

INVESTIGASI FRAKSI HAMPA DUA FASE UDARA - AIR DAN GLISERIN (0% - 30%) PADA PIPA KAPILER DENGAN KEMIRINGAN 30° TERHADAP POSISI HORIZONTAL

Yudia Rahman¹, Sukamta², Sudarja³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
 Jl. Lingkar Barat, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta 55183

¹yudiarahman@yahoo.co.id, ²msukamta@gmail.com, ³sudarja@gmail.com,

ABSTRACT

Two phase flow has been used in so many industrial processes, such as boilers, reactors, heat exchanges, geothermal and others, some parameters that need to be studied include flow patterns, hollow fractions and pressure changes. research on hollow fractions aims to determine the composition of the gas and liquid phases that occur. the phase composition that occurs in the two-phase flow will effect the nature and value of the flow property, knowing the property value of each phase that occurs can be known so that it can facilitate further analysis. The purpose of this study is to find out the characteristics of the hollow fraction of various patterns that appear, to determine the characteristics of the speed, length and frequency of bubbly and plug.

This research was carried out in 4 stages (on the basis of working fluid), namely: air-water, air-water + 0% glycerin, air + water 10% glycerin, air-water + 20% glycerin, and air-water + 30% glycerin, research conducted to determine the empty fraction one of them by using the method of digital image processing by using the MATLAB R2014a software

The results of the study it was found that the flow patterns that emerged in this study were bubbly, plug, annular, slug-annular and churn flows. the results of the study show that the hollow fraction value is determined by the superficial velocity of the liquid and air velocity. the greater the superficial velocity of air, the lower the fraction value will decrease. the value of the hollow fraction of the bubbly flow pattern will increase significantly over a period of time caused by the emergence of plugs. in the flow pattern the hollow fraction plug will reach 1 at a certain time range. this is because the plug meets the test section section of the channel. the bubbly and plug flow patterns are greatly influenced by the viscosity of the fluid. This is because the higher the viscosity of the fluid, the faster the speed of the bubbly and plug flow patterns, the lower the viscosity, the faster the speed of the bubbly and plug flow patterns. the length of the bubbly pattern and the plug are influenced by the higher homogeneous value, the length of the pattern increases. on the frequency of bubbly and plug appearances, the frequency is quite high, which results in an increase in the value of the empty fraction.

Keywords : multiphase, void fraction, flow pattern, viscosity, digital image processing

1. PENDAHULUAN

Banyak industri yang melakukan produksi dengan menggunakan proses perubahan fase, pemisahan fase maupun penggabungan fase. Fase merupakan wujud dari suatu zat, yang dapat berupa padat, cair, atau gas. Fase juga dibedakan menjadi *singlephase* dan *multiphase*. Aliran *singlephase* merupakan aliran yang hanya terdiri dari 1 fase saja. Aliran *multiphase* adalah aliran simultan dari beberapa fase dari sebuah zat. Aliran dua fase (*two-phase low*) merupakan sebuah contoh aliran multifase yang hanya melibatkan dua macam wujud dari suatu zat dalam sebuah aliran.

Studi mengenai aliran dua-fase mengalami perkembangan pesat dengan adanya banyak penelitian mengenai aliran dua fase yang bermacam – macam, studi aliran dua fase dapat dikelompokkan menurut kombinasi antara fasenya, aliran dua-fase dapat dibedakan menjadi aliran (gas-cair, cair-padat, dan padat-gas), menurut arah alirannya (searah keatas, searah kebawah, dan berlawanan arah), menurut kedudukan saluran (mendatar, vertikal, dan miring). Semua aliran tersebut dapat terjadi pada pipa berukuran normal (*normal pipe*), besar (*large pipe*),

mikro (*micro pipe*), dan mini (*mini pipe*). Sehingga studi tentang aliran dua-fase sangat luas dan beragam.

Penelitian dan pemanfaatan tentang aliran dua fase pada pipa mini telah diterapkan pada bidang industri dan bidang kedokteran. Beberapa contoh aplikasi aliran dua fase pada pipa mini adalah *micro heat exchanger*, *micro cooling electronic*, dan *micro-electro-mechanical system (MEMS)*, sedangkan pada dunia kedokteran beberapa contoh aplikasinya adalah pola aliran yang terdapat pada tubuh manusia, contohnya adalah pembuluh darah.

Fraksi hampa merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengetahui karakter dari aliran dua fase. Dengan menentukan fraksi hampa kita dapat menentukan beberapa karakter aliran yaitu kecepatan relatif, menentukan prediksi perubahan transisi pola aliran, perpindahan panas dan menjadi dasar dalam perhitungan penurunan tekan dan lain-lain. Pentingnya penelitian untuk menentukan fraksi hampa pada pipa mini serta untuk mendapatkan pengetahuan yang lebih mendalam dan memvalidasi percobaan sebelumnya dengan metode berbeda, menjadi salah satu faktor pentingnya melakukan penelitian ini. Manfaat penelitian ini bertujuan untuk beberapa karakter aliran yaitu kecepatan dan frekuensi pada pola aliran, menentukan prediksi perubahan transisi pola aliran, perpindahan panas dan menjadi dasar perhitungan penurunan tekan yang digunakan untuk penelitian selanjutnya.

Fukano dan Kariyasaki, (1993) melakukan pengukuran fraksi hampa menggunakan metode arus konstan dengan kalibrasi menggunakan model *small bubblys* dan *large gas bubblys*. Analisa mengenai fraksi hampa dilakukan dengan mengetahui nilai dari *film thickness* cairan yang melingkari dan mengelilingi *bubbly*. Hubungan antara *film thickness* dengan kecepatan superfisial gas (J_G) pada aliran horizontal pipa berukuran 1 mm, 2,4 mm, 4,9 mm dan 9 mm. Fukano dan Kariyasaki, (1993) menyatakan bahwa nilai *film thickness* pada pipa berdiameter tersebut memiliki nilai *film thickness* semakin besar dengan kenaikan (J_G). Sebaliknya, pada pipa dengan diameter 9 mm nilai *film thickness* semakin turun dengan kenaikan (J_G). Selain itu, data yang didapat pada pola aliran *intermittent* dapat dihungkan secara baik dengan data yang didapat pada pola aliran *annular*.

Ali dkk, (1993) melakukan pengukuran tentang fraksi hampa dengan cara pengukuran konduktivitas listrik pada sebuah aliran. Dengan dua pasang elektroda dipasang pada saluran masuk dan keluar pada plat sejajar dengan gap antara 0,778 mm – 1,465 mm. Fraksi hampa diukur dengan membandingkan rasio antara konduktivitas listrik aliran dua-fase gas-cair dengan konduktivitas listrik aliran satu-fase cair. Hasil dari data tersebut kemudian akan dikonversikan ke bentuk fraksi hampa.

Triplet dkk (1999) membandingkan data fraksi hampa mereka yang deistimasi dari foto yang diambil dari seksi uji sirkular, dengan prediksi dari beberapa korelasi. Dengan pengecualian aliran *annular* dimana semua korelasi yang diujikan melebihi data, model homogen menghasilkan kesesuaian terbaik dengan hasil eksperimen.

Kawahara dkk (2002) mengukur fraksi hampa pada pipa dengan diameter 100 μm . pada saat fluida cair mengalir dengan *flow rate* yang rendah, gambar yang terekam didominasi aliran tanpa udara ($\epsilon=0$), dan inti gas mengalir dengan film cairan halus. Sedangkan pada saat rata-rata aliran tinggi, terdapat tiga jenis aliran yang terekam yaitu aliran tunggal ($\epsilon=0$), inti gas mengalir dengan cair halus ($\epsilon=1$), dan inti gas yang mengalir dengan film cairan tebal ($0 < \epsilon < 1$). Berikut adalah grafik fraksi hampa yang dihasilkan dari penelitian Kawahara dkk (2002).

Chung dan Kawaji, (2004) melakukan pengukuran tentang fraksi hampa rata-rata waktu pada saluran sirkular berdiameter $D = 50, 100, 250, \text{ dan } 530 \mu\text{m}$ serta 96 μm saluran persegi menggunakan analisis gambar. Model aliran homogen mempunyai kesesuaian yang baik dengan data untuk $D = 530 \mu\text{m}$. Data untuk $D = 250 \mu\text{m}$ sedikit berbeda dari model aliran homogen, tetapi bersesuaian secara baik dengan korelasi yang disusulkan lebih dulu oleh Ali dkk, (1993) untuk aliran dua-fase dalam saluran persegi sempit dengan $D_h \sim 1 \text{ mm}$: $\alpha = 0,8$ β dengan $\beta = J_G/J_L$ adalah kualitas volumetrik. Data dari Chung dan Kawaji, (2004) untuk saluran persegi 96 μm dan 50 serta 100 μm menunjukkan kecenderungan berbeda sama sekali dari korelasi-korelasi tersebut, akan tetapi menunjukkan hubungan yang tidak linier antara α dan β .

Sadatomi dkk, (2010) melakukan penelitian aliran dua fase gas – cairan pada pipa horizontal berdiameter 3,5, dan 9 mm menggunakan empat macam cairan, yaitu : *tap water*, larutan *poly-oxy-ethylene lauryl*, larutan *nonionic-polymer-fluorinate FC4430*, dan *purehydrofluoroether 7200*, semetara fluida gasnya adalah udara pada kondisi atmosfer. Mereka melaporkan : properti cairan

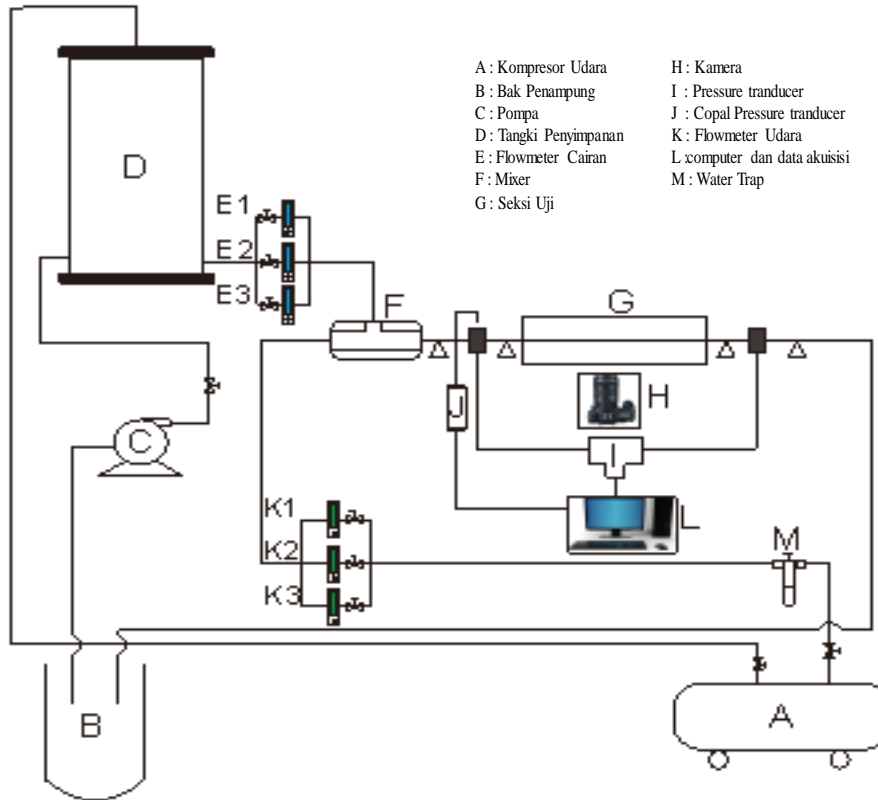
sangat berpengaruh terhadap transisi pola aliran, terutama transisi aliran bubbly ke aliran slug; properti cairan tidak berpengaruh banyak pada *frictional pressure drop*, tetapi berpengaruh signifikan pada *interfacial friction force* dan fraksi hampa, terutama pada aliran *bubbly* dan *slug* untuk $j_L=2\text{m/s}$.

Aqli Haq dkk (2015) mengukur fraksi hampa rata-rata pada saluran berdiameter dalam 1,6 mm dengan menggunakan analisis gambar dengan bantuan *software* MATLAB. Hasil pengukuran fraksi hampa dibandingkan dengan model homogen yaitu $\alpha = J_G(J_G+J_L)$, persamaan Ali dkk (1993), persamaan Kawahara dkk (2002) dimana $\beta = (0,03\alpha^{0.5})/(1-0,97\alpha^{0.5})$. Melaporkan aliran *slug* dan *bubbly* berada di atas garis korelasi terhadap model homogen, sedangkan untuk aliran *churn*, *slug-annular*, *annular*. Letak fraksi hampa untuk aliran *slug* dan *bubbly* yang berada di atas garis homogen menandakan *slip ratio* yang terjadi bernilai lebih dari 1. Besarnya *slip ratio* tersebut dikarenakan kecepatan aktual dari udara jauh lebih besar dari pada kecepatan aktual air. Sedangkan nilai fraksi hampa aliran *churn*, *slug-annular*, *annular*, berada dibawah garis korelasi penelitian Sairon dan Wongwises (2009) dimana mereka menggunakan pipa berukuran 0,15 mm dan meneliti hanya untuk aliran *throat-annular*, *serpentine-like gas core*, dimana hasil fraksi hampa yang didapatkan mendekati garis korelasi Kawahara (2002).

Sudarja, (2015) melakukan penelitian tentang fraksi hampa, salah satu hasilnya, melaporkan secara umum kenaikan J_G memberikan pengaruh fraksi hampa, kecuali pada J_G yang sangat rendah, karena pada J_G tersebut pola aliran yang terbentuk adalah *bubbly* dan *plug*. dari grafik fraksi hampa homogen (β) vs fraksi hampa terukur (ϵ atau α), untuk harga *bubbly*, semua harga ϵ lebih tinggi dari pada harga β , sedangkan untuk aliran *plug*, harga ϵ tersebar disekitar garis korelasi Ali dkk. ($\epsilon=0,8 \beta$) sampai dengan sedikit di atas garis homogen. Hal ini dapat dilihat karena pada aliran *bubbly* dan *plug* tidak terjadi *slip* atau misalnya ada, *slip ratio* nya mendekati 1. Untuk pola aliran *churn*, *plug-annular*, (S-A), maupun *annular* (A), harga ϵ sangat kecil, bahkan berada dibawah garis korelasi Kawahara (persamaan 2). Hal ini dapat dilihat karena adanya *slip ratio* yang sangat besar, berarti kecepatan gas jauh lebih besar dari pada kecepatan cairan.

2. Metode Penelitian

Instalasi peralatan yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada gambar 1. Komponen-komponen utama pada instalasi tersebut meliputi : tangki air, pompa air, kompresor udara, bejana bertekanan, *test section*, mixer, dan konektor. Peralatan pendukung yang digunakan dalam penelitian, antara lain: optical correction box, kamera, komputer, video processing system, dan acquisition system. Alat ukur yang digunakan dalam penelitian, antara lain: flowmeter air, flowmeter udara, temperature indicator, Thermocouple, pressure indicator, dan pressure transducer. Untuk pengambilan gambar video aliran, digunakan kamera berkecepatan tinggi merk Nikon tipe J4, dengan kecepatan 1200 fps dan resolusi 640 x 480 pixel. Akuisisi data dari "National Instrument" digunakan untuk mengkonversi data dari analog menjadi digital, agar dapat direkam, disimpan, diolah, dan dianalisa pada komputer. Kondisi penelitian adalah adiabatik. Eksperimen dilakukan pada kecepatan superfisial gas (J_G) dengan interval 0,025 – 66,3 m/s, dan kecepatan superfisial cairan (J_L) dengan interval 0,033 – 4,935 m/s.



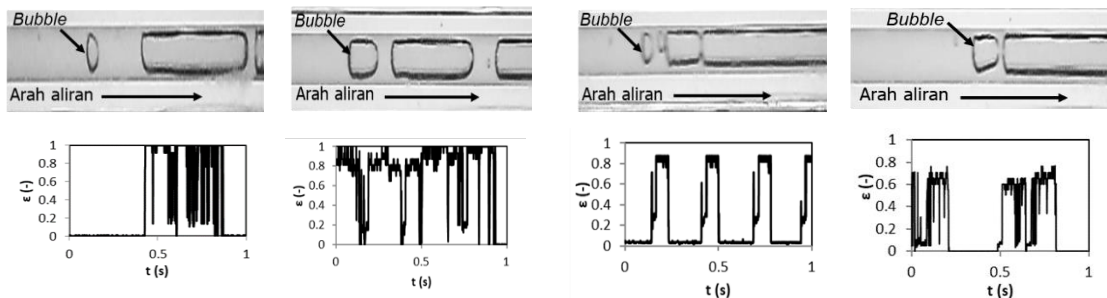
Gambar 1. Skema instalasi penelitian

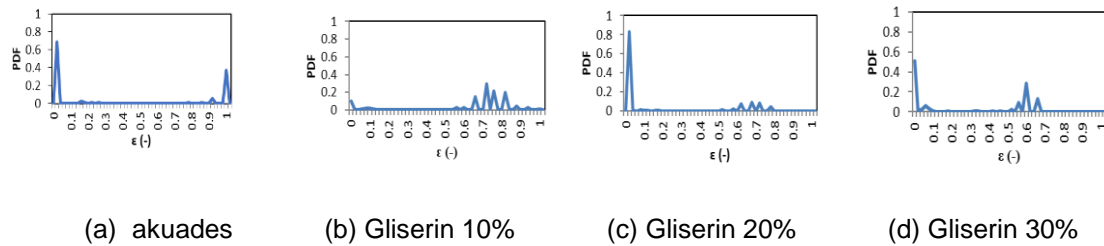
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian pada pipa mini dengan kemiringan 30 derajat menghasilkan beberapa jenis pola aliran bermunculan yang masing-masing campuran mengandung 0%, 10%, 20%, dan 30% gliserin. Dari penelitian tentang pola aliran, aliran yang terdeteksi pada kenaikan persentase gliserin adalah *bubbly*, *plug*, *slug annular*, *annular* dan *churn*. Perbedaan yang terjadi diantara beberapa persentase gliserin tadi adalah proses transisi antara pola aliran. Analisa fraksi hampa dilakukan pada posisi 26 piksel (6,879 mm) dari sebelah kiri (sisi inlet). Hasil time-series fraksi hampa kemudian diolah untuk menentukan nilai *Probability Distribution Function (PDF)* sebagai fungsi ε (-) (nilai fraksi hampa).

3.1 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran *Bubbly*

Pola aliran *bubbly* ditunjukkan dengan munculnya gelembung-gelembung udara yang terbentuk menyerupai bulatan kecil yang mengambang antara dinding pipa. Pola aliran ini terbentuk saat kecepatan superfisial gas (J_G) rendah dan kecepatan superfisial cairan (J_L) tinggi.

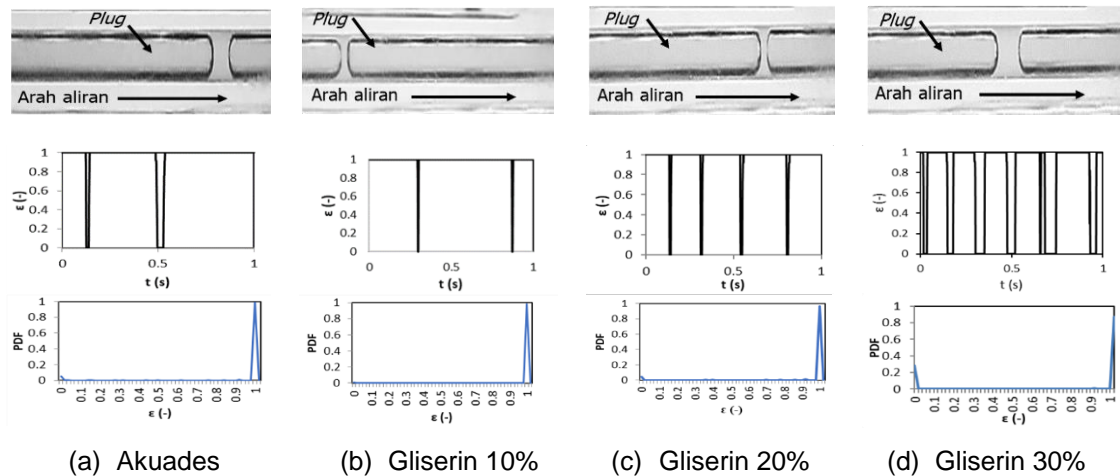




Gambar 2. Pola aliran *bubbly* dengan $J_G = 0.116$ m/s dan $J_L = 0.89$ m/s

3.2 Fraksi hampa untuk Pola Aliran *Plug*

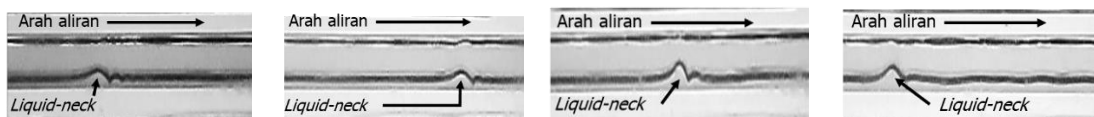
Pola aliran *plug* seringkali ditandai dengan adanya gelembung-gelembung udara yang menutupi seluruh dinding pipa dengan panjang pola aliran yang bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa diameter *plug* sama dengan diameter pipa mini. Berdasarkan fasenya pola aliran *plug* dibedakan menjadi dua yaitu *plug* udara dan *plug* air. *Plug* adalah pola aliran yang berdasarkan bentuknya dikategorikan sebagai aliran *bubbly* yang memanjang (*elongated bubbly*).

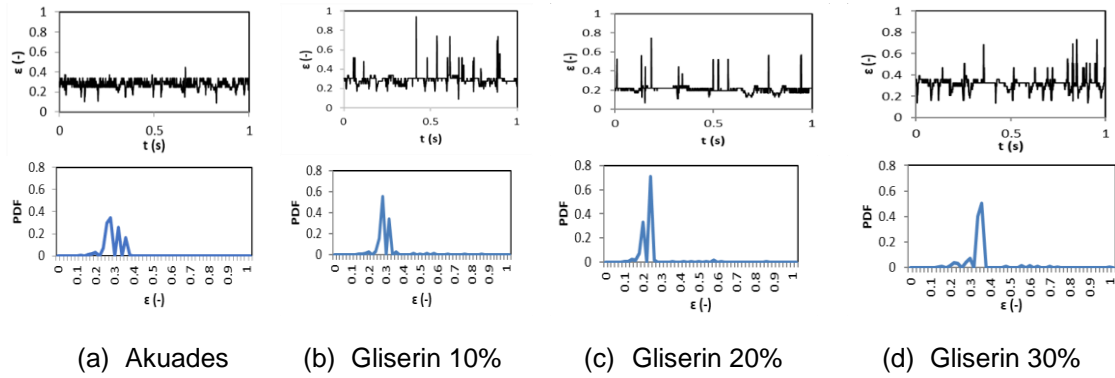


Gambar 3. Pola Aliran *Plug* dengan $J_G = 0.116$ m/s dan $J_L = 0.033$ m/s

3.3 Fraksi Hampa untuk Pola *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.

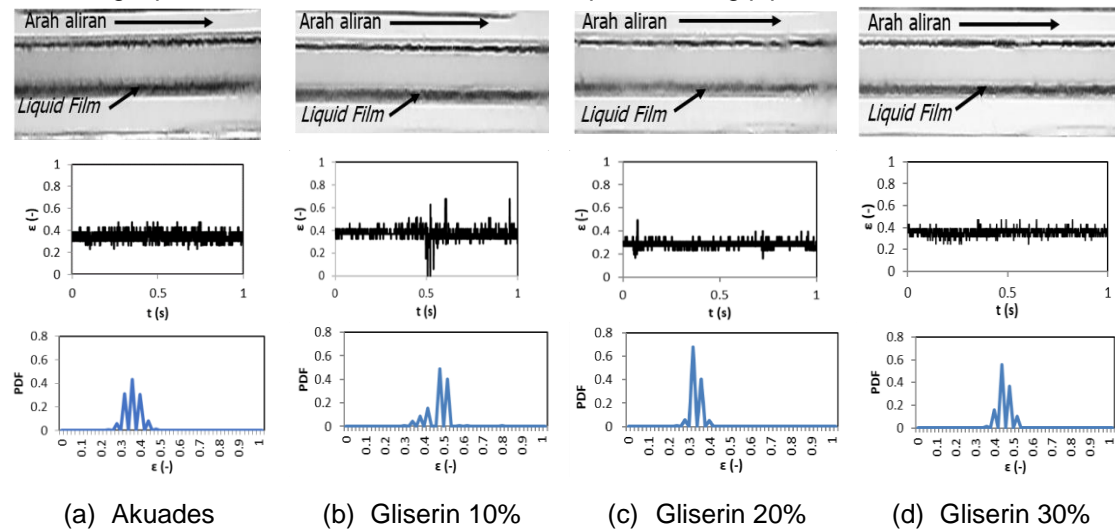




Gambar 4. Pola Aliran *slug-annular* dengan $J_G = 9,62$ m/s dan $J_L = 0,033$ m/s

3.4 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran *Annular*

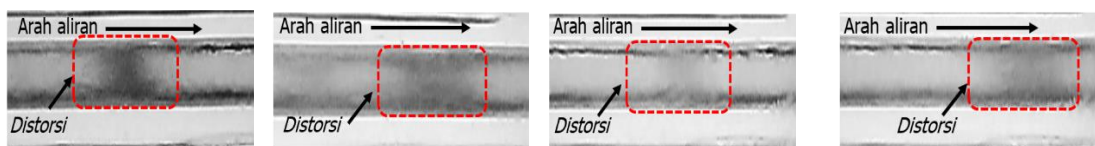
Pola aliran ini merupakan kelanjutan dari pola aliran *slug-annular* terjadi akibat kecepatan superficial dari fase gas (J_G) jauh lebih besar jika dibandingkan dengan fase cairan (J_L) yang rendah yang menyebabkan udara menembus bagian tengah lapisan film cairan sehingga mendorong lapisan film cairan terdistribusi merata pada dinding pipa.

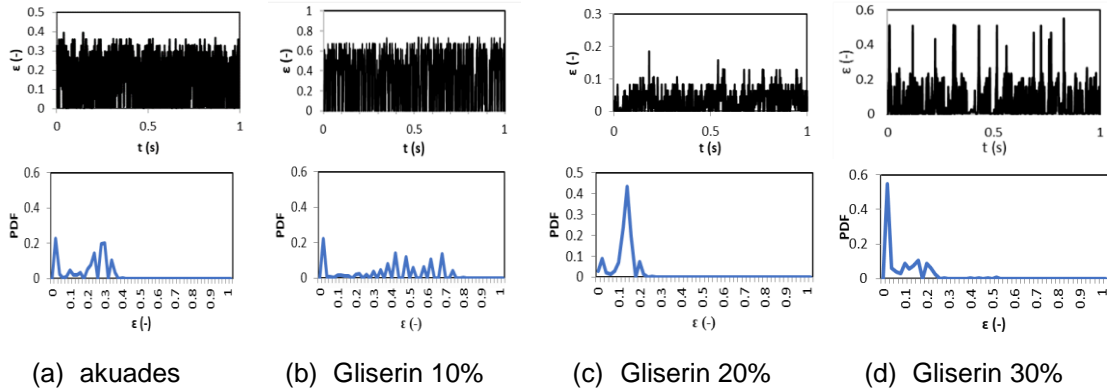


Gambar 5. Pola Aliran *Annular* dengan $J_G = 66,2$ m/s dan $J_L = 0,033$ m/s

3.5 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran *Churn*

Pola aliran *churn* terbentuk saat kecepatan superficial gas yang tinggi dan kecepatan superficial cairan yang cukup besar tetapi selisih keduanya cukup besar. Pola aliran ini merupakan pola aliran yang mengalami ketidakstabilan pada bagian ekor pola, sehingga terdapat bagian yang terdistorsi.



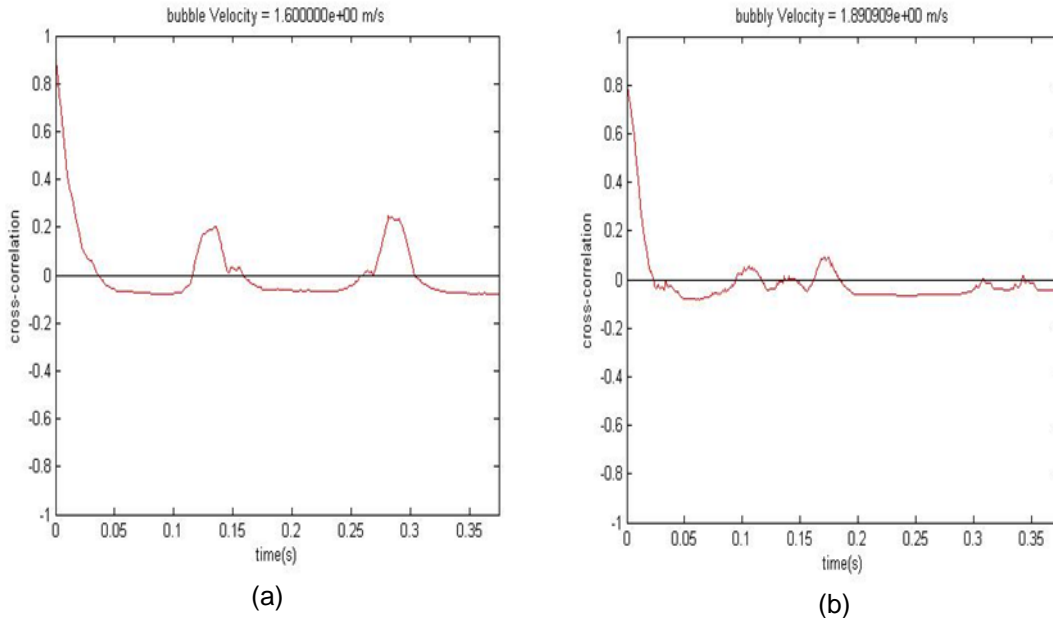


Gambar 6. Pola Aliran *Churn* dengan $J_G = 66,2$ m/s dan $J_L = 4,935$ m/s

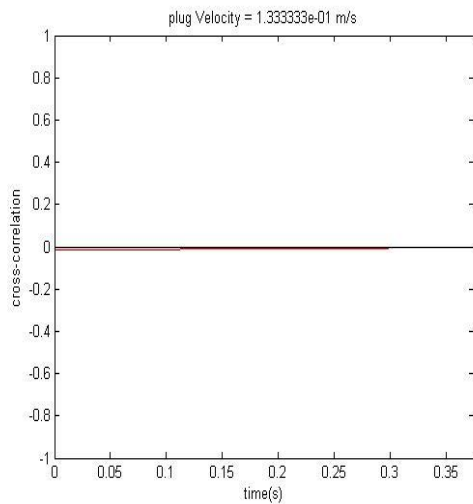
3.6 Cross-Correlation Aliran *Bubbly* dan *Plug*

Kecepatan dari *bubbly* dan *plug* dapat dicari dengan menentukan jeda waktu antara pergerakan *bubbly* atau *plug* dari satu titik referensi ke titik referensi lainnya. Nilai *cross-correlation bubbly* dapat dilihat pada Gambar 7 dan nilai *Cross-correlation plug* dapat dilihat pada Gambar 8.

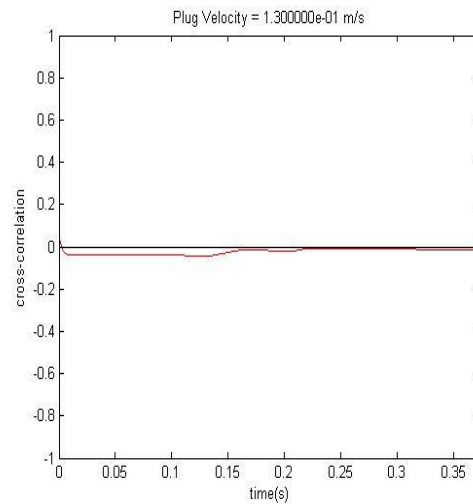
Pada Gambar 7 dan 8 terlihat grafik yang fluktuatif dimana terdapat nilai yang menunjukkan jeda waktu yang dihasilkan. Puncak tertinggi merepresentasikan jeda waktu dari hasil *cross-correlation*. Kemudian nilai dari kecepatan *bubble* dan *plug* dihitung dari selisih jarak antara kedua referensi yang digunakan dibagi dengan jeda waktu yang sudah ditentukan. Jika viskositas mengalami kenaikan maka kecepatan *bubbly* dan *plug* akan menurun. Hal tersebut dikarenakan dari udara yang semakin susah untuk masuk kedalam aliran pipa campuran gliserin dan akuades dengan viskositas yang dinaikan.



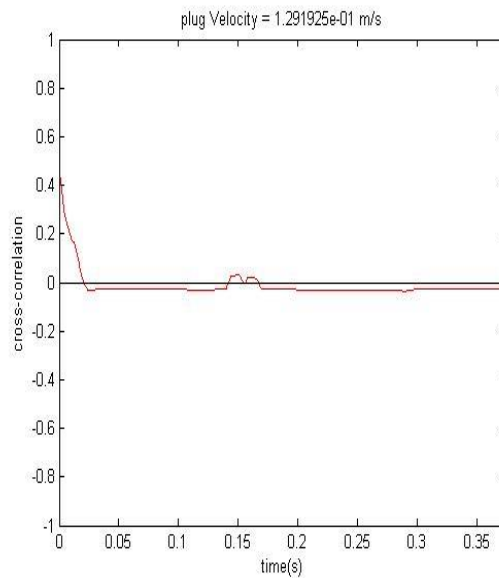
Gambar 7. *Cross-Correlation bubbly* pada (a) $J_G = 0.025$ m/s $J_L 0.89$ m/s dan (b) $J_G = 0.116$ m/s $J_L 0.89$ m/s



(a) kecepatan *plug* pada
 $J_G = 0,116$ m/s dan $J_L = 0,033$ m/s



(b) kecepatan *plug* pada
 $J_G = 0,116$ m/s dan $J_L = 0,232$ m/s

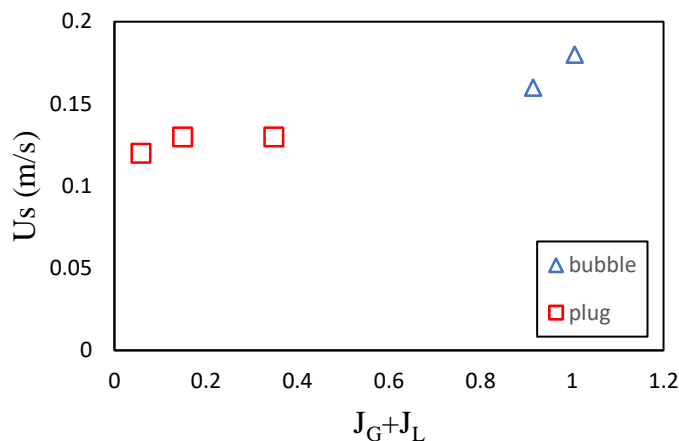


(c) kecepatan *plug* pada
 $J_G = 0,025$ m/s dan $J_L = 0,033$ m/s

Gambar 8. Cross-correlation *plug*

3.7 Kecepatan *Bubbly* dan *Plug*

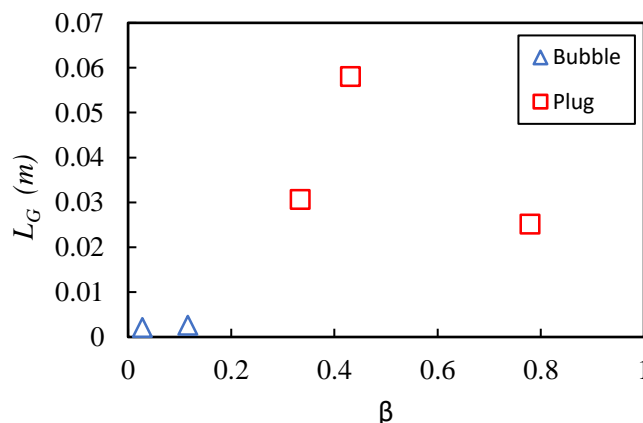
Kecepatan pola aliran *bubbly* dan *plug* dibuat dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 9. Grafik dibuat dengan menghubungkan antara kecepatan *bubbly* dan *plug* dengan total fluks volumetrik dimana $J_T = (J_G + J_L)$. secara umum dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai total fluks volumetrik maka kecepatan *Bubbly* dan *plug* akan meningkat.



Gambar 9. Kecepatan *bubbly* dan *plug*

3.8 Panjang *Bubbly* dan *Plug*

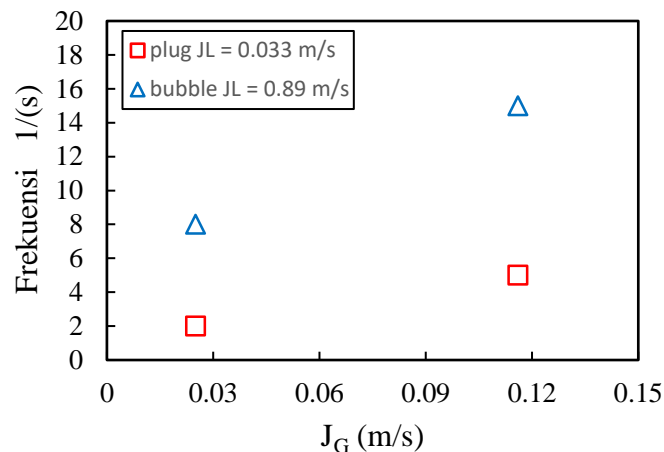
Gambar 10. Menunjukkan grafik Panjang *plug* dan *bubbly* ditentukan dengan menggunakan metode menghitung manual terhadap *bubbly* dan *plug* yang mengalir selama 1 detik kemudian diambil rata-rata untuk menentukan panjang *bubbly* dan *plug*. Setelah diketahui ($\Delta t = t_2 - t_1$) dan mendapatkan kecepatan yang didapat dari hasil *cross-correlation* (v), dengan begitu di dapatkan nilai dari panjang *bubbly* dan *plug* dengan memperhitungkan ($L = \Delta t.v$). Dari hasil yang didapatkan hanya sedikit Panjang *bubbly* yang memiliki ukuran kurang dari diameter pipa. Hal ini dikarekan pada aliran *bubbly* juga ditemukan aliran *plug* Panjang yang akan mempengaruhi rata-rata *bubbly* dan *plug*.



Gambar 10. Panjang *Bubbly* dan *Plug*

3.9 Frekuensi Kemunculan *Bubbly* dan *Plug*

Gambar 11. Menunjukkan grafik frekuensi kemunculan *bubbly* dan *plug* yang didapatkan dengan metode hitung manual. Semakin tinggi nilai J_G dan J_L maka kemunculan frekuensi yang diperoleh akan semakin banyak. Peningkatan frekuensi *bubbly* dan *plug* dipengaruhi oleh kecepatan superficial J_G . dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai J_G maka jumlah *bubbly* dan *plug* yang terbentuk akan semakin meningkat.



Gambar 11. Frekuensi *Bubbly* dan *Plug*

4. Kesimpulan

- Karakteristik nilai fraksi hampa pada masing-masing pola aliran yaitu sebagai berikut:
 - Nilai fraksi hampa untuk pola aliran *bubbly* pada rentang waktu meningkat drastis yang disebabkan oleh munculnya *plug* udara panjang.
 - Nilai fraksi hampa pada pola aliran *plug* pada rentang waktu tertentu hampir mendekati nilai 1 yang disebabkan oleh *plug* udara panjang yang memenuhi bagian seksi uji.
 - Nilai fraksi hampa pada pola aliran *churn* memiliki nilai yang sangat fluktuatif.
 - Nilai fraksi hampa *slug-annular* menurun pada waktu tertentu yang disebabkan oleh gelombang air (*liquid-neck*) pada titik tertentu pada aliran.
 - Nilai fraksi hampa *annular* tidak terjadi penurunan atau kenaikan yang signifikan dan cenderung stabil.
 - Semakin tinggi kecepatan J_G maka nilai fraksi hampa yang diperoleh akan semakin meningkat, sebaliknya semakin tinggi kecepatan J_L maka nilai fraksi hampa yang diperoleh akan semakin menurun.
- Kecepatan, Panjang, dan Frekuensi *bubbly* dan *plug* dapat disimpulkan sebagai berikut:
 - Pada pola aliran *bubbly* dan *plug* sangat dipengaruhi oleh total fluks volumetrik. Hal tersebut dikarenakan semakin tinggi $J_T = (J_G + J_L)$ maka kecepatan pola aliran akan semakin meningkat.
 - Panjang pola *bubbly* dan *plug* dipengaruhi dari semakin tingginya (β) maka panjang dari pola mengalami peningkatan, selain itu dari pengaruh homogen, panjang pola *bubbly* dan *plug*, dipengaruhi dari nilai variabel J_G dan J_L yang dihasilkan.
 - Pada frekuensi kemunculan *bubbly* dan *plug* didapatkan frekuensi yang cukup tinggi hal tersebut mengakibatkan nilai fraksi hampa yang dihasilkan cukup meningkat.

5. Daftar Pustaka

- Dos Santos, H. T., de Carvalho, D. F., Souza, C. F., & Medici, L. O. (2015). Lettuce growing under automated irrigation and hydrogel application. *Engenharia Agricola*, 35(5), 395–410.
- Fukano and Kariyasaki_1993_Characteristics of gas-liquid two-phase flow in a capillary.pdf. (n.d.).
- kawahara at al, 2002, pattern, void fraction, pressure drop of Two-phase flow in micro-channels.pdf. (n.d.).
- M.I. Ali, M. Sadatomi, M. K. (1993). Adiabatic Two-Phase flow in narrow channels

between two flat plates, *71*, 657–666.

- SADATOMI, M., KAWAHARA, A., MATSUO, M., & ISHIMURA, K. (2010). Effects of Surface Tension on Two-Phase Gas-Liquid Flows in Horizontal Small Diameter Pipes. *Journal of Power and Energy Systems*, *4*(2), 290–300.
- Saisorn, S., & Wongwises, S. (2008). Flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air-water flow in a horizontal circular micro-channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *32*(3), 748–760.
- Science, C. (2004). Alasdair McAndrew School of Computer Science and Mathematics Victoria University of Technology. *Image Processing*.
- Serizawa, A., Feng, Z., & Kawara, Z. (2002). Two-phase flow in microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*.
- Singh, P. R., Jimenez, H., Katti, K. V., Volkert, W. A., & Barnes, C. L. (1994). Transition Metal Chemistry of Main Group Hydrazides. Part 3: Carboxylate Appended Phosphorus Hydrazides as Novel Functionalized Chelating Systems. Synthesis and Characterization of New Cyclometallaphosphohydrazides. X-ray Structure of a Palladium(II) Repr. *Inorganic Chemistry*, *33*(4), 736–741.
- Sowinski, J., Dziubinski, M. (2007). The effect of liquid viscosity on the void friction in a two- phase gas-liquid flow in narrow mini-channels. *Proceeding of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6)*, ECCE-6(September), 16–20.
- Thome, J. R. (2010). Wolverine Heat Transfer Engineering Data book III. *Heat and Mass Transfer*.
- 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.