

Karakteristik aliran dua fase pada saluran ekspansi tiba-tiba

Latif Ngudi Wibawanto¹, Budi Santoso², Wibawa Endra Juwana²

¹Program Sarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami 36A Surakarta tlp. 0271632163

²Staff Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami 36A Surakarta tlp. 0271632163
Email korespondensi: budisant@staff.uns.ac.id

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran dua fase yang melalui saluran dengan ekspansi tiba-tiba berupa perubahan pola aliran dan *pressure recovery*. Pengujian dilakukan dengan variasi kecepatan superficial air 0,2-1,3 m/s dan kecepatan superficial udara 0,2-1,9 m/s yang menghasilkan pola tiga pola aliran yaitu *bubble*, *plug*, dan *slug*. Saluran ekspansi mengakibatkan adanya beberapa perubahan pola aliran yang semula *plug* pada saluran hulu menjadi *bubble* pada saluran hilir dan *slug* menjadi *plug*. *Pressure recovery* hasil percobaan dibandingkan dengan persamaan model aliran homogen dan korelasi Wadle, kedua korelasi tersebut memiliki prediksi dengan nilai simpangan baku sebesar 0,32 dan 0,43.

Kata kunci: aliran dua fase, pola aliran, ekspansi, *pressure recovery*.

Abstract

This research was conducted to find out the flow characteristic of two phases through the channel with sudden expansion in the form of change of flow pattern and *pressure recovery*. The test was carried out with variation of superficial velocity of water 0.2-1.3 m / s and superficial air velocity of 0.2-1.9 m / s resulting in pattern of three flow patterns ie *bubble*, *plug*, and *slug*. The expansion channel resulted in some changes to the flow pattern that originally *plugs* in the upstream channel into *bubble* in the downstream channel and the *slug* becomes *plug*. *Pressure recovery* experimental results compared with the homogeneous model flow equation and Wadle correlation, both correlations have predictions with standard deviation values of 0.32 and 0.43.

Keywords: two phase flow, flow pattern, expansion, *pressure recovery*.

1. Pendahuluan

Aliran dua fase merupakan bagian dari aliran multi-fase. Aliran dari fase yang berbeda ini banyak dijumpai dalam proses-proses industri misalnya dalam komponen sistem konversi energi seperti penukar kalor, evaporator, dan siklus pendingin. Komponen tersebut merupakan komponen yang lazim digunakan pada proses industri dan instalasi tenaga nuklir. Transportasi produk-produk petrolemum dalam pipa telah menjadi obyek dari sejumlah studi yang membangun model-model rancangan dari jenis/pola aliran dan penurunan tekanan dalam pipa vertikal, horisontal dan miring [1]. Pola aliran tertentu pada Gambar 1 terbentuk karena kombinasi kecepatan fase cairan dan gas tergantung pada interaksi gravitasi, tegangan geser (inersia) dan tegangan permukaan pipa. Hal ini diyakini bahwa mekanisme aliran pada penampang saluran persegi dan lingkaran dengan diameter kecil (saluran mini) berbeda dari saluran dengan diameter yang lebih besar (saluran konvensional)[2].

Daerah transisi pola aliran *bubble-plug* dapat diprediksi dengan mengetahui nilai d_b/D_h berada di

antara 0,03-0,4, nilai tersebut bergantung pada nilai fraksi hampa pola aliran (*bubble*) pada daerah disekitar batas transisi (α_{cr}) yang diperoleh dari persamaan berikut [3]:

$$\alpha_{cr} = 0,6 - \frac{2,32d_b}{D_h} \quad (1)$$

$$J_g = u_g \cdot \alpha \quad (2)$$



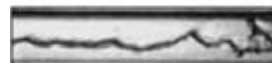
(a) Bubble



(b) Plug



(c) Slug



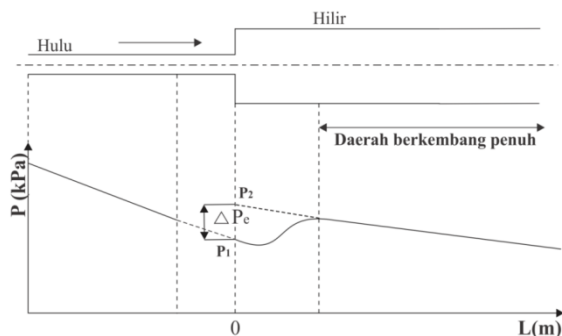
(d) Wavy



(e) Annular

Gambar 1. Pola aliran dua fase pada saluran horisontal

Pada beberapa industri seperti industri kimia, pemindahan fluida umumnya dilakukan melalui sistem perpipaan. Dalam sistem perpipaan, selain memerlukan pipa-pipa utama, juga memerlukan beberapa komponen pipa, seperti belokan pipa, siku, katup, perbesaran saluran, pengecilan saluran, dan kombinasi saluran. Dalam sistem pipa yang besar, kerugian pada komponen pipa biasanya hanya merupakan kerugian yang kecil (rugi minor) dibandingkan dengan kerugian akibat gesekan sepanjang saluran (rugi mayor)[4]. Namun pada sistem yang tidak besar, kerugian pada komponen pipa dapat menjadi kerugian utama terhadap kerugian total sepanjang lintasan aliran. Pada perubahan area saluran secara tiba-tiba (*sudden expansion*) terjadi adanya *pressure recovery*, yaitu adanya kenaikan tekanan setelah melewati ekspansi yang disebabkan karena penurunan kecepatan fluida tersebut secara signifikan dan selanjutnya tekanan akan turun kembali. Untuk merancang perangkat tersebut, sangat penting untuk memperkirakan karakteristik penurunan tekanan aliran dua fase[5][6]. Nilai *pressure recovery* diperhitungkan untuk mengetahui rugi-rugi total dalam suatu sistem perpipaan. Penelitian mengenai *pressure recovery* dalam aliran dua fase telah banyak dilakukan, dengan harapan diperoleh suatu petunjuk teknis dan desain praktis dalam merencanakan komponen-komponen sistem konversi energi seperti dalam penentuan spesifikasi pompa yang akan digunakan pada sistem tersebut. Dalam penelitian ini, percobaan akan dilakukan dengan saluran uji dengan penampang persegi berukuran mini pada saluran hulu dan persegi panjang berukuran konvensional pada saluran hilir dengan udara dan air sebagai fluida kerja. Nilai *pressure recovery* ΔP_e karena adanya ekspansi didefinisikan sebagai perbedaan tekanan ketika garis gradien tekanan pada kondisi aliran berkembang penuh hulu dan hilir diekstrapolasi ke titik perluasan saluran (P_1 dan P_2) yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pada penelitian ini untuk memprediksi nilai *pressure recovery* menggunakan metode aliran homogen (Persamaan 3) dan Persamaan [1] (Persamaan 4).



Gambar 2. Distribusi tekanan pada saluran ekspansi tiba-tiba.

Besar *pressure recovery* ditentukan oleh persamaan berikut [3]:

$$\Delta P_e = (1 - \sigma^2) \frac{1}{2} G_{\text{total}}^2 K \left[\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right] \quad (3)$$

$$\Delta P_e = (1 - \sigma^2) \frac{1}{2} G_{\text{total}}^2 K \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_l} + \frac{x^2}{\rho_g} \right] \quad (4)$$

dimana,

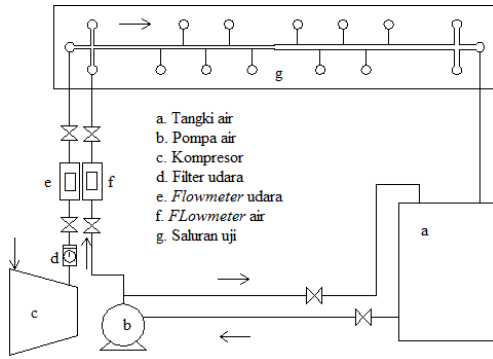
- X = kualitas gas
- σ = rasio ekspansi (A_1/A_2)
- A = luas penampang saluran, m^2
- G = fluks massa fase, kg/m^2s
- ρ_h = massa jenis campuran, kg/m^3
- ΔP_e = *pressure recovery*, kPa
- K = konstanta empiris fase udara-air (0,83)

Subscript,

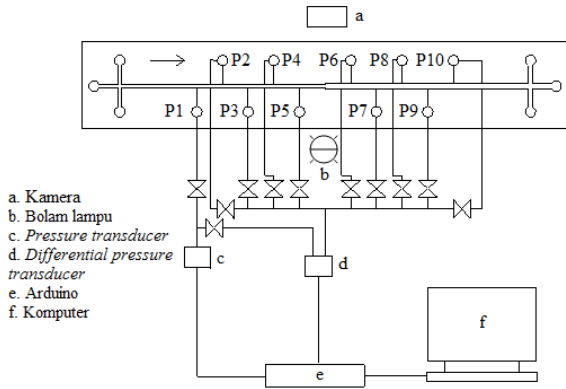
- 1 = saluran hulu
- 2 = saluran hilir
- l = fase cair (air)
- g = fase gas (udara)

2. Metode

Pengujian dilakukan dengan variasi kecepatan superfisial air J_1 0,2-1,3 m/s dan kecepatan superfisial udara J_g 0,2-1,9 m/s. Skema pengujian dan instrumentasi ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Untuk mengetahui pola aliran dua fase pada setiap variasi, kamera ditempatkan di atas saluran yaitu pada saluran hulu, area ekspansi, dan hilir dengan durasi perekaman selama 3 detik. Sebuah lampu ditempatkan di bawah saluran uji agar gambar yang diperoleh lebih jelas, kamera yang digunakan pada penelitian ini memiliki kecepatan pengambilan gambar 1000 fps. Video rekaman aliran dua fase diolah menggunakan perangkat lunak Phantom 630 untuk mengetahui kecepatan aktual fase gas (u_g). Pada penelitian ini pengukuran tekanan dilakukan pada daerah berkembang penuh. Pengukuran tekanan diambil pada kecepatan superfisial air 0,6-1,3 m/s. Saluran uji memiliki lima *pressure tap* sebagai titik ukur tekanan pada setiap saluran hulu dan hilir. Sensor tekanan Copal PA500-501G digunakan untuk mengukur tekanan pada titik ukur tekanan pertama dan sensor tekanan MPXV4006DP digunakan untuk mengukur beda tekanan antara titik ukur tekanan pertama dengan titik ukur berikutnya.



Gambar 3. Skema pengujian

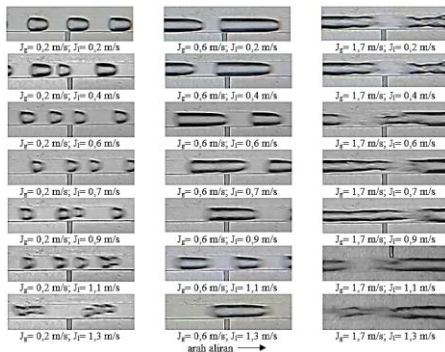


Gambar 4. Skema instrumentasi

3. Hasil dan Pembahasan

Pola aliran dua fase

Pola aliran yang teridentifikasi pada hasil penelitian ini sebagai berikut:



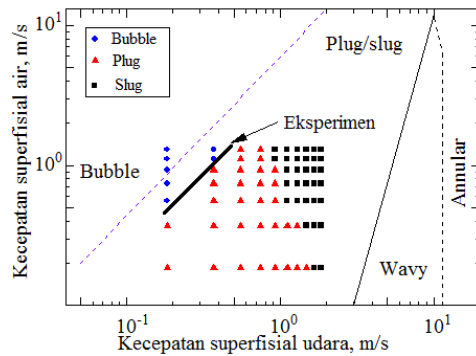
Gambar 5. Pola aliran dua fase pada saluran

Dalam penelitian ini diperoleh tiga pola aliran yang berbeda yaitu bubble, plug, dan slug, sedangkan pola aliran wavy dan annular tidak ditemukan pada penelitian ini. Gambar 5 menunjukkan beberapa pola aliran yang ada pada penelitian ini. Pola aliran bubble mulai ditemukan pada variasi debit air 300 ml/menit yaitu pada kecepatan superfisial air 0,6 m/s, pola ini terbentuk hanya pada kecepatan superfisial udara rendah yaitu 0,2 m/s dan 0,4 m/s. Pada variasi kecepatan superfisial air 0,2 m/s dan 0,4 m/s pola aliran bubble tidak ditemukan meskipun pada kecepatan superfisial udara rendah. Bubble

menjadi lebih memanjang yang kemudian berubah menjadi plug seiring bertambahnya kecepatan superfisial udara pada kecepatan superfisial air yang sama[7]. Pola aliran slug terbentuk pada variasi kecepatan superfisial udara tinggi. Pola aliran slug mulai terbentuk pada kecepatan superfisial udara 1,7 m/s dan kecepatan superfisial air 0,2 m/s.

Data visualisasi pola aliran hasil penelitian pada saluran hulu diplot pada peta pola aliran yang telah dibuat oleh [2] (Gambar 6) yang sama-sama menggunakan saluran persegi berukuran mini namun dengan diameter hidrolis saluran yang berbeda.

Berdasarkan pada data eksperimen dan peta pola aliran tersebut, terdapat adanya sedikit perbedaan (pergeseran) daerah transisi antara bubble dan plug. Perbedaan ini dapat dikarenakan diameter hidrolis saluran yang digunakan pada penelitian ini tiga kali lebih besar dibandingkan pada saluran yang digunakan oleh [2].

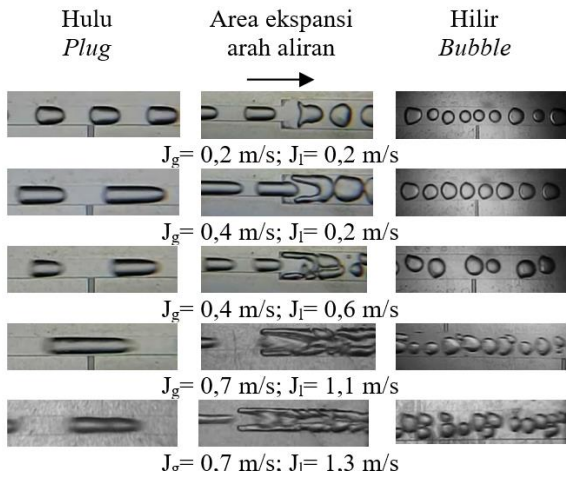


Gambar 6. Pola aliran hasil penelitian yang diplot pada peta pola aliran [2]

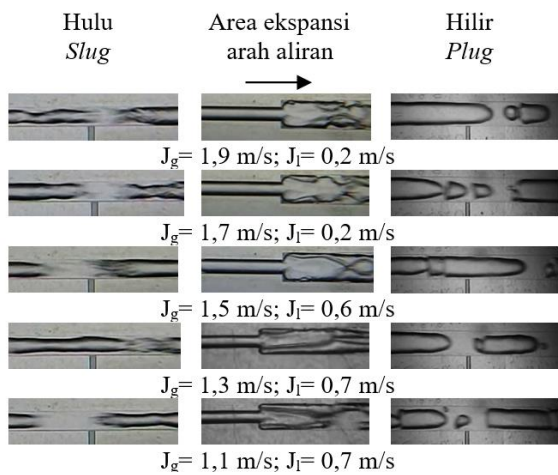
Daerah transisi pola aliran bubble-plug dapat diprediksi dengan mengetahui nilai db/D_h berada di antara 0,03-0,4 yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data parameter tak berdimensi db/D_h pada daerah transisi bubble-plug

J_l , m/s	J_g , m/s	u_g , m/s	α_{cr}	pola aliran	d_b/D_h
0,6	0,2	1,4	0,13	Bubble	0,20
0,7	0,2	1,6	0,11	Bubble	0,21
0,9	0,2	2,1	0,09	Bubble	0,22
1,1	0,4	2,4	0,16	Bubble	0,19
1,3	0,4	2,7	0,14	Bubble	0,20



Gambar 7. Perubahan pola aliran plug menjadi bubble



Gambar 8. Perubahan pola aliran slug menjadi plug

Ekspansi saluran mengakibatkan beberapa pola aliran berubah menjadi tipe pola yang berbeda[8]. Misalkan pada $J_l=0,2$ m/s, $J_g=0,4$ m/s dan $J_l=0,6$ m/s, $J_g=0,4$ m/s pola aliran yang semula plug berubah menjadi bubble seperti yang terlihat pada Gambar 7. Pola aliran bubble pada saluran hilir lebih banyak ditemukan dibandingkan sebelum aliran melewati ekspansi (pada saluran hulu). Pada $J_l=0,2$ m/s, $J_g=1,9$ m/s dan $J_l=0,7$ m/s; $J_g=1,1$ m/s pola aliran yang semula slug menjadi plug seperti yang terlihat pada Gambar 8. Pola aliran plug pada saluran hilir lebih sedikit dibandingkan sebelum aliran melewati ekspansi.

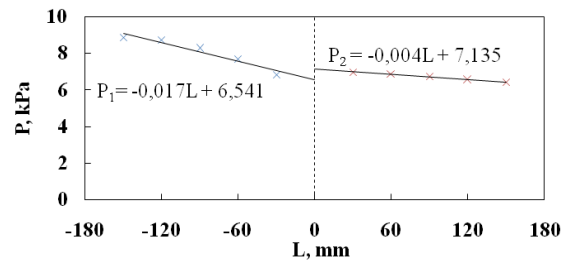
Pressure recovery

Panjang daerah transisi (L_d) pada saluran ekspansi tiba-tiba yang ditunjukkan pada Tabel 2 merupakan fungsi dari bilangan Reynolds pada saluran hulu (Re_1). Panjang daerah transisi semakin besar seiring bertambahnya bilangan Reynolds tersebut. Nilai dari perbandingan antara panjang daerah transisi dengan Diameter saluran (L_d/D_h) pada saluran ekspansi dapat dikorelasikan berdasarkan bilangan Reynolds dan rasio ekspansi " (σ) "[9][10]. Pada penelitian ini pengukuran tekanan diambil pada jarak 30 mm

setelah ekspansi. Bilangan Reynolds yang digunakan adalah bilangan Reynolds total dari penjumlahan masing-masing fase[14]. Berdasarkan Persamaan 5 jarak tersebut sudah berada pada daerah berkembang penuh sehingga pada Gambar 9 distribusi tekanan sebelum pada daerah transisi tidak diketahui.

$$\frac{L_d}{D_h} = 13,788 \cdot Re_1^{0,11} (1-\sigma)^{2,463} \tag{5}$$

Nilai pressure recovery ΔP karena adanya ekspansi didefinisikan sebagai perbedaan tekanan ketika garis gradien tekanan pada kondisi aliran berkembang penuh hulu dan hilir diekstrapolasi ke titik nol pada perluasan saluran[11][16]. Gambar 10 menunjukkan bahwa semakin besar nilai kecepatan superfisial air maka nilai pressure recovery semakin besar. Pada kecepatan superfisial air yang sama semakin besar kualitas gas nilai pressure recovery juga cenderung lebih besar[12][15]. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa nilai pressure recovery hasil penelitian lebih mendekati dengan nilai pressure recovery yang diperoleh dari persamaan model aliran homogen dibandingkan dari korelasi [1].



Gambar 9. Distribusi tekanan sepanjang saluran ekspansi tiba-tiba pada variasi $J_l=0,9$ m/s, $J_g=0,6$ m/s

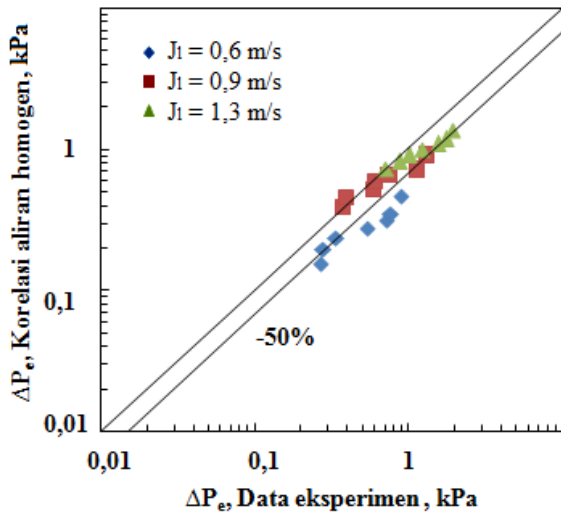
Tabel 2. Panjang daerah transisi saluran ekspansi.

	J_g , m/s	Re udara	Re total	L_d , mm	
J_l , m/s	0,7	139,2	2220,1	23,2	
	0,6	174,0	2254,9	23,2	
	Re air	1,1	208,8	2289,7	23,3
		2080,9	313,2	2394,1	23,4
	J_l , m/s	0,6	104,4	3572,5	24,4
0,9		139,2	3607,3	24,4	
Re air		0,9	174,0	3642,1	24,5
		3468,1	208,8	3676,9	24,5
		1,7	313,2	3781,3	24,6
J_l , m/s	0,2	34,8	5583,8	25,6	
	1,3	0,4	69,6	5618,6	25,7
		0,6	104,4	5653,4	25,7
	Re air	0,7	139,2	5688,2	25,7
		5549,0	174,0	5723,0	25,7
	1,1	208,8	5757,8	25,7	

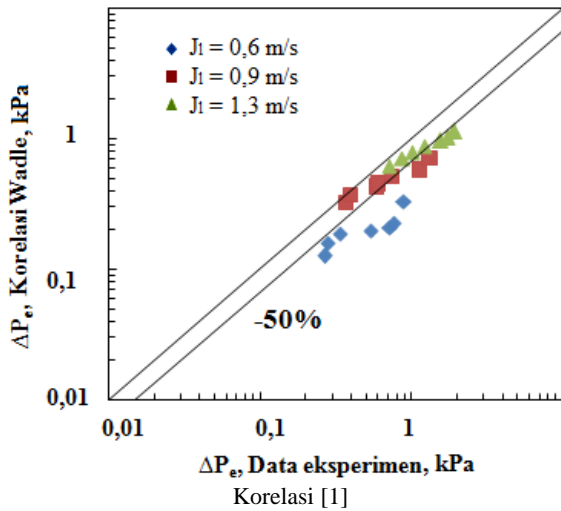
	1,5	313,2	5792,6	25,8
--	-----	-------	--------	------

Tabel 3. Simpangan baku antara pressure recovery hasil penelitian dengan persamaan

Simpangan	Persamaan metode aliran homogen	Korelasi [1] (1988)
Nilai rata-rata simpangan	0,24 kPa	0,35 kPa
Simpangan baku (S)	0,32 kPa	0,43 kPa



(a) Korelasi metode aliran homogen



Gambar 11. Perbandingan nilai ΔP_e eksperimen dengan perhitungan

Pressure recovery hasil penelitian dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari persamaan metode aliran homogen dan korelasi [1]

Grafik perbandingan tersebut ditunjukkan pada Gambar 11. Pada penelitian ini metode aliran homogen memberikan prediksi dengan nilai simpangan lebih rendah dibandingkan dengan korelasi [1] yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Perbedaan dari kedua korelasi didasarkan pada penentuan massa jenis campuran, fluks massa serta konstanta empiris yang telah ditentukan pada korelasi [1]. Pada variasi kecepatan superficial air 0,6 m/s tidak dapat diprediksi dengan baik karena differential pressure transducer memiliki akurasi yang rendah pada kondisi tersebut.

4. Kesimpulan

Dari data dan analisa yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini diperoleh pola aliran dua fase *bubble*, *plug*, dan *slug*. Pola aliran *wavy* dan *annular* tidak ditemukan pada penelitian ini.
2. Pada penelitian aliran dua fase ini, nilai *pressure recovery* berdasarkan metode aliran homogen dan korelasi wadde cenderung lebih rendah dibandingkan *pressure recovery* hasil penelitian.
3. Dibandingkan korelasi wadde nilai *pressure recovery* berdasarkan metode aliran homogen memberikan nilai yang lebih mendekati dengan *pressure recovery* hasil penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] J. Supranto, 2000. *Statistik: Teori dan Aplikasi*, Erlangga, Jakarta.
- [2] J.W. Coleman, dan S. Garimella, 1999. *Characterization of Two-phase Flow Patterns in Small Diameter Round and Rectangular Tubes*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 31, hlm. 2869-2881.
- [3] B.R. Munson, D.F. Young, dan T.H. Okhiisi, 2009. *Fundamentals of Fluid Mechanics*, John Wiley and Sons, United States of America.
- [4] M. Wadde, 1989. *A New Formula For the Pressure Recovery in an Abrupt Diffusor*, [1]
- [5] J.F. Zhao, 2011. *Flow Patterns, Pressure Drops and Other Related Topics of Two-phase Gas-liquid Flow in Microgravity*, dalam
- [6] I. Y. Chen, C. Liu, K. Chien, C. Wang, 2008. *Two-Phase flow Characteristics Across Sudden Expansion In Small Rectangular Channels*, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, hlm. 696-706.
- [7] W.H. Ahmed, C.Y. Ching, dan M. Shoukri, 2007. *Development of Two-phase Flow Downstream of a Horizontal Sudden Expansion*, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 29, hlm. 194-206.
- [8] W.H. Ahmed, C.Y. Ching, dan M. Shoukri, 2007. *Pressure Recovery of Two-Phase flow Across Sudden Expansions*, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 33, hlm. 575-594.

- [9] R.I. Koestoer, dan S. Proborini, 1994. *Aliran Dua Fase dan Fluks Kalor Kritis*, Pradya Paramita, Jakarta Timur.
- [10] K. Mishima dan T. Hibiki, *Flow Regime two-phase flow in rectangular channels*, dalam S. Kandlikar, S. Garimella, D. Li, S. Colin, dan M.R. King, 2006. *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Michrochannels*, India.
- [11] Kandlikar, S., Garimella, S., Li, D., Colin, S., dan King, M.R. 2006. *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Michrochannels*, India.
- [12] G. Huang, H. Ji, Z. Huang, B. Wang, dan H. Li, *Flow Regime Identification of Mini-Pipe Gas-Liquid Two-Phase Flow Based on Textural Feature Series*, National Natural Science Foundation of China.
- [13] International Journal of Multiphase Flow, Vol. 15, hlm. 241-256.
- [14] A. Belmiloudi (ed.), *Heat Transfer-Theoretical Analysis, Experimental and Industrial Systems*, hlm.419-436, Intech, China. [17] H. Ide dkk. 2007. *Fundamental Data on the Gas-Liquid Two-Phase Flow in Minichannels*, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 46, hlm. 519-530.
- [15] S.S. Mahendale, A.M. Jacobi, R.K. Ahah, 2000. *Fluid Flow and Heat Transfer Micro- and Meso-scales with Aplication to Heat Exchanger Design*, dalam Cheng, L., Mewes, D. 2005. *Review of Two-Phase Flow and Flow Boiling of Mixtures in Small and Mini Channels*, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 32, hlm. 185-207.
- [16] M. Venkatesan, S.K. Das, dan A.R. Balakrishnan, 2009. *Effect of Tube Diameter on Two-Phase Flow Patterns in Mini Tube*, The Canadian Journal Of Chemical Engineering, Vol. 88, hlm.936-944.