil perhitungan kecepatan aliran dan Re dapat dilihat pada Tabel 1.

b. Pengambilan Data Fluktuasi Kecepatan Aliran

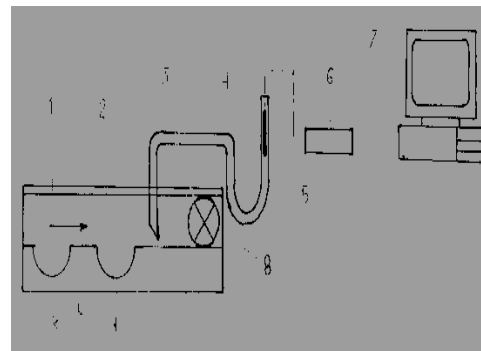
Pengambilan data seperti terlihat pada gambar 2. Data diambil menggunakan sensor tegangan (salah satu tahanan jembatan Wheatstone) yang ditempatkan di dalam manometer yang berisi air.

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)

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.

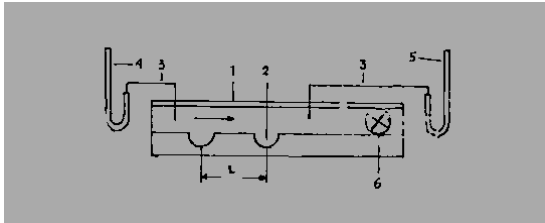
Gambar 2. Pengukuran Fluktuasi Kecepatan Aliran Fluida

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

c. 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):

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

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

$(z_1 - z_2), \text{ m}$

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

$$\rho \left[\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla) U \right] = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 U \quad (4)$$

dengan:

μ = viskositas dinamik, N.det.m^{-2}
 U = kecepatan fluida, m.det^{-1}
 t = waktu, det

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

$$\Omega = \text{curl } U = 2 \times \omega \quad (5)$$

Jika diambil curl dari persamaan (4) diperoleh persamaan transport vorticity (Raisinghanian, 2002: 639)

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + (U \cdot \nabla) \Omega = (\Omega \cdot \nabla) U + \nu \nabla^2 \Omega \quad (6)$$

A. Kekuatan Vortex

Kekuatan vortex digambarkan dengan bilangan Strouhal Str dan Energi Kinetik yang dikandung oleh vortex.

1. 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*)

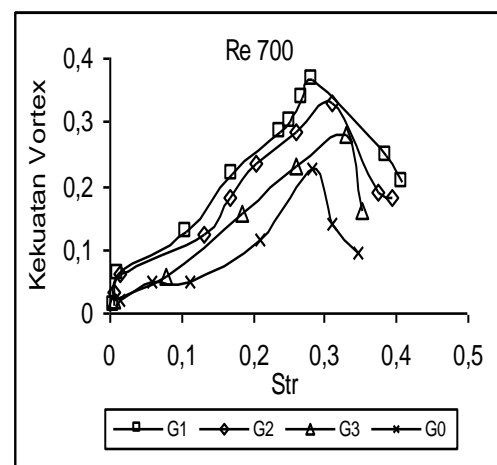
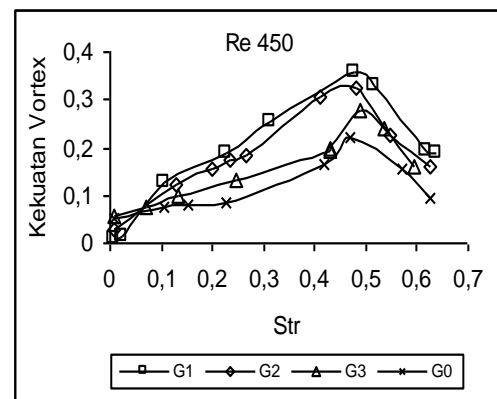
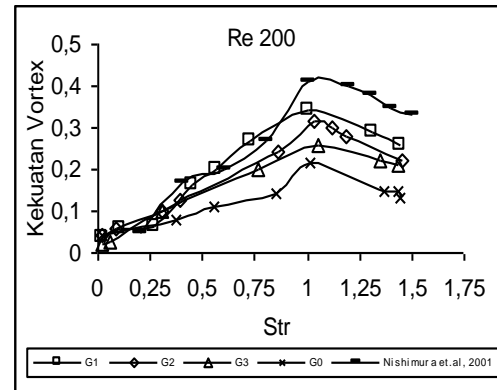
tersebut memenuhi keseluruhan saluran pada saat laju aliran utama minimum (katup denyut tertutup). Setelah itu vortex tambahan menghilang. Proses ini berlangsung terus mengikuti osilasi aliran utama (Nishimura *et al.*, 1997).

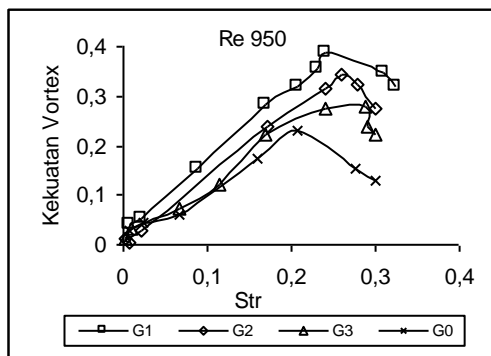
Dari fenomena di atas dapat dilihat bahwa terjadi penggabungan vortex (*merging*) ketika laju aliran utama minimum. Proses ini didominasi oleh efek tak stedi ($\partial\Omega/\partial t$) dan efek kekentalan ($\nu V^2\Omega$) dari persamaan (6) sedangkan efek inersia non linear $(U \cdot V)\Omega$ berkurang. 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 (6) (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 Re untuk tiap perlakuan pada bilangan Re tertentu dapat dilihat pada gambar 4.

Dari grafik pada gambar 4 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.





Gambar 4. Grafik Kekuatan Vortex vs Str

Grafik bilangan Str vs kekuatan vortex diverifikasi dengan penelitian Nishimura *et. al*, (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.

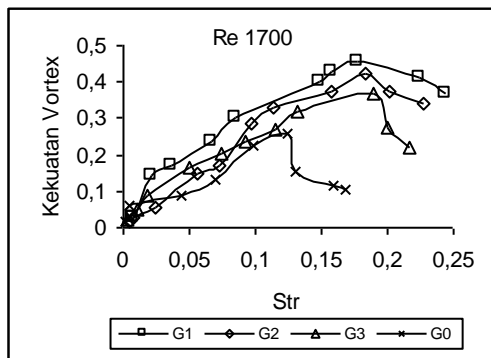
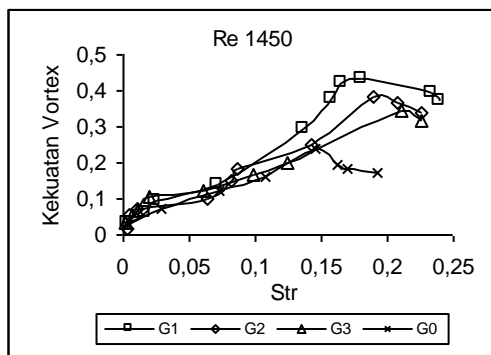
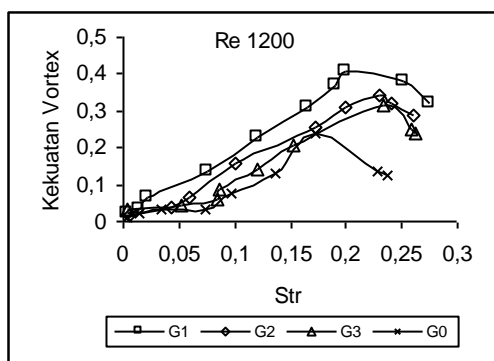
B. Pressure Drop

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 2.

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

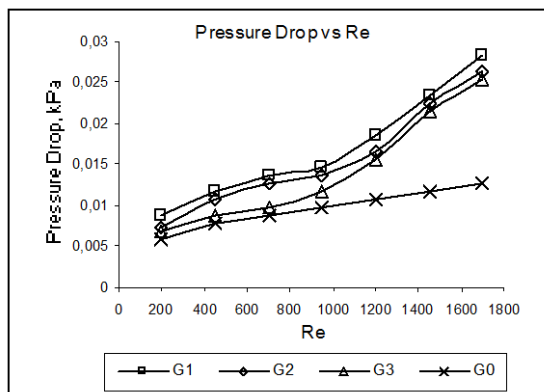
Sumber: Hasil pengukuran (data diolah)



1. Grafik Pressure Drop vs Bilangan Re

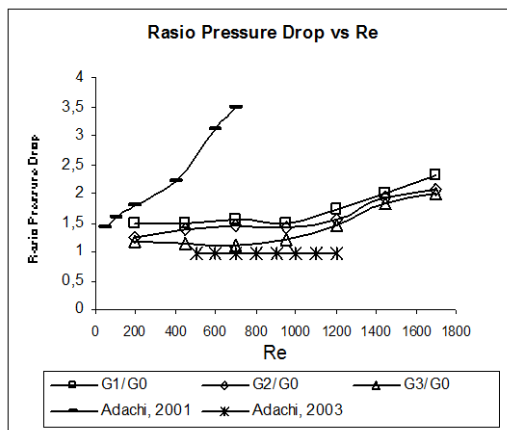
Hubungan antara *pressure drop* dan bilangan Re digambarkan dalam grafik pada gambar 5. Dari grafik tampak bahwa *pressure drop* meningkat seiring meningkatnya bilangan Re. Pada saat aliran memasuki permukaan rata sebelum alur, kecepatannya masih relatif seragam dan kondisi aliran irrotasional. Pada daerah ini gradien tekanan dekat dinding masih nol, dikarenakan belum terbentuk pemisahan (separasi) lapisan batas.

Ketika aliran meliwati titik stagnasi perubahan kekasaran, terjadi fluktuasi kecepatan yang mendorong lapisan batas menjauhi dinding dengan pemisahan terbatas. Akibatnya terjadi gradien tekanan dekat dinding. Peristiwa tersebut akan meningkat dengan meningkatnya bilangan Re.



Gambar 5. Grafik Pressure Drop vs Re

Adanya alur dalam saluran yang membangkitkan *self-sustained oscillatory flow* sangat mempengaruhi *pressure drop*. Aliran yang berosilasi menginduksi tegangan Reynold (*Reynold stress*) yang mampu meningkatkan difusi momentum yaitu mengangkut energi dari aliran utama ke aliran osilasi dan mempertahankannya. Akibatnya kerugian tekanan dari aliran utama meningkat dengan munculnya aliran osilasi (Adachi dan Uehara, 2003).



Gambar 6. Grafik Rasio Pressure Drop vs Re

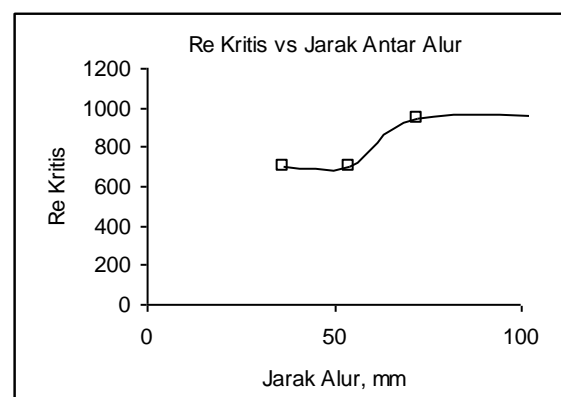
Dari grafik terlihat bahwa peningkatan *pressure drop* terjadi sangat drastis pada bilangan Re 950 untuk perlakuan G1, G2 dan G3. Hal ini disebabkan karena pada bilangan Re tersebut telah terjadi *self sustained oscillatory flow* dimana sebagian energi aliran utama diserap oleh aliran osilasi. Kondisi ini menyebabkan fluktuasi kecepatan dan pemisahan lapisan batas semakin meningkat ke arah hilir. Akibatnya

terjadi perbedaan tekanan di sisi masuk dan sisi keluar aliran, dimana tekanan di sisi masuk relatif lebih besar dari pada tekanan di sisi keluar. Untuk perlakuan G0 peningkatan *pressure drop* tidak sedrastis G1, G2, dan G3 karena osilasi aliran hanya tergantung pada kecepatan putar katup denyut.

Grafik *pressure drop* diverifikasi dengan penelitian terdahulu dalam bentuk *rasio pressure drop* (gambar 6) yaitu perbandingan antara *pressure drop* saluran beralur terhadap *pressure drop* saluran tanpa alur. *Pressure drop* penelitian ini lebih tinggi dari penelitian Adachi dan Uehara, 2003 karena mereka menggunakan alur segiempat dengan kondisi aliran tanpa denyut. Sebaliknya lebih rendah dari penelitian Adachi dan Uehara, 2001 karena mereka menggunakan alur segiempat atas bawah dengan kondisi aliran tanpa denyut.

2. Grafik Jarak Antar Alur Terhadap Re Kritis

Hubungan antara jarak antar alur terhadap bilangan Re kritis digambarkan dalam bentuk grafik pada gambar 7. Dari grafik tersebut terlihat bahwa peningkatan bilangan Re kritis terjadi seiring meningkatnya jarak alur. Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada jarak alur yang kecil, interaksi antara *vortex-vortex* utama yang muncul di dalam alur semakin kuat sehingga pada bilangan Re yang relatif kecil telah terjadi peralihan kondisi aliran dari laminar stedi ke transisi tak stedi dengan munculnya *self-sustained oscillatory flow*.



Gambar 7. Re Kritis vs Jarak Antar Alur

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. 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.
2. *Pressure drop* meningkat seiring meningkatnya bilangan Re dan peningkatannya drastis pada Re dimana mulai terjadinya *self-sustained oscillatory flow*. Nilai *pressure drop* paling tinggi terjadi pada G1 diikuti oleh G2, G3 dan G0.
3. Bilangan Reynold kritis membesar jika jarak antar alur meningkat yaitu untuk jarak antar alur $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ kali keliling alur Re kritis 700 sedangkan untuk jarak antar alur sama dengan keliling alur Re kritis 950.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhaci, T. and Uehara, H. 2001. **Correlation Between 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 Grooved Channel**, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* (41): 601-613.
- Ciptoadi, P. (2006). **"Pengaruh Jarak Alur Terhadap Kekuatan Vortex dan Rugi Tekanan Aliran Fluida Berdenyut Dalam Saluran Berpenampang Segiempat"**, *Journal Ilmu-Ilmu Teknik Diagonal*, Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang, Vol, 7 No. 1
- Ciptoadi, P. (2009). **"Pengaruh Jarak Alur Terhadap Kekuatan Vortex dan Tegangan Geser Osilasi Aliran Fluida Berdenyut Dalam Saluran Berpenampang Segiempat"**, *Jurnal Teknologi*, Fakultas Teknik Universitas Pattimura, Vol, 6 No. 2
- Juve, D. 2002. **Aerodynamic Noise Induced by Laminar and Turbulent Boundary Layer Over Rectangular Cavities**, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2476
- Greiner, M.; Tufo, H.M.; Fischer, P.F. and Wirtz, R.A, 2000. **Three Dimensional Simulations of Enhanced Heat Transfer in a Flat Passage Downstream from a Grooved Channel**, *Proc. 34th National Heat Transfer Conference, Pittsburgh, Pennsylvania.*
- 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.*
- Obi, S.; Kobayashi, K.P.; Bethancourt, A.M.; Yoshida, H.; Asano, T. and Echigo, R. 1995. **Experimental and Computational Study of Turbulent Heat Transfer Characteristics in Serrrated Channel Flow**, *Int. J. Heat and Fluid Flow* 16: 398-404.
- Raishingania, M.D. 2002. **Fluid Dynamics (With Hydrodynamics)** Fourth revised edition, S. Chand & Company LTD. New Delhi.
- 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.

