

Karakteristik Aliran Dua Fase Dan Pola Aliran Pada Bagian *Upstream* Dalam Saluran *Microchannel*

¹Made Sucipta

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia
m.sucipta@unud.ac.id

²Novita Fitriyanti Pulungan, ³I Putu Gede Ananta Kusuma, ⁴Vinny Violent Muhammad, ⁵Haslinda Kusumaningsih,

⁶Rafil Arizona, ⁷Made Suarda, ⁸Amelia Situmorang, ⁹Deendarlianto

²Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia

novitaafp@gmail.com

³Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia

tudeananta22@gmail.com

⁴Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia

vinnyviolentm@gmail.com

⁵Program Studi Doctor Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada
Yogyakarta, Indonesia

haslinda89@mail.ugm.ac.id

⁶Program Studi Doctor Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada
Yogyakarta, Indonesia

rafilarizona@eng.uir.ac.id

⁷Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia

made.suarda@unud.ac.id

⁸Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia

ameliasitumorang@student.unud.ac.id

⁹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada
Yogyakarta, Indonesia

deendarlianto@ugm.ac.id

Abstract—Fenomena aliran dua fase dalam *microchannel* telah diteliti secara eksperimen, dimana aquades digunakan sebagai fase cair dan nitrogen sebagai fase gas untuk menciptakan aliran dua fase. Kecepatan cairan (j_L) sebesar 0,3; 0,6 dan 1,0 m/s dan kecepatan gas (j_G) sebesar 2,6; 4,0, dan 6,5 m/s digunakan untuk menentukan pola dan kecepatan aliran, serta *pressure drop* yang terjadi sepanjang *microchannel*. *High speed camera* digunakan untuk mengamati pola aliran untuk selanjutnya diolah dengan menggunakan *image processing* untuk memperjelas fenomena yang terjadi. Program MATLAB digunakan untuk menentukan kecepatannya. Hasil observasi diperoleh bahwa ada beberapa tipe aliran yang dapat terjadi seperti *slug*, *slug-annular*, *bubbly* dan *churn*. Peningkatan j_L dan j_G akan meningkatkan kecepatan aliran dua fase, demikian pula akan terjadi peningkatan *pressure drop* disepanjang *microchannel*.

Kata Kunci— *microchannel*, aliran dua fase, *upstream*, kecepatan aliran, *pressure drop*

I. PENDAHULUAN

Studi mengenai aliran dua fasa berkembang dengan sangat cepat karena dapat divariasikan berdasarkan parameter yang diteliti. Perkembangan penelitian aliran dua fasa saat ini fokus pada aliran gas-cairan dalam *microfluidic* yang dapat diaplikasikan diberbagai bidang seperti *micro-electromechanical system* (MEMS, miniaturisasi elemen mekanis dan elektro mekanis) dan juga pada pola aliran dalam struktur tubuh manusia (material untuk rekayasa dan regenerasi jaringan tubuh) [1-2]. Fluida merupakan zat yang dapat mengalir dan mengubah bentuknya ketika diberi tegangan geser. Fluida terbagi menjadi dua jenis yaitu fluida Newtonian dan non-Newtonian. Fluida Newtonian adalah jenis fluida yang viskositasnya tidak dipengaruhi oleh deformasi gesernya. Fluida non-newtonian adalah jenis fluida yang viskositasnya berubah terhadap laju deformasi gesernya. Fenomena fluida yang umum terjadi adalah fluida yang mengalir di dalam saluran. adapun fenomena fluida yang mengalir pada saluran kecil. *Microfluidic* adalah rekayasa teknologi dalam untuk memproses serta memanipulasi fluida dalam saluran yang berukuran hingga ratusan mikrometer atau lebih kecil daripada 1 milimeter [3]. Ada beberapa persamaan dan teori dari aliran fluida pada saluran konvensional tidak dapat digunakan pada saluran yang kecil maka diperlukan eksperimen untuk membuktikan hal tersebut. Salah satu contoh eksperimen dari fluida yang mengalir pada saluran kecil adalah aliran yang mengalir pada *microchannel*. Hal yang membedakan *microchannel* dengan saluran konvensional yaitu tegangan permukaan yang dominan, pengaruh gravitasi, gesekan, gaya geser, dan gaya *viscous* sangat berpengaruh terhadap pola aliran dua fasa, *pressure drop*, *void fraction*, dan perpindahan panas yang terjadi, dimana pada *macrochannel* hal tersebut berbeda signifikansinya [4].

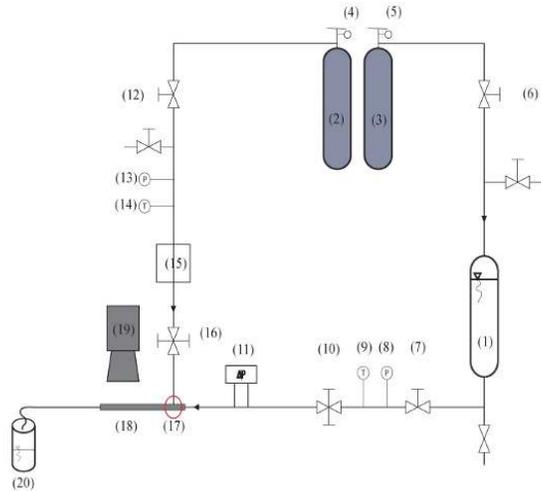
Microchannel merupakan saluran dengan ukuran *hydraulic diameter* sangat kecil dengan ukuran antara 1 μm - 1000 μm [5]. Teknologi *microfluidic* terus berkembang, teknologi ini sangat penting di bidang industri yang luas. Pengaplikasian teknologi *microfluidic* seperti pada *microreactor*, peralatan *micro-cooling*, *micro-heat exchangers*, dan pada sistem mikro elektro-mekanis [6-7]. *Microchannel* sudah diterapkan pada bidang medis dan alat manufaktur. Salah satu contoh penerapan *microchannel* yaitu pelepasan panas pada alat *microelectronic*. Perubahan fasa pada saluran tidak dapat dihindari jika *microchannel* digunakan sebagai alat penukar kalor. Perubahan fasa pada saluran ini terkadang menyebabkan terbentuknya dua fasa sekaligus, yaitu fasa cair dan fasa gas. Dari hasil penelitian Kumar & Nigam (2017), sistem perpindahan panas skala mikro (*micro-heat exchanger*) mempunyai rasio luas area perpindahan panas terhadap volume (*surface area-to-volume*) dan laju perpindahan panas yang tinggi, geometri yang *compact* serta pengondisian termal yang mudah, sedangkan dari hasil penelitian Revellin & Thome (2006), *micro-heat exchanger* mempunyai *heat transfer coefficient* yang lebih baik dan *heat flux dissipation* yang tinggi jika dibandingkan dengan teknologi pemindah kalor konvensional [8]. Dengan ukuran yang lebih kecil maka akan terjadi intensifikasi proses perpindahan panas dan massa, mempermudah kontrol terhadap proses keteknikan yang terjadi dan akurat, memiliki tingkat keamanan yang lebih tinggi, menggunakan prinsip modul sehingga memiliki fleksibilitas yang tinggi, dan keuntungan secara molekular serta morfologi yang dapat dikontrol [9-10].

Pada penelitian ini telah dilakukan analisis eksperimen aliran dua fasa pada *microchannel* dengan fasa cair yang digunakan yaitu aquades dan fasa gas yang digunakan yaitu nitrogen. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pola aliran, kecepatan pola aliran, *pressure drop* dengan menggunakan metode *image* dan *signal processing*.

II. METODE DAN PROSEDUR

Gambar 1 menunjukkan instalasi penelitian yang digunakan dalam penelitian ini. *Microfluidic chip* digunakan untuk mengalirkan fluida kerja melalui pipa-pipa instalasi. Pipa-pipa yang digunakan terdiri dari pipa tembaga dan stainless steel. Fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah campuran air dengan zat lain, yang dikenal sebagai fluida non-Newtonian, serta nitrogen sebagai gas uji.

Dalam penelitian ini, terdapat dua tabung nitrogen (komponen nomor 2 dan 3) yang digunakan. Tabung nitrogen (2) digunakan untuk mengalirkan nitrogen ke dalam *microfluidic chip*, sementara tabung nitrogen (3) berfungsi sebagai pompa pneumatik untuk mengalirkan cairan uji ke dalam *microfluidic chip*. Debit cairan uji dan gas uji diatur menggunakan katup (7) dan (12). Sebelum memasuki daerah percampuran (17) yang berbentuk T-junction, cairan uji melewati pipa kapiler (11). Bejana (20) ditempatkan pada saluran keluar *microfluidic chip* untuk mengukur debit cairan uji secara manual dengan menimbang cairan yang terkumpul dalam bejana selama periode waktu tertentu menggunakan timbangan digital. Debit gas uji diukur menggunakan *flowmeter* (15) yang terpasang sebelum daerah percampuran (17). Tekanan cairan dan gas uji diukur menggunakan *pressure transducer* (8) dan (13) yang dipasang sebelum daerah percampuran (17). Sementara itu, temperatur cairan dan gas uji diukur menggunakan termokopel tipe-T (9) dan (14) yang terpasang sebelum daerah percampuran (17). Dua katup *double needle* dipasang pada saluran gas dan cairan uji (10) dan (16) sebelum memasuki daerah percampuran (17) untuk mengatur aliran simultan dari cairan dan gas uji yang memasuki daerah percampuran.



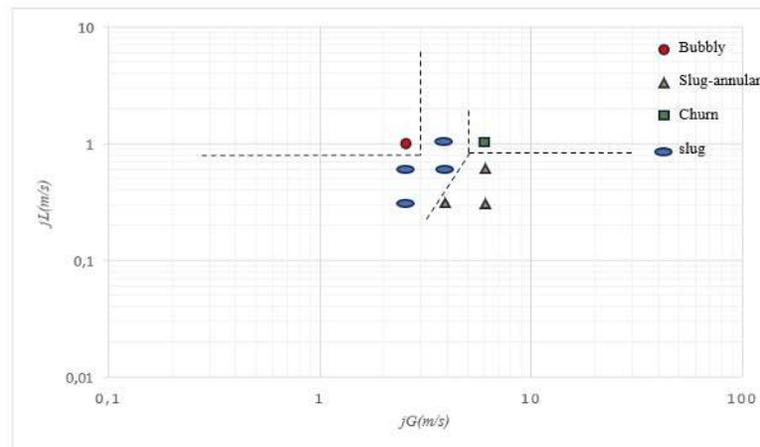
GAMBAR 1. DIAGRAM SKEMATIK INSTALASI PENELITIAN

Setelah cairan dan gas uji bercampur dalam daerah percampuran (17), aliran dua fase ini mengalir ke dalam *microfluidic chip* (18) yang terbuat dari akrilik dan tembaga. *Microfluidic chip* tersebut memiliki tiga daerah pengamatan, yaitu dua daerah pengamatan pola aliran yang menggunakan saluran akrilik dari daerah percampuran berbentuk T-junction dan satu daerah pengamatan perpindahan panas dengan saluran tembaga yang terletak pada daerah percampuran T-junction. Sumber panas diperoleh dari arus listrik yang dialirkan ke sebagian daerah *microfluidic chip* yang terbuat dari tembaga.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Peta Pola Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen

Persebaran pola aliran pada penelitian ini di gambarkan pada peta pola aliran dengan menggunakan parameternya yaitu kecepatan superfisial cair dan gas. Kecepatan superfisial cairan (j_L) 0,3 m/s – 1 m/s sebagai sumbu y dan kecepatan superfisial gas (j_G) 2,6 m/s – 6,6 m/s pada sumbu x. Hasil dari peta pola aliran tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.

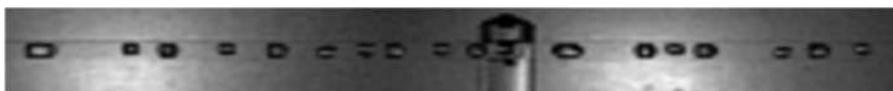


GAMBAR 2. HASIL PETA POLA ALIRAN DUA FASA (AIR)

Dari 9 percobaan yang dilakukan menggunakan variasi j_L dan j_G , di dapatkan 4 pola aliran yang berbeda bahwa terdapat 1 pola aliran *bubbly*, 4 pola aliran *slug*, 3 pola aliran *slug-annular* dan 1 pola aliran *churn*, seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Pola aliran *bubbly* terjadi apabila fasa gas lebih kecil daripada diameter penampang. Pola aliran *bubbly* dapat ditemukan pada j_G rendah dengan j_L yang tinggi. Pada penelitian ini didapat pada $j_G = 2,6$ m/s dan $j_L = 1$ m/s yang ditunjukkan seperti pada gambar 10. Pada pengamatan kali ini proses *bubbly* terjadi karena fasa gas terputus akibat dari j_L yang tinggi, yang berarti kecepatan superfisial gas tidak cukup kuat untuk melawan kecepatan superfisial dari cairan sehingga tidak dapat membuat fasa gas yang lebih besar di dalam saluran.

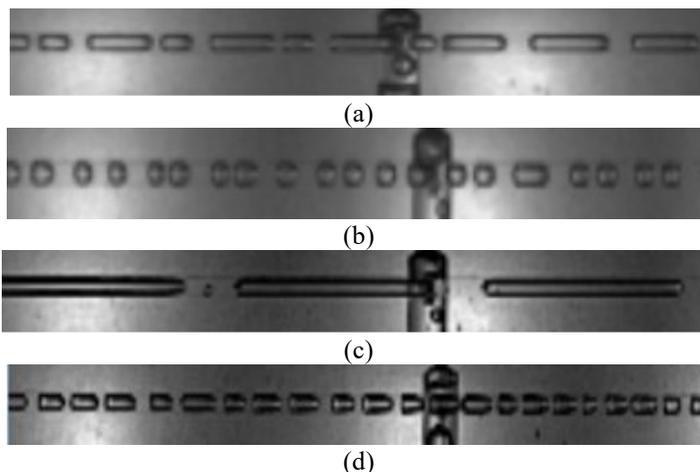
TABEL 1. POLA ALIRAN

aquades dan nitrogen		j_L (m/s)		
		0,3	0,6	1
j_G (m/s)	2,6	<i>slug</i>	<i>slug</i>	<i>bubbly</i>
	4	<i>slug-annular</i>	<i>slug</i>	<i>slug</i>
	6,6	<i>slug-annular</i>	<i>slug-annular</i>	<i>churn</i>

GAMBAR 3. POLA ALIRAN BUBBLY PADA ALIRAN AIR-NITROGEN PADA $j_L = 1$ M/S DAN $j_G = 2,6$ M/S

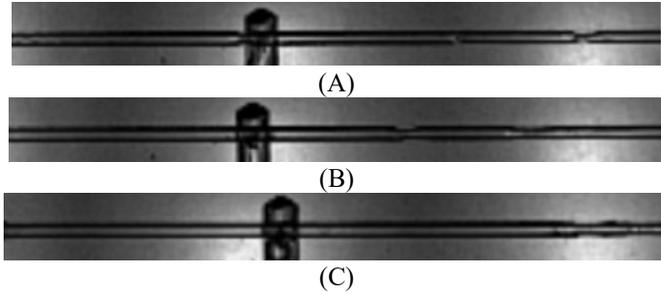
Pola aliran *slug* ditandai dengan fasa gas yang memenuhi diameter saluran dan lebih besar dan Panjang daripada bubbly namun tidak sampai menyatu atau masih terputus-putus. Fasa cair pada pola aliran slug memiliki volume lebih kecil dan berada diantara fasa gas. Ini terjadi pada kecepatan superfisial gas yang tidak terlalu rendah dan kecepatan superfisial cairan yang tidak terlalu tinggi.

Pada penelitian ini pola aliran *slug* didapat pada j_L 0,3 m/s dan 0,6 m/s pada j_G 2,6 m/s dan pada j_L 0,6 m/s dan 1m/s pada j_G 4 m/s. Pada Gambar 4, terjadi peningkatan j_G yang menyebabkan Panjang slug menjadi lebih panjang sedangkan pada j_L panjang dari *slug* akan meningkat apabila j_L semakin rendah. Ini terjadi karena peningkatan kecepatan cairan menyebabkan gas akan semakin susah menembus tegangan permukaan cairan dan begitu juga sebaliknya.

GAMBAR 4. POLA ALIRAN SLUG (A) j_L 0,3 m/s PADA j_G 2,6 m/s, (B) j_L 0,6 m/s PADA j_G 2,6 m/s, (C) j_L 0,6 m/s PADA j_G 4 m/s, (D) j_L 1 m/s PADA j_G 4 m/s

Pola aliran *slug-annular* dapat terjadi pada kecepatan superfisial gas yang tinggi dengan kecepatan superfisial cairan yang rendah. Karakteristik pola aliran slug-annular ini yaitu terbentuknya pola aliran pada slug yang hampir menjadi *annular* namun masih terdapat fasa cair didalam fasa gas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pada percobaan kali ini, pola aliran *slug-annular* terdapat pada j_G sebesar 6,6m/s dengan j_L 0,3 m/s dan 0,6m/s dan pada j_L 0,3 m/s, j_G 4 m/s.

Pola aliran *churn* ditandai dengan tidak stabilnya slug yang terjadi, yaitu dengan adanya *bubbly* yang tidak beraturan pada kepala dan ekor dari *slug* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Hal ini dapat terjadi pada kecepatan superfisial gas dan cairan yang tinggi. Pola aliran ini terjadi karena peningkatan kecepatan superfisial fluida yang tinggi mengakibatkan ketidakstabilan pada pola aliran sehingga membuat timbulnya *bubbly* diantara slug. Pola aliran *churn* ini merupakan tahapan dimana *slug* satu dengan yang lain akan menjadi satu dan membentuk pola aliran *annular*.



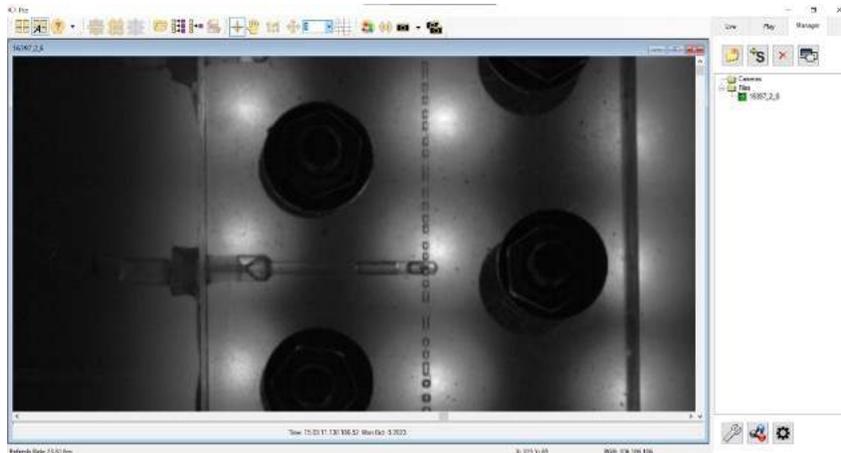
GAMBAR 5. POLA ALIRAN SLUG ANNULAR (A) j_L 0,3 m/s, j_G 6,6 m/s (B) j_L 0,6 m/s, j_G 6,6 m/s (C) j_L 0,3 m/s, j_G 4 m/s



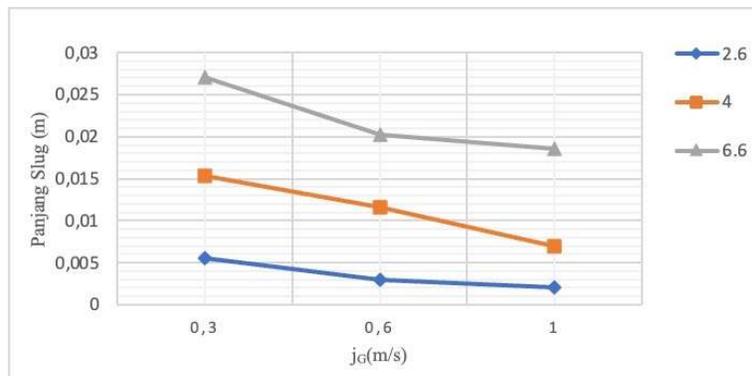
GAMBAR 6. POLA ALIRAN CHURN PADA j_L 1 m/s, j_G 6,6 m/s

B. Panjang dan Kecepatan Slug Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen

Panjang slug didapat melalui pengukuran dengan menggunakan PCC 3. Dengan mengukur panjang gelembung dengan manual seperti Gambar 7 dan kemudian mengalikan dengan skala yang didapat melalui luas penampang dikali dengan ukuran penampang dalam *pixel*, maka akan didapat panjang rata-rata gas *slug* pada diagram seperti pada Gambar 8. Sesuai dengan teori, bahwa ketika kecepatan superficial cairan ditingkatkan, maka panjang *gas slug* akan berkurang dan panjang *liquid slug* akan bertambah.

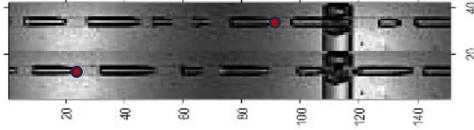


GAMBAR 7. PCC3

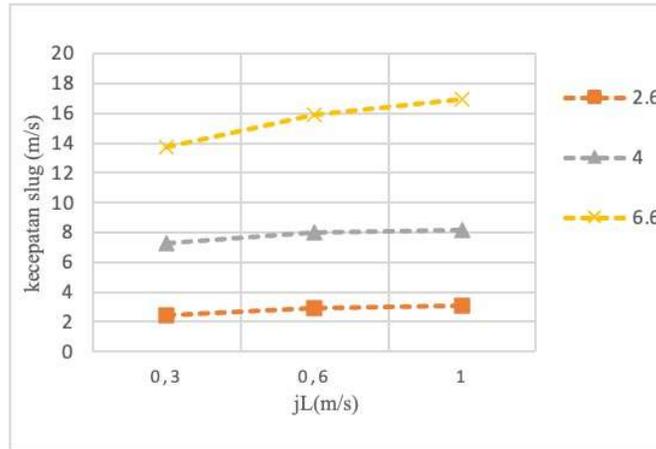


GAMBAR 8. PERBANDINGAN PANJANG GAS SLUG TERHADAP j_L PADA MASING-MASING CAIRAN PADA $j_G = 2,6 \text{ M/S} = 6,6 \text{ M/S}$

Kecepatan *slug* didapat dengan menggunakan Matlab 2016a yang ditunjukkan seperti pada Gambar 6 dengan mengekstraksi *file* video.avi menjadi gambar. Setelah itu kecepatan *slug* didapat dengan membandingkan dua gambar dengan gelembung yang sama dengan posisi yang berbeda seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Setelah dilakukan perhitungan didapatkan hasil kecepatan *slug* seperti ditunjukkan pada Gambar 10.



GAMBAR 9. GAMBAR POLA ALIRAN PADA FRAME 1 DENGAN FRAME 3



GAMBAR 10. KECEPATAN GAS SLUG

C. Pressure Drop Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen

Pressure drop merupakan parameter penting dalam analisa aliran dua fasa pada *microchannel*. Pada penelitian ini digunakan sensor tekanan *differential pressure transducer* (DPT) dengan merek Valydine Model P55D-4-N-1-48-S-4A untuk mendapatkan data *pressure drop* pada *microchannel*. *Pressure tap* pada *microchannel* dihubungkan kepada DPT dengan konfigurasi sisi positif adalah *pressure tap* pertama yang dilewati aliran dan sisi negatif adalah *pressure tap* kedua yang dilewati aliran. DPT kemudian akan menghitung perbedaan tekanan yang dihasilkan pada sisi positif dan negatif. Hal ini yang menjadi landasan perhitungan *pressure drop* pada *microchannel*. *Pressure drop* kemudian dibagi dengan jarak antara kedua *pressure tap* sehingga dihasilkan *pressure drop gradient*. Terdapat 5 pasang *pressure tap*, yaitu pada bagian *upstream 1*, *upstream 2*, *heating section*, *downstream 1*, dan *downstream 2*. Sehingga dibutuhkan 5 DPT secara bersamaan datanya diambil. Pengumpulan data diperoleh dari *data logger* yang dioperasikan oleh *Advantech* dan didapatkan data analog berupa tegangan dalam satuan voltase. Data yang tersimpan kemudian diolah menggunakan Microsoft Excel dan dikonversi menjadi tekanan dengan rumus berikut.

$$\Delta P_{V1} = ((28206 \times V) - 33333) \times 10^{-3} kPa$$

$$\Delta P_{V2} = ((15638 \times V) - 16609) \times 10^{-3} kPa$$

di mana:

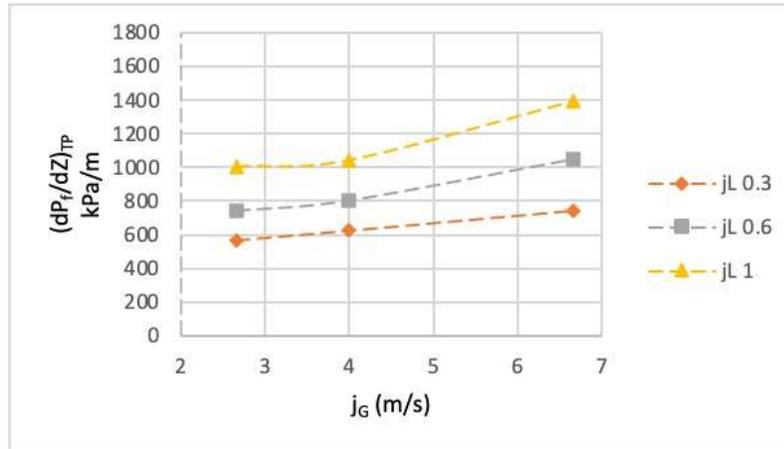
V : Tegangan bacaan *differential pressure transducer* (V)

ΔP_{U1} : Penurunan tekanan pada bagian *upstream 1* (kPa)

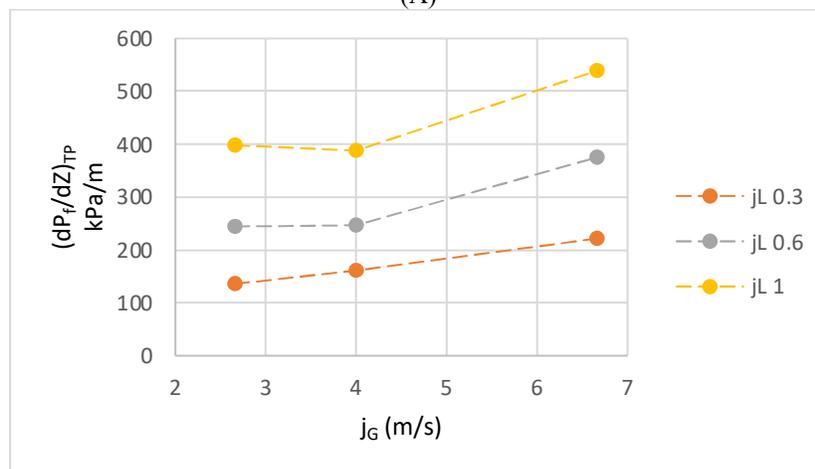
ΔP_{U2} : Penurunan tekanan pada bagian *upstream 2* (kPa)

Untuk mendapatkan data *pressure drop gradient* didapatkan dari data perbedaan tekanan sesuai dengan persamaan diatas, lalu dibagi dengan jarak antara *pressure tap 1* dan *2* pada bagian *upstream microchannel*. Kemudian, dilakukan analisis data tersebut terhadap kenaikan kecepatan superfisial gas dengan kecepatan superfisial *liquid* dijaga konstan.

Dapat dilihat pada Gambar 11, bahwa ketika *pressure drop gradient* untuk seluruh cairan meningkat seiring dengan nilai kecepatan superfisial cairan yang ditingkatkan. *Pressure drop gradient* juga berpengaruh terhadap nilai kecepatan superfisial gas, yaitu semakin tinggi kecepatan superfisial gas-nya, maka *pressure drop gradient* juga semakin besar.



(A)



(B)

GAMBAR 11. PRESSURE DROP GRADIENT TERHADAP PENINGKATAN j_G (AQUADES-NITROGEN);
(A) UPSTREAM 1; (B) UPSTREAM 2

IV. KESIMPULAN

Karakteristik pola aliran dua fase dalam penelitian ini dianalisis menggunakan metode *image* dan *signal processing*. Berikut kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan analisis yang telah dilakukan yaitu bahwa terdapat 4 pola aliran yang dianalisis yaitu *slug*, *slug-annular*, *bubbly* dan *churn*. Dengan peningkatan j_L dan j_G akan meningkatkan kecepatan aliran dua fase demikian pula akan terjadi peningkatan *pressure drop* disepanjang *microchannel*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Udayana atas pendanaan hibah penelitian/Riset Merdeka Belajar sesuai dengan kontrak Surat Perjanjian Penugasan Pelaksanaan Penelitian B/776-2/UNI4.4.A/PT.01.03/2023. Ucapan terima kasih juga kepada Pusat Studi Energi Universitas Gadjah Mada karena sudah memfasilitasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Choi J.E, Takei M, Doh D.H. Fabrication of Microchannel with 60 Electrodes and Resistance Measurement. Flow measurement and instrumentation. 2010; 61:2733-2738.
- [2] Basu, P., Alexandros Repanas, Anamika Chatterjee, Birgit Glasmacher, U. Narendra Kumar, I. Manjubala. 2017. PEO–CMC blend nanofibers fabrication by electrospinning for soft tissue engineering applications. Materials Letters, Vol. 195, pp. 10-13.
- [3] Whitesides, G. (2006). The origins and the future of microfluidics. Nature, 442(7101), 368.

- [4] 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*, 158-169.
- [5] Kandlikar, S. G., Garimella, S., Li, D., Colin, S., & King, M. R. (2014). *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*. Massachusetts: Elsevier.
- [6] Yin, Y., Zhu, C., Guo, R., Fu, T., & Ma, Y. 2018. Gas-liquid two-phase flow in a square microchannel with chemical mass transfer: Flow pattern, void fraction and frictional pressure drop. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 484–496.
- [7] Kim, S. M., & Mudawar, I. 2012. Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for adiabatic and condensing mini/micro-channel flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(11–12), 3246–3261.
- [8] Revellin, R., & Thome, P. (2006). *Experimental Two-Phase Fluid Flow in Microchannels*. International
- [9] Abiev, R. S. (2020). Gas-liquid and gas-liquid-solid mass transfer model for Taylor flow in micro (milli) channels: A theoretical approach and experimental proof. *Chemical Engineering Journal Advances*, 4.
- [10] Jensen, K. F. (2017). Flow chemistry—Microreaction technology comes of age. *AIChE Journal*, 63(3), 858–869. Swiss Federal Institute of Technology Lausanne Vol.3437