

KARAKTERISTIK ALIRAN TAYLOR SISTEM GAS-LIQUID DALAM MICROCHANNEL BERPENAMPANG LINGKARAN

Aloisius Yuli Widiyanto

Teknik Kimia, Universitas Surabaya
Jl. Raya Kalirungkt, Surabaya, Indonesia
Penulis korespondensi: aloy_sius_yw@staff.ubaya.ac.id

Abstrak

Sistem miniaturisasi memiliki kinerja yang unggul dibandingkan dengan alat-alat konvensional karena mampu menghasilkan luas permukaan spesifik (A/V) yang sangat besar untuk berlangsungnya perpindahan massa dan panas antar fase. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakterisasi aliran dua fase metanol-udara dalam microchannel berpenampang lingkaran dari bahan PTFE (Poly tetra fluoro etilen) yang meliputi karakterisasi dimensi bubble dari 3 jenis konfigurasi channel, pengaruh besarnya kecepatan gas dan liquid serta perubahan tekanan sepanjang channel terhadap dimensi panjang bubble di bagian inlet dan outlet tube. Percobaan dilakukan dengan cara memvisualisasi pola aliran gas-liquid (jenis Taylor) dan mengukur dimensi panjang bubble inlet dan outlet yang terbentuk dalam channel dengan diameter dalam 1 mm. Aliran Taylor yang menjadi fokus pengamatan memiliki bentuk dan dimensi yang seragam serta tetap dari waktu ke waktu. Peningkatan rasio kecepatan linier (U_G/U_L) menyebabkan peningkatan panjang bubble di seluruh bagian channel dari bagian inlet sampai outlet. Panjang bubble di bagian outlet lebih besar daripada di bagian inlet karena pengaruh peningkatan pressure drop sepanjang tube dan kadang-kadang karena munculnya fenomena penggabungan bubble. Sifat pembasahan fase liquid terhadap dinding dalam channel menentukan jenis pola aliran, dan dimensi panjang bubble di sepanjang channel.

Kata kunci: panjang bubble; tekanan; slug; microchannel; Taylor

GAS-LIQUID TAYLOR FLOW CHARACTERISTICS IN CIRCULAR MICROCHANNEL

Abstract

Miniaturization performs better than conventional equipment since it can generate a high specific surface (A/V) for mass and heat transfer between phases. The current studies aimed at characterizing the two-phase flow pattern (air-methanol) with a circular cross-sectional area of silicone, determining bubble length in the inlet and outlet section by using the three configurations of microchannel; finding the effect of gas and liquid velocity as well as the pressure drop throughout the channel to the bubble dimensions formed. The experiments were conducted by visualizing a gas-liquid flow pattern (Taylor) and measuring the bubble length within a channel of 1 mm ID. As a flow pattern target in this work, Taylor has a uniform shape, dimension, and constant velocity during observations. An increase in the ratio of linear velocity (U_G/U_L) brings on an increase in bubble length throughout the channel from the inlet to the outlet section. The bubble length outlet is longer than the inlet section due to the effect of increasing pressure drop (ΔP) and is sometimes caused by the bubble coalescence phenomena. The wettability on the inner wall of the microchannel strongly determined the flow pattern type and the length of bubbles.

Keywords: bubble length; pressure; slug; microchannel; Taylor

PENDAHULUAN

Karakteristik aliran dua fase dalam pipa kapiler sangat berbeda dengan aliran dalam pipa/saluran/tube dari dimensi yang lebih besar. Dengan demikian literatur-literatur yang begitu banyak tersedia berkaitan dengan fenomenologi dari

perpindahan massa/panas antar fase dan proses-proses hidrodinamika aliran dua fase secara umum tidak dapat diaplikasikan untuk aliran dalam pipa kapiler ini. Pada sistem kapiler, gaya tegangan permukaan bekerja secara dominan dan secara signifikan mampu mereduksi *slip velocity*, dan membuat karakteristik aliran menjadi tidak

tergantung pada orientasi *channel* yang berhubungan dengan gaya gravitasi (Triplett et al., 1999; Volkel et al., 2008). Fitur utama dari aliran dua fase adalah kemunculan sebuah *interface* yang memisahkan fase gas dan *liquid*. Pada sistem dengan dimensi *channel* pada skala mikro, pengaruh gaya tegangan permukaan akan semakin besar, gaya inersia semakin kecil dan dapat diabaikan pengaruhnya; kondisi ini menyebabkan sebuah perubahan yang signifikan dalam evolusi jenis-jenis pola aliran dua fase dalam *channel* skala mikro dibandingkan dengan konvensional *channel* (Rajesh & Buwa, 2012).

Peneliti-peneliti terdahulu telah banyak yang mengkonfirmasi perbedaan signifikan antara aliran dua fase dalam pipa kapiler dan pipa-pipa dengan dimensi yang lebih besar ditinjau dari aspek perubahan tekanan dua fase (Zhao et al., 2013; Warnier et al., 2010), besarnya koefisien perpindahan massa dan panas (Vasilev & Abiev, 2021; Kashid et al., 2011), dan pembentukan pola aliran dua fase (Puccetti et al., 2015). Lebih jauh, pemanfaatan *microdevice* secara optimal menuntut pemahaman yang baik tentang perilaku aliran dua fase, tiga fase atau lebih secara baik dalam *microchannel*. Studi pembentukan pola aliran dua fase gas-liquid telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu (Puccetti et al., 2015), dan telah berhasil mengidentifikasi beberapa jenis pola aliran yang terbentuk meliputi *slug*, *bubbly*, *churn*, *slug annular*, dan *annular* (Triplett et al., 1999). Dari pola aliran yang terbentuk dalam *channel*, *regime* aliran *slug* yang disebut juga sebagai *regime* Taylor yang tersusun dari *bubble* dan *slug* dengan bentuk, dan ukuran yang seragam serta kecepatan alir yang konstan di sepanjang *channel* merupakan jenis aliran yang paling stabil, dan pembentukannya selalu menjadi target studi/penelitian untuk tujuan pengembangan unit-unit proses yang melibatkan perpindahan massa dan atau panas antar fase dalam *microchannel* (Zhang et al., 2021). Analisis ilmiah terhadap hasil-hasil investigasi ini telah menempatkan banyak informasi penting yang akan menjadi petunjuk dalam penentuan kondisi operasi optimum seperti suhu, tekanan, dan laju alir yang mampu menghasilkan pola aliran stabil dengan luas permukaan kontak yang besar untuk mendukung berlangsungnya perpindahan massa dan atau panas dari fase-fase yang tidak bercampur.

Karena itu topik penelitian yang sangat menarik dalam kaitannya dengan pengembangan sistem *microfluidic* ini adalah investigasi karakteristik aliran dua fase dalam sistem *microdevice* yang melibatkan fase gas dan fase *liquid*. Selama ini aliran dua fase secara ekstensif telah di pelajari dalam konvensional *channel* (Saljoshi & Autee, 2017) dalam bentuk evolusi pola aliran sebagai fungsi dari kecepatan superficial fase gas/liquid menggunakan *channel* dengan diameter yang lebih besar dari 1 mm. Sebaliknya, analisa aliran dua fase dalam *microsystem* sejauh ini terbatas pada geometri yang

sederhana dan kecepatan superficial pada *range* yang terbatas, serta minim penggunaan *variable* suhu dalam percobaan, padahal suhu sangat berpengaruh pada sifat fisik fase *liquid* dan terlebih fase gas. Untuk itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran dua fase dalam *microchannel* berpenampang lingkaran dari bahan PTFE (Teflon) yang meliputi karakteristik dimensi *bubble* dari tiga jenis konfigurasi *channel*, pengaruh besarnya kecepatan gas dan liquid serta perubahan tekanan sepanjang *channel* terhadap dimensi panjang *bubble* yang terbentuk.

METODE PENELITIAN

Bahan

Pola aliran dua fase diamati dalam percobaan dengan menggunakan udara sebagai fase gas dan metanol (CH₃OH) sebagai fase *liquid*. Sifat fisika fase gas dan liquid yang berpengaruh terhadap pembentukan pola aliran dalam skala mikro pada 25°C ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat fisika udara dan metanol

Fluida	ρ (kg/m ³)	μ (kg/m.s)	σ (N/m)
Air	1.2041	1.82E-05	-
CH ₃ OH	792	5.90E-04	2.27E-02

ρ = densitas, μ = viskositas, σ = tegangan permukaan

Alat

Microchannel yang digunakan dalam penelitian ini memiliki diameter dalam 1mm, panjang 30m; dan diameter dalam 1,5mm, panjang 6m, dari bahan *poly tetra fluoro etilen* (PTFE/Teflon). Untuk mengalirkan metanol ke dalam *channel* digunakan *pompa syringe* (HARVARD Apparatus PHD 2000). Pompa ini mampu mengalirkan metanol dengan debit minimum dan maksimum pada *range* 0,0001 μ l/hr (dengan 0,5 μ l *syringe*) sampai dengan 220,82 ml/min (dengan 140ml *syringe*), sedangkan untuk mengalirkan udara digunakan SERV INSTRUMENTATION 0151B, yang memungkinkan udara mengalir dengan debit pada *range* 0.00 to 20 Ncm³/min dengan maksimum tekanan gas sebesar 1,5 bars abs.

Visualisasi aliran dua fase yang terbentuk dalam *microchannel* dilakukan dengan menggunakan *high speed* digital camera dengan bantuan sumber cahaya (lampu LED) yang memungkinkan deteksi interfas antara gas dan liquid dapat diamati secara jelas. Observasi terhadap hasil visualisasi dilakukan dengan bantuan *software* GIMP.

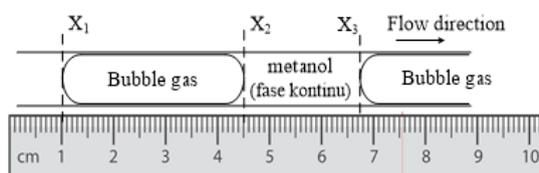
Metode Penelitian

Percobaan dilakukan dalam 3 tahap, yaitu tahap pertama, pembentukan pola aliran dua fase dengan fokus pola aliran Taylor dalam *microchannel*;

tahap kedua, melakukan visualisasi pola aliran Taylor, dan tahap ketiga, melakukan pengukuran panjang *bubble* pada pola aliran Taylor yang terbentuk.

Pembentukan pola aliran Taylor dipengaruhi oleh jenis/sifat fase gas dan *liquid* yang diamati, seperti densitas, viskositas, dan tegangan permukaan. Jenis aliran Taylor hanya terbentuk pada *range* debit gas dan *liquid* tertentu, sehingga pada tahap awal percobaan dilakukan pengontakan udara dan metanol dengan variasi debit aliran untuk mengetahui *range* debit masing-masing fase yang mampu menghasilkan pola Taylor (Zhang et al., 2021).

Analisa hasil percobaan dilakukan dengan cara mengukur panjang *bubble* di bagian *inlet* dan *outlet channel* dengan metode seperti terlihat pada Gambar 1 dengan bantuan *software* GIMP.



Gambar 1. Metode pengukuran dimensi panjang *bubble* dan *slug*. *Slug* adalah area diantara *bubble-bubble* yang berdekatan

HASIL DAN PEMBAHASAN

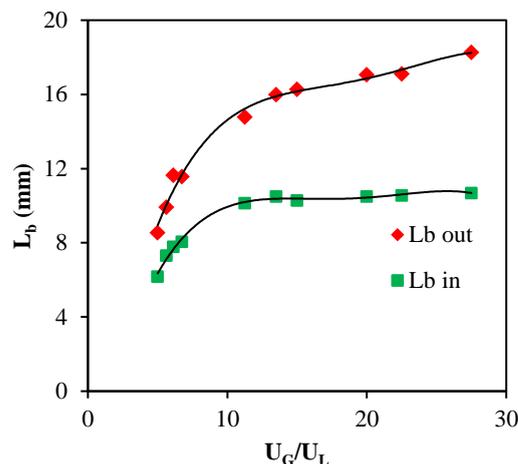
Dimensi panjang *bubble* pada bagian *inlet* dan *outlet microchannel* dengan variasi diameter *inlet tube* untuk gas dan *liquid* serta dengan diameter *channel* utama tetap 1mm diukur pada percobaan ini. Dimensinya berbeda-beda, selain dipengaruhi oleh sifat fisik fluida yang digunakan seperti viskositas, densitas, sudut kontak dan sifat pembasahan *liquid* pada dinding dalam *tube*, panjang *bubble* juga dipengaruhi oleh diameter dalam *tube*, laju alir volumetrik fluida serta bentuk kontak di bagian *inlet* (*T* dan *Y-junction*).

1. Karakteristik Panjang *Bubble*

Gas dan *liquid* yang mengalir dalam *tube* membentuk beberapa jenis pola aliran dua fase. Akan tetapi studi saat ini memfokuskan pada jenis pola aliran Taylor yang merupakan pola aliran stabil, yaitu memiliki bentuk dan dimensi yang seragam dari waktu ke waktu, panjang *slug* yang tetap, dan memiliki kecepatan *linier* yang konstan.

Dalam aplikasinya, pola aliran yang stabil ini memudahkan dalam pengendalian dan kontrol proses; luas permukaan kontak antar fase yang besar dapat dihasilkan untuk keberlangsungan perpindahan massa dan atau panas yang lebih baik sehingga konversi reaksi dan *yield* yang tinggi dengan mudah dapat direalisasikan. Pola aliran Taylor yang berhasil diobservasi dalam penelitian ini memiliki bentuk seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Gelembung-

gelembung udara terbentuk dalam *channel* dengan dikelilingi oleh metanol sebagai fase kontinyu. Penggunaan metanol yang bersifat membasahi dinding menghasilkan sebuah lapisan *film* tipis pada celah sempit antara *bubble* dan dinding dalam *tube*. Dimensi *bubble* di bagian *inlet* dan *outlet tube* untuk konfigurasi diameter *inlet tube* masing-masing 1mm terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh rasio kecepatan fase gas terhadap fase *liquid* pada panjang *bubble* di bagian *inlet tube* (berjarak sekitar 20 cm dari *T-junction*); dan pada bagian *outlet tube*. Diameter dalam *tube* pada bagian *inlet* fase *liquid* = 1mm, *inlet* fase gas = 1 mm, dan panjang *tube* = 30 m

Gambar 2 menunjukkan bahwa perubahan rasio kecepatan linier gas-liquid (U_G/U_L) berpengaruh pada panjang *bubble* di bagian *inlet* dan *outlet*. Pada rasio kecepatan linier yang semakin besar, panjang *bubble inlet* meningkat pada *range* dari 6-11mm. Demikian juga panjang *bubble* di bagian *outlet* turut meningkat pada *range* 8-18,5 mm dengan semakin besarnya rasio. Akan tetapi bila diperhatikan, pengaruh perubahan rasio kecepatan terlihat lebih signifikan pada lokasi dimana *bubble* keluar dari sistem. Peningkatan panjang *bubble* di bagian *outlet* selain disebabkan oleh peningkatan kecepatan udara juga disebabkan oleh fenomena penggabungan *bubble-bubble* yang berurutan (*bubble coalescence*) membentuk *bubble* yang lebih besar ukurannya. Fenomena *bubble coalescence* ini dapat dideteksi melalui pengukuran *pressure drop* dua fase (ΔP) di sepanjang *channel*. Besarnya pengaruh *pressure drop* dua fase dijelaskan lebih detail pada bagian C.

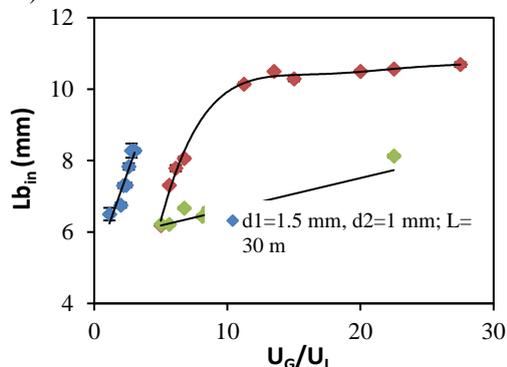
Panjang *bubble* pada bagian ini diperoleh pada rasio kecepatan linier fase gas dan fase *liquid* (U_G/U_L) yang berbeda, dan diameter *inlet tube* fase gas (d_1) dan fase *liquid* (d_2) yang bervariasi dengan konektor *inlet* berbentuk *T-junction*. Tiga konfigurasi yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Konfigurasi yang digunakan dalam pengamatan pola aliran

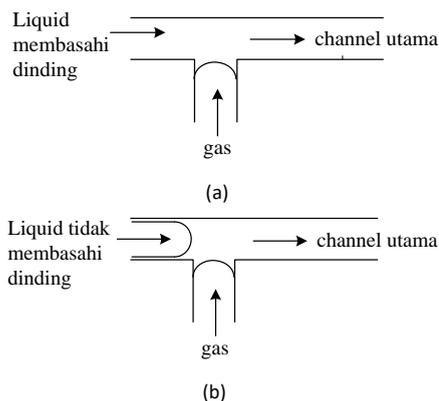
Konfigurasi Channel	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_{ch} (mm)	L_{ch} (m)
Konfigurasi 1	1,5	1	1	30
Konfigurasi 2	1	1	1	30
Konfigurasi 3	1	1,5	1,5	6

d_1 = diameter inlet gas; d_2 = diameter inlet liquid; d_{ch} = diameter channel utama

Diameter *tube* di bagian *inlet gas-liquid* yang berbeda pada rasio kecepatan linier (U_G/U_L) yang sama menghasilkan panjang *bubble* yang berbeda. Panjang *bubble* terbesar ditunjukkan oleh konfigurasi *channel* 1. Peningkatan nilai rasio U_G/U_L menyebabkan peningkatan panjang *bubble*. Pada *channel* dengan diameter inlet liquid 1 mm, diameter inlet gas 1,5mm dan panjang 30m (konfigurasi 1) terlihat bahwa perubahan kecil pada nilai rasio memberikan dampak signifikan terhadap perubahan dimensi panjang *bubble* dibandingkan dengan konfigurasi *channel* yang lain. Pengaruh terkecil perubahan rasio kecepatan linier terhadap panjang *bubble* ditunjukkan oleh konfigurasi *channel* 3. Semakin besar diameter inlet gas, peranan fase gas semakin dominan dalam pembentukan *bubble* di *T-junction* (Gambar 3). Pada *liquid* yang membasahi dinding dalam *tube* seperti metanol yang digunakan dalam percobaan ini, karena metanol memiliki sifat pembasahan dinding PTFE (teflon) yang sangat baik, metanol dengan mudah dapat memotong kepala *bubble* yang berhasil melakukan penetrasi menuju *channel* utama. Sifat pembasahan metanol pada dinding *tube* yang terbuat dari PTFE dianalisa dan diukur sudut kontaknya diperoleh sebesar 143° . Sebaliknya, pada sistem dengan *liquid* yang tidak membasahi dinding *tube*, *gas relative* lebih sulit menembus fase *liquid* sehingga pembentukan pola aliran Taylor pada *channel* utama membutuhkan gaya inersia fase gas yang lebih besar yang dapat dicapai dengan cara memperbesar debitnya (Wang et al., 2010).



Gambar 3. Pengaruh perubahan rasio kecepatan fase gas terhadap fase *liquid* (U_G/U_L) pada dimensi panjang *bubble* di bagian inlet *tube* (berjarak sekitar 20 cm dari *T-junction*). d_1 = diameter dalam inlet *tube* fase liquid, d_2 = diameter dalam inlet *tube* fase gas



Gambar 4. Liquid yang membasahi dinding dengan mudah memotong kepala *bubble* yang melakukan penetrasi menuju *channel* utama, (b) Fase gas lebih sulit menembus fase *liquid* yang tidak membasahi dinding

Dengan demikian jenis material *channel* dan jenis *liquid* menentukan jenis pola aliran yang terbentuk di dalam *channel*. Pada rasio U_G/U_L yang sama, dengan *channel* terbuat dari bahan yang berbeda dan *liquid* dengan sifat fisik yang berbeda, karakteristik pola aliran yang terbentuk dalam *channel* akan berbeda.

2. Bilangan Tidak Berdimensi

Nilai *Reynold Number* dan *Capillary Number* mampu mengkarakterisasi pola aliran dalam *microchannel*. Dari nilai bilangan tidak berdimensi ini dapat diketahui gaya-gaya yang bekerja dalam sistem dua fase *gas-liquid*. Dari percobaan diperoleh nilai bilangan tidak berdimensi seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Bilangan tidak berdimensi

Bilangan Tidak Berdimensi	Nilai
Reynold number fase gas ($N_{Re,GS}$)	1,404 – 4,255
Reynold number fase liquid ($N_{Re,LS}$)	1,900 – 49, 876
Capillary number (C_a)	0,000055 – 0,00097

Bilangan Reynold untuk fase gas dan *liquid* memiliki nilai lebih besar dari 1. Bilangan Reynold menyatakan rasio dari gaya inersia terhadap gaya *viscous*. Karena itu berdasarkan bilangan Reynold gaya inersia bekerja lebih dominan daripada gaya *viscous*. Sedangkan *Capillary number* dalam percobaan ini memiliki nilai lebih kecil dari 1. *Capillary number* menyatakan rasio dari gaya *viscous* terhadap gaya tegangan permukaan. Berdasarkan nilai *Capillary number*, gaya tegangan permukaan bekerja lebih dominan daripada gaya *viscous*. Dengan demikian dari dua bilangan tidak berdimensi ini dapat diurutkan pengaruh besarnya gaya-gaya yang bekerja

pada sistem yang diamati pada penelitian ini, yaitu gaya inersia > gaya tegangan permukaan > gaya viskos. Tegangan permukaan metanol murni sebesar 24 mN/m, dan tegangan permukaan campuran methanol + methylen blue sebesar 24,5 mN/m. Methylen blue digunakan untuk memudahkan pengamatan pola aliran.

3. Pressure Drop Sistem Dua Fase (Metanol-Udara)

Dalam sistem dua fase gas-liquid, pola aliran yang terbentuk sepanjang microtube tidak dapat dipisahkan dari kenaikan pressure drop (ΔP) (Zhao et al., 2013). Dalam tube dengan dimensi mikro dan sangat panjang, perubahan tekanan fluida di bagian inlet sangat berbeda dengan perubahan tekanan di bagian outlet. Karena sistem yang diobservasi melibatkan fase gas yang sangat responsif dengan perubahan tekanan, maka design dari microdevice yang ditujukan untuk sistem gas-liquid seharusnya mempertimbangkan besarnya perubahan tekanan ini.

Pressure drop dalam channel dapat diketahui besarnya dengan menggunakan model yang diajukan oleh Kreutzer. Model ini merupakan pengembangan model yang diajukan oleh Bretherton, dimana model Bretherton hanya valid untuk sistem dengan karakteristik: capillary number sangat kecil (mendekati nol), ketebalan film liquid mendekati nol sehingga luas area penampang bubble sama atau mendekati luas area microtube (Warnier et al., 2010). Kedua syarat ini telah dipenuhi oleh hasil-hasil observasi aliran dua fase metanol-udara dalam penelitian ini sehingga model Kreutzer ini dapat digunakan. Pressure drop -(dP/dz) di sepanjang microchannel sesuai dengan model Kreutzer diberikan dengan Persamaan (1).

$$\frac{-dP}{dz} = \frac{\Delta P_{uc}}{L_b + L_s} = \frac{1}{L_b + L_s} \frac{32\mu_l(U_g + U_l)}{D_c^2} \cdot (L_s + \delta) + 7.16 \frac{\sigma(3Ca_b)^{2/3}}{D_c(1 + 3.34Ca_b^{2/3})} \dots\dots\dots(1)$$

ΔP_{uc} = pressure drop untuk 1 unit cell yang terdiri dari 1 bubble dan 1 slug, L = panjang, b = bubble, s = slug, σ = tegangan permukaan, D = diameter, c = channel, U = kecepatan, δ = faktor koreksi panjang bubble. Hasil integrasi dan penyederhanaan Persamaan (1) diperoleh Persamaan (2) (Warnier et al., 2010).

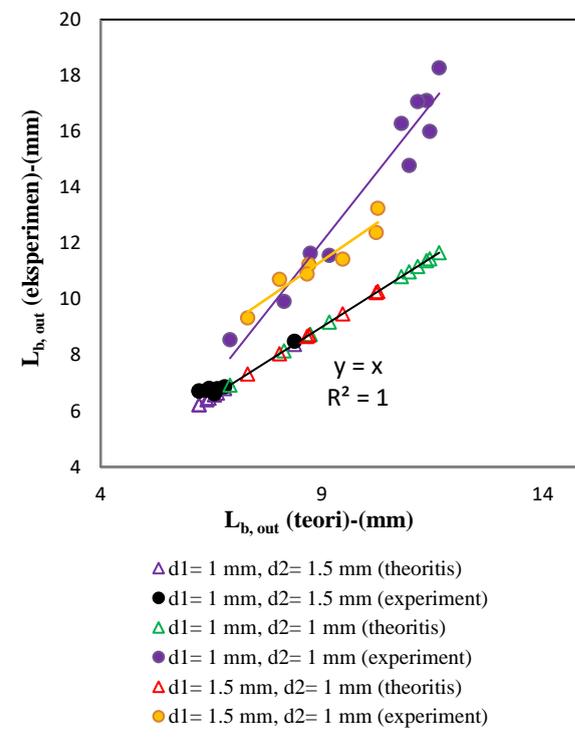
$$\Delta P = 32 \cdot \mu_l \cdot \frac{(U_g + U_l)}{D_c^2} \left(\frac{L_s}{L_b + L_s} \right) \Delta z \dots\dots\dots(2)$$

Pada kondisi steady state, gaya gravitasi dan perbedaan temperature diabaikan, serta fase yang

berada pada keadaan setimbang memiliki tekanan yang seragam (Zhao et al., 2013). Karena itu Persamaan (2) ini dapat digunakan untuk menghitung panjang bubble di bagian outlet tube menggunakan hukum Boyle:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \dots\dots\dots(3)$$

P = tekanan, V = volume bubble, indeks 1 dan 2 masing-masing menunjukkan bagian inlet tube, dan outlet tube. Perhitungan panjang bubble dengan Persamaan (3) menggunakan pendekatan bahwa bentuk bubble menyerupai silinder, sehingga dengan mudah dapat ditentukan panjang bubble dalam channel (Hellmann & Agar, 2019). Profil pressure drop yang diperoleh dan pengaruhnya terhadap panjang bubble dengan menggunakan Persamaan (3) di bagian outlet ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Panjang bubble outlet tube dengan perubahan pressure drop (ΔP) channel

Berdasarkan Gambar 5, panjang bubble teoritis di bagian outlet seharusnya membentuk kecenderungan garis lurus (y=x). Akan tetapi kecenderungan yang diperoleh dalam eksperimen menunjukkan perbedaan signifikan dengan teori. Panjang bubble eksperimen pada lokasi yang semakin dekat dengan bagian outlet tube menunjukkan penyimpangan yang semakin besar. Penyimpangan panjang bubble ini dipengaruhi oleh perubahan pressure drop sepanjang channel dari bagian inlet sampai dengan outlet, dan kadang-kadang karena fenomena penggabungan bubble (coalescence).

SIMPULAN

Dari hasil percobaan dapat disimpulkan beberapa poin penting antara lain: hasil observasi aliran Taylor yang menjadi fokus penelitian ini memiliki bentuk dan dimensi yang seragam dan tetap dari waktu ke waktu; pola aliran Taylor mengalir dalam *channel* dengan kecepatan linier konstan. Dimensi *bubble* dan *slug* yang muncul dalam *channel* menunjukkan kecenderungan yang konstan. Peningkatan rasio kecepatan linier (U_G/U_L) menyebabkan peningkatan panjang *bubble* di seluruh bagian *channel* dari bagian *inlet* sampai *outlet*. Panjang *bubble* di *outlet section* > *inlet section*. Untuk itu perubahan tekanan di sepanjang *channel* dari bagian *inlet* sampai *outlet* dari sistem dua fase yang melibatkan gas sebaiknya tidak diabaikan. Perubahan tekanan memiliki korelasi kuat dengan panjang *bubble* yang terbentuk. Sifat pembersihan fase *liquid* terhadap dinding dalam *channel* menentukan jenis pola aliran, dimensi panjang *bubble* dan *slug* yang terbentuk apabila pola aliran yang terbentuk adalah pola aliran Taylor. Penggunaan *liquid* yang bersifat membasahi dinding dalam *channel* memunculkan film *liquid* tipis yang berada pada daerah sempit antara *bubble* dan dinding dalam *channel*. Bilangan tidak berdimensi (N_{Re} , dan C_a) mampu memberikan gambaran dominasi gaya-gaya yang bekerja dan memiliki pengaruh signifikan pada sistem dua fase ini. Tiga gaya dominan yang bekerja dalam skala mikro yang diamati dalam penelitian ini meliputi gaya inersia, gaya *viscous* dan gaya tegangan permukaan. Penggunaan parameter operasi yang berbeda akan menghasilkan dominasi gaya yang berbeda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih atas dukungan financial dari *the Indonesia Endowment Fund for Education (LPDP)*, Kementerian Keuangan, serta Direktorat Sumber Daya Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Hellmann, D., & Agar, D. W. (2019). Modeling of Slug Velocity and Pressure Drop in Gas-Liquid-Liquid Slug Flow. *Chemical Engineering & Technology*, 42(10), 2138–2145. <https://doi.org/10.1002/ceat.201900087>
- Kashid, M. N., Renken, A., & Kiwi-Minsker, L. (2011). Gas-liquid and liquid-liquid mass transfer in microstructured reactors. *Chemical Engineering Science*, 66(17), 3876–3897. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.015>
- Puccetti, G., Tosi, M., Pulvirenti, B., & Morini, G. L. (2015). Flow patterns of an air–water mixture at the exit of a micro T-junction. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 67, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.01.010>
- Rajesh, V. M., & Buwa, V. v. (2012). Experimental characterization of gas-liquid-liquid flows in T-junction microchannels. *Chemical Engineering Journal*, 207–208, 832–844. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.07.082>
- Saljoshi, P. S., & Autee, A. T. (2017). Experimental investigation of two-phase flow patterns in minichannels at horizontal orientation. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 53(9), 2799–2811. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2020-9>
- 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)
- Vasilev, M. P., & Abiev, R. S. (2021). Gas – Liquid Two-Phase Flow and Heat Transfer without Phase Change in Microfluidic Heat Exchanger.
- Volkel, N., Widiyanto, A. Y., Aubin, J., & Xuereb, C. (2008). Gas-Liquid Taylor Flow Characteristics in Straight and Meandering Rectangular Microchannels. <https://aiche.confex.com/aiche/s08/techprogram/P105713.HTM>
- Wang, K., Lu, Y. C., Tan, J., Yang, B. D., & Luo, G. S. (2010). Generating gas/liquid/liquid three-phase microdispersed systems in double T-junctions microfluidic device. *Microfluidics and Nanofluidics*, 8(6), 813–821. <https://doi.org/10.1007/s10404-009-0514-6>
- Warnier, M. J. F., De Croon, M. H. J. M., Rebrov, E. V., & Schouten, J. C. (2010). Pressure drop of gas-liquid Taylor flow in round microcapillaries for low to intermediate Reynolds numbers. *Microfluidics and Nanofluidics*, 8(1), 33–45. <https://doi.org/10.1007/s10404-009-0448-z>
- Zhang, Y., Zhang, J., Tang, Z., & Wu, Q. (2021). Gas – Liquid Taylor Flow Characteristics in a Fractal Microchannel Network during Numbering-up and Sizing-up. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00448>
- Zhao, Y., Chen, G., Ye, C., & Yuan, Q. (2013). Gas – liquid two-phase flow in microchannel at elevated pressure. *Chemical Engineering Science*, 87, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.10.011>