

Studi Eksperimental Mengenai Pola Aliran Dan Fraksi Hampa Pada Aliran Gas-Cairan Dalam Pipa Berukuran Mini

Sudarja^{1,4,a}, Indarto², Deendarlianto², Aldrin Gutama³

¹Program Studi S3 Ilmu Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No 2 Yogyakarta 55281, Indonesia.

²Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No 2 Yogyakarta 55281, Indonesia

³Program Studi S1, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No 2 Yogyakarta 55281, Indonesia

⁴Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Lingkar Selatan, Tamantirto, Yogyakarta, Indonesia

E mail : sudarja_msn@yahoo.com

Abstrak

Intisari

Telah dilakukan penelitian secara eksperimental tentang pola aliran dan fraksi hampa aliran dua-fase pada pipa berukuran kecil. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan data primer tentang pola aliran dan fraksi hampanya. Penelitian dilakukan pada seksi uji berupa pipa kaca berdiameter dalam 1,6 mm posisi horisontal, menggunakan fluida gas dan cairan, yaitu udara kering dan aquades, dengan kecepatan superfisial gas (J_G) = 0,83 – 65,4 m/s, dan kecepatan superfisial cairan (J_L) = 0,02 - 4,14 m/s. Kondisi penelitian adalah adiabatik. Data tentang pola aliran didapatkan secara langsung dari rekaman video menggunakan high speed camera, dan data fraksi hampa didapatkan dari image processing terhadap video tersebut. Pola aliran yang terdeteksi adalah: bubbly, slug, slug-annular, churn, dan annular. Pada penelitian ini, pola aliran terpisah (stratified) tidak muncul sama sekali. Secara umum kenaikan J_G memberikan pengaruh naiknya fraksi hampa (ϵ), kecuali pada J_G yang sangat rendah.

Kata kunci: aliran dua-fasa gas-cairan, saluran mini, horisontal, pola aliran, fraksi hampa

1. Pendahuluan

Aliran dua-fase dapat terjadi pada saluran nano (< 10 μm), saluran mikro (10 μm sampai dengan 200 μm), saluran mini (200 μm sampai dengan 3 mm), dan saluran konvensional (lebih besar dari 3 mm) (Kandlikar, 2003). Parameter dalam aliran dua-fase terdiri dari parameter dasar (pola aliran, fraksi hampa, perubahan tekanan), dan parameter perpindahan kalor. Parameter-parameter tersebut sangat penting di dalam rekayasa peralatan yang bekerjanya melibatkan aliran dua-fase. Karakteristik aliran dua-fasa pada saluran-saluran kecil atau kapiler (mini, mikro, dan nano) sangat berbeda dengan karakteristik pada saluran besar (konvensional), karena tegangan permukaan sangat dominan (Triplett dkk, 1999). Sehubungan dengan hal tersebut perlu dilakukan studi komprehensif (pola aliran, peta pola aliran, *pressure gradient*, *void fraction*, dan koefisien perpindahan kalor) mengenai aliran dua-fasa pada pipa berukuran kecil. Pada tahap ini dilakukan investigasi mengenai pola aliran dan fraksi hampa untuk dua-fasa gas-cairan pada pipa mini horisontal. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan data primer tentang pola aliran dan fraksi hampa pada pipa berukuran mini dan membandingkannya dengan data dan informasi yang sudah ada.

Fukano dan Kariyasaki (1993) melakukan penelitian tentang aliran dua-fase udara-air pada pipa dengan diameter dalam 1 mm, 2,4 mm, dan 4,9 mm, dengan arah vertikal naik, horisontal, dan vertikal turun. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada pipa yang diameter dalamnya lebih kecil, pembentukan *liquid slug* lebih mudah, dan pola aliran tidak dipengaruhi oleh arah aliran. Hal ini disebabkan oleh kuatnya pengaruh tegangan permukaan. Sementara Triplett dkk (1999) melakukannya pada pipa berdiameter dalam 1,1 mm, 1,45 mm, dan saluran *semi-triangular* dengan diameter hidraulik 1,09 mm dan 1,49 mm. Pola aliran yang terdeteksi adalah: *bubbly*, *churn*, *slug*, *slug-annular*, dan *annular*. Efek diameter pada aliran dua fase juga diinvestigasi oleh Chung dan Kawaji (2004)

untuk mengidentifikasi fenomena yang membedakan *microchannel* dari *minichannel*. Penelitian dilakukan dengan menggunakan gas nitrogen dan air pada saluran berdiameter 530, 250, 100, dan 50 μm . Pada pipa berdiameter 530 μm dan 250 μm , karakteristik aliran dua fase (peta pola aliran, fraksi hampa, *pressure drop*) mirip dengan karakteristik aliran pada *minichannel* (diameter ~ 1 mm). Pada pipa berdiameter 100 μm dan 50 μm , karakteristik aliran menyimpang dari karakteristik pada *minichannel*, yaitu terjadinya dominasi dari aliran *slug*. Pola aliran *bubbly*, *churn*, *slug-annular*, dan *annular* pada saluran dengan $D_H \leq 100$ μm disebabkan karena viskositas dan tegangan permukaan yang lebih besar. Jadi, jelas bahwa pada interval diameter pipa yang diinvestigasi, diameter memberikan pengaruh pada karakteristik aliran dua fase.

Penelitian tentang fraksi hampa pada saluran mini dan mikro telah dilakukan antara lain oleh: Kariyasaki dkk. (1992), Ali dkk. (1993), Fukano dan Kariyasaki (1993), Mishima dan Hibiki (1996), Bao dkk. (1994), Triplet dkk. (1999b), Kawahara dkk (2002), dan Chung dan Kawaji (2004). Ali (1993) memberikan korelasi sederhana, yaitu: $\alpha = 0,8 \beta$, dengan α adalah fraksi hampa dan β adalah fraksi hampa homogen. Fukano dan Kariyasaki (1993) dan Mishima dan Hibiki (1996) juga mengukur dan mengkorelasikan kecepatan dari *bubble* besar. Pengukuran fraksi hampa saluran mini dan mikro cukup sulit dilakukan. Mayoritas pengukuran yang dilakukan dan dipublikasikan berdasarkan analisis gambar (*image analysis*). Di samping itu ada sedikit peneliti yang menggunakan metode lain, yaitu: Bao dkk (1994) dengan *simultaneous solenoid valves*, Mishima dan Hibiki (1996) dengan radiografi neutron dan *image processing*. Mishima dan Hibiki (1996) mengkorelasikan data fraksi hampanya pada aliran ke atas dalam saluran vertikal menggunakan *drift flux model* sebagaimana yang dilakukan Kariyasaki dkk. (1992). Triplet dkk. (1999b) membandingkan data fraksi hampa mereka, yang diestimasi dari foto yang diambil dari seksi uji sirkular, dengan prediksi dari beberapa korelasi. Dengan pengecualian aliran *annular*, dimana semua korelasi yang diujikan melebihi (*overpredicted*) data, model homogen menghasilkan kesesuaian terbaik dengan hasil eksperimen. Serizawa dkk. (2002) mengukur fraksi hampa menggunakan analisis gambar video. Untuk semua pola aliran *bubbly* dan *slug*, didapatkan korelasi linier antara α dan β ,

$$\alpha = 0,833 \beta \quad (1)$$

Kawahara dkk (2002) mengevaluasi hasil penelitiannya dengan persamaan empiris:

$$\varepsilon = \frac{0.03\beta^{0.5}}{1 - 0.97\beta^{0.5}} \quad (2)$$

Chung dan Kawaji (2004) menyatakan bahwa model aliran homogen mempunyai kesesuaian yang baik dengan data untuk diameter 530 μm . Data untuk diameter 250 μm sedikit berbeda dari model aliran homogen, tetapi bersesuaian secara baik dengan korelasi tipe Armand yang diusulkan lebih dulu oleh Ali dkk (1993) untuk aliran dua-fase dalam saluran persegi sempit dengan $DH \sim 1$ mm, yaitu:

$$\alpha = 0,8 \beta \quad (3)$$

dengan $\beta = j_G/j$ adalah kualitas volumetrik. Data dari Chung dan Kawaji (2004) menunjukkan hubungan tidak linier antara α dan β , yaitu:

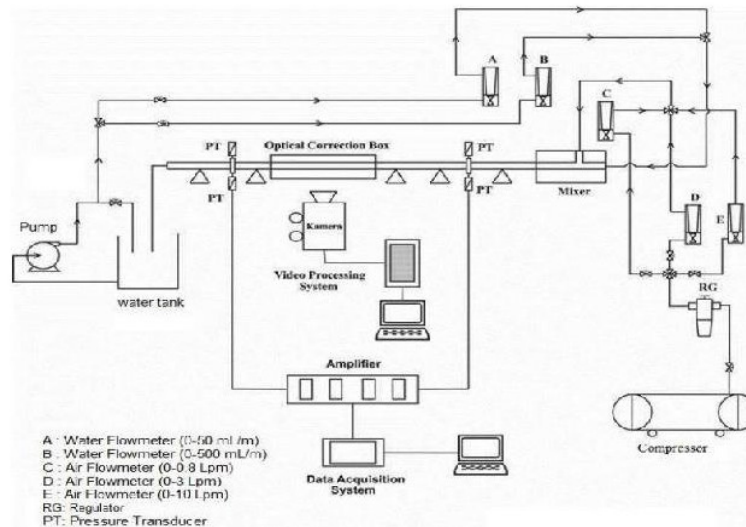
$$\alpha = \frac{C_1 \beta^{0.5}}{1 - C_2 \beta^{0.5}} \quad (4)$$

Konstanta C_1 dan C_2 sensitif terhadap ukuran saluran, $C_1 = 0,02$ dan $C_2 = 0,98$ untuk diameter saluran 50 μm , serta $C_1 = 0,03$ dan $C_2 = 0,97$ untuk saluran sirkular berdiameter 100 μm .

2. Metodologi

Instalasi alat yang digunakan pada penelitian ini, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, terdiri dari: tangki air, pompa air, planum, kompresor udara, *water trap*, seksi uji berupa pipa kaca berdiameter dalam 1,6 mm posisi horisontal, *optical correction box*, *flowmeter* udara dan *flowmeter* air. Fluida yang digunakan adalah udara kering dan aquades. Data pola aliran didapatkan dari gambar

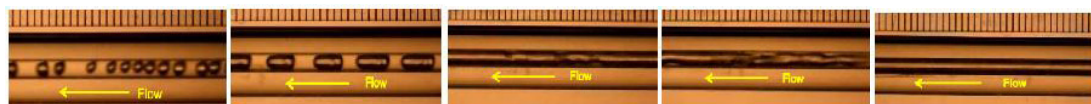
video visual dan fraksi hampa didapatkan dengan *image processing* terhadap video tersebut. Untuk pengambilan gambar tersebut digunakan kamera video Nikon J4 dengan kecepatan 1200 fps. Kondisi penelitian adalah adiabatik. Penelitian dilakukan pada kecepatan superfisial gas (J_G) = 0,83 – 65,4 m/s, dan kecepatan superfisial cairan (J_L) = 0,02 - 4,14 m/s.



Gambar 1. Skema alat uji

3. Hasil dan Pembahasan

Pola aliran yang terdeteksi pada penelitian ini adalah: *bubbly*, *slug*, *slug-annular*, *churn*, dan *annular* (Gambar 2).

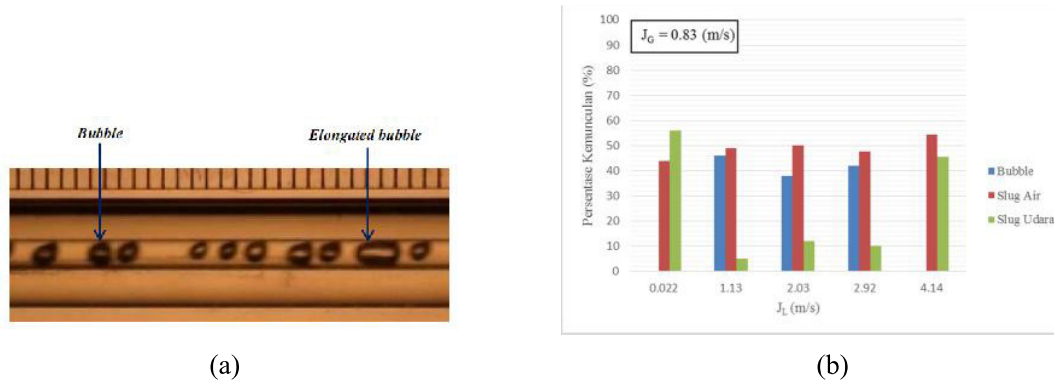


(a) (b) (c) (d) (e)

- (a) *bubbly*, $J_G=0,8294$ m/s, $J_L=1,1370$ m/s.
- (b) *slug*, $J_G=0,8294$ m/s, $J_L=0,4686$ m/s.
- (c) *slug-annular*, $J_G=18,7177$ m/s, $J_L=0,0224$ m/s.
- (d) *churn*, $J_G=9,3775$ m/s, $J_L=1,1370$ m/s.
- (e) *annular*, $J_G=42,0697$ m/s, $J_L=0,0224$ m/s.

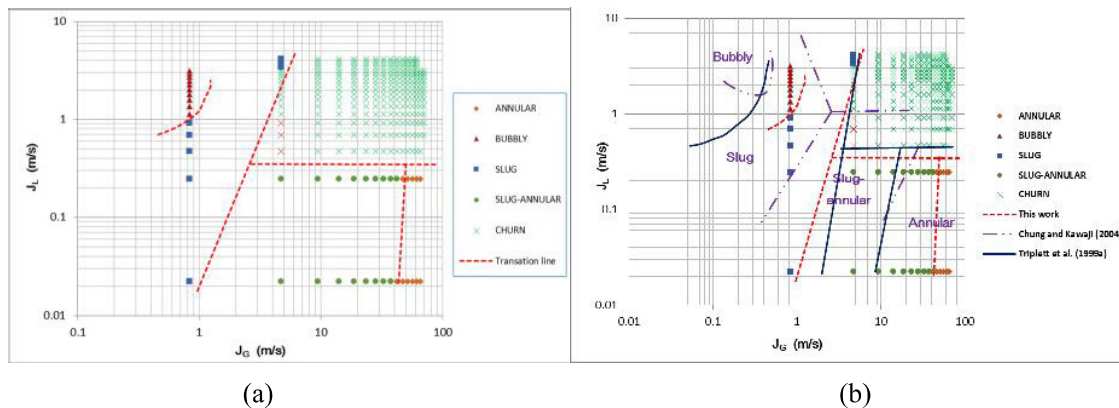
Gambar 2. Pola aliran yang terdeteksi

Pada pola aliran *bubbly*, kadang-kadang terjadi penggabungan satu gelembung dengan gelembung lainnya sehingga terbentuk gelembung panjang (*slug*) atau *elongated bubble* (Gambar 3a). Demikian juga pada aliran *slug*, juga sering disertai munculnya beberapa gelembung (*entrainment*). Persentase munculnya *bubble* dan *slug* pada $J_G=0,83$ m/s dan berbagai J_L ditunjukkan pada Gambar 3b.



Gambar 3. (a). Kemunculan *elongated bubble*. (b). Persentase kemunculan *bubble* dan *slug*

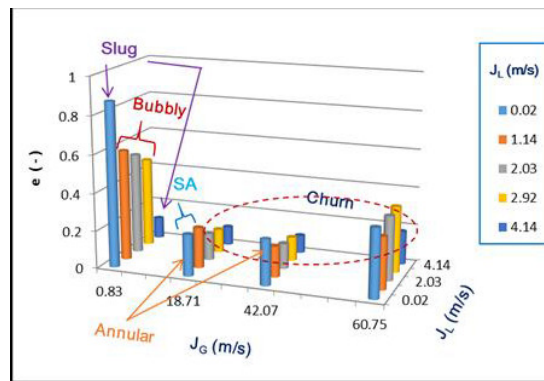
Peta pola aliran dari penelitian ini ditunjukkan pada gambar 4a, sedangkan gambar 4b adalah komparasi dengan peta pola aliran dari peneliti lain [Triplet dkk. (1999a) untuk diameter pipa 1,45 mm dan Chung dan Kawaji (2004) untuk diameter pipa 250 μm]. Pada Gambar 3b terlihat bahwa jika dibandingkan dengan peta pola dari Triplet dkk. (1999a), ada kemiripan dalam hal pola aliran yang terdeteksi maupun konfigurasi garis transisi antar pola aliran (terutama antara *slug* dan *churn*). Akan tetapi jika dibandingkan dengan peta dari Chung dan Kawaji (2004), terdapat perbedaan yang signifikan baik konfigurasi maupun posisi garis transisinya, walaupun terdapat kesamaan pola aliran yang terdeteksi. Dari ketiga peta pola aliran tersebut, garis transisi antara pola aliran *churn* dengan *slug-annular* maupun *annular* berupa garis lurus horisontal. Dari ketiga garis transisi tersebut terlihat bahwa untuk ukuran saluran yang lebih besar, maka garisnya lebih di bawah. Hal ini menunjukkan bahwa pada saluran yang berukuran lebih besar, lebih mudah terbentuk pola aliran *churn*. Jika dibandingkan dengan peta pola aliran dari Mandhane dkk. (1973) yang merepresentasikan aliran pada saluran konvensional (besar) menunjukkan perbedaan yang signifikan, sebagaimana diungkapkan oleh Fukano dan Kariyasaki (1993) dan Triplet dkk. (1999a).



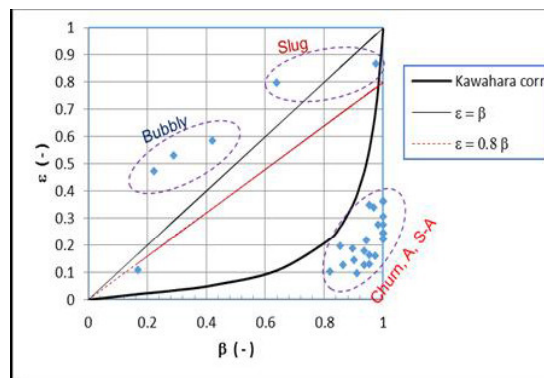
Gambar 4. (a) Peta pola aliran dari penelitian ini dan garis transisinya. (b) Peta pola aliran dibandingkan dengan penelitian lain

Gambar 5 menunjukkan bahwa secara umum kenaikan J_G memberikan pengaruh naiknya fraksi hampa, kecuali pada J_G yang sangat rendah, karena pada J_G tersebut pola aliran yang terbentuk adalah *bubbly* dan *slug*. Dari grafik fraksi hampa homogen (β) vs fraksi hampa terukur (ϵ atau α), yaitu Gambar 6, untuk aliran *bubbly*, semua harga ϵ lebih tinggi dari pada harga β , sedangkan untuk aliran *slug*, harga ϵ tersebar disekitar garis korelasi Ali dkk. ($\epsilon=0,8 \beta$) sampai dengan sedikit di atas garis homogen. Hal ini menunjukkan bahwa pada aliran *bubbly* dan *slug* tidak terjadi *slip* atau misalnya ada, *slip ratio* nya mendekati 1. Untuk pola aliran *churn*, *slug-annular* (S-A), maupun *annular* (A), harga ϵ sangat kecil, bahkan berada di bawah garis korelasi Kawahara (persamaan 2).

Hal ini menunjukkan adanya *slip ratio* yang sangat besar, berarti kecepatan gas jauh lebih besar dari pada kecepatan cairan.



Gambar 5. Pengaruh J_G dan J_L terhadap fraksi hampa.



Gambar 6. Pengaruh β terhadap ϵ . ($\epsilon = \alpha$)

4. Kesimpulan

Pola aliran yang terdeteksi pada penelitian ini adalah: *bubbly*, *slug*, *slug-annular*, *churn*, dan *annular*. Pada pola aliran bubbly sering disertai munculnya *elongated bubble*. Peta pola aliran yang didapatkan mempunyai kemiripan dengan peta dari Triplett (1999). Secara umum kenaikan J_G memberikan pengaruh naiknya fraksi hampa, kecuali pada J_G yang sangat rendah.

Daftar Pustaka

- Ali, M., Sadatomi, M., Kawaji, M., 1993, Adiabatic Two-Phase Flow in Narrow Channels Between Two Flat Plates, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 71.
- Bao, Z.Y., Bosnick, M.G., Haynes, B.S., 1994. Estimation of void fraction and pressure drop for two-phase flow in fine passages. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 72, 625-632.
- Chung, P.M.Y., Kawaji, M., 2004, The Effect of Channel Diameter on Adiabatic Two-Phase Flow Characteristic in Microchannels, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 30, pp. 735-761.
- Fukano T., Kariyasaki A., 1993, Characteristics of gas-liquid two-phase flow in a capillary tube, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 141, pp. 59-68.
- Kandlikar, S.G., Grande, W.J., 2003. Evolution of microchannel flow passages—thermohydraulic performance and fabrication technology. *Heat Transfer Eng.* 24, 3-17.
- Kariyasaki, A., Fukano, T., Ousaka, A., and Kagawa, M., 1992, Isothermal air-water two-phase up- and downward flows in vertical capillary tube (1st report, Flow pattern and void fraction), *Trans. JSME Ser. B.*, Vol. 58, pp. 2684-2690.

- Kawahara, A., Chung, P.M.Y., Kawaji, M., 2002, Investigation of Two-Phase Flow Pattern, Void Fraction and Pressure Drop in a Microchannel, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, pp. 1411-1435.
- Mandhane, J.M., Gregory, G.A., and Aziz, K., 1974, A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipe. *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 19, pp. 115-124.
- Mishima K., Hibiki T., 1996, Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes, *Int. J. Multiphase flow*, Vol 2, pp. 703-712.
- Serizawa, A., Feng, Z., and Kawara, Z., 2002, Two-phase flow in microchannels. *Exp Thermal fluid Sci.*, Vol. 26, pp. 703 – 714.
- Triplett, K.A., Ghiaasiaan, S.M., Abdel Khalik, S.I., Sadowski, D.L., 1999. Gas-liquid two-phase flow in microchannels—Part I: Two-phase flow pattern. *Int. J Multiphase Flow* 25, 377–394.
- Triplett, K. A., Ghiaasiaan, S. M., Abdel-khalik, S.I., LeMouel, A., and McCord, B. N., 1999b, Gas-Liquid two-phase flow in microchannels. Part II: Void fraction and pressure drop. *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 25, pp. 377-394.