

Haslinda Kusumaningsih

Mahasiswa S3
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
Email: haslinda89@mail.ugm.ac.id

M. Rian Alif Madani

Mahasiswa S2
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
Email: mrianalif00@mail.ugm.ac.id

Muhammad Fakhri Alfath

Mahasiswa S2
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
Email: muhammadfakhri2020@mail.ugm.ac.id

Aldy Franstanata Ritonga

Mahasiswa S1
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
Email: aldyfranstanata@mail.ugm.ac.id

Deendarlianto

Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
Email: deendarlianto@ugm.ac.id

Indarto

Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
Email: indarto@ugm.ac.id

KARAKTERISTIK POLA ALIRAN DUA FASE GAS-CAIRAN NON-NEWTONIAN DI DALAM MICROCHANNELS BERPENAMPANG PERSEGI

The aim of this study is to investigate the characteristics of gas-non-Newtonian liquids flow patterns in square microchannels. The microchannels that used in this study was made by acrylic material with horizontal orientation and the side length of 8×10^{-4} m. Water, Air, Carboxymethyl Cellulose 0.2%wt (CMC 0.2%wt) aqueous solution, and Xanthan Gum 0.2%wt (XG 0.2%wt) aqueous solution were used in this study as the liquid test. Moreover, nitrogen gas was used as gas test. The liquid superficial velocity was varied of 0.1-1 m/s. Then, the gas superficial velocity variation of 0.26-7.8 m/s. The differential pressure transducer was used in this study to measure the pressure drop, which is occurs in square microchannels. Whereas, The flow patterns were recorded by using the high-speed camera. Furthermore the flow pattern video was analyzed by using image processing method to obtain the flow pattern characteristics. The two-phase flow pressure drop of all gas-Newtonian/non-Newtonian liquids two-phase flows in this study increase by increasing J_L in the same J_G . The flow patterns that occur in this study are bubbly, slug, slug-annular and churn. The viscosity and rheological parameter of liquids test influenced the characteristic of flow patterns. The flow patterns in this study were plotted in the flow patterns map and suitable with the flow patterns transisiton lines based on the previous study. Likewise, the experimental pressure drop shows the good agreement with the pressure drop prediction correlation by Kawahara et al. (2011).

Keywords: Flow Pattern, Two Phase Flow, Non-Newtonian, Pressure Drop, Image Processing, Void Fraction

1. PENDAHULUAN

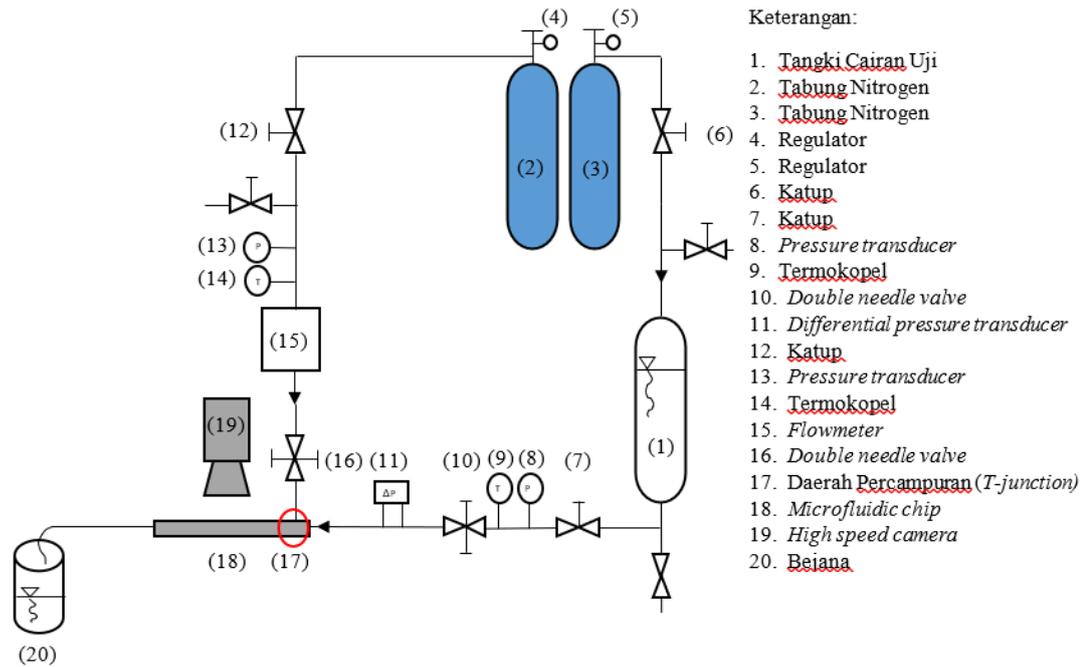
Dewasa ini peralatan - peralatan kedokteran, biomedik, reaktor kimia dan keteknikan dibuat dalam ukuran mikro dengan performansi yang tinggi, salah satu contohnya adalah *microfluidic chip* berupa alat pengontrol aliran, yang dapat digunakan dalam *micro chemical reactor* dan *heat exchanger*, yang keduanya merupakan aplikasi dari aliran dua fase. Perkembangan penelitian aliran dua fase saat ini fokus pada aliran gas-cairan non-Newtonian, karena aplikasi fluida non-Newtonian telah banyak digunakan di seluruh aplikasi bidang industri dan biomedik. Aplikasi cairan non-Newtonian meliputi aliran darah di dalam pembuluh darah, penyerap cairan tubuh saat operasi atau pengobatan tertentu dan material *hydrogel* [1-2], material untuk rekayasa dan regenerasi jaringan tubuh [3]. Selain itu juga digunakan dalam industri kimia dan industri polimer [4]. Tegangan geser yang diberikan kepada fluida non-Newtonian tidak linier terhadap laju deformasi yang terjadi atau gradien kecepatan terhadap sumbu-y. Sehingga viskositas fluida non-Newtonian mengalami perubahan saat dikenai tegangan geser sekecil apapun. Fluida yang viskositasnya berkurang seiring dengan meningkatnya tegangan geser disebut *shear-thinning fluids*. Sedangkan fluida yang viskositasnya bertambah seiring dengan meningkatnya tegangan geser disebut *shear-thickening fluids*. Pada dunia perindustrian, *shear-thinning fluids* lebih sering ditemukan dibandingkan dengan *shear-thickening fluids*.

Karakteristik aliran dua fase gas-cairan non-Newtonian yang salah satu diantaranya adalah pola aliran perlu dikaji lebih dalam agar perancangan peralatan yang berkaitan dengan aplikasi aliran dua fase dapat lebih optimal. Karakteristik aliran dua fase nitrogen-fluida non-Newtonian di dalam *microchannel* berpenampang persegi dan 2 buah berbentuk segitiga yang masing-masing diameter hidroliknya berukuran 2,5; 0,886; dan

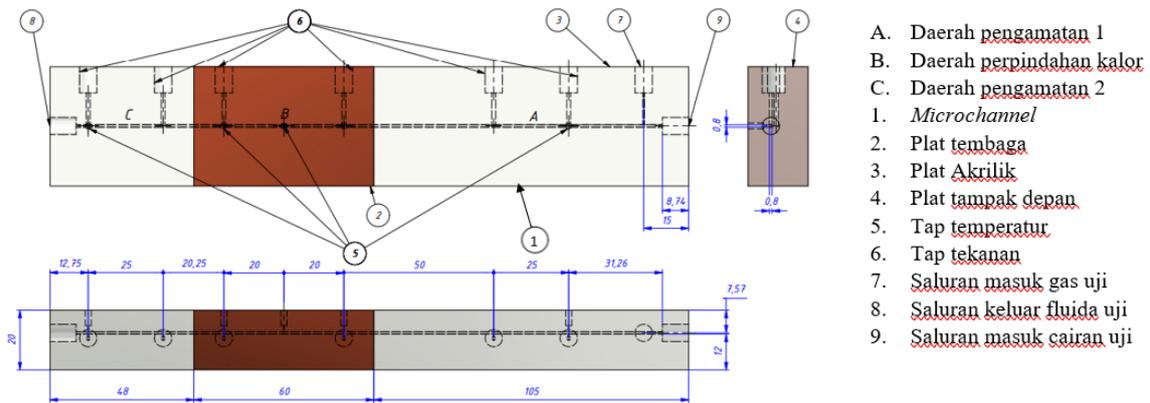
2,886 mm, telah diteliti. CMC 0,4%wt, 0,2%wt polyacrylamide (PAM), dan XG 0,2%wt digunakan dalam penelitian ini sebagai fluida kerja. Jenis aliran dua fase yang terjadi meliputi aliran *slug*, *churn*, dan *annular*. Pola aliran dalam penelitian ini dipengaruhi oleh variasi J_G pada J_L yang dijaga konstan, viskositas efektif, dan sifat reologi cairan [5]. Sementara, pengaruh sifat fisik cairan dan diameter saluran terhadap pola aliran dua fase juga telah dipelajari. Cairan kerja yang digunakan antara lain air, etanol, CMC (0,0464%wt; 0,1262%wt; 0,2446%wt), dan *Sodium Dodecyl Sulfate* (SDS) dengan variasi konsentrasi larutan SDS sebesar 0.0608%wt dan 0.2620%wt. Sementara, gas uji yang digunakan adalah nitrogen. Viskositas, tegangan permukaan, dan diameter saluran mempengaruhi pola aliran yang terjadi. Beberapa pola aliran seperti *bubbly*, *slug*, *unstable slug*, *churn*, *slug-annular* dan *annular* terjadi pada penelitian ini dan diplot pada diagram pola aliran [6]. Karakteristik aliran dua fase gas - cairan non-Newtonian di dalam *microchannel* berbentuk persegi panjang dengan larutan PAM (0,1%wt; 0,2%wt; 0,4%wt) digunakan sebagai fluida cair dan nitrogen sebagai fluida gas telah diamati. Pola aliran yang terjadi pada penelitian ini hanya *slug*. Kecepatan gelembung gas meningkat seiring meningkatnya konsentrasi larutan PAM sedangkan fraksi hampa menurun [7]. Karakteristik aliran dua fase dengan menggunakan PAM sebagai cairan kerja dengan variasi konsentrasi sebesar 0,1%wt; 0,2%wt; dan 0,4%wt juga telah diteliti pada *microchannel* berpenampang lingkaran dengan diameter 0,25 mm. Karakteristik yang ditekankan pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh fluida dengan sifat viskoelastik terhadap *pressure drop* yang terjadi [8]. Selain itu, pola aliran dua fase dengan menggunakan dua cairan berbeda telah diamati di dalam *microchannels* berpenampang persegi panjang dengan tiga dimensi saluran berbeda antara lain 0,4 x 0,4 mm, 0,4 x 0,6 mm, dan 0,4 x 0,8 mm. Penelitian ini menggunakan siklohexana sebagai fase tersebar dan CMC sebagai fase kontinyu. Pola aliran yang dihasilkan meliputi *slug*, *droplet*, *parallel*, dan *jet*. Pola aliran *droplet* dan *jet* terjadi pada larutan CMC dengan konsentrasi tertinggi dan dimensi saluran terkecil [9]. *Pressure drop* aliran dua fase gas-cairan non-Newtonian telah diamati di dalam *microchannels* berpenampang lingkaran. Tiga jenis cairan kerja digunakan dalam penelitian ini antara lain CMC, XG, dan PAM. Data *pressure drop* meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan superfisial gas dengan kecepatan superfisial cairan yang konstan pada aliran dua fase gas-larutan PAM. Sedangkan pada aliran dua fase dengan menggunakan cairan kerja CMC dan XG, *pressure drop* cenderung konstan. Hal ini disebabkan oleh viskositas cairan kerja yang menurun seiring dengan peningkatan kecepatan rata-rata cairan akibat peningkatan kecepatan superfisial gas [10]. Kemudian, *pressure drop* aliran dua fase gas-cairan non-Newtonian juga telah diamati di dalam *microchannels* berpenampang persegi. Larutan CMC, XG, dan PAM digunakan sebagai cairan kerja dalam penelitian ini. Sebuah korelasi telah didapatkan dalam penelitian ini untuk mengukur *pressure drop* yang terjadi pada aliran dua fase gas-cairan non-Newtonian [11]. Pembentukan pola aliran dan transisi pola aliran dua fase gas-cairan non-Newtonian di dalam *microchannel* kebanyakan hanya diamati menggunakan pengamatan langsung dan masih belum diamati dan dibahas secara terperinci menggunakan *image processing*. Untuk itu, dalam penelitian ini pembentukan pola aliran dan transisinya akan dibahas dengan seksama menggunakan metode *image processing* untuk lebih memahami pola aliran yang terjadi.

2. METODE DAN BAHAN

Gambar 1 menunjukkan instalasi penelitian yang digunakan dalam penelitian saat ini. Fluida kerja dialirkan ke dalam *microfluidic chip* melalui pipa-pipa instalasi. Pipa-pipa yang digunakan meliputi pipa tembaga berukuran 8 dan 4 mm dan *stainless steel* yang berukuran 6 mm. Sedangkan fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini antara lain air, CMC 0,2%wt, dan XG 0,2 %wt. Sedangkan nitrogen digunakan sebagai gas uji. Kecepatan superfisial cairan uji, J_L divariasikan dalam rentang 0,1-1 m/s, sedangkan gas, J_G divariasikan dalam rentang 0,26-7,8 m/s. Sifat fisik dari fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1. Cairan uji ditampung dalam tabung nomor (1) yang berkapasitas $10 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Baik debit cairan uji maupun gas uji diatur menggunakan katup (7) dan (12) seperti pada Gambar 1. Cairan uji dilewatkan pada pipa kapiler (11) sebelum memasuki daerah percampuran (17) antara cairan dan gas uji yang berbentuk T-junction untuk mengukur beda tekanan menggunakan transduser beda tekanan dan akan diolah menggunakan Persamaan Bernoulli menjadi debit cairan uji yang mengalir ke dalam *microfluidic chip* seperti pada Gambar 2. Sebuah bejana (20) ditempatkan pada saluran keluar *microfluidic chip* yang digunakan untuk mengkonfirmasi pengukuran debit cairan uji secara manual yaitu dengan menimbang cairan uji yang tertampung dalam bejana selama periode waktu tertentu menggunakan timbangan digital. Sedangkan debit gas uji diukur dengan menggunakan *flowmeter* (15) yang dipasang sebelum daerah percampuran (17). Tekanan cairan dan gas uji diukur menggunakan transduser tekanan (8) dan (13) yang dipasang sebelum daerah percampuran (17). Begitu juga temperatur cairan dan gas uji diukur menggunakan termokopel tipe-T (9) dan (14) yang dipasang sebelum daerah percampuran (17). Dua buah katup dipasang masing-masing pada saluran gas dan cairan uji (10) dan (16) sebelum memasuki daerah percampuran (17) bertujuan untuk mengatur aliran simultan dari cairan dan gas uji yang memasuki daerah percampuran.



Gambar 1. Instalasi Penelitian



Gambar 2. Microfluidic Chip

Tabel 1: Sifat Fisis Cairan Uji

Jenis Cairan	Rumus Molekul	Berat Molekul	Konsentrasi (%wt)	ρ (kg/m ³)	σ (N/m)	μ_0 (Pa s)
Nitrogen	N ₂	28,01	-	1,2504	-	1,8 x 10 ⁻⁵
Water	H ₂ O	18,02	-	968,3	0,0721	0,00097
CMC	(NaC ₈ H ₁₁ O ₇) _m	9 x 10 ⁴	0,2	987,7	0,0705	2,61 x 10 ⁻³
XG	(C ₃₅ H ₄₉ O ₂₉) _m	2 x 10 ⁶ -1,2 x 10 ⁷	0,2	1006,9	0,0734	8 x 10 ⁻¹

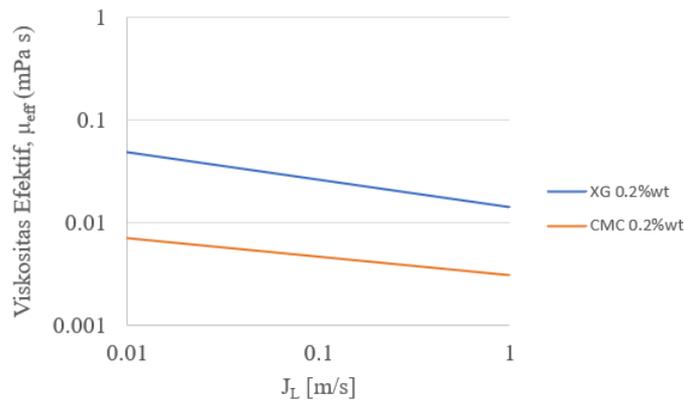
Tabel 1 menunjukkan bahwa cairan uji yang digunakan dalam penelitian ini memiliki viskositas, μ_0 yang berbeda namun dengan tegangan permukaan, σ dan densitas, ρ yang hampir sama. Sehingga, karakteristik pola aliran dan *pressure drop* yang terjadi hanya dipengaruhi oleh viskositas cairan dan sifat reologi cairan uji seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Sehingga, viskositas efektif dari beberapa cairan non-Newtonian yang digunakan sebagai cairan uji dalam penelitian ini dapat dihitung menggunakan Persamaan 1 [12],

Tabel 2: Parameter Reologi Cairan Uji [10]

Jenis Cairan	k (Pa s)	n
Air	0.00097	1
CMC 0.2%wt	0.016	0.82
XG 0.2%wt	0.029	0.73

$$\mu_{eff} = k \left(\frac{8J_L}{D_H} \right)^{n-1} \quad (1)$$

dengan k adalah koefisien konsistensi cairan uji dan n adalah indeks aliran seperti tercantum pada Tabel 2. Perhitungan viskositas efektif dilakukan pada semua variasi kecepatan superfisial cairan, J_L pada penelitian ini dan diplot pada Gambar 3 yaitu grafik hubungan antara viskositas efektif dan J_L .



Gambar 3. Viskositas Efektif Cairan non-Newtonian terhadap Variasi Kecepatan Viskositas Cairan, J_L .

Gambar 3 menjelaskan bahwa viskositas efektif dari kedua cairan kerja non-Newtonian yang digunakan dalam penelitian ini menurun seiring dengan peningkatan kecepatan superfisial. Cairan CMC 0.2% wt menunjukkan nilai viskositas efektif yang lebih rendah dibandingkan cairan XG 0.2% wt seiring dengan kenaikan J_L . Hal ini sesuai dengan sifat dari kedua cairan tersebut adalah *shear-thinning*.

2.1 Parameter Pola Aliran Dua Fase

2.1.1 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds, Re merupakan perbandingan antara gaya inersia dan viskos yang digunakan untuk membedakan jenis aliran laminar, transisi, atau turbulen. Pada aliran dua fase, Bilangan Reynolds untuk masing-masing fase dapat dihitung menggunakan Persamaan 2 dan 3.

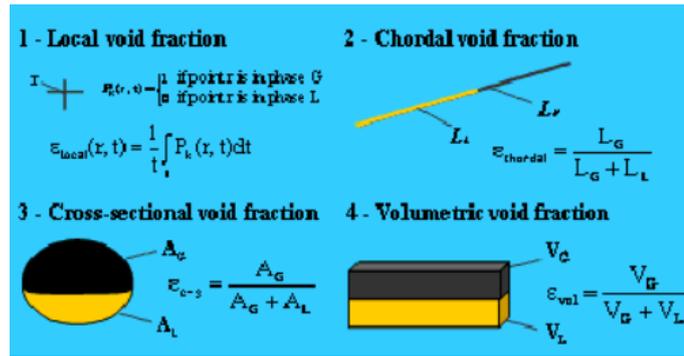
$$Re_L = \frac{\rho_L j_L D_H}{\mu_L} \quad (2)$$

$$Re_G = \frac{\rho_G j_G D_H}{\mu_G} \quad (3)$$

dengan simbol F untuk cairan dan G untuk gas. D_H adalah diameter hidrolis, ρ adalah densitas fluida, μ adalah viskositas fluida, dan j adalah kecepatan superfisial fluida.

2.1.2 Fraksi Hampa

Fraksi hampa, α , digunakan untuk menentukan beberapa parameter penting lainnya seperti densitas dan viskositas aliran dua fase serta untuk memprediksikan transisi pola aliran, perpindahan kalor dan penurunan tekanan. Fraksi hampa dapat dihitung berdasarkan geometri seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Fraksi Hampa di berbagai Geometri [13]

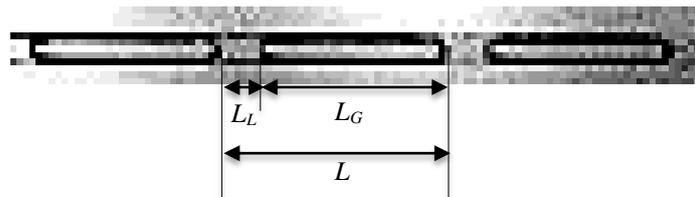
Penelitian ini menggunakan *microchannels* dengan luas gelembung penampang melintang mendekati luas saluran. Sehingga, perhitungan fraksi hampa yang digunakan adalah fraksi hampa *chordal* yang dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$\alpha = \frac{L_G}{L_G + L_L} \quad (4)$$

dengan L_G adalah panjang gelembung gas, dan L_L adalah panjang siput cairan. Baik L_G maupun L_L ditentukan dengan menggunakan metode *image processing* menggunakan MATLAB.

2.1.3 Panjang dan Kecepatan Gelembung Gas

Panjang gelembung gas, L_G adalah panjang aksial gelembung gas yang diukur dari kepala sampai ekor gelembung. Sedangkan panjang siput cairan, L_L adalah panjang fase cair diantara dua gelembung gas yang diukur dari ekor gelembung gas sebelum dan kepala gelembung gas setelahnya [14]. Gambar 5 menunjukkan cara pengukuran L_G dan L_L yang diukur menggunakan MATLAB melalui *image processing*. Pengukuran L_G dan L_L yang sangat panjang dapat dilakukan menggunakan Persamaan 5 dan 6 yang memerlukan hasil perhitungan kecepatan gelembung gas, U_G menggunakan Persamaan 7 karena panjang dan kecepatan gelembung gas saling berkaitan.



Gambar 5. Cara pengukuran L_G dan L_L

$$L_G = \frac{u_G(f_{G,i} - f_{G,o})}{F} \quad (5)$$

$$L_L = \frac{u_G(f_{L,i} - f_{L,o})}{F} \quad (6)$$

dimana U_G adalah kecepatan gelembung gas, f merupakan nomor *frame* dengan simbol i dan o adalah untuk kepala dan ekor gelembung gas atau siput cairan. Sedangkan F adalah nilai *frame rate*.

$$u_G = \Delta Z \cdot F \quad (7)$$

dimana ΔZ adalah perpindahan gelembung gas selama l/F .

2.1.4 Pressure Drop

2.1.4.1 Pressure Drop Akibat Gesekan pada Aliran Fase Tunggal

Energi aliran fluida cair fase tunggal di dalam saluran semakin berkurang dari hulu ke hilir saluran. Hal ini disebabkan penurunan tekanan karena gesekan antara saluran dan cairan yang mengalir yang disebut *pressure drop* akibat gesekan. *Pressure drop* akibat gesekan dapat dihitung menggunakan Persamaan 8 dengan λ merupakan faktor gesekan untuk aliran fase tunggal.

$$(\Delta P_{f,L})_{SP} = \lambda \frac{1}{D_H} \rho_L \frac{u_L^2}{2} \quad (8)$$

dengan $\Delta P_{f,L,SP}$ merupakan *pressure drop* akibat gesekan pada aliran fluida cair satu fase, λ merupakan faktor kerugian gesek, D_H adalah diameter hidrolis, ρ_L adalah densitas fluida cair, u_L adalah kecepatan superfisial fluida cair.

2.1.4.2 Faktor Pengali Aliran Dua Fase

Metode *Lockhart-Martinelli* digunakan untuk mendapatkan *pressure drop* akibat gesekan pada aliran dua fase dengan menggunakan faktor pengali melalui Persamaan 9.

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_{TP} = \phi_{TP}^2 \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_{L,SP} \quad (9)$$

dengan ϕ_{TP}^2 merupakan faktor pengali aliran dua fase yang dapat dihitung menggunakan Persamaan 10. Sedangkan $\Delta P_f/\Delta Z$ merupakan *pressure drop* per jarak antar dua transduser tekanan. Simbol *TP* untuk aliran dua fase.

$$\phi_{TP}^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (10)$$

C merupakan konstanta Chisholm dan Laird [15] yang nilainya bergantung pada bilangan Reynolds dan dapat dilihat pada Tabel 3. Sedangkan, X dan X^2 merupakan parameter Lockhart-Martinelli, yang dapat dihitung menggunakan Persamaan 11 dan 12, dengan x merupakan kualitas uap.

$$X = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{0,1} \quad (11)$$

$$X^2 = \frac{\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_{L,SP}}{\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_{G,SP}} \quad (12)$$

Kolerasi prediksi *pressure drop* telah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya dengan menentukan nilai konstanta, C dalam perhitungan faktor pengali aliran dua fase yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Nilai Konstanta Chisholm dan Laird (1958), C .

Jenis aliran cairan	Jenis aliran gas	C
Turbulen	Turbulen	20
Laminar	Turbulen	12
Turbulen	Laminar	10
Laminar	Laminar	5

Tabel 4. Nilai Konstanta, *C*.

Peneliti	Konstanta, <i>C</i>
Mishima dan Hibiki (1996) [16]	$C = 21(1 - e^{-0.316D_h})$, D_h dalam mm
Kawahara et al. (2011) [17]	$C = 1.38Bo^{0.04}Re_L^{0.25}We_G^{-0.12}$
Feng dan Zhang (2021) [11]	$C = 9.748(k/\mu_G)^{-0.103}(j_G/j_L)^{0.443-0.241n}$

2.2 Image Processing

Data pola aliran secara visual yang direkam menggunakan kamera *high-speed* dipindahkan ke komputer menggunakan aplikasi *Phantom Control Camera* (PCC). Penggunaan PCC bertujuan mengatur ukuran gambar, *frame rate*, dan tingkat pencahayaan. Kemudian data visual diekstrak dan diolah menggunakan MATLAB dengan mengembangkan algoritma. Langkah-langkah *image processing* [18] meliputi memasukkan gambar visualisasi pola aliran ke dalam MATLAB menggunakan fungsi *imread*. Gambar hasil rekaman kamera *high-speed* merupakan gambar *grayscale*. Satu gambar *grayscale* terdiri dari elemen *gray* dengan rentang 0-255. Selanjutnya adalah rotasi dan pemotongan gambar yang dilakukan karena gambar visualisasi terkadang kurang sejajar dengan sumbu saluran. Tujuan dari proses rotasi dan pemotongan gambar adalah menyesuaikan posisi sumbu saluran dengan gambar dan menghilangkan bagian yang terdapat di luar diameter saluran agar gambar lebih terfokus saat dianalisis.

Kemudian, operasi morfologi (proses filtrasi) bertujuan mengubah nilai pixel atau mengatur kontras gambar. Operasi ini dapat disebut juga proses filtrasi gambar dengan menghilangkan noise sebelum gambar diolah. Pada proses ini termasuk didalamnya fungsi *imadjust* dan *adapthisteq*. Proses filtrasi menggunakan dua masukan gambar. Gambar pertama merupakan gambar asli dan yang kedua menggambarkan struktur elemen. Metode filtrasi yang digunakan adalah transformasi *top* dan *bottom hat*. Transformasi *top hat* mempengaruhi daerah terang sedangkan *bottom hat* mempengaruhi daerah gelap sehingga metode *top* dan *bottom hat* menghasilkan kontras gambar yang lebih baik dari metode lain. Selanjutnya, penyempurnaan gambar dengan mengubah pixel gambar menjadi pixel kebalikan. Seperti yang diketahui bahwa setiap gambar *grayscale* terdiri dari 0-255 elemen *gray*. Sehingga pada proses ini gambar dengan pixel awal 20 misalnya diubah menjadi 235 yaitu 255-20. Hasil proses ini pola aliran terlihat lebih cerah dan *background* terlihat lebih gelap dari sebelumnya. Kemudian, subtraksi *background* untuk memperjelas batas antar muka fluida gas dan cair. Hal ini penting dalam menganalisis objek yang bergerak seperti pola aliran agar mempermudah melacak pergerakan pola aliran. Cara sederhana untuk membuat *background* dalam langkah ini adalah dengan memasukkan gambar *background* yang berasal dari gambar saluran yang terisi penuh cairan tanpa ada aliran. Tahap terakhir adalah segmentasi gambar. Proses ini bertujuan untuk memisahkan objek gambar dengan *background* menggunakan cara sederhana yaitu metode ambang batas. Langkah ini mengubah setiap nilai *grayscale* dari gambar menjadi dua nilai yaitu 0 untuk *background* dan nilai lain untuk objek gambar. Secara manual nilai ambang batas yang dipilih biasanya 0,15.

3. HASIL DAN DISKUSI

Data video pola aliran dalam penelitian ini diolah menggunakan metode *image processing* untuk mendapatkan karakteristik pola aliran. Selain itu, karakteristik pola aliran dapat diketahui dengan mengolah data *pressure drop* dari transduser tekanan menggunakan metode *signal processing*.

3.1 Karakterisasi Pola Aliran Dua Fase menggunakan Image Processing

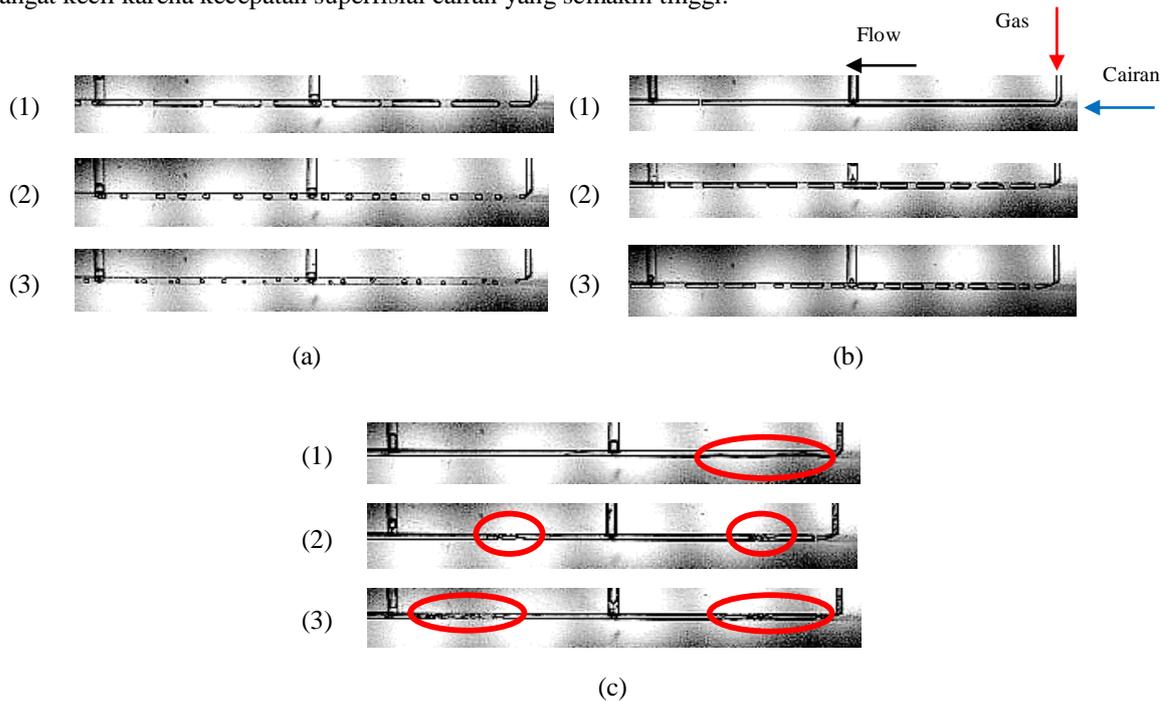
Pola aliran yang terjadi dalam penelitian ini meliputi pola aliran *bubbly*, *short-slug*, *long-slug*, *slug-annular*, dan *churn*. Namun, pola aliran *bubbly* hanya terjadi pada aliran dua fase gas-air pada J_G rendah dan J_L yang tertinggi seperti pada Gambar 6.

Pola aliran *long-slug* terbentuk pada J_G yang rendah dan J_L rendah seperti pada Gambar 6a-1. Sementara Gambar 6b-1 juga menunjukkan pola aliran *long-slug* namun dengan panjang aksial gelembung gas yang semakin meningkat seiring peningkatan J_G pada J_L yang sama [19]. Hal ini terjadi karena debit gas yang mengalir pada *microchannels* semakin meningkat atau volume gas dalam saluran semakin tinggi sehingga gelembung gas memiliki panjang aksial yang lebih panjang.

Kenaikan J_L pada J_G yang dijaga konstan menyebabkan panjang aksial gelembung gas semakin menurun sehingga pola aliran *long-slug* berubah menjadi aliran *short-slug* seperti ditunjukkan pada Gambar 6a-1 dan 2, juga 6b-1 dan 2. Debit air yang masuk ke dalam *microchannels* semakin tinggi sehingga gelembung gas lebih sulit memasuki siput cairan dan pecah menjadi gelembung gas yang lebih pendek. Pada J_L yang lebih

tinggi lagi, pola aliran *bubbly* seperti pada Gambar 6a-3 terbentuk, karena gelembung gas semakin sulit memasuki siput cairan dan semakin terpecah menjadi gelembung gas yang lebih kecil dengan ukuran panjang aksialnya kurang dari diameter saluran.

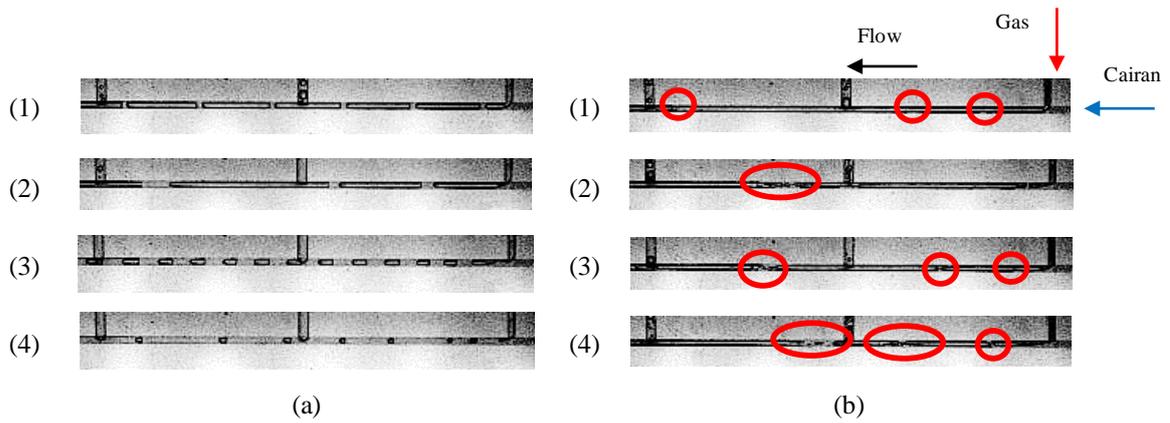
Sementara pada variasi J_G tertinggi pada penelitian ini, pola aliran yang terjadi meliputi pola aliran *slug-annular* dan *churn*. Pola aliran *slug-annular* seperti pada Gambar 6c-1 terbentuk pada J_G tertinggi dan J_L terendah yang dicirikan dengan gelembung gas yang sangat panjang tanpa dipisahkan oleh siput cairan namun terdapat lapisan cairan didekat dinding saluran yang menyelimuti gas tersebut yang disertai gangguan pada antar muka fase gas dan cair yang sering muncul. Sedangkan pola aliran *churn* terbentuk pada variasi J_G dan J_L tertinggi pada penelitian ini, yang dicirikan dengan gelembung gas yang panjang dan terdapat gangguan pada bagian ekor gelembung karena debit cairan yang tinggi sehingga memecah gelembung gas pada bagian ekor menjadi gelembung gas yang sangat kecil dan menyebar di daerah siput cairan seperti pada Gambar 6c-2 dan 3. Semakin tinggi J_L semakin banyak bagian ekor gelembung gas yang terpecah menjadi gelembung gas yang sangat kecil karena kecepatan superficial cairan yang semakin tinggi.



Gambar 6. Pola aliran dua fase gas-air dengan variasi J_G dan J_L (a) 0.26 m/s, (b) 1.56 m/s, (c) 7.8 m/s dan (1) 0.1 m/s, (2) 0.5 m/s, (3) 1 m/s.

Pola aliran dua fase gas-CMC 0.2%wt ditunjukkan pada Gambar 7. Transisi pola aliran yang terjadi sama seperti yang terjadi pada aliran dua fase gas-air. Hal ini menyimpulkan bahwa viskositas cairan tidak begitu mempengaruhi transisi pola aliran. Sehingga, pada J_G yang dijaga konstan dengan kenaikan J_L , panjang aksial gelembung gas pada aliran dua fase gas-CMC 0.2%wt juga mengalami penurunan, pola aliran *long-slug* yang terjadi pada J_G dan J_L rendah seperti pada Gambar 7a-1 dan 2 berubah menjadi pola aliran *short-slug* seperti pada Gambar 7a-3 dan 4.

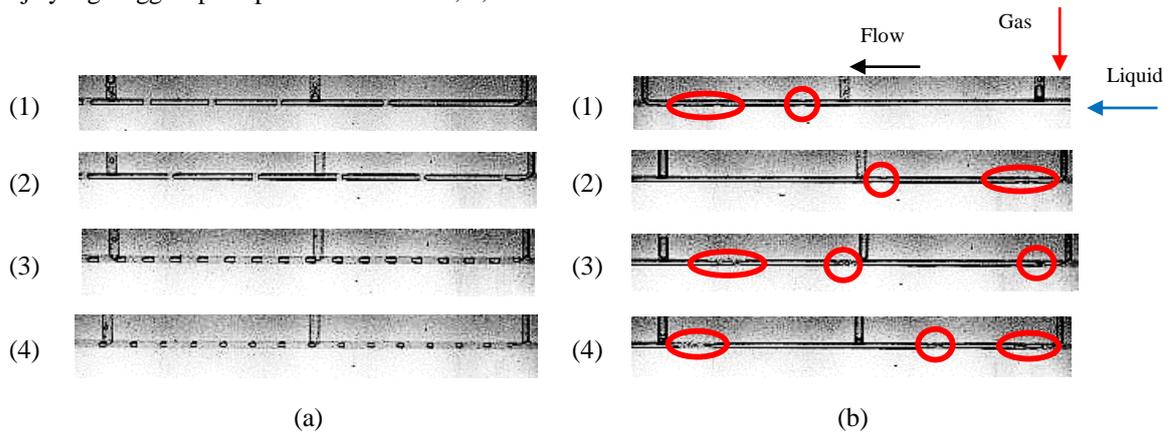
Viskositas cairan uji mempengaruhi bentuk hidung gelembung gas seperti terlihat pada Gambar 6b-1, hidung gelembung gas pada pola aliran *long-slug* dari aliran dua fase gas-air pada J_G dan J_L , 1.56 m/s dan 0.1 m/s berturut-turut lebih datar dibandingkan bentuk hidung gelembung gas yang terbentuk pada pola aliran yang sama pada variasi J_G dan J_L yang sama dari aliran dua fase gas-CMC 0.2%wt. Hidung gelembung gas pada pola aliran dua fase gas-CMC 0.2%wt lebih lancip dikarenakan viskositas cairan yang lebih tinggi menyebabkan gelembung gas sulit menembus siput cairan. Selain itu, ketebalan lapisan cairan yang menyelimuti gelembung gas lebih tebal sehingga gangguan pada lapisan cairan pada pola aliran *slug-annular* lebih sedikit dan gelembung gas lebih mendekati pola aliran *annular* seperti pada Gambar 7b-1d dan 2 pada variasi J_G namun J_L rendah. Selain itu, viskositas CMC 0.2%wt yang lebih tinggi dari air juga berpengaruh pada pecahnya gelembung gas bagian ekor menjadi gelembung-gelembung gas yang sangat kecil akibat J_L yang meningkat lebih sedikit menyebar dalam siput cairan seperti yang terjadi pada pola aliran *churn* pada Gambar 7b-3 dan 4.



Gambar 7. Pola aliran dua fase gas-CMC 0.2% wt dengan variasi J_G dan J_L (a) 1.56 m/s, (b) 7.8 m/s dan (1) 0.05 m/s, (2) 0.1 m/s, (3) 0.5 m/s, (4) 1 m/s.

Fluida kerja XG 0.2% wt memiliki viskositas tertinggi dibanding fluida kerja lainnya yang digunakan dalam penelitian ini. Sehingga panjang aksial gelembung gas pada pola aliran *long* dan *short-slug* lebih pendek dibandingkan panjang aksial gelembung gas pada aliran dua fase gas dengan kedua cairan kerja lainnya seperti terlihat pada Gambar 8a-1 sampai 4. Hal ini disebabkan gelembung gas sulit masuk dan berkembang dalam siput cairan. Selain itu, ketebalan lapisan cairan lebih tebal. Oleh karena itu gelembung gas nampak lebih tajam.

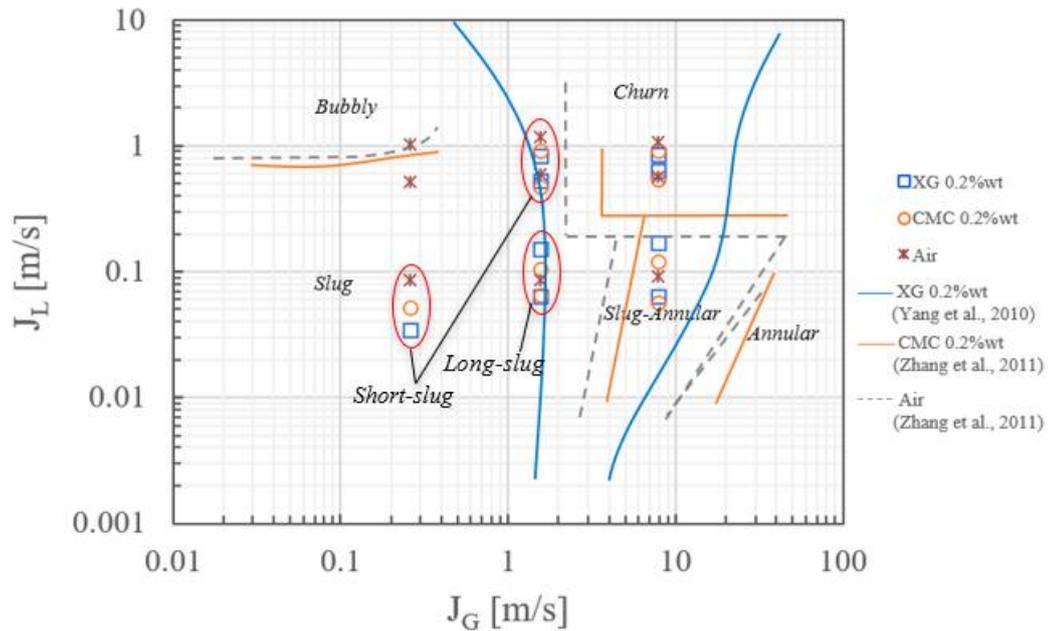
Tingginya viskositas juga menyebabkan gangguan pada antar muka gas dan cairan dekat dinding pipa lebih sedikit seperti terlihat pada Gambar 8b-1. Transisi dari pola aliran *slug-annular* lebih cepat menjadi pola aliran *churn* pada J_G yang sama dengan kenaikan J_L . Namun, gangguan pada ekor gelembung gas pada aliran *churn* nampak lebih sedikit karena gelembung gas sulit terpecah pada siput cairan dengan viskositas cairan kerja yang tinggi seperti pada Gambar 8b-2, 3, dan 4.



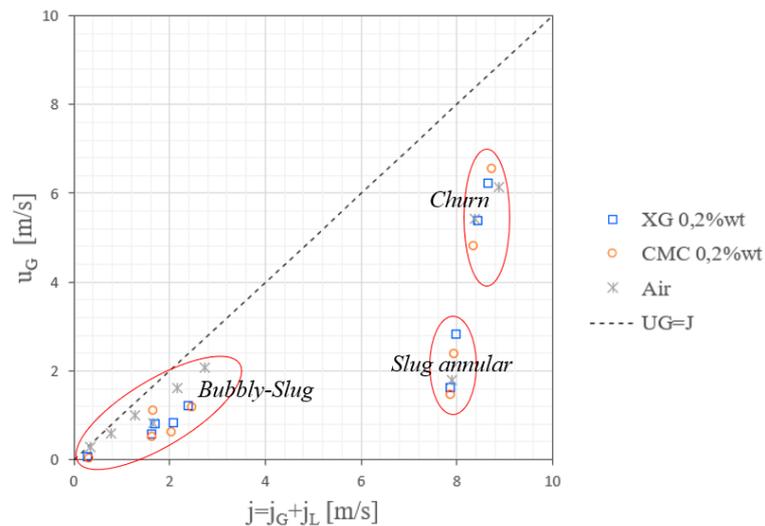
Gambar 8. Pola aliran dua fase gas-XG 0.2% wt dengan variasi J_G dan J_L (a) 1.56 m/s, (b) 7.8 m/s dan (1) 0.02 m/s, (2) 0.06 m/s, (3) 0.2 m/s, (4) 0.3 m/s.

Transisi pola aliran yang terjadi pada pola aliran dua fase gas-cairan Newtonian/non-Newtonian pada penelitian ini diplot dalam grafik pola aliran yang dibandingkan dengan garis transisi pola aliran sebelumnya. Pola aliran yang terjadi pada penelitian ini sesuai dengan transisi dan daerah pola aliran pada penelitian-penelitian sebelumnya. Viskositas cairan tidak banyak berpengaruh pada jenis dan transisi pola aliran. Namun, pada aliran dua fase gas XG 0.2% wt, transisi pola aliran dari pola aliran *slug-annular* lebih cepat menjadi pola aliran *churn* seiring dengan peningkatan J_L pada J_G yang sama seperti terlihat pada Gambar 9. Sedangkan, Gambar 10 merupakan grafik hubungan antara kecepatan gelembung gas, U_G dengan kecepatan superficial total, J . Garis putus-putus adalah garis data U_G sama dengan J . Data U_G untuk aliran dua fase gas-air pada penelitian ini mendekati garis putus-putus untuk nilai J yang relatif rendah. Sedangkan data-data U_G untuk aliran dua fase gas-CMC 0.2% wt/XG 0.2% wt menyebar di bawah garis putus-putus karena memiliki viskositas efektif seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Pola aliran *churn* pada setiap aliran dua fase dalam penelitian ini menunjukkan kecepatan gelembung gas yang tinggi. Karena pola aliran ini terjadi pada J_G tertinggi dan variasi J_L yang relatif tinggi. Sementara pola aliran *slug-annular* menunjukkan nilai U_G medium karena pola aliran ini terjadi pada J_G yang tinggi namun variasi J_L yang relatif rendah. Data-data pola aliran *bubbly* dan *slug* menunjukkan nilai

U_G yang rendah karena terbentuk pada J_G rendah pada variasi J_L pada penelitian ini.



Gambar 9. Peta Pola Aliran Dua Fase



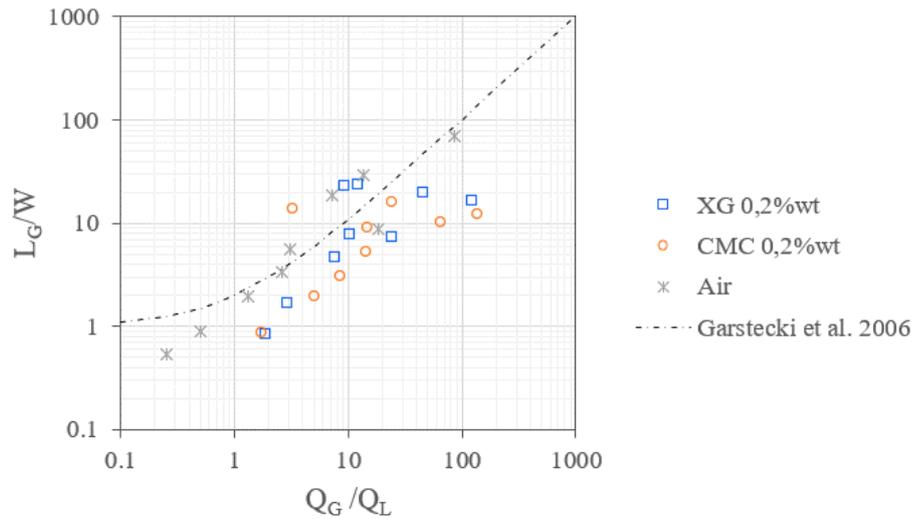
Gambar 10. Grafik Hubungan antara Kecepatan Gelembung dan Kecepatan Superfisial

Panjang gelembung gas diukur menggunakan metode *image processing* dengan penggunaan perangkat lunak MATLAB. Gambar 11 menunjukkan data non dimensional panjang gelembung terhadap lebar saluran terhadap rasio debit gas dan cairan kerja. Garis putus-putus merupakan persamaan yang diperoleh dari penelitian sebelumnya [20]. Data penelitian ini menyebar di sekitar garis persamaan yang didapat oleh peneliti sebelumnya seperti pada Persamaan 16.

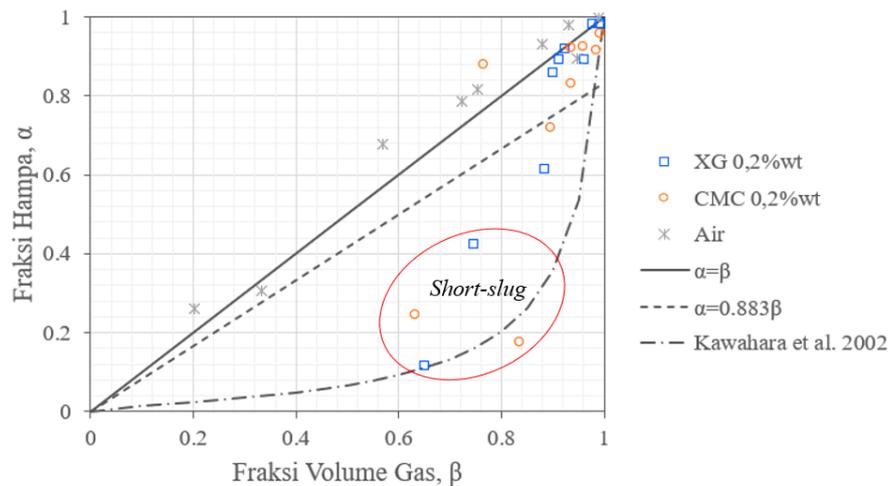
$$\frac{L_G}{W} = 1 + \frac{Q_G}{Q_L} \tag{16}$$

Persamaan ini menunjukkan persamaan untuk pola aliran *homogeneous* dimana bentuk dan ukuran gelembung seragam [21]. Selain itu, data-data penelitian aliran dua fase gas-non-Newtonian terlihat menyebar di bawah garis Persamaan 16. Hal ini dikarenakan viskositas cairan CMC 0,2% wt dan XG 0,2% wt menurun seiring peningkatan J_L , sehingga panjang aksial gelembung gas lebih pendek dibandingkan dengan panjang aksial

gelembung gas pada aliran dua fase gas-air.



Gambar 11. Grafik Hubungan antara L_G/W dan Q_G/Q_L

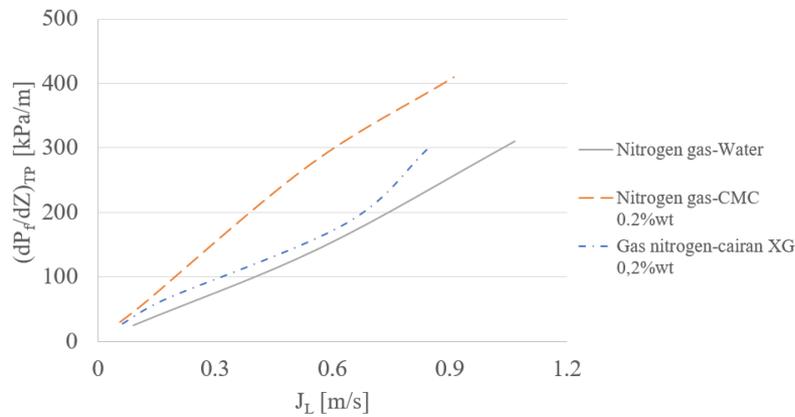


Gambar 12. Grafik Hubungan antara *Void Fraction* dan Farksi Volume Gas

Void fraction dalam penelitian ini dihitung menggunakan *chordal void fraction* seperti pada Persamaan 4 dengan asumsi luas penampang gelembung memenuhi seluruh diameter saluran karena dimensi saluran mikro. Sebagian besar data penelitian menyebar disekitar garis $\alpha = \beta$ atau aliran homogen. Hal ini sesuai dengan grafik hubungan antara L_G/W dan Q_G/Q_L pada Gambar 11. *Void fraction* untuk pola aliran dua fase gas-air menyebar merata sepanjang garis $\alpha = \beta$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12, hal ini menunjukkan bahwa *void fraction*, α meningkat seiring peningkatan faksi volume gas, β . Namun, data α untuk pola aliran gas-cairan non-Newtonian menunjukkan angka yang lebih tinggi mendekati 1 karena sifat cairan *shear thinning* dengan viskositas yang menurun seiring peningkatan J_L menyebabkan panjang aksial gelembung meningkat. Sedangkan, beberapa data *void fraction* untuk pola aliran dua fase gas-cairan non-Newtonian menyebar di antara garis $\alpha = 0,833\beta$ dan garis data [17] dikarenakan pada pola aliran *short-slug* yang terbentuk, panjang aksial gelembung gas lebih pendek dibandingkan pola aliran *short-slug* pada aliran dua fase gas-air. Hal ini disebabkan viskositas cairan non-Newtonian yang lebih tinggi dibandingkan air sehingga gelembung gas lebih sulit berkembang dalam siput cairan.

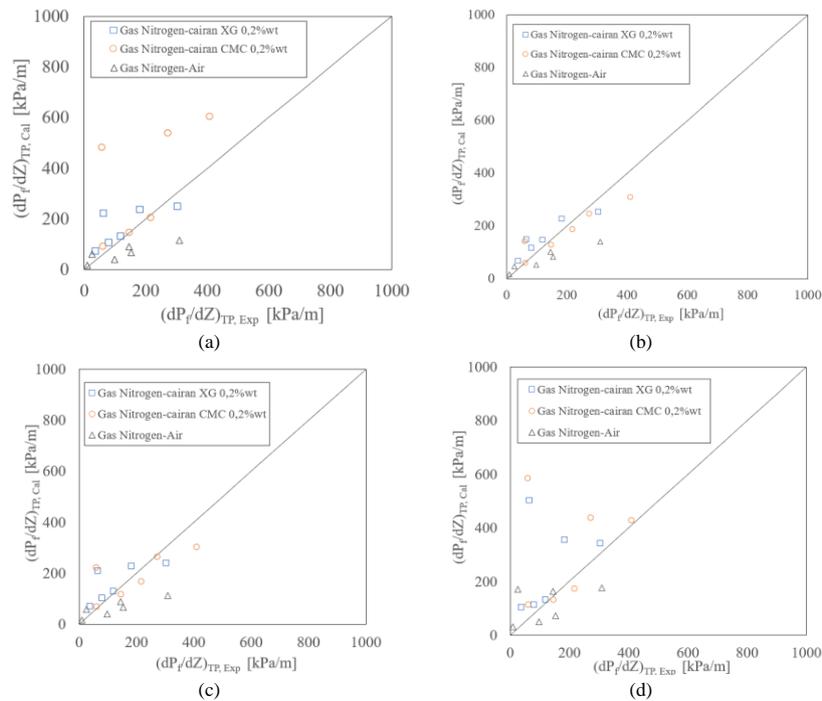
Gambar 13 menunjukkan grafik hubungan antara *pressure drop*, $(dP/dz)_{TP}$ aliran dua fase terhadap kecepatan superfisial cairan uji, J_L . *Pressure drop* aliran dua fase meningkat seiring peningkatan kecepatan superfisial cairan uji, J_L untuk setiap jenis cairan uji pada J_G yang konstan. Nilai *pressure drop* aliran dua fase

gas-CMC 0,2%wt dan XG 0,2%wt menunjukkan angka yang lebih tinggi dibanding aliran dua fase gas-air seiring dengan peningkatan J_L . Hal ini disebabkan oleh viskositas efektif dari cairan CMC 0,2%wt dan XG 0,2%wt menurun seiring dengan peningkatan J_L seperti pada Gambar 3, sehingga kecepatan gelembung gas meningkat dan menyebabkan peningkatan *pressure drop*.



Gambar 13. Grafik Hubungan antara *Pressure Drop*, $(dP/dZ)_{TP}$ Aliran Dua Fase terhadap Kecepatan Superfisial Cairan Uji, J_L pada J_G yang sama.

Perbandingan antara *pressure drop* aliran dua fase gas-cairan Newtonian/non-Newtonian yang dihasilkan dalam penelitian ini dan *pressure drop* yang didapat berdasarkan hasil perhitungan korelasi prediksi *pressure drop* dengan menggunakan konstanta, C dalam faktor pengali aliran dua fase dari peneliti-peneliti sebelumnya ditunjukkan pada Gambar 14. Korelasi konstanta, C dalam faktor pengali aliran dua fase yang didapatkan oleh [17] pada Gambar 14b menunjukkan kesesuaian yang paling baik dengan data *pressure drop* pola aliran dua fase dalam penelitian ini. Hal ini disebabkan oleh parameter-parameter sifat fisis dan reologi cairan uji menjadi faktor penentuan nilai C . Oleh karena itu, *pressure drop* aliran dua fase sangat bergantung pada sifat fisis dan reologi cairan uji.



Gambar 14. Grafik Hubungan antara *Pressure Drop* Aliran Dua Fase Eksperimental terhadap *Pressure Drop* Aliran Dua Fase Kalkulasi (a) Chisholm dan Laird (1958), (b) Kawahara et al. (2011), (c) Mishima dan Hibiki (1996), serta Feng dan Zhang (2021).

4. KESIMPULAN

Karakteristik pola aliran dua fase gas-cairan Newtonian/non-Newtonian dalam penelitian ini dianalisis menggunakan metode *image* dan *signal processing*. Berikut kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan analisis yang telah dilakukan:

1. Pola aliran yang terjadi dalam penelitian ini meliputi pola aliran *bubbly*, *short-slug*, *long-slug*, *slug-annular*, dan *churn*.
2. Peningkatan J_G pada J_L yang sama menyebabkan panjang aksial gelembung gas semakin meningkat dan sebaliknya.
3. Pada nilai J_G dan J_L yang sama untuk pola aliran *short* dan *long slug*, panjang aksial gelembung XG 0.2% wt paling pendek. Hal ini disebabkan viskositas XG 0.2% yang paling tinggi diantara kedua cairan uji lainnya, sehingga gelembung gas sulit masuk dan berkembang dalam siput cairan.
4. Pola aliran *churn* terjadi pada nilai J_G yang tinggi. Semakin tinggi J_L menyebabkan gangguan pada bagian ekor gelembung semakin meningkat sehingga ekor gelembung pecah menjadi gelembung-gelembung kecil dan mengalir di dalam siput cairan. Gangguan pada ekor gelembung pada pola aliran dua fase untuk pola aliran gas-XG 0.2% lebih kecil dari pada kedua aliran dua fase lainnya karena viskositas cairan XG 0.2% wt paling tinggi sehingga gelembung sulit terpecah.
5. Rasio panjang gelembung dengan lebar saluran memenuhi Persamaan Garstecki et al. (2006). Namun, data rasio panjang gelembung dengan lebar saluran untuk aliran dua fase gas-CMC 0.2% wt/XG 0.2% wt berada di bawah garis Persamaan Garstecki et al. (2006) karena peningkatan J_L menyebabkan viskositas cairan menurun dan panjang aksial gelembung gas meningkat.
6. Pola aliran *bubbly* dan *slug* memiliki nilai kecepatan gelembung yang paling rendah, sebaliknya untuk pola aliran *churn*. Hal ini disebabkan pola aliran *churn* terjadi pada nilai J_G dan J_L yang tinggi.
7. Seluruh transisi pola aliran yang terjadi memenuhi peta pola aliran dan garis transisi pola aliran dari penelitian sebelumnya yaitu Yang et al. (2010) dan Zhang et al. (2011). Transisi pola aliran dari *slug-annular* menjadi *churn* terjadi lebih singkat pada aliran dua fase XG 0.2% wt karena viskositas cairan XG 0.2% wt yang tinggi.
8. Data *void fraction* menyebar disekitar garis $\alpha = \beta$. Beberapa data *void fraction* untuk pola aliran dua fase gas-cairan non-Newtonian menyebar di antara garis $\alpha = 0.833\beta$ dan garis data Kawahara et al. (2002) dikarenakan pada pola aliran *short-slug* yang terbentuk, panjang aksial gelembung gas lebih pendek dibandingkan pola aliran *short-slug* pada aliran dua fase gas-air. Hal ini disebabkan viskositas cairan non-Newtonian yang lebih tinggi dibandingkan air sehingga gelembung gas lebih sulit berkembang dalam siput cairan.
9. *Pressure drop* aliran dua fase meningkat seiring peningkatan kecepatan superfisial cairan uji, J_L untuk setiap jenis cairan uji pada J_G yang konstan. Nilai *pressure drop* aliran dua fase gas-CMC 0.2% wt dan XG 0.2% wt menunjukkan angka yang lebih tinggi dibanding aliran dua fase gas-air seiring dengan peningkatan J_L .
10. Korelasi prediksi *pressure drop* oleh Kawahara et al. (2011) menunjukkan kesesuaian yang paling baik dengan data *pressure drop* pola aliran dua fase dalam penelitian ini karena memperhitungkan sifat fisis dan reologi cairan uji.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] ARAVAMUDHAN, A., DAISY M. RAMOS, AHMED A. NADA, SANGAMESH G. KUMBAR. 2014. *Natural Polymers: Polysaccharides and Their Derivatives for Biomedical Applications*. Natural and Synthetic Biomedical Polymers. Chapter 4, pp. 67-89. Elsevier Inc.
- [2] OMIDIAN, H., K. PARK. 2017. *Superporous Hydrogels for Drug Delivery Systems*. Comprehensive Biomaterials II, Vol. 1, pp. 688-704. Elsevier Inc.
- [3] BASU, P., ALEXANDROS REPANAS, ANAMIKA CHATTERJEE, BIRGIT GLASMACHER, U. NARENDRA KUMAR, I. MANJUBALA. 2017. PEO-CMC blend nanofibers fabrication by electrospinning for soft tissue engineering applications. *Materials Letters*, Vol. 195, pp. 10-13.
- [4] BUSH, M. B. 1989. "Application in Non-Newtonian Fluid Mechanics" In: Brebbia, Carlos A. (Ed). *Viscous Flow Applications*, Vol. 5, chapter 7. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- [5] YANG, Z. C., Q.C. BI, B. LIU, K. X. HWANG. 2010. Nitrogen/non-Newtonian fluid two-phase upward flow in non-circular microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 36, pp. 60-70.
- [6] ZHANG, T., B. CAO, Y. FAN, Y. GONTHIER, L. LUO, S. WANG. 2011. Gas-liquid flow in circular microchannel. Part I: Influence of liquid physical properties and channel diameter on flow patterns. *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, pp. 5791-5803.
- [7] MANSOUR, M.H., A. KAWAHARA, M. SADATOMI. 2015. Experimental investigation of gas-non-Newtonian liquid two-phase flows from T-junction mixer in rectangular microchannel. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 72, pp. 263-274.

- [8] KAWAHARA, A., MORI, A., LAW, W. Z., YONEMOTO, Y., MANSOUR, M. H., & SADATOMI, M. 2016. Two-phase flow Pressure Drop for Gas and *non-Newtonian* Liquid through Circular Microchannel. Jepang: *J-STAGE*.
- [9] FU, T., LIJUAN WEI, CHUNYING ZHU, & YOUGUANG MA. 2015. Flow patterns of liquid-liquid two-phase flow in non-Newtonian fluids in rectangular microchannels. *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 91, pp. 114-120.
- [10] KAWAHARA, A., YUKIHIRO YONEMOTO, YOICHI ARAKAKI. 2020. Pressure Drop for Gas and Polymer Aqueous Solution Two- Phase Flows in Horizontal Circular Microchannel. *Flow Turbulence and Combustion*. Springer Nature B.V. 2020.
- [11] FENG, KAI AND HUICHEN ZHANG. 2021. Pressure drop and flow pattern of gas-non-Newtonian fluid two phase flow in a square microchannel. *Chemical Engineering Reseach and Design*, Vol. 173, pp. 158-169.
- [12] SPISAK, W. 1986. *Two-phase flow of gas-highly viscous liquid*. Wroclaw Technical University, Poland.
- [13] THOME, JHON R. 2010. *Engineering Data Book III*. Wolverine Tube, Inc. Switzerland.
- [14] AGOSTINI, B., REVELLIN, R. DAN THOME, J. R. 2008, Elongated bubbles in microchannels. Part I: Experimental study and modeling of elongated bubble velocity, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 34, pp. 590-601.
- [15] CHISHOLM, D DAN A. D. K. LAIRD. 1958. Two-phase flow in rough tubes. *Trans. Am. Sot. Mech. Engrs*, Vol. 80, No. 2, pp. 276-283.
- [16] KAWAHARA, A., SADATOMI, M., NEI, K., MATSUO, H. 2011. Characteristics of Two-Phase Flows in a Rectangular Microchannel with a T-Junction Type Gas-Liquid Mixer. *Heat Transfer Engineering*, Vol. 32, pp. 585–594.
- [17] MISHIMA, K., HIBIKI, T., 1996. Some Characteristics of Air-Water Two-Phase Flow in Small Diameter Vertical Tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 22, pp. 703-712.
- [18] WIDYATAMA, A., OKTO DINARYANTO, INDARTO, DEENDARLIANTO. 2018. The development of image processing technique to study the interfacial behavior of air-water slug two-phase flow in horizontal pipes. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 59, pp. 168-180.
- [19] KUSUMANINGSIH, H., NURKHOLIS HAMIDI, ADRIAZKA FASA S. 2019. Pola Aliran Dua Fase Gas - Fluida Non-Newtonian melalui Belokan Pipa. *Jurnal Rekayasa Mesin*, Vol. 10, No. 3, pp. 317-326.
- [20] GARSTECKI, P., FUERSTMAN, M. J., STONE, H. A. & WHITESIDE, G.M. 2006. Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction-scaling and mechanism of break-up, *Lab on a chip*, Vol. 2, pp. 437-446.
- [21] KAWAHARA, A., MOHAMED H. MANSOUR, MICHIO SADATOMI, WEN ZHE LAW, HIROKI KURIHARA, HASLINDA KUSUMANINGSIH. 2015. Characteristics of gas–liquid two-phase flows through a sudden contraction in rectangular microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 66, pp. 243-253.