

PENGUJIAN KARAKTERISTIK ALIRAN FASA TUNGGAL ALIRAN AIR HORIZONTAL PADA ANNULUS SEMPIT DARI PENUKAR KALOR PIPA KONSENTRIK

Wibawa Endra J¹, Tri Istanto¹, Yusno Yulianto²

¹ Staf Pengajar – Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

² Alumnus Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

Keywords :

Friction factor
Laminar
Narrow annulus
Reynolds number
Turbulent

Abstract :

This research was conducted to investigate flow characteristics with/without heat exchange of single phase horizontal water flow in narrow annulus of a concentric tube heat exchanger. Test section was a concentric tube heat exchanger. The inner tube was made of aluminium with inside and outside diameters of 17.34 mm and 19.07 mm. The outer tube was made of aluminium with inside and outside diameters of 23.84 mm and 25.14 mm. The pressure measuring length was 1,198 mm. Hydraulic diameter of narrow annulus was 4.77 mm. Flows in the inner tube and in annulus were in opposite directions. Working fluid used in this research was water. For the flow with heat exchange, the water temperature at the inlet of inner tube was maintained at 60 °C. In this research, the water mass flow rate and pressure drop across narrow annulus were measured at steady states. Results of the research were compared with predictions from conventional flow theory. Results of the research shown that the flow characteristics of water through the narrow annulus were different from those in normal pipes. The transition from laminar to turbulent flow was initiated earlier than that in normal pipes, i.e. at a Reynolds number range from 1,400 to 1,800. The flow friction factor of the horizontal flow with heat exchange was larger than that without heat exchange at the Reynolds number lower than 800. The flow friction characteristics in narrow annulus had relations to liquid temperature difference at the inlet and outlet of the annulus. It was concentrated in the laminar flow area.

PENDAHULUAN

Penukar kalor atau lebih sering disebut dengan *heat exchanger* adalah suatu alat yang digunakan sebagai media transfer kalor antara fluida panas dan fluida dingin. Penukar kalor banyak digunakan dalam bidang rekayasa, misalnya: dalam hal pemanas ruangan, pengkondisian udara, pembangkit tenaga, pemanfaatan panas buang dan proses – proses kimia. Penukar kalor dengan saluran kecil digunakan dalam produk atau peralatan yang memiliki fluks panas tinggi seperti : reaktor nuklir, bioreaktor (berfungsi memodifikasi dan memisahkan sel – sel makhluk hidup dan membran sel), dan piranti – piranti elektronik berefisiensi tinggi.

Fluida perlu dipompa melalui penukar kalor, sehingga menentukan daya pemompaan (*pumping power*) fluida yang diperlukan adalah hal yang utama sebagai bagian dari desain sistem dan analisis biaya operasi. Daya pemompaan sebanding dengan penurunan tekanan (*pressure drop*) fluida, dimana hal ini dihubungkan dengan gesekan fluida (*fluid friction*) dan kontribusi penurunan tekanan lain sepanjang lintasan aliran fluida. Adanya penurunan tekanan berarti terdapat kehilangan energi akibat gesekan antara fluida dengan permukaan saluran. Penurunan tekanan fluida mempunyai hubungan

langsung dengan perpindahan kalor dalam penukar kalor, operasi, ukuran, dan faktor – faktor lain, termasuk pertimbangan ekonomi. Menentukan penurunan tekanan dalam sebuah penukar kalor adalah hal yang utama untuk banyak aplikasi, sedikitnya ada 2 alasan ; (1) fluida perlu dipompa melalui penukar kalor, berarti diperlukan pemompaan fluida. Daya pemompaan ini sebanding dengan penurunan tekanan dalam penukar kalor, (2) laju perpindahan kalor dapat dipengaruhi secara signifikan oleh perubahan temperatur jenuh (*saturation temperature*) untuk fluida yang mengalami pengembunan atau penguapan jika terdapat penurunan tekanan yang besar sepanjang aliran. Hal ini karena perubahan temperatur jenuh berhubungan dengan perubahan tekanan jenuh dan mempengaruhi beda temperatur untuk perpindahan kalor.

Penukar kalor bercelah sempit telah digunakan secara luas di industri karena mempunyai beberapa kelebihan, antara lain: cocok digunakan untuk penukar kalor dengan perbedaan temperatur rendah, mempunyai efektivitas perpindahan kalor yang tinggi, dan desain yang ringkas tanpa proses permesinan yang rumit. Akan tetapi, penukar kalor bercelah sempit juga mempunyai kelemahan, yaitu

penurunan tekanan yang tinggi dan membutuhkan fluida kerja yang bersih. Penurunan tekanan dalam penukar kalor bercelah sempit merupakan parameter desain yang penting dalam aplikasi rekayasa karena menentukan daya pemompaan yang dibutuhkan. Semakin besar penurunan tekanan dalam penukar kalor bercelah sempit, semakin besar pula daya pemompaan yang dibutuhkan untuk mempertahankan aliran, yang berdampak pada biaya pemompaan yang semakin besar pula.

Changhong (2005) mengklasifikasikan saluran sempit baik itu dengan geometri *rectangular* maupun *annular* dibatasi dengan diameter hidrolis sebesar ≤ 5 mm. Klasifikasi saluran menurut Mehendale, dkk (2000) sebagai berikut :

1. *Conventional passages* $D > 6$ mm
2. *Compact passages* $1 \text{ mm} < D < 6$ mm
3. *Meso - channels* $100 \mu\text{m} < D < 1$ mm
4. *Microchannels* $1 \mu\text{m} < D < 100 \mu\text{m}$

Banyak peneliti yang telah meneliti karakteristik aliran pada *annulus* sempit. Mala dan Li (1999) meneliti karakteristik aliran air dalam *microtubes* dengan kisaran diameter dari 50 sampai 254 μm . Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik aliran pada *microtubes* dengan diameter lebih kecil menyimpang dari prediksi teori konvensional. Sedangkan dalam *microtubes* dengan diameter besar, hasil penelitian sesuai dengan teori konvensional. Pada penelitian ini transisi aliran terjadi pada kisaran bilangan Reynolds 500 – 1.500.

Sun, dkk (2003) melakukan penelitian terhadap karakteristik tahanan aliran air pada *annulus* sempit dengan pertukaran kalor yang dilakukan pada kondisi 1 atm. Penelitian ini menggunakan seksi uji yang terdiri dari 3 pipa konsentris dengan ukuran celah annulus 0,9 mm; 1,4 mm; dan 2,4 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis aliran mulai berubah dari laminar ke turbulen sebelum bilangan Reynolds mencapai 2.000.

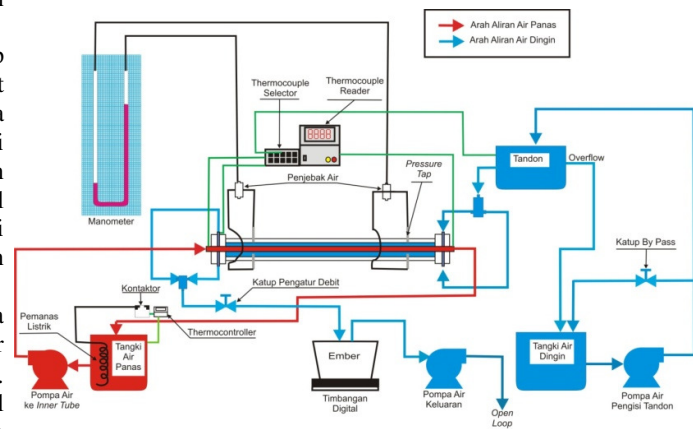
Celata, dkk (2004) menyelidiki aliran fluida fasa tunggal dalam micropipes, dimana R114 mengalir dalam pipa – pipa kapiler dengan diameter 130 μm . Bilangan Reynolds divariasikan dari 100 – 8.000. Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa dalam daerah aliran laminar, faktor gesekan sesuai dengan teori Hagen – Poiseuille untuk bilangan Reynolds kurang dari 600 – 800. Untuk bilangan Reynolds lebih tinggi, data percobaan menyimpang dari teori Hagen – Poiseuille. Transisi dari aliran laminar ke turbulen terjadi pada kisaran bilangan Reynolds 1.800 – 2.500.

Lu dan Wang (2008) menyelidiki karakteristik aliran dengan atau tanpa pertukaran kalor pada *annulus* sempit. Penelitian ini menggunakan *tube-in-tube heat exchanger* dengan celah annular sebesar 3,08 mm dan panjang pengukuran tekanan sebesar 1.410 mm. Fluida yang digunakan dalam penelitian ini adalah air dengan arah aliran horizontal, ke atas, dan ke bawah. Pada penelitian ini kisaran bilangan Reynolds berdasar diameter hidrolis *annular* – nya

dari 3 sampai 30.000. dalam penelitian ini transisi aliran dalam *annulus* sempit dimulai lebih awal dari pipa konvensional pada $1.100 < Re < 1.500$.

METODOLOGI PENELITIAN

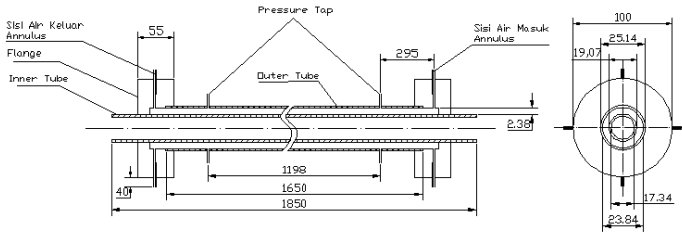
Skema alat penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Aliran pada pipa dalam (*inner tube*) dan pada *annulus* adalah berlawanan arah. Lintasan aliran pada saluran annular bercelah sempit adalah lintasan terbuka. Air dingin yang berada dalam tangki air dingin digerakkan oleh pompa air pengisi tandon menuju tandon, lalu air dingin akan mengalir ke seksi uji. Air dingin yang keluar dari seksi uji ditampung sementara dalam ember yang dibawahnya dipasang timbangan digital untuk menimbang massa air pada selang waktu tertentu. Setelah ditimbang air dingin dipompa oleh pompa air keluaran dan langsung dibuang. Lintasan pipa bagian dalam adalah sebuah lintasan tertutup. Air panas yang berada dalam tangki air panas digerakkan oleh pompa air bagian pipa dalam, mengalir melewati seksi uji dan kembali ke tangki air panas. Pemanas air elektrik berfungsi untuk memanaskan air dalam tangki air panas. Pemanas yang digunakan berjumlah 10 buah dengan total daya yang dipakai adalah 6.000 Watt. Pemanas air elektrik dikontrol dengan termokontroler untuk mempertahankan temperatur konstan dalam tangki air panas.



Gambar 1. Skema alat penelitian.

Seksi uji adalah sebuah penukar kalor pipa konsentrik. Skema seksi uji dapat dilihat pada Gambar 2. Pipa dalam terbuat dari aluminium dengan diameter dalam dan luar adalah 17,4 mm dan 18,4 mm. Pipa luar terbuat dari aluminium dengan diameter dalam dan luar adalah 23,68 mm dan 24,68 mm. Lebar celah *annulus* 2,64 mm. Panjang pengukuran tekanan 1.200 mm. Diameter hidrolis *annulus* sempit adalah 5,28 mm. Seksi uji diisolasi dengan *thermoplex isolator* untuk meminimalisir perpindahan kalor ke lingkungan melalui konveksi dan radiasi.

Gambar 2. Skema seksi uji.



Pada penelitian ini, untuk mengukur temperatur digunakan termokopel tipe-T. Termokopel ini memiliki sensitifitas ~ 43 μV/°C dan berdiameter 0,1 mm. Termokopel ini dipasang pada sisi pipa dalam (untuk mengukur temperatur air panas masuk dan keluar dari pipa dalam), pada tandon (untuk mengukur temperatur air dingin masuk ke *annulus*) serta pada sisi keluar *annulus* (untuk mengukur temperatur air dingin keluar dari *annulus*). Manometer pipa U ini terbuat dari selang plastik yang berfungsi untuk mengukur perbedaan tekanan aliran air pada sisi *annulus*. Fluida manometer yang digunakan adalah air. Pemasangan *pressure tap*, sejauh 25 kali diameter hidrolis dari sisi masuk dan keluar air di *annulus* sempit untuk memastikan bahwa daerah tersebut sudah merupakan daerah berkembang penuh (*fully developed*) (Olson, 1963).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bilangan Reynolds untuk aliran fluida yang mengalir di *annulus* dihitung dengan persamaan :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu} \tag{1}$$

Faktor gesekan (*friction factor*) pada aliran fluida fasa tunggal dalam pipa konvensional berbentuk bulat dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$f = \frac{64}{Re} ; Re < 2.300 \tag{2}$$

$$f = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} ; 4 \times 10^3 < Re < 3 \times 10^4 \tag{3}$$

Diagram Moody memberikan faktor gesekan yang berkaitan dengan bilangan Reynolds dan kekasaran relatif (*e/D*). Untuk menghindari penggunaan metode grafis dalam mendapatkan *f* untuk aliran turbulen, persamaan yang telah secara luas digunakan untuk faktor gesekan adalah dari Colebrook :

$$\frac{1}{f^{0,5}} = -2,0 \log \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot f^{0,5}} \right) \tag{4}$$

Kesulitan dalam penggunaannya adalah bahwa persamaan Colebrook ini berbentuk implisit dalam ketergantungannya terhadap *f*. Miller (1996) menyarankan bahwa iterasi tunggal akan memberikan hasil dalam 1% jika perkiraan awal dihitung dari:

$$f_0 = 0,25 \left[\log \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \tag{5}$$

Diagram Moody dan Persamaan Colebrook mempunyai keakuratan sampai ± 10%.

Frictional pressure drop di *annulus* untuk aliran air horisontal dapat dihitung dengan persamaan :

$$\Delta P_f = f \frac{l}{D_h} \frac{\rho \cdot V^2}{2} \tag{6}$$

$$f = 2 \frac{D_h}{l} \frac{(\Delta P_f)}{\rho \cdot V^2} \tag{7}$$

Dalam perhitungan faktor gesekan aliran dalam *annulus* dengan menggunakan Pers. (7). Sun (2003) telah menurunkan persamaan faktor gesekan dalam daerah aliran laminar pada *annulus* secara matematis sebagai berikut :

$$f = \frac{\left(1 - \frac{r_i}{r_o}\right)^2 \ln\left(\frac{r_i}{r_o}\right)}{\left[1 + \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^2\right] \ln\left(\frac{r_i}{r_o}\right) + 1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^2} \frac{64}{Re} \tag{8}$$

Pada penelitian ini, dimensi seksi uji yang digunakan disubstitusi ke dalam Pers. (8) sehingga didapat bentuk persamaan :

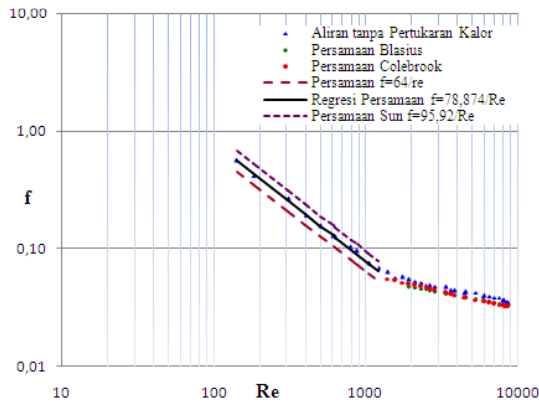
$$f = \frac{95,9}{Re} \tag{9}$$

a. Pengaruh Variasi Bilangan Reynolds Terhadap Karakteristik Gesekan Pada Aliran Tanpa Pertukaran Kalor

Pengaruh variasi bilangan Reynolds terhadap karakteristik gesekan pada aliran tanpa pertukaran kalor dapat dilihat pada Gambar 3. Untuk aliran tanpa pertukaran kalor, temperatur air masukan pada sisi *annulus* dan *inner tube* berkisar antara 28,7°C – 29,7°C. Melalui perbandingan antara kurva karakteristik gesekan aliran air dalam *annulus* sempit dan dalam pipa konvensional seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3, terlihat bahwa pada daerah aliran laminar (*Re* < 1.400) faktor gesekan dalam *annulus* sempit adalah 19,59% – 33,07 % lebih besar dibandingkan dengan pipa konvensional (dibandingkan dengan Persamaan *f* = 64/*Re*). Persamaan regresi faktor gesekan aliran yang terjadi pada daerah aliran laminar adalah

$$f = 78,87/Re \quad Re < 1.400$$

Hasil yang didapat dengan regresi Persamaan *f* = 78,87/*Re* adalah 1,232 kali sebesar nilai yang dihitung dengan Persamaan *f* = 64/*Re*, tetapi lebih kecil dari nilai yang dihitung dengan Persamaan Sun (*f* = 95,92/*Re*) sebesar 17,77%. Pada daerah aliran turbulen (*Re* > 1.800), faktor gesekan dalam *annulus* sempit adalah 4,60% - 23,50% lebih besar dibandingkan dengan teori pipa konvensional (dibandingkan dengan Persamaan Blasius). Daerah dimana terjadi perubahan *trendline* nilai faktor gesekan (*f*) untuk daerah aliran laminar ke *trendline* faktor gesekan (*f*) untuk daerah aliran turbulen disimpulkan sebagai daerah transisi, dimana dalam penelitian ini transisi aliran dalam *annulus* sempit dimulai lebih awal dibanding dalam pipa konvensional pada 1.400 ≤ *Re* ≤ 1.800.



Gambar 3. Kurva karakteristik gesekan pada aliran tanpa pertukaran kalor.

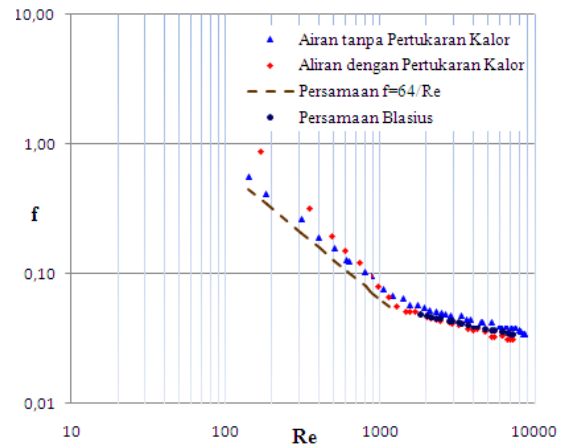
b. Pengaruh Variasi Bilangan Reynolds Terhadap Karakteristik Gesekan Pada Aliran Dengan/Tanpa Pertukaran Kalor

Pada variasi aliran dengan pertukaran kalor, temperatur air dingin masukan pada sisi *annulus* sempit berkisar antara 27,8 °C – 31,3 °C, sedangkan temperatur air panas masukan pada *inner tube* adalah 60 °C. Untuk variasi aliran tanpa pertukaran kalor, temperatur air masukan pada sisi *annulus* dan *inner tube* berkisar 28,7 °C – 29,7 °C. Temperatur air yang masuk ke *annulus* sempit dan *inner tube* merupakan temperatur yang diperoleh dalam keadaan tunak.

Dalam penelitian ini transisi aliran dengan pertukaran kalor dalam *annulus* sempit terjadi dalam kisaran $1.300 \leq Re \leq 1.700$. Transisi aliran dengan pertukaran kalor terjadi sedikit lebih awal dibandingkan dengan transisi aliran tanpa pertukaran kalor. Pada aliran dengan pertukaran kalor, faktor gesekan dalam *annulus* sempit adalah 1,26% - 11,71% lebih kecil dibandingkan dengan teori pipa konvensional (dibandingkan dengan Persamaan Blasius) pada daerah turbulen. Hal tersebut berkebalikan dengan aliran tanpa pertukaran kalor. Akan tetapi, pada daerah laminar, faktor gesekan dalam *annulus* sempit untuk aliran dengan pertukaran kalor adalah 11,86% - 131,55% lebih besar daripada aliran tanpa pertukaran kalor.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa dalam daerah aliran laminar, kurva gesekan aliran dengan pertukaran kalor dan tanpa pertukaran kalor relatif berbeda. Faktor gesekan aliran yang terjadi pada aliran air horisontal dengan pertukaran kalor lebih besar dibandingkan dengan tanpa pertukaran kalor pada $Re < 800$. Pertukaran kalor berpengaruh besar terhadap gesekan aliran khususnya pada daerah dengan bilangan Reynolds rendah. Pada daerah dengan $Re < 800$, faktor gesekan aliran dengan pertukaran kalor adalah 1,19 – 2,08 kali lebih besar daripada tanpa pertukaran kalor. Pada daerah tersebut, pertukaran kalor menyebabkan aliran pada

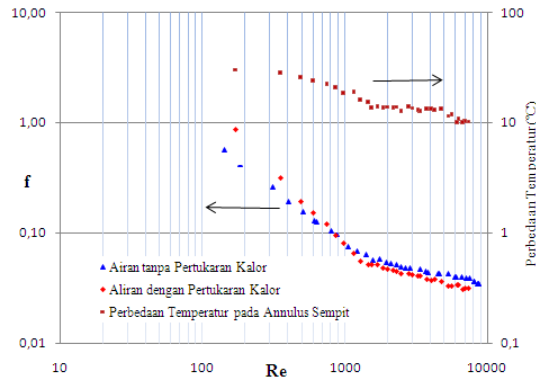
annulus menjadi asimetris. Hal itu disebabkan perbedaan temperatur air pada dinding luar pipa dalam dengan bagian tengah *annulus*. Sedangkan air yang mengalir secara simetris tanpa pertukaran kalor akan mengurangi gesekan aliran. Hasil serupa juga didapat oleh Jiang (1998) dan Lu (2008). Ketika bilangan Reynolds mulai meningkat, pertukaran kalor juga meningkat, sehingga menyebabkan viskositas air menjadi lebih kecil. Viskositas air yang kecil akan menurunkan gesekan aliran.



Gambar 4. Kurva karakteristik gesekan pada aliran dengan/tanpa pertukaran kalor.

c. Pengaruh Variasi Bilangan Reynolds Terhadap Beda Temperatur Air Masuk dan Keluar Annulus Sempit

Hubungan antara variasi bilangan Reynolds terhadap beda temperatur air yang masuk dan keluar dari *annulus* sempit ditunjukkan dalam Gambar 5. Temperatur air yang masuk dan keluar dari *annulus* sempit merupakan temperatur yang diperoleh dalam keadaan tunak. Pada daerah dengan $Re \leq 800$, perbedaan temperatur air yang masuk dan keluar dari *annulus* sempit berkisar antara 22,1 °C – 30,3 °C. Pada daerah tersebut, kurva karakteristik gesekan aliran dengan dan tanpa pertukaran kalor terlihat berbeda. Perbedaan tersebut menjadi berkurang seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Pada daerah aliran turbulen ($Re > 1.800$), perbedaan temperatur air yang masuk dan keluar dari *annulus* sempit menjadi lebih kecil, yakni berkisar antara 10,3 °C – 13,7 °C. Pada daerah turbulen, kurva karakteristik gesekan aliran dengan dan tanpa pertukaran kalor relatif sama. Pengaruh pertukaran kalor terhadap gesekan aliran terlihat jelas pada daerah aliran laminar. Sementara itu, pada daerah aliran turbulen, pertukaran kalor hanya sedikit berpengaruh terhadap gesekan aliran. Hasil serupa juga didapat oleh Sun (2003) dan Lu (2008).



Gambar 5. Hubungan antara faktor gesekan aliran dengan perbedaan temperatur air di annulus.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan pembahasan, dapat diambil kesimpulan mengenai pengujian karakteristik aliran fasa tunggal aliran air horisontal pada penukar kalor saluran annular bercelah sempit sebagai berikut :

1. Karakteristik aliran di *annulus* sempit dari penukar kalor pipa konsentrik berbeda dengan karakteristik aliran pada pipa konvensional, yaitu transisi dari aliran laminar ke turbulen terjadi pada bilangan Reynolds yang lebih rendah. Transisi aliran pada *annulus* sempit terjadi pada $1.400 < Re < 1.800$ untuk aliran tanpa pertukaran kalor dan pada $1.300 < Re < 1.700$ untuk aliran dengan pertukaran kalor.
2. Faktor gesekan aliran yang terjadi di *annulus* untuk aliran air horisontal dengan pertukaran kalor lebih besar dibandingkan tanpa pertukaran kalor pada $Re < 800$. Faktor gesekan aliran di *annulus* sempit dari penukar kalor saluran annular lebih besar daripada pipa konvensional pada daerah laminar, baik untuk aliran tanpa pertukaran kalor maupun dengan pertukaran kalor.
3. Pada daerah turbulen, faktor gesekan aliran di *annulus* sempit dari penukar kalor pipa konsentrik saluran annular lebih lebih besar daripada pipa konvensional untuk aliran tanpa pertukaran kalor, tetapi lebih kecil daripada pipa konvensional untuk aliran dengan pertukaran kalor.
4. Pengaruh perbedaan temperatur air masuk dan keluar *annulus* terhadap karakteristik gesekan di *annulus* sempit dari penukar kalor pipa konsentrik saluran annular terkonsentrasi pada daerah laminar.

DAFTAR PUSTAKA

Celata, G.P., 2004, "Single Phase Heat Transfer and Fluid Flow in Micropipes", *Heat Transfer Engineering*, 25, 13–22.

Changhong, P., 2005, "Two Phase Flow and Boiling Heat Transfer in Two Vertical Narrow Annuli", *Nuclear Engineering and Design*, 235, 1737–1747.

Jiang, M.J., Luo, X.H., Liu, W.L., 1998, "Investigation of Heat Transfer and Fluid Dynamic Characteristics of Water Flow Through Microchannels Without Phase Change", *J Beijing Univ.*, 12, 71–75.

Lu, G. & Wang, J., 2008, "Experimental Investigation on Flow Characteristics in A Narrow Annulus", *Heat Mass Transfer*, 44, 495–499.

Mala, G.M. & Li, D.Q., 1999, "Flow Characteristics of Water in Microtubes", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20, 142–148.

Mehendale, S.S., Jacobi, A.M., Shah, R.K., 2000, "Fluid Flow and Heat Transfer at Micro and Meso Scales with Application to Heat Exchanger Design", *Appl. Mech. Rev.*, 53, 175 – 193.

Miller, R.W., 1996, "Flow Measurement Engineering Handbook", 3rd ed, New York, McGraw Hill.

Olson, R.M. & Sparrow, E.M., 1963, "Measurements of Turbulent Flow Development in Tubes and Annuli with Square or Rounded Entrances", *A.I.Ch.E. Journal*, 9, 766–770.

Sun, L.C., Yan, C.Q., Sun, Z.N., Zhang, Q.H., 2003, "Flow Resistance Characteristics of Water in Narrow Annulus During Heat Exchange", *Journal of Marine Science and Application*, 2, 41–44.

Sun, Z.N., Sun, L.C., Yan, C.Q., 2004, "Experimental Investigation of Single Phase Flow Friction in Narrow Annuli", *Nucl. Eng.*, 25, 123–127.

DAFTAR NOTASI

D = diameter dalam pipa (m)
 D_h = diameter hidrolis (m)
 r_i = jari – jari dalam *annulus* (m)
 r_o = jari – jari luar *annulus* (m)
 e = kekasaran absolut (m)
 e/D = kekasaran relatif
 f = faktor gesekan aliran
 l = panjang pengukuran *pressure drop* (m)
 V = kecepatan fluida (m/s)
 ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
 ΔP_f = *frictional pressure drop* (Pa)