

## Karakteristik Gradien Tekanan Pada Aliran Dua-Fase Udara-Campuran Air dan 20% Gliserin Dalam Pipa Horizontal Berukuran Mini

*(The characteristic of pressure gradient on two-phase flow of air- 20% glycerin aqueous solution in horizontal mini-pipe)*

Sudarja<sup>1,2,a</sup>, Farid Jayadi<sup>1</sup>, Indarto<sup>1</sup>, Deendarlianto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281.

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Lingkar Selatan 2 Yogyakarta 55183.

<sup>a</sup>E-mail : Sudarja\_msn@yahoo.com

### Abstract

Experimental study on the pressure gradient of air- 20% glycerin aqueous solution in a 1.6 mm inner diameter glass pipe has been carried-out. The flows orientation were horizontal co-current. The superficial velocities of gas and liquid were varied in the range of 0.025 - 66.3 m/s and 0.033 - 4.935 m/s, respectively. The aim of the present work was to obtain the primary data of the pressure gradient of air - 20% glycerin aqueous solution in horizontal mini-channel and the comparison of them to both homogenous and separated model. As results, both gas and liquid superficial velocities significantly affected to the pressure gradient. The experimental two-phase pressure gradient increases with the increase of either  $J_G$  or  $J_L$ . Most of the data predicted by using homogeneous model fairly agreed against the experimental data. Meanwhile, most of the data predicted by using separated model of Mishima and Hibiki's correlation were in good agreement with the experimental data.

**Keywords:** two-phase flow, mini-channel, air- glycerin aqueous solution, viscosity, pressure gradient.

#### 4. Pendahuluan

Aliran dua-fase pada saluran kecil sangat luas aplikasinya, misalnya pada penukar kalor kompak (*compact heat exchangers*), sistem pendinginan mikroelektronik (*microelectronic cooling systems*), reaktor nuklir skala riset, proses kimia, dan sistem refrigerasi berukuran kecil [1]. Desain dan operasi dari sistem atau peralatan yang melibatkan aliran dua-fase pada saluran kecil membutuhkan pemahaman yang sangat baik tentang karakteristik aliran dua-fase pada saluran kapiler. Karakteristik pada aliran dua fase terdiri dari: pola aliran (*flow pattern*) dan peta pola aliran (*flow pattern map*), fraksi hampa (*void fraction*), gradien tekanan (*pressure gradient*), dan koefisien perpindahan kalor. Viskositas fluida merupakan salah satu variabel penting yang mempengaruhi karakteristik aliran dua-fase, disamping ukuran saluran, dan orientasi saluran.

Penelitian tentang pengaruh viskositas terhadap karakteristik aliran dua-fase pernah dilakukan antara lain oleh Sowinski dan Dziubinski [2], Matsubara dan Naito [3], Zhao dkk. [4], Parsie dkk. [5], Stahle dkk. [6], dan Hanafizadeh dkk. [7]. Eksperimen yang dilakukan oleh para peneliti tersebut umumnya dilakukan pada saluran berukuran besar. Informasi tentang gradien tekanan pada pipa berukuran mini dengan fluida yang mempunyai viskositas lebih besar dari air dirasa masih sangat kurang. Itulah justifikasi

mengapa studi ini dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan informasi primer tentang pengaruh kecepatan superfisial gas maupun cairan terhadap gradien tekanan dari aliran dua-fase udara-campuran air dan 20% gliserin pada pipa horizontal berukuran mini.

#### 5. Metode

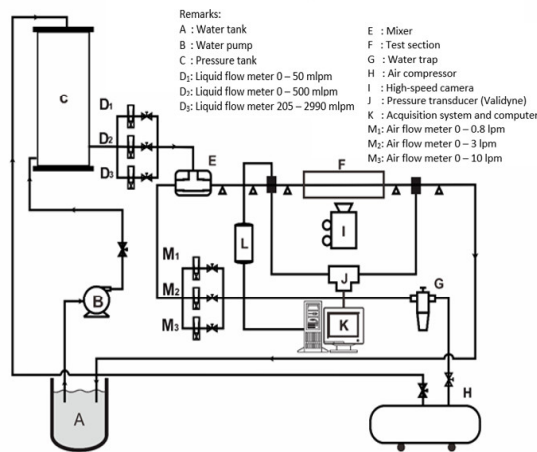
Instalasi peralatan penelitian ditunjukkan secara skematis pada Gambar 1. Komponen-komponen utama pada instalasi tersebut adalah: seksi uji, *mixer*, kompresor udara, pompa pneumatik, *flow meter* gas, *flow meter* cairan, sensor tekanan, kamera berkecepatan tinggi, akuisisi data dan komputer. Seksi uji berupa pipa transparan terbuat dari bahan gelas (kaca) berpenampang sirkular dengan diameter dalam 1,6 mm.

Untuk mengukur *pressure drop*, digunakan sensor beda tekanan berupa *pressure transducer* dari Validyne dengan akurasi  $\pm 0,25\%$  yang dihubungkan dengan sisi masuk dan sisi keluar seksi uji. Data yang didapatkan dari sensor tersebut masih berupa data analog. Untuk mengubah data analog menjadi data digital, digunakan akuisisi data dari *National Instruments*. Sebelum digunakan, sensor beda tekanan dikalibrasi terlebih dahulu menggunakan manometer vertikal (manometer kolom air) pada kondisi statis.

Fluida kerja yang digunakan adalah udara dan campuran air dan 20% gliserin, dengan *properties* seperti ditunjukkan pada tabel 1. Penelitian ini dilakukan pada kecepatan superfisial gas ( $J_G$ )= 0,025-66,3 m/s, dan kecepatan superfisial cairan ( $J_L$ )= 0,033-4,935 m/s.

Tabel 1. Sifat-sifat fisik fluida kerja

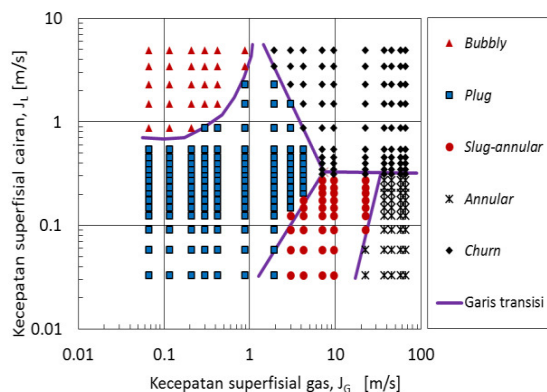
Fluida kerja	Massa jenis, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Viskositas Dinamik, $\mu$ [N.s/m <sup>2</sup> ]
Udara	1,163	$1,85 \times 10^{-5}$
Air + 20% gliserin	1.066	$1,47 \times 10^{-3}$



Gambar 1. Skema alat penelitian

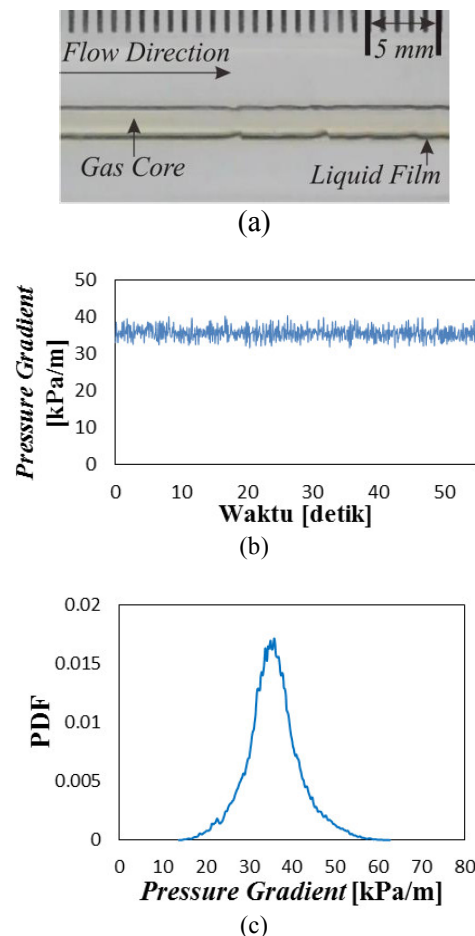
## 6. Hasil dan Pembahasan

Sebagaimana disampaikan oleh Jayadi [8], bahwa pola aliran yang muncul pada penelitian ini adalah *bubbly*, *plug*, *churn*, *slug-annular*, dan *annular*. Pola aliran terpisah (*stratified flow*) tidak pernah didapatkan. Selanjutnya peta pola aliran berbasis kecepatan superfisial ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta pola aliran dari penelitian ini.

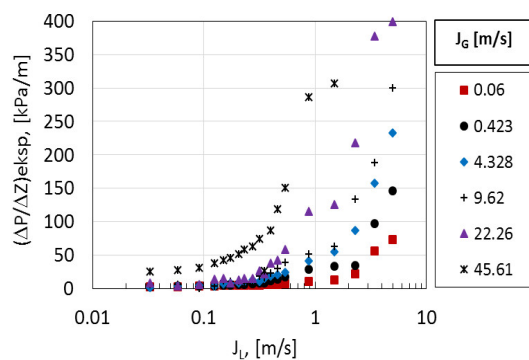
Gambar 3 menunjukkan konfigurasi dari salah satu pola aliran, yaitu pola aliran *annular*, dengan  $J_G = 36,96$  m/s dan  $J_L = 0,0149$  m/s, beserta karakteristik *pressure gradient*, dan probability distribution function (PDF) nya. Dari Gambar 3(a) terlihat bahwa karakteristik pola aliran *annular* adalah alirannya berupa gas yang mengalir pada bagian tengah penampang saluran (berupa *gas core*) dikelilingi cairan yang menempel pada dinding pipa bagian dalam membentuk cincin anulus, dengan sedikit gelombang pada antar muka (*interface*). Selanjutnya pada grafik *pressure gradient* dan PDF [Gambar 3(b) dan (c)], terlihat bahwa *pressure gradient* pada kondisi tersebut sekitar 35 kPa/m dan mengalami sedikit fluktuasi. Hal ini disebabkan oleh adanya gelombang pada antar muka antara gas dan cairan.



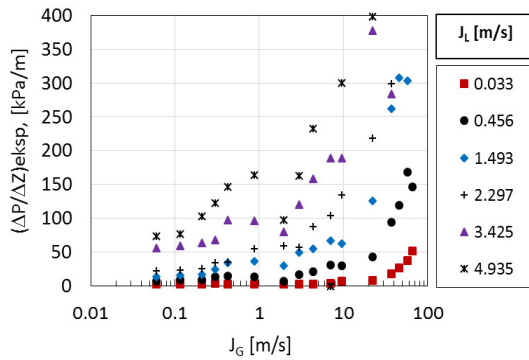
Gambar 3. Tipikal pola aliran *annular* pada  $J_G = 36,96$  m/s ;  $J_L = 0,0149$  m/s. (a) Pola aliran *Annular*, (b) *Pressure gradient time-series*, (c) *PDF*

Gradien tekanan, ( $\Delta P/\Delta Z$ ), sebagai fungsi dari  $J_G$  dan  $J_L$  ditunjukkan pada Gambar 4. Gambar 4(a), menunjukkan pengaruh  $J_L$  terhadap gradien tekanan pada berbagai harga  $J_G$ , sedangkan gambar 4(b) menunjukkan pengaruh  $J_G$  terhadap gradien tekanan

pada dengan harga  $J_L$  bervariasi. Absis pada kedua gambar tersebut dinyatakan dalam skala logaritmik. Hal ini dimaksudkan agar sebaran data dapat ditampilkan dengan jelas. Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa kecepatan superfisial gas maupun cairan berpengaruh terhadap gradien tekanan secara signifikan, semakin tinggi  $J_G$  menyebabkan semakin tingginya gradien tekanan, dan sebaliknya. Demikian juga halnya dengan  $J_L$ . Hal ini karena kenaikan  $J_G$  maupun  $J_L$  akan menaikkan kecepatan superfisial total dari aliran fluida (*total volumetric flux*), yang secara teoritis berpengaruh pada kenaikan gradien tekanan secara signifikan.



(a)

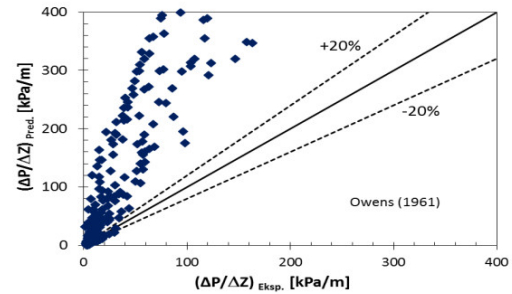


(b)

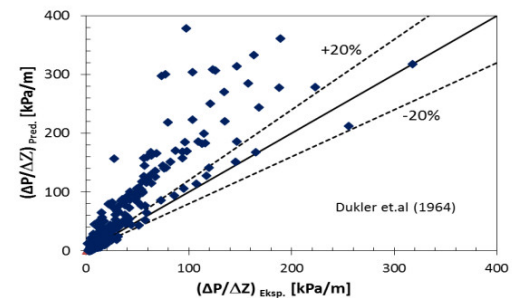
Gambar 4. (a) Pengaruh  $J_L$  terhadap *pressure gradient* pada berbagai  $J_G$ , (b) Pengaruh  $J_G$  terhadap *pressure gradient* pada berbagai  $J_L$ .

Selanjutnya semua data *pressure gradient* hasil eksperimen dibandingkan dengan data hasil prediksi yang dihitung dengan menggunakan model homogen (*homogeneous model*) maupun model terpisah (*separated model*), sebagaimana pernah dilakukan oleh Kawahara dkk.[9], Chung dan Kawaji [10], dan Sur dan Liu [11]. Pada model homogen, gas dan cairan dianggap tercampur sempurna dan mengalir pada kecepatan yang sama, sehingga campuran dua-fase dapat dipandang sebagai fluida satu-fase [11]. Pada model homogen, *pressure gradient* diprediksi dengan perhitungan berdasarkan formulasi viskositas

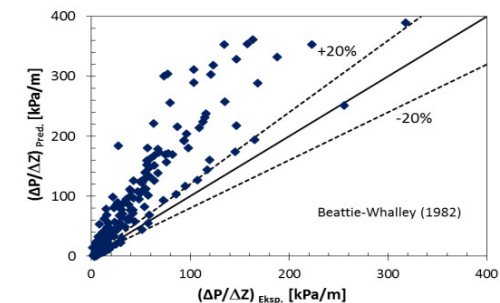
dua-fase nya. Dalam hal ini dikenal beberapa korelasi, sebagai berikut [9]:



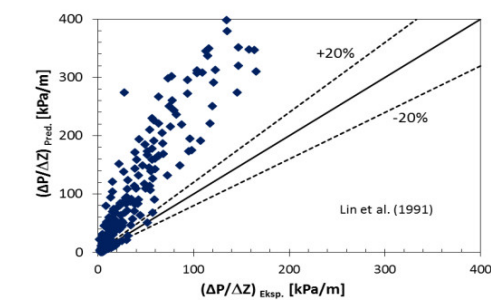
(a).Owens (1961)



(b).Dukler dkk. (1964)



(c).Beattie dan Whalley (1982)



(d).Lin et al. (1991)

Gambar 5. Komparasi gradien tekanan antara hasil eksperimen dan prediksi menggunakan model homogen dengan berbagai formulasi viskositas dua-fase.

Owens (1961):  $\mu_{TP} = \mu_L$  (1)

Dukler dkk. (1964):  $\mu_{TP} = \beta\mu_G + (1 - \beta)\mu_L$  (2)

Beattie dan Whalley (1982):  $\mu_{TP} = \mu_L (1 - \beta)(1 + 2,5\beta) + \mu_G\beta$  (3)

Lin et al. (1991):  $\mu_{TP} = \frac{\mu_L\mu_G}{\mu_G + x^{1,4}(\mu_L - \mu_G)}$  (4)

dengan:  $\mu$  adalah viskositas,  $\beta$  adalah fraksi hampa homogen, dan  $x$  adalah kualitas gas. Subskrip  $TP$  menyatakan kondisi dua-fase, subskrip  $L$  untuk fase cair dan subskrip  $G$  untuk fase gas.

Komparasi antara gradien tekanan hasil eksperimen dengan gradien tekanan prediksi dengan model homogen ditampilkan pada Gambar 5. Terlihat dari gambar tersebut bahwa prediksi dengan model homogen kurang sesuai dengan hasil eksperimen. Hal ini disebabkan karena, dari hasil pengamatan secara visual, mayoritas pola aliran yang terbentuk bukanlah aliran homogen (*bubbly, plug, slug-annular*, maupun *annular*). Diantara model korelasi yang ditampilkan, model korelasi dari Dukler dkk. [12] merupakan model yang paling baik kesesuaiannya, artinya prediksi viskositas dua-fase yang paling baik dibandingkan dengan korelasi yang lain. Dengan kata lain, formulasi prediksi viskositas dua-fase dari Dukler dkk. [12] paling mendekati viskositas dua-fase yang sebenarnya.

Berbeda dengan model homogen, pada model aliran terpisah, fase gas dan fase cair diasumsikan mengalir secara terpisah dengan kecepatan yang berbeda. Pada penelitian ini, seperti yang dilakukan oleh Kawahara dkk. [9], *pressure gradient* prediksi dihitung menggunakan korelasi empirik dari Lockhart dan Martinelli (1949), Chisholm (1973), Friedel (1979), serta Mishima dan Hibiki (1996). Korelasi dari Lockhart dan Martinelli (1949) menggunakan pengali dua-fase yang didefinisikan sebagai berikut:

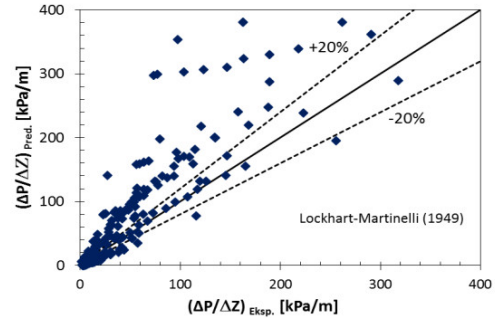
$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_{TP} = \phi_L^2 \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_L \quad (5)$$

dengan  $(\Delta P_f/\Delta Z)_L$  adalah penurunan tekanan satu-fase cair akibat gesekan. Pengali dua-fase juga dapat dikaitkan dengan parameter Martinelli, ( $X$ ),

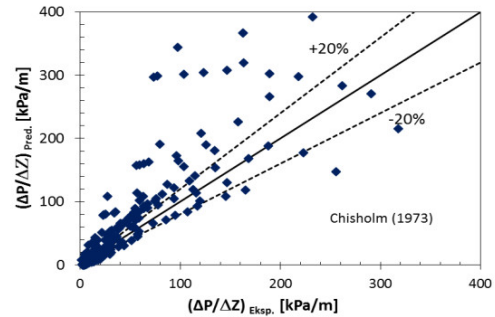
$$X^2 = \frac{\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_L}{\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta Z}\right)_G} \quad (6)$$

dengan  $(\Delta P_f/\Delta Z)_G$  adalah penurunan tekanan satu-fase gas akibat gesekan. Untuk menghitung besarnya

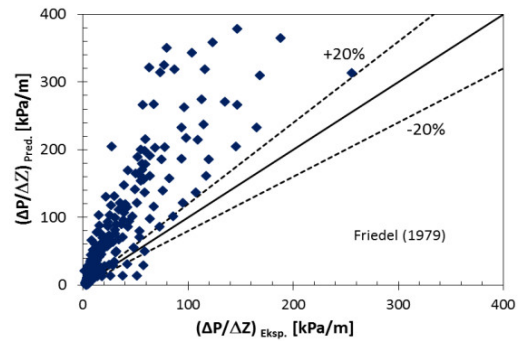
pengali dua-fase, Chisholm dan Laird (1958) mengusulkan korelasi sebagai berikut, pers. (7):



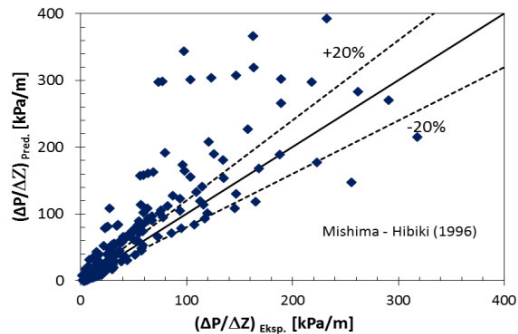
(a) Lockhart-Martinelli (1949)



(b) Chisholm (1973)



(c) Friedel (1979)



(d) Mishima dan Hibiki (1996)

Gambar 6. Komparasi gradien tekanan antara hasil eksperimen dan prediksi menggunakan model terpisah dengan berbagai korelasi

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (7)$$

$C$  adalah suatu konstanta, yang harganya tergantung pada kondisi aliran baik gas maupun cairan apakah laminar atau turbulen. Mishima dan Hibiki [13] telah mengusulkan formulasi untuk  $C$  sebagai fungsi dari diameter, sebagai berikut:

$$C = 21 (1 - e^{-0,333D}) \quad (8)$$

Dengan  $D$  adalah diameter saluran.

Selanjutnya, dibuat grafik hubungan antara gradien tekanan hasil penelitian (absis) dan gradien tekanan prediksi (ordinat) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Tampak pada gambar tersebut, banyak data prediksi yang tidak sesuai dengan data penelitian (sebagian besar *over predicted*), kecuali prediksi menggunakan korelasi dari Mishima dan Hibiki [13], Gambar 6(d). Diantara prediksi yang ditampilkan, prediksi dengan korelasi dari Mishima dan Hibiki mempunyai kesesuaian paling baik terhadap data eksperimen. Hal ini dikarenakan korelasi-korelasi empiris yang digunakan tersebut adalah korelasi untuk saluran konvensional, sedangkan korelasi Mishima dan Hibiki didapatkan dari eksperimen dengan saluran kecil (1 - 4 mm). Disamping itu, korelasi tersebut juga mengakomodasi besarnya ukuran saluran.

## 7. Kesimpulan

Telah dilakukan studi eksperimental untuk gradien tekanan pada aliran dua-fase udara-campuran air dan 20% gliserin dalam pipa berdiameter dalam 1,6 mm horisontal. Kecepatan superfisial gas pada rentang 0,025-66,3 m/s, sedangkan kecepatan superfisial cairan 0,033-4,935 m/s. Selanjutnya data hasil pengukuran juga dibandingkan dengan hasil perhitungan prediksi dengan model homogen dan model terpisah. Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Kecepatan superfisial gas maupun kecepatan superfisial cairan mempengaruhi besarnya gradien tekanan secara signifikan. Semakin besar kecepatan superfisial gas ataupun cairan, semakin besar gradien tekanan. Hal ini sesuai dengan teori bahwa besarnya gradien tekanan merupakan fungsi dari *total volumetric flux*.
- Data hasil eksperimen dibandingkan dengan prediksi dengan model homogen, yang menggunakan korelasi empiris viskositas dua-fase dari Owens (1961), Dukler dkk. (1964), Beattie dan Whalley (1982), dan Lin dkk. (1991). Secara

umum kesesuaiannya kurang baik (*over predicted*). Hal ini dikarenakan, pola aliran yang terbentuk kebanyakan bukan merupakan aliran homogen.

- Data hasil penelitian juga dibandingkan dengan prediksi hasil perhitungan menggunakan model terpisah dari Lockhart dan Martinelli (1949), Chisholm (1973), Friedel (1979), serta Mishima dan Hibiki (1996). Data prediksi dengan korelasi Mishima dan Hibiki (1996) mempunyai kesesuaian paling baik terhadap data eksperimen dibandingkan korelasi yang lain. Hal ini karena korelasi Mishima dan Hibiki (1996) didapatkan dari penelitian yang menggunakan pipa berukuran kecil, dan mengakomodasi besarnya ukuran saluran.

## Daftar Pustaka

- Triplett, K. A., Ghiaasiaan, S. M., Abdel-khalik, S.I., and Sadowski, D. L., 1999a, Gas-Liquid two-phase flow in microchannels. Part I: Two-phase flow pattern. *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 25, pp. 377-394.
- Sowinski, J., Dziubinski, M., 2007, The effect of liquid viscosity on the void fraction in two-phase gas-liquid flow in narrow mini-channels, Proceedings of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6)
- Matsubara, H., Naito, K., 2011, Effect of Liquid Viscosity on Flow Pattern of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Horizontal Pipe, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 37, pp. 1277-1281.
- Zhao, Y., Yeuang, H., Zorgani, E.E., Archibong, A.E., Lao, L., 2013, High Viscosity Effects on Characteristics of Oil and Gas Two-Phase Flow in Horizontal Pipes, *Chemical Engineering Science*, Vol 95, pp. 343-352
- Parsi, M., Vieira, R.E., Torres, C.F., Kesana, N., McLaury, B.S., Shirazi, S.A., Schleicher, E., Hampel, U., 2015, Parsi, M., Vieira, R.E., Torres, C.F., Kesana, N., McLaury, B.S., Shirazi, S.A., Schleicher, E., Hampel, U., On the effect of liquid viscosity on interfacial structures with in churn flow: Experimental study using wire mesh sensor, *Chem. Eng. Science*, Vol. 130, 221-238.
- Stähle, P., Gaukel V., Schuchmann H.P., 2015, Influence of feed viscosity on the two-phase flow inside the exit orifice of an effervescent atomizer and on resulting spray characteristics, *Food Research International*, Vol. 77, 55-62.
- Hanafizadeh, P., Karimi, A., Taklifi, A., Hojati, A., 2016, Experimental investigation of two-phase water-oil flow pressure drop in inclined pipes, *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 74, 169-18
- Jayadi, F., 2016, Studi eksperimental pengaruh viskositas terhadap karakteristik aliran dua-fase (udara-campuran air dan gliserin) di dalam pipa dengan diameter berukuran mini, *Thesis Teknik Mesin dan Industri*, UGM, Yogyakarta.

- [9] Kawahara A., Chung P.M., Kawaji M., 2002, Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 28, pp. 1411-1435.
- [10] Chung, P.M.-Y., Kawaji, M., 2004. The effect of channel diameter on adiabatic two-phase flow characteristics in microchannel. *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 30, pp. 735-761.
- [11] Sur A., Liu D., 2012, Adiabatic air-water two-phase flow in circular microchannels, *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 53, pp. 18-34.
- [12] Dukler, A.E., Wicks III, M., Cleveland, R.G., 1964. Pressure drop and hold-up in two-phase flow. *AIChE J.*, Vol. 10 (1), pp. 38–51.
- [13] Mishima K., Hibiki T., 1996, Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes, *Int. J. Multiphase flow*, Vol 2, pp. 703-712.

#### **Ucapan terima kasih**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Diko Anutup, Wenang Suprayogi, dan Dimas Ferly, atas kontribusinya dalam penyiapan alat, pengambilan data, olah data dan diskusinya.