

Pemodelan dan Verifikasi Aliran Dua Fase (Air-Udara) di Belokan 90°

Arif Yunizar Nugraha, Rudy Soenoko, Slamet Wahyudi
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: arif.yunizar.nugraha.1989@gmail.com

Abstract

Two phase flow in a piping installation is influenced by the interaction between phases, geometry and orientation (vertical or horizontal), flow direction (up or down) that may affect the flow pattern. In contrast to single phase flow which only influenced by the Reynolds number in the formula of density, viscosity and pipe diameter. So the two phase flow has an interesting phenomenon to be studied which is the result of the pressure drop to form a flow pattern. The purpose of this study are to determine the pressure drop that occurs in the 90° from the horizontal position to a vertical position, and to analyze the flow pattern of two-phase fluid (water-air) at 90° in computational simulation and visualization verified with the help of high-speed digital camera. This study used clear PVC pipe (CPVC) and acrylic (PMMA) material in the 90° curves--test section with the aim to observe the flow pattern visualization then analyzed through simulation modeling with ANSYS software and verified experimentally. The calculation of the pressure drop in the 90° curve calculated theoretically and experimentally so that research can be studied scientifically. There was relationship between the flow patterns of the amount of pressure drop in the two-phase flow curves 90° of the thickness of the interface. The bigger the thickness of the interface, the pressure drop decreases both theoretically and experimentally due to the friction between the interfaces associated with friction factor, in this case is influenced by the Reynolds number and its value is inversed so the greater proportion of the air volumetric (β) then the Reynolds water number (Re_{SL}) will decrease and increases friction between phase, besides the back pressure in the curve also affect the thickness 90° interface. There is wavy flow or turbulence in the bottom of horizontal pipe when the flow is laminar, it because of gravitation and centrifugal force or twin eddy in the actual speed ratio (v_G/v_L). The conditions influenced the flow pattern and pressure drop. The highest value of speed ratio (v_G/v_L) is 1,824 at v_{SG} 0,076 m/s and the lowest is 0,423 at v_{SG} 0,025 m/s.

Keywords: two phase flow; pressure drop; flow pattern and curves

PENDAHULUAN

Pada kehidupan sehari-hari tidak saja ditemui kasus untuk aliran *single phase* dalam sistem pemipaan, namun kenyataannya sering terjadi aliran *multiphase* (dua fase, tiga fase, atau lebih), misalnya peristiwa keluarnya air dari botol, gelombang laut, pengembunan, kavitasi pompa dan turbin [1]. Aliran *multiphase* merupakan istilah yang digunakan untuk membedakan setiap aliran yang lebih dari satu fase atau komponen, dengan mengklasifikasikan sesuai dengan keadaan fase yang berbeda berdasarkan gas-padat,

cair-padat, dan cair-gas. Aliran *multiphase* dalam saluran pemipaan dipengaruhi oleh interaksi antar fase, geometri dan orientasinya (vertikal maupun horizontal), *flow direction* (keatas atau kebawah) yang dapat mempengaruhi *flow pattern*. Berbeda dengan aliran *single phase* yang hanya dipengaruhi oleh bilangan *Reynolds* yang merupakan formula dari massa jenis, viskositas dan diameter pipa [2].

Halim [3] dalam penelitiannya melaporkan pola aliran fluida dua fase (air-udara) yang terjadi di belokan 90° yang

menyebabkan terganggunya aliran dan membentuk *flow pattern* yang berbeda-beda akibat dari perubahan geometri yang mendadak. Faktor utama pembentukan *flow pattern* yaitu proporsi volumetrik udara (β), kecepatan superfisial air (v_{SL}) dan kecepatan superfisial udara (v_{SG}) yang menentukan kondisi *slip* maupun *no slip* (*homogeneous*).

Penelitian yang dilakukan Saidj *et. al.*, [4], tentang perilaku aliran dua fase udara dan gas yang mengalir dari pipa horizontal ke pipa vertikal dengan diameter 34 mm melalui *elbow* 90° dengan perbandingan $R/D = 5$. Variasi kecepatan superfisial udara antara 0,3 sampai 4 *m/s* dan variasi kecepatan superfisial air antara 0,21 sampai 0,91 *m/s* menghasilkan pola aliran *plug*, *slug*, dan *stratified wavy* di pipa horizontal sedangkan pola aliran di posisi vertikal menghasilkan pola aliran *slug* dan *churn* pada kondisi eksperimental sehingga terjadi sedikit perubahan dari hulu ke hilir belokan pipa, sementara di kondisi lainnya menunjukkan peningkatan pada struktur frekuensi dari pipa horizontal ke vertikal serta panjang *slug* meningkat melewati tikungan vertikal.

Belokan pipa memiliki nilai *pressure drop* yang besar dibandingkan pipa lurus karena adanya perubahan geometri dan lintasan yang menyebabkan munculnya pola aliran sehingga terjadi aliran terpisah yang berdampak pada nilai *pressure drop* yang tinggi. Fokus dari penelitian ini pada *flow pattern* akibat dari perubahan geometri belokan 90° yang disebabkan dari perubahan lintasan aliran fluida dua fase yang tajam dan mendadak tersebut yang mengakibatkan nilai *pressure drop* lebih tinggi dibandingkan dengan sudut belokan lainnya dikarenakan elevasi yang menyebabkan penumpukan tekanan [5].

Dalam aliran satu fase saat fluida air melewati belokan yang menyebabkan gaya sentrifugal yang arahnya dari pusat lengkungan ke luar dinding belokan, pengaruh gaya sentrifugal menyebabkan adanya lapisan batas untuk membentuk aliran sekunder yang idealnya bergerak dalam dua pusean. Ketika belokan diposisikan secara vertikal, terjadi gaya aksi sentrifugal, gravitasi, dan daya apung keatas yang menyebabkan perilaku aliran yg rumit seperti distribusi fase

yang tidak homogen, aliran balik, aliran sekunder, dan korosi [6].

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui *pressure drop* yang terjadi di belokan 90° dari posisi horizontal ke posisi vertikal serta menganalisa *flow pattern* fluida dua fase (air-udara) di belokan 90° secara simulasi komputasi dan diverifikasi secara visualisasi dengan bantuan kamera digital *high speed* [7].

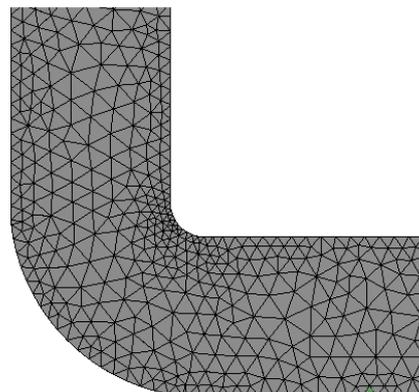
METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem (SPRS) dan Laboratorium Fenomena Dasar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dimulai dari bulan Juni sampai November 2014.

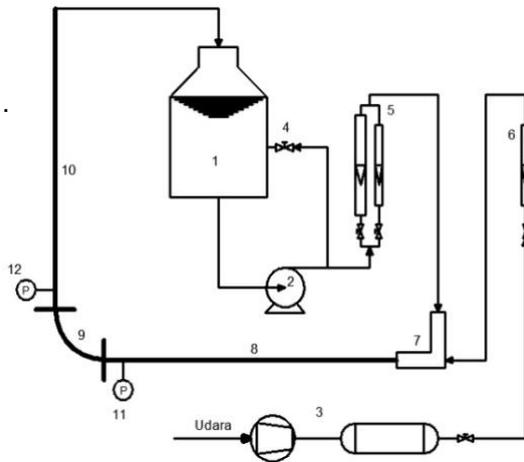
Simulasi dari komputasi dinamika fluida dilakukan dengan *software ANSYS FLUENT* 14.5 melalui pemodelan di bagian uji belokan 90° untuk melihat pengaruh proporsi volumetrik udara (β) yang diperoleh dari persamaan [2]:

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

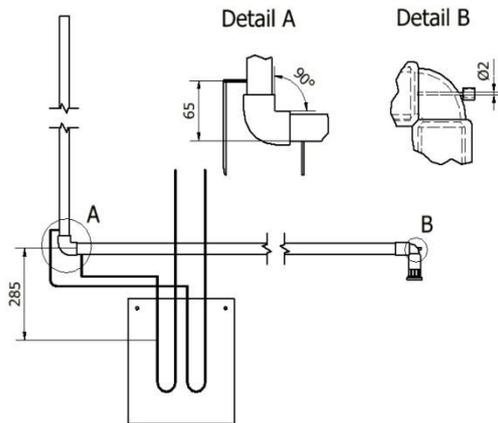
Pengaruh proporsi volumetrik udara (β) tersebut dikaitkan dengan *flow pattern* yang selanjutnya diverifikasi secara visual dari hasil foto di belokan 90° . Dalam proses simulasi pemodelan di belokan 90° , *mesh* merupakan pendiskrit dari komponen uji, penambahan kontrol di *body size* pada meshing di belokan 90° dengan memasukkan nilai 5 mm di *element size* [3].



Gambar 1. Meshing di Belokan 90°



Gambar 2. Skema Instalasi.



Gambar 3. Rangkaian Bagian Uji Belokan 90°

Gambar 2 merupakan skema instalasi penelitian dan gambar bagian uji belokan 90°. Ketika fluida air mengalir dari *hydraulics bench* (1) melalui pompa sentrifugal (2) dengan mengatur besar debit air pada *gate valve* (4) dan sesuai pada pembacaan di *flowmeter* air (5) dan mengkalibrasinya, dipastikan aliran fluida air telah mengalir dengan stabil. Mengatur debit udara dengan mengatur putaran katup pada *flowmeter* udara (6). Jika percampuran kedua fluida yang mengalir melalui *mixer* (7) sudah dipastikan stabil, maka selanjutnya adalah pengambilan data di bagian uji belokan 90° (9) dan memperhatikan *flow regimes* yang terjadi mulai dari pipa transparan horizontal (8) sampai pipa transparan vertikal (10) serta

mencatat level ketinggian pada masing-masing manometer raksa (11) dan (12) [4].

Pressure drop dihitung menggunakan Korelasi *Lockhart-Martinelli* yang terdiri dari *acceleration*, gravitasi, dan tekanan statis [9]. *Pressure drop* di belokan pipa 90° dibahas melalui perhitungan secara empiris dan secara eksperimental sehingga dapat dianalisis perbedaannya [3].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan dengan kondisi temperatur 20°C dan tekanan 1 atmosfer. Perhitungan *pressure drop* dilakukan secara empiris dan eksperimental, berikut data tetap yang telah diketahui untuk proses perhitungan *pressure drop*.

- Diameter dalam pipa (*D*) : 0,029 m
- Luas penampang pipa (*A*) : 0,00066m²
- Radius belokan 90° (*R*) : 0,02m
- Densitas udara (ρ_G) : 1,21 kg/m³
- Densitas air (ρ_L) : 998 kg/m³

- Viskositas dinamis udara (μ_G) : 0,0000818 Pa s
- Viskositas dinamis air (μ_L) : 0,001 Pa s
- Percepatan gravitasi (*g*) : 9,81 m/s²
- Elevation pressure tap* ($\Delta z_{11,12}$) : 0,065 m
- Perbandingan geometri (*R/D*) : 0,7
- P_{atm}* : 101.325 Pa
- Pipe Roughness* (*k*) : 0,0000044 m
- Koefisien losses* (*K*) : 0,4

Simulasi Pemodelan

Hukum kekekalan massa atau persamaan kontinuitas tiga dimensi untuk aliran *unsteady* di suatu titik pada fluida kompresibel ditulis dalam persamaan [2]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \tag{2}$$

Untuk fluida *inkompresible* (cairan), densitasnya adalah konstan sehingga persamaan menjadi [3]:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

Persamaan momentum untuk fluida campuran dihitung dengan menjumlahkan persamaan masing-masing momentum untuk setiap fase [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot \{ \mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T) \} + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot (\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \vec{v}_{dr.i} \vec{v}_{dr.i}) \quad (4)$$

Persamaan *Navier-Stokes* untuk fluida Newtonian digunakan untuk mengembangkan suatu metode volume hingga [8]

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \text{gradu}) + S_{Mx} \quad (5)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \text{gradv}) + S_{My} \quad (6)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \text{gradw}) + S_{Mz} \quad (7)$$

Pemodelan turbulensi yang digunakan adalah fase cairan dengan simulasi *Eulerian-Eulerian two phase flow* berupa turbulensi enegi kinetik [3].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_L \alpha_L k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_L \alpha_L v_L k) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_L (\mu_L + \frac{\mu_{Ltur}}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}) + \alpha_L (G - \alpha_L \rho_L \rho \epsilon_L) \quad (8)$$

Fase kontinu dihitung menggunakan model standar *k - ε* pada viskositas turbulen [3].

$$\mu_{Ltur} = C_\mu \rho_L \frac{k_L^2}{\epsilon_L} \quad (9)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} C_{\epsilon_1} &= 1,44 \\ C_{\epsilon_2} &= 1,92 \\ C_\mu &= 0,09 \\ \sigma_k &= 1 \\ \sigma_\epsilon &= 1,3 \end{aligned}$$

Perhitungan Empiris

Flow rate masing-masing fase

$$v_{Si} = \frac{Q_i}{A} \quad (10)$$

Mass flow rate masing-masing fase

$$\dot{m}_i = \frac{\rho_i}{Q_i} \quad (11)$$

Mass flux masing-masing fase

$$G_i = \frac{\dot{m}_i}{A} \quad (12)$$

Reynolds number (Re) masing-masing fase

$$Re_{Si} = \frac{G_i \times D}{\mu_i} \quad (13)$$

Friction factor

Untuk aliran laminer (*Re* < 2300)

$$f_i = 16/Re_{Si} \quad (14)$$

Untuk aliran turbulen (*Re* ≥ 2300)

$$f_i = \left[-1.8 \times \text{Log}_{10} \left(\left(\frac{k}{(3.7 \times D)^{1.11}} \right) + \frac{6.9}{Re} \right) \right]^{-2} \quad (15)$$

Pressure gradient akibat gesekan

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_i = \frac{2 \times f_i \times \rho_i \times v_{Si}^2}{D} \quad (16)$$

Faktor *Lockhart-Martinelli*

$$X = \left[\frac{\left(\frac{dp}{dz} \right)_L}{\left(\frac{dp}{dz} \right)_G} \right]^{1/2} \quad (17)$$

Pressure drop multiplier

Fase udara

$$\Phi_G = (1 + CX + X^2)^{1/2} \quad (18)$$

Fase air

$$\Phi_L = \left(1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \right)^{1/2} \quad (19)$$

Tabel 1. Nilai Parameter C untuk Korelasi *Lockhart Martinelli* [9]

	<i>Lockhart</i>	<i>Martinelli</i> [9]	C
Cairan		Gas	
Turbulen	Turbulen	Turbulen	20
Laminer	Laminer	Turbulen	12
Turbulen	Turbulen	Laminer	10
Laminer	Laminer	Laminer	5

Total pressure gradient

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{friction} = \Phi_L^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_L = \Phi_G^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_G \quad (20)$$

Gas Void Fraction

$$\alpha = (1 + X^{0,8})^{-0,378} \quad (21)$$

Liquid Holdup

$$\alpha_L = 1 - \alpha \tag{22}$$

Kecepatan aktual masing-masing fase

$$v_i = \frac{v_{Si}}{\alpha_i} \tag{23}$$

Densitas campuran

$$\rho_m = (\alpha \times \rho_G) + (\alpha_L \times \rho_L) \tag{24}$$

Restriction pressure

$$\Delta P_{restriction} = K \times \rho_L \frac{v_{SL}^2}{2} + K \rho_G \frac{v_{SG}^2}{2} \tag{25}$$

Friction pressure

$$\Delta P_{friction} = \left[\left(\frac{dP}{dz} \right)_{friction} \right]_{Lockhart Martinelli} \times \frac{\pi R}{2} \tag{26}$$

Static pressure

$$\Delta P_{static} = \rho_m \times g \times R \times \sin \theta \tag{27}$$

Total pressure drop elbow

$$\Delta P_{EB} = [\Delta P]_{restriction} + [\Delta P]_{friction} + [\Delta P]_{static} \tag{28}$$

Dalam penelitian aliran dua fase, kecepatan aliran sangat berpengaruh terhadap hasil penelitian sehingga perlu dibedakan antara kecepatan superfisial dengan kecepatan aktual. Kecepatan superfisial merupakan kecepatan fluida udara atau air yang mengalir dan menempati seluruh saluran pipa sedangkan kecepatan aktual merupakan kecepatan rata-rata udara dan cairan ketika mengalir pada saluran pipa yang diperoleh secara empiris [2].

Perhitungan Eksperimen

$$\Delta P_{elbow} = [\Delta z_{11,12} + (h_{11} - h_{12})] \times \rho_m \times g \tag{29}$$

Keterangan:

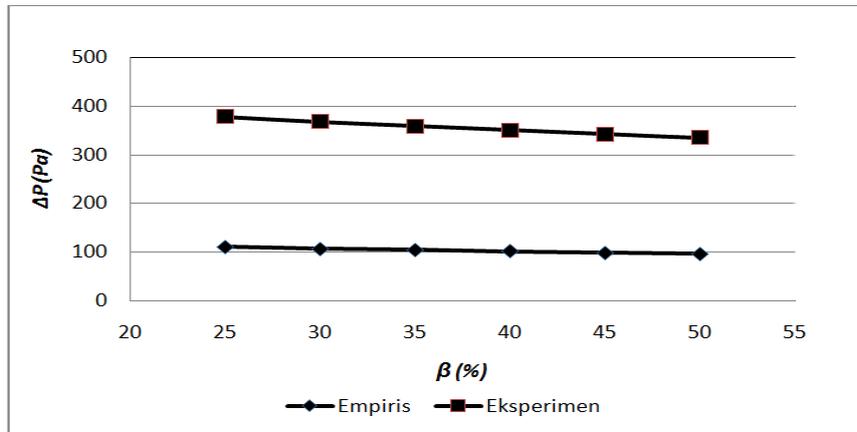
$$\Delta P_{elbow} = \text{pressure drop di belokan } (N/m^2)$$

$$\Delta z_{11,12} = \text{elevasi pressure taps (m)}$$

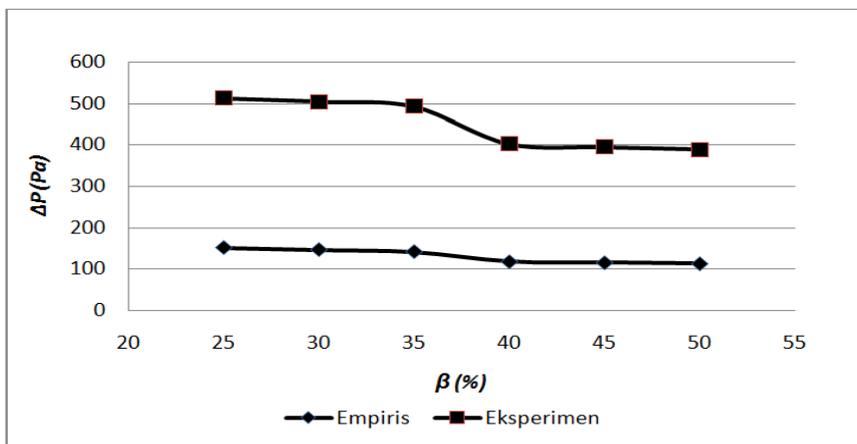
$$h = \text{level ketinggian manometer raksa (m)}$$

$$\rho_m = \text{densitas campuran } (kg/m^3)$$

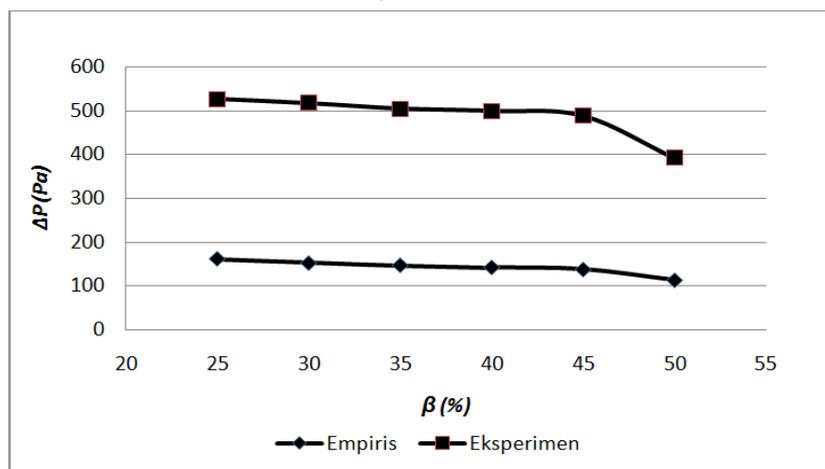
Hubungan proporsi volumetrik udara (β) terhadap *pressure drop* di belokan 90⁰ secara empiris dan eksperimen ditunjukkan pada Gambar 4, 5 dan 6 di bawah. Hasil eksperimen *pressure drop* pada Gambar 4, 5 dan 6 menunjukkan bahwa perhitungan *pressure drop* secara empiris maupun eksperimen di belokan 90⁰ kecenderungan grafiknya menurun yang mana hasil eksperimen nilainya lebih besar dibandingkan hasil perhitungan secara empiris, hal ini disebabkan karena perhitungan empiris tidak memperhatikan faktor kondisi di laboratorium yang berkenaan dengan penelitian secara eksperimen, menurunnya *pressure drop* berkaitan dengan densitas campuran (ρ_m) yang sesuai dengan persamaan (24) dan (26). Nilai densitas campuran (ρ_m) berkaitan dengan fraksi dari masing-masing fase yaitu *gas void fraction* (α) dan *liquid hold-up* (α_L) [7]. Dikarenakan densitas udara (ρ_G) yang jauh lebih kecil dibandingkan densitas air (ρ_L) maka faktor pengali dari fraksi cairan memiliki peran yang besar dibandingkan fraksi udara sehingga semakin besar proporsi volumetrik udara (β) maka *gas void fraction* (α) semakin besar dan *liquid hold-up* (α_L) menurun. Nilai fraksi-fraksi tersebut diperoleh dari perhitungan berdasarkan faktor *Lockhart-Martinelli* (X), dimana faktor *Lockhart-Martinelli* (X) merupakan perbandingan *frictional pressure gradient* fase air dengan *frictional pressure gradient* fase udara yang mana *frictional pressure gradient* dari masing-masing fase dipengaruhi oleh bilangan *Reynolds* [2] dan [10].



Gambar 4. Grafik Hubungan Proporsi Volumetrik Udara (β) terhadap *Pressure Drop* pada v_{SG} 0,025 m/s



Gambar 5. Grafik Hubungan Proporsi Volumetrik Udara (β) terhadap *Pressure Drop* pada v_{SG} 0,050 m/s



Gambar 6. Grafik Hubungan Proporsi Volumetrik Udara (β) terhadap *Pressure Drop* pada v_{SG} 0,076 m/s

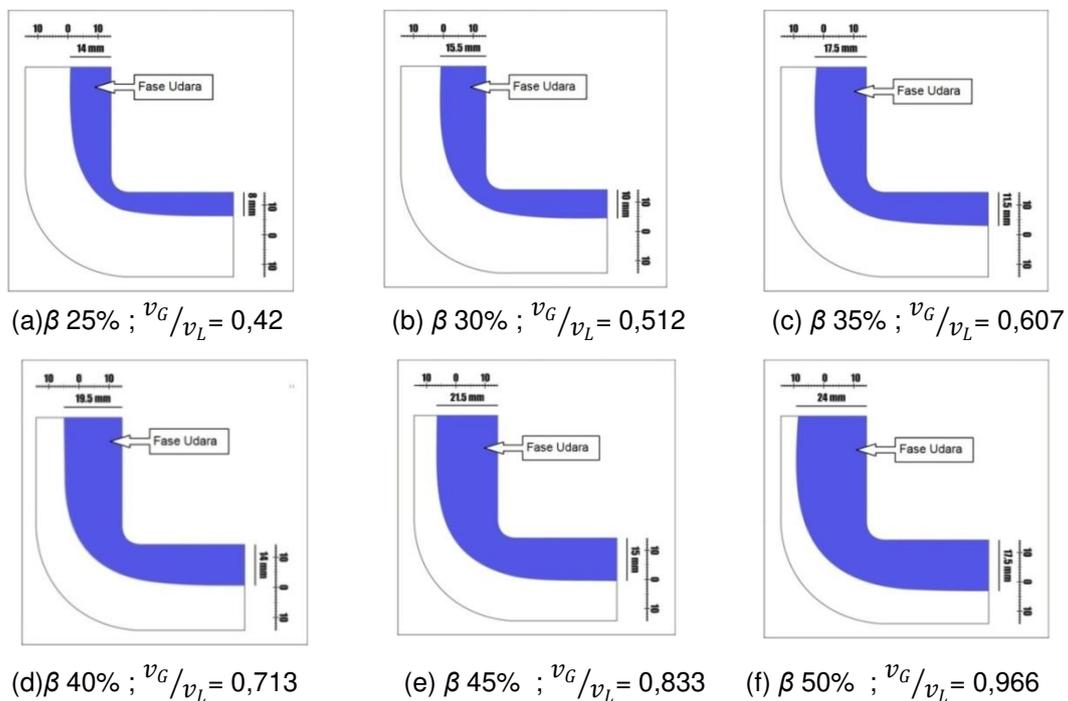
Analisa Flow Pattern Hasil simulasi KDF dan Visualisasi di Belokan 90⁰

Gambar 7, 8, 9, 10, 11 dan 12 merupakan simulasi pemodelan KDF dan hasil foto visual di belokan 90⁰. Hasil simulasi KDF menunjukkan udara mengisi sebagian dari ruang belokan 90⁰ yang ditandai dengan warna biru dan merupakan posisi udara dengan kecepatan superficial udara (v_{SG}) yang seolah-olah mengalir di dalam pipa dan

bersinggungan dengan fluida air sehingga membentuk suatu profil yang disebut juga *flow pattern*, gambar simulasi selanjutnya diverifikasi dengan foto hasil eksperimen yang menunjukkan *flow pattern slug* di belokan 90⁰. *Flow pattern slug* merupakan gelembung udara yang menyatu dan membentuk gelembung yang lebih besar yang menyentuh bagian atas permukaan pipa [3], [4] dan [7].

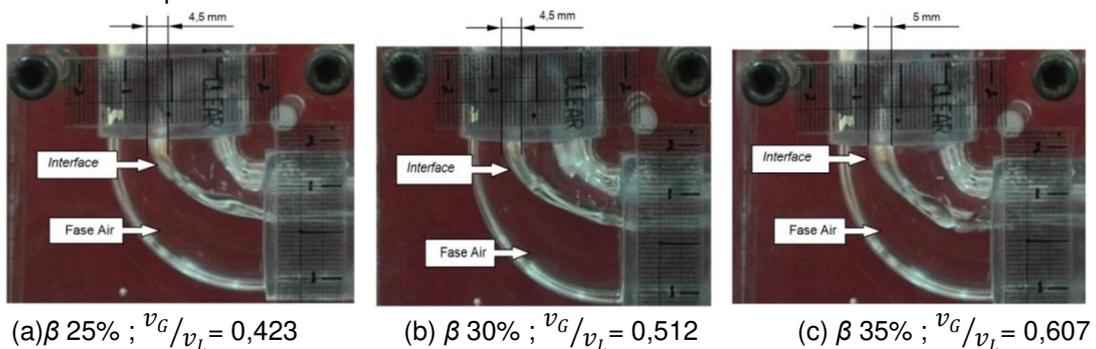
Flow Pattern pada Kecepatan Superficial Udara 0,025 m/s

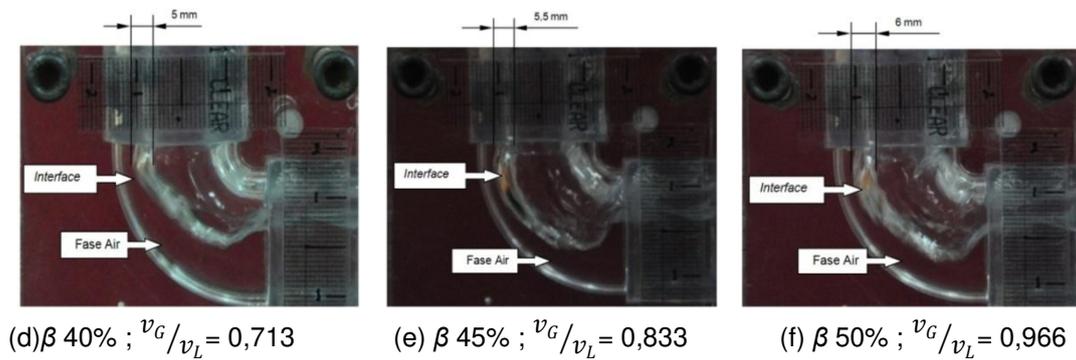
1. Hasil simulasi KDF



Gambar 7. Flow Pattern Hasil Simulasi KDF pada v_{SG} 0,025 m/s

2. Hasil foto eksperimen

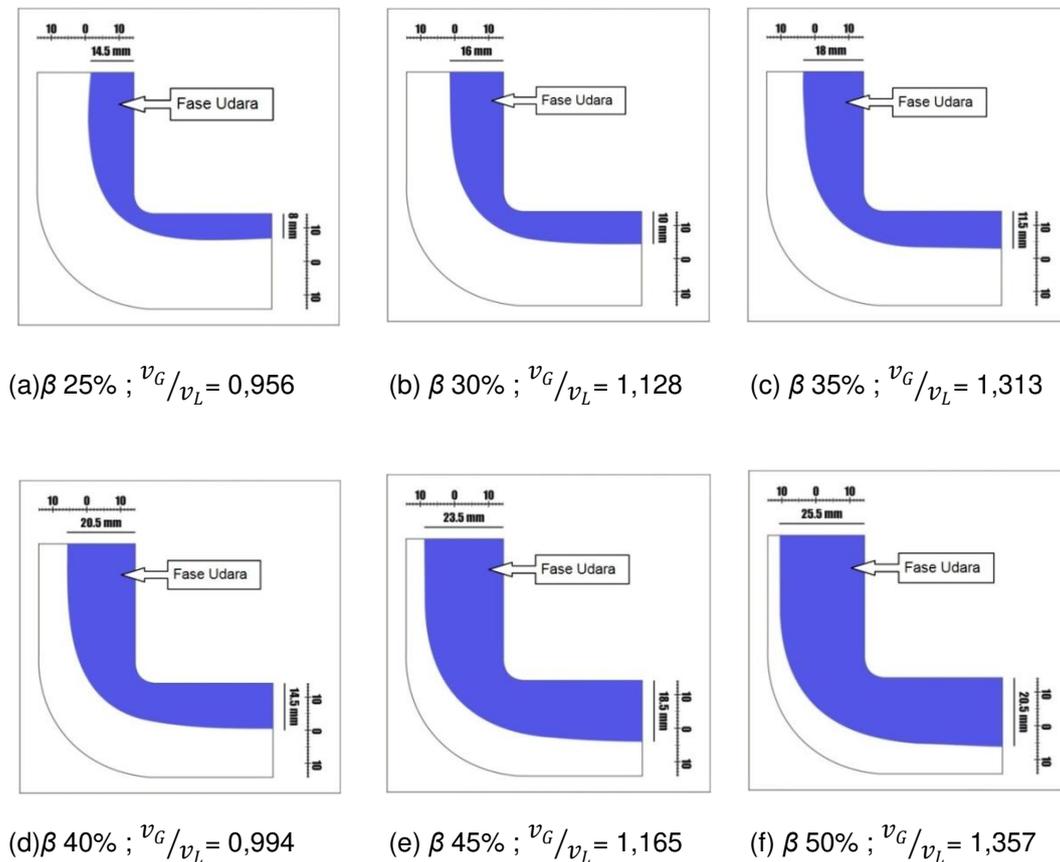




Gambar 8. Flow Pattern Hasil Eksperimen pada $v_{SG} 0,025 \text{ m/s}$

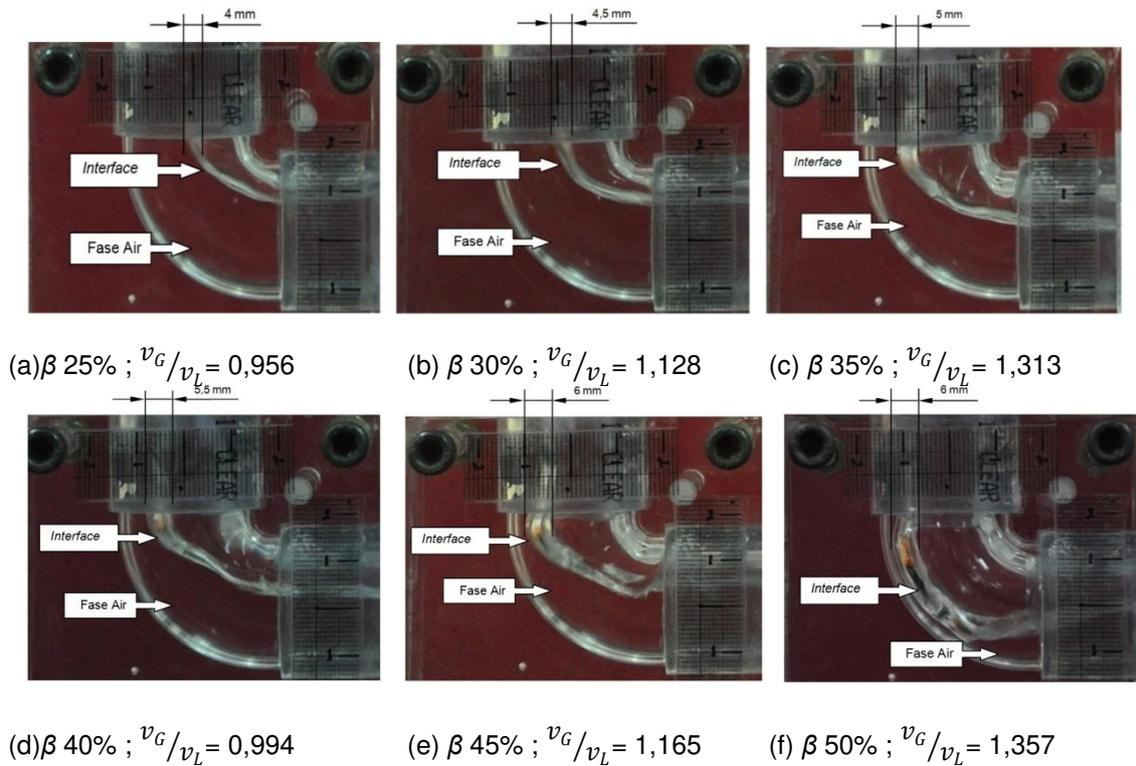
Flow Pattern pada Kecepatan Superfisial Udara 0,050 m/s

1. Hasil simulasi KDF



Gambar 9. Flow Pattern Hasil Simulasi KDF pada $v_{SG} 0,050 \text{ m/s}$

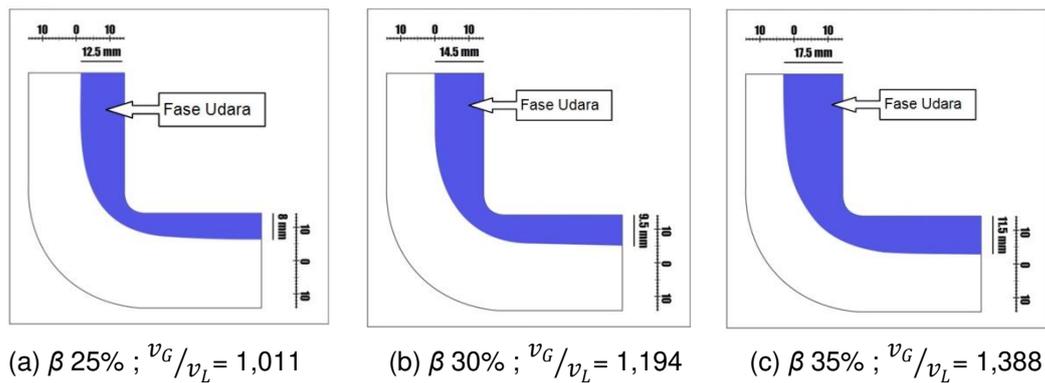
2. Hasil foto eksperimen

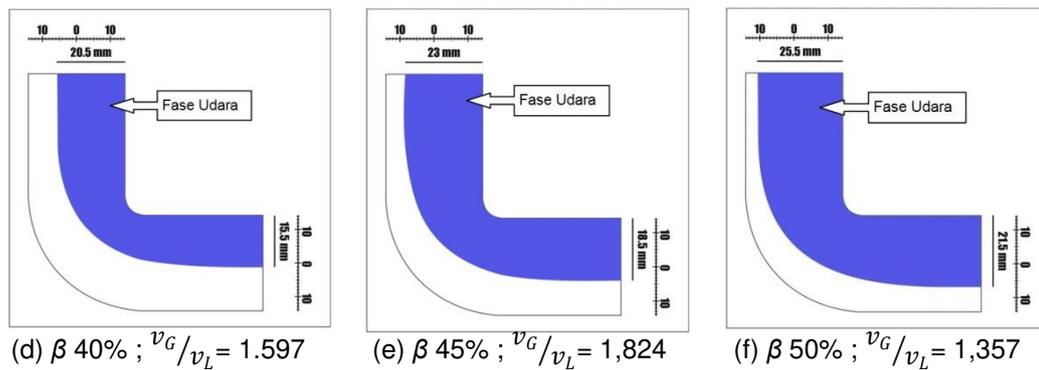


Gambar 10. Flow Pattern Hasil Eksperimen pada $v_{SG} 0,050 \text{ m/s}$

Flow Pattern pada Kecepatan Superfisial Udara $0,076 \text{ m/s}$

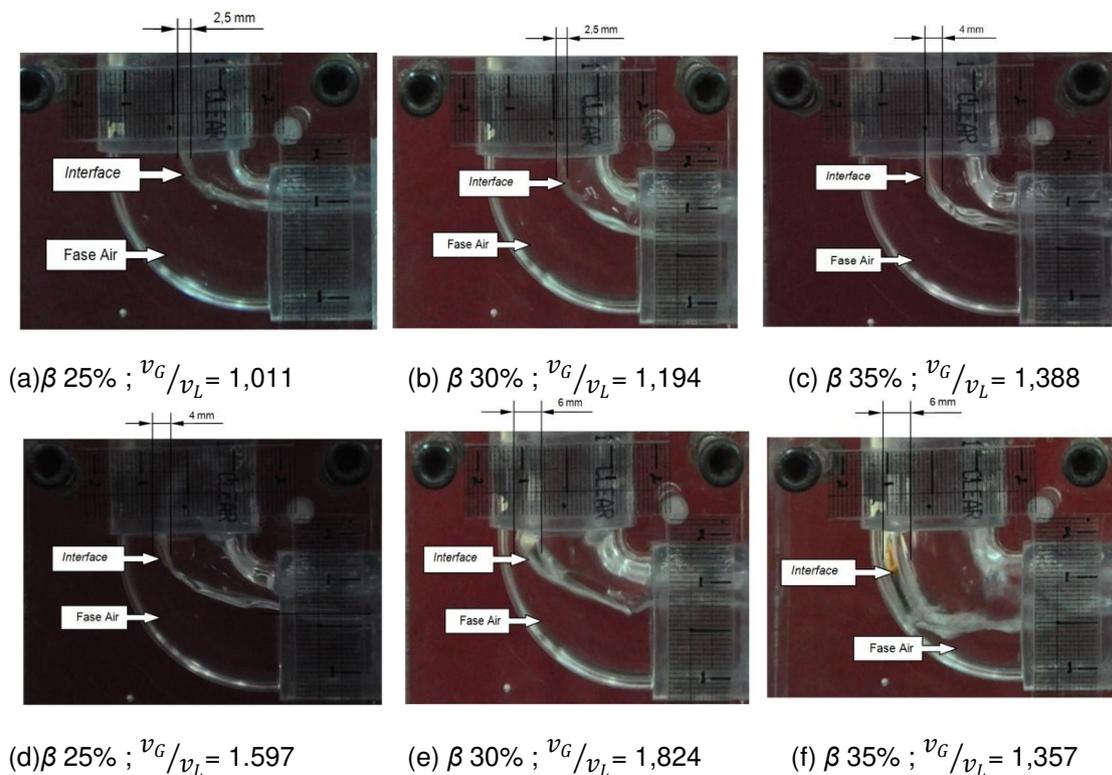
1. Hasil simulasi KDF





Gambar 11. Flow Pattern Hasil Simulasi KDF pada $v_{SG} 0,076 \text{ m/s}$

2. Hasil foto eksperimen



Gambar 12. Flow Pattern Hasil Eksperimen pada $v_{SG} 0,076 \text{ m/s}$

Gambar 7, 8, 9, 10, 11 dan 12 membahas flow pattern yang terjadi pada kecepatan superfisial udara (v_{SG}) $0,025 \text{ m/s}$, $0,050 \text{ m/s}$ dan $0,076 \text{ m/s}$ dengan memperlihatkan bahwa simulasi memberikan gambaran posisi udara yang menyentuh bagian dalam dari belokan 90° , kemudian dari simulasi tersebut diverifikasi secara

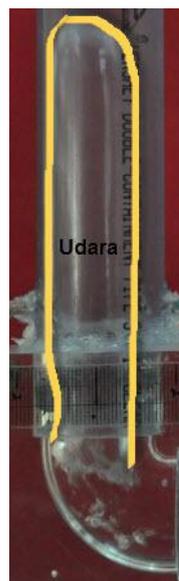
eksperimen berupa flow pattern slug yang ditampilkan pada masing-masing variasi, dari hasil simulasi dan eksperimen terlihat bahwa semakin besar proporsi volumetrik udara (β) maka bilangan Reynolds air (Re_{SL}) semakin rendah sehingga memberikan gerak udara yang lebih banyak yang berhubungan dengan

semakin berkurangnya volume air yang mengisi pipa [4].

Gambar 13 menunjukkan fenomena yang terjadi ketika fase air dan fase udara bercampur dalam komponen *mixture* adalah gelembung udara dari *nozzle* akan menyatu membentuk gelembung yang lebih besar dan menyentuh bagian atas permukaan pipa horizontal yang disebut *flow pattern slug*, kemudian terus mengalir di belokan 90° dan pipa vertikal [7].



(a) *Flow Pattern Slug* di Pipa Horizontal

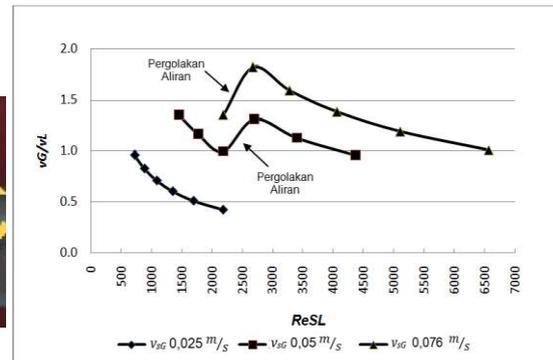


(b) *Flow Pattern Slug* di Pipa Vertikal

Gambar 13. *Flow Pattern Slug* di Pipa Lurus

Hasil penelitian secara simulasi dan eksperimen memberikan gambaran bahwa dengan semakin besar proporsi volumetrik udara (β) maka belokan didominasi oleh udara pada bagian radius terluar di belokan 90° dan juga dipengaruhi oleh gaya gravitasi yang semakin besar. Fenomena yang terjadi

di belokan 90° adalah ketika proporsi volumetrik udara (β) yang rendah, udara mengisi sebagian dari volume belokan dan posisinya berada di bagian sisi atas yang disebabkan densitas udara yang lebih ringan, namun semakin besar proporsi volumetrik udara (β) maka udara akan mengisi lebih banyak ruang di belokan 90° [3].



Gambar 14. Grafik Hubungan Bilangan Reynolds Air (Re_{SL}) terhadap *Slip ratio* Fluida (v_G/v_L)

Gambar 14 menunjukkan bahwa pada kecepatan superficial udara (v_{SG}) 0,025 m/s dengan menurunnya bilangan Reynold air (Re_{SL}) maka *slip rationya* (v_G/v_L) naik dengan stabil, namun pada kecepatan superficial udara (v_{SG}) 0,050 m/s dan 0,076 m/s terjadi perubahan aliran turbulen ke laminar pada fluida air yang menyebabkan nilai *slip ratio* menurun. Kondisi ini berpengaruh terhadap *flow pattern* yang menyebabkan timbulnya gelombang di sisi bawah pipa horizontal seperti pada Gambar 10 (c) dan 12 (e) serta berpengaruh juga menurunnya *pressure drop* yang jauh lebih besar di dibandingkan titik sebelumnya. Fenomena ini diakibatkan gaya sentrifugal dan gravitasi yang saling menekan [6] dan [12].

Berdasarkan perbandingan proporsi volumetrik udara (β) dengan geometri belokan 90° (R/D) bahwa terjadi gaya sentrifugal di belokan 90° yang menyebabkan fase udara menekan fase air di posisi dinding luar dan setelah melewati belokan 90° tersebut. Ketika proporsi volumetrik udara (β) rendah maka gaya sentrifugal yang terjadi kecil yang dikarenakan kecepatan superficial udara (v_{sg}) yang rendah sehingga udara yang terjebak

ukurannya kecil yang masih dipengaruhi oleh gaya gravitasi, dengan meningkatnya proporsi volumetrik udara (β) maka kecepatan udara meningkat sehingga volume air akan menurun yang berpengaruh terhadap gaya gravitasi yang semakin besar. Gaya sentrifugal berkaitan dengan geometri belokan karena adanya *twin eddy* sehingga berpengaruh terhadap *flow pattern slug* di belokan 90° [11], jika semakin besar geometri belokan maka gaya sentrifugalnya akan menurun [4].

Penyebab terjadinya pergolakan yang ditandai dengan meningkatnya proporsi volumetrik udara (β) dikarenakan perubahan kecepatan aliran dari kedua fluida yang mana kecepatan fluida udara meningkat dan kecepatan fluida air yang semakin pelan sehingga saat melintasi belokan 90° mengalami pergolakan akibat dari gaya sentrifugal yang besar dari arah horizontal ke vertikal dan pengaruh gaya gravitasi yang terjadi pada fluida air semakin besar. Untuk fenomena *flow pattern* tersebut, fluida air memiliki peranan yang penting dikarenakan

densitas fluida air memiliki massa yang lebih besar dibandingkan fluida udara sehingga pengaruh gravitasi yang terjadi pada fluida air [3] dan [6]. Arah dari gaya sentrifugal dan gaya gravitasi memiliki peranan penting dalam terbentuknya fenomena *flow pattern* di belokan 90° berupa terdapatnya gelombang di sisi bawah pipa horizontal saat akan melintasi belokan 90° tersebut, dikarenakan gravitasi menyebabkan aliran balik kemudian berinteraksi dengan kecepatan fluida dari arah horizontal [12].

Gambar 8, 10 dan 12 hasil foto eksperimen terlihat *interface* dengan ketebalan tertentu yang diakibatkan gesekan antar fase, ketebalan *interface* setelah melewati belokan lebih tebal dibandingkan sebelum melewati belokan, hal ini dikarenakan tekanan balik dan gaya gravitasi di belokan 90° sehingga berpengaruh terhadap gaya gesek antar fase [2], [5] dan [11]. Hasil pengukuran ketebalan udara yang melintasi belokan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Dimensi *Flow Pattern Slug* di Belokan 90° dengan $R/D = 0,7$

Proporsi Volumetrik Udara	Kecepatan Superfisial (m/s)		Gas Void Fraction	Liquid Holdup	Kecepatan Aktual (m/s)		Slip Ratio	Ketebalan Udara (mm)				Tebal Interface Maksimum (mm)	Pressure Drop (Pa)	
	v_{sG}	v_{sL}	α_G	α_L	v_G	v_L	v_G/v_L	Horizontal (dari sisi atas)		Vertikal (dari sisi kanan)			Teoritis	Eksperimen (Rata-Rata)
								Simulasi	Eksperimen	Simulasi	Eksperimen			
0.025	25	0.076	0.44	0.56	0.057	0.135	0.423	8	10.5	14	15.5	4.5	110.721	377.606
	30	0.059	0.46	0.54	0.055	0.108	0.512	10	10.5	15.5	17.5	4.5	107.296	367.439
	35	0.047	0.47	0.53	0.054	0.089	0.607	11.5	11.5	17.5	17.5	5	104.349	359.061
	40	0.038	0.48	0.52	0.052	0.073	0.713	14	12.5	19.5	20.5	5	101.580	350.908
	45	0.031	0.50	0.50	0.051	0.061	0.833	15	17.5	21.5	21	5.5	98.936	342.115
	50	0.025	0.51	0.49	0.050	0.051	0.966	17.5	17.5	24	21.5	6	96.392	335.144
0.050	25	0.151	0.26	0.74	0.195	0.204	0.956	8	5.5	14.5	13.5	4	160.102	512.681
	30	0.118	0.28	0.72	0.183	0.163	1.128	10	5.5	16	13.5	4.5	153.195	503.788
	35	0.094	0.29	0.71	0.173	0.132	1.313	11.5	10	18	17	5	147.908	492.705
	40	0.076	0.40	0.60	0.126	0.126	0.994	14.5	11	20.5	18	5.5	118.453	402.364
	45	0.062	0.41	0.59	0.122	0.105	1.165	18.5	12	23.5	20	6	115.792	394.625
	50	0.050	0.42	0.58	0.119	0.088	1.357	20.5	17.5	25.5	23	6	113.316	388.906
0.076	25	0.227	0.25	0.75	0.305	0.302	1.011	8	4.5	12.5	11	2.5	173.917	526.298
	30	0.177	0.26	0.74	0.287	0.240	1.194	9.5	9.5	14.5	13	2.5	162.738	517.800
	35	0.141	0.28	0.72	0.271	0.195	1.388	11.5	9.5	17.5	15	4	155.131	504.678
	40	0.114	0.29	0.71	0.257	0.161	1.597	15.5	10.5	20.5	19.5	4	149.358	499.022
	45	0.093	0.31	0.69	0.245	0.134	1.824	18.5	12	23	21	6	144.571	488.442
	50	0.076	0.42	0.58	0.178	0.131	1.357	21.5	14.5	25.5	23	6	113.991	392.663

Menurunnya *pressure drop* juga dipengaruhi oleh *slip ratio* (v_G/v_L), terlihat bahwa *slip ratio* (v_G/v_L) terus meningkat seiring dengan menurunnya *pressure drop*, kemudian pada kondisi tertentu *slip ratio* (v_G/v_L) menurun yang diikuti dengan

penurunan *pressure drop* yang besar dibandingkan dari titik sebelumnya. Kondisi ini terlihat juga pada pada hasil foto eksperimen yang mana mulai munculnya gelombang di sisi bagian bawah pipa horizontal, fenomena ini dikarenakan kemampuan gaya angkat dari fluida air kecil dikarenakan pengaruh gravitasi

yang besar dan gaya sentrifugal yang juga besar [4], [6] dan [12].

Berdasarkan Tabel 2 diatas dapat dijelaskan bahwa pada kecepatan superfisial udara (v_{SG}) $0,025 \text{ m/s}$ hasil eksperimen menunjukkan ketebalan udara cenderung lebih besar dibandingkan hasil simulasi, sedangkan pada kecepatan superfisial udara (v_{SG})

$0,050 \text{ m/s}$ dan $0,076 \text{ m/s}$ hasil eksperimen menunjukkan ketebalan udara lebih rendah dibandingkan hasil simulasi, perbedaan ini dikarenakan tekanan balik dari belokan dan meningkatnya kecepatan superfisial udara (v_{SG}) yang mempengaruhi ketidakstabilan ukuran *flow pattern slug* [4].

Semakin besar ketebalan *interface* maka *pressure drop* semakin menurun baik secara empiris maupun eksperimen. *Interface* berkaitan dengan gesekan antar fase yang dalam hal ini adalah efek slip jika bilangan *Reynolds* air (Re_{SL}) menurun maka slip antar fase besar [8].

Efek slip merupakan bagian dari fraksi volume yang mempengaruhi gaya sentrifugal yang mendorong fase air ke dinding luar belokan serta pengaruh elevasi dan tekanan balik di belokan 90° memberikan dampak pada gesekan antar fase dan ketebalan *interface* [12] dan [13].

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. *Flow pattern* yang terjadi di belokan 90° adalah *slug*.
2. Terdapat keterkaitan antara *flow pattern* dengan *pressure drop* yaitu semakin besar proporsi volumetrik udara (β) maka bilangan *Reynolds* air (Re_{SL}) semakin menurun sehingga memberikan udara untuk mengisi ruang belokan 90° yang menyebabkan *pressure drop* akan menurun, menurunnya *pressure drop* dipengaruhi dari fraksi masing-masing fase yang berhubungan dengan densitas campuran (ρ_m)
3. Semakin besar proporsi volumetrik udara (β) juga menyebabkan ketidakstabilan fluida air dan mempengaruhi *flow pattern* di belokan 90° , ketidakstabilan tersebut dikarenakan tekanan balik di belokan 90° .

4. Gaya sentrifugal dan gaya gravitasi di belokan 90° tersebut memberikan pengaruh terhadap gaya gesek antar fase yang saling menekan dengan munculnya *interface* dengan ketebalan tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Widayana, G. dan T. Yuwono. (2010). *Studi Eksperimental dan Numerik Aliran Dua Fase (Air-Udara) Melewati Elbow 30° dari Pipa Vertikal Menuju Pipa dengan Sudut Kemiringan 60°* . Tesis Magister Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- [2] Adiwibowo, P.H. (2009). *Studi Eksperimental dan Numerik Gas-Cairan Aliran Dua Fase Melewati Elbow 45° dari Arah Vertikal Ke Posisi Miring 45°* . Tesis Magister Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- [3] Halim, A. (2009). *Studi Eksperimental dan Numerical tentang Karakteristik Aliran Dua Fase Gas-Liquid Melewati Elbow 90° dari Arah Vertikal ke Horizontal (Studi Kasus untuk 90° Meter Bend)*. Tesis Magister Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- [4] Saidj, F., R. Kibboua, A. Azzi, N. Ababou dan B.J. Azzopardi. (2014). "Experimental Investigation of Air-Water Two-Phase Flow through Vertical 90° Bend". *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 57: 226-234.
- [5] Spedding, P.L. and E. Benard. (2007). "Gas-Liquid Two Phase Flow through a Vertical 90° Elbow Bend". *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 31: 761-769.
- [6] Azzi, A., Friedel, L. and Belaadi, S. (1999). "Two-Phase Gas/Liquid Flow Pressure Loss in Bends". *Forschung im Ingenieurwesen*. Vol. 65: 309-318.
- [7] 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.
- [8] Ghosh, S., G. Das and P.K. Das. (2011). "Simulation of Core Annular in Return Bends - A Comprehensive CFD Study". *Journal of Chemical Engineering*

- Research and Design*. Vol. 89: 2244-2253.
- [9] Kim, S., G. Kojasoy and T. Guo. (2010). "Two Phase Minor Loss in Horizontal Bubbly Flow with Elbows: 45^o and 90^o Elbows". *Journal of Nuclear Engineering and Design*. Vol. 240: 284-289.
- [10] Wiryanta, I.K.E.H., T. Yuwono. (2012). *Studi Eksperimental dan Numerik Karakteristik Aliran Dua Fase Air-Udara Melewati Elbow 75^o dari Pipa Vertikal Menuju Pipa dengan Sudut Kemiringan 15^o*. Tesis Magister Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- [11] Crawford, N., S. Spence, A. Simpson and G. Cunningham. (2009). "A Numerical Investigation of the Flow Structures and Losses for Turbulent Flow in 90^o Elbow Bends". *Journal of Process Mechanical Engineering*. 223 (1):27-44.
- [12] Gardner, G.C. and P.H. Neller. (1969). "Phase Distribution in Flow of an Air-Water Mixture Round Bends and Past Obstructions at the Wall of 76 mm Bore Tube". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Vol 184: p36.
- [13] Padilla, M., R. Revellin, J. Wallet, and J.Bonjour. (2013). "Flow Regime Visualization and Pressure Drops of HFO-1234yf, R-134a and R-410A during Downward Two-Phase Flow in Vertical Return Bends". *Journal of Heat and Fluid Flow*. Vol 40: 116-13.