

## Studi Eksperimental *Pressure Drop* dan Pola Aliran Dua Fasa Gas-Cairan Non-Newtonian pada *Horizontal Square Microchannel*

M.RIAN ALIF MADANI, HASLINDA KUSUMANINGSIH, DEENDARLIANTO

### 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. This study objective is to obtain the characteristics of gas-non-Newtonian liquids flow patterns in horizontal square microchannels. The horizontal square microchannels of 0.8 x 0.8 mm was used in this study. Water, 0.2% wt Carboxymethyl cellulose (CMC) aqueous solution, and 0.4% wt CMC were used in this study as the liquid test. While, nitrogen gas was used as gas test. The gas and liquid superficial velocity were varied of 0.26-7.8 m/s and 0.05-1 m/s, respectively. The flow patterns were recorded by using the high-speed camera. The flow pattern video data was processed by using image processing to characterize the flow pattern. Whereas, the two-phase flow pressure drop was measured by the differential pressure transducer. More characteristics of flow pattern including the axial length of gas slug and slug formation frequency is explained well. The identified flow patterns are bubbly, slug, slug-churn, churn, wavy-annular, and slug-annular.  $J_L$  has a more significant effect than  $J_G$  on the pressure drop gradient. The correlation constant (C) will give a different percentage of error in predicting the pressure drop gradient of the two-phase flow according to the parameters that affect it.

**Keywords:** Microchannel, Flow Pattern, Two-Phase Flow, Non-Newtonian Fluid, Pressure Drop Gradient

### PENDAHULUAN

Pada peradaban saat ini, telah terjadi peningkatan yang signifikan dalam perkembangan dan penerapan teknologi saluran *microchannel* dikarenakan keunggulan serta manfaatnya. Mikrofluida adalah ilmu rekayasa teknologi yang digunakan untuk memproses dan memanipulasi fluida dalam saluran berukuran hingga mikrometer (lebih kecil dari 1 milimeter) (Whitesides, 2006). Aplikasi dari *microchannel* terdapat pada *microreactors*, *micro-electrical-mechanical system* (MEMS), *micro heat exchangers*, serta pendingin *chip* elektronik (Mansour dkk., 2015). Berbagai penelitian yang intensif telah dilakukan peneliti terdahulu untuk mempelajari secara lebih mendalam mengenai fenomena aliran dan perpindahan kalor aliran dua fasa pada *microchannel*.

Penelitian ini akan menggunakan saluran mikro (*microchannel*) 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.

Prediksi penurunan tekanan yang akurat memainkan peran penting dalam proses perancangan pompa untuk sistem mikro. Korelasi berdasarkan model aliran homogen dan terpisah sering digunakan untuk memperkirakan penurunan tekanan aliran dua fasa. Hal ini dikarenakan pola aliran memiliki pengaruh sangat signifikan pada penurunan tekanan aliran dua fasa. Maka dari itu, perlu mempertimbangkan informasi pola aliran untuk memprediksi penurunan tekanan aliran dua fasa secara akurat. Choi dan Kim (2011) mempelajari penurunan tekanan menurut informasi pola aliran dan korelasi yang diusulkan untuk menghitung penurunan tekanan aliran dua fasa berdasarkan informasi pola aliran. Saisorn dan Wongwises (2015) menyelidiki karakteristik aliran dua fasa dalam perangkat mikro dan mengidentifikasi bahwa penurunan tekanan pada aliran *churn* jauh lebih tinggi daripada pola aliran lainnya.

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. Kawahara dkk. (2020) menyelidiki penurunan tekanan aliran dua fasa larutan nitrogen dan polimer dalam perangkat mikro. Mereka menunjukkan bahwa berbagai larutan cair polimer menunjukkan sifat reologi yang berbeda. Oleh karena itu, jenis polimer mempengaruhi penurunan tekanan aliran dua fasa. Beberapa korelasi model aliran homogen dan terpisah divalidasi oleh data eksperimen.

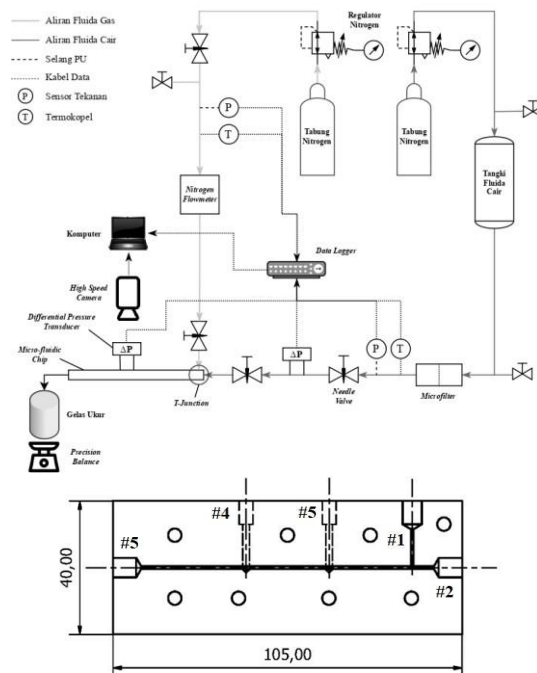
Mayoritas penelitian sebelumnya tentang aliran cair-gas hanya mempertimbangkan cairan *newtonian*. Data aliran fluida *non-newtonian*-gas khususnya mengenai penurunan tekanan dan pola aliran masih terbatas. Penelitian tentang penurunan tekanan aliran fluida *non-newtonian*-gas di saluran mikro terutama dipusatkan pada aliran *slug*. Pengaruh pola aliran dan sifat reologi fasa cair pada penurunantekanan masih belum sepenuhnya dipahami. Beberapa korelasi untuk memprediksi gradien

penurunan tekanan gesekan dua fasa telah divalidasi menjadi universal. Studi ini dikhususkan untuk pola aliran dan gradien penurunan tekanan untuk aliran fluida nitrogen dan *non-newtonian*. Sebuah korelasi baru dikembangkan untuk memperkirakan gradien penurunan tekanan gesekan. Dalam korelasi, rasio laju aliran gas-cair dan sifat reologi fasa cair dipertimbangkan.

## METODOLOGI PENELITIAN

### 1. Aparatus penelitian

Gambar 1 menunjukkan diagram skematik dari peralatan serta detail *microchannel* yang digunakan pada fasilitas penelitian *microchannel*. *Microchannel* 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 Detail Desain *Microchannel*

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 *microchannel*. 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 *microchannel* untuk selanjutnya ditimbang menggunakan *precision balance* Sartorius Quintix224-1S berkapasitas 220 gram dengan ketelitian 0,0001 gram.

*Differential pressure transducer* yang digunakan adalah seri P55D-4-N-1-48-S-4A dengan eror maksimal 0,25%. 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 *microchannel* sebagai media penerangan.

## 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*,  $\mu_a$  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) [10].

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

TABEL I. Properties Fluida Kerja

Fluida	Masa Jenis $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Surface Tension $\sigma$ (N/m)	k (Pa.s <sup>n</sup> )	n
Air	968,3	0,0721	0,001	1,0
CMC 0,2%	970,3	0,0715	0,074	0,873
CMC 0,4%	987,7	0,071	0,176	0,868

## 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,  $\rho_L$  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  $\lambda$  [12]. Maka dari itu, *friction factor* dapat dihitung dengan persamaan (5).

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

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).

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

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

#### 4. Pressure Drop Gradient

*Pressure drop* diidentifikasi berdasarkan pembacaan sensor *differential pressure transducer*. Pada penelitian ini, data diambil saat grafik *real time* dari sensor sudah konvergen yang memiliki makna bahwa aliran yang terjadi sudah *fully developed*.

Analisis yang dilakukan menggunakan *separated model* dengan mendeskripsikan aliran dua fasa diperlakukan terpisah antara fasaliquid dan gas. Pada metode ini, penurunan tekanan aliran dua fasa lebih baik diidentifikasi berdasarkan viskositas gas dan liquid secara terpisah dibandingkan menjadi satu kesatuan. Maka dari itu, penurunan tekanan dapat dihitung berdasarkan persamaan (14) yang ditemukan oleh (Lockhart dan Martinelli, 1949)[14].

$$\left( \frac{dP_f}{dZ} \right)_{TP} = \phi^2 \left( \frac{dP_f}{dZ} \right)_i \quad (14)$$

Konstanta  $\phi^2$  adalah faktor pengali gesekan untuk aliran dua fasa yang dapat diidentifikasi melalui persamaan (15) yang ditemukan oleh (Chisholm, 1967) [15].

$$\phi^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (15)$$

Konstanta C adalah parameter yang mendeskripsikan efek interaksional pada aliran dua fasa. Saat ini, konstanta C masih terus dikembangkan untuk menghasilkan prediksi aliran dua fasa yang akurat. Sedangkan X

adalah parameter Martinelli yang didefinisikan dengan persamaan (16).

$$X^2 = \frac{(dP_f/dZ)_L}{(dP_f/dZ)_G} \quad (16)$$

$(dP_f / dZ)_L$  dan  $(dP_f / dZ)_G$  adalah gradien penurunan tekanan aliran satu fasa masing-masing untuk liquid dan gas ketika mengalir pada *microfluidic chip*. TABEL II memberikan rangkuman terkait persamaan dalam mendefinisikan nilai konstanta C untuk pada akhirnya mendapatkan nilai faktor pengali gesekan aliran dua fasa. Konstanta ini akan berpengaruh terhadap prediksi penurunan tekanan aliran dua fasa yang dihasilkan. Setiap konstanta akan menghasilkan prediksi yang berbeda. Hal ini dikarenakan pertimbangan parameter yang digunakan berbeda pula.

TABEL II. Rangkuman Korelasi Nilai C

Peneliti	Korelasi
Chisholm dan Laird (1967) [16]	C = 5
Mishima dan Hibiki (1996) [17]	C = 21 (1 - e <sup>-0,316D<sub>H</sub></sup> )
Hwang dan Kim (2006) [18]	C = 0,227 (Re) <sup>0,452</sup> (X) <sup>-0,32</sup> {[\sigma/g(\rho <sub>L</sub> -ρ <sub>G</sub> )]/D <sub>H</sub> } <sup>-0,82</sup>
Kawahara dkk. (2011) [9]	C = 1,38 (Bo) <sup>0,04</sup> (ReL) <sup>0,25</sup> (WeG) <sup>-0,12</sup>
Feng dan Zhang (2021) [11]	C = 9,748 (k/μ <sub>G</sub> ) <sup>0,105</sup> (J <sub>G</sub> /J <sub>L</sub> ) <sup>0,443-0,241ln</sup>

Pada akhirnya, korelasi-korelasi tersebut, dibandingkan dengan parameter persen eror rata-rata dan persen eror dari akar rata-rata. (Mansour dkk., 2015) menyatakan persen eror tersebut dengan persamaan (17) dan (18) [8].

$$E_m = \frac{1}{N} \sum \frac{(dP_f/dZ)_{pred} - (dP_f/dZ)_{exp}}{(dP_f/dZ)_{exp}} \times 100\% \quad (17)$$

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum \left( \frac{(dP_f/dZ)_{pred} - (dP_f/dZ)_{exp}}{(dP_f/dZ)_{exp}} \right)^2} \times 100\% \quad (18)$$

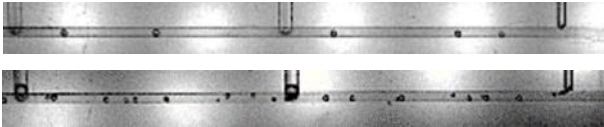
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 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*.

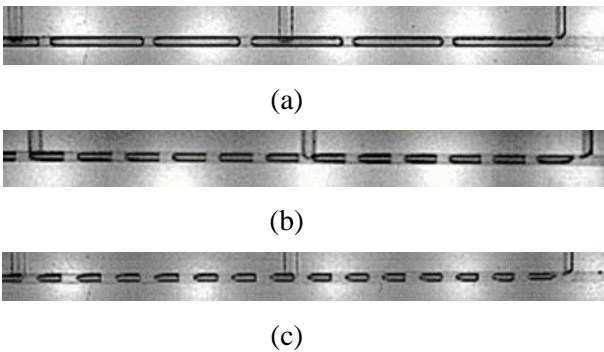
Pada aliran Air-Nitrogen, pola aliran yang terbentuk adalah pola aliran *bubbly*, *slug*, *slug-annular*, *wavy-annular*, *slug-churn*, dan *churn*. Sedangkan pada aliran CMC-Nitrogen, pola aliran *bubbly* dan *wavy annular* tidak terbentuk. Pola aliran *bubbly* pada aliran Air-Nitrogen digantikan dengan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

Pola aliran *bubbly* terbentuk pada variasi kecepatan superfisial fluida cair tertinggi dan kecepatan superfisial fluida gas terendah. Seiring dengan kenaikan kecepatan superfisial gas, frekuensi gelembung yang terbentuk juga akan semakin bertambah.



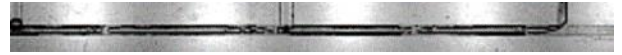
Gambar 2. Pola Aliran *Bubbly*

Pola aliran *slug* terbentuk ketika variasi kecepatan superfisial fluida gas sangat kecil menuju sedang dan variasi kecepatan superfisial fluida cair kecil menuju sedang. Perbedaan signifikan antara pola aliran *bubbly* dan *slug* terletak pada karakteristik gas yang memanjang dari *bubble* menjadi *gas plug*. Pada pola aliran *bubbly*, *bubble* diidentifikasi dengan ukuran diameter yang sama atau lebih kecil darisaluran, sedangkan pada pola aliran *slug*, *gas plug* diidentifikasi dengan diameter yang lebih besar atau jauh lebih besar dari saluran.



Gambar 3 Pola Aliran *Slug*, (a) Air-Nitrogen ; (b) CMC 0,2%-Nitrogen ; (c) CMC 0,4%-Nitrogen

Pola aliran *slug* tidak langsung berubah menjadi pola aliran *churn* tetapi melewati pola aliran transisi yang bernama pola aliran *slug-churn*. Pola aliran ini diidentifikasi dengan adanya pola aliran *slug* dan *churn* pada saat bersamaan.



Gambar 4. Pola Aliran *Slug-Churn*

Pola aliran *churn* memiliki ciri dengan adanya *slug* yang tidak beraturan dan cenderung tidak teratur. Batas antara cairan dan gas pada pola aliran ini menjadi sulit untuk diobservasi karena terdapat *bubble-bubble* yang terdispersi pada bagian *tail slug*. Bagian *nose slug* pada pola aliran ini pun memiliki bentuk yang tidak tetap. Pola aliran *churn* mulai terbentuk ketika *slug* mengalami peningkatan kecepatan superfisial gas dan semakin tinggi kecepatan superfisial fluida cair, maka pola aliran *churn* yang teramati juga semakin cepat dikarenakan peningkatan kecepatan superfisial fluida ini memunculkan ketidakstabilan pada aliran dua fasa yang mengalir dan menyebabkan timbulnya *bubble* disekitar daerah pemutusan *slug*.



Gambar 5. Pola Aliran *Churn*

Pola aliran *wavy-annular* merupakan pola aliran transisi menuju pola aliran *annular* yang dapat diidentifikasi dengan adanya *slug* panjang yang tidak terputus pada seluruh saluran tetapi bergelombang. Pada pola aliran ini, fluida gas selalu berhasil untuk menembus *surface tension* tetapi terdapat beberapa titik yang didominasi oleh cairan walaupun terdapat gas dibagian tengah saluran atau yang biasa dikenal sebagai *liquid neck*.



Gambar 6. Pola Aliran *Wavy-Annular*

Pola aliran *slug-annular* terjadi pada kecepatan superfisial fluida gas yang sangat tinggi namun kecepatan superfisial fluida cair yang rendah. Rasio kecepatan superfisial gas sangat jauh hingga 8 kali lipat dari kecepatan superfisial cairan.



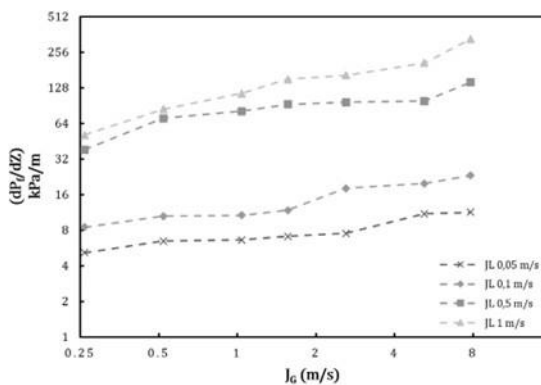
Gambar 7. Pola Aliran *Slug-Annular*



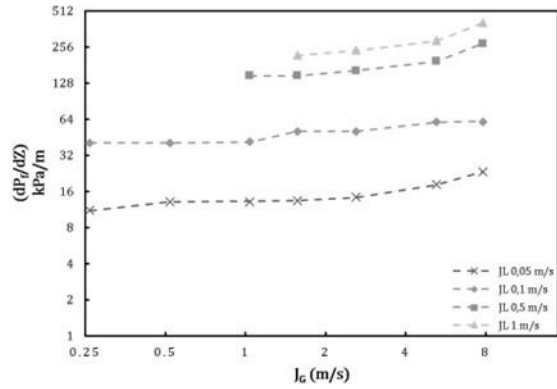
2. Pressure Drop Gradient

Menampilkan hasil pemetaan gradien penurunan tekanan terhadap perubahan kecepatan superfisial gas. Dapat disimpulkan dari ketiga grafik di bawah, gradien penurunan tekanan yang terjadi terhadap kenaikan  $J_G$  dengan  $J_L$  dijaga konstan, pada fluida *newtonian* Air-Nitrogen mengalami peningkatan yang cukup signifikan seiring meningkatnya  $J_G$ . Namun, pada fluida *non-newtonian* CMC-Nitrogen, perubahan  $J_G$  tidak memberikan efek yang begitu signifikan dan cenderung membentuk tren yang stabil. Hal ini disebabkan karena viskositas efektif mengalami penurunan seiring peningkatan kecepatan rata-rata dari likuid dan  $J_G$  yang direpresentasikan oleh gambar di bawah ini.

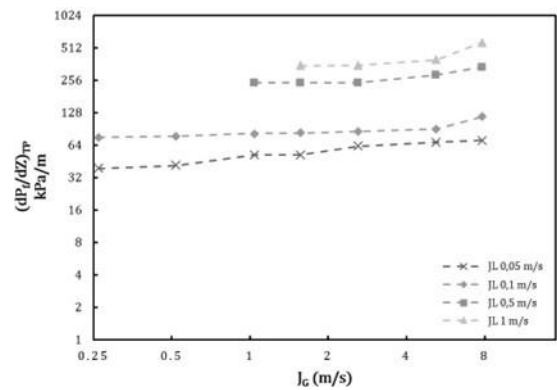
Selanjutnya, terdapat keunikan yang terjadi pada kurva peningkatan gradien penurunan tekanan, khususnya pada pola aliran *churn* dan *slug-annular*. Pada pola aliran *slug-annular*,  $J_G = 5,2 \text{ m/s} - 7,81 \text{ m/s}$  dan  $J_L = 0,05 \text{ m/s} - 0,1 \text{ m/s}$ , kemiringan kurva gradien penurunan tekanan tidak begitu signifikan. Namun, ketika pola aliran yang terjadi adalah *churn*,  $J_G = 5,2 \text{ m/s} - 7,81 \text{ m/s}$  dan  $J_L = 0,5 \text{ m/s} - 1 \text{ m/s}$  kemiringan kurva gradien penurunan tekanan mengalami peningkatan yang sangat signifikan. Hal ini disebabkan oleh karakteristik pola aliran *churn* yang cenderung tidak stabil dibandingkan dengan pola aliran *slug-annular*. Pada visualisasi dapat dibuktikan bahwa pola aliran *churn* sangat tidak stabil dan fluktuatif. Sedangkan pada pola aliran *slug-annular*, aliran yang mengalir cenderung lebih tenang.



(a)

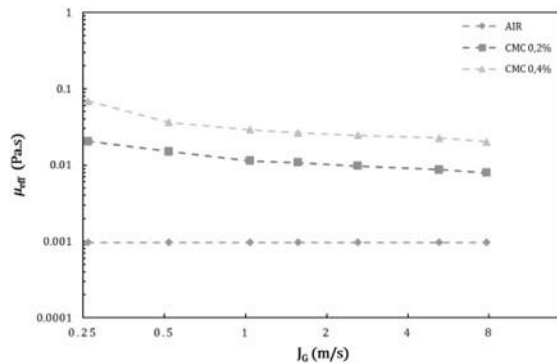


(b)



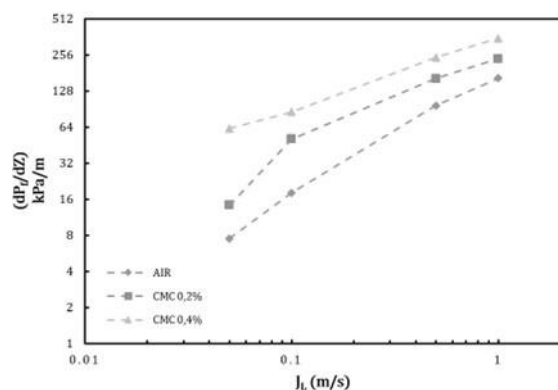
(c)

Gambar 8. Gradien Penurunan Tekanan terhadap Perubahan  $J_G$ , (a) Air-Nitrogen ; (b) CMC 0,2%-Nitrogen ; (c) CMC 0,4%-Nitrogen

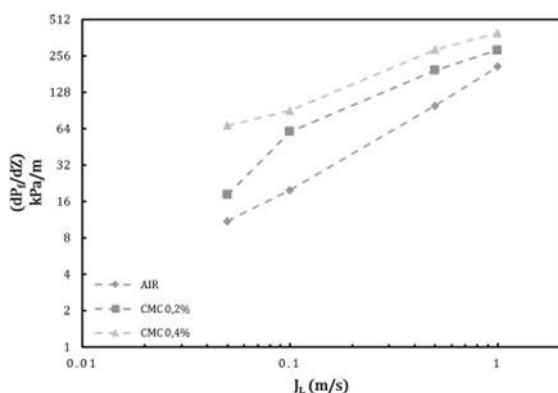


Gambar 9. Viskositas Efektif terhadap Peningkatan  $J_G$

Selain pengaruh  $J_G$ , pengaruh  $J_L$  juga ditinjau terhadap perubahan gradien penurunan tekanan. Secara teoritis, kenaikan  $J_L$  akan memberikan peningkatan gradien penurunan tekanan yang signifikan karena berbanding lurus secara langsung. Teori tersebut dibuktikan dengan Gambar 10.



(a)



(b)

Gambar 10. Gradien Penurunan Tekanan terhadap Perubahan  $J_L$ , (a)  $J_G = 2,6 \text{ m/s}$  ; (b)  $J_G = 5,21 \text{ m/s}$

### 3. Pengembangan Konstanta Korelasi (C)

Berdasarkan TABEL II, seiring perkembangan zaman dan konstanta korelasi, akan memberikan prediksi terkait gradien penurunan tekanan aliran dua fasa yang semakin akurat hanya dengan mengetahui gradien penurunan tekanan aliran satu fasa. Konstanta korelasi milik Mishima dan Hibki menghasilkan persentase error yang sangat besar pada penelitian ini. Hal ini disebabkan karena hanya memperhatikan pengaruh diameter hidraulik dari saluran, namun tidak dengan karakteristik faktor gesekan, aliran, dan fluida yang mengalir. Sementara konstanta korelasi milik Kai Feng dan Huichen Zhang memberikan prediksi gradien penurunan tekanan aliran dua fasa yang paling akurat pada penelitian ini. Pada hal ini, konstanta korelasi milik Kai Feng dan Huichen Zhang memperhatikan pengaruh dari karakteristik faktor gesekan, aliran, dan fluida yang mengalir dalam saluran. Pada Gambar 11. dapat dilihat garis penyimpangan pada masing-masing korelasi. Garis penyimpangan mayoritas terletak pada area

negatif, dan hanya sedikit yang menyimpang pada area positif. Hal ini menunjukkan bahwa prediksi yang dihasilkan cenderung lebih rendah dari hasil eksperimen.

## KESIMPULAN

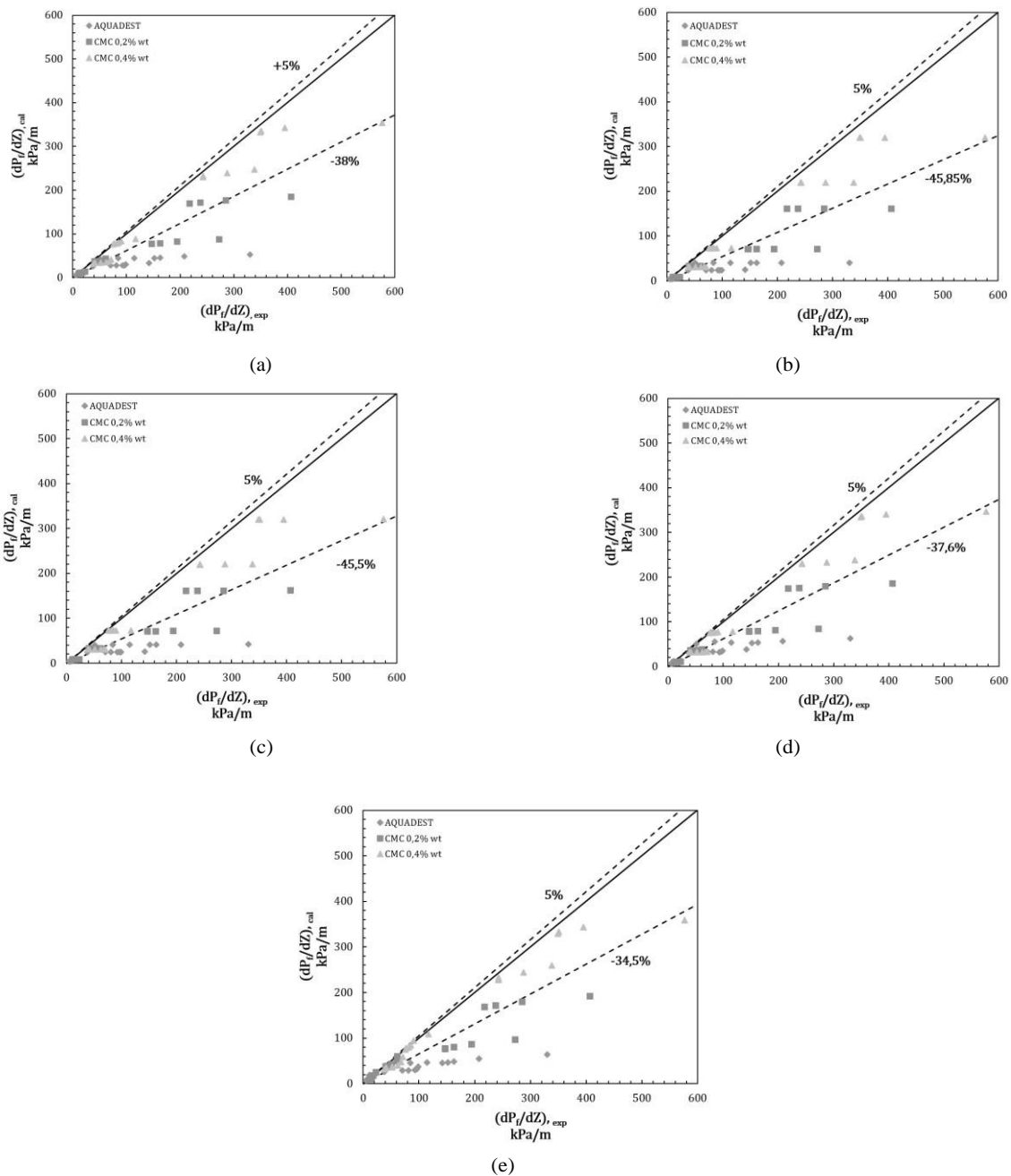
Studi penelitian eksperimental dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik aliran dua fasa yang mengalir pada saluran berukuran mikro. Pada penelitian ini digunakan tiga jenis fluida cair untuk membandingkan pengaruh karakteristik fluida cair baik newtonian dan non-newtonian, maupun perbandingan konsentrasi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

Gradien penurunan tekanan dipengaruhi oleh  $J_L$  dan  $J_G$ . Perubahan  $J_L$  akan memberikan pengaruh signifikan terhadap perubahan gradien penurunan tekanan. Sedangkan perubahan  $J_G$  tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan pada fluida non-newtonian. Pada fluida newtonian, perubahan  $J_G$  memberikan pengaruh lebih signifikan. Hal ini disebabkan pada fluida non-newtonian, khususnya shear thinning, viskositas efektif akan mengalami penurunan seiring meningkatnya  $J_G$ .

Dalam memprediksi gradien penurunan tekanan aliran dua fasa dengan mengetahui gradien penurunan tekanan aliran satu fasa, diperlukan konstanta korelasi (C). Seiring perkembangan zaman, para peneliti berusaha menemukan konstanta korelasi (C) yang dapat memberikan prediksi akurat dengan kesalahan minim. Penelitian ini membuktikan korelasi milik (Mishima dan Hibki, 1996) memberikan nilai kesalahan yang paling besar dikarenakan hanya mempertimbangkan pengaruh diameter hidraulik saluran. Sedangkan korelasi milik (Feng dan Zhang, 2021) adalah yang paling akurat karena mempertimbangkan pengaruh faktor gesekan, karakteristik aliran, dan fluida yang mengalir dalam saluran. Namun, korelasi ini masih memiliki penyimpangan yang cukup besar, yang diidentifikasi dengan Erms sebesar 34,5%. Maka dari itu, diperlukan pengembangan korelasi baru untuk menghasilkan prediksi yang lebih akurat.

TABEL III. Mean Error dan Root Mean Square Error terhadap Pengembangan Konstanta Korelasi (C)

Korelasi	Air		CMC 0,2%		CMC 0,4%	
	$E_m$ (%)	$E_{rms}$ (%)	$E_m$ (%)	$E_{rms}$ (%)	$E_m$ (%)	$E_{rms}$ (%)
Chisholm dan Laird (1967)	-36	46,87	-32,85	37,1	-17,42	23,55
Mishima dan Hibki (1996)	-46,8	55	-42,9	46,5	-24,86	30,6
Hwang dan Kim (2006)	-46,24	54,45	-42,8	46,3	-24,8	30,5
Kawahara dkk. (2011)	-33,65	46,27	-35,89	40	-20,53	27,17
Feng dan Zhang (2021)	-20,88	44,75	-23,94	31,75	-12,85	18,19



Gambar 11. Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Kalkulasi dengan Eksperimental ; (a) (Chisholm dan Laird, 1958) ; (b) (Mishima dan Hibki, 1996) ; (c) (Hwang dan Kim, 2006) ; (d) (Kawahara dkk, 2011) ; (e) (Feng dan Zhang, 2021)



DAFTAR PUSTAKA

- Chisholm, D. (1967a). A Theoretical Basis For The Lockhart- Martinelli Correlation For Two-Phase Flow. In *Inr J Heat Moss Transfer* (Vol. 10). Pergamon Press Ltd.
- Chisholm, D. (1967b). A Theoretical Basis For The Lockhart- Martinelli Correlation For Two-Phase Flow. In *Inr J Heat Moss Transfer* (Vol. 10). Pergamon Press Ltd.
- Choi, C., & Kim, M. (2011). Flow pattern based correlations of two-phase pressure drop in rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32(6), 1199–1207. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.08.002>
- Feng, K., & Zhang, H. (2021). Pressure drop and flow pattern of gas-non-Newtonian fluid two-phase flow in a square microchannel. *Chemical Engineering Research and Design*, 173, 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.07.010>
- Hwang, Y. W., & Kim, M. S. (2006a). The pressure drop in microtubes and the correlation development. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(11–12), 1804–1812. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.10.040>
- Hwang, Y. W., & Kim, M. S. (2006b). The pressure drop in microtubes and the correlation development. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(11–12), 1804–1812. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.10.040>
- Kawahara, A., Yonemoto, Y., & Arakaki, Y. (2020). Pressure Drop for Gas and Polymer Aqueous Solution Two-Phase Flows in Horizontal Circular Microchannel. *Flow, Turbulence and Combustion*, 105(4), 1325–1344. <https://doi.org/10.1007/s10494-020-00127-z>
- Kozicki, W., Chou, C. H., & Tiu, C. (1966). Non-Newtonian flow in ducts of arbitrary cross-sectional shape. In *Chemical Engineering Science* (Vol. 21). Pergamon Press Ltd.
- Kreutzer, M. T., Kapteijn, F., Moulijn, J. A., & Heiszwolf, J. J. (2005). Multiphase monolith reactors: Chemical reaction engineering of segmented flow in microchannels. *Chemical Engineering Science*, 60(22), 5895–5916. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.03.022>
- Lockhart, R. W., & Martinelli, R. C. (1949). Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes. *Chemical Engineering Progress*, 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/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.02.019>
- Mishima, K., & Hibiki, T. (1996a). Some Characteristics Of Air-Water Two-Phase Flow In Small Diameter Vertical Tubes. In *J. Multiphase Flow* (Vol. 22, Issue 4).
- Mishima, K., & Hibiki, T. (1996b). Some Characteristics Of Air-Water Two-Phase Flow In Small Diameter Vertical Tubes. In *J. Multiphase Flow* (Vol. 22, Issue 4).
- Revellin, R., Agostini, B., & Thome, J. R. (2008). Elongated bubbles in microchannels. Part II: Experimental study and modeling of bubble collisions. *International Journal of Multiphase Flow*, 34(6), 602–613. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.07.006>
- Saisorn, S., & Wongwises, S. (2015). Adiabatic two-phase gas-liquid flow behaviors during upward flow in a vertical circular microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 69, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.07.021>
- Shah, R. K., & London, A. L. (1978). Rectangular Ducts. In *Laminar Flow Forced Convection in Ducts* (pp. 196–222). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-020051-1.50012-7>
- Weibel, D. B., & Whitesides, G. M. (2006). Applications of microfluidics in chemical biology. In *Current Opinion in Chemical Biology* (Vol. 10, Issue 6, pp. 584–591). <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.10.016>
- Wojtan, L., Revellin, R., & Thome, J. R. (2006). Investigation of saturated critical heat flux in a single, uniformly heated

microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30(8), 765–774.  
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.03.006>

Yamamoto, K., & Ogata, S. (2014). Drag reduction of slug flows in microchannels by modifying the size of T-junctions. *International Journal of Multiphase Flow*, 62, 67–72.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.02.011>

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*, 36(1), 60–70.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.07.011>

---

PENULIS:

M.Rian Alif Madani

Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Kabupaten Sleman.

Email: [mrionalif00@mail.ugm.ac.id](mailto:mrionalif00@mail.ugm.ac.id)

Haslinda Kusumaningsih

Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Kota Malang.

Email: [haslinda.kusuma@ub.ac.id](mailto:haslinda.kusuma@ub.ac.id)

Deendarlianto

Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Kabupaten Sleman.

Email: [deendarlianto@ugm.ac.id](mailto:deendarlianto@ugm.ac.id)