

## Analisis Aliran Fluida Dua Fase (Udara-Air) melalui Belokan 45°

Awaluddin, Slamet Wahyudi dan Agung Sugeng Widodo  
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya  
Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia  
Telp: (+62 341) 587710, 587711. Fax: (+62 341) 551430  
E-mail: awaluddin.smkn2@gmail.com

### Abstract

*The phenomenon of two phase flow can be found in our nature, at the living body and industrial of the world. The flow of fluid through the pipe bends have a value greater than the pressure drop straight pipe it's was because the changes in geometry and trajectory that have an impact on the change of flow pattern. This research aims to determine of the flow pattern and two-phase flow pressure drop that occur through the 45° elbow from the horizontal to the vertical slopes upward. Diameter of the pipe (D) 26.64mm, variation that do are gas flow rate ( $Q_G$ ) (1 - 3) LPM and gas volume fraction ( $\beta$ ) (25 - 50) %. From the results of this research we can conclude that the flow pattern that occurs is the slug/plug flow where the greater the gas volume fraction ( $\beta$ ), the size of the slug/plug flow greater and inversely proportional to the pressure drop further down. Upheaval of two-phase flow patterns due to the influence of gravity occurs at the actual speed ratio of air and water ( $v_G/v_L$ ) at 1 LPM air 0.713 and 0.966 at 3 LPM air. The highest pressure drop occurs with the condition of the gas volume fraction ( $\beta$ ) of 50 %, actual speed ratio of air and water ( $v_G/v_L$ ) 0.764 at 107.415 Pa in theoretically and 214.616 Pa at experimentally.*

**Keywords:** 45° elbow, flow pattern, pressure drop.

### PENDAHULUAN

Sifat-sifat aliran fluida merupakan suatu hal yang sangat menarik untuk diteliti, baik fluida statik maupun fluida dinamik. Fluida zat cair yang mengalir melalui sebuah pipa dengan panjang tertentu menyebabkan terjadinya kerugian energi berupa penurunan tekanan (*pressure drop*) disebabkan oleh *major losses* akibat gesekan sepanjang dinding pipa maupun *minor losses* akibat perubahan bentuk lokal saluran berupa belokan, katup, maupun sambungan pipa dan juga tergantung besar koefisien gesek pipa tersebut. Dalam kehidupan sehari-hari, tidak saja menemui kasus untuk aliran satu fase di sistem pemipaan, kenyataannya sering terjadi aliran multiphase (dua fase, tiga fase, atau lebih) [1].

Aliran multifase adalah aliran yang fasenya (padat, cair dan gas) saling berinteraksi antara satu dengan yang lainnya dan setiap hubungan antar fase pergerakannya saling mempengaruhi. Sedangkan aliran dua fase adalah aliran yang terdiri dari dua fase yang

berbeda, dan merupakan bagian aliran multiphase. Aplikasi aliran multiphase misalnya kavitasi pompa dan turbin, *electrophotographic* printer di proses aliran efektif toner untuk menghasilkan kualitas gambar dan kecepatan pencetakan, ketel uap, proses reaktor nuklir di sistem pembangkit tenaga nuklir, proses destilasi, industri perminyakan dan pertambangan, bidang medis untuk aliran darah dan sperma, sehingga akan menjadi sangat berharga untuk memikirkan aplikasi aliran multiphase [2].

Untuk merancang dan aplikasi di lapangan, penggunaan belokan sangat diperlukan. Belokan pipa memiliki nilai *pressure drop* yang besar dibandingkan pipa lurus hal ini dikarenakan perubahan geometri dan lintasan mengakibatkan perubahan pola aliran sehingga terbentuk aliran terpisah dari sisi bagian dalam belokan pipa tersebut. Besar kecilnya nilai *pressure drop* ditentukan oleh pemilihan sudut belokan [3].

Kim *et.al.*, (2008), menyimpulkan bahwa efek geometris belokan 45° menunjukkan

penurunan tekanan meningkat dengan meningkatnya laju aliran gas dan cairan, hasil korelasi yang dikembangkan dengan data eksperimen  $C = 65$  dan faktor  $k = 0.58$  untuk belokan  $90^\circ$  dan  $k = 0.35$  untuk belokan  $45^\circ$  menghasilkan data yang sangat baik dengan perbedaan persentasi rata-rata masing-masing belokan  $\pm 2,1\%$  dan  $\pm 1,3\%$  [4].

Adiwibowo (2009), variasi kecepatan superfisial cairan  $0.3 \text{ m/s}$  sampai  $1.1 \text{ m/s}$  dan kualitas volumetrik gas  $0.05$  sampai  $0.20$  akan menghasilkan pola aliran *bubble* pada bidang uji vertikal, penyimpangan *global void friction* dari *homogeneous* model sebesar  $42\%$  sampai  $50\%$  dan penurunan nilai *pressure drop* terjadi diberbagai kecepatan superfisial cairan dengan bertambahnya kualitas volumetrik gas [5].

Abdulkadir *et.al.*, (2011), laju aliran cairan yang rendah dan kecepatan superfisial gas yang tinggi, film pemecah (*burn out*) terjadi pada posisi  $45^\circ$  sekitar tikungan. Efek gravitasi terjadi secara signifikan pada kecepatan superfisial gas yang tinggi [6].

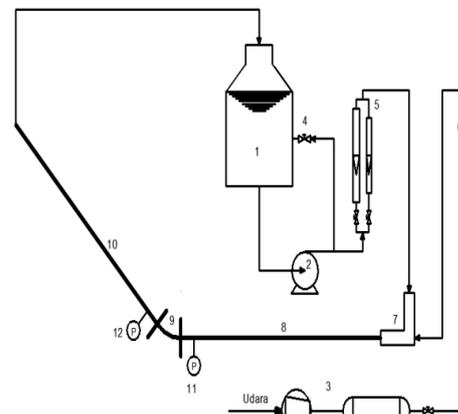
Oliviera dan Barbosa (2013), distribusi tekanan statis lokal berbeda secara signifikan antara dua orientasi aliran, terutama karena efek gravitasi yang dominan pada laju aliran gas yang rendah. Kemudian pada campuran rendah kecepatan khas arus bertingkat, perbedaan signifikan yang diamati antara gas *holdup* di inlet dan outlet belokan. Ini dapat dikaitkan dengan fenomena yang berbeda bergantung pada orientasi aliran, seperti aliran cairan berlawanan di belokan (aliran ke atas) dan pembentukan lompatan hidrolis di bagian keluar (mengalir ke bawah). Karena kedua gas dan kecepatan superfisial cairan meningkat (meningkatkan inersia aliran), perbedaan antara *inlet* dan *outlet* pada gas *holdup* menjadi lebih kecil [7].

Dari uraian tersebut dan melihat pentingnya pengetahuan tentang aliran dua fase melalui belokan serta data base yang masih kurang, maka perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh *gas volume fraction* dan debit aliran udara terhadap *pressure drop* dengan variasi yang berbeda. Pada penelitian ini menggunakan *gas volume fraction* dengan klasifikasi moderat, variasi debit aliran udara dan air.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental yaitu melakukan pengukuran langsung dan tak langsung.

Peralatan yang digunakan seperti ditunjukkan oleh gambar 1. Seksi uji (9) menggunakan pipa *acrylic* transparan agar perilaku aliran dapat diamati. Debit aliran air dan udara diukur menggunakan *flow meter* (6 dan 5) kedua aliran (udara-air) bercampur pada mixer (7). Sebelum melewati seksi uji (9), aliran dua fase (udara-air) melewati pipa horizontal (8) sepanjang  $200 \text{ mm}$ . Pengukuran aliran menggunakan manometer U sebelum (11) dan sesudah (12) belokan (9) dengan *elevation pressure tap* ( $\Delta Z$ )  $30 \text{ mm}$  [8].



Gambar 1. Skema instalasi

Eksperimen akan dilakukan dengan variasi *gas volume fraction* ( $\beta$ ) ( $25 - 50$ ) % dan debit udara ( $Q_G$ ) ( $1 - 3$ ) Liter Per Minute (LPM). Variasi ini akan didapat debit air ( $Q_L$ ) melalui persamaan 1 [5].

$$\beta = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} \quad (1)$$

Pengukuran properti fluida dua fase disesuaikan dengan temperatur rata-rata ruang, saat penelitian yaitu  $20^\circ\text{C}$ .

Gambar 1 menunjukkan bahwa air di reservoir (1) disirkulasi oleh pompa (2) menuju instalasi. Pengaturan debit aliran air yang diinginkan melalui *flow meter* (5) menggunakan *gate valve* (4). Setelah aliran air terlihat berkembang penuh (*fully developed*) di pipa horizontal transparan (8),

udara dari kompresor (3) diinjeksikan ke mixer (7). Debit aliran udara diukur menggunakan *flow meter* (6). Distribusi tekanan aliran dua fase (udara-air) sebelum (11) dan sesudah (12) belokan 45° (9) menuju pipa vertikal miring ke atas (10) diukur menggunakan manometer U [9].

Pengambilan data dilakukan setiap perubahan debit aliran udara ( $Q_G$ ) dan debit aliran air ( $Q_L$ ). Visualisasi fenomena pola aliran fluida (udara-air) melalui belokan 45° menggunakan kamera kecepatan tinggi Nikon D90 berupa format gambar perdetik.

Kecepatan superficial digunakan untuk pemetaan pola aliran. Untuk kecepatan superficial udara ( $v_{sG}$ ) menggunakan persamaan 2.

$$v_{sG} = \frac{Q_G}{A} \tag{2}$$

Kecepatan superfisia air ( $v_{sL}$ ) menggunakan persamaan 3.

$$v_{sL} = \frac{Q_L}{A} \tag{3}$$

Dimana A adalah luas penampang pipa ( $m^2$ )

Kecepatan rata-rata udara dan air adalah kecepatan actual yang dihasilkan oleh udara ( $v_G$ ) dan air ( $v_L$ ) ketika mengalir dalam pipa seperti pada Persamaan 4 dan 5.

$$v_G = \frac{v_{sG}}{\alpha_G} \tag{4}$$

$$v_L = \frac{v_{sL}}{\alpha_L} \tag{5}$$

Dimana :  $\alpha_G = \text{Gas void fraction}$   
 $\alpha_L = \text{Liquid holdup}$

Untuk perhitungan *pressure drop* eksperimental melalui belokan ( $\Delta p_{EB}$ ) menggunakan persamaan 6 berikut.

$$\Delta p_{EB} = [\Delta Z + (h_{11} - h_{12})] \times \rho_m \times g \tag{6}$$

Dimana :

- $\Delta p_{EB}$  = *Pressure drop* pada belokan ( $N/m^2$ )
- $\Delta Z$  = *Elevation* antara pressure taps (m)
- h = Hasil ketinggian level air pada manometer (m)
- $\rho_m$  = Densitas campuran ( $kg/m^3$ )
- g = Percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

Untuk perhitungan *pressure drop* teoritis melalui belokan ( $\Delta p_{EB}$ ) dipengaruhi oleh *pressure drop* karena *friction* ( $\Delta p_f$ ), *static* ( $\Delta p_s$ ) dan *retriction* ( $\Delta p_r$ ) yaitu menggunakan persamaan 7.

$$\Delta p_{EB} = [\Delta p]_f + [\Delta p]_s + [\Delta p]_r \tag{7}$$

*Pressure drop friction* ( $\Delta p_f$ ) dan *static* ( $\Delta p_s$ ) aliran fluida dua fase menggunakan korelasi Lockhart-Martinelli seperti pada persamaan 8 dan 9.

$$\Delta p_f = \left[ \left( \frac{dp}{dx} \right)_f \right]_{Lockhart \ Martinelli} \times \frac{\pi R}{2} \tag{8}$$

$$\left( \frac{dp}{dx} \right)_f = \Phi_L^2 \left( \frac{dp}{dx} \right)_{sL f} = \Phi_G^2 \left( \frac{dp}{dx} \right)_{sG f} \tag{9}$$

Dimana :

- $\left( \frac{dp}{dx} \right)_f$  = *Gradient pressure friction* ( $pa/m$ )
- $\Phi_L^2$  atau  $\Phi_G^2$  = Aliran dua fase *multiplier*
- R = Radius belokan (m)

*Gradient pressure* untuk *friction* ( $\frac{dp}{dx}$ )<sub>f</sub> menggunakan persamaan 10.

$$\left( \frac{dp}{dx} \right)_{sL f} = 2 \frac{f_{sL} \rho_L v_{sL}^2}{D} \tag{10}$$

Dimana:

- $f_{sL}$  = *Friction factor*
- $\rho_L$  = Densitas air ( $kg/m^3$ )
- $v_{sL}$  = Kecepatan superficial aliran (m/s)
- D = Diameter dalam pipa (m)

Korelasi Lockhart-Martinelli ( $\phi$ ) yang dikembangkan adalah seperti pada Persamaan 11.

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \tag{11}$$

**Tabel 1.** Nilai parameter C untuk Korelasi Lockhart-Martinelli ( $\phi$ ) pada persamaan (7) [4].

| Cairan   | Gas      | C  |
|----------|----------|----|
| Turbulen | Turbulen | 20 |
| Laminer  | Turbulen | 12 |
| Turbulen | Laminer  | 10 |
| Laminer  | Laminer  | 5  |

Perhitungan *pressure drop static* ( $\Delta p_s$ ) dipengaruhi oleh radius belokan ( $R$ ) dan sudut belokan pipa ( $\Theta$ ) menggunakan Persamaan 12.

$$\Delta p_s = \left[ \left( \frac{dp}{dx} \right)_s \right]_{Lockhart\ Martinelli} \times R \times \sin\theta \quad (12)$$

*Gradient pressure* untuk *static*  $\left( \frac{dp}{dx} \right)_s$  menggunakan persamaan 13 di bawah ini.

$$\left( \frac{dp}{dx} \right)_{static} = \rho_m \times g \quad (13)$$

*Pressure drop* dua fase *retriction* ( $\Delta p_r$ ) menggunakan Persamaan 14.

$$\Delta p_r = \frac{k_s}{2} (\rho_L v_{sL}^2 + \rho_G v_{sG}^2) \quad (14)$$

Dimana  $k_s$  adalah koefisien *losses*.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

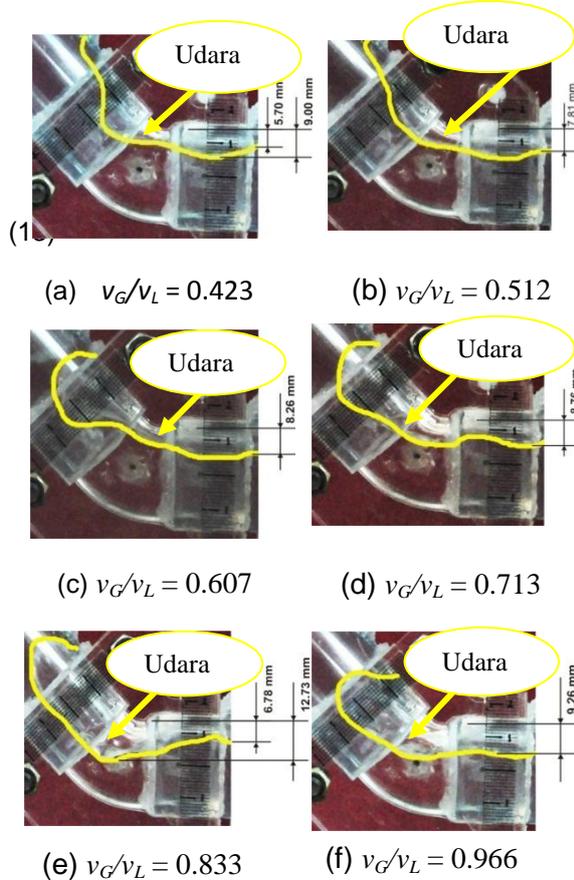
Hasil visualisasi penelitian tentang pola aliran fluida dua fase melalui belokan 45°, dengan variasi *gas volume fraction* ( $\beta$ ) (25-50)% secara berurutan ditunjukkan gambar 2 dan 3.

Gambar 2 menunjukkan bahwa pola aliran yang terjadi adalah *slug/plug flow*. Semakin meningkatnya *gas volume fraction* ( $\beta$ ) bentuk dan ukuran pola aliran yang terjadi semakin besar dan berbanding terbalik dengan kecepatan superfisial air ( $v_{sL}$ ) yang semakin kecil. Kondisi ini menyebabkan fraksi cairan ( $\alpha_L$ ) dalam campuran tidak maksimal karena debit air ( $Q_L$ ) semakin kecil.

Ukuran dan bentuk pola aliran sebanding dengan kenaikan perbandingan kecepatan aktual udara dengan air ( $v_G/v_L$ ) yang signifikan setiap kenaikan *gas volume fraction* ( $\beta$ ). Kondisi ini terjadi penurunan kecepatan aktual udara ( $v_G$ ) sangat kecil dan kecepatan aktual air ( $v_L$ ) yang penurunannya besar, hal ini disebabkan karena penambahan proporsi *gas volume fraction* ( $\beta$ ) pada debit aliran udara ( $Q_G$ ) yang tetap sehingga debit air ( $Q_L$ ) menurun.

Gambar 3 memperlihatkan ukuran *slug/plug flow* di belokan lebih besar. Berbanding lurus dengan kecepatan superfisial udara ( $v_{sG}$ ) dan *gas volume fraction* ( $\beta$ ). Jika proporsi *gas volume fraction* ( $\beta$ ) ditambahkan setiap kenaikan debit udara

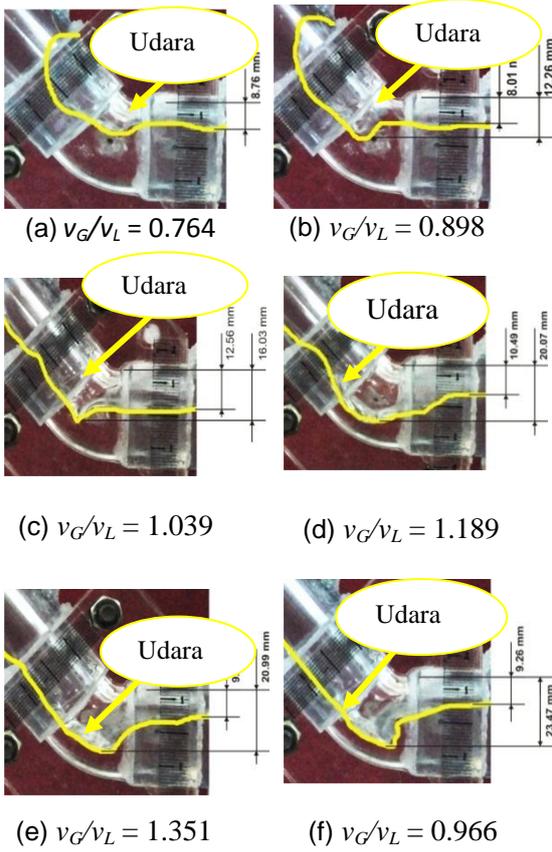
( $Q_G$ ) menyebabkan debit air ( $Q_L$ ) berkurang. Karena fraksi udara dalam campuran lebih besar dari fraksi air menyebabkan luasan udara yang menentukan pola aliran semakin besar. Perbandingan kecepatan aktual udara dan air ( $v_G/v_L$ ) pada *gas volume fraction* ( $\beta$ ) 50% terjadi penurunan yang sangat drastis sehingga terjadi pergolakan pola aliran. Hal ini terjadi karena kecepatan aktual udara ( $v_G$ ) turun drastis dan berbanding terbalik dengan *gas void fraction* ( $\alpha_G$ ) nilainya meningkat.



**Gambar 2.** Pola aliran dengan perbandingan kecepatan aktual udara dan air ( $v_G/v_L$ ) pada 1 LPM udara

Hasil visualisasi penelitian ini sama dengan penelitian dilakukan oleh Khairul Muhajir [10] menemukan bahwa semakin besar debit udara ( $Q_G$ ) yang ditambahkan maka ukuran dan bentuk pola aliran yang terjadi semakin besar. Karena perbedaan densitas cukup besar antara udara dan air menyebabkan udara selalu berada di atasnya

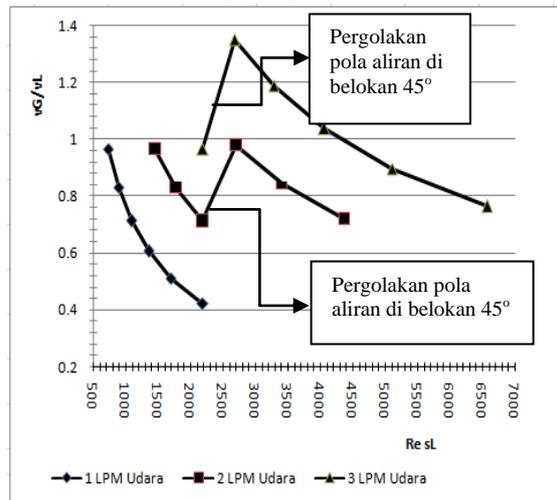
air pada aliran campuran. Bentuk pola aliran yang terjadi karena pengaruh distribusi kecepatan aliran fluida menimbulkan gaya sentrifugal sehingga terjadi aliran melingkar yang dibatasi oleh perbandingan radius dan diameter ( $R/D$ ) belokan. Gerakan melingkar aliran fluida menyebabkan terjadinya *pressure drop* ( $\Delta p$ ).



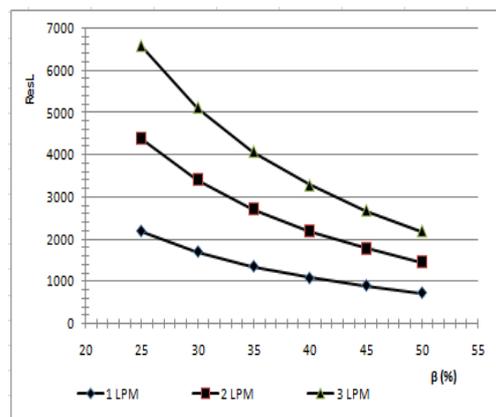
**Gambar 3.** Pola aliran dengan perbandingan kecepatan aktual udara dan air ( $v_G/v_L$ ) pada 3 LPM udara

Gambar 4 menunjukkan bahwa ketika bilangan Reynolds superficial air ( $Re_{sL}$ ) laminar perbandingan kecepatan actual udara dan air ( $v_G/v_L$ ) mengalami kenaikan stabil dan apabila bilangan Reynolds superficial air ( $Re_{sL}$ ) mengalami perubahan dari turbulen ke laminar perbandingan kecepatan actual udara dan air ( $v_G/v_L$ ) terjadi penurunan yang drastis. Kondisi ini di visualisasi aliran fluida dua fase (gambar 3f) menimbulkan pergolakan pola aliran atau gaya sentrifugal. Perubahan aliran ini juga diakibatkan oleh gaya grafitasi dari pipa vertikal, sehingga aliran bergerak ke

bawah kemudian berinteraksi dengan kecepatan aliran dari arah horizontal sehingga *pressure drop* ( $\Delta p$ ) pada kondisi ini mengalami penurunan drastis. Hal yang sama ditemukan oleh Olivera dan Barbosa [7] bahwa aliran berlawanan pada pola aliran intermitten arah ke atas sangat dipengaruhi oleh belokan dan gaya grafitasi.



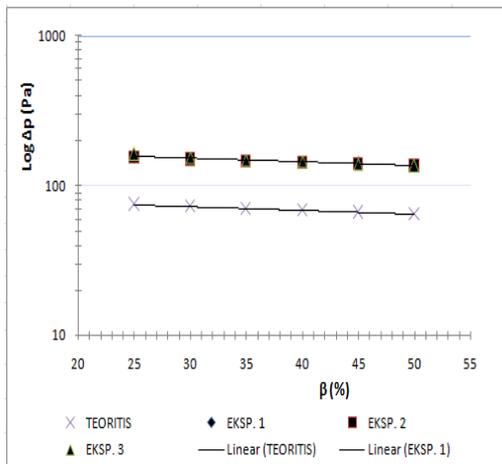
**Gambar 4.** Grafik hubungan bilangan Reynolds superficial air ( $Re_{sL}$ ) dengan perbandingan kecepatan actual udara dan air ( $v_G/v_L$ )



**Gambar 5.** Grafik hubungan bilangan Reynolds dan *gas volume fraction* ( $\beta$ )

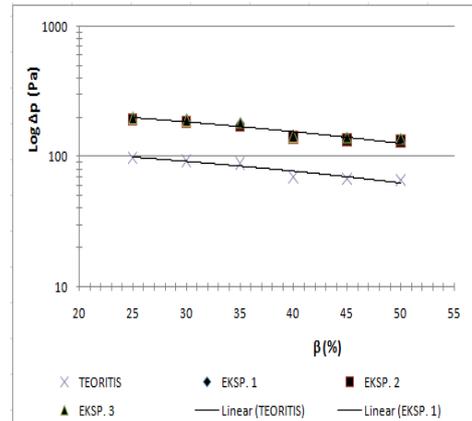
Gambar 5 menunjukkan bahwa bilangan Reynolds superficial air ( $Re_{sL}$ ) berbanding terbalik dengan *gas volume fraction* ( $\beta$ ) setiap debit aliran udara ( $Q_G$ ). semakin besar *gas volume fraction* ( $\beta$ ) pada aliran fluida dua fase (udara-air) maka semakin kecil bilangan

Reynolds superficial air ( $Re_{sL}$ ). Apabila debit udara ( $Q_G$ ) bertambah maka bilangan Reynolds superficial air ( $Re_{sL}$ ) juga akan mengalami penambahan, karena pada penelitian ini hubungan gas volume fraction ( $\beta$ ), debit aliran udara ( $Q_G$ ) dan debit aliran air ( $Q_L$ ) ditentukan persamaan (1). Adiwibowo [11] menemukan bahwa semakin besar bilangan Reynolds superficial air ( $Re_{sL}$ ) maka kualitas volumetrik gas ( $\beta$ ) semakin kecil.

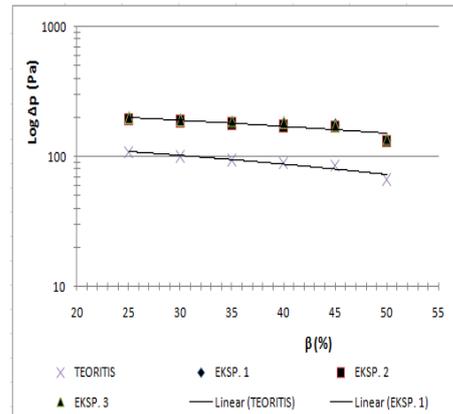


**Gambar 6.** Grafik hubungan gas volume fraction ( $\beta$ ) terhadap pressure drop ( $\Delta p$ ) pada 1 LPM udara.

Gambar 6 menunjukkan bahwa *pressure drop* ( $\Delta p$ ) semakin turun dengan bertambahnya gas volume fraction ( $\beta$ ) baik eksperimen maupun teoritis. Wiryanta [2] menemukan bahwa *pressure drop* yang terjadi akan cenderung menurun dengan bertambahnya volumetric gas quality ( $\beta$ ). Penurunan *pressure drop* sangat stabil, karena bilangan Reynolds kedua fase tidak mengalami perubahan (tetap pada kondisi laminar) sehingga parameter-parameter berpengaruh seperti *friction factor* mengalami kenaikan dengan stabil seiring dengan turunnya bilangan Reynolds superficial air ( $Re_{sL}$ ) dan pemilihan korelasi-korelasi untuk pencampuran kedua fase tetap selama tidak terjadi perubahan aliran dari laminar ke turbulen dan sebaliknya.



**Gambar 7.** Grafik hubungan gas volume fraction ( $\beta$ ) terhadap pressure drop ( $\Delta p$ ) pada 2 LPM udara



**Gambar 8.** Grafik hubungan gas volume fraction ( $\beta$ ) terhadap pressure drop ( $\Delta p$ ) pada 3 LPM udara

Gambar 7 dan 8 menunjukkan bahwa nilai *pressure drop* turun baik teoritis maupun eksperimen setiap kenaikan gas volume fraction ( $\beta$ ). Kim [4] menyimpulkan bahwa efek geometris belokan  $45^\circ$  menunjukkan penurunan tekanan dengan meningkatnya gas dan laju aliran cairan. Gambar 6 dengan gas volume fraction ( $\beta$ ) 35% ke 40%, nilai *pressure drop* secara teoritis dan eksperimental turun signifikan dibandingkan sebelumnya, stabil lagi setelah gas volume fraction ( $\beta$ ) 40%. Hal ini disebabkan bilangan Reynolds superficial air ( $Re_{sL}$ ) yang mengalami perubahan dari turbulen menjadi laminar sehingga *friction factor* turun drastis. Selain itu, pemilihan parameter untuk kejadian

ini mengalami perubahan sehingga *pressure drop multiplier gas* ( $\phi_G$ ) menjadi turun. Untuk gambar 7 terjadi pada *gas volume fraction* ( $\beta$ ) 45% ke 50%.

Secara keseluruhan grafik hubungan *pressure drop* ( $\Delta p$ ) terhadap bilangan Reynolds superfisial air ( $Re_{sL}$ ) gambar 5, 6 dan 7, menunjukkan bahwa terjadi perbedaan *pressure drop* eksperimental dan teoritis. Disebabkan karena perhitungan secara teoritis menggunakan beberapa asumsi dan tidak mempertimbangkan keadaan aktual yang terjadi di lapangan, misalnya sambungan pipa, belokan pipa dan kerugian aliran lainnya sebelum aliran fluida melewati belokan  $45^\circ$ . Pada perhitungan eksperimental, selain pembacaan distribusi tekanan pada manometer, *elevation pressure tab* ( $\Delta Z$ ) sangat mempengaruhi hasil perhitungan. Semakin besar *elevation pressure tab* ( $\Delta Z$ ) maka hasil perhitungan *pressure drop* semakin besar. Wiryanta [2] menyimpulkan bahwa besarnya *pressure drop* secara eksperimental cenderung akan lebih besar daripada *pressure drop* secara teoritis.

Perubahan bilangan Reynolds superfisial air ( $Re_{sL}$ ) dari turbulen ke laminar terjadi penurunan yang sangat signifikan baik eksperimental maupun secara teoritis. Hal ini terjadi karena *friction factor* pada aliran laminar lebih besar dari aliran turbulen. Pemilihan faktor korelasi pada masing-masing perubahan aliran juga mengalami perubahan [4].

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Semakin besar *gas volume fraction* ( $\beta$ ) disetiap debit aliran udara ( $Q_G$ ) maka bentuk dan ukuran *slug/plug flow* yang terjadi semakin besar. Hal ini berbanding terbalik dengan bilangan Reynolds superfisial air ( $v_{sL}$ ).
2. *Pressure drop* ( $\Delta p$ ) aliran dua fase melalui belokan  $45^\circ$  mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya *gas volume fraction* ( $\beta$ ).

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Widayana, G. dan T. Yuwono. 2010. *Studi Eksperimental dan Numerik Aliran Dua Fase (Air-Udara) Melewati Elbow  $30^\circ$  dri*

*Pipa Vertikal Menuju Pipa dengan Sudut Kemiringan  $60^\circ$* . Jurnal Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya

- [2] Wiryanta, I.K.E.H., T. Yuwono. 2012. *Studi Eksperimental dan Numerik Karakteristik Aliran Dua Fase Air-Udara Melewati Elbow  $75^\circ$  dari Pipa Vertikal Menuju Pipa dengan Sudut Kemiringan  $15^\circ$* . Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- [3] Zainuddin, I.M.A. Sayoga dan I.M. Nuarsa. 2012. Analisa Pengaruh Variasi Sudut Sambungan Belokan Terhadap Head Losses Aliran Pipa. *Jurnal Teknik Mesin*. Vol. 2 (2): 14-22
- [4] Kim, S., G. Kojasoy dan T. Guo. 2010. Two Phase Minor Loss in Horizontal Bubbly Flow with Elbows:  $45^\circ$  and  $90^\circ$  Elbows. *Journal of Nuclear Engineering and Design*. Vol. 240: 284-289.
- [5] Adiwibowo, P.H. 2009. *Studi Eksperimental dan Numerik Gas-Cairan Aliran Dua Fase Melewati Elbow  $45^\circ$  dari Arah Vertikal Ke Posisi Miring  $45^\circ$* . Jurnal Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- [6] Abdulkadir, M., D. Zhao, A. Azzi, I.S. Lowndes dan B.J. Azzopardi. 2012. Two Phase Air-Water Flow Through a Large Diameter Vertical. *Journal of Chemical Engineering Science*. Vol. 79: 138-152.
- [7] Oliveira, P.M. dan J.R. Barbosa. 2014. Pressure Drop and Gas Holdup in Air-Water Flow in 1800 Return Bends. *Journal of Multiphase Flow*. Vol. 61: 83-93.
- [8] Hudaya, A.Z., Indarto, dan Deendarlianto. 2013. Penentuan Sub-sub Daerah Aliran Stratified Udara-Air Pada Pipa Horizontal Menggunakan Constant Electric Current Method. *Jurnal Simetris*. Vol. 4 (1): 49-57.
- [9] Santoso, B., Indarto, Deendarlianto dan T.S. Widodo. 2012. Fluktuasi Beda Tekanan dari Pola Aliran Slug Air-Udara pada Aliran Dua Fase Searah Pipa Horizontal. *Jurnal Teknik Mesin*. 14 (2): 1-6.
- [10] Muhajir, K. 2009. Karakteristik Aliran Fluida Gas-Cair Melalui Pipa Sudden Contraction. *Jurnal Teknologi*. Vol. 2 (2): 176-184.

- [11]Adiwibowo, P.H. 2010. Eksperimental Karakteristik *Pressure Drop* pada Aliran Dua Fase Gas-Cairan Melewati Pipa Vertikal. *Jurnal Teknik Mesin*. 1 (2): 65-70.