

Studi Eksperimental Pola Aliran Dua Fasa dan Karakteristik *Slug* pada Saluran Horizontal *Microchannel* Penampang Persegi*

M.R.A. Madani^{*,1}, H. Kusumaningsih² dan Deendarlianto¹

¹Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

²Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang, Indonesia

*E-mail: mrianalif00@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Pada peradaban saat ini, telah terjadi peningkatan yang signifikan dalam perkembangan dan penerapan teknologi saluran *microchannel* dikarenakan keunggulan serta manfaatnya. Salah satu aplikasinya adalah *liquid cooling system* yang terdapat pada CPU atau GPU komputer dan sistem pendingin reaktor mikro. Seiring berjalannya perkembangan teknologi, kebutuhan sistem pendingin pada ukuran yang lebih kecil seperti pada telepon genggam, tablet, dan laptop menjadi tantangan tersendiri. Studi eksperimental aliran dua fasa pada saluran *microchannel* dilakukan terhadap karakteristik pola aliran untuk fluida *newtonian* dan perbandingannya secara spesifik dengan fluida *non-newtonian* untuk karakteristik pola aliran yang terbentuk. Saluran *micro-fluidic chip* berpenampang persegi dengan ukuran 0,8 mm x 0,8 mm dilewati oleh fluida kerja cairan *newtonian* berupa Air dan *non-newtonian* berupa *Carboxymethyl Cellulose* (CMC) konsentrasi 0,2% serta 0,4% dengan nitrogen sebagai fluida kerja gas. Kecepatan superficial cairan yang digunakan adalah pada rentang $J_L = 0,05 - 1$ m/s dan gas $J_G = 0,07 - 8,594$ m/s. *Differential pressure transducer* dan *high speed camera* digunakan untuk menganalisis fenomena yang terjadi. Metode *image processing* digunakan dengan aplikasi MATLAB R2021a. Pola aliran yang teridentifikasi adalah *bubbly*, *slug*, *slug-churn*, *churn*, *wavy-annular*, dan *slug-annular*. Karakteristik *slug* seperti geometri dan waktu pembentukan dianalisa dengan membandingkan fluida kerja Air, CMC 0,2%, dan CMC 0,4% serta pengaruh variasi J_G dan J_L .

Kata kunci : *Microchannel, Aliran Dua Fasa, Pola Aliran, Fluida non-Newtonian, Slug.*

Abstract

In today's civilization, there has been a significant increase in the development and application of microchannel technology due to its advantages and benefits. One of the applications is the liquid cooling system found on the CPU or GPU of the computer and the micro reactor cooling system. As technology develops, the need for cooling systems in smaller sizes such as mobile phones, tablets, and laptops is a challenge. Experimental studies of two-phase flow in microchannels were carried out on the characteristics of the flow pattern for Newtonian fluids and their specific comparison with non-Newtonian fluids for the characteristics of the formed flow patterns. The micro-fluidic chip channel with a square cross section with a size of 0.8 mm x 0.8 mm is passed by the working fluid of Newtonian fluid in the form of water and non-Newtonian in the form of Carboxymethyl Cellulose (CMC) with a concentration of 0.2% and 0.4% with nitrogen as the fluid. gas work. The superficial velocity of the liquid used is in the range of $J_L = 0.05 - 1$ m/s and gas $J_G = 0.07 - 8.594$ m/s. Differential pressure transducer and high-speed camera are used to analyze the phenomena that occur. The image processing method is used with the MATLAB R2021a application. The identified flow patterns are bubbly, slug, slug-churn, churn, wavy-annular, and slug-annular. Slug characteristics such as geometry and formation time were analyzed by comparing the working fluids of Water, CMC 0.2%, and CMC 0.4% and the effect of J_G and J_L variations.

Keywords : *Microchannel, Non-Newtonian Fluid, Two-Phase Flow, Flow Pattern, Slug*

*Best paper form our partner Mechanical Engineering and Emerging Technologies National Conference (MEET-nConf) Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering Universitas Gadjah Mada

1. PENDAHULUAN

Pada zaman ini, telah terjadi peningkatan yang signifikan dalam perkembangan dan penerapan teknologi saluran *micro-fluidic chip* dikarenakan keunggulan serta manfaatnya. Selain itu, reduksi pada ukuran, bahan, dan fluida menjadi keunggulan tersendiri pada sistem mikrofluida ini. Mikrofluida adalah ilmu rekayasa teknologi yang digunakan untuk memproses dan memanipulasi fluida dalam saluran berukuran hingga mikrometer (lebih kecil dari 1 milimeter) (Whitesides, 2006). Peningkatan ini didukung dengan kebutuhan terhadap permintaan seiring perkembangan zaman di bidang teknologi. Beberapa penerapan dan perkembangan yang saat ini sedang meningkat dari segi permintaannya adalah kontrol kondisi produksi pada teknologi mikrokimia, sistem pendingin pada mikroreaktor, sistem pendingin mikro pada perangkat elektronik, dan lainnya. Maka dari itu, perkembangan penelitian pada sektor saluran *micro-fluidic chip* menjadi sangat penting untuk memenuhi permintaan saat ini dan mendukung keberlanjutan teknologi masa depan yang saat ini sudah dalam tahap finalisasi pengembangan.

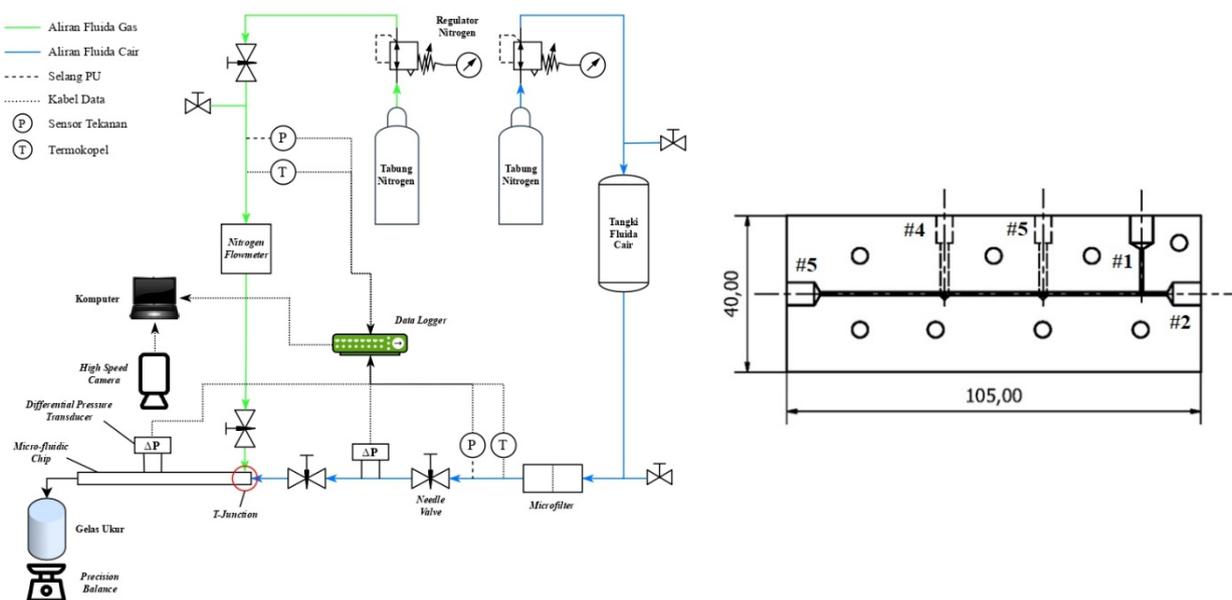
Penelitian ini akan menggunakan saluran mikro (*micro-fluidic chip*) sebagai penampang aliran dua fasa yaitu fasa cair dan fasa gas. Pengembangan *microchannel* terus dilakukan dengan pengaplikasiannya dalam dunia industri seperti pada *micro-electro-mechanical-system* (MEMS), reaktor skala mikro, dan *micro-heat exchanger*. Menurut Revellin dan Thome, *microtechnologies* diterapkan karena memiliki kapabilitas pendinginan yang lebih baik dibandingkan teknologi konvensional. Hal ini dikarenakan karakteristik dari teknologi mikro yang memiliki *heat flux dissipation* yang tinggi dan *heat transfer coefficient* yang lebih baik menyebabkan pola aliran yang terbentuk pada *microchannel* pun berbeda. Pola aliran yang terbentuk pada fenomena aliran dua fasa di *microchannel* lebih dipengaruhi oleh *surface tension force* daripada gravitasi yang dapat diabaikan. Selain itu, Revellin & Thome (2006) menambahkan bahwa teknologi mikro ini dapat mengurangi beban dari segi biaya dan tempat untuk menghasilkan *output power* yang sama.

Aliran dua fasa fluida *non-newtonian*-gas juga menarik banyak perhatian karena aplikasinya yang luas. Yang dkk. (2010) mengeksplorasi pengaruh karakteristik *non-newtonian* pada transisi pola aliran, dan mengembangkan peta pola aliran untuk saluran dengan diameter hidraulik 2,5, 2,886 dan 0,866 mm. Mansour dkk. (2015) melakukan percobaan pada aliran dua fasa fluida *non-newtonian*-gas dalam saluran mikro dengan diameter hidraulik 0,235 mm. Aliran *slug* dua fasa diperoleh, dan pengaruh sifat *non-newtonian* dari fasa cair pada penurunan tekanan dua fasa dan pola aliran dilaporkan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Aparatus Penelitian

Gambar 1 menunjukkan diagram skematik dari peralatan serta detail *micro-fluidic chip* yang digunakan pada fasilitas penelitian *microchannel*. *Micro-fluidic chip* yang digunakan memiliki penampang persegi dengan panjang seluruh sisi 0,8 mm dan memiliki 5 lubang. Fluida gas berupa nitrogen diinjeksikan melalui lubang nomor #1, sedangkan fluida cair melalui lubang nomor #2. Kemudian kedua fluida tersebut akan bercampur pada daerah observasi dan aliran fluida dua fasa akan keluar melalui lubang nomor #5. Lubang nomor #3 dan #4 terpisah sepanjang 25 mm digunakan untuk mengukur penurunan tekanan dengan menghubungkannya ke *differential pressure transducer*.



Gambar 1. Diagram Skematik Aparatus Penelitian dan *Micro-fluidic Chip*

Fluida gas berupa nitrogen diinjeksikan dari tabung nitrogen dan dialirkan menggunakan media pipa tembaga. *Flowmeter* gas nitrogen digunakan untuk mengatur debit fluida gas yang akan dialirkan. Sedangkan fluida cair ditampung pada sebuah tangki berbahan *stainless steel*. Tangki tersebut akan diberikan tekanan dari gas nitrogen untuk mendorong fluida cair menuju *micro-fluidic chip*. Debit fluida cair diatur menggunakan *needle valve*. Validasi yang dilakukan untuk memastikan J_L dan J_G sesuai dengan target adalah dengan menampung fluida cair yang keluar dari *micro-fluidic chip* untuk selanjutnya ditimbang menggunakan *precision balance* Sartorius Quintix224-1S berkapasitas 220 gram dengan ketelitian 0,0001 gram.

Untuk visualisasi pola aliran yang terjadi, digunakan *high speed camera* Phantom Miro S310 pada daerah observasi dengan resolusi 384 x 288 piksel dan *sample rate* 25000 fps. Terdapat lampu LED tepat di bawah *micro-fluidic chip* sebagai media penerangan.

Dengan menggunakan peralatan penelitian tersebut, pola aliran, panjang *slug*, kecepatan *slug* dalam aliran dua fasa dapat diobservasi. *Void fraction* aliran dua fasa diidentifikasi dengan panjang fasa gas dan cairan yang terbentuk. Sedangkan penurunan tekanan diidentifikasi berdasarkan voltase yang terbaca pada aplikasi LabView saat aliran sudah *steady* pada waktu observasi tertentu.

2.2. Fluida Uji

Aquadest dan *carboxymethyl cellulose* (CMC) dengan konsentrasi 0,2 serta 0,4 wt% digunakan pada penelitian ini. Larutan CMC dibuat dengan metode pencampuran *aquadest* dan bubuk CMC dengan perbandingan berat sesuai konsentrasi tertera hingga tercampur secara homogen. Larutan CMC akan memberikan karakteristik fluida *non-Newtonian*, dan hubungan antara *apparent viscosity* dengan *shear rate* dapat dinyatakan menggunakan persamaan (1).

$$\mu_a = k \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1} \quad (1)$$

dimana du/dy adalah *shear rate*, μ_a adalah *apparent viscosity*, k adalah *consistency coefficient*, dan n adalah *flow index*.

Namun, pada fluida *non-newtonian*, *apparent viscosity* mengalami penurunan seiring meningkatnya *shear rate*, yang membuktikan bahwa larutan CMC merupakan fluida *non-newtonian* dengan karakteristik *shear thinning*. Maka dari itu, *apparent viscosity* harus dihitung dengan mempertimbangkan aspek rasio saluran dan indeks aliran, $a=0,2121$ dan $b=0,6766$ melalui persamaan (2) yang ditemukan oleh (Shah dan London, 1978).

$$\mu_a = k \left(\frac{a + bn}{n} \right)^n \left(\frac{8J_L}{D_H} \right)^{n-1} \quad (2)$$

Tabel 1 menunjukkan properti dari fluida uji yang dipakai dan didapat dari data sekunder penelitian terdahulu milik (Yang dkk, 2010) dan (Kai Feng dan Huichen Zhang, 2021).

Tabel 1. Properties fluida kerja uji

Fluida	Masa Jenis ρ (kg/m ³)	Surface Tension σ (N/m)	k (Pa.s ⁿ)	n
Air	968,3	0,0721	0,00097	1,0
CMC 0,2%	970,3	0,0715	0,218	0,67
CMC 0,4%	987,7	0,071	0,704	0,65

2.3. Properti Aliran Fluida

Pada penelitian ini digunakan beberapa persamaan dalam mengidentifikasi karakteristik aliran fluida yang mengalir. Berikut ini penjelasan beberapa property yang dipakai. Kecepatan superfisial likuid dan gas dihitung dengan persamaan (3).

$$J_L = \frac{Q_L}{A} \quad J_G = \frac{Q_G}{A} \quad (3)$$

dimana Q adalah debit aliran, yaitu massa per satuan waktu. Sedangkan A adalah luas penampang saluran.

Friction factor aliran satu fasa diidentifikasi dengan persamaan (4).

$$f = \frac{D_H}{2\rho_L J_L^2} \left(\frac{dP_f}{dZ} \right)_{SP} \quad (4)$$

dimana D_H adalah diameter hidraulik, (dP_f/dz) adalah gradien penurunan tekanan fluida cair satu fasa, ρ_L adalah masa jenis likuid, dan J_L adalah kecepatan superfisial likuid.

Dalam perkembangan teknologi, khususnya *microchannel* dengan penampang persegi, *friction factor* dipengaruhi oleh aspek rasio saluran, yaitu λ . Maka dari itu, *friction factor* dapat dihitung dengan persamaan (5).

$$f = 24(1 - 1,3553\lambda + 1,9467\lambda^2 - 1,7012\lambda^3 + 0,9564\lambda^4 - 0,2537\lambda^5)/Re \quad (5)$$

Bilangan Reynolds untuk fluida *newtonian* diidentifikasi berdasarkan persamaan (6). Sedangkan untuk fluida *non-newtonian* didefinisikan dengan persamaan (7).

$$Re_L = \frac{D_H \rho_L J_L}{\mu_L} \quad Re_G = \frac{D_H \rho_G J_G}{\mu_G} \quad (6)$$

$$Re'_L = \frac{8^{1-n} D_H^n \rho_L J_L^{2-n}}{k} \left(\frac{n}{a + bn} \right)^n \quad (7)$$

Selanjutnya, bilangan yang berpengaruh pada penelitian ini adalah Bilangan Weber dan Bilangan Bond. Kedua bilangan tersebut dapat diidentifikasi dengan persamaan (8) dan (9).

$$We_L = \frac{\rho_L J_L^2 D_H}{\sigma} \quad We_G = \frac{\rho_G J_G^2 D_H}{\sigma} \quad (8)$$

$$Bo = \frac{(\rho_L - \rho_G) g D_H^2}{\sigma} \quad (9)$$

2.4. Karakteristik *Slug* dan *Void Fraction*

Karakteristik *slug* dianalisis dengan fokus pada panjang, kecepatan, dan proses pembentukan *slug* yang terobservasi pada variasi kecepatan superfisial tertentu. Panjang *slug* didefinisikan dari *slug nose* hingga *slug tail* yang terobservasi pada hasil visualisasi. Sedangkan kecepatan *slug* diidentifikasi menggunakan metode *image processing* dengan mengetahui perpindahan titik koordinat *slug nose* pada rentang *sample rate* tertentu serta *sample rate* yang digunakan saat proses visualisasi. Berikut ini adalah persamaan (10) dan (11) yang digunakan dalam analisis karakteristik *slug*.

$$L_S = |Y_t - Y_n| \left(\frac{LC_m}{LC_p} \right) \quad (10)$$

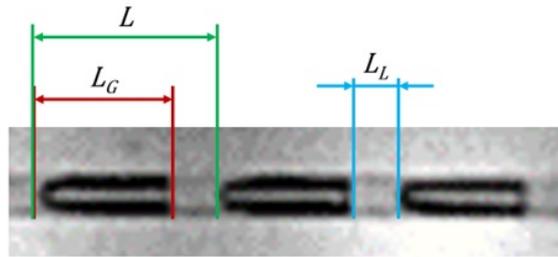
$$U_S = |Y_{n,FB} - Y_{n,FL}| \left(\frac{FR}{FB - FL} \right) \left(\frac{LC_m}{LC_p} \right) \quad (11)$$

Y_t adalah koordinat *slug tail* dan Y_n koordinat *slug nose* dalam piksel. LC_m adalah lebar saluran dalam meter, sedangkan LC_p merupakan lebar saluran dalam piksel. Selanjutnya, $Y_{n,FB}$ adalah koordinat awal *slug nose* pada *frame* ke-FB, sedangkan $Y_{n,FL}$ adalah koordinat akhir *slug nose* pada *frame* ke-FL. FR adalah *sample rate* yang digunakan. FB merupakan *frame* awal dan FL adalah *frame* akhir dalam analisis kecepatan *slug* tertentu.

Namun, pada kondisi tertentu, dalam mendefinisikan panjang *slug*, *slug nose* dan *slug tail* tidak terjadi pada satu *frame*. Maka dari itu, panjang *slug* ditentukan berdasarkan persamaan (12) oleh (Agostini dkk., 2008).

$$L_S = \frac{U_S (FB - FL)}{FR} \quad (12)$$

Setelah mengidentifikasi panjang *slug*, untuk mendefinisikan *void fraction*, diperlukan panjang fasa likuid dalam fenomena aliran dua fasa. Gambar 2. Menjelaskan metode dalam mendefinisikan panjang fasa likuid dan gas pada fenomena aliran dua fasa.

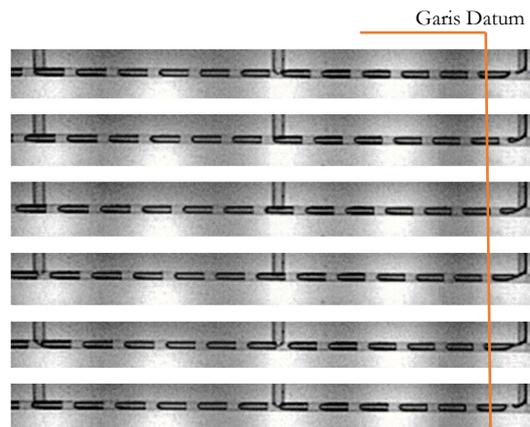


Gambar 2. Pembagian Fasa Likuid dan Gas Aliran Dua Fasa

L_G adalah panjang fasa gas yang nilainya sama dengan panjang *slug* (L_s), sedangkan L_L adalah panjang fasa likuid, dan pada akhirnya L merupakan akumulasi panjang fasa gas dan likuid. Maka dari itu, *void fraction* dapat didefinisikan berdasarkan persamaan (13).

$$\alpha = \frac{L_G}{L_G + L_L} \quad (13)$$

Untuk mengetahui perbedaan secara detail antara pembentukan *slug* pada aliran dua fasa Air-Nitrogen dengan aliran dua fasa CMC-Nitrogen dilakukan perhitungan waktu yang dibutuhkan bagi sebuah *slug* untuk terbentuk dari awal keluar saluran *inlet* gas sampai terputusnya *slug* dari saluran *inlet* gas. Perhitungan waktu ini dapat diketahui dengan membagi $\Delta F = FB - FL$ dengan *sample rate* atau *frame per second* (fps) yang digunakan dalam video. Dalam analisis ini, digunakan garis datum yang sama pada seluruh variasi penelitian baik kecepatan superfisial maupun likuid seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Proses Pembentukan Aliran *Slug*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

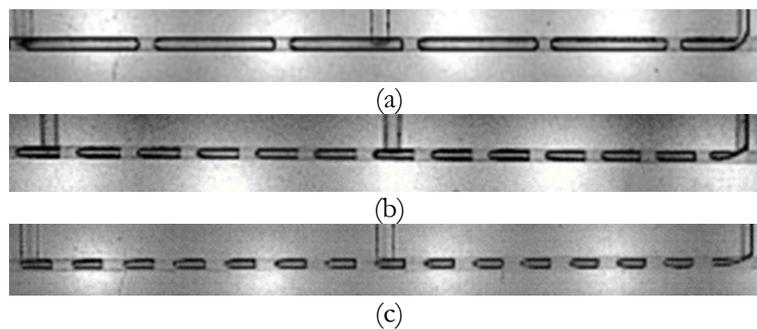
3.1. Pola Aliran Dua Fasa

Pola aliran dua fasa diidentifikasi pada area observasi, yaitu diantara kedua *pressure tap* ($Z = 40$ mm) untuk memastikan aliran yang mengalir adalah aliran *fully developed*.

Pada aliran Air-Nitrogen, pola aliran yang terbentuk adalah pola aliran *bubbly*, *slug*, *slug-annular*, *wavy-annular*, *slug-churn*, dan *churn*. Sedangkan pada aliran CMC-Nitrogen, pola aliran *bubbly* dan *wavy annular* tidak terbentuk. Pola aliran *bubbly* pada aliran Air-Nitrogen digantikan dengan pola aliran *slug* pada CMC-Nitrogen. Fenomena tersebut disebabkan viskositas yang dimiliki oleh fluida cair CMC.

Pola aliran *slug* dibandingkan pada variasi $J_L = 0,5$ m/s dan $J_G = 1,56$ m/s untuk ketiga fluida uji yang digunakan. Pada fluida *newtonian*, yaitu Air-Nitrogen, karakteristik *slug* yang terbentuk cenderung memiliki *slug nose* dan *slug tail* tumpul, tidak tajam dan juga tidak rata. Sedangkan pada fluida *non-newtonian*, CMC-Nitrogen, *slug nose*

yang terbentuk cenderung lebih tajam seperti peluru, namun *slug tail* lebih rata. Seiring peningkatan konsentrasi fluida cair CMC, *slug nose* yang terbentuk semakin tajam dan panjang, serta *slug tail* semakin rata. Selain itu, ketebalan *film* likuid mengalami peningkatan seiring pertambahan konsentrasi cairan. Gambar 4 merepresentasikan fenomena tersebut.



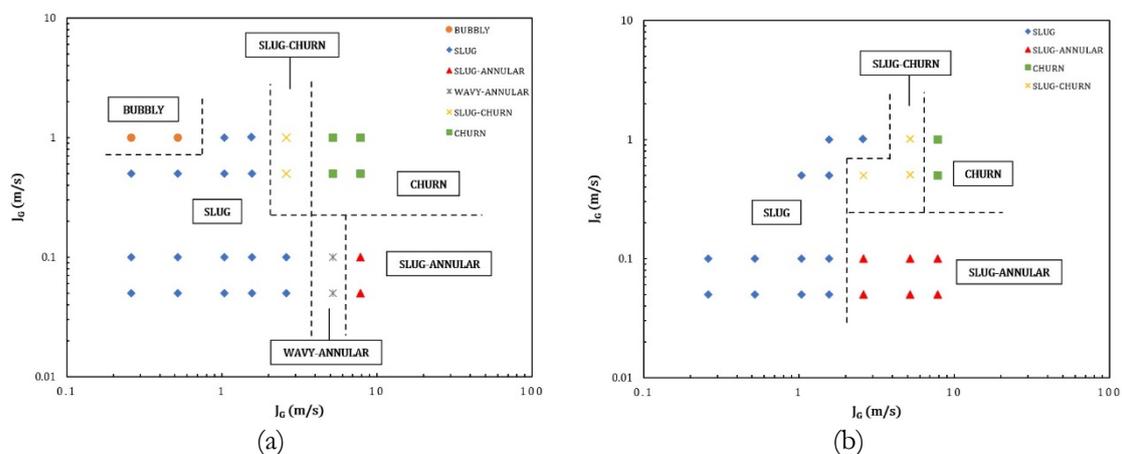
Gambar 4. Pola Aliran Slug $J_L = 0,5$ m/s dan $J_G = 1,56$ m/s ; (a) Air-Nitrogen ; (b) CMC 0,2%-Nitrogen ; (c) CMC 0,4%-Nitrogen

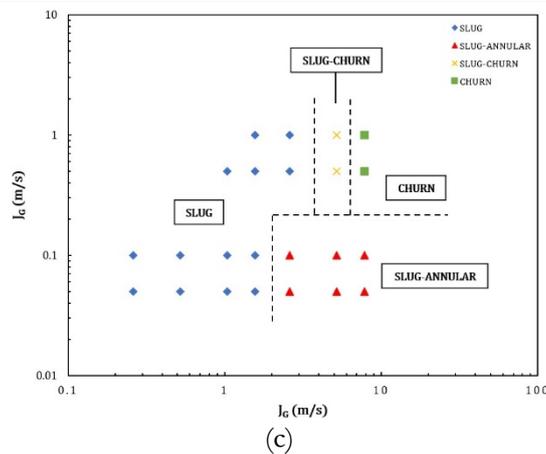
3.2. Peta Rezim Aliran

Gambar 5 menyajikan peta rezim aliran untuk ketiga fluida uji yang digunakan baik *newtonian* dan *non-newtonian*. Pada gambar tersebut, garis hitam mewakili batas transisi dan rezim aliran. Garis lurus digunakan untuk membedakan pola aliran dikarenakan perubahan yang terjadi pada batas transisi sangat kecil, dibandingkan garis miring atau kurva yang menggambarkan tren umum. Pola aliran yang diidentifikasi pada ketiga fluida uji mayoritas memiliki kesamaan, hanya saja pola aliran *bubbly* dan *wavy-annular* hanya terbentuk pada aliran Air-Nitrogen. Selain itu, terjadi perubahan signifikan pada transisi aliran *slug* ke *churn* untuk fluida cair yang berbeda. Transisi pola aliran *bubbly* menuju *slug* diidentifikasi dengan fasa gas yang pada awalnya memiliki lebar kurang dari D_H , menjadi seukuran D_H . Hal ini disebabkan debit aliran gas yang dapat menembus tegangan permukaan fluida cair meningkat.

Selanjutnya, transisi pola aliran dari *slug* ke *slug-annular* terjadi ketika J_G ditingkatkan. Hal ini menyebabkan fasa gas yang mengisi saluran meningkat, sehingga panjang *slug* juga mengalami peningkatan, bahkan pada suatu momen, dalam satu *frame* fasa gas tidak terputus. Namun, secara mayoritas, pola aliran yang terbentuk adalah *slug-annular*, yaitu terdapat pola aliran *annular* yang sering terputus diawali oleh *necking*. Pada aliran Air-Nitrogen, transisi dari pola aliran *slug* ke *slug-annular* diselingi oleh pola aliran *wavy-annular*. Pola aliran ini ditandai dengan pola aliran *annular* panjang yang mengalami gelombang *necking* berkelanjutan namun tidak sampai memutus fasa gas.

Transisi dari pola aliran *slug* ke *churn* diselingi oleh pola aliran *slug-churn*. Transisi pola aliran *slug* ke *slug-churn* diidentifikasi dengan munculnya pola aliran *slug* dan *churn* dalam satu fenomena. Pada *slug nose* dan *slug tail* terdapat gelembung yang terdispersi, namun batas antara *slug* masih terlihat jelas. Sedangkan pada transisi pola aliran *slug-churn* ke *churn* ditandai dengan menghilangnya batas *slug* dalam satu fenomena. Pola aliran *churn* cenderung memiliki karakteristik aliran yang panjang dan sesekali terputus oleh gelembung terdispersi.



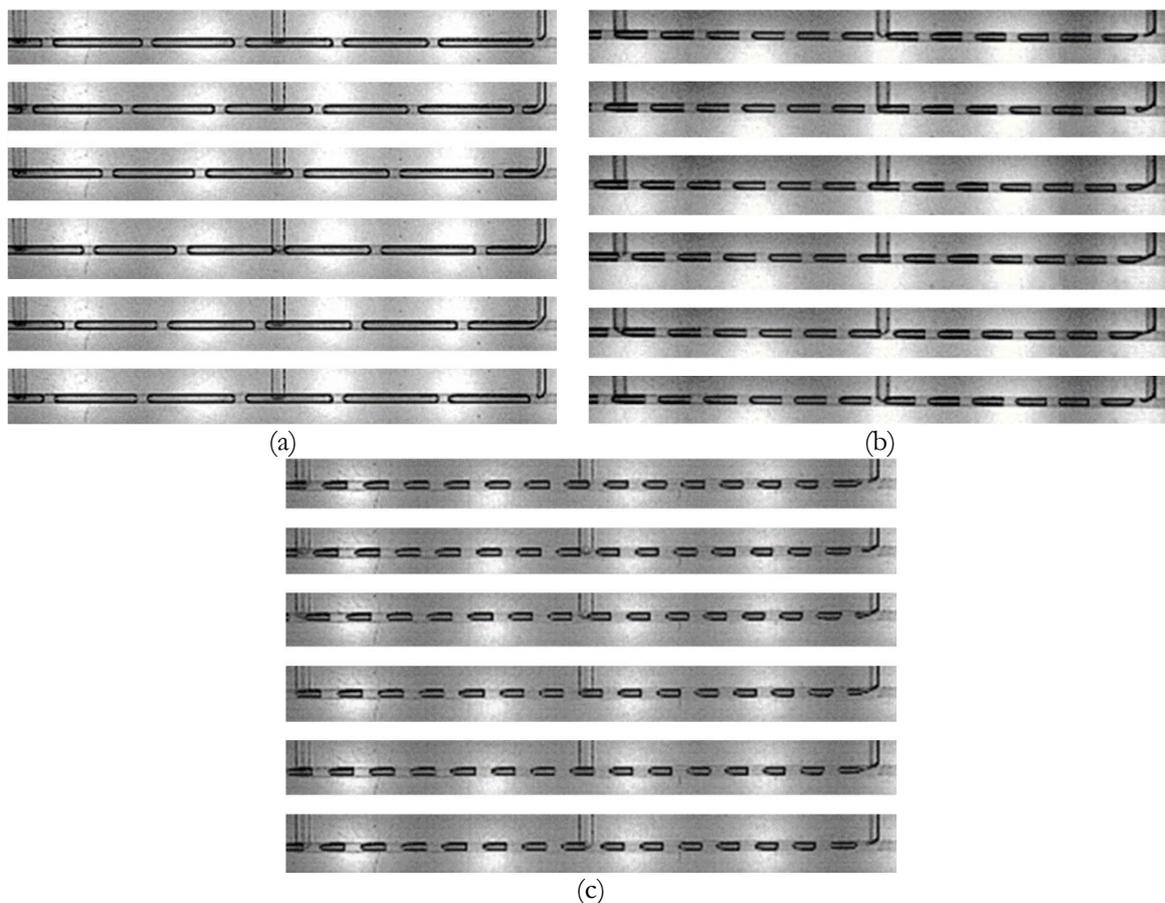


Gambar 5. . Peta Rezim Aliran (a) Air-Nitrogen ; (b) CMC 0,2%-Nitrogen ; (c) CMC 0,4%-Nitrogen

3.3. Proses Pembentukan Slug dan Void Fraction

Pada penelitian ini, mekanisme pembentukan *slug* yang terjadi adalah *breaking slug formation*. Proses ini terjadi ketika gas *slug* keluar dari saluran masuk gas dan mengalir dekat dengan bagian atas dinding saluran, yang kemudian membentuk satu titik kontak, sedangkan aliran likuid yang mendorong *slug* menuju ke depan lewat di bawah gas *slug* tersebut. *Slug* putus setelah gaya tegangan permukaan tidak dapat lagi menahan *slug* yang terhubung dengan saluran masuk gas, yang kemudian mengakibatkan *necking*.

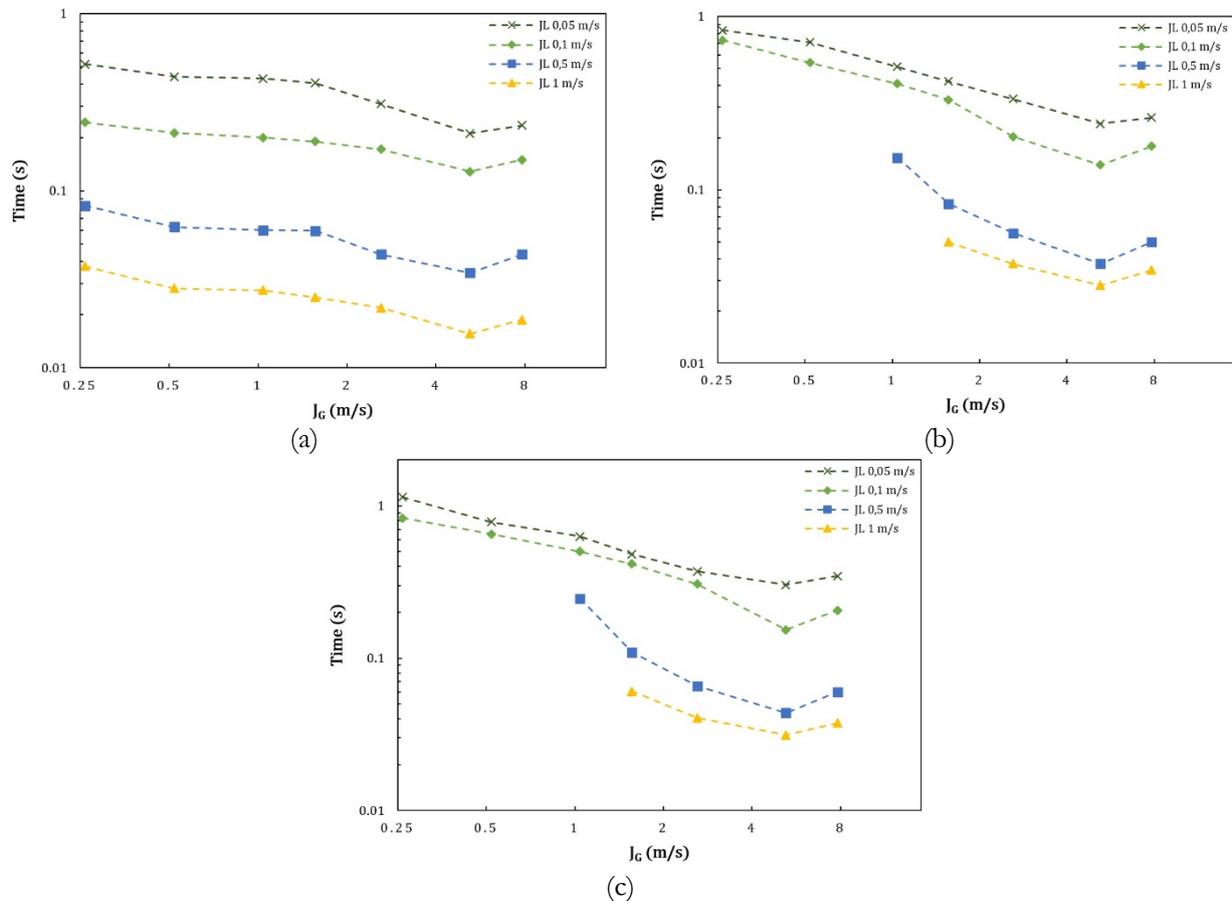
Selain itu, proses pembentukan *slug* juga terjadi ketika gas *slug* keluar dari saluran inlet gas dan mengalir dekat dengan bagian atas dinding saluran yang kemudian terjadi *necking* dan putus setelah gaya tegangan permukaan tidak dapat lagi menahan *slug* yang terhubung dengan saluran inlet gas seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Proses Pembentukan Slug pada $J_L = 0,5 \text{ m/s}$ dan $J_G = 1,56 \text{ m/s}$ (a) Air-Nitrogen ; (b) CMC 0,2%-Nitrogen ; (c) CMC 0,4%-Nitrogen

Untuk mengetahui perbedaan secara detail antara pembentukan *slug* pada aliran dua fasa Air-Nitrogen dengan aliran dua fasa CMC-Nitrogen dilakukan perhitungan waktu yang dibutuhkan bagi sebuah *slug* untuk terbentuk dari awal keluar saluran inlet gas sampai terputusnya *slug* dari saluran inlet gas. Pada Gambar 7, dapat disimpulkan waktu yang dibutuhkan mengalami penurunan seiring peningkatan J_G . Namun, terjadi peningkatan setelah J_G melewati 5 m/s. Hal ini dikarenakan panjang *slug* yang terbentuk mengalami peningkatan signifikan karena mengalami transisi pola aliran.

Selain itu, peningkatan viskositas akan menyebabkan waktu yang dibutuhkan dalam pembentukan *slug* mengalami peningkatan. Hal ini dapat dibuktikan pada titik awal garis dengan tanda $J_L = 0,05$ m/s pada grafik CMC 0,4% lebih tinggi dibandingkan dengan grafik CMC 0,2%.

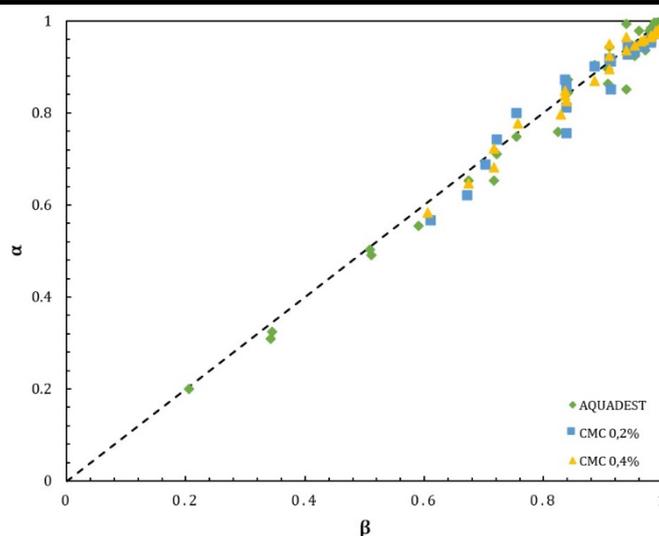


Gambar 7. Waktu Pembentukan Slug Terhadap Peningkatan J_G (a) Air-Nitrogen ; (b) CMC 0,2%-Nitrogen ; (c) CMC 0,4%-Nitrogen

Perbedaan signifikan lainnya adalah fluktuasi waktu yang dibutuhkan bagi satu *slug* untuk terbentuk sempurna pada aliran dua fasa CMC-Nitrogen jauh lebih signifikan daripada Air-Nitrogen. Hal ini tentunya disebabkan oleh perbedaan jenis cairan dimana CMC yang merupakan cairan *non-newtonian shear thinning* dimana viskositas efektif dan tegangan permukaan akan berubah seiring dengan gradien perubahan tekanan, sedangkan cairan air yang merupakan cairan *newtonian* dimana tidak akan terjadi perubahan viskositas maupun tegangan permukaan apabila diberikan tekanan. Oleh sebab itu, waktu yang dibutuhkan oleh satu *slug* pada aliran dua fasa Air-Nitrogen cenderung lebih stabil.

Pada penelitian ini, data *void fraction* (α) dibandingkan dengan *homogenous void fraction* (β) yang merupakan rasio J_G terhadap J_T . Data hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *void fraction* yang diidentifikasi, sangat dekat dengan korelasi *homogenous void fraction model* ($\alpha = \beta$).

Berdasarkan Gambar 8, dapat disimpulkan bahwa peningkatan kecepatan superfisial gas akan memberikan peningkatan yang signifikan terhadap nilai (β). Pada sisi lain, ketika J_L dijaga konstan, sementara J_G ditingkatkan, maka pola aliran dua fasa yang terbentuk akan lebih didominasi oleh fasa gas. Hal ini menyebabkan panjang fasa likuid yang terbentuk akan semakin menurun, sehingga nilai *void fraction* yang teridentifikasi akan mendekati 1.

Gambar 8. Perbandingan Data *Void Fraction* terhadap *Homogenous Void Fraction Model*

4. KESIMPULAN

Studi penelitian eksperimental dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik aliran dua fasa yang mengalir pada saluran berukuran mikro. Pada penelitian ini digunakan tiga jenis fluida cair untuk membandingkan pengaruh karakteristik fluida cair baik *newtonian* dan *non-newtonian*, maupun perbandingan konsentrasi cairan.

Karakteristik unik pada pola aliran *slug* berhasil diidentifikasi pada aliran dua fasa CMC-Nitrogen. Peningkatan konsentrasi CMC berdampak pada *slug nose* yang semakin tajam, *slug tail* semakin rata, dan ketebalan film likuid semakin tebal. Selain itu, peta rezim aliran, khususnya pada transisi pola aliran dari *slug* ke *slug-churn* dan *slug-churn* ke *churn* mengalami pergeseran garis transisi. Peningkatan konsentrasi larutan, akan menyebabkan garis transisi bergeser ke arah kanan (J_G lebih tinggi). Hal ini disebabkan adanya perbedaan karakteristik reologi dan *surface tension*.

Perbedaan jenis fluida cair dan konsentrasi, berpengaruh pada waktu pembentukan *slug*. Pada fluida *newtonian*, peningkatan J_G cenderung memberikan perubahan yang stabil. Sedangkan pada fluida *non-newtonian*, perubahan yang terjadi lebih fluktuatif dikarenakan viskositas efektif dipengaruhi oleh gradien perubahan tekanan. Void fraction pada penelitian ini nilainya sangat dekat dengan nilai homogenous void fraction model. Peningkatan J_G pada J_L yang konstan, akan memberikan transisi pola aliran menuju pola aliran yang didominasi oleh fasa gas. Hal ini menyebabkan panjang fasa likuid menurun, sehingga nilai *void fraction* akan mendekati 1.

5. DAFTAR PUSTAKA

- A. Kawahara, Y. Yonemoto, Y. Arakaki, 2020, Pressure drop for gas and polymer aqueous solution two-phase flows in horizontal circular microchannel, *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 105, No. 4, pp. 1325–1344.
- C. Choi, M. Kim, 2011, Flow pattern based correlations of two-phase pressure drop in rectangular microchannels, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, No. 6, pp. 1199–1207.
- D. B. Weibel, G. M. Whitesides, 2006, Applications of microfluidics in chemical biology, *Current Opinion in Chemical Biology*, Vol. 10, No. 6, pp. 584–591.
- D. Chisholm, 1967, A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow, Pergamon Press Ltd, USA.
- K. Feng, H. Zhang, 2021, Pressure drop and flow pattern of gas-non-Newtonian fluid two-phase flow in a square microchannel, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 173, pp. 158–169.
- K. Mishima, T. Hibiki, 1996, Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 4, pp. 703–712.
- K. Yamamoto, S. Ogata, 2014, Drag reduction of slug flows in microchannels by modifying the size of T-junctions, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 62, pp. 67–72.
- L. Wojtan, R. Revellin, J. R. Thome, 2006, Investigation of saturated critical heat flux in a single, uniformly heated microchannel, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, No. 8, pp. 765–774.
- M. H. Mansour, A. Kawahara, M. Sadatomi, 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.

- M. T. Kreutzer, F. Kapteijn, J. A. Moulijn, J. J. Heiszwolf, 2005, Multiphase monolith reactors: Chemical reaction engineering of segmented flow in microchannels, *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 22, pp. 5895–5916.
- R. K. Shah, A.L. London, 1978, Rectangular Ducts,” in *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*, Elsevier.
- R. Revellin, B. Agostini, J. R. Thome, 2008, Elongated bubbles in microchannels. Part II: Experimental study and modeling of bubble collisions, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 34, No. 6, pp. 602–613.
- R. W. Lockhart and R. C. Martinelli, 1949, Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 45, pp. 39–48.
- S. Saisorn, S. Wongwises, 2015, Adiabatic two-phase gas-liquid flow behaviors during upward flow in a vertical circular micro-channel,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 69, pp. 158–168.
- W. Kozicki, C. H. Chou, C. Tiu, 1966, Non-Newtonian flow in ducts of arbitrary cross-sectional shape, Pergamon Press Ltd., USA.
- Y. W. Hwang, M. S. Kim, 2006, The pressure drop in microtubes and the correlation development,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 11–12, pp. 1804–1812.
- Z. C. Yang, Q. C. Bi, B. Liu, K. X. Huang, 2010, Nitrogen/non-Newtonian fluid two-phase upward flow in non-circular microchannels, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 36, No. 1, pp. 60–70.