

Investigasi Pola Aliran Dua-Fase Gas-Cairan Di Dalam Pipa Berukuran Mini Pada Aliran Horisontal

Sudarja^{1,2,a*}, Indarto^{3,b} Deendarlianto^{4,c}, Raditia Noverdi^{5,d}, Aldrin Gutama^{6,e}

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

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Lingkar Selatan, Tamantirto, Yogyakarta, Indonesia

^{3,4} Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No 2 Yogyakarta 55281, Indonesia.

^{5,6}Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No 2 Yogyakarta 55281, Indonesia.

email: sudarja_msn@yahoo.com, indarto@ugm.ac.id, deendarlianto@ugm.ac.id,
raditianoverdi@gmail.com., aldringutama@gmail.com

Abstrak

Karakteristik aliran dua-fase pada saluran-saluran kecil (saluran mini, saluran kapiler, saluran mikro, dan saluran nano) sangat berbeda dengan karakteristik pada saluran konvensional, sehingga kebanyakan literatur yang berkaitan dengan fenomena penurunan tekanan dan perpindahan kalor karena perubahan fase dan proses hidrodinamika aliran dua-fase umumnya tidak berlaku untuk saluran kecil. Oleh karena itu perlu dilakukan studi komprehensif mengenai pola aliran dua-fase gas-cairan pada pipa berukuran kecil. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan data primer tentang pola aliran dan peta pola aliran pada pipa berukuran mini. Penelitian dilakukan pada seksi uji berupa pipa kaca berdiameter dalam 1,6 mm posisi horisontal, menggunakan fluida gas dan cairan, yaitu udara kering dan air, dengan kecepatan superfisial gas (J_G)= 0,08 – 64,42 m/s, dan kecepatan superfisial cairan (J_L)= 0,02 - 3,09 m/s. Kondisi penelitian adalah adiabatik. Pola aliran yang terdeteksi adalah: *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular*, *wavy annular*, dan *annular*. Dari beberapa peta pola aliran yang ada, peta pola aliran yang paling mirip dengan penelitian ini adalah peta dari Triplett dkk (1999a).

Kata kunci : aliran dua-fase gas-cairan, saluran mini, horisontal, pola aliran, peta pola aliran

Pendahuluan

Fase (*phase*) adalah kondisi atau bentuk atau wujud dari suatu zat, yang dapat berupa padat, cair, atau gas. Aliran multi fase (*multiphase flow*) adalah aliran simultan dari beberapa fase. Aliran dua fase (*two-phase flow*) merupakan fenomena paling sederhana dari aliran multi fase [1]. Untuk aliran dua-fase, distribusi masing-masing fase (cair dan gas) pada saluran merupakan hal yang sangat penting. Distribusi masing-masing fase tersebut mempengaruhi struktur aliran, yang sering disebut pola aliran dua-fase dan mempunyai karakteristik khusus. Koefisien perpindahan kalor dan penurunan tekanan berhubungan sangat erat dengan struktur aliran dua-fase lokal dari fluida, dan oleh karenanya,

maka prediksi pola aliran dua-fase merupakan aspek penting [2].

Aliran dua fase dapat terjadi pada saluran berukuran besar (*large channel*), normal (*normal channel*), mini (*mini channel*), mikro (*micro channel*), dan bahkan pada saluran nano (*nano channel*). Dalam hal penamaan dan pengklasifikasian ukuran saluran ini, terdapat berbagai versi, misalnya versi Triplett dkk. [3], versi Mehendale [4], versi Kandlikar, [5], dan sebagainya.

Saluran-saluran aliran dengan diameter hidraulik pada orde sama dengan atau lebih kecil dari konstanta Laplace digunakan pada penukar kalor kompak (*compact heat exchangers*, gambar 1), sistem pendinginan mikroelektronik (*microelectronic cooling systems*), reaktor nuklir

skala riset, proses kimia, dan sistem refrigerasi berukuran kecil [3].

Konstanta Laplace adalah [3]:

$$L = \{/[g(\square_L - \square_G)]\}^{1/2} \quad (1)$$

dengan:

\square : tegangan permukaan, g: konstanta gravitasi,
 \square_L : densitas cairan, dan \square_G : densitas gas



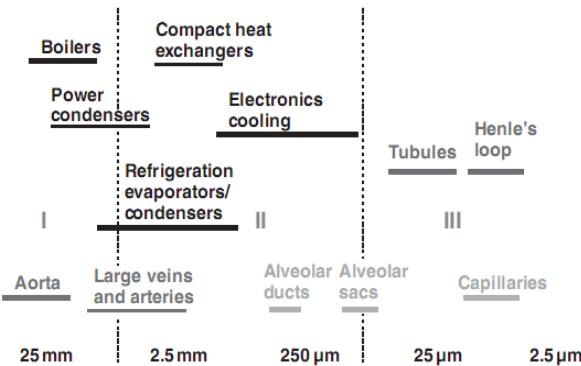
Gambar 1. Compact Heat Exchangers (dari GEA)

Desain dan operasi dari sistem yang melibatkan aliran dua-fase gas-cairan pada saluran kapiler membutuhkan karakteristik aliran dua-fase pada saluran tersebut, termasuk pola aliran dan penurunan tekanan dua-fase [3]. Zhao dan Bi [6] menjelaskan aplikasi aliran pada saluran kecil antara lain: pendinginan modul-modul *high-density multi-chip* pada *supercomputer*, peralatan *X-ray* dan peralatan diagnostik lainnya berdaya tinggi, penukar kalor fluks tinggi pada sistem kedingantaraan (*aerospace system*), sistem pendinginan kreogenik pada satelit, dan sebagainya. Kawahara et al. [7] memberikan contoh aplikasi lain dari *microscale devices*, yaitu untuk pendinginan rangkaian mikroelektrik, aplikasi-aplikasi pada *bioengineering*, *aerospace* dan *microheat pipe*. Beberapa dari pemakaian tersebut melibatkan aliran dua fase dalam pipa berdiameter kurang dari 1 mm.

Parameter-parameter pada aliran dua fase terdiri dari parameter dasar dan parameter efek perpindahan kalor (*heat transfer effect*). Parameter dasar meliputi: (a) *Flow behavior* (*interfacial*

behavior), yaitu pola aliran (*flow pattern* atau *flow regime*) dan peta pola aliran (*flow pattern map*), (b) fraksi hampa (*void fraction*, \square), (c) perubahan tekanan (*pressure gradient* atau *pressure drop*).

Kandlikar [5] memberikan gambaran aplikasi aliran dua-fase pada berbagai ukuran saluran (gambar 2).



Gambar 2. Skema aplikasi aliran dua-fase berdasarkan ukuran saluran [5].

Pada aliran dua fase di dalam pipa berukuran mini dan mikro, fluida mempunyai sifat yang unik, yaitu tegangan permukaan sangat dominan sehingga hukum Newton untuk fluida tidak berlaku. Hal ini disebabkan oleh kecilnya diameter saluran.

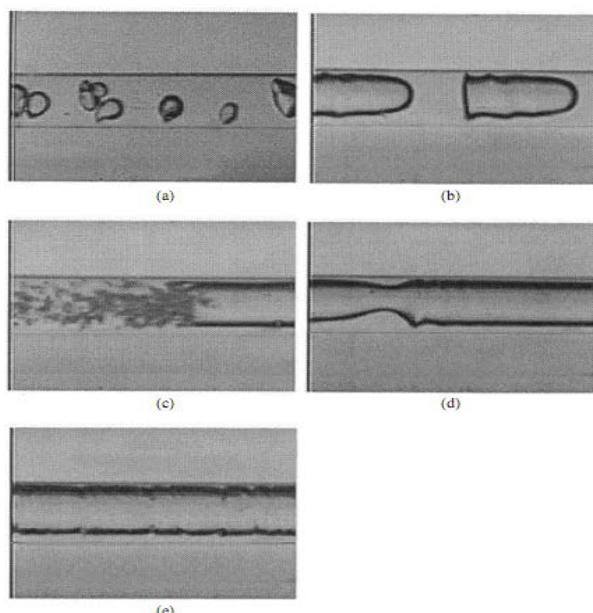
Aliran dua-fase pada saluran mini dan mikro meliputi area yang dinamis dan berkembang pesat. Beberapa sifat (*attributes*) dari aliran dua-fase pada saluran mini dan mikro tidak seluruhnya diketahui, dan terdapat inkonsistensi diantara observasi eksperimental, interpretasi fenomenologikal, dan model-model teoritikal [8]. Disamping itu, Chung dan Kawaji [9] mengungkapkan bahwa informasi dan data penelitian pada *microchannel* dengan diameter $< 100 \mu\text{m}$ masih sangat terbatas dan belum sepenuhnya konsisten, serta pengaruh dari pengecilan diameter saluran masih belum jelas.

Identifikasi pola aliran dilakukan terutama dengan metode fotografis, dan karena subjektivitas dari metode ini maka terdapat ketidaksesuaian (*disagreement*) terhadap pola aliran utama (*major flow regimes*).

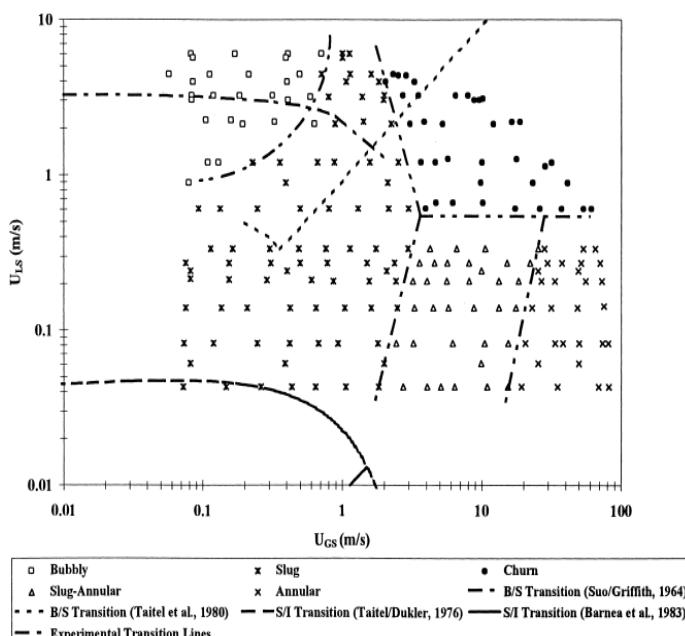
Pola aliran dan interval parameter antara saluran-saluran vertikal dan horisontal dengan diameter $\leq 1 \text{ mm}$ mirip, serta tidak sensitif terhadap orientasinya. Pola aliran yang umum terpantau pada saluran mini adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3 menggunakan fotografi [3].

Gambar 3 adalah contoh hasil penelitian tentang pola aliran dari Triplett dkk. [3] dengan

metode fotografi, sedangkan gambar 4 adalah contoh peta aliran dari Triplett dkk. [3] yang digambarkan pada koordinat kecepatan superficial masing-masing fase, dan dibandingkan dengan peta pola aliran dari peneliti lain, terutama posisi garis transisinya.

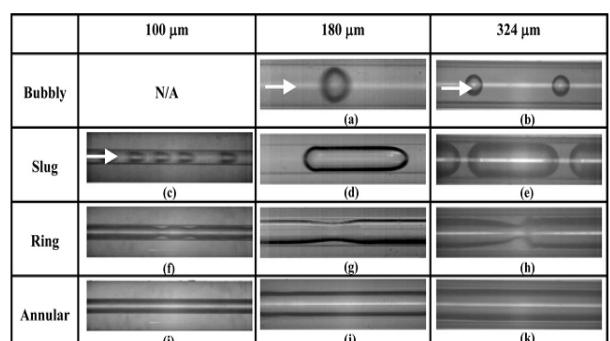


Gambar 3. Foto dari pola aliran pada seksi uji berdiameter 1,097 mm dari Triplett dkk.[3]
(a) *Bubbly* ($J_G=0,083 \text{ m/s}$; $J_L=3,021 \text{ m/s}$), (b) *Slug* ($J_G=0,498 \text{ m/s}$; $J_L=0,608 \text{ m/s}$), (c) *Churn* ($J_G=6,183 \text{ m/s}$; $J_L=0,661 \text{ m/s}$), (d) *Slug-annular* ($J_G=6,163 \text{ m/s}$; $J_L=0,082 \text{ m/s}$), (e) *Annular* ($J_G=73,30 \text{ m/s}$; $J_L=0,082 \text{ m/s}$).



Gambar 4. Peta pola aliran dari Triplett dkk.[3] untuk aliran searah dalam pipa berdiameter dalam 1,097 mm.

Peneliti lain yang melakukan riset tentang pola aliran pada saluran mini, antara lain: Suo dan Griffith [10], Damianides dan Westwater [11], Fukano dkk.[12], Fukano dan Kariyasaki [13], Barajas dan Panton [14], Mishima dan Hibiki [15], Coleman dan Garimella [16], Chen dkk.[17], Hassan dkk.[18], Lee dan Lee [19], dan Saidi dkk.[20]. Para peneliti tersebut menggunakan bentuk saluran yang sama, yaitu sirkular dan fluidanya juga sama, yaitu udara-air, akan tetapi pola aliran yang didapatkan berbeda-beda. Kesamaan dari hasil penelitian mereka adalah ditemukannya aliran *annular* oleh semua peneliti dan pola aliran *bubbly* oleh mayoritas peneliti.



Gambar 5. Pola aliran dari Sur dan Liu [21].

Penamaan pola aliran kadang-kadang juga berbeda antar peneliti, sebagai contoh pada penelitian yang dilakukan oleh Sur dan Liu [21], ada pola aliran yang disebut dengan “*ring*”, yaitu konfigurasi aliran *annular* yang secara periodik tebal film cairannya menebal membentuk *ring* (gambar 5.f,g,h). Oleh Triplett dkk.[3] serta peneliti yang lain, pola aliran ini disebut “*slug annular*”.

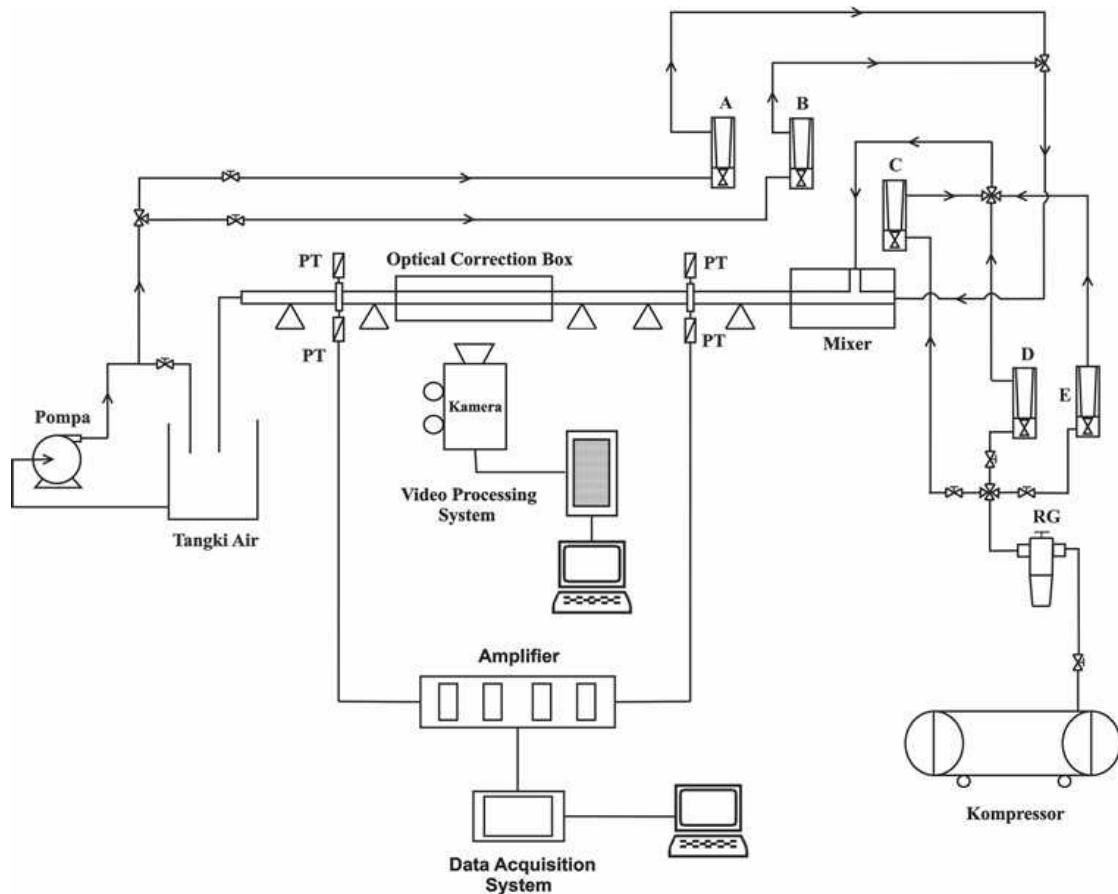
Metodologi

Bahan penelitian berupa fluida gas dan cair. Fluida gas yang digunakan adalah udara dengan kelembaban rendah, yang didapatkan dari kompresor udara yang dilengkapi dengan *dryer* dan *water trap*, sedangkan untuk fluida cair digunakan air yang dialirkan ke dalam sistem dengan bantuan pompa air dan plenum (untuk menghilangkan efek *pulsating*).

Penelitian dilakukan pada suatu instalasi alat yang 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*, dan alat ukur (*pressure transducer*, *thermocouple*, dan *flowmeter*) sebagaimana digambarkan secara skematis pada gambar 6. Di sini digunakan 2 buah *flow meter*

cairan dengan kapasitas yang berbeda ($0 - 50$ mL/mnt dan $0 - 500$ mL/mnt), serta 3 buah *flow*

meter gas yang berbeda kapasitasnya ($0 - 0,8$ L/mnt, $0 - 3$ L/mnt, dan $0 - 10$ L/mnt).



Keterangan:

- A : Flowmeter Air ($0 - 50$ mL/m)
- B : Flowmeter Air ($0 - 500$ mL/m)
- C : Flowmeter Udara ($0 - 0,8$ Lpm)
- D : Flowmeter Udara ($0 - 3$ Lpm)
- E : Flowmeter Udara ($0 - 10$ Lpm)
- RG : Regulator
- PT : Pressure Transducer

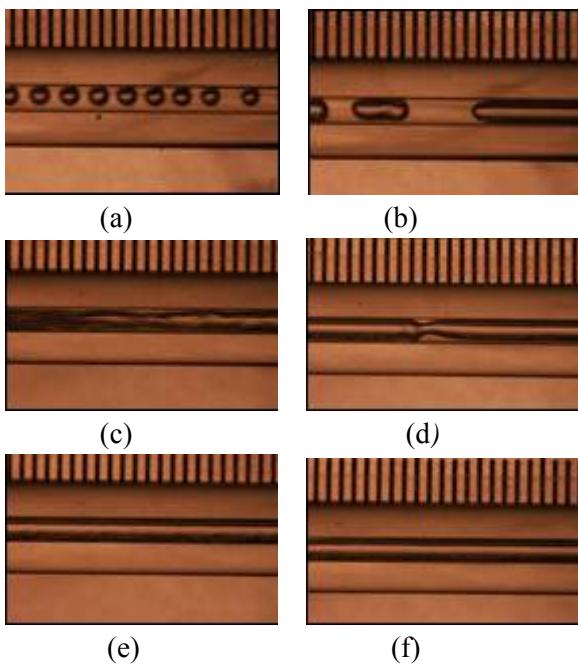
Gambar 6. Skema instalasi alat uji.

Penelitian dilakukan pada kecepatan superfisial gas (J_G) = $0,08 - 64,42$ m/s, dan kecepatan superfisial cairan (J_L) = $0,02 - 3,09$ m/s. Kondisi penelitian adalah adiabatik. Pengambilan data (berupa gambar) pola aliran dilakukan secara visual dengan kamera Canon 500 D.

Hasil

Dari data visual yang didapatkan, terlihat bahwa pola aliran yang terdeteksi adalah: *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular*, *wavy annular*, dan *annular* (gambar 7). Aliran *bubbly* (gambar 7a) terjadi pada J_G kecil, J_L sedang sampai tinggi. Karena debit aliran udara kecil, maka terbentuk

gelembung-gelembung udara yang saling terpisah dengan diameter lebih kecil dari diameter saluran serta berbentuk mendekati bola. Hal ini menunjukkan dominasi gaya akibat tegangan permukaan yang cenderung meminimalkan “*surface free energy*” dengan memperkecil luas permukaan. Jika kecepatan superfisial gas ditingkatkan (dengan memperbesar debit aliran udara) maka sebagian gelembung udara tersebut tergabung dan membentuk peluru atau *elongated bubble* yang sering disebut aliran *slug* (gambar 7b). Gelembung panjang tersebut mengalir berselang-seling dengan air. Diameter dari *slug* hampir memenuhi saluran.



Gambar 7. Pola aliran yang terdeteksi
(a) *Bubbly* ($J_G=0,1$ m/s dan $J_L=1,62$ m/s);
(b) *Slug* ($J_G=2,06$ m/s dan $J_L=0,06$ m/s); (c) *Churn* ($J_G=21,03$ m/s dan $J_L=0,52$ m/s); (d) *Slug-annular* ($J_G=7,37$ m/s dan $J_L=0,02$ m/s); (e) *Wavy-annular* ($J_G=57,4$ m/s dan $J_L=0,24$ m/s); (f) *Annular* ($J_G=14,12$ m/s dan $J_L=0,05$ m/s)

Jika J_G dan J_L tinggi, pola aliran yang terbentuk adalah *churn* (gambar 7c). Pada pola aliran ini topologi antara gas dan cairan tidak teratur dan berubah-ubah. Pada J_G tinggi dan J_L rendah sampai sedang, maka akan terbentuk aliran *annular* yaitu aliran gas pada inti saluran yang dikelilingi oleh cairan (pada dinding saluran), yang dapat dibedakan menjadi 3 macam aliran, yaitu *slug annular*, *wavy-annular* dan *annular*.

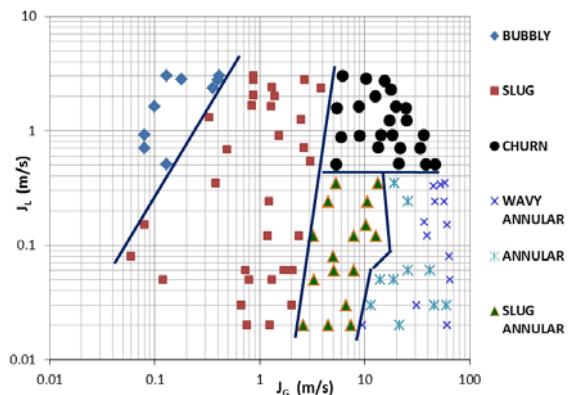
Aliran *slug annular* (gambar 7d) terbentuk dari aliran gas kontinyu pada tengah saluran dikelilingi oleh film cairan dengan leher seperti ring pada kelilingnya. Leher cairan ini disebabkan oleh terbentuknya gelombang pada garis antar muka secara periodik sebagai akibat dari tegangan geser dan viskositas.

Pada aliran *wavy-annular* (gambar 7e), batas antara cairan dan gas kelihatan agak bergelombang (bukan garis lurus), sedangkan pada aliran *annular* (gambar 6f), berupa garis lurus. Kedua aliran ini terjadi pada *region* yang sama, yaitu pada J_G yang sangat tinggi dengan J_L rendah sampai sedang.

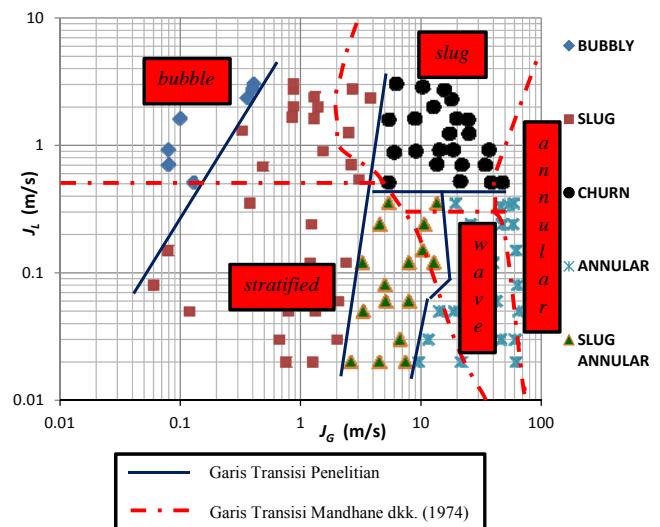
Pola aliran terpisah (*stratified flow*) tidak pernah ditemukan pada penelitian ini. Hal ini menunjukkan bahwa, dan skaligus disebabkan oleh, gaya gravitasi (yang menyebabkan

terpisahnya dua fluida beda berat jenis) lebih kecil dari pada gaya yang disebabkan oleh tegangan permukaan pada saluran kecil.

Peta pola aliran dari penelitian ini ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Peta pola aliran dan garis transisi penelitian ini



Gambar 9. Perbandingan garis transisi pola aliran penelitian ini dengan peta Mandhane dkk.[22]

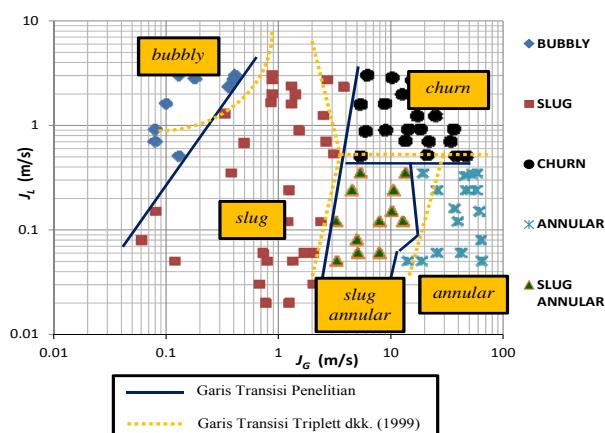
Peta tersebut selanjutnya dibandingkan dengan peta yang sudah ada dan sering menjadi rujukan, yaitu peta Madhane dkk.[22], peta Triplett dkk.[3] dan peta dari Sur dan Liu [21], sebagaimana ditunjukkan pada gambar 9, 10, dan 11, berturut-turut.

Kesimpulan

Pola aliran yang didapatkan adalah *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular*, *wavy annular*, dan *annular*. Peta pola aliran yang didapatkan mempunyai kemiripan dengan peta dari Triplett dkk.[3].

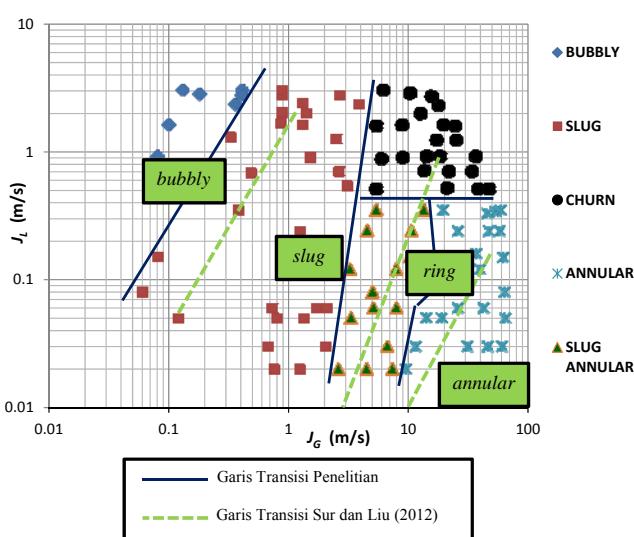
Referensi

- [1] G.B. Wallis, One-Dimensional Two-Phase Flow, McGraw-Hill, New York, 1969.
- [2] J.R. Thome, Two-phase flow pattern, in: Thome, J.R., Wolverine Tube inc, *Engineering Data III*, 2007, pp. 12.1.
- [3] K.A. Triplett, S. M. Ghiaasiaan, S.I. Abdel-khalik, and D. L. Sadowski, 1999a, Gas-Liquid two-phase flow in microchannels. Part I: Two-phase flow pattern, *Int. J. Multiphase flow*. 25 (1999a) 377-394.
- [4] Mehendale, A.M. Jacobi, Evaporative heat transfer in mesoscale heat exchangers, *ASHRAE Transactions*, 106 (2000) 446-455.
- [5] S.G. Kandlikar, D.A. Willistein, and J. Borelli, Experimental evaluation of pressure drop elements and fabricated nucleation sites for stabilizing flow boiling in minichannels and microchannels, *Proc. 3rd Int. Conf. on Microchannels and Minichannels*, Part B (2005) 115–124.
- [6] T.S. Zhao, Q.C. Bi, Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels, *Int. J. Multiphase Flow*, 27 (2001) 765-782.
- [7] A. Kawahara, P.M. Chung, M. Kawaji, Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel, *Int. J. Multiphase Flow*, 28 (2002) 1411-1435.
- [8] S. M. Ghiaasiaan, Two-Phase Flow, Boiling, and Condensation in Conventional and Miniature Systems, Cambridge University Press, New York, 2008.
- [9] P.M.-Y. Chung, , M. Kawaji, The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannel. *Int. J. Multiphase flow*, 30 (2004) 735-761.
- [10] M. Suo, P. Griffith, Two Phase Flow in Capillary Tubes, M.I.T. Heat Transfer Laboratory, Cambridge, Massachusetts, 1963.
- [11] C.A. Damianides, J.W. Westwater, Two-phase flow patterns in a compact heat exchanger and small tubes. In:Proceedings of Second UK National Conference on Heat Transfer, Glasgow, September 14–16. Mechanical Engineering Publications, London, (1988) 1257–1268.
- [12] T. Fukano, A. Kariyasaki, M. Kagawa, Flow patterns and pressure drop in isothermal



Gambar 10. Perbandingan garis transisi pola aliran penelitian ini dengan peta Triplett dkk. [3].

Dari perbandingan peta pola aliran penelitian ini terhadap peta Mandhane dkk.[22] terdapat perbedaan pola aliran maupun posisi garis transisinya. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan karakteristik gaya gravitasi, gaya inersia, maupun gaya karena tegangan permukaan yang terjadi pada pipa berukuran mini dibandingkan dengan pada pipa berukuran konvensional.



Gambar 11. Perbandingan garis transisi pola aliran penelitian ini dengan peta Sur dan Liu [21].

Pola aliran dan peta pola aliran pada penelitian ini mempunyai kemiripan yang cukup baik dengan peta pola aliran dari Triplett dkk.[3], sedangkan jika dibandingkan dengan peta dari Sur dan Liu [21] terdapat perbedaan yang cukup signifikan baik pola alirannya maupun posisi garis transisinya.

gasliquid co-current flow in a horizontal capillary tube, in: ANS Proceedings of National Heat Transfer Conference: Technical Sessions, (1989) 153-161.

[13] T. Fukano, A. Kariyasaki, Characteristics of gasliquid two-phase flow in a capillary tube, Nuclear Engineering and Design, 141 (1993) 59-68.

[14] A.M. Barajas, R.L. Panton, The effect of contact angle on two-phase flow in capillary tubes. Int. J. Multiphase Flow, 19 (1993) 337-346.

[15] K. Mishima, T. Hibiki, Some characteristics of airwater two-phase flow in small diameter vertical tubes, Int. J. Multiphase flow, 2 (1996) 703-712.

[16] J. W. Coleman, and S. Garimella, Characteristics of two-phase flow pattern in small diameter round and rectangular tubes. Int. J. Multiphase flow, 42 (1999) 2869-2881.

[17] W.L. Chen, M.C. Twu , C. Pan, Gas-liquid two-phase flow in micro-channels, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 28 (2002) 1235-1247.

[18] I. Hassan, M. Vaillancourt, K. Pehlivan, Two-phase flow regime transitions in microchannels: a comparative experimental study, Microscale Thermophysical Engineering, 9 (2005) 165-182.

[19] C.Y. Lee, S.Y. Lee, Influence of surface wettability on transition of two-phase flow pattern in round mini-channels, Int. J. Multiphase Flow, 34 (2008) 706-711.

[20] M.H. Saidi, P. Hanafizadeh, A. Nouri Gheimasi, S. Ghanbarzadeh, Experimental investigation of air-water, two-phase flow regimes in vertical mini pipe, Scientia Iranica B (2011) 18 (4), 923–929.

[21] D. Liu, A. Sur, Adiabatic air-water two-phase flow in circular microchannels, Int. J. Thermal Sciences, 53 (2012) 18-34.

[22] J.M. Mandhane, G.A. Gregory, and K. Aziz, A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipe. Int. J. Multiphase flow, 19 (1974) 115-124.