

PENGUJIAN KARAKTERISTIK ALIRAN FASA TUNGGAL ALIRAN AIR VERTIKAL KE ATAS PADA PENUKAR KALOR SALURAN RECTANGULAR BERCELAH SEMPIT

Wibawa Endra J¹, Tri Istanto¹, Ahmad Khusaeni²

¹ Staf Pengajar – Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

² Alumnus Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

Keywords :

*Narrow rectangular channel
Reynolds number
Friction factor*

Abstract :

This research was conducted to investigate the flow characteristics of single phase vertical upward water flow with/without heat exchange in narrow gap rectangular channel heat exchanger. Test section was a concentric tube heat exchanger. The inner tube was made of aluminium with inner side and outer side lengths of 17.4 mm and 18.4 mm. The outer tube was made of aluminium with inner side and outer side lengths of 23.68 mm and 24.68 mm. The pressure measuring length was 1,200 mm. Hydraulic diameter of the narrow rectangular channel was 5.28 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 the research, the 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 conventional pipes. For the flow without heat exchange in narrow annulus, the flow transition from laminar to turbulent flow was initiated earlier than that in normal pipes at a Reynolds number range from 1,850 to 2,333. The flow transition with heat exchange occurred for a Reynolds number in the range of 1,657 to 2,245. Flow friction factor of the downward flow with heat exchange was larger than that without heat exchange at the Reynolds number was lower than 734. The flow friction characteristics in narrow annulus had relations to the liquid temperature difference at the inlet and outlet of the annulus. Their influences on the flow friction were 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 dan 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 mm $< D < 6$ mm
3. *Meso - channels* 100 $\mu\text{m} < D < 1$ mm
4. *Microchannels* 1 $\mu\text{m} < D < 100$ μm

Banyak peneliti yang telah meneliti karakteristik aliran pada anulus 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 anulus sempit dengan pertukaran kalor yang dilakukan pada kondisi 1 atm. Penelitian ini menggunakan seksi uji yang terdiri dari 3 pipa konsentris dengan ukuran celah anulus 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.

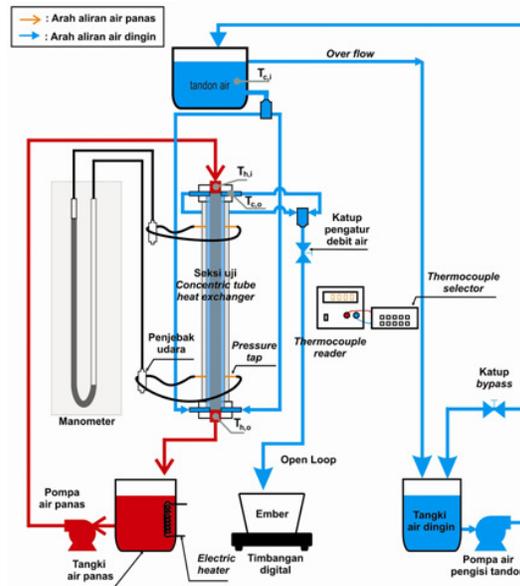
Celata, dkk (2004) menyelidiki aliran fluida fasa tunggal dalam micropipes, dimana R114 mengalir dalam pipa – pipa kapiler dengan diameter 130 μm . Bilangan Reynolds divariasikan dari 100 – 8.000. Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa dalam daerah aliran laminar, faktor gesekan sesuai dengan teori Hagen – 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 anulus 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 anulus sempit dimulai lebih awal dari pipa konvensional pada $1.100 < Re < 1.500$.

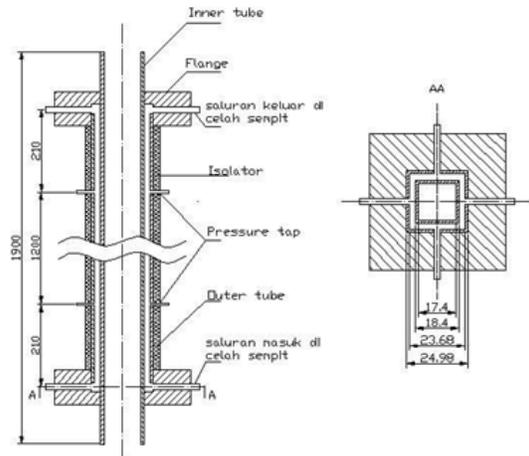
METODOLOGI PENELITIAN

Skema alat penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Aliran pada pipa dalam (*inner tube*) dan pada anulus 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 anulus 2,64 mm. Panjang pengukuran tekanan 1.200 mm. Diameter hidrolis anulus 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 $\sim 43 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 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 anulus) serta pada sisi keluar anulus (untuk mengukur temperatur air dingin keluar dari anulus). Manometer pipa U ini terbuat dari selang plastik yang berfungsi untuk mengukur perbedaan tekanan aliran air pada sisi anulus. Fluida manometer yang digunakan adalah air. Pemasangan *pressure tap*, sejarak 25 kali diameter hidrolis dari sisi masuk dan keluar air di anulus sempit untuk memastikan bahwa daerah tersebut sudah merupakan daerah berkembang penuh (*fully developed*) (Olson, 1963).

HASIL DAN PEMBAHASAN

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

$$f = \frac{64}{\text{Re}} ; \text{Re} < 2.300 \quad (1)$$

$$f = 0,3164 \cdot \text{Re}^{-0,25} ; 4 \times 10^3 < \text{Re} < 3 \times 10^4 \quad (2)$$

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 :

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

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:

$$f_0 = 0,25 \left[\log \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (4)$$

Diagram Moody dan Persamaan Colebrook mempunyai keakuratan sampai $\pm 10\%$.

Frictional pressure drop pada aliran air vertikal ke bawah dapat dihitung dengan persamaan :

$$\Delta P_f = f \frac{l}{D_h} \frac{\rho \cdot V^2}{2} \quad (5)$$

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

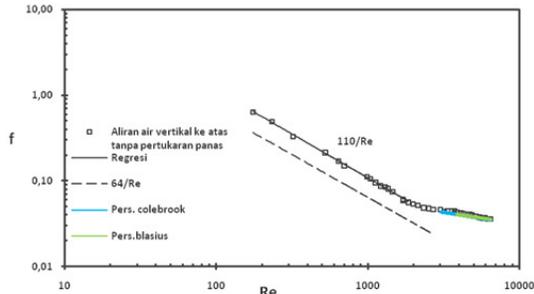
a. Pengaruh Variasi Bilangan Reynolds Terhadap Karakteristik Gesekan Pada Aliran Tanpa Pertukaran Kalor

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 anulus dan pipa dalam berkisar $29,2^\circ\text{C}$. Melalui perbandingan antara kurva karakteristik gesekan aliran air dalam anulus sempit dan dalam pipa konvensional seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3, terlihat bahwa pada daerah aliran laminar ($\text{Re} < 1.850$) faktor gesekan dalam anulus sempit adalah 58 – 74 % lebih besar dibandingkan dengan pipa konvensional (dibandingkan dengan Pers. $f = 64/\text{Re}$). Persamaan regresi faktor gesekan aliran yang terjadi pada daerah aliran laminar adalah,

$$f = \frac{110}{\text{Re}} ; \text{Re} < 1.850 \quad (9)$$

Hasil yang didapat dengan regresi Pers. $f = 110/\text{Re}$ adalah 1,719 kali sebesar nilai yang dihitung dengan Persamaan $f = 64/\text{Re}$. Pada daerah aliran turbulen ($\text{Re} > 2.333$), faktor gesekan dalam anulus sempit adalah 0,31 – 9,01% lebih besar dibanding dalam pipa konvensional (dibandingkan dengan Persamaan Blasius). Pada daerah aliran turbulen ($\text{Re} > 2.333$), faktor gesekan dalam anulus sempit adalah 1,38 – 8,31% lebih besar dibandingkan dengan Persamaan Colebrook. 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 anulus sempit dimulai lebih awal

dibandingkan dengan pipa konvensional pada $1.850 \leq Re \leq 2.333$.



Gambar 3. Kurva karakteristik gesekan pada aliran tanpa pertukaran kalor

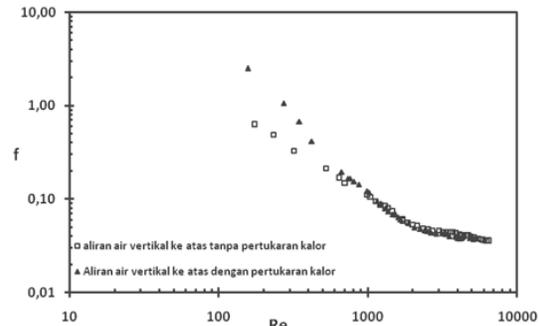
b. Pengaruh Variasi Bilangan Reynolds Terhadap Karakteristik Gesekan Pada Aliran Dengan/Tanpa Pertukaran Kalor

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara variasi bilangan Reynolds terhadap karakteristik gesekan pada aliran tanpa pertukaran kalor dan dengan pertukaran kalor. Untuk variasi aliran tanpa pertukaran kalor, temperatur air masukan pada sisi anulus dan pipa dalam berkisar $29,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada variasi aliran dengan pertukaran kalor, temperatur air dingin masukan pada sisi anulus sempit berkisar $29,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, sedangkan temperatur air panas masukan pada pipa dalam dijaga konstan pada $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperatur air yang masuk ke anulus sempit dan pipa dalam merupakan temperatur yang diperoleh dalam keadaan tunak.

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 vertikal ke atas dengan pertukaran kalor lebih besar dibandingkan dengan tanpa pertukaran kalor pada $Re \leq 734$. Perbedaan tersebut menjadi berkurang, seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Pertukaran kalor berpengaruh besar terhadap gesekan aliran khususnya pada daerah dengan bilangan Reynolds rendah. Dalam daerah dengan $Re \leq 734$, faktor gesekan aliran dengan pertukaran kalor adalah 1,15 – 3,94 kali lebih besar dibanding tanpa pertukaran kalor. Dalam daerah dengan $Re \leq 734$, pertukaran kalor menyebabkan aliran pada anulus menjadi asimetris. Hal itu disebabkan perbedaan temperatur air pada dinding luar pipa dalam dengan bagian tengah anulus. 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. Dalam penelitian ini transisi aliran dengan pertukaran kalor dalam anulus sempit dalam kisaran

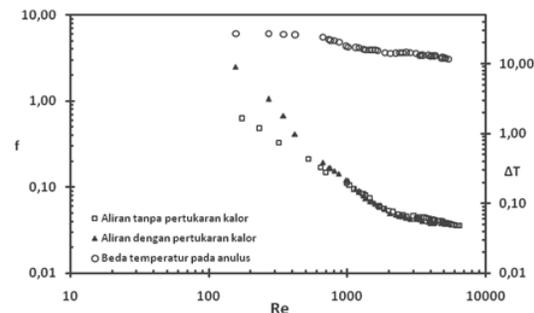
$1.657 \leq Re \leq 2.245$. Transisi aliran dengan pertukaran kalor terjadi lebih awal dibanding transisi aliran tanpa pertukaran kalor.



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

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

Hubungan antara variasi bilangan Reynolds terhadap beda temperatur air yang masuk dan keluar dari anulus sempit ditunjukkan dalam Gambar 5. Temperatur air yang masuk dan keluar dari anulus sempit merupakan temperatur yang diperoleh dalam keadaan tunak. Pada daerah dengan $Re \leq 734$, perbedaan temperatur air yang masuk dan keluar dari anulus sempit berkisar antara $22,6\text{ }^{\circ}\text{C} - 27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada daerah dengan bilangan Reynolds yang sama, kurva karakteristik gesekan aliran dengan dan tanpa pertukaran kalor terlihat berbeda. Perbedaan tersebut menjadi berkurang seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Pada daerah aliran turbulen ($Re > 2.396$), perbedaan temperatur air yang masuk dan keluar dari anulus sempit menjadi lebih kecil berkisar antara $11,8\text{ }^{\circ}\text{C} - 14,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada daerah dengan bilangan Reynolds yang sama kurva karakteristik gesekan aliran dengan dan tanpa pertukaran kalor relatif sama. Pengaruh pertukaran kalor terhadap gesekan aliran terlihat jelas dalam daerah aliran laminar. Sedangkan dalam daerah aliran turbulen, pertukaran kalor 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 dalam anulus sempit

KESIMPULAN

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

1. Pada variasi tanpa pertukaran kalor, transisi dari aliran laminar ke aliran turbulen dalam anulus sempit dimulai lebih awal dibandingkan dengan pipa konvensional pada $1.850 \leq Re \leq 2.333$. Daerah aliran laminar terjadi pada kisaran bilangan $Re < 1.850$, sedangkan daerah turbulen terjadi pada bilangan $Re > 2.333$. Pada variasi dengan pertukaran kalor transisi dari aliran laminar ke aliran turbulen terjadi pada $1.657 \leq Re \leq 2.245$.
2. Karakteristik gesekan aliran pada variasi tanpa pertukaran kalor dan dengan pertukaran kalor relatif berbeda dalam daerah aliran laminar. Faktor gesekan aliran yang terjadi pada aliran air vertikal ke atas dengan pertukaran kalor lebih besar dibandingkan tanpa pertukaran kalor pada $Re \leq 734$.
3. Karakteristik gesekan aliran dalam anulus sempit berhubungan dengan beda temperatur air masuk dan keluar anulus. Pengaruh beda temperatur terhadap gesekan aliran terlihat jelas dalam daerah aliran 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 Union 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 anulus (m)
- r_o = jari – jari luar anulus (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)