

KAJIAN EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK ALIRAN DUA FASE UDARA-AIR + 7% BUTANOL PADA PIPA KECIL POSISI MIRING 30°

Wahyu Solihin^a, Sudarja^b, Sukamta^c

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183

^awahyusolihin@gmail.com, ^bsudarja_msn@yahoo.com, ^cmsukamta@gmail.com

Abstrak

Aliran dua-fase merupakan bagian dari aliran multifasa yang hanya melibatkan dua macam wujud dari suatu zat dalam sebuah aliran. Pada umumnya aliran dua fasa sering dijumpai dalam sistem perpipaan minyak dan gas, reaktor nuklir, geothermal, pendingin perangkat elektronik. Tujuan dari penelitian ini untuk mendapatkan data primer tentang kajian eksperimental karakteristik aliran dua-fase udara-air + 7% butanol pada pipa kecil posisi miring 40°. Data primer yang diambil yaitu: Video pola aliran dan gradien tekanan. Penelitian ini dilakukan menggunakan seksi uji berupa pipa kecil dengan diameter dalam pipa sebesar 1,6 mm dengan panjang 130 mm dan kemiringan 40° terhadap posisi horizontal. Fluida yang bekerja adalah udara-air aquades dengan campuran butanol 7%. Dengan memvariasikan nilai kecepatan superfisial gas dan air pada kisaran $J_G = 0,025 - 66,3$ m/s dan $J_L = 0,033 - 4,935$ m/s. Pada penelitian ini menggunakan metode visualisasi dengan program *MOV to AVI* kemudian diolah dengan *virtual dub* untuk pola aliran, *digital image processing* dengan program MATLAB R2014a untuk fraksi hampa dan untuk gradien tekanan menggunakan sensor tekanan fluida *MPX System* yang dihubungkan ke komputer. Pada penelitian ini pola aliran yang didapatkan yaitu: *bubble*, *plug*, *slug annular*, *annular* dan *churn*. Pola aliran yang terbentuk lalu dijustifikasi kemudian dipetakan berdasarkan variasi kecepatan superfisialnya, peta pola aliran juga dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu. Nilai fraksi hampa dipengaruhi oleh J_G dan J_L yang bervariasi dan pola aliran yang terjadi. Sedangkan untuk hasil gradien tekanan menunjukkan bahwa kecepatan superfisial gas (J_G) dan kecepatan superfisial cair (J_L) sangat mempengaruhi nilai gradien tekanan semakin tinggi nilai J_G dan J_L maka nilai gradien tekanan akan semakin naik.

Kata kunci: Dua fase, pipa kecil, butanol, kecepatan superfisial, pola aliran, peta pola aliran, fraksi hampa, gradien tekanan.

Abstrak

A two-phase flow is part of a multiphase flow which only involves two forms of a substance in a stream. In general, two-phase flow is often found in oil and gas piping systems, nuclear reactors, geothermal, cooling electronic devices. The purpose of this study was to obtain primary data on an experimental study of the characteristics of a two-phase flow of air-water + 7% butanol in a small pipe with a slanted position of 40°. Primary data taken are: Video flow patterns and pressure gradients. This research was conducted using a test section in the form of a small pipe with a diameter of 1.6 mm in length with 130 mm in length and a slope of 40 ° to the horizontal position. The working fluid is air-water distilled water with 7% butanol mixture. By varying the superficial velocity values of gas and water in the range $JG = 0.025 - 66.3 \text{ m / s}$ and $JL = 0.033 - 4.935 \text{ m / s}$. In this study using a visualization method with the MOV to AVI program and then processed with virtual dub for flow patterns, digital image processing with the MATLAB R2014a program for vacuum fractions and for pressure gradients using the MPX System fluid pressure sensor connected to the computer. In this study the flow patterns obtained are: bubble, plug, annular, annular and churn slug. Flow patterns that are formed are then justified and mapped based on variations in superficial velocity, flow pattern maps are also compared with the results of previous studies. The value of the vacuum fraction is influenced by the varied JG and JL and the flow patterns that occur. As for the pressure gradient results show that the gas superficial velocity (JG) and liquid superficial velocity (JL) greatly affect the pressure gradient value the higher the JG and JL values, the pressure gradient value will increase.

Keywords: Two phases, small pipe, butanol, superficial velocity, flow pattern, flow pattern map, vacuum fraction, pressure gradient.

1. 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*) adalah fenomena paling sederhana dari aliran multi fase. Aliran dua fase banyak dijumpai baik dalam kehidupan sehari-hari maupun dalam proses-proses industri.

Studi tentang aliran dua fase dapat kita bedakan menjadi beberapa bagian, menurut kombinasi antar fasenya yaitu, (gas-cair, cair-padat, dan padat-gas), menurut arah aliran yaitu, (searah keatas, searah kebawah, dan berlawanan arah), dan menurut kedudukan saluran yaitu, (mendatar, tegak, dan miring). Aliran dua fase dapat terjadi pada saluran atau pipa berukuran besar (*large pipe*), normal (*normal pipe*), mini (*mini pipe*) dan mikro (*micro pipe*).

Dalam penelitian karakteristik aliran dua fase pada pipa kecil sangat tergantung pada tegangan permukaan dan viskositas karena ukuran pipa yang semakin kecil cairan akan memiliki kecenderungan untuk naik dan membasahi permukaan dalam pipa karena adanya gaya-gaya kapiler yang bekerja. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya pola aliran *intermittent* pada pipa yang kecil, sedangkan pada pipa dengan diameter yang lebih besar akan terjadi pola aliran terpisah (*stratified*).

Dalam penelitian untuk mengetahui pola aliran dan fraksi hampa maka dilakukan analisis aliran dengan metode visualisasi dengan fotografi terhadap pola aliran yang terbentuk. Metode ini memberikan analisis gambar secara mendalam dengan beberapa tahapan *image processing* untuk mendapatkan data yang diinginkan. Salah satu keunggulan dari metode ini memungkinkan untuk menganalisis hasil visual dengan tingkat akurasi yang baik tanpa merusak atau mengganggu aliran. Sementara itu, gradien tekanan diperoleh dengan mengolah data yang didapatkan dari pengendali mikro *single-board* yaitu *Pressure Transducer MPX System*. Metode ini mampu memberikan data yang sangat banyak dalam kurun waktu yang singkat dan akurat.

Penelitian tentang aliran dua fase pada saluran pipa mini baru diteliti oleh sedikit peneliti, dan berdasarkan pemahaman keilmuan yang penulis miliki, masih ada kebelum seragaman hasil investigasi yang dipublikasikan. Dari beberapa penelitian tentang aliran dua fase pada pipa mini yang telah dilakukan Penelitian mengenai karakteristik aliran dua fase pada saluran kecil telah diteliti oleh beberapa peneliti sebelumnya antara lain Triplett dkk.(1999), Kawahara dkk. (2002), Krishnamurthy dan Peles (2009), Sur dan Liu (2011), He dkk. (2011) dan Sudarja dkk. (2019). Terdapat beberapa hasil yang menarik di mana pola aliran dua fase pada pipa kecil berbeda dengan pola aliran dua fase pada pipa konvensional. penelitian penelitian tersebut menghasilkan berbagai macam hasil. Visualisasi dari pola aliran yang terbentuk serta penggambaran peta pola aliran menjadi penting untuk menunjukkan karakteristik-karakteristik yang ada pada aliran dua fase tersebut.

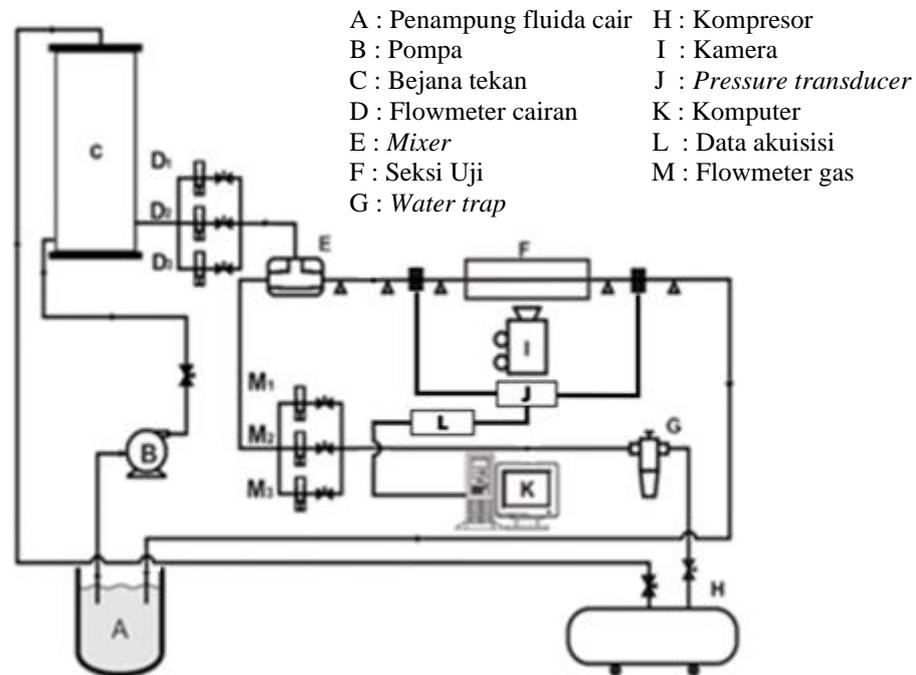
Jika pada penelitian terdahulu fluida cair yang digunakan adalah air yang memiliki tegangan permukaan yang tinggi dan posisi saluran horizontal maka pada penelitian ini menggunakan campuran air dan butanol 7% yang memiliki nilai tegangan permukaan yang lebih rendah selain itu sudut kemiringan dibuat 30°. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efek penurunan nilai tegangan permukaan dan sudut kemiringan untuk mendapatkan informasi mengenai karakteristik aliran dua fase pada pipa saluran kecil.

2. Metode Penelitian

Bahan penelitian berupa fluida gas dan cair. Fluida gas yang digunakan adalah udara yang memiliki kelembaban rendah yang didapat dari kompresor yang telah dilengkapi dengan *water trap*, sedangkan untuk fluida cair yang digunakan adalah campuran air dan butanol 7% yang dialirkan ke dalam bejana bertekanan dengan bantuan pompa. Penelitian ini dilakukan pada kecepatan superfisial gas (J_G) = 0,025 - 66,3 m/s dan kecepatan superfisial cairan (J_L) = 0,033 - 4,935 m/s.

Penelitian dilakukan pada suatu Instalasi peralatan yang ditunjukkan pada gambar 1. Instalasi peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa komponen utama: tangki air, pompa air, kompresor udara, bejana bertekanan, *mixer*, *test section*, konektor dan separator. Peralatan yang mendukung dalam penelitian ini antara

lain: kamera, amplifier, komputer, *optical correction box*, *acquisition system*, dan *video processing system*. Alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini antara lain : Mpx, data akuisisi, *temperature indicator*, *pressure indicator*, *flowmeter* udara, *flowmeter* air. dan *thermocouple*.



Gambar 1. Skema alat penelitian

2.1. Pola aliran

Untuk pengolahan data pola aliran diperoleh dari pengujian berupa video yang didapat dari kamera berkecepatan tinggi. Dari hasil video yang berhasil terekam pada kamera kemudian hasil video diamati sehingga dapat ditentukan jenis pola alirannya. Kemudian pola aliran yang berhasil diamati didistribusikan ke dalam peta pola aliran sesuai dengan nilai kecepatan superfisialnya.

2.2. Fraksi hampa

Pengolahan fraksi hampa didapatkan dari video yang telah direkam dengan menggunakan kamera dengan kecepatan 1200 fps dipindah ke komputer. Masing-masing video tersebut kemudian diberi garis hitam pada sisi kanan dan sisi kiri menggunakan *software* AVS video editor untuk memudahkan MATLAB dalam membaca nilai fraksi hampa. Setelah semua video diberi garis hitam di sisi kanan dan sisi kiri, video tersebut dipecah menjadi gambar-gambar menggunakan *software* Virtual Dub. Gambar-gambar tersebut kemudian diolah menggunakan *software* MATLAB.

2.3. Gradien tekanan

Untuk mengukur *pressure drop*, digunakan sensor beda tekanan berupa *pressure transducer* dari *MPX sytem* yang dihubungkan dengan sisi masuk dan sisi keluar seksi uji. Data yang didapatkan dari sensor tersebut masih berupa data analog. Untuk mengubah data analog menjadi data digital digunakan akuisisi data dari *arduino UNO*. Sebelum digunakan sensor beda tekanan dikalibrasi terlebih dahulu menggunakan manometer vertikal pada kondisi statis. Kemudian dari *arduino UNO* ke perangkat komputer agar data bisa diolah dan direkam kedalam perangkat komputer melalui *software* yang sudah terinstal.

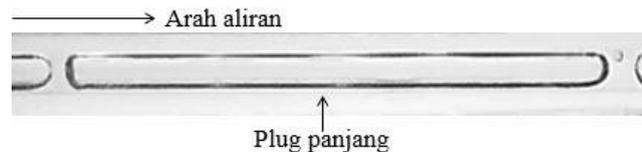
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pola Aliran

Dari hasil indentifikasi yang diperoleh dari video terdapat lima macam pola aliran yang terdeteksi yaitu : *plug*, *bubble*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*. Dengan mengatur kecepatan superfisial gas (J_G) dan kecepatan superfisial liquid (J_L).

3.1.1 Pola Aliran Plug

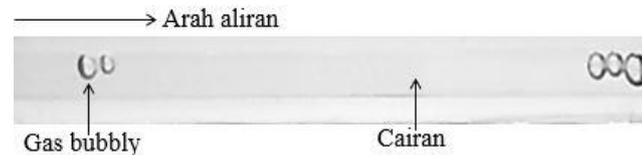
Pola aliran *plug* terbentuk saat kecepatan superfisial gas dinaikan sedangkan kecepatan superfisial cair pada aliran *plug* cenderung rendah dibandingkan dengan aliran *bubble*. Pola aliran *plug* mulai terbentuk pada kecepatan (J_G) = 0,025 m/s sedangkan kecepatan (J_L) = 0,033 m/s, Pola aliran *plug* bergerak dengan kecepatan konsisten dengan kondisi tertentu.



Gambar 2. Pola aliran *plug* pada $J_G = 0,207$ m/s, $J_L = 0,091$ m/s

3.1.2 Pola Aliran Bubbly

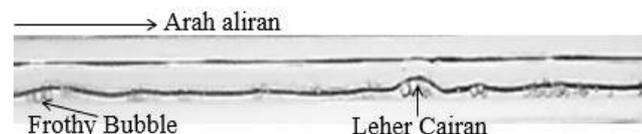
Terbentuknya pola aliran *bubbly* ketika nilai kecepatan superfisial udara lebih rendah dari kecepatan superfisial cairan. Dengan debit air yang lebih besar daripada debit gas menyebabkan cairan di area mixer menumpuk, oleh sebab itu aliran *bubble* muncul ketika gas yang terkumpul dibagian atas dari *mixer* menerobos cairan yang terkumpul. Semakin kecilnya saluran pada *mixer* mengakibatkan udara yang terkumpul terus mendorong cairan sehingga menyebabkan terjadinya aliran dua fase, kemudian aliran udara yang berhasil keluar seperti terpotong-potong.



Gambar 3. Pola aliran *bubbly* pada $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s

3.1.3 Pola Aliran Slug-annular

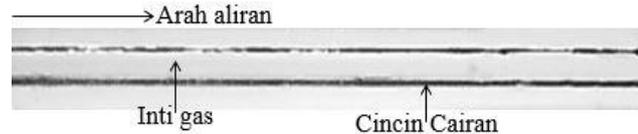
Pola ini terjadi pada saat aliran udara sudah *continue* dan sementara aliran air bagian bawah maupun atas saluran pipa membentuk gelombang. Lapisan air yang ada pada bagian atas saluran pipa biasanya cenderung lebih tipis dari bagian bawah, terbentuknya pola aliran *slug annular* akibat adanya kenaikan pada kecepatan superfisial gas (J_G). sehingga yang tadinya pola aliran *plug* yang terpotong oleh air kini berhasil ditembus oleh aliran udara, karena tegangan permukaan tak mampu mempertahankan bentuknya dan terbentuklah pola aliran *slug annular*.



Gambar 4. Pola aliran *slug-annular* pada $J_G = 3$ m/s, $J_L = 0,091$ m/s

3.1.4 Pola Aliran Annular

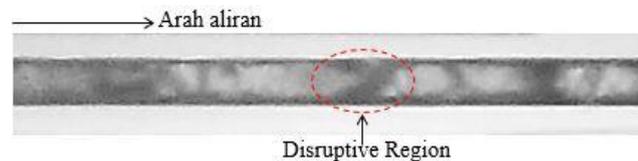
Pola aliran *annular* seperti pola aliran *slug annular* yang memiliki gelombang kecil yang lebih banyak yang terdapat pada bagian atas dan bawah *liquid film*. Aliran *annular* terlihat seperti aliran yang tenang, padahal jika diamati dengan lebih jelas aliran *annular* memiliki gelombang kecil dibagian atas dan bawah yang bergerak cepat.



Gambar 5. Pola aliran *annular* pada $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,091$ m/s

3.1.5 Pola Aliran Churn

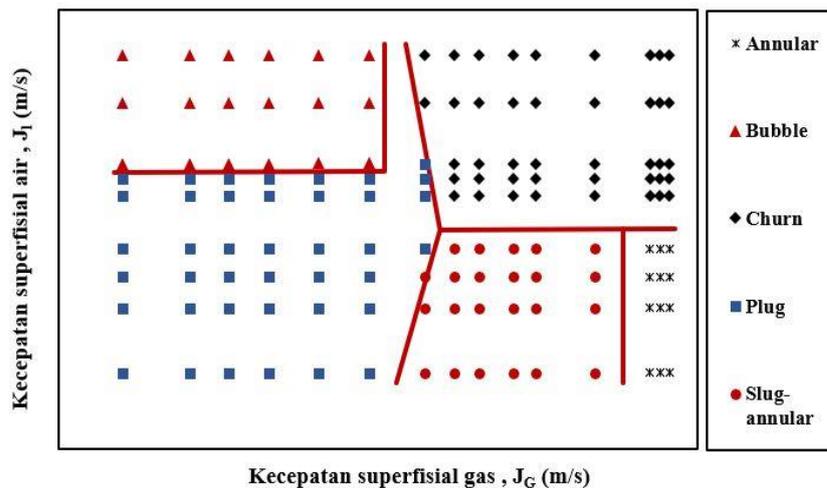
Pola aliran *churn* dapat terjadi dari transisi aliran *plug*, *slug annular*, dan *annular* aliran *churn* terjadi ketika kecepatan superfisial cairan (J_L) dan kecepatan superfisial gas (J_G) sama-sama tinggi. ketika nilai (J_L) tinggi seharusnya pola yang terbentuk adalah pola aliran *plug* tapi karena nilai (J_G) juga tinggi maka cairan terdispersi menjadi ukuran yang sangat kecil dengan kecepatan sangat tinggi sehingga pola yang teramati hanya terlihat bayangan hitam bergerak sangat cepat pada aliran inti gas dan disertai fluida cair. Pada aliran *churn* yang bertransisi dengan aliran *slug annular* masih tersisa gelembung yang mengganggu aliran udara, sedangkan untuk pola aliran *churn* yang bertransisi dengan pola aliran *annular* cairan akan cenderung mendatar tanpa ada gelombang.



Gambar 6. Pola aliran *churn* pada $J_G = 22,6$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s

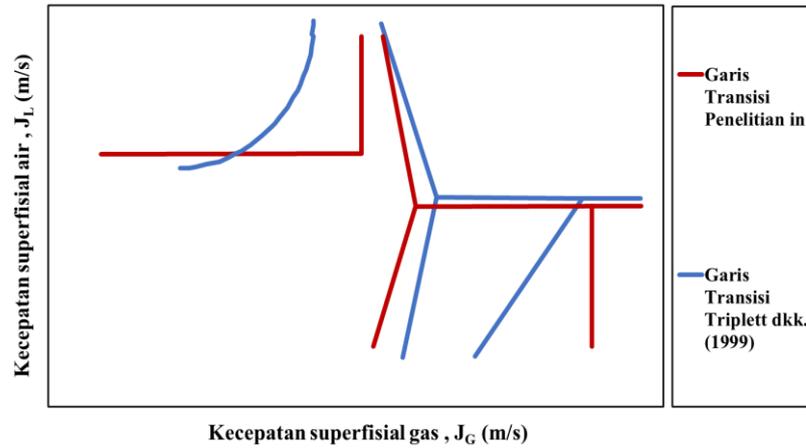
3.1.6 Peta Pola Aliran

Pola aliran yang telah dijustifikasi kemudian dipetakan berdasarkan variasi kecepatan superfisialnya. Pada peta pola aliran tersebut jarak titik menunjukkan kecepatan superfisial fluida gas (J_G) dengan nilai minimum 0,01 dan nilai maksimumnya 100, sedangkan titik kordinat kecepatan superfisial fluida cair (J_L) dengan nilai minimum 0,01 dan nilai maksimumnya 10. nilai pada kedua sumbu tersebut dinyatakan secara logaritmik. Pada peta pola aliran yang telah didapatkan terdapat pula garis transisi antar pola yang dimana garis transisi ini menunjukkan titik kordinat aliran manakah yang berubah antar pola aliran satu dengan pola alirannya.



Gambar 7. Peta pola aliran

3.1.7 Perbandingan Peta Pola Aliran dengan Penelitian Terdahulu



Gambar 8. Perbandingan peta pola aliran dengan penelitian terdahulu

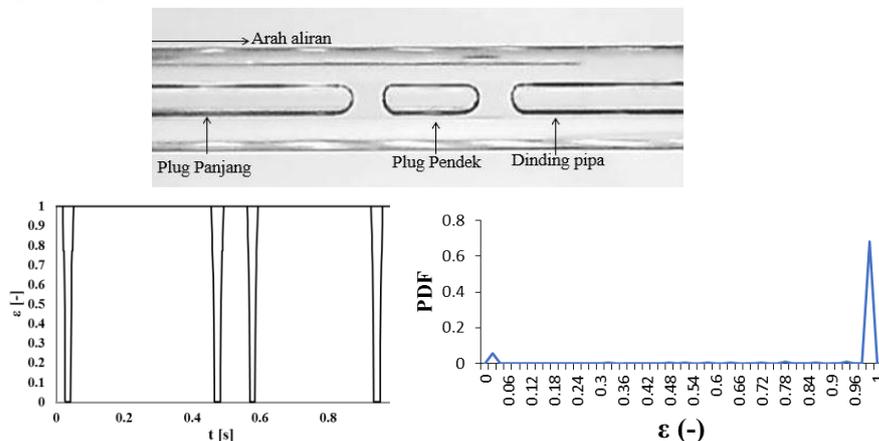
Pada gambar 8 garis transisi penelitian ini dengan penelitian triplet dkk. (1999) dapat dibedakan pada garis transisi pola aliran *bubbly* dimana pada penelitian triplet dkk. (1999a) pola aliran *bubbly* lebih sedikit dari penelitian ini. Pola aliran yang terbentuk pada penelitian ini sama dengan penelitian Triplet dkk (1999) yaitu: *annular*, *bubbly*, *churn*, *plug* dan *slug annular*. Pada penelitian ini menggunakan saluran pipa mini dengan diameter dalam pipa 1,6 mm dengan menggunakan fluida kerja yaitu air-udara dan campuran butanol 7% dengan variasi sudut kemiringan pipa 30°. Sedangkan penelitian Triplet dkk. (1999a) saluran yang digunakan semi segitiga dengan diameter dalam pipa 1,09 mm dengan fluida kerja yang digunakan yaitu air-udara. Pergeseran yang terjadi akibat pengaruh fluida kerja yang digunakan karena pada penelitian ini menggunakan campuran butanol 7%.

3.2 Fraksi Hampa

Hasil penelitian pada pipa mini dengan kemiringan 40° menghasilkan beberapa jenis pola aliran yang mengandung campuran butanol 7%. Dari penelitian tentang pola aliran, aliran yang terdeteksi pada kenaikan persentase butanol adalah *bubbly*, *plug*, *slug annular*, *annular*, dan *churn*. Analisa fraksi hampa dilakukan pada posisi 26 piksel (6,879 mm) dari sebelah kiri (sisi inlet). Hasil *time-average* fraksi hampa kemudian diolah untuk menentukan nilai *Probability Distribution Function* (PDF) sebagai fungsi ε [-] (nilai fraksi hampa).

3.2.1 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran *Plug*

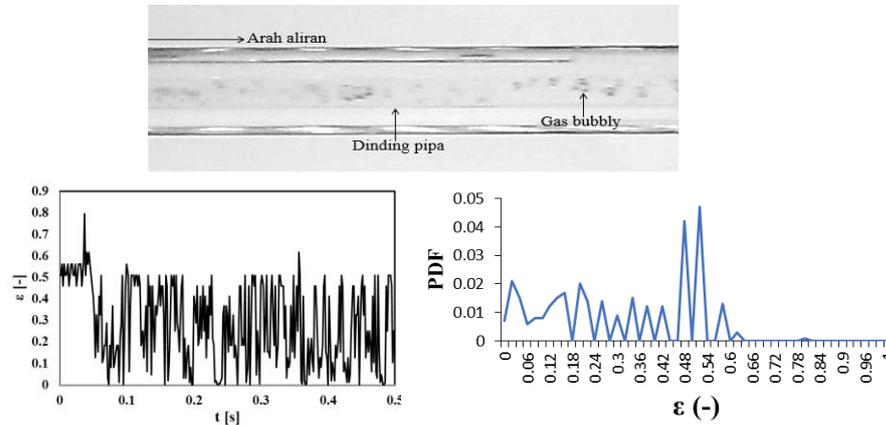
Pola aliran *plug* biasanya ditandai dengan adanya gelembung-gelembung udara yang menutupi seluruh dinding pipa dengan panjang pola aliran yang bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa diameter *plug* sama dengan diameter pipa mini. *Plug* adalah pola aliran yang berdasarkan bentuknya dikategorikan sebagai aliran *bubble* yang memanjang (*elongated bubble*).



Gambar 9. Pola aliran *plug*, time average, dan PDF pada $J_G = 0,207$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s

3.2.2 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran *Bubbly*

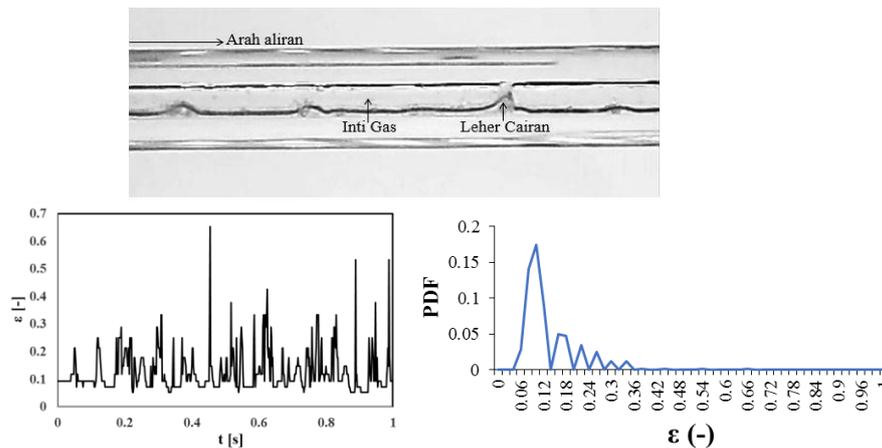
Pada pola aliran *bubbly* yang terjadi biasanya diawali dengan munculnya gelembung-gelembung udara yang berbentuk bulatan kecil yang mengambang di antara batas dinding pipa. Pola aliran ini terbentuk saat kecepatan superfisial gas (J_G) rendah dan kecepatan superfisial cairan (J_L) tinggi.



Gambar 10. Pola aliran *bubbly*, time average dan PDF pada $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s

3.2.3 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran *Slug Annular*

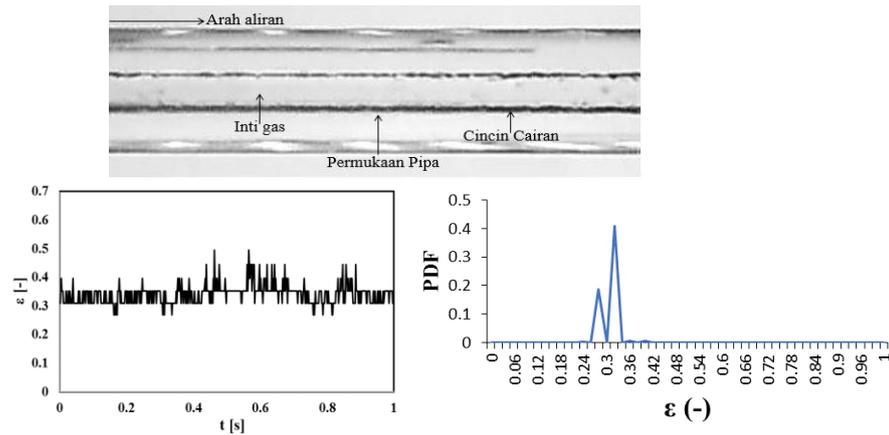
Pola aliran *slug-annular* adalah pola transisi antara pola *plug* menjadi pola *annular*. Pola aliran ini memiliki struktur dimana fase cairan terdistribusi secara simetris pada dinding pipa, namun pada titik tertentu lebih terdapat lapisan film cairan yang lebih tebal dibanding titik lainnya. Hal tersebut disebabkan karena udara pada saat J_G mengalami kenaikan maka udara akan berusaha untuk menembus jembatan cairan yang memisahkan antara udara pada aliran *plug* sehingga munculnya lapisan film cairan yang terjadi akan lebih tebal.



Gambar 11. Pola aliran *slug annular*, time average, dan PDF pada $J_G = 4,238$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

3.2.4 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran *Annular*

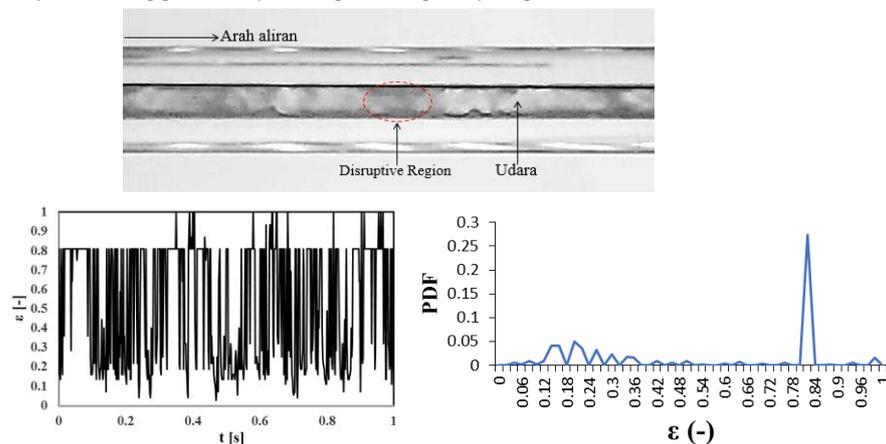
Pola aliran *annular* adalah pola aliran dimana kecepatan superfisial gas (J_G) yang tinggi dan kecepatan superfisial cairan (J_L) yang rendah mengakibatkan udara menembus bagian dari tengah lapisan film cairan sehingga mendorong lapisan film cairan terdistribusi secara merata dan simetris pada bagian dinding pipa. Hal ini disebabkan oleh fase gas melewati tengah-tengah fase cair. Pola *annular* bisa juga disebut sebagai kelanjutan dari pola aliran *slug-annular*.



Gambar 12. Pola aliran *annular*, time average, dan PDF pada $J_G = 58,05$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

3.2.5 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran *Churn*

Pola aliran *churn* terbentuk ketika kecepatan superfisial gas (J_G) dan kecepatan superfisial cairan (J_L) yang sama-sama cukup tinggi dimana selisih keduanya cukup besar. Pola aliran ini termasuk kedalam bentuk jenis pola aliran yang sangat tidak stabil pada sisi ekornya, sehingga terdapat bagian bagian yang terdistorsi.

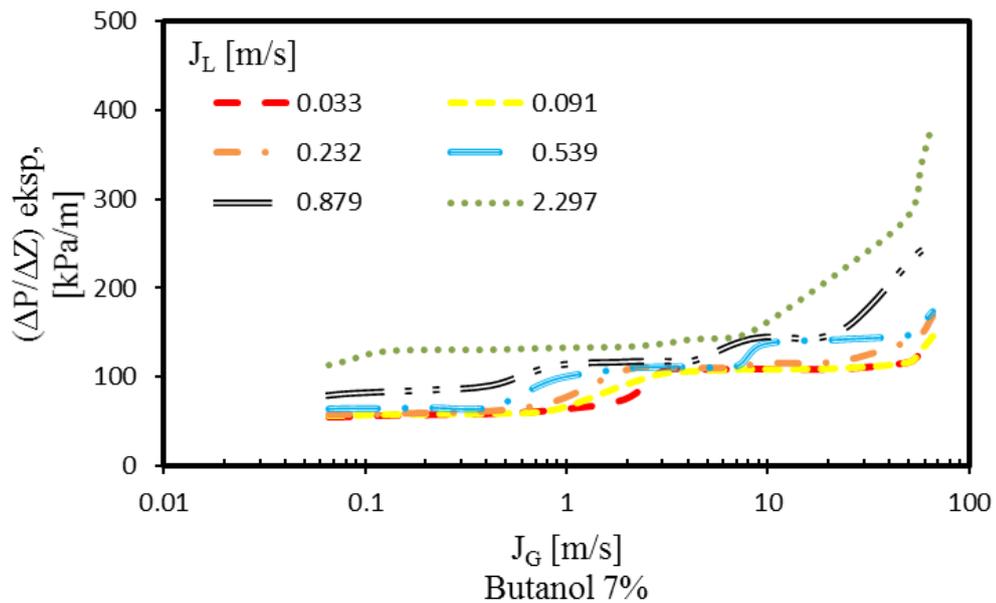


Gambar 13. Pola aliran *churn*, time average, dan PDF pada $J_G = 22,6$ m/s, $J_L = 0,539$ m/s

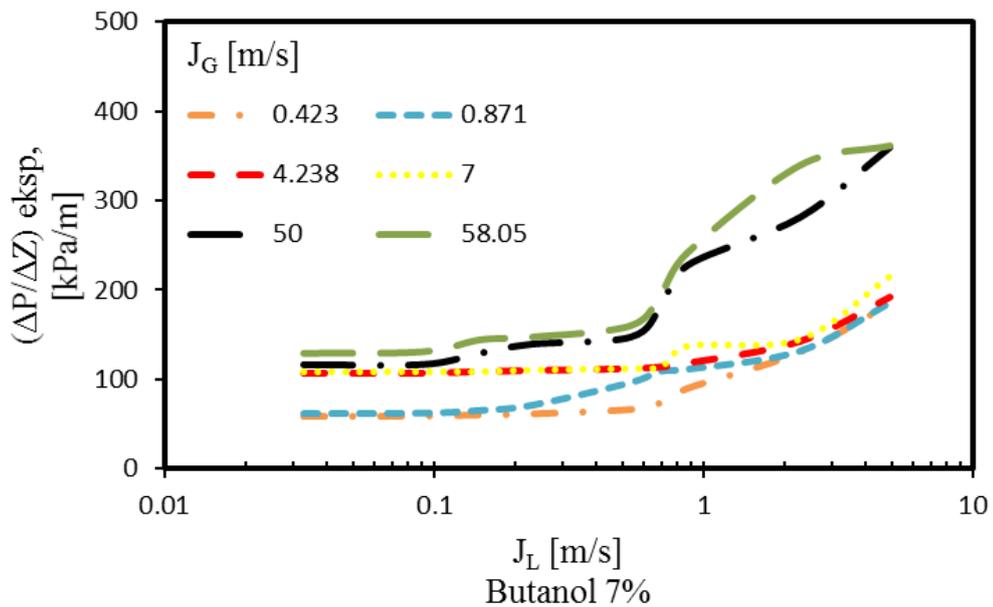
3.3 Gradien tekanan

Pada penelitian ini kecepatan superfisial gas (J_G) dan kecepatan superfisial liquid (J_L) dibuat bervariasi untuk mengetahui pengaruh yang terjadi akibat kenaikan maupun penurunan kecepatan superfisial terhadap gradien tekanan. Penelitian ini dilakukan untuk melihat pengaruh dari perubahan kecepatan superfisial terhadap nilai gradien tekanan.

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 15 dan 16 jika kecepatan superfisial gas (J_G) mengalami peningkatan maka nilai dari gradien tekanan juga akan meningkat dan jika kecepatan superfisial liquid (J_L) mengalami peningkatan maka nilai gradien tekanan juga akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena kenaikan J_G dan J_L akan menaikkan superfisial total dari aliran fluida (*total volumetric flux*) yang berpengaruh pada kenaikan gradien tekanan secara signifikan.



Gambar 14. Pengaruh J_L terhadap gradien tekanan dengan variasi J_G ,



Gambar 15. Pengaruh J_G terhadap gradien tekanan dengan variasi J_L ,

4. Kesimpulan.

Berdasarkan dari hasil penelitian dan pengolahan data didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Pola aliran yang yang diamati pada penelitian di pipa kecil diameter dalam 1,6 mm dan panjang seksi uji 130 mm dengan kemiringan 40° dengan konsentrasi butanol 7% terhadap posisi horizontal dengan nilai superfisial fluida cairan = 0,033 – 4,935 m/s dan superfisial fluida gas = 0,025 – 66,3 m/s yaitu: pola aliran *bubbly*, pola aliran *plug*, pola aliran *slug annular*, pola aliran *annular* dan pola aliran *churn*.
2. Perbandingan peta pola aliran dari penelitian ini dan yang dilakukan oleh beberapa orang studi sebelumnya menunjukkan bahwa semua peta hanya setuju dengan itu Triplett dkk. (1999a) termasuk pola aliran yang diamati.
3. Semakin tinggi kecepatan superfisial gas maka nilai fraksi hampa yang diperoleh akan semakin meningkat, sebaliknya semakin tinggi kecepatan superfisial liquid maka nilai fraksi hampa yang diperoleh akan semakin menurun.
4. Kecepatan superfisial gas (J_G) dan kecepatan superfisial cair (J_L) sangat mempengaruhi nilai gradien tekanan yang didapatkan dari hasil penelitian, semakin tinggi nilai J_G dan J_L maka nilai gradien tekanan akan semakin naik. Nilai tegangan permukaan, viskositas cairan dan sudut kemiringan sangat mempengaruhi terhadap nilai gradien tekanan.

Daftar Pustaka

Journal:

- [1] Chung, P. M. Y., & Kawaji, M. (2004). The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, 30(7-8 SPEC. ISS.), 735–761.
- [2] Fukano, T., & Kariyasaki, A. (1993). Characteristics of gas -liquid two-phase flow in a capillary tube. *Nuclear Engineering and Design* 141 59-68.
- [3] He, K., Wang, S., & Huang, J. (2011). The effect of surface tension on phase distribution of two-phase flow in a micro-T-junction. *Chemical Engineering Science*, 66(17), 3962–3968.
- [4] Kawahara, A., Chung, P. Y., & Kawaji, M. (2002). Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel. *International Journal of Multiphase Flow*, 28(9), 1411–1435.
- [5] Krishnamurthy, S., & Peles, Y. (2009). Surface tension effects on adiabatic gas-liquid flow across micro pillars. *International Journal of Multiphase Flow*, 35(1), 55–65.
- [6] Setyawan, A., Indarto, & Deendarlianto. (2016). The effect of the fluid properties on the wave velocity and wave frequency of gas-liquid annular two-phase flow in a horizontal pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 71, 25–41.
- [7] Sudarja, Haq, A., Deendarlianto, Indarto, & Widyaparaga, A. (2019). Experimental study on the flow pattern and pressure gradient of air-water two-phase flow in a horizontal circular mini-channel. *Journal of Hydrodynamics*, 31(1), 102–116.
- [8] Sur, A., & Liu, D. (2012). International Journal of Thermal Sciences Adiabatic air e water two-phase flow in circular microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*, 53, 18–34.
- [9] 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 patterns. *International Journal of Multiphase Flow*, 25(3), 377–394.
- [10] Zhao, T. S., & Bi, Q. C. (2001). Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, 27(5), 765–782.