

Studi Eksperimental Pengaruh Convective Heat Transfer terhadap *Pressure Drop* pada Aliran Dua Fase Gas-Cair Fluida Newtonian dan *non-Newtonian* dalam *Square Microchannel*

L.A. Huda^{1,*}, H. Kusumaningsih², Deendarlianto¹, Indarto¹

¹Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia

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

E-mail: luqman.al.huda@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Penelitian terkait dua fase gas-cair dalam saluran mikro telah banyak dilakukan. Namun, keterlibatan fluida non-newtonian serta kalor dalam aliran dua fase suatu saluran mikro masih terbatas, terutama pemecahan masalah pada pendinginan perangkat mikro. Permintaan terhadap efisiensi aliran fluida dua fase dalam mengikat kalor menjadi parameter penting dalam keberhasilan sistem pendinginan. Tujuan penelitian ini membandingkan beda tekanan antara fluida newtonian dan *non-newtonian* berdasarkan perbedaan viskositas pada aliran dua fase. Penelitian juga menambahkan perlakuan kalor konveksi dan mengamati pada dua area, yaitu sebelum (*upstream*) dan sesudah (*downstream*) terdampak kalor. Jenis fluida cair newtonian yang digunakan yaitu aquadest dan fluida non-newtonian yaitu *Carboxymethyl Cellulose* (CMC wt 0,4%), sedangkan fluida gas yang digunakan adalah nitrogen. Dimensi diameter hidrolis saluran sebesar 0,8 mm. Kecepatan superficial cairan divariasikan mulai 0,1 m/s hingga 1 m/s, sedangkan kecepatan superficial gas divariasikan mulai 0,26 m/s hingga 7,81 m/s. *High speed video camera* digunakan untuk merekam pola aliran, panjang dan kecepatan gelembung terbentuk. Hasil penelitian aliran nitrogen-aquadest membentuk pola aliran *bubbly*, *slug*, *churn* dan *slug-annular*, sedangkan nitrogen-CMC wt 0,4% membentuk *slug*, *churn* dan *slug-annular*. Perbedaan viskositas aquadest memberikan beda tekanan lebih rendah daripada CMC wt 0,4%. Penambahan kalor mampu memberikan beda tekanan yang lebih rendah diiringi dengan penurunan viskositas cairan.

Kata kunci : *Aliran Dua Fase, Microchannel, Non-Newtonian, Kalor Konveksi*

Abstract

The research on the two-phases gas-liquid in microchannel has been conducted so far. However, the non-Newtonian fluids and heat transfer involvement in the microchannel study is a major concern, especially solving problems in cooling microdevices. The effectiveness demand for absorbing heat becomes an important parameter. The study purpose is to compare differential pressure drop between viscosities of Newtonian and non-newtonian fluids in two-phase flow. The study added convective heat treatment and observed at two different areas, namely before (*upstream*) and after (*downstream*) affected by heat. The Newtonian fluids used distilled water and non-Newtonian fluids was Carboxymethyl Cellulose (CMC wt 0.4%) flowing with nitrogen gas. The hydraulic diameter of square microchannel is 0.8 mm. The liquid superficial velocity varied from 0.1 m/s to 1 m/s, while the gas superficial velocity varied from 0.26 m/s to 7.81 m/s. A high speed video camera recorded the flow pattern, length, and bubble velocity. The flow pattern results of nitrogen-aquadest fluid formed was bubbly, slug, churn and wavy-annular, while nitrogen-CMC wt 0.4% formed slug, churn and slug-annular. The viscosity difference of distilled water gave a lower pressure than CMC wt 0.4%. The heat addition provided a lower pressure difference accompanied by decreasing liquid viscosity.

Keywords: *Two-phase flow, Microchannel, Non-Newtonian, Convective Heat*

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan pendinginan pada komponen mikro menuntut perkembangan penelitian aliran dua fase. Keterbatasan ruang dan tingkat efisiensi pengikat kalor dengan memanfaatkan aliran fluida dua fase pada perangkat kecil menjadi faktor utama pengembangan penelitian saluran pada skala mikro. Aplikasi penelitian pada perangkat kecil dapat ditemukan pada reaksi kimia (Anna, 2016), bioteknologi (Song dkk, 2006), teknik pengolahan pangan (Joensson dkk, 2012), dan fabrikasi material (Skurtys dan Aguilera, 2008). Aliran dua fase mampu menimbulkan fenomena fisis yang lebih kompleks daripada satu fase. Interaksi antarmuka gas-cair secara signifikan mampu membentuk pola aliran, karakteristik aliran baru dan mempengaruhi gradien beda tekanan. Perbedaan interaksi antarmuka gas-cair berupa gelembung pada saluran mikro ditinjau dari *liquid film thickness* antara fluida newtonian dan non-newtonian menjadi landasan utama penelitian aliran dua fase terus berkembang.

Seiring pengaplikasian aliran dua fase pada perangkat mikro, penelitian telah berkembang mengarah pada saluran berskala mikro. Sebuah saluran diklasifikasikan berukuran mikro apabila diameter dalam saluran berukuran dibawah 1 mm. Dalam literatur lain, saluran dijabarkan berskala mikro apabila memenuhi bilangan Bond atau *Eotvos number* (Eo) di bawah 4 (Kew and Cornwell, 1997). Namun Ullmann dan Brauner (2006, 2007) mengajukan nilai Eo untuk batas antara saluran berskala mikro dan mikro sebesar 0,2 berbasis hasil penelitian Brauner dan Moalem-Maron (1992) dan Triplett dkk (1999). Nilai Eo ditentukan dari perbandingan percepatan gravitasi terhadap kekuatan tegangan permukaan cair. Pada *microchannel*, faktor kekuatan tegangan permukaan lebih mendominasi daripada percepatan gravitasi.

Penelitian *microchannel* dimulai dengan melibatkan cairan newtonian dengan gas. Fluida newtonian memiliki karakteristik tegangan geser yang akan berbanding lurus terhadap gradien kecepatan aliran yang tegak lurus terhadap bidang gesernya. Oleh sebab itu, viskositas fluida newtonian cenderung konstan meskipun terdapat gaya yang bekerja. Dalam perkembangannya, fluida non-newtonian digunakan untuk mengganti peran fluida cair newtonian.

Fluida non-newtonian dipengaruhi oleh perubahan laju geser, tegangan geser dan temperatur. Viskositas fluida non-newtonian akan berubah tidak linier apabila dikenai gaya geser, sehingga hukum Newton terkait viskositas tidak berlaku. Karakteristik perubahan viskositas terhadap laju geser yang bergantung terhadap perubahan waktu diklasifikasikan menjadi *ingham plastic*, *shear thinning* dan *shear thickening* (Bagaskoro, 2021). *Bingham plastic* merupakan fluida non-newtonian yang akan berperilaku layaknya fluida newtonian apabila dikenai laju geser minimum sebelum mulai mengalir. Fluida non-newtonian akan berperilaku *shear thinning* (*pseudo-plastic*) ditandai dengan penurunan viskositas seiring dengan bertambahnya laju geser. Sebaliknya, fluida non-newtonian akan berperilaku *shear thickening* (*dilatant*) dengan peningkatan viskositas seiring dengan bertambahnya laju geser. Keterbatasan ruang pergerakan aliran dan tingkat efisiensi mengikat kalor oleh cairan newtonian menjadi dasar diusulkannya penerapan fluida non-newtonian sebagai substitusi fluida newtonian tersebut.

Penelitian pola aliran dalam *microchannel* telah dilakukan dalam beberapa penelitian. Suo dan Griffith (1964) mempelopori kajian aliran pada *microchannel* aksis horizontal pada saluran *circular* berdiameter 2,59 mm dan 1,02 mm dengan fluida gas nitrogen dan helium terhadap fluida cair air, *heptane* dan *octane*. Pola aliran terbentuk mendapatkan *slug flow*, *annular flow*, dan *bubbly-slug flow*. Triplett dkk (1999) melanjutkan penelitian *microchannel* aliran dua fase udara-air pada saluran berpenampang *circular* dan segitiga. Pola aliran teramati diperoleh *bubbly*, *churn flow*, *slug-annular flow* dan *annular flow*. Coleman dan Garimella (1999) mengkaji dampak diameter penampang pada transisi pola aliran dua fase. Hasilnya, seiring diameter penampang semakin kecil, maka transisi pola aliran berlaku ditentukan oleh kombinasi kecepatan superfisial gas dan cairan. Hasil lain menunjukkan *surface tension* juga turut menjadi parameter utama dalam transisi pola aliran. Hal tersebut juga didukung oleh penelitian Yang dan Shieh (2001). Serizawa dkk (2002) menguji *microchannel* berpenampang *circular* berdiameter 20 μm , 25 μm dan 100 μm . Dengan memanfaatkan *high speed video camera*, pola aliran tertangkap terdiri *dispersed bubbly*, *gas slug*, *liquid ring*, *liquid lump*, *annular*, *frothy*, *rivulet*, *liquid droplet* dan pola aliran sendiri bernama *skewes barbecue shaped flow*. Pola aliran terbentuk tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan dinding dalam saluran dari saluran mikro.

Pemanfaatan substitusi dari fluida cair newtonian menjadi non-newtonian dalam saluran mikro dimulai oleh Yang dkk (2010) pada *microchannel* vertikal non-*circular* dengan tiga jenis variasi diameter hidraulik dengan penampang saluran berbentuk *square* dan *triangular*. Dengan memanfaatkan variasi diameter hidrolis, fluida cair kerja yaitu *Carboxymethyl Cellulose* (CMC) wt 0,4%, *Polyacrylamide* (PAM) wt 0,2% dan *Xanthan Gum* (XG) wt 0,2% dengan campuran fluida gas nitrogen. Pola aliran terbentuk terdiri *slug flow*, *churn flow* dan *annular flow*. Selain itu, terbentuk pola aliran baru yang dinamakan *chained bubble/slug flow* pada fluida PAM. Besarnya *rheological properties*, parameter k dan n , pada setiap fluida cair non-newtonian dan bentuk penampang *microchannel* menjadi parameter utama terhadap pola aliran terbentuk. Hasil lain penelitian Zhang dkk (2011) pada aliran dua fase *microchannel* menunjukkan seiring mengecilnya diameter hidraulis saluran mikro maka area transisi aliran dari *slug* ke *bubbly* dan *churn* ke *annular* berlangsung pada kecepatan superfisial fluida, gas dan cair, lebih tinggi. Apabila viskositas cairan semakin tinggi maka membutuhkan kecepatan superfisial fluida, gas dan cair, lebih tinggi juga. Sebaliknya, jika

surface tension fluida cair menurun maka transisi pola aliran berlangsung lebih cepat pada kecepatan superfisial fluida yang rendah.

Selain pola aliran dan fluida non-newtonian, penelitian *microchannel* telah melibatkan fluida cair dalam sistem pendinginan dengan fungsi sebagai penyerap kalor. Rao dkk (1981) menguji sifat viskositas dinamik dengan perlakuan kalor pada cairan CMC dengan variasi konsentrasi. Hasil menunjukkan penurunan *specific viscosity* CMC berlangsung secara linier seiring dengan penurunan konsentrasi CMC ketika dipanaskan hingga 121,1 °C selama 10 menit. Selain itu, Saisorn dkk (2014) karakteristik transfer kalor aliran udara-air pada *rectangular microchannel* dengan panjang dan lebar berturut-turut 0,45 mm 0,41 mm. Beban transfer kalor non-*boiling* dijaga tetap pada 80 W. Hasilnya, aliran gelembung berukuran pendek mampu meningkatkan penguatan transfer kalor dari pada aliran gelembung berukuran panjang. Selain itu, *Nusselt number* meningkat seiring dengan naiknya bilangan Reynolds. Aliran dua fase gas-cair lebih baik dalam meningkatkan transfer kalor daripada aliran satu fase cair. Hal tersebut juga didukung oleh Suwankamnerd dan Wongwises (2015) pada jenis aliran serupa bahwa dependensi performa penyerapan kalor terhadap *Nusselt number* cenderung konstan pada bilangan Reynolds rendah hingga sedang. Aliran dua fase cenderung lebih baik dalam mengikat kalor daripada aliran satu fase pada aliran terpisah.

Efektivitas fluida non-newtonian dalam mengganti peran fluida newtonian diukur melalui penurunan beda tekanan pada saluran. Kawahara (2002) menguji beda tekanan pada aliran terpisah menggunakan parameter Lockhart-Martinelli. Hasilnya, *two-phase frictional multiplier* berkorelasi dengan baik terhadap model aliran terpisah dengan parameter Lockhart-Martinelli dengan *margin error* $\pm 10\%$. Kaji dkk (2005) menguji *frictional pressure drop* pada variasi *small tube*. Hasil menunjukkan *two-phase frictional pressure drop* sangat berkaitan dengan korelasi Chisholm dan Laird yang relatif terhadap kecepatan superfisial gas (J_G) dan cairan (J_L). Untuk kondisi kecepatan superfisial gas dan cairan terendah, *frictional pressure drop* bergantung pada jenis pola aliran daripada kondisi aliran laminar atau turbulen.

Berdasarkan pemaparan latar belakang sebelumnya, literatur penelitian tentang keterlibatan aliran dua fase fluida non-newtonian masih sangat terbatas. Selain itu, dampak penambahan kalor pada dinding saluran cenderung memberikan pengaruh perubahan sifat fisis viskositas fluida non-newtonian. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk mengukur penurunan tekanan aliran dua fase gas-cair antara fluida newtonian (aquadest) dan non-newtonian (CMC wt 0,4%) pada *microchannel* dengan sebelum (*upstream*) dan sesudah (*downstream*) perlakuan penambahan kalor konveksi. Selain itu, dilakukan pemetaan pola aliran, kecepatan gelembung dan panjang gelembung yang dibandingkan dengan penelitian sebelumnya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengobservasi karakteristik aliran dua fase gas-cair dengan membandingkan kemampuan viskositas fluida cair newtonian dan non-newtonian saat mengikat kalor konveksi dengan peninjauan pola aliran terbentuk dari *differential pressure drop* yang terukur. Penelitian menggunakan saluran mikro dengan berpenampang persegi (*square*) dengan diameter hidrolis 0,8 mm. Dalam pengolahan *image processing technique*, diperlukan parameter pendukung diantaranya kecepatan superfisial aliran dua fase sesuai pada persamaan 1 dan kecepatan gelembung pada kondisi ideal sesuai persamaan 2 (Kusumaningsih dkk, 2019).

$$J = J_G + J_L \quad (1)$$

$$U_G = J \quad (2)$$

dimana U_G merupakan kecepatan gelembung, J merupakan kecepatan superfisial aliran, J_L merupakan kecepatan superfisial fluida cair dan J_G adalah kecepatan superfisial fluida gas. Selanjutnya, bilangan Reynolds merupakan parameter menunjukkan perbandingan kecepatan aliran fluida dan dimensi diameter penampang yang dilewati aliran fluida terhadap viskositas dinamik fluida. Bilangan Reynolds antara cairan dan gas dihitung secara terpisah sesuai persamaan 3 dan 4 berturut-turut.

$$Re_L = \frac{\rho_L J_L D_H}{\mu_L} \quad (3)$$

$$Re_G = \frac{\rho_G J_G D_H}{\mu_G} \quad (4)$$

dimana Re merupakan bilangan Reynolds, ρ merupakan massa jenis fluida dan D_H merupakan diameter hidrolis saluran dan μ adalah viskositas dinamik fluida. Parameter Lockhart-Martinelli (X) merupakan metode

perhitungan *frictional pressure drop* aliran terpisah pada saluran *microchannel*. Persamaan parameter Lockhart-Martinelli ditunjukkan dengan bilangan tak berdimensi sesuai persamaan 5.

$$X^2 = \frac{(\Delta P)_L}{(\Delta P)_G} \quad (5)$$

dimana $(\Delta P)_L$ merupakan beda tekanan saat cairan mengalir satu fase dalam saluran dan $(\Delta P)_G$ merupakan beda tekanan saat gas mengalir sendirian dalam saluran. Suatu fluida mengalir dalam saluran mikro dengan aksis horizontal mengandung penurunan tekanan gesekan (ΔP_f) dan penurunan tekanan akselerasi (momentum) (ΔP_{acc}) . Gesekan tersebut diakibatkan kontak fluida dengan dinding saluran, sedangkan momentum (akselerasi) menimbulkan rugi tekanan seiring meningkatnya kecepatan aliran. Dalam saluran beraksis horizontal, beda tekanan yang disebabkan beda elevasi dan gravitasi setara nol karena saluran masuk dan saluran keluar memiliki ketinggian yang sama. Persamaan beda tekanan terukur yang memenuhi ditunjukkan oleh persamaan 6.

$$\Delta P_{measured} = \Delta P_f + \Delta P_{acc} \quad (6)$$

Besarnya penurunan tekanan akibat gesekan (*frictional pressure drop*) sangat bergantung pada parameter Lockhart-Martinelli dan *two-phase flow multiplier* (Φ_L). Penentuan *frictional pressure drop* ditunjukkan melalui persamaan 7 (Lockhart dan Martinelli, 1949).

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_{TP} = \Phi_L^2 \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_L \quad (7)$$

dimana $\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_{TP}$ merupakan gradien penurunan tekanan pada aliran dua fase dan $\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_L$ merupakan gradien penurunan tekanan aliran cairan satu fase. Nilai *two-phase flow multiplier* (Φ_L) ditentukan melalui persamaan 8 yang diajukan oleh Chisholm dan Laird (1958).

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (8)$$

dengan C merupakan konstanta Chisholm dan Laird bernilai antara 5 hingga 20 yang ditentukan apakah kondisi aliran tergolong laminar atau turbulen. Dalam saluran mikro, besarnya bilangan Reynolds gas dan cair dipastikan akan dibawah 2000, sehingga konstanta C bernilai 5 (Mansour dkk, 2015). Zuber dan Findlay (1965) mengajukan formulasi kecepatan gelembung dengan model *drift flux* yang ditunjukkan dalam persamaan 9.

$$u_G = C_o J + V_{GJ} \quad (9)$$

dengan V_{GJ} merupakan *drift velocity* yang nilainya dapat ditiadakan pada saluran beraksis horizontal. Mishima dan Hibiki (1996) mengajukan nilai C_o sesuai dengan persamaan 10.

$$C_o = 1,2 + 0,51 \exp(-0,691 D_H) \quad (10)$$

dengan D_H merupakan diameter dalam saluran. Selanjutnya, Garstecki dkk (2006) menjabarkan bilangan tak berdimensi antara panjang gelembung (L_G) terhadap lebar saluran (w) yang dikorelasikan terhadap rasio debit gas (Q_G) terhadap cairan (Q_L) sesuai pada persamaan 11.

$$\frac{L_G}{w} = \left(1 + \frac{Q_G}{Q_L}\right) \quad (11)$$

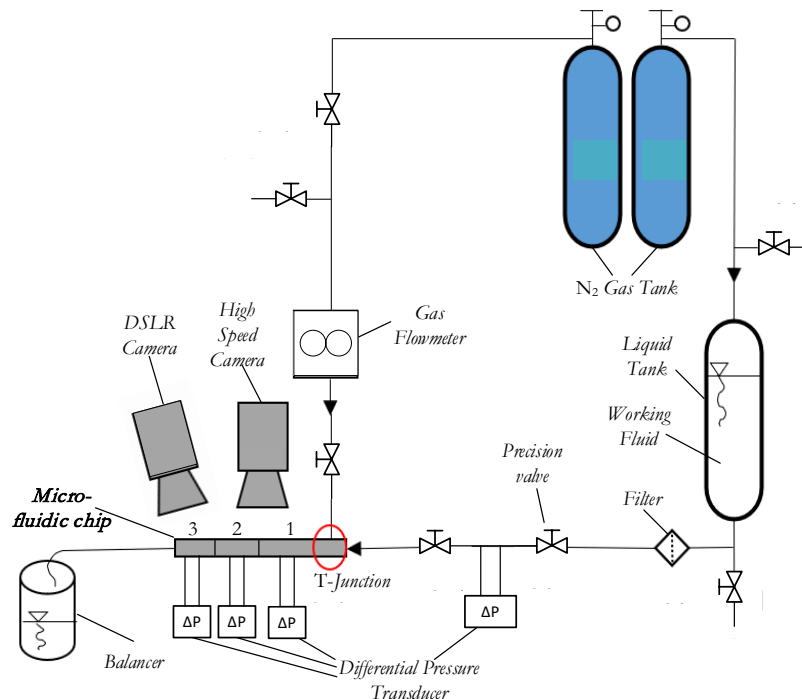
Penelitian aliran dua fase ini menggunakan fluida gas berjenis nitrogen murni, sedangkan fluida cair newtonian berwujud aquadest dan fluida cair non-newtonian berwujud *Carboxymetil Cellulose* dengan konsentrasi 0,4% (CMC wt 0,4%). Aliran fluida gas dan cair newtonian atau gas dan cair non-newtonian mengalir secara simultan dalam saluran. CMC merupakan zat aditif polimer turunan selulosa yang telah digunakan dalam berbagai industri, diantaranya cairan tambahan pengeboran, pengental produk kosmetik, industri tekstil, kertas, keramik dan makanan (Benchabane, 2006). Pemilihan CMC dengan konsentrasi 0,4% sebagai cairan non-newtonian dipertimbangkan mengingat konsentrasi tersebut telah diteliti dan didukung acuan literatur yang lengkap.

Tabel 1. Sifat fisis gas nitrogen

Jenis Gas	Nitrogen
Rumus Molekul	N ₂
Berat Molekul	28
Densitas (kg/m ³)	1,251
Jenis Gravitasi (m/s ²)	0,96737
Titik Didih (°C)	-195,79
Titik Lebur (°C)	-210

Tabel 2. Sifat fisis fluida kerja cair pada 22 °C

Jenis Cairan	Aquadest	CMC
Rumus Molekul	H ₂ O	(NaC ₈ H ₁₁ O ₇) _m
Berat Molekul (g/mol)	18	700.000
Konsentrasi	-	0,4
Tegangan Permukaan (N/m)	0,07269	0,07152
Parameter Reologi		
	k	0,00097
	n	1,0
Viskositas (mPa.s)	μ_{ϕ}	1,004
	μ_{ω}	-
		1



Gambar 1. Skema instalasi penelitian

Tabel 1 menunjukkan sifat fisis dari fluida gas nitrogen dan Tabel 2 menunjukkan sifat fisis fluida cair antara aquadest dan CMC wt 0,4% pada temperatur 22 °C. Pada Tabel 1, pemilihan gas nitrogen sebagai media gas inert dengan pertimbangan kemampuan gas nitrogen untuk tidak mudah bereaksi dengan unsur lain serta cenderung tidak berwarna, tidak berbau dan tidak berasa. Selain itu dengan massa jenis gravitasi gas yang rendah, pengaruh gravitasi gas nitrogen sangat kecil terhadap kekuatan tegangan permukaan cairan dan sesuai untuk penelitian *microchannel*. Pada Tabel 2 menunjukkan sifat fisis viskositas aquadest dan CMC wt 0,4%. Notasi μ_{ϕ} menunjukkan viskositas maksimum pada saat laju geser yang rendah, notasi μ_{ω} menunjukkan viskositas minimum pada saat laju geser yang tinggi dan notasi k dan n mengindikasikan konstanta tak berdimensi yang ditentukan sifat reologi cairan yang diperoleh melalui sebuah eksperimen dengan *power law model*. Nilai viskositas CMC yang digunakan dalam penelitian dalam Tabel 2 masih mengacu terhadap penelitian yang dilakukan Benchabane dan Bekkour (2008) dan belum dilakukan validasi melalui uji eksperimen karena keterbatasan peralatan yang terdapat dalam laboratorium. Ketika melewati area *heating*, sifat fisis pada Tabel 2 akan mengalami perubahan seiring dengan jumlah kalor yang diikat oleh cairan, baik aquadest dan CMC. Cairan CMC cenderung akan berperilaku *shear thinning* seiring dengan

perubahan laju geser. Jarak antar molekul cairan akan semakin renggang, sehingga tegangan geser akan semakin kecil dan memperbesar laju geser. Oleh sebab itu, pergerakan molekul akan semakin aktif dan berdampak pada penurunan viskositas cairan.

Aliran dua fase akan mengalir sepanjang saluran mikro dengan melewati tiga area, yaitu area *upstream*, *heating* dan *downstream* yang ditunjukkan oleh nomor 1, 2 dan 3 secara berturut-turut pada Gambar 1. Media pengamatan dan observasi aliran dua fase dilakukan pada *micro-fluidic chip*. *Microchannel* yang digunakan memiliki penampang persegi (*square*) dengan diameter hidrolis (D_H) sebesar 0,8 mm dan konstan sepanjang area saluran. Gambar 1 menunjukkan skema instalasi penelitian yang dilakukan. Aliran gas nitrogen diatur dengan debit aliran pada *flowmeter*, sedangkan aliran cairan diatur dengan membuka *precision valve* atau *needle valve*. Kecepatan superfisial aliran cairan diketahui melalui fluks massa aliran dua fase yang tertampung selama 25 detik melalui neraca (*balancer*). Dengan mengetahui fluks massa, massa jenis, dan luas penampang saluran, maka akan diperoleh kecepatan aliran cairan terukur (J_L).

Area *upstream* merupakan area awal dimana terjadi campuran aliran gas dan cair pada *T-junction*. Area *upstream* dan *downstream* terbuat dari jenis material *acrylic*. Pengamatan pada area *upstream* dilakukan pada area setelah aliran mengalir 25 mm dari *T-junction*. Aliran dua fase telah terbentuk *fully developed flow* yang ditentukan oleh parameter Bilangan Reynolds cairan dan diameter hidrolis saluran. Dengan tercapainya panjang *fully developed flow* maka fluktuasi beda tekanan di dekat *T-junction* akibat mekanisme percampuran gas dan cair tidak akan berlangsung. Perbedaan tekanan diukur sepanjang 25 mm dengan meletakkan sensor *differential pressure transducer* (DPT) pada kedua ujung saluran. Keseluruhan sensor DPT yang terpasang pada penelitian menggunakan model *Validyne* dengan kapasitas pengukuran $5,5 \pm 0,05$ kPa. Pengolahan *image processing technique* dilakukan pada area *upstream* yang tertangkap oleh *high speed video camera* untuk mendapatkan pola aliran, kecepatan gelembung, panjang gelembung dan fraksi hampa. *High speed video camera* yang digunakan adalah model Phantom Miro Lab 310. Pengolahan *image processing technique* dilakukan dengan Software Matlab dengan algoritma yang telah dipersiapkan untuk mendapatkan visualisasi pola aliran, kecepatan gelembung dan panjang gelembung. Visualisasi aliran diperoleh dengan mengatur tingkat kecerahan dan menghilangkan *noise* untuk mendapatkan kualitas gambar yang lebih tajam terutama pada sisi antarmuka dua fase. Penentuan kecepatan gelembung dilakukan dengan menentukan perubahan jarak satu ujung gelembung (*slug nose*) terhadap perpindahan dua *frame* pada selang waktu tertentu. Panjang gelembung ditentukan melalui penentuan titik ujung dan ekor sebuah gelembung terhadap perubahan *frame* dalam selang waktu tertentu.

Di sisi lain, area *heating* merupakan saluran terbuat dari jenis material tembaga dan diberikan perlakuan kalor, sehingga aliran dua fase mengalir akan mengikat kalor saat kontak dengan dinding saluran mikro. Kalor yang diberikan masih dalam batas kalor konveksi, sehingga fase cairan tidak mengalami perubahan fase dari cair menjadi gas selama melewati area *heating*. Kalor konveksi yang diserap oleh aliran akan mempengaruhi temperatur di dinding sekitar area *heating*. Perubahan temperatur dinding luar pada area *heating* akan diukur melalui sensor temperatur. Sensor temperatur yang digunakan merupakan termokopel tipe-T dengan kapasitas pengukuran -200 °C hingga 350 °C. Desain *micro-fluidic chip* terutama area *heating* memiliki tiga *hole tap* sebagai rumah peletakan sensor termokopel. Masing-masing *hole tap* berisi satu sensor termokopel dengan jarak antar *hole tap* sepanjang 30 mm. Ujung sensor termokopel tipe-T diposisikan menyentuh di dinding luar saluran area *heating* dengan ketebalan 1 mm terhadap diameter dalam saluran. Untuk mencegah terjadi perubahan fase cairan dan tetap pada fenomena kalor konveksi, beda temperatur dinding aliran dua fase dengan kalor konveksi diatur tidak lebih dari 5 °C terhadap tanpa perlakuan kalor saat pengambilan data. Selain sensor termokopel, juga diletakkan sebuah sensor DPT melalui dua ujung sensor pengamatan yang terpasang pada *hole tap* dengan selisih panjang 60 mm. Kemampuan pengikatan kalor konveksi pada penelitian dibahas secara kualitatif dan terbatas melalui selisih temperatur dinding saat pengambilan data untuk memberikan dampak pada karakteristik aliran dua fase.

Terakhir, area *downstream* merupakan aliran setelah terdampak *convective heat*. Fenomena aliran pada *downstream* ditangkap dengan kamera *Digital Single-Lens Reflex* (DSLR). Karena keterbatasan kemampuan penangkapan dan kualitas gambar kamera DSLR, maka pengolahan gambar untuk mendapatkan pola aliran, kecepatan gelembung, panjang gelembung dan fraksi hampa pada area *downstream* tidak dapat dilakukan. Fenomena yang tertangkap melalui kamera DSLR dijabarkan secara morfologi pola aliran terbentuk.

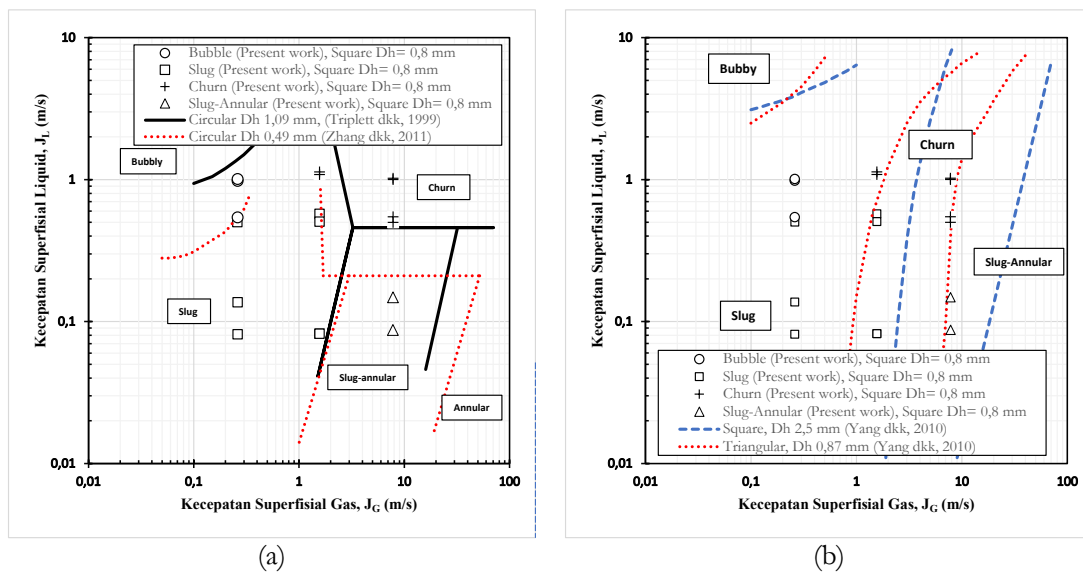
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengolahan data dengan menggunakan *image processing technique*, dapat diperoleh pola aliran dari kombinasi kecepatan superfisial gas (J_G) dan kecepatan superfisial cairan (J_L). Selain pola aliran, diperoleh juga kecepatan gelembung dan panjang gelembung. Selain itu, disajikan penjabaran beda tekanan terukur.

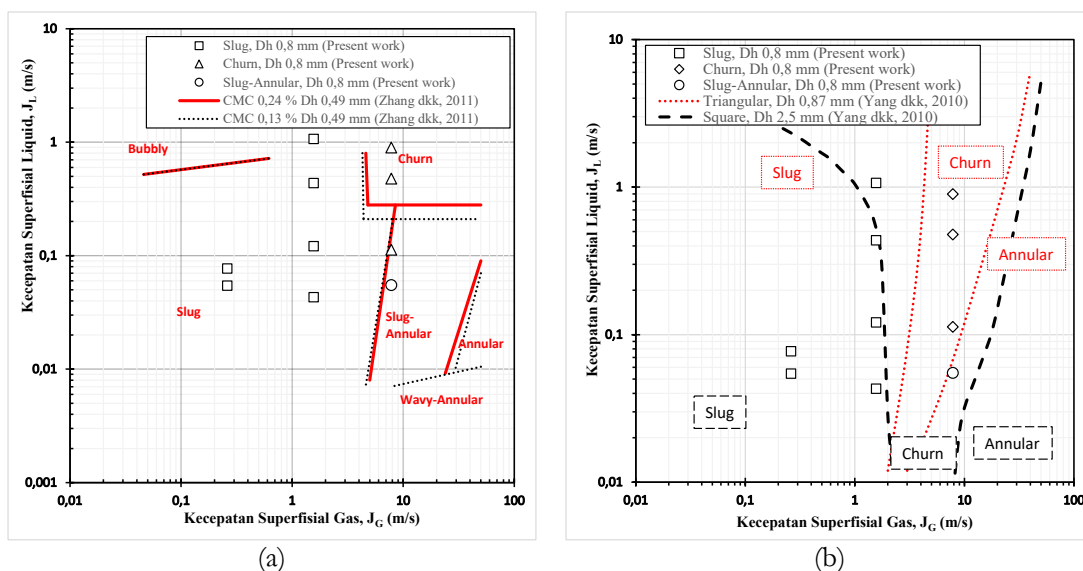
3.1. Pola Aliran Dua Fase

Berdasarkan hasil eksperimen pengamatan pola aliran untuk jenis fluida nitrogen-aquadest, pola aliran terbentuk terdiri dari aliran *bubbly*, *slug*, *slug-churn* dan *wavy-annular*. Aliran *bubbly* diidentifikasi dengan kemunculan

gelembung berukuran kecil dengan panjang gelembung lebih kecil dari diameter hidrolis yang berlangsung pada J_G rendah dan J_L tinggi. Selain pola aliran *bubbly*, penelitian juga menangkap pola aliran *slug* yang diidentifikasi dengan kemunculan gelembung dengan panjang gelembung lebih besar dari diameter hidrolis yang berlangsung pada kombinasi J_G rendah hingga sedang dan J_L rendah hingga sedang. Pengamatan pola aliran juga menunjukkan pola aliran *churn* yang ditunjukkan dengan panjang gelembung yang variatif dan berubah-ubah terhadap gelembung yang lain yang berlangsung pada J_G tinggi dan J_L tinggi. Terakhir, hasil eksperimen menangkap pola aliran *slug-annular* yang diidentifikasi melalui gelembung/*slug* yang berukuran panjang yang bergelombang secara mendadak mengalami gangguan pemutusan gelembung (Triplett dkk, 1999). Di sisi lain, jenis aliran dua fase nitrogen-CMC wt 0,4% pada eksperimen menangkap pola aliran *slug*, *churn* dan *slug-annular*. Morfologi pola aliran antara *upstream* dan *downstream* tidak mengalami perubahan yang signifikan. Namun bentuk dari *slug nose* di area *downstream* cenderung lebih runcing daripada area *upstream*, selain itu panjang gelembung semakin panjang dan lebih pipih. Hal tersebut mengindikasikan penyerapan kalor oleh CMC wt 0,4% memberikan dampak pada viskositas CMC yang semakin menurun. Sehingga kemampuan kecepatan gas mampu lebih mudah menembus tegangan permukaan cairan.



Gambar 2. Peta pola aliran dua fase nitrogen-aquadeast terhadap penelitian (a) Triplett dkk (1999), Zhang dkk (2011) dan (b) Yang dkk (2010)



Gambar 3. Peta pola aliran dua fase nitrogen-CMC wt 0,4% terhadap penelitian (a) Zhang dkk (2011) dan (b) Yang dkk (2010)

Gambar 2 menunjukkan hasil dari pemetaan pola aliran dalam korelasi kombinasi kecepatan superficial gas (J_G) dan cair (J_L) untuk aliran dua fase nitrogen-aquadeast. Pemetaan dilakukan untuk area *upstream*, sedangkan untuk

area *downstream* tidak dipetakan karena keterbatasan kemampuan penangkapan kamera. Peta pola aliran dikomparasikan dengan penelitian sebelumnya, Tripplett dkk (1999), Zhang dkk (2011) dan Yang dkk (2010). Zhang dkk (2011) dan Tripplett dkk (1999) melakukan pengujian aliran dua fase nitrogen-aquadest pada *microchannel* berpenampang *circular* dengan diameter hidrolis 0,49 mm dan 1,07 mm secara berturut-turut. Kemiripan bentuk saluran yang menyerupai penelitian ini menjadi acuan utama dalam membandingkan pola aliran. Pola aliran penelitian ini cenderung mendekati dan saling mendukung dengan yang dilakukan pada dua penelitian tersebut. Yang dkk (2010) menguji pola aliran dua fase dengan variasi diameter hidrolis yang mendekati penelitian ini. Perbedaan batas transisi pola aliran pada Gambar 2 cenderung berbeda jauh, namun hasil eksperimen pola aliran penelitian cenderung mendukung dua peta pola aliran yang telah diajukan.

Di sisi lain, hasil eksperimen aliran nitrogen-CMC wt 0,4% menunjukkan pola aliran *slug*, *churn* dan *slug-annular*. Pola aliran eksperimen tersebut telah dipetakan dalam Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan peta pola aliran nitrogen-CMC wt 0,4% berdasarkan eksperimen dengan mendapatkan pola aliran *slug*, *churn* dan *slug-annular*. Pada penelitian J_G rendah dan J_L tinggi, penelitian tidak menangkap pola aliran *bubbly*. Pada rentang tersebut, kecepatan superficial gas rendah tidak mampu menembus tegangan permukaan saat kecepatan superficial cairan tinggi pada percampuran *T-junction*. Penentuan batas transisi pola aliran dibandingkan dengan penelitian Zhang dkk (2011) dan Yang dkk (2010). Zhang dkk (2011) melakukan penelitian nitrogen-CMC wt 0,4% dengan variasi konsentrasi cairan CMC yang mendekati penelitian ini. Peta pola aliran terbentuk antara kedua penelitian memiliki kemiripan dan saling melengkapi kombinasi J_G dan J_L . Yang dkk (2010) juga melakukan pengujian dengan fluida nitrogen-CMC wt 0,4% dengan penampang saluran segitiga (*triangular*) beraksis vertikal dengan diameter hidrolis 0,87 mm. Kemiripan diameter hidrolis terhadap penelitian ini mampu memberikan visual pada batas transisi pola aliran *slug* menuju *slug-annular*. Perbedaan area transisi aliran *churn* dan aliran *slug-annular* hampir memiliki kesamaan morfologi aliran sehingga sulit untuk dibedakan. Berdasarkan hasil eksperimen pola aliran dengan frekuensi luas area kontak antarmuka fase terendah, pola aliran terbaik adalah *slug-annular* baik untuk aliran nitrogen-aquadest dan aliran nitrogen-CMC wt 0,4%. Aliran nitrogen-CMC wt 0,4% cenderung lebih unggul dalam proses peralihan transisi pola aliran dari *slug* menuju *slug-annular* pada rentang J_G yang lebih singkat daripada aliran nitrogen-aquadest. Perbedaan karakteristik dasar viskositas antara aquadest dengan CMC membuat efek *viscous* CMC mampu lebih mudah meminimalisir gaya geser antarmuka fase dan mengalir dalam kondisi laminar.

3.2. Panjang Gelembung

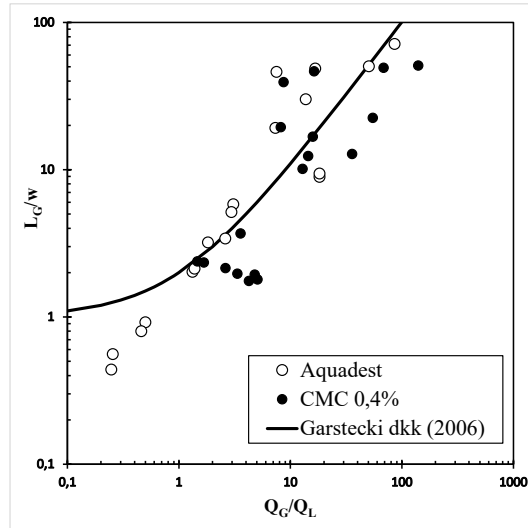
Panjang gelembung diukur dengan menentukan perubahan pergerakan *bubble nose* pada satuan *frame* yang berbeda melalui *image processing technique*. Gambar 4 menunjukkan hubungan rasio debit aliran gas dan cair terhadap panjang gelembung terbentuk pada area *upstream*. Panjang gelembung terukur dikorelasikan terhadap persamaan Garstecki dkk (2006) karena memiliki kesamaan mekanisme pembentukan dan pemutusan gelembung yang terbentuk dari percampuran aliran dua fase melalui *T-junction*. Kemunculan gelembung (*slug nose*) didasari pada kemampuan tegangan normal antarmuka yang tegak lurus terhadap arah aliran cairan. Tegangan normal akan terakumulasi akibat resistansi tegangan permukaan cairan. Sesaat setelah tegangan normal antarmuka melebihi tegangan permukaan cairan maka *slug nose* akan terbentuk. Tegangan normal mengalir secara kontinyu dan berkurang seiring terkonversi dalam kecepatan. Pemutusan gelembung pada *T-junction* diakibatkan lompatan tegangan normal yang telah berkurang di bawah tegangan permukaan cairan.

Debit aliran memiliki hubungan yang kuat terhadap kecepatan superficial fluida. Baik fluida cair aquadest atau CMC wt 0,4% memiliki tren panjang gelembung yang sama. Seiring dengan meningkatnya J_L dengan J_G yang dijaga konstan, maka panjang gelembung semakin pendek. Selain itu, seiring meningkatnya J_G , maka panjang gelembung akan semakin panjang. Untuk jenis pola aliran *bubbly* dan *slug*, panjang gelembung cenderung rata karena keseragaman panjang gelembung dan morfologi *slug nose* dan *slug tail* yang konstan. Berbeda dengan aliran *slug-annular*, kemunculan *liquid hold-up* secara tiba-tiba dalam saluran mampu memutus dan menyambung panjang gelembung satu sama lain. Ketidakkonsistensian tekanan geser antarmuka fase sepanjang saluran *upstream* menjadi faktor timbulnya *liquid hold-up*. Selain itu, pemisahan *dispersed bubble* berukuran kecil dari *slug tail* mempengaruhi fraksi volume gas suatu gelembung. Diameter *dispersed bubble* yang cenderung kecil menyebabkan *dispersed bubble* bergerak lebih lambat daripada pergerakan gelembung. Hal tersebut memicu pemisahan dari *tail nose* dan bergabung dengan *slug nose* yang lain.

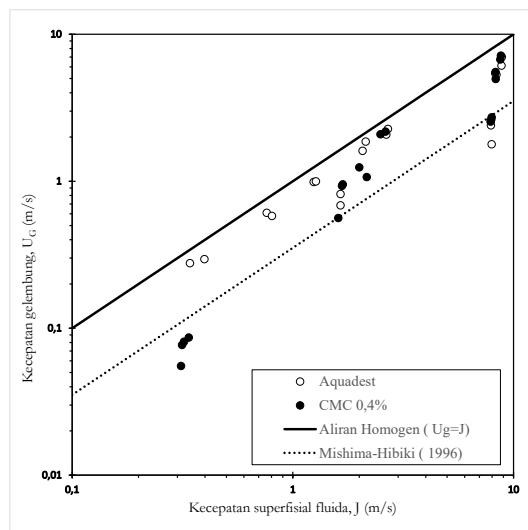
3.3. Kecepatan Gelembung

Kecepatan gelembung terukur ditunjukkan dalam Gambar 5. Kecepatan volumetrik aliran (J) merupakan penjumlahan kecepatan superficial gas dan cair. Berdasarkan perbandingan kecepatan suatu gelembung aliran fluida dua fase nitrogen-aquadest dan nitrogen-CMC wt 0,4%, nilai C_o aquadest lebih tinggi dari CMC wt 0,4%. Sebaran nilai konstanta C_o yang diajukan Mishima dan Hibiki (1996) untuk saluran D_H sebesar 0,8 mm menunjukkan lebih mendekati pada kondisi aktual untuk fluida CMC wt 0,4%. Di sisi lain, sebaran data kecepatan aliran nitrogen-aquadest mendekati kondisi aliran homogen. Namun fluktuasi ketidakstabilan kecepatan gelembung cairan

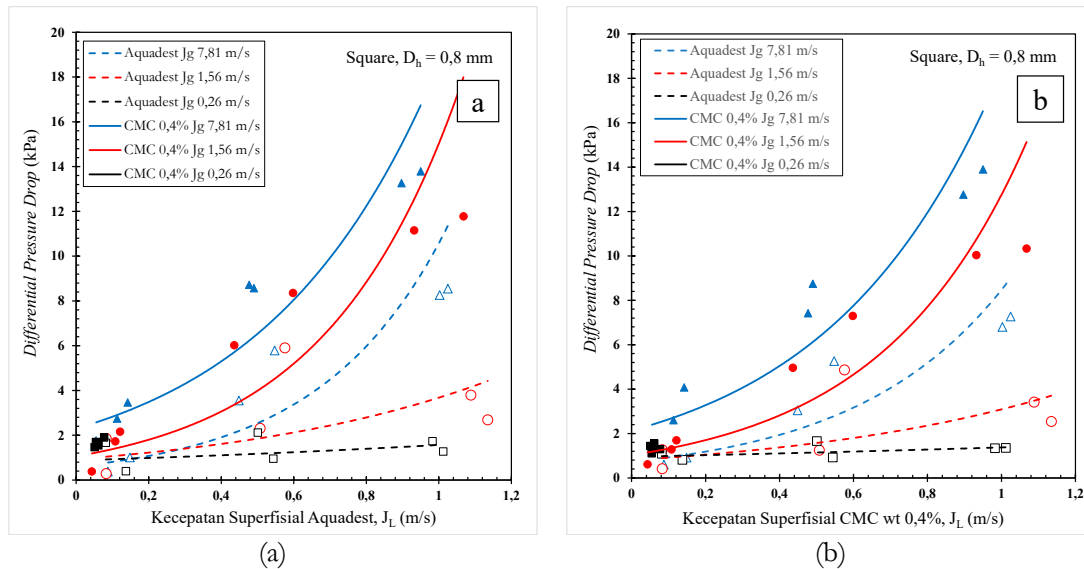
nitrogen-CMC 0,4% lebih tinggi daripada aquadest. Hal tersebut diakibatkan viskositas CMC wt 0,4% yang lebih rendah pada pola aliran *slug-annular* dengan morfologi gelembung yang tidak pasti dan pengukuran kecepatan secara eksperimen kurang akurat.



Gambar 4. Korelasi rasio debit aliran terhadap panjang slug area *upstream*



Gambar 5. Korelasi kecepatan superfisial aliran terhadap kecepatan gas area *upstream*



Gambar 6. *Differential pressure drop* terukur aliran dua fase untuk area (a) *upstream* dan (b) *downstream*

3.4. Penurunan Tekanan Aliran Dua Fase

Gambar 6 menunjukkan *differential pressure drop* (ΔP) terukur melalui sensor DPT terhadap kecepatan superficial cairan (J_L). Pada Gambar 6, data beda tekanan dengan simbol segitiga berlangsung pada J_G 7,81 m/s, simbol lingkaran berlangsung pada 1,56 m/s dan simbol segiempat berlangsung pada J_G 0,26 m/s. Di samping itu, simbol dengan warna terisi putih menunjukkan cairan aquadest dan simbol dengan warna terisi penuh menunjukkan cairan CMC wt 0,4%. Keterbatasan penelitian terkait variasi jumlah data kombinasi J_G dan J_L menjadi faktor kurang akuratnya tren kurva terbentuk.

Dengan viskositas cairan CMC wt 0,4% yang lebih rendah daripada aquadest, aliran nitrogen-CMC wt 0,4% menunjukkan rugi tekanan yang lebih besar untuk J_G yang sama. Seiring J_G tinggi dan J_L tinggi, terdapat potensi CMC akan berperilaku *shear thickening* saat menerima laju geser yang besar seperti diutarakan Benchabane dan Bekkour (2008). Namun untuk J_G tinggi dan J_L rendah, aliran nitrogen-CMC wt 0,4% memiliki rugi tekanan yang rendah dan berperilaku *shear thinning*. Perilaku *shear thinning* pada CMC wt 0,4% tercermin pada pola aliran *slug-annular*. Meskipun pada pola aliran *slug-annular* terdapat pada pola aliran nitrogen-aquadest dan nitrogen-CMC wt 0,4%, pola aliran tersebut lebih mudah terbentuk pada aliran nitrogen-CMC wt 0,4% karena transisi pola aliran dari *slug* menuju *slug-annular* yang lebih singkat dan lebih cepat tercapai.

Differential pressure drop terukur merupakan penjumlahan rugi tekanan akibat perubahan momentum (akselerasi) aliran dan rugi tekanan akibat gesekan. Penurunan tekanan akibat momentum aliran akan meningkat kuadratis seiring dengan meningkatnya kecepatan superficial aliran gas dan cair (J) namun dampak yang diakibatkan dalam fenomena *microchannel* sangat kecil karena luas penampang saluran tidak mengalami perubahan dan lebih didominasi rugi tekanan akibat gesekan. Kerugian tekanan gesekan dapat timbul melalui kontak cairan dengan dinding saluran dan antarmuka dua fase gas-cair.

Tren rugi gesekan antarmuka dua fase akan meningkat terkait pengaruh konstanta *two-phase friction multiplier* (Φ_L). Besar kecilnya nilai Φ_L tidak lepas dari luas area kontak gas-cair dari pola aliran yang terbentuk yang diindikasikan melalui kualitas gas. Besarnya rugi tekanan gesekan antara kontak cairan dan dinding saluran bersifat tetap dan akan berubah secara kuadratis seiring peningkatan kecepatan superficial cairan. Di sisi lain, rugi tekanan gesekan antarmuka fase lebih dominan dan dipengaruhi oleh luas kontak antarmuka fase. Semakin banyak frekuensi kemunculan gelembung kecil yang muncul maka rugi tekanan akan semakin besar. Fenomena tersebut dapat terekam pada kemunculan *dispersed bubble* pada pola aliran *bubbly* dan *churn*.

Aliran fluida nitrogen-aquadest lebih unggul karena memiliki rugi tekanan yang lebih sedikit daripada nitrogen-CMC wt 0,4% pada area *upstream*. Namun dengan perlakuan kalor konveksi, mampu meminimalisir kerugian tekanan yang hilang pada area *downstream*, baik aliran nitrogen-aquadest dan nitrogen-CMC wt 0,4%. Hal tersebut mengindikasikan aliran area *downstream* berlangsung aliran dengan fluks massa yang tetap namun dengan viskositas cairan yang lebih rendah daripada area *upstream*. Penurunan viskositas CMC wt 0,4% pada area *downstream* berdampak pada kemampuan gelembung untuk lebih mudah bergerak dan penetrasi pada tegangan permukaan cairan. Berdasarkan hasil eksperimen, aliran dua fase dengan kerugian tekanan paling sedikit terjadi pada kecepatan superficial cairan rendah yang tercermin pada pola aliran *slug-annular*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penjabaran penelitian yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil akhir penelitian diantaranya:

1. Transisi pola aliran dua fase terbentuk pada penelitian dipengaruhi oleh kombinasi kecepatan superfisial gas dengan cairan dan perbedaan viskositas cairan antara aquadest dengan CMC wt 0,4%. Aliran nitrogen-CMC wt 0,4% cenderung mampu lebih cepat transisi dari *slug* menuju *slug-annular*.
2. Panjang gelembung penelitian area *upstream* sangat dipengaruhi kombinasi kecepatan superfisial gas dan cair. Selain itu, mekanisme pembentukan gelembung sangat ditentukan dari percampuran gas dan cair pada T-junction.
3. Kecepatan gelembung pada area *upstream* dengan fluida nitrogen-aquadest mendekati kondisi aliran homogen, namun aliran nitrogen-CMC wt 0,4% memiliki sebaran data yang lebih fluktuatif. Penurunan viskositas fluida CMC wt 0,4% berpotensi memunculkan ketidakpastian pengukuran kecepatan gelembung yang lebih besar.
4. Perbedaan viskositas CMC wt 0,4% yang lebih rendah daripada aquadest menimbulkan rugi tekanan yang lebih besar pada area *upstream*. Namun dengan perlakuan kalor konveksi mampu memberikan penurunan viskositas fluida cair, baik aquadest dan CMC wt 0,4%.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Anna, S. L., 2016. Droplets and bubbles in microfluidic devices, *Annu. Rev. Fluid Mech.* Vol. 48. 285–309. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122414-034425>
- Bagaskoro, F. I., 2021. Studi eksperimental mengenai karakteristik aliran dua fase dan pola aliran slug fluida newtonian serta perbandingannya terhadap fluida non-newtonian pada upstream square microchannels. *Skripsi. Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.*
- Benchabane, A., 2006. *Doctorate Thesis (in French)*, ULP Strasbourg I, pp. 169.
- Benchabane, A., Bekkour, K., 2008. Rheological properties of carboxymethyl cellulose (CMC) solutions. *Colloid Polym Sci.* Vol. 286. 1173-1180. <https://doi.org/10.1007/s00396-008-1882-2>
- Brauner, N., Moalem-Maron, D. 1992. Flow pattern transitions in two-phase liquid-liquid flow in horizontal tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, 18 (1), pp. 123–140. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(92\)90010-E](https://doi.org/10.1016/0301-9322(92)90010-E)
- Chisholm, D., Laird, A.D.K., 1958. Two phase flow in rough tube. *Trans. ASME* 80 (2), 276-286.
- Coleman, J. W., & Garimella, S. 1999. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42 (15), 2869–2881. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(98\)00362-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(98)00362-7)
- 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 Chip* 2 437–446. <https://doi.org/10.1039/b510841a>
- Joensson, H.N., Andersson Svahn, H., 2012. Droplet microfluidics—a tool for single-cell analysis, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* vol 51. <https://doi.org/12176–12192>. 10.1002/anie.201200460
- Kaji, M., Sawai, T., Ueda, T., 2005. Frictional Pressure Drop Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Small Bore Tubes. *Mem. School B.O.S.T. Kinki University*, 15, 65-74.
- Kawahara, A., Chung, P. M. Y., Kawaji, M., 2002. Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel. *Int. Journal of Multiphase Flow* 28, 1411-1435. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(02\)00037-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00037-X)
- Kew, P.A., Cornwell, K., 1997. Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels. *Appl. Therm. Eng.* 17, 705–715. [https://doi.org/10.1016/s1359-4311\(96\)00071-3](https://doi.org/10.1016/s1359-4311(96)00071-3)
- Kusumaningsih, H., Hamidi, N., Sabila, A. F., 2019. Pola aliran dua fase gas-fluida non newtonian melalui belokan pipa. *Rekayasa Mesin* 12, 317-326.
- Lockhart, R.W., Martinelli, R.C., 1949. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chem. Eng. Progress* 45, 39-48.
- Mansour, M. H., Kawahara, A., Sadatomi, M., 2015. Experimental investigation of gas-non-newtonian liquid two-phase flows from T-junction mixer in rectangular microchannel. *International Journal of Multiphase Flow*, 72, 263-274. <https://doi.org/>
- Mishima, K., Hibiki, T., 1996. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes. *International Journal of Multiphase Flow* 22 (4), 703-712. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(96\)00010-9](https://doi.org/10.1016/0301-9322(96)00010-9)

- Rao, M. A., Walter, R. H., Cooley, H. J. 1981. Effect of Heat Treatment on the Flow Properties of Aqueous Guar Gum and Sodium Carboxymethylcellulose (CMC) Solutions. *Journal of Food Science* 46, 896-899. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb15374.x>
- Saisorn S., Kuaseng P., Wongwiset S., 2014. Heat transfer characteristics of gas-liquid flow in horizontal rectangular micro-channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 55, Pages 54 – 61. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.02.006>
- Serizawa, A., Feng, Z., & Kawara, Z. 2002. Two-phase flow in microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26, 703–714. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00175-9](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00175-9)
- Skurtys, O., Aguilera, J. M., 2008. Applications of microfluidic devices in food engineering, *Food Biophys.* vol 3. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11483-007-9043-6>
- Song, H., Chen, D. L., Ismagilov, R. F., 2006. Reactions in droplets in microfluidic channels, *Angew. Chem. Int. Ed.* vol:45. 7336–7356.
- Suo, M., dan Griffith, P. 1964. Two-Phase Flow in Capillary Tubes. *Basic Engineering*, September, 576–582. <https://doi.org/10.1115/1.3653176>
- Suwankamnerd P., Wongwiset S. 2015. An experimental study of two-phase air-water flow and heat transfer characteristics of segmented flow in a microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 62, Pages 29 – 39. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.11.010>
- Triplett, K. A., Ghiaasiaan, S. M., Abdel-Khalik, S. I., & Sadowski, D. L. 1999. Gas-liquid two-phase flow in microchannels part I: Two-phase flow patterns. *International Journal of Multiphase Flow*, 25(3), 377–394. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(98\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(98)00054-8)
- Ullmann, A., Brauner, N. 2006, Closure relations for two-fluid models for two-phase stratified smooth and stratified wavy flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 32 (1), pp. 82-105. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.08.005>
- Ullmann, A., Brauner, N., 2007, The prediction of flow pattern maps in minichannels. *Multiphase Science and Technology*, 19 (1), pp. 49-73. <https://doi.org/10.1615/MultScienTechn.v19.i1.20>
- Yang, Z.C., Bi, Q.C., Liu, B., Huang, K.X. 2010. Nitrogen/non-Newtonian fluid two-phase upward flow in non-circular microchannels. *International Journal of Multiphase Flow* vol. 36. 1. 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.07.011>
- Zhang, T., Cao, B., Fan, Y., Gonthier, Y., Luo, L., Wang, S., 2011. As-liquid flow in circular microchannel. Part I: Influence of liquid physical properties and channel diameter on flow patterns. *Chemical Engineering Science* 66, 5791–5803. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.035>
- Zuber, N., Findlay, J.A., 1965. Average volumetric concentration in two-phase flow system, *Trans. ASME J. Heat Transfer* 87, 453-468. <https://doi.org/10.1115/1.3689137>