

ANALISIS KETAKPASTIAN PENGUKURAN (*UNCERTAINTY MEASUREMENT*) PADA PENGUJIAN KARAKTERISTIK ALIRAN FASA TUNGGAL ALIRAN AIR VERTIKAL KE BAWAH PADA PENUKAR KALOR SALURAN ANNULAR BERCELAH SEMPIT

Tri Istanto¹, Wibawa Endra J¹, Tinneke Febrina²

¹ Staf Pengajar – Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

² Alumnus Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

Keywords :

Narrow annulus
Uncertainty measurement
Reynolds number
Friction factor
Poiseuille number

Abstract :

The promising performance of narrow annulus channels has given rise to intensive research on pressure drop and heat transfer characteristics of flows at the small scale. To check the classical models and to validate new ones, experiments need to be conducted. Although more care has been devoted lately to the design of experiments in terms of control of the geometry and of the boundary conditions, the uncertainties which inevitably affect each measurement do not seem to have been given the proper consideration. Correctly calculating uncertainties not only allows a correct assessment of the experimental data obtained, but can also be used to decide which measurements need to have the highest precision to achieve a certain accuracy, thus saving money on the others. In this paper, a quantitative criterion is given to assess the accuracy achievable in the determination of the friction factor in the laminar and turbulent regime for the flow of water in a narrow gap annular channel heat exchanger. The influence of the five quantities (pressure drop, length, diameter, volume flow rate and temperature) measured to determine friction factor in the laminar and turbulent regime are studied separately and when combined.

It is found that volume flow rate and pressure drop measurements are determinant for the final of uncertainty. Uncertainty measurement of volume flow rate is the dominant factor in uncertainty of Reynolds number. Uncertainty measurement of volume flow rate and pressure drop are the dominant factors in uncertainty of friction factor. Uncertainty calculation of actual friction factor is the dominant factor in uncertainty analysis of Poiseuille number. At low Reynolds number, uncertainty calculation of Poiseuille number very high and become decrease along with increasing of Reynolds number.

PENDAHULUAN

Kesalahan (*error*) merupakan unsur yang tak dapat dihindari dalam proses pengukuran. Kesalahan dalam pengukuran biasanya didefinisikan sebagai perbedaan antara nilai sebenarnya dengan nilai terukur. Efek kesalahan adalah menciptakan ketidakpastian (*uncertainty*) dalam nilai sebuah hasil pengukuran. Ketika digunakan dalam konteks pengukuran, ketidakpastian mempunyai sebuah angka dan satuan yang berhubungan dengannya. Lebih spesifik lagi, ketidakpastian pengukuran mempunyai satuan yang sama dengan hasil pengukuran. Perhitungan ketidakpastian yang teliti tak hanya memberikan perkiraan yang tepat mengenai data penelitian yang didapat, tapi juga dapat digunakan untuk menentukan pengukuran yang memerlukan kepresisian lebih tinggi agar didapat hasil yang akurat. Analisis ketidakpastian merupakan alat yang sangat berguna untuk menetapkan tingkat reliabilitas sebuah pengukuran dan untuk validasi model – model teoritis dan simulasi. Selain itu, analisis ketidakpastian dapat

memberikan kontribusi nyata dalam merencanakan penelitian – penelitian.

Analisis ketidakpastian adalah sebuah alat yang terkenal yang pemakaiannya sungguh luas dalam aplikasi keteknikan sekarang ini, tetapi masih ada beberapa hal yang kurang jelas dalam penggunaannya. Banyak peneliti yang telah meneliti karakteristik aliran pada anulus sempit dan memasukkan analisis ketidakpastian pengukuran dalam penelitiannya. Hegab, dkk (2002) melakukan penelitian terhadap karakteristik aliran fluida fasa tunggal R-134a dalam *rectangular microchannels*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transisi dari aliran laminar ke turbulen terjadi pada kisaran bilangan Reynolds 2.000 – 4.000. Ketidakpastian pengukuran faktor gesekan bervariasi dari 3 – 23%, sedangkan ketidakpastian bilangan Reynolds hampir mendekati 10%. Pada daerah bilangan Reynolds rendah, pengukuran faktor gesekan sangat besar dan semakin berkurang seiring meningkatnya bilangan Reynolds. Ketidakpastian dalam perhitungan kecepatan merupakan faktor dominan dalam analisis ketidakpastian faktor gesekan

Celata, dkk (2004) menyelidiki aliran fluida fasa tunggal dalam micropipes, dimana R114 mengalir dalam pipa – pipa kapiler dengan diameter 130 μm . Bilangan Reynolds divariasi 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 $1.100 < \text{Re} < 1.500$.

Mokrani, dkk (2009) meneliti karakteristik aliran dan perpindahan kalor konveksi pada *microchannels* berpenampang segiempat (*rectangular*) dengan menggunakan fluida air. Ketinggian saluran sempit, e , divariasi antara 50 – 500 μm dan diameter hidrolis antara 100 μm – 1 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dalam daerah laminar, nilai bilangan Poiseuille hasil eksperimen sesuai dengan nilai teoritis. Dalam daerah turbulen, kehilangan tekanan yang didapat dengan korelasi Blasius agak lebih rendah dibanding hasil eksperimen. Untuk tinggi saluran antara 500 μm dan 100 μm , transisi antara daerah laminar dan turbulen terjadi pada bilangan Reynolds berkisar antara 2.000 dan 3.000

Ketidakpastian Pengukuran

Analisis ketidakpastian digunakan untuk mengukur seberapa baik data eksperimental menggambarkan nilai – nilai faktor gesekan aktual. Metode yang diuraikan oleh Moffat (1988) untuk ketidakpastian pengukuran sampel tunggal digunakan untuk melakukan analisis. Persamaan dasar dalam analisis ketidakpastian :

$$u_y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2} \quad (1)$$

dimana :

y = variabel yang diukur/diinginkan

u_y = ketidakpastian variabel yang diinginkan

x_i = salah satu dari variabel - variabel terukur untuk mendapatkan nilai y

u_{x_i} = ketidakpastian x_i

$\frac{\partial y}{\partial x_i}$ = koefisien kepekaan (*sensitivity coefficient*) y

terhadap x_i

Variabel yang diukur sering tak dapat ditentukan secara langsung. Sebagai gantinya, diukur kuantitas – kuantitas input yang menentukan nilai dari variabel yang diukur. Jika terdapat n input kuantitas, $x_1, x_2, \dots, x_n$, digambarkan hubungan mereka terhadap variabel yang diukur, y , dengan hubungan fungsional.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

Ketika y tergantung pada angka sembarang dari kuantitas – kuantitas input, seperti dalam Persamaan (2), ketidakpastian $u(x_i)$ $i = 1, 2, \dots, n$ berpropagasi ke dalam y menurut :

$$u^2(y) = \pm \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 u^2(x_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 u^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 u^2(x_n) \right] \quad (3)$$

x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) tak terhubung satu sama lain.

Jika $\partial y / \partial x_i = 1$ untuk semua $i = 1, 2, \dots, n$ sehingga didapat:

$$u^2(y) = \pm (u^2(x_1) + u^2(x_2) + \dots + u^2(x_n)) \quad (4)$$

atau

$$u(y) = \pm \sqrt{u^2(x_1) + u^2(x_2) + \dots + u^2(x_n)} \quad (5)$$

Persamaan (5) menunjukkan bahwa $u(y)$ adalah akar penjumlahan kuadrat (*root-sum-square*) dari $u(x)$.

METODOLOGI PENELITIAN

Faktor gesekan secara normal dapat diperoleh dari pengukuran eksperimental dari beberapa besaran, yaitu ; diameter saluran, panjang saluran, penurunan tekanan, laju aliran volume, dan temperatur fluida. Dari besaran-besaran tersebut dapat untuk menghitung faktor gesekan dan bilangan Reynolds (Re), dimana Re pada annulus dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu} \quad (6)$$

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

$$f = \frac{64}{\text{Re}} ; \text{Re} < 2.300 \quad (7)$$

Persamaan Blasius untuk faktor gesekan di daerah turbulen dirumuskan pada pers (8).

$$f = 0,3164 \cdot \text{Re}^{-0,25} ; 4 \times 10^3 < \text{Re} < 3 \times 10^4 \quad (8)$$

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 :

$$\frac{1}{f^{0.5}} = -2,0 \log \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot f^{0.5}} \right) \quad (9)$$

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:

$$f_0 = 0,25 \left[\log \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (10)$$

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

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

$$\Delta P_f = f \frac{l}{D_h} \frac{\rho \cdot V^2}{2} \quad (11)$$

$$f = 2 \frac{D_h (\Delta P_f)}{l \rho \cdot V^2} \quad (12)$$

Dalam perhitungan faktor gesekan aliran dalam anulus dengan menggunakan Pers. (11), diameter saluran diganti dengan diameter hidrolis anulus. Sun [2004] telah menurunkan persamaan faktor gesekan dalam daerah aliran laminar pada anulus secara matematis sebagai berikut :

$$f = \frac{\left(1 - \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 \right) \ln \left(\frac{r_i}{r_o} \right)}{\left[1 + \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 \right] \ln \left(\frac{r_i}{r_o} \right) + 1 - \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2} \frac{64}{Re} \quad (13)$$

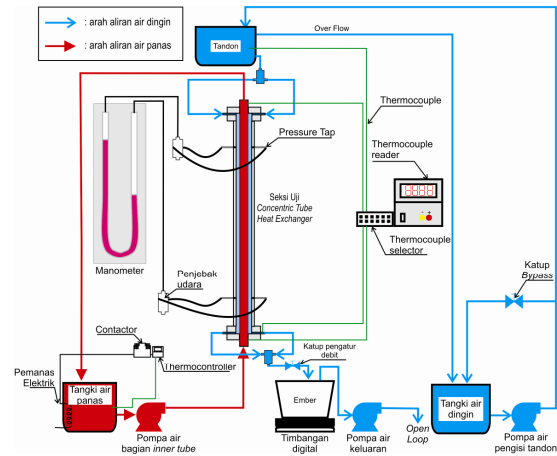
Pada penelitian ini, dimensi seksi uji yang digunakan disubstitusi ke dalam Pers. (13) sehingga didapat bentuk persamaan :

$$f = \frac{95,9}{Re} \quad (13)$$

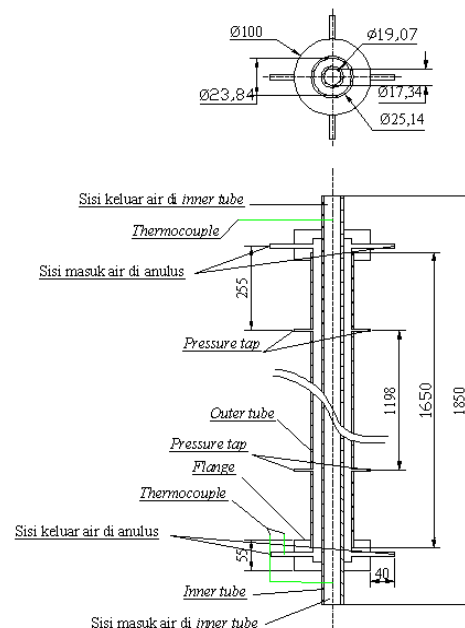
Hasil faktor gesekan secara normal diplot pada diagram Moody atau dalam grafik bilangan Poiseuille ($Po = f \cdot Re$), dihitung dan diplotkan sebagai fungsi bilangan Reynolds. Untuk menilai akurasi dari hasil-hasil tersebut, sebuah analisis ketakpastian biasanya dilakukan menggunakan teori perambatan kesalahan (*the propagation of error*) (Moffat, 1998), menggunakan pers. (1) – (5) (Lorenzini, 2009).

Skema alat penelitian dapat dilihat pada gambar 1. Aliran pada pipa dalam (*inner tube*) dan pada anulus adalah berlawanan arah. Lintasan aliran air pada anulus 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 anulus sempit. Air dingin yang keluar dari anulus ditangkap 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 alir pipa dalam adalah sebuah lintasan tertutup. Air panas yang berada dalam tangki air panas digerakkan oleh pompa air bagian pipa dalam, mengalir melewati pipa dalam 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 sebesar 60°C dalam tangki air panas yang akan masuk ke pipa dalam.



Gambar 1. Skema alat penelitian



Gambar 2. Skema seksi uji

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 17,34 mm dan 19,07 mm. Pipa luar terbuat dari aluminium dengan

diameter dalam dan luar adalah 23,84 mm dan 25,14 mm. Lebar celah anulus 2,38 mm. Panjang pengukuran tekanan 1.198 mm. Diameter hidrolis anulus sempit adalah 4,77 mm. Seksi uji diisolasi dengan *thermoplex isolator* untuk meminimalisir perpindahan kalor ke lingkungan melalui konveksi dan radiasi.

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 masuk dan keluar 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 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

a. Pengaruh Ketidakpastian Bilangan Reynolds Terhadap Ketidakpastian Faktor Gesekan

Pada variasi tanpa pertukaran kalor, variasi bilangan Reynolds berkisar antara 89,215 – 9.418,905 dan pada variasi dengan pertukaran kalor, variasi bilangan Reynolds berkisar antara 261,063 – 6.131,705. Dari Tabel 1 terlihat bahwa ketidakpastian perhitungan bilangan Reynolds pada

variasi tanpa pertukaran kalor antara 0,17 – 0,51%, sedangkan ketidakpastian perhitungan faktor gesekan bervariasi dari 0,37 – 31,89%. Ketidakpastian perhitungan bilangan Reynolds pada variasi dengan pertukaran kalor terlihat pada Tabel 2 dengan nilai antara 0,17 – 0,42%, sedangkan ketidakpastian perhitungan faktor gesekan bervariasi dari 0,41 – 7,93%. Ketidakpastian dalam perhitungan kecepatan aliran air dalam anulus sempit (V) merupakan faktor dominan dalam ketidakpastian bilangan Reynolds.

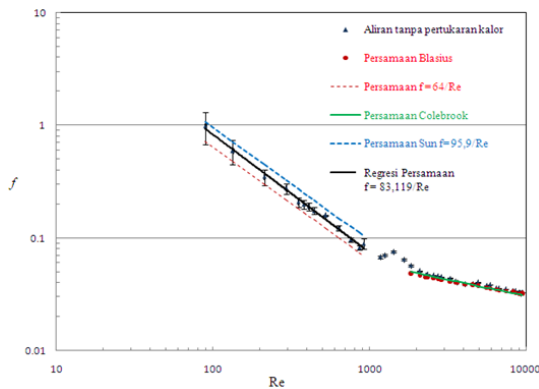
Dari Gambar 3 dan 4 terlihat bahwa pada bilangan Reynolds rendah, ketidakpastian perhitungan faktor gesekan sangat besar dan menjadi berkurang seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Hasil serupa juga didapat oleh Hegab, dkk (2002). Pada daerah dengan bilangan Reynolds rendah, ketidakpastian dalam perhitungan *frictional pressure drop* ($\rho g \Delta z - \Delta P$) merupakan faktor dominan dalam analisis ketidakpastian faktor gesekan. Sedangkan pada daerah aliran turbulen, ketidakpastian dalam perhitungan kecepatan aliran air dalam anulus sempit (V) merupakan faktor dominan dalam analisis ketidakpastian faktor gesekan. Pada daerah dengan bilangan Reynolds rendah, ketidakpastian perhitungan faktor gesekan pada variasi tanpa pertukaran kalor lebih besar bila dibanding pada variasi dengan pertukaran kalor. Hal ini terjadi karena faktor gesekan yang terjadi pada aliran dengan pertukaran kalor lebih besar bila dibanding aliran tanpa pertukaran kalor, sehingga nilai pembagi dalam perhitungan ketidakpastian faktor gesekan aliran dengan pertukaran kalor lebih besar.

Tabel 1. Kontribusi ketidakpastian pada variasi tanpa pertukaran kalor

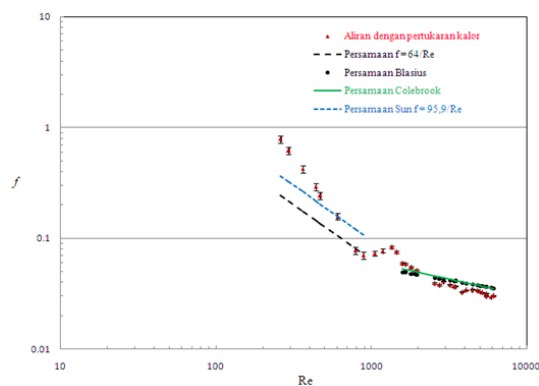
Parameter	Ketidakpastian (%)	Kontribusi terhadap Re (%)	Kontribusi terhadap f_{aktual} (%)	Kontribusi terhadap Po (%)
Diameter hidrolis (D_h)	0,148	8,4–66,77	0,002–16,22	–
Panjang pengukuran <i>pressure drop</i> (l)	0,024	–	0,0001–0,429	–
Kecepatan aliran air dalam anulus sempit (V)	0,081–0,489	23,02–91,60	93,7–0,07	–
<i>Frictional pressure drop</i> ($\rho g \Delta z - \Delta P$)	0,06–31,8	–	1,05–99,92	–
Faktor gesekan (f_{aktual})	0,37–31,89	–	–	73,36–99,99
Bilangan Reynolds (Re)	0,17–0,51	–	–	0,01–26,64
Bilangan Poiseuille (Po)	0,43–31,89	–	–	–

Tabel 2. Kontribusi ketidakpastian pada variasi dengan pertukaran kalor

Parameter	Ketidakpastian (%)	Kontribusi terhadap Re (%)	Kontribusi terhadap f_{aktual} (%)	Kontribusi terhadap Po (%)
Diameter hidrolik (D_h)	0,148	10,44–80,21	0,03–13	–
Panjang pengukuran <i>pressure drop</i> (l)	0,024	–	0,0009–0,4	–
Kecepatan aliran air dalam anulus sempit (V)	0,074–0,389	19,79–89,56	0,02–82,37	–
<i>Frictional pressure drop</i> ($\rho g \Delta z - \Delta P$)	0,23–7,91	–	14,53–99,94	–
Faktor gesekan (f_{aktual})	0,41–7,93	–	–	63,9–100
Bilangan Reynolds (Re)	0,17–0,42	–	–	0–36,1
Bilangan Poiseuille (Po)	0,46–7,93	–	–	–



Gambar 3. Ketidakpastian faktor gesekan pada aliran tanpa pertukaran kalor

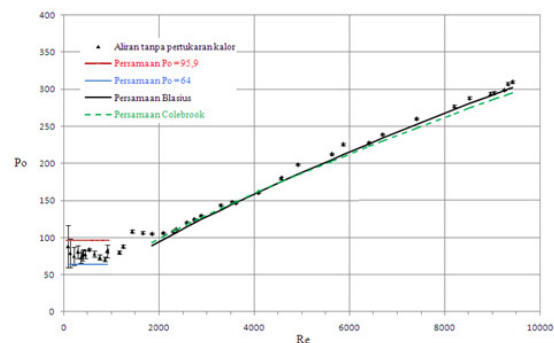


Gambar 4. Ketidakpastian faktor gesekan pada aliran dengan pertukaran kalor

b. Pengaruh Ketidakpastian Bilangan Reynolds Terhadap Ketidakpastian Bilangan Poiseuille

Dari Tabel 1 terlihat bahwa ketidakpastian perhitungan bilangan Poiseuille pada variasi tanpa

pertukaran kalor antara 0,43 – 31,89 %, sedangkan ketidakpastian perhitungan bilangan Poiseuille pada variasi dengan pertukaran kalor terlihat pada Tabel 2 dengan nilai antara 0,46 – 7,93 %. Ketidakpastian dalam perhitungan faktor gesekan (f_{aktual}) merupakan faktor dominan dalam analisis ketidakpastian bilangan Poiseuille. Dari Gambar 5 terlihat bahwa pada bilangan Reynolds rendah, ketidakpastian perhitungan bilangan Poiseuille sangat besar dan menjadi berkurang seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Melalui perbandingan antara kurva bilangan Poiseuille aliran air dalam anulus sempit dan dalam pipa - pipa normal seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 5, terlihat bahwa pada daerah aliran laminar ($Re < 1.000$) bilangan Poiseuille dalam anulus sempit adalah 11,09 – 38,15 % lebih besar dibanding dalam pipa – pipa normal (dibandingkan dengan $Po = 64$).



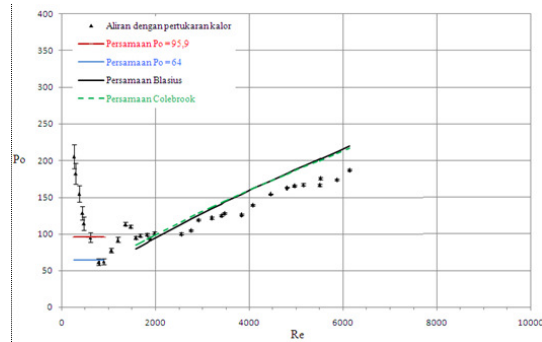
Gambar 5. Ketidakpastian bilangan Poiseuille pada aliran tanpa pertukaran kalor

Persamaan regresi faktor gesekan aliran yang terjadi pada daerah aliran laminar adalah,

$$f = \frac{83,119}{Re}, \quad Re < 1.000$$

maka $Po = 83,119$

Hasil yang didapat dari Persamaan $Po = 83,119$ adalah 1,299 kali sebesar nilai yang dihitung dengan Persamaan $Po = 64$, tetapi lebih kecil dari nilai yang dihitung dengan Persamaan Sun ($Po = 95,9$) sebesar 15,38%. Pada daerah aliran turbulen ($Re > 3.600$), beberapa nilai bilangan Poiseuille yang didapat dengan perhitungan persamaan Blasius dan Colebrook agak lebih rendah dibanding nilai penelitian, tetapi bedanya lebih kecil bila dibanding ketidakpastian pengukuran.



Gambar 6. Ketidakpastian bilangan Poiseuille pada aliran dengan pertukaran kalor

Melalui perbandingan antara kurva bilangan Poiseuille aliran air dalam anulus sempit dan dalam pipa - pipa normal seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 6, terlihat bahwa pada daerah dengan $Re \leq 605$ bilangan Poiseuille dalam anulus sempit adalah 48,56 – 220,57 % lebih besar dibanding dalam pipa – pipa normal ($Po = 64$). Pada daerah dengan $Re < 605$ bilangan Poiseuille dalam anulus sempit adalah 18,84 – 113,89 % lebih besar dibanding nilai yang didapat dengan persamaan Sun ($Po = 95,9$). Pada daerah dengan $Re > 2.500$, nilai bilangan Poiseuille yang didapat dengan perhitungan persamaan Blasius lebih besar 5,46 – 22,27 % dibanding nilai penelitian dan nilai bilangan Poiseuille yang didapat dengan perhitungan persamaan Colebrook lebih besar 7,54 – 22,88 % dibanding nilai penelitian.

KESIMPULAN

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

1. Pada variasi tanpa pertukaran kalor, nilai ketidakpastian perhitungan bilangan Reynolds berkisar antara 0,17 – 0,51 %, sedangkan pada variasi dengan pertukaran kalor berkisar antara 0,17 – 0,42%. Ketidakpastian dalam perhitungan kecepatan aliran air dalam anulus sempit (V)

merupakan faktor dominan dalam ketidakpastian bilangan Reynolds.

2. Pada variasi tanpa pertukaran kalor, nilai ketidakpastian perhitungan faktor gesekan berkisar antara 0,37 – 31,89%, sedangkan pada variasi dengan pertukaran kalor berkisar antara 0,41 – 7,93%. Ketidakpastian dalam perhitungan kecepatan aliran air dalam anulus sempit (V) dan *frictional pressure drop* ($\rho g \Delta z - \Delta P$) merupakan faktor dominan dalam ketidakpastian faktor gesekan.
3. Ketidakpastian perhitungan bilangan Poiseuille pada variasi tanpa pertukaran kalor antara 0,43 – 31,89 %, sedangkan ketidakpastian perhitungan bilangan Poiseuille pada variasi dengan pertukaran kalor dengan nilai antara 0,46 – 7,93 %.
4. Ketidakpastian dalam perhitungan faktor gesekan (f_{aktual}) merupakan faktor dominan dalam analisis ketidakpastian bilangan Poiseuille. Pada bilangan Reynolds rendah, ketidakpastian perhitungan bilangan Poiseuille sangat besar dan menjadi berkurang seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds.

DAFTAR PUSTAKA

- Celata, G.P., 2004, "Single Phase Heat Transfer and Fluid Flow in Micropipes", *Heat Transfer Engineering*, 25, 13–22.
- Hegab, H.E., Bari, A., Ameel, T., 2002, "Friction and Convection Studies of R134a in Microchannels within The Transition and Turbulent Flow Regimes", *Experimental Heat Transfer*, Vol. 15, pp. 245–259.
- Lorenzini, M, Morini, G.L., Henning, T., Brandner, J., 2009, "Uncertainty assessment in friction factor measurements as a tool to design experimental set-ups", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 282–289
- Lu, G. & Wang, J., 2008, "Experimental Investigation on Flow Characteristics in A Narrow Annulus", *Heat Mass Transfer*, 44, 495–499.
- Miller, R.W., 1996, "*Flow Measurement Engineering Handbook*", 3rd ed, New York, McGraw Hill.
- Moffat, RJ, 1988, "Describing the Uncertainties in Experimental Results", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 1, pp. 3-17
- Mokrani, O., Bourouga, B., Castelain, C., Peerhossaini, H., 2009, "Fluid Flow and Convective Heat Transfer in Flat

Microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 1337–1352.

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, 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 hidrolik (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/m³)
 ΔP_f = *frictional pressure drop* (Pa)