

Untung Surya Dharma

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Muhammadiyah Metro
Jurusan Teknik Mesin
Mahasiswa Doctoral
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
Untung.surya.dharma@mail.ugm.ac.id

Calista Anjani Dwiputri

Mahasiswa S1
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
anjaniclsta@gmail.com

Eko Nugroho

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Muhammadiyah Metro
Jurusan Teknik Mesin
exonugros@gmail.com

Asroni

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Muhammadiyah Metro
Jurusan Teknik Mesin
as.roni@aol.com

Deendarlianto

Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
Deendarlianto@ugm.ac.id

Indarto

Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
Indarto@ugm.ac.id

ANALISA KECEPATAN SLUG ALIRAN DUA FASE DI DOWNSTREAM T-JUNCTION MINICHANNEL HORIZONTAL DENGAN RADIUS BELOKAN (r/d_h) 0.7

Uneven distribution of the phases between in the main channel when two-phase flow passes through the T-junction it can cause the formation of slug flow which affects performance in the downstream area. The slug is formed due to the acceleration of the gas phase moving towards an average or stable velocity. The bend radius of the T-junction affects the formation of slug because the radius can increase the velocity of the gas phase. Research on the slug velocity was carried out in the downstream region of the horizontal mini channel T-junction. The working fluid used is air as the gas phase and water. The flow pattern and velocity slug analysis were carried out by visualizing the flow at a distance of ± 30 mm from the T-junction, that works as a mixer of the working fluid. High-speed camera is used to record video and processed in the form of image processing with the MATLAB program. Two-phase flow slug velocity analysis conducted in the downstream area of the horizontal minichannel T-junction, it can be concluded that the slug velocity tends to increase linearly with increasing superficial velocity of air and water. Comparison of slug velocity experimentally with the results of calculations using the equations of Fukano and Kariyasaki (1993) and Sudarja et al (2018) shows conformity with less than 10% of error margin, while Nicklin et al (1962) is $\pm 30\%$.

Keywords: T-Junction, Bend, Slug Velocity, Minichannel, Rectangular Channel, Image Processing

1. PENDAHULUAN

Perkembangan dibidang teknologi mikrofluida dalam dekade terakhir telah berkembang dan penerapannya berpotensi semakin luas, terutama dibidang keteknikan dan medis [1]. Aliran dua fase dalam saluran kecil memiliki peranan penting dalam proses kimia dan didunia industri dikarenakan dimensinya [2]. Dalam pengaplikasian aliran dua fase pada saluran kecil, diperlukan mekanisme untuk mengalirkan kedua fase yang berbeda pada suatu saluran. Salah satu mekanisme pencampurannya adalah dengan *T-junction*. *T-junction* termasuk metode pencampuran yang umum digunakan baik pada saluran konvensional, *minichannel* maupun *microchannel*. Aliran dua fase menggunakan t-junction dengan penampang persegi panjang yang memiliki diameter hidraulik kecil (*minichannel*) telah diteliti. Penelitian tersebut memberikan kesimpulan berupa acuan untuk perancangan *mini heat exchanger*. Selain itu, dari penelitian tersebut juga didapat bahwa kecepatan superficial fase cair maupun gas memiliki pengaruh terhadap pola aliran yang cenderung serupa dengan sambungan yang berukuran besar (*macro-size junction*) [3]. Aplikasi aliran dua fase pada saluran kecil lainnya adalah pada *Micro Electro Mechanical System* atau MEMS [4]. MEMS sendiri merupakan suatu elemen mekanis dan elektro mekanis yang dibuat menggunakan teknologi fabrikasi mikro. Pada perangkat komputer dengan *high speed processor* yang memiliki ukuran kecil hingga mikro, aliran dua fase dengan saluran kecil juga digunakan sebagai sistem pendingin pada *high speed processor* tersebut. Sistem pendingin tersebut diperlukan supaya kinerja *processor* menjadi lebih optimal.

Aliran dua fase dalam saluran mini (*minichannel*) maupun saluran mikro (*microchannel*) dapat digunakan pada beberapa bidang antara lain; *heat pipe* (merupakan salah satu komponen penting dalam peralatan elektronik yang digunakan sebagai pendingin), biomedik, dan *aerospace* [5]. Perkembangan peralatan dalam ukuran mikro dan mini sudah begitu cepat, sehingga dibutuhkan pemahaman yang

mendalam terhadap karakteristik aliran dua fase baik dalam saluran mini maupun mikro untuk menyempurnakan desain serta proses kontrolnya.

Pada setiap penggunaan aliran dua fase pada *T-junction*, kecepatan superfisial kedua fluida memiliki pengaruh penting dalam terbentuknya pola aliran. Salah satu pola aliran yang paling dominan muncul dalam pengamatan aliran dua fase pada saluran mikro dan mini adalah pola aliran *slug*. Hal ini dikarenakan, ketika aliran dua-fase melewati *T-junction* maka distribusi yang tidak merata dari fase-fase antara kedua *outlet* dapat menyebabkan terbentuknya aliran *slug* yang berpengaruh terhadap performa di daerah *downstream*. Aliran *slug* pada *T-junction* dan hasilnya menunjukkan bahwa *slug* terbentuk akibat percepatan fase gas yang bergerak menuju kecepatan rata-rata atau stabil (*stable translational velocity*) [6]. Oleh karena itu pengaruh radius pada belokan *t-junction* memiliki peran penting pada pembentukan *slug* karena radius dapat semakin meningkatkan kecepatan fase gas [7]. Kecepatan local fluida ini dapat diukur dengan menggunakan kecepatan *slug* [8]. Peningkatan kecepatan fase gas ini, akan mempengaruhi bilangan Reynold, yang akan mengakibatkan meningkatnya *pressure drop* [6-10].

1.1 Kecepatan Slug

Kecepatan slug gas didefinisikan sebagai kecepatan ujung depan dari gelembung gas yang bergerak didalam saluran. Kecepatan ini didapat dari variable jarak perpindahan gelembung gas terhadap variable waktu tempuhnya [11]. Kecepatan *slug* dapat dihitung menggunakan metode image processing dari Program MATLAB, yaitu dengan cara mendapatkan nilai letak x yang merupakan selisih jarak pixel antara posisi *pixel centroid* dari masing-masing slug gas yang terdeteksi dari hasil *image processing* dengan pxel pertama pada gambar [12].

Kecepatan *slug* gas didalam saluran kecil telah banyak dibahas oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Kecepatan *slug* gas dipengaruhi oleh kecepatan superfisial fase gas dan fase udara dan efek *micrografity* [13],

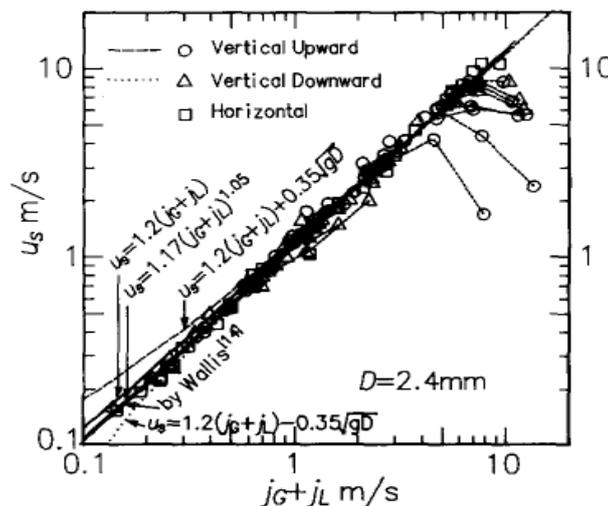
$$U_s = 1.2 (j_G + j_L) + 0.35(gD)^{0.5} \tag{1}$$

Dimana j_G adalah kecepatan superfisial gas (m/s), j_L adalah kecepatan superfial liquid (m/s), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), dan D adalah diameter dalam saluran (m).

Untuk saluran kecil dan horizontal dengan laju aliran massa kecil, Persamaan 1 kurang sesuai sehingga persamaan tersebut dimodifikasi dengan mengabaikan nilai dari $0.35(gD)^{0.5}$ dan menjadi Persamaan 2 [14].

$$U_s = (1+C_s) (j_G+j_L), \tag{2}$$

Dimana C_s adalah konstanta mendekati harga 0,2.



Gambar 1. Grafik hubungan kecepatan *slug* gas terhadap *total volumetric flux* (j_G+j_L) [13]

Persamaan 1 menyimpulkan bahwa kecepatan *slug* gas memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan kecepatan liquid. Untuk diameter dalam pipa 1 mm, maka persamaan yang digunakan adalah Persamaan 3 [13].

$$U_S = C_k (j_G + j_L)^{1.05}, \tag{3}$$

Dengan $C_k = 1.21$

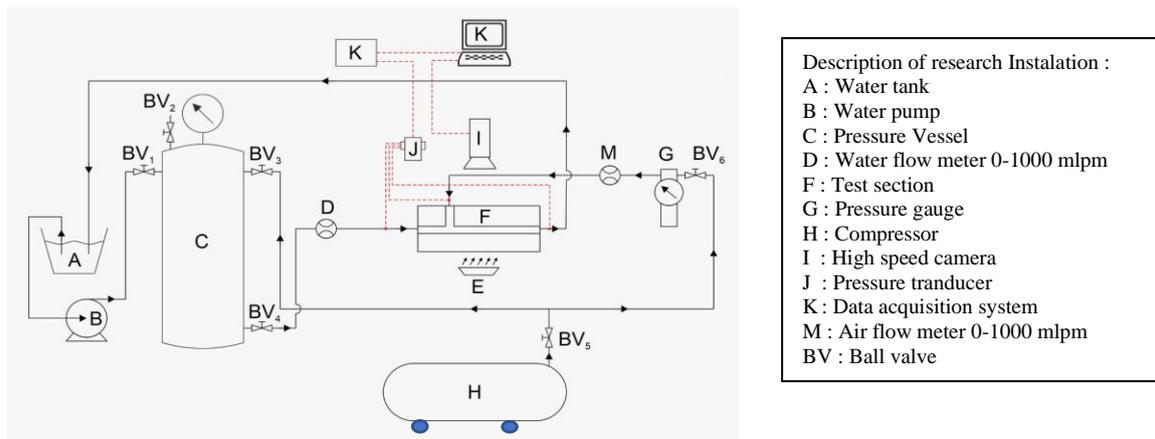
Persamaan 3 untuk diameter dalam pipa 1 mm ini dengan nilai $C_k = 1.21$, bersesuaian dengan Persamaan 4 yang mengusulkan nilai dari $C_S = 0.233$ [14].

$$\begin{aligned} U_S &= (1 + 0.233) (j_G + j_L) \\ U_S &= 1.233 (j_G + j_L) \end{aligned} \tag{4}$$

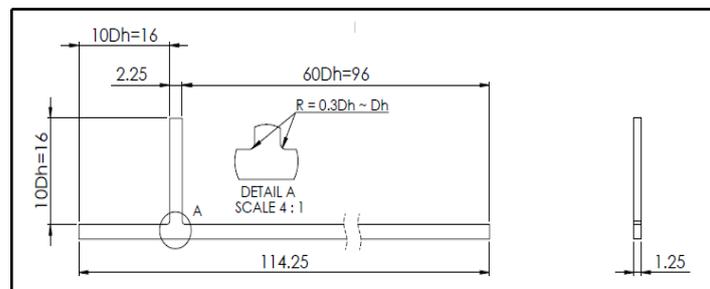
Nilai C_S dipengaruhi oleh nilai $j_G + j_L$, dimana ketika $j_G + j_L > 1$ m/s maka nilai C_S sedikit lebih besar dari nol (0), yang berarti bahwa kecepatan *slug* gas sedikit lebih besar dari pada fase cairan. Sedangkan pada $j_G + j_L < 1$ m/s, beberapa data adalah negatif, yang artinya bahwa cairan bergerak lebih cepat daripada *slug* gas. Adapun hubungan pola aliran terhadap kecepatan *slug* telah dijelaskan [16]. Dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa pola aliran *bubbly* dan *slug* memiliki nilai kecepatan gelembung yang paling rendah, sebaliknya untuk pola aliran *churn*. Hal ini disebabkan pola aliran *churn* terjadi pada nilai j_G dan j_L yang tinggi. Berdasarkan pemaparan di atas, penelitian ini dilaksanakan untuk mengetahui pengaruh radius belokan *T-junction* terhadap kecepatan *slug* di daerah *downstream* pada *T-junction minichannel horizontal*.

2. METODE DAN BAHAN

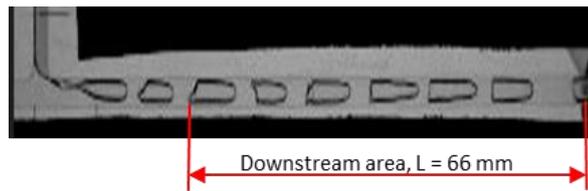
Skema instalasi dari alat penelitian yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Seksi uji berada di daerah *downstream* dari *T-junction minichannel horizontal* (Gambar 2). Fluida kerja yang digunakan adalah udara sebagai fase gas dan air sebagai fase cair dengan sifat fisis seperti pada Tabel 1. Analisa pola aliran dilakukan dengan visualisasi aliran pada jarak 30 hingga 96 mm dari *T-junction* sebagai mixer dari fluida kerja yaitu udara dan air seperti pada Gambar 3. Kamera berkecepatan tinggi Phantom Miro M310 dengan kecepatan 15000 *frame per second* dan 512x384 pixel resolution digunakan untuk merekam video sebanyak 5223 *frame* selama 0.348 detik. Posisi kamera diletakan tepat diatas seksi uji seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Instalasi Alat Penelitian



Gambar 3. Geometry T-junction



Gambar 4. Analisa kecepatan slug dilakukan di daerah *downstream* pada jarak ± 30 -96 mm dari *T-junction minichannel* horizontal.

Pengolahan data yang akan dilakukannya dalam penelitian ini adalah pengolahan data yang berasal dari gambar kamera berkecepatan tinggi yang berupa *video image* seperti pada Gambar 4. Data gambar ini diolah sedemikian rupa dengan menggunakan program MATLAB untuk menghasilkan gambar yang berkualitas, yang nantinya akan diolah untuk mendapatkan kecepatan slug yang terjadi di daerah *downstream T-Junction* secara eksperimen dan membandingkannya dengan hasil perhitungan menggunakan persamaan dari peneliti sebelumnya [13-15]. Komponen-komponen utama instalasi alat pengujian dalam penelitian ini adalah pompa air yang berguna untuk mengalirkan fluida air dari tanki air menuju *pressure tank*, *Pressure Tank* yang berfungsi sebagai pompa pneumatik untuk mengalirkan fluida cair kedalam seksi uji, *Flowmeter* cairan dan *flowmeter* gas untuk mengukur debit fluida yang masuk ke seksi uji, kompresor udara berfungsi untuk menyediakan/menyuplai udara bertekanan. Seksi uji berupa *T-Junction* sebagai *mixer* dan *minichannel* dengan penampang melintang persegi panjang yang terbuat dari akrilik. Diameter hidraulik minichannel d_h adalah 1,607 mm, dengan ukuran lebar dan tinggi, berturut-turut adalah 2.25 mm dan 1.25 mm. Radius belokan r didaerah sudut *T-junction* antara cabang dengan saluran utama diaplikasikan dengan ukuran $0.7 d_h = 1.12$ mm atau $r/D_H = 0.7$.

Tahapan pengambilan data dilakukan setelah proses kalibrasi telah selesai dilakukan. Tahapan pengambilan data adalah mula-mula tanki air diisi dengan air yang telah disaring untuk memastikan air bebas dari partikel padat untuk menghindari gangguan aliran dalam seksi uji, kemudian air dalam tanki air dipompakan kedalam bejana tekan dengan menggunakan pompa submersible. Udara bertekanan dari kompresor dialirkan kedalam bejana tekan hingga mencapai *5 bar gauge*. Buka katup cairan melewati *flowmeter* cairan dengan debit tertentu sehingga didapatkan kecepatan superfisial cairan, j_L sesuai dengan matriks penelitian. Buka katup udara dari kompresor melewati *flowmeter* gas dengan debit tertentu sehingga didapatkan kecepatan superfisial gas, j_G sesuai dengan matriks penelitian. Rekam semua data yang dibutuhkan dengan menggunakan *high speed camera* pada seksi uji *T-Junction* ketika aliran kecepatan superfisial udara dan air sudah bercampur dan *steady*. Lakukan langkah yang dijelaskan sebelumnya dengan j_L tetap dan j_G bervariasi sesuai dengan matriks penelitian. Lakukan langkah yang sama, namun dengan j_G tetap dan j_L bervariasi sesuai dengan matriks penelitian. Lakukan semua langkah hingga matriks penelitian dengan variasi j_G dan j_L selesai dan berulang-ulang untuk mendapat data yang akurat.

Tabel 1. Properties dari fluida kerja pada suhu 30 °C

Fluida kerja	ρ (kg/m ³)	σ (N/m)	μ (Pa.s)
Air	995.7	7.12E-2	7.975E-4
Udara	1.165	-	1.86E-5

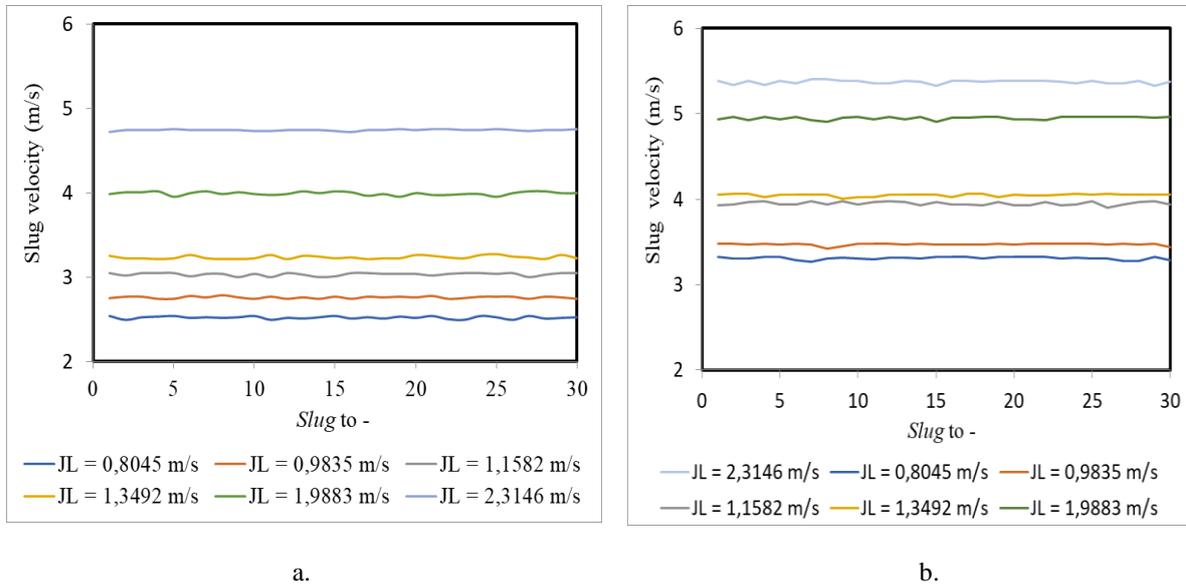
3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Analisis Pengaruh kecepatan superfisial air dan udara terhadap Kecepatan Slug

Kecepatan *slug* merupakan parameter penting yang digunakan untuk menentukan karakteristik aliran *slug*. Kecepatan *slug* dapat diketahui menggunakan metode *image processing* dengan cara menghitung jarak perpindahan lokasi titik nose *slug* pada awal *frame* dan titik *nose slug* pada akhir *frame*, kemudian dibagi dengan waktu yang didapatkan dari selisih jarak *frame* selama perpindahan *slug* terjadi.

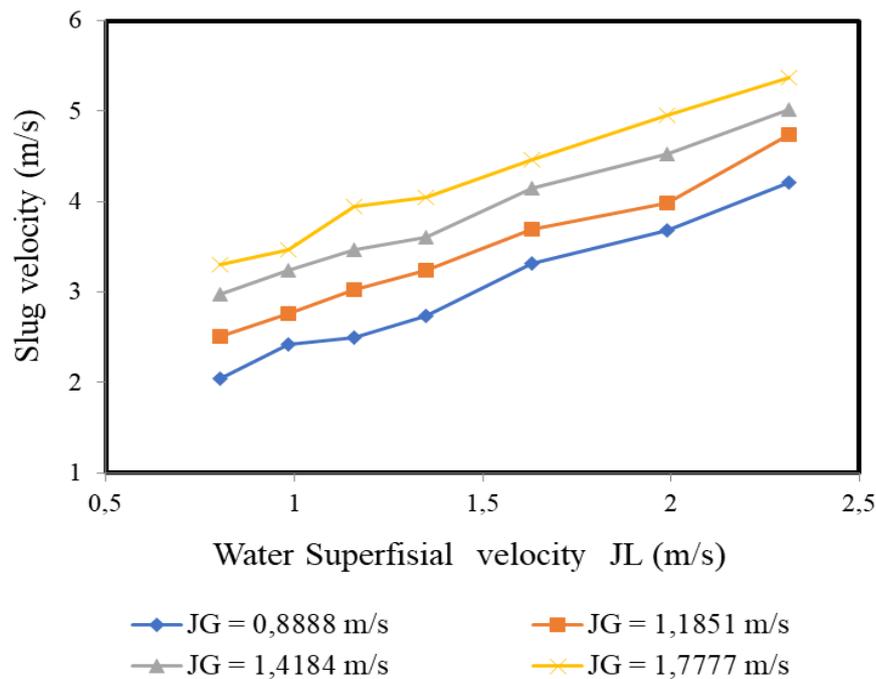
Kecepatan superfisial air dan udara berpengaruh signifikan terhadap kecepatan slug yang terjadi di *downstream T-junction* [13-15]. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 5 menunjukkan hubungan perubahan kecepatan setiap *slug* pada j_G konstan adalah 1,185 m/s dan 1,777 m/s dengan variasi j_L antara 0.8045 – 2.3146 m/s. Perubahan kecepatan diukur pada 30 *slug* dengan jarak ± 30 mm dari *T-junction*. Dari gambar tersebut terlihat bahwa semakin tinggi j_G maka kecepatan slug juga semakin tinggi, terutama pada j_L yang

juga tinggi, yaitu pada $j_L = 1.9883$ m/s dan 2.3146 m/s. Fluktuasi kecepatan dari masing-masing *slug* juga tidak terlalu besar, artinya kecepatan masing-masing slug hampir sama sehingga dapat diketahui kecepatan rata-ratanya dari masing-masing variasi j_G dan j_L .

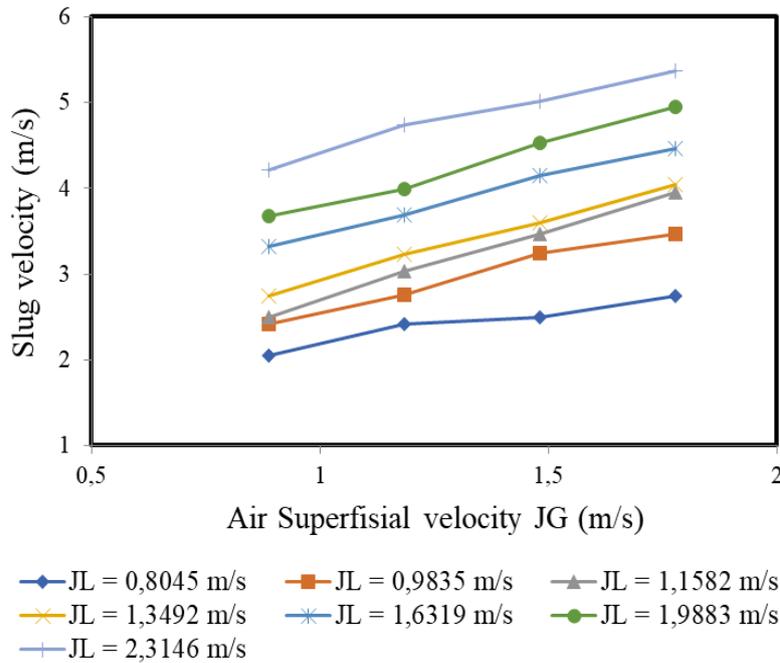


Gambar 5. Perubahan kecepatan setiap *slug* pada a. kecepatan superficial udara konstan $j_G = 1,185$ m/s; dan b. $j_G = 1,777$ m/s

Untuk melihat lebih jauh hubungan antara kecepatan superficial air dan udara terhadap kecepatan slug rata-rata, dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7. Gambar 6, menunjukkan pengaruh j_L terhadap kecepatan slug rata-rata pada j_G konstan. Sedangkan Gambar 6 menunjukkan pengaruh kecepatan superficial udara terhadap kecepatan slug pada j_L konstan. Dari ke dua gambar tersebut, didapat bahwa kecepatan slug cenderung meningkat secara linear seiring meningkatnya j_G dan j_L .



Gambar 6. Pengaruh kecepatan superficial air terhadap kecepatan *slug*

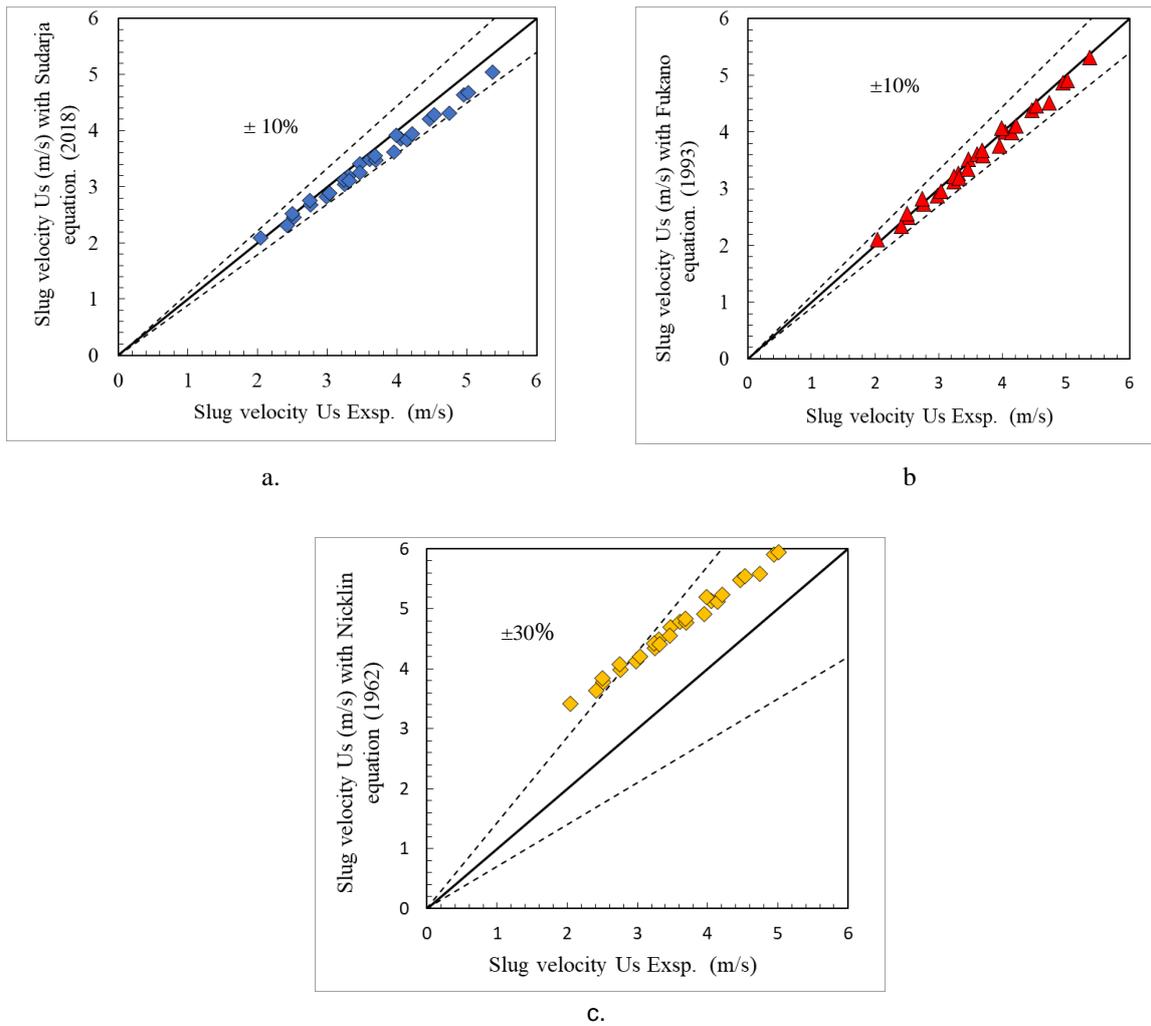


Gambar 7. Pengaruh kecepatan superficial udara terhadap kecepatan slug

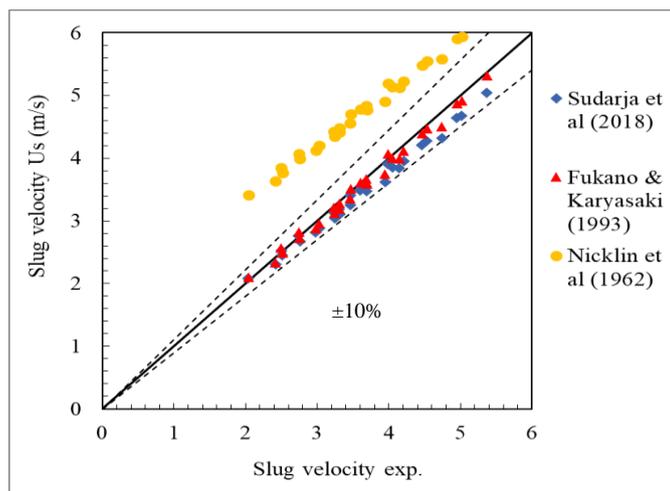
3.2 Perbandingan kecepatan slug eksperimen terhadap kecepatan slug perhitungan menggunakan persamaan peneliti sebelumnya

Nilai hasil eksperimen kecepatan *slug* gas berbanding lurus dengan kecepatan superficial dua fase campuran sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya [13-15] yang dilakukan pada saluran horizontal dan vertikal. Gambar 8 menunjukkan perbandingan kecepatan *slug* eksperimen pada $r/D_H = 0.7$ terhadap perhitungan menggunakan persamaan a. Sudarja dkk (2018); b. Fukano & Kariyasaki (1993); dan c. Nicklin (1962). Pada Gambar 8.a, data eksperimen memiliki kesesuaian apabila menggunakan korelasi Sudarja dkk, 2018 dan Nicklin 1962 seperti pada Pers. 4 walaupun pada kecepatan slug secara eksperimen yang tinggi cenderung menunjukkan *over predicted* hingga mencapai $\pm 10\%$. Sedangkan perbandingan data kecepatan *slug* eksperimen dengan nilai perhitungan menggunakan persamaan Fukano dan Kariyasaki, 1993 (Pers. 2) seperti pada Gambar 8.b, menunjukan nilai kesesuaian yang sama dengan Sudarja et al (2018) yaitu $\pm 10\%$, namun apabila menggunakan nilai perhitungan dengan persamaan Nicklin et al 1962 (Pers. 1) seperti pada Gambar 8.c menunjukan bahwa persamaan Nicklin et al (1962) *under predicted*, dengan margin error diatas $\pm 10\%$ yaitu mencapai $\pm 30\%$.

Ketidaksesuaian hasil kecepatan eksperimen dengan hasil perhitungan menggunakan persamaan korelasi peneliti terdahulu, hal ini dikarenakan antara lain adalah perbedaan kondisi penelitian, seksi uji dan fluida kerja yang digunakan. Untuk memudahkan menganalisisnya, Gambar 8.a-c, diplot kembali seperti pada Gambar 9. Dari Gambar tersebut, terlihat bahwa korelasi Fukano dan Kariyasaki, 1993 [14] yang paling sesuai dengan data eksperimen dengan margin error hanya sebesar 2,68%. Fukano dan Kariyasaki, 1993 [14] melakukan eksperimen terhadap aliran pada seksi uji *capillary tube* dengan diameter saluran yaitu 1 mm. $U_S = (1 + C_s)(j_G + j_L)$, Dimana C_s adalah konstanta mendekati harga 0,2. Sedangkan Sudarja dan kawan-kawan, 2018 [15] sedikit *over predicted* dengan margin error 5.29%. Seksi uji dengan penampang lingkaran dengan diameter 1.6 mm, dengan penelitian didapat nilai $C_s = 0.233$ [15]. Untuk korelasi Nicklin dan kawan-kawan, 1962 [13], korelasi kecepatan *slug* dipengaruhi juga oleh efek *microgravity* gD , margin error adalah $\pm 30\%$. Efek *microgravity* ini dapat diabaikan apabila orientasi seksi uji yang digunakan adalah horizontal [14]. Dalam penelitian ini, eksperimen menggunakan seksi uji dengan penampang persegi Panjang dan diameter hidraulik 1.6 mm. Orientasi dari seksi uji adalah horizontal. Fluida kerja yang digunakan adalah air sebagai fase kontinu dan udara sebagai fase *dispersed*.



Gambar 8. Perbandingan kecepatan slug eksperimen terhadap U_s perhitungan menggunakan : a. korelasi Sudarja dkk (2018); b. korelasi Fukano dan Kariyasaki (1993); dan c. Nicklin dkk (1962)



Gambar 9. Perbandingan kecepatan *slug* eksperimen pada $r/D_H = 0.7$ terhadap U_s perhitungan menggunakan persamaan peneliti sebelumnya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasana tentang Analisa kecepatan slug aliran dua fasa yang dilakukan di daerah downstream T-junction *minichannel* horizontal, dapat disimpulkan bahwa kecepatan slug cenderung meningkat secara linear dengan meningkatnya kecepatan superfisial udara dan air. Perbandingan kecepatan slug secara eksperimen dengan hasil perhitungan menggunakan persamaan Fukano dan Kariyasaki (1993) dan Sudarja et al (2018) menunjukkan kesesuaian dengan margin error lebih kecil 10%, sedangkan Nicklin et al $\pm 30\%$.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Direktorat Jenderal pendidikan Tinggi Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan atas beasiswa BPPDN Tahun 2019 yang telah diberikan, terima kasih kepada Departemen Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada, dan terima kasih juga kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Metro, serta terima kasih banyak terutama kepada Achilleus Hermawan Astyanto, Setya Wijayanta, Haslinda Kusumaningsih, dan Drajat Indah Mawarni, atas dukungan selama riset dilakukan.

6. REFERENSI

- [1] SEEMANN, R., BRINKMAN M., PFOHL, T., HERMINGHAUS, S., Droplet based microfluidics. *Rep. Prog. Phys.* 75. 016601, 2012.
- [2] MOGRA A., VERMA S.K., THOMAS. T., Fabrication of square microchannel for experimental investigation of Two-phase flow using conventional machining process, 2016.
- [3] ELAZHARY, A. M., H.M. SOLIMAN, Two-pase flow in a horizontal mini-size impacting T-Junction with a rectangular cross-section, *Int. J. Multiphase Flow*, v. 42, pp. 104-114, 2012.
- [4] MOHAMMED H. MANSOUR, AKIMARO KAWAHARA, MICHIO SADATOMI, Experimental investagation of gas-non-newtonian liquid two-phase flow from T-Junction mixer in rectangular microchannel, *Int. J. Multiphase Flow*, v. 72, pp. 263-274, 2015.
- [5] KAWAHARA, A., CHUNG, P.M., KAWAJI, M., Investigation of two-phase flow pattern, void fraction, and pressure drop in a microchannel, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 28, pp. 1411-1435, 2002.
- [6] KEN YAMAMOTO, SATOSHI OGATA, Drag reduction of slug flows in microchannels by modifying the size of T-junction, *Int. J. Multiphase Flow*, v. 62, pp. 67-72, 2014.
- [7] ABHIK MAJUMDER, SAMBIT MAJUMDER, Effect of corner radius of a T-junction mini-square channel on fluid flow and heat transfer in the developing region: The three dimensionals numerical simulation, *Procedia Engineering*, v. 105, pp. 89-95, 2015.
- [8] WARNIER, M.J.F., DE CROON, M.H.J.M., REBROV, E.V., SCHOUTEN, J.C., Pressure drop of gas-liquid Taylor flowin roun micro-capillaries for low to intermediate Reynold numbers, *Microfluid Nanofluid*, v. 8, pp. 33-45, 2010.
- [9] KREUTZER, M.T., KAPTEIJN, F., MOULIJN, J.A., KLEIJN, C.R., HEISZWOLF, J.J., Inertial and interfacial effect on pressure drop of Taylor flowin capillaries, *AIChE Journal*, v. 51, no. 9, pp. 2428-2440, 2005a.
- [10] RAJLAKSHMI NAYAK, OSWALD JASON LOBO, DHIMAN CHATTERJE, SARIT K. DAS, Effect of geometrical parameters on slug behaviour and two-phase pressure drop in microchannel T-junctions, *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, v. 130, pp. 76-87, , 2018.
- [11] DUCKLER, A.E., HUBBARD, M.G., A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. *Ind. Eng. Chem. Fund*, v. 14, pp. 337-347, 1975.
- [12] DINARYANTO, O., WIDYATAM, A., MAJID, A.I., DEENDARLIANTO., DAN INDARTO., Image Processing analysis on the air-water slug two phase flow in a horizontal pipe. *AIP conference proceeding*, pp. 1737, 2016.
- [13] NICKLIN, D.J., WILKE, L.O., AND DAVIDSON, J.P., Two phase flow in vertical tube, *Trans. Inst. Chem. Eng*, v. 40-1, pp. 61-68, 1962.
- [14] TOHRU FUKANO, AKIRA KARIYASAKI , Characteristic of gas-liquid two-phase flow in a cappillary tube, *Nuclear Engineering and Design*, v. 141, pp. 59-68, 1993.
- [15] SUDARJA, AQLI HAQ, DEENDARLIANTO, INDARTO, ADHIKA WIDYAPRAGA, A Drag reduction of slug flows in microchannels by modifying the size of t-junction, *Journal of Hidrodinamics*, v. 31, no. 1, pp. 102-116, 2019.
- [16] KUSUMANINGSIH, H., M. RIAN ALIF MADANI, M. FAKHRI ALFATH, ALDY FRANSTANANATA, DEENDARLIANTO, INDARTO, Karakteristik pola aliran dua fase gas-cairan non-newtonian didalam microchannels berpenampang persegi, *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 13 no. 2, pp. 563-576, 2022.