

Studi Tentang Aliran Fluida Gas-Cair Melalui Pipa Horisontal Pembesaran Mendadak

Khairul Muhajir

Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri,
Institut Sains dan Teknologi AKPRIND Yogyakarta
Jl. Kalisahak 28 (Kompleks Balapan) Yogyakarta 55222
email: khairul.muhajir@ymail.com

Abstrak

Penerapan aliran dua fase dapat terjadi pada proses pendinginan di reaktor nuklir, pada proses aliran fluida dalam ketel uap, pada proses di banyak industri yang melibatkan aliran fluida bertemperatur tinggi atau aliran fluida pada lingkungan bertemperatur tinggi, bahkan sampai pada banyak proses aliran yang terjadi di industri minyak bumi dan gas serta pada industri pertambangan. Aliran dua fase adalah suatu bagian dari kajian ilmu perpindahan panas yang melibatkan aliran suatu fluida dengan disertai perubahan wujud (fase) dari fluida yang bersangkutan selama proses aliran tersebut. Namun dalam perkembangan lebih lanjut karena sifat aliran fluida yang disertai perubahan fase adalah serupa dalam perlakunya, maka aliran dua fase juga dapat dimaksudkan aliran dari dua komponen fluida yang dicampur dan mengalir bersamaan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan debit aliran fluida gas dan cairan (air) pada pipa horizontal pembesaran mendadak, dengan diameter dalam 24 mm dan 50 mm dengan panjang masing – masing 2000 mm.

Metode yang digunakan adalah eksperimental yaitu dengan fluida dua komponen dialirkannya pada pipa dengan debit udara divariasi 5 lpm, 10 lpm, 20 lpm, 30 lpm, dan debit fluida cairan divariasi 3 lpm, 6 lpm, 9 lpm. Tiap perubahan debit kemudian dicatat beda tekanannya dengan menggunakan manometer pipa U.

Hasil penelitian menunjukkan pada debit udara yang makin besar dengan debit cairan dijaga konstan adalah perubahan beda tekanan makin kecil, dan pada debit cairan makin besar dengan debit udara dijaga konstan adalah perubahan beda tekanan makin besar. Hasil penelitian ini kemudian disimulasikan menggunakan bantuan software Ansys Fluent 12.1.

Keyword : aliran fluida, gas-cair, pipa horisontal, pembesaran mendadak

Pendahuluan

Aliran dua fase adalah suatu bagian dari kajian ilmu perpindahan panas yang melibatkan aliran suatu fluida dengan disertai perubahan wujud (fase) dari fluida yang bersangkutan selama proses aliran tersebut. Namun dalam perkembangan lebih lanjut karena sifat aliran fluida yang disertai perubahan fase adalah serupa dalam perlakunya, maka aliran dua fase juga dapat dimaksudkan aliran dari dua komponen fluida yang dicampur dan mengalir bersamaan. Karena keunikan proses aliran dua fase ini beserta sifat-sifat fisis yang menyertainya, maka banyak kalangan akademisi maupun para rekayasa industri yang mencoba mengkaji aliran dua fase ini lebih jauh bahkan sampai saat ini pun, kajian keilmuan ini masih terus dikembangkan. Perkembangan dari proses aliran dua fase ini selain dari keunikan aliran dan proses fisis yang terlibat, juga didasarkan pada kegunaan dari aliran dua fase ini dalam mendukung banyak proses di industri. Dapat dicontohkan disini

penerapan aliran dua fase adalah pada proses yang terjadi di reaktor nuklir, pada proses aliran fluida di ketel uap, pada proses di banyak industri yang melibatkan aliran fluida bertemperatur tinggi atau aliran fluida pada lingkungan bertemperatur tinggi, bahkan sampai pada banyak proses aliran yang terjadi di industri minyak bumi dan gas serta pada industri pertambangan.

Berdasarkan latar belakang masalah tersebut, yang dapat dirumuskan dalam hal ini adalah penelitian mengenai hubungan beda tekanan dengan laju aliran pada saat aliran fluida dua fase gas-cair yang mengalir melalui daerah pembesaran mendadak (*sudden enlargement*).

Agar penelitian terfokus pada hal-hal yang diteliti dan dibahas maka penulis membatasinya. Adapun untuk batasan masalahnya adalah sebagai berikut :

1. Penelitian difokuskan pada pengaruh perubahan laju aliran pada penurunan tekanan aliran dua fase.
2. Fluida yang diteliti disini adalah udara (gas) dan air (cair).

3. Penurunan tekanan yang terjadi pada sistem *sudden enlargement* horisontal.

Tinjauan Pustaka

Irawan (2008) melakukan percobaan untuk menunjukkan sifat-sifat aliran. Pada aliran fluida satu fase horizontal, semakin besar prosentase kenaikan kapasitas aliran fluida pipa venturi, semakin besar pula tekanan yang dihasilkan. Jenis aliran yang terjadi pada aliran fluida dalam pipa venturi adalah jenis aliran turbulen karena bilangan Reynoldsnya lebih dari 4000, dari seluruh operasi pompa sentrifugal baik tunggal maupun paralel.

Putra (2007) dari hasil penelitiannya yang membandingkan penurunan tekanan teoritis dan penurunan hasil pengamatan aliran gas-cair melalui pipa berdiameter 32 mm. Hasilnya adalah pada kecepatan aliran air konstan sedangkan kecepatan aliran udara berubah-ubah, penurunan tekanan teoritis berkurang dengan meningkatnya kecepatan aliran udara.

Wang (2008) melakukan penelitian tentang aliran dua fase pada pipa horizontal aliran searah pada pembesaran mendadak (*sudden expansion*), berkesimpulan bahwa pola aliran seperti semburan air pada kualitas dan fluks massa yang sangat rendah dapat mengakibatkan jatuh tekanan yang besar pada aliran.

Mahmuddin (2008) dalam penelitiannya tentang aliran dua fase gas-cair pada pipa dengan pembesaran penampang mendadak menemukan bahwa makin besar debit udara penurunan tekanan makin meningkat dengan debit air yang makin semakin besar. Kualitas udara yang makin tinggi akan berakibat penurunan tekanan yang makin besar pula pada debit air yang makin besar.

Chen, Tseng dan Wang (2010) pada penelitiannya tentang aliran dua fase gas-cair melewati pembesaran mendadak pada saluran kecil menemukan bahwa adanya hubungan antara jatuh tekanan akibat gesekan dengan bilangan Bond, bilangan Froude, bilangan Weber, bilangan Reynolds.

Sihombing (2010) melakukan penelitian tentang karakteristik aliran gas-cair berlawanan arah pada pengelilan mendadak berpenampang segiempat saluran vertikal. Dari penelitiannya dapat disimpulkan bahwa penurunan tekanan akan meningkat pada saat debit udara konstan dan debit air yang semakin diperbesar.

Dwinanto (2011) pada penelitiannya tentang aliran dua fase melewati pipa horizontal sirkular menemukan bahwa pada peningkatan aliran udara lebih besar maka gerakan kantung gas semakin cepat sehingga turbulensi semakin besar pada dinding pipa bagian atas dan efek laminarisasi tetap terbentuk pada daerah dekat dinding pipa bagian bawah.

Deniz dan Eskin (2012) pada penelitiannya tentang jatuh tekanan pada aliran dua fase melalui pipa horizontal melalui pembesaran halus (*smooth expansion*) menemukan bahwa pengaruh fraksi hampa (*void fraction*) pada penurunan tekanan adalah cukup besar.

Gradien tekanan

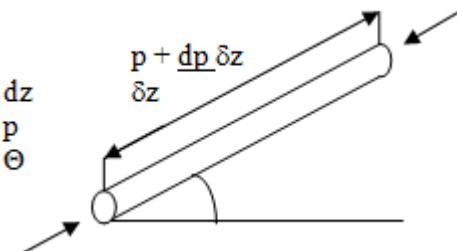
Gradien tekanan aliran dua-fase melalui suatu sistem adalah parameter yang penting dalam perancangan, baik untuk sistem adiabatik maupun sistem dengan perubahan fase seperti ketel dan kondensor. Tidak ada korelasi umum untuk penurunan tekanan aliran dua-fase yang akurat, mungkin korelasi yang ada digunakan untuk mewakili berbagai situasi fisik. Walaupun demikian, untuk menghitung penurunan tekanan diadakan pendekatan seperti aliran dianggap homogen atau terpisah.

Penurunan tekanan didefinisikan sebagai gradien tekanan $\frac{dp}{dz}$, yang diintegralkan terhadap panjang pipa L, secara umum dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{dp}{dz} = \int_0^L \frac{dp}{dz} dz \quad \dots \dots \dots (1)$$

Aliran satu- fase

Untuk memprediksi penurunan tekanan dalam sistem harus ditentukan dahulu gradien tekanan. Untuk aliran sepanjang pipa sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.berikut:



Gambar 1. Volume kontrol aliran satu fase

Persamaan perubahan momentum (untuk aliran tunak) dari Gambar 1. di atas adalah tekanan + gaya geser dinding + gravitasi.

$$-\frac{dp}{dz} \frac{\pi D^2}{4} - \tau \delta z \pi D - \frac{\pi D^2}{4} \delta z \rho g \sin \theta = \frac{d(GAU)}{dz} \delta z \quad \dots \dots \dots (2)$$

Dengan mengganti $U = \frac{G}{D}$, maka persamaan (1.) menjadi:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{\tau \delta z \pi D^2}{4} - \frac{\pi D^2 \delta z \rho g \sin \theta}{\rho} = \frac{G^2 A}{4} \quad \dots\dots(3)$$

Persamaan dibagi dengan $\frac{\delta z}{\pi D^2}$, menjadi:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{4\tau + \rho g \sin \theta}{D} + \frac{G^2 d}{dz} \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad \dots\dots(4)$$

dengan :

G = laju aliran massa total per luas total atau fluks massa total ($\text{kg/m}^2 \text{s}$).

U = kecepatan aliran (m/s).

ρ = kerapatan (kg/m^3).

dp/dz = penurunan tekanan (N/m^2).

A = luas penampang (m^2).

τ = tegangan geser dinding (N/m^2).

D = diameter pipa (m).

Penurunan tekanan total = penurunan tekanan gesekan + penurunan tekanan gravitasi + penurunan tekanan percepatan.

Jadi gradien penurunan tekanan total dapat dinyatakan sebagai penjumlahan dari 3 komponen gradien tekanan. Ketiga komponen yang berbeda tersebut timbul dari pengaruh fisik yang nyata.

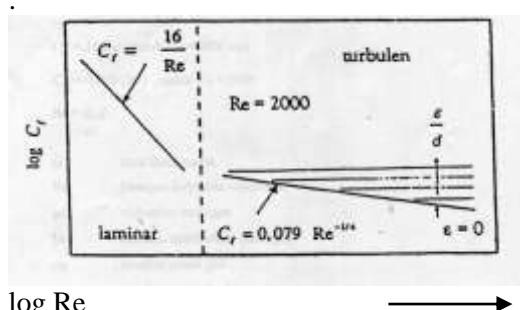
Persamaan (4.) di atas dapat digunakan untuk memprediksi penurunan tekanan dua fase yang terdiri dari gesekan dinding, gravitasi dan percepatan. Pada aliran yang tidak mengalami percepatan dan pipa pada kondisi horisontal, maka persamaan menjadi:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{4\tau}{D} \quad \dots\dots(5)$$

Dalam aliran satu-fase, τ biasanya dinyatakan berkaitan dengan faktor gesekan:

$$C_f = \frac{\tau}{0.5 \rho v^2} = \frac{\tau}{0.5 G^2 / D} \quad \dots\dots(6)$$

Besarnya C_f didapat dari gambar berikut :



Gambar 2. Faktor gesekan dalam aliran satu fase

Gambar tersebut menunjukkan hubungan antara faktor gesekan dengan bilangan Reynold, baik untuk aliran laminer maupun aliran turbulen.

$$C_f = 16/\text{Re} \quad \dots\dots(7)$$

jika $\text{Re} < 2000$

$$C_f = 0.079 \text{ Re}^{-0.25} \quad \dots\dots(8)$$

jika $\text{Re} > 2000$

Aliran dua-fase

Penurunan tekanan dua-fase sering dinyatakan dalam kaitannya dengan:

Penurunan tekanan (dua fase) = penurunan tekanan (satu-fase) x pengali (dua fase).

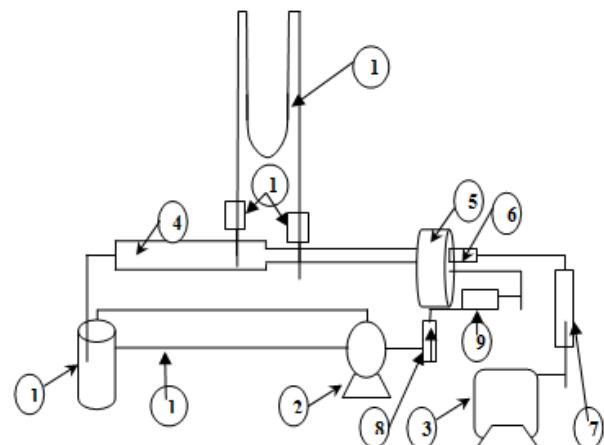
$$\left(-\frac{dp}{dz} \right)_f = \left(-\frac{dp}{dz} \right)_{lo} \cdot \phi_{lo}^2 \quad \dots\dots(9)$$

dengan : $(-dp/dz)_f$ = gradien tekanan dua fase.

$(-dp/dz)_{lo}$ = gradien tekanan satu fase.

ϕ_{lo}^2 = pengali dua fase.

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan Instalasi Percobaan



Gambar 3. Rangkaian percobaan

Keterangan :

- 1. Reservoir air
- 2. Pompa
- 3. Kompresor
- 4. Pipa acrylic sudden enlargement
- 5. Tabung pembagi air
- 6. Saluran by pass
- 7. Flowmeter udara
- 8. Flowmeter air
- 9. Tabung pencampur
- 10. Penjebak tekanan
- 11. Manometer U
- 12. Manometer U

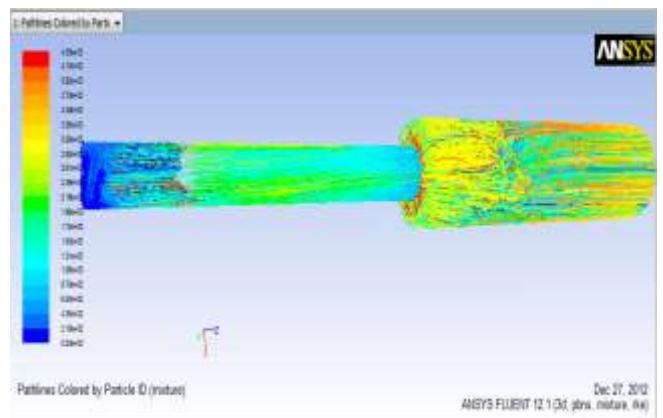
Hasil dan Pembahasan

Pada perhitungan pengaruh perubahan debit aliran terhadap beda tekanan aliran dua fase, fluida yang digunakan adalah fluida air dan fluida udara, dengan variasi debit air 3 lpm, 6 lpm, 9 lpm dan variasi debit udara 5 lpm, 10 lpm, 20 lpm, 30 lpm. Pada perhitungan yang dilakukan dalam percobaan ini, debit cairan akan dibuat

tetap (misal pada 3 lpm) dan debit udara diubah-ubah (5 lpm, 10 lpm, 20 lpm, 30 lpm).

Tabel 1. Fraksi Hampa

Q_g (lp m) $\times 10^{-5}$	Q_g (m^3/s)	V_g (m/s)	V_l (m/s)	\dot{m}_g (kg/s)	\dot{m}_l (kg/s)	$x \times 10^{-3}$
5	8,333	2,63	0,331	9,708	0,14948	0,00065
10	16,66	5,26	0,331	19,416	0,14948	0,00129
20	33,33	10,5	0,331	38,833	0,14948	0,00259
30	50	15,7	0,331	58,25	0,14948	0,00388



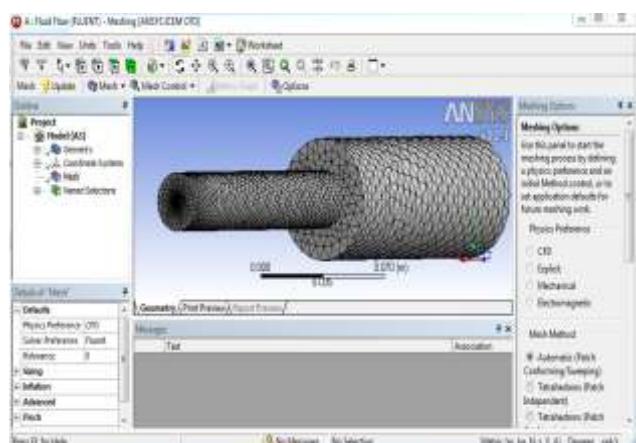
Gambar 5. Simulasi dari garis lintasan

Tabel 2. Beda Tekanan (ΔP)

α	G_g (kg/m ² .s)	G_l (kg/m ² .s)	G (kg/m ² .s)	ΔP (Pa)
0,358	1,098	211,89	212,98	12,56
0,526	3,226	156,45	159,68	9,56
0,689	8,453	102,65	111,103	7,04
0,769	14,151	76,242	90,393	6,27

Simulasi Menggunakan Software ANSYS FLUENT 12.1

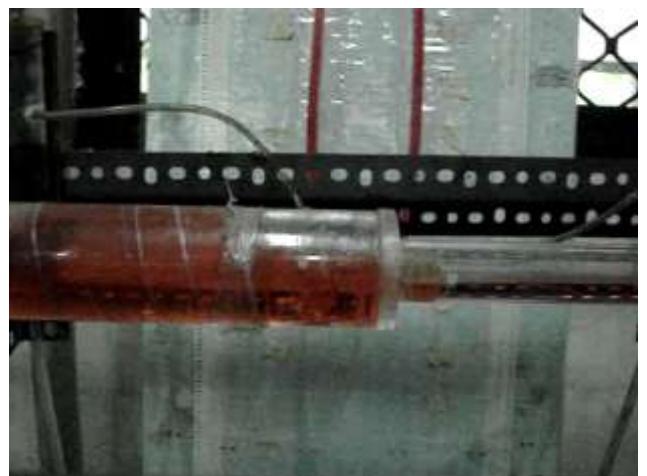
Cara simulasi aliran dua fase menggunakan *software* Ansys Fluent 12.1. Telah disimulasikan saat debit aliran fluida cair (Q_l) = 9 lpm dan debit fluida udara (Q_g) = 30 lpm. Setelah didefinisikan, kemudian kita klik kanan pada submenu *mesh* dikiri atas, dan pilih *update*. Proses *meshing* berakhir disini. Jika kita klik pada gambar 4.6 di bagian *statistic* terlihat jumlah elemen, jumlah node (simpul) yang terdapat pada *mesh* geometri.



Gambar 4. Tampilan saat *mesh*

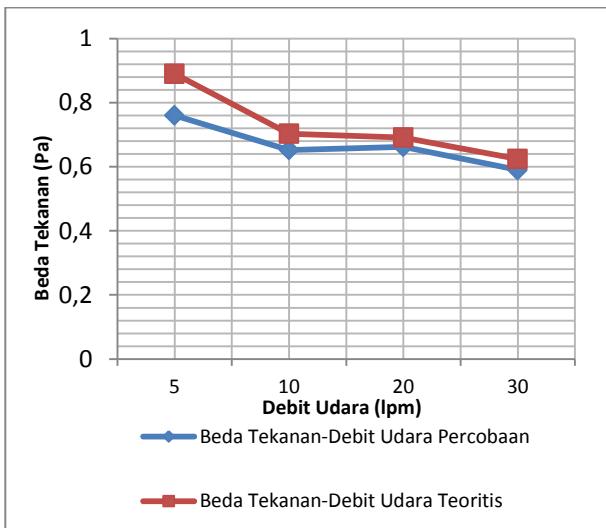
Jika kita ingin mensimulasikan garis – garis lintasan (*pathlines*) dari partikel – partikel fluida yang terlibat, maka pada gambar 2. di bawah ini disimulasikan menggunakan Ansys Fluent 12.1.

Tampak dari gambar 5. diatas bahwa pada daerah pembesaran mendadak didominasi oleh warna kuning dan sedikit merah, ini menunjukkan bahwa pada debit udara 30 lpm dan debit air 9 lpm di sekitar daerah pembesaran mendadak banyak fluida yang melewati daerah tersebut (warna kuning serta sedikit merah menunjukkan intensitas garis lintasan fluida di daerah itu besar). Hal ini dikarenakan pada daerah tersebut terjadi pola aliran *slug* (sumbat cairan) dan hasil simulasinya sesuai dengan hasil pengamatan seperti pada gambar 4. dimana jelas terjadi pola aliran *slug* (sumbat cairan).



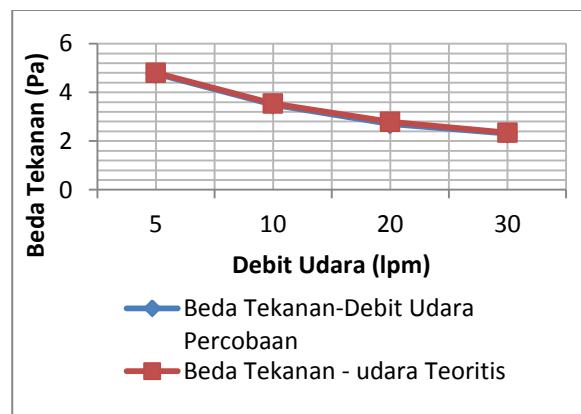
Gambar 6. Hasil pengamatan saat $Q_u = 30$ lpm, $Q_a = 9$ lpm terlihat terbentuknya pola aliran *slug* (sumbat)

Dibawah ini diberikan grafik hubungan beda tekanan dan debit untuk data-data percobaan yang didapat : untuk debit air tetap



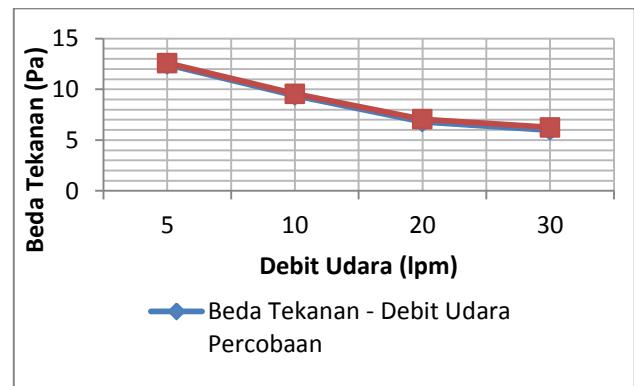
Gambar 7. Grafik Beda Tekanan terhadap Debit Udara untuk Debit air = 3 lpm (tetap)

Pada gambar 7. terlihat hubungan antara perubahan debit udara dengan perubahan beda tekanan. Terlihat jika debit udara diperbesar (dengan debit cairan dijaga konstan = 3 lpm), maka perubahan beda tekanan makin kecil. Hal ini disebabkan pada debit cairan yang dijaga tetap = 3 lpm sedangkan debit udara diperbesar maka kecepatan aliran udara meningkat sehingga energi kinetik udara akan meningkat, menurut hukum kekekalan energi peningkatan energi kinetik ini akan diimbangi dengan penurunan energi tekanan pada daerah disekitar pembesaran mendadak. Penurunan energi tekanan ini mengakibatkan perubahan beda tekanan didaerah pembesaran mendadak tersebut makin kecil. Juga dari gambar 4.24 tampak bahwa beda tekanan hasil percobaan (grafik warna biru) dibawah grafik hasil perhitungan teoritis (grafik warna merah), hal ini disebabkan karena pada hasil perhitungan teoritis digunakan asumsi model aliran homogen, yaitu dimana kedua fase tercampur dengan baik dan kecepatan kedua fase dianggap sama.



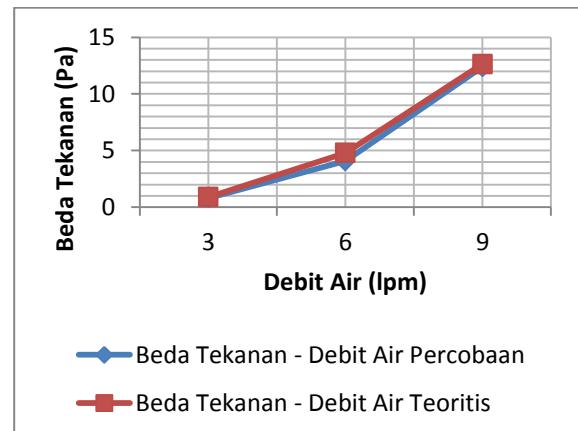
Gambar 8. Grafik Beda Tekanan terhadap Debit Udara untuk debit air = 6 lpm (tetap)

Gambar 8. diatas tampak bahwa pada debit cairan dijaga tetap 6 lpm dan debit udara diperbesar, maka perubahan beda tekanan masih tetap makin kecil. Hal ini dikarenakan pada penambahan debit udara maka energi kinetik fluida udara makin besar sehingga berdasarkan hukum kekekalan energi, penambahan energi kinetik ini harus diimbangi oleh pengurangan energi tekanan sehingga beda tekanan akan makin kecil. Nampak juga bahwa hasil percobaan ada dibawah hasil perhitungan teoritis, hal ini disebabkan adanya asumsi model aliran homogen pada perhitungan teoritis.



Gambar 9. Beda Tekanan terhadap Debit Udara untuk debit air = 9 lpm (tetap)

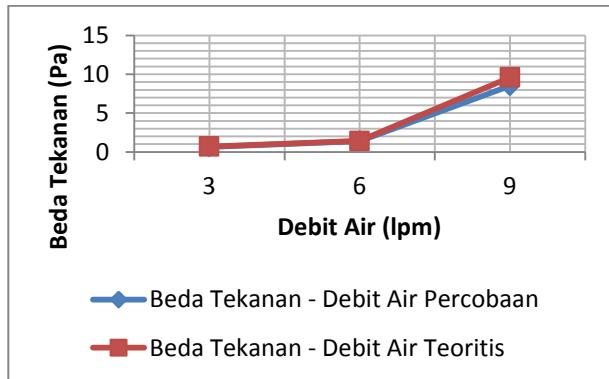
Pada gambar 9. diatas tampak bahwa penambahan debit udara dengan debit cairan dibuat tetap mengakibatkan perubahan beda tekanan makin kecil. Hal ini disebabkan bahwa bertambahnya debit udara akan menyebabkan energi kinetik udara makin besar dan menurut hukum kekekalan energi maka penambahan ini haruslah diimbangi oleh penurunan energi tekanan yang berakibat perubahan beda tekanan makin kecil. Terlihat juga bahwa hasil percobaan ada dibawah hasil perhitungan teoritis, hal ini disebabkan adanya asumsi model aliran homogen pada perhitungan teoritis.



Gambar 10. Beda Tekanan terhadap Debit Air untuk Debit udara = 5 lpm (tetap)

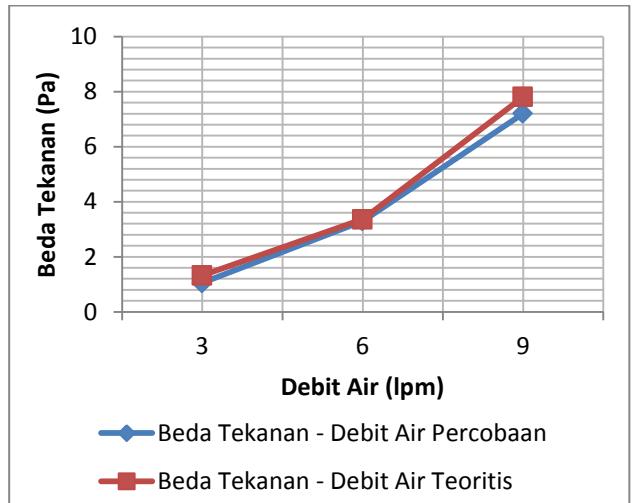
Pada gambar 10. tampak bahwa debit udara dijaga tetap 5 lpm dan debit cairan makin diperbesar maka perubahan

beda tekanan makin besar juga, hal ini disebabkan karena pada debit cairan yang makin besar (debit udara dibuat tetap) maka fluida cair akan cenderung dapat menarik fluida gas (udara) diatasnya untuk bergerak juga, hal ini sesuai dengan teori sifat dasar fluida cair yang memiliki sifat viskos yang lebih besar daripada fluida gas, otomatis menyebabkan pengaruh tegangan geser juga besar sehingga dapat menyebabkan efek tarikan pada fluida gas seperti disebutkan diatas. Akibatnya adalah perubahan beda tekanan makin besar jika debit fluida cair diperbesar dengan debit fluida gas (udara) dijaga tetap.



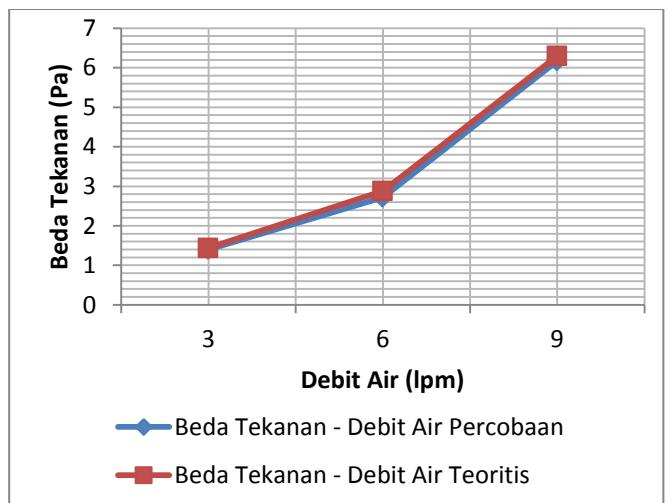
Gambar 11. Beda Tekanan terhadap Debit Air untuk Debit udara = 10 lpm (tetap)

Pada gambar 11. tampak bahwa debit udara dijaga tetap 10 lpm dan debit cairan makin diperbesar maka perubahan beda tekanan makin besar juga, hal ini disebabkan karena pada debit cairan yang makin besar (debit udara dibuat tetap) maka fluida cair akan cenderung dapat menarik fluida gas (udara) diatasnya untuk bergerak juga, hal ini sesuai dengan teori sifat dasar fluida cair yang memiliki sifat viskos yang lebih besar daripada fluida gas, otomatis menyebabkan pengaruh tegangan geser juga besar sehingga dapat menyebabkan efek tarikan pada fluida gas seperti disebutkan diatas. Akibatnya adalah perubahan beda tekanan makin besar jika debit fluida cair diperbesar dengan debit fluida gas (udara) dijaga tetap.



Gambar 12. Beda Tekanan terhadap Debit Air untuk Debit udara = 20 lpm (tetap)

Pada gambar 12. tampak bahwa debit udara dijaga tetap 20 lpm dan debit cairan makin diperbesar maka perubahan beda tekanan makin besar juga, hal ini disebabkan karena pada debit cairan yang makin besar (debit udara dibuat tetap) maka fluida cair akan cenderung dapat menarik fluida gas (udara) diatasnya untuk bergerak juga, hal ini sesuai dengan teori sifat dasar fluida cair yang memiliki sifat viskos yang lebih besar daripada fluida gas, otomatis menyebabkan pengaruh tegangan geser juga besar sehingga dapat menyebabkan efek tarikan pada fluida gas seperti disebutkan diatas. Akibatnya adalah perubahan beda tekanan makin besar jika debit fluida cair diperbesar dengan debit fluida gas (udara) dijaga tetap.



Gambar 13. Beda Tekanan terhadap Debit Air untuk Debit udara = 30 lpm (tetap)

Pada gambar 13. tampak bahwa debit udara dijaga tetap 30 lpm dan debit cairan makin diperbesar maka perubahan beda tekanan makin besar juga, hal ini disebabkan karena pada debit cairan yang makin besar (debit udara dibuat tetap) maka fluida cair akan

cenderung dapat menarik fluida gas (udara) diatasnya untuk bergerak juga, hal ini sesuai dengan teori sifat dasar fluida cair yang memiliki sifat viskos yang lebih besar daripada fluida gas, otomatis menyebabkan pengaruh tegangan geser juga besar sehingga dapat menyebabkan efek tarikan pada fluida gas seperti disebutkan diatas. Akibatnya adalah perubahan beda tekanan makin besar jika debit fluida cair diperbesar dengan debit fluida gas (udara) dijaga tetap.

Kesimpulan

Dari hasil penelitian studi pengaruh debit aliran dua fase terhadap beda tekanan pada aliran horizontal yang melalui *sudden enlargement* dapat disimpulkan :

1. Bila debit fluida gas (udara) diperbesar (debit fluida cair dijaga konstan), maka perubahan beda tekanan pada kedua pipa *sudden enlargement* makin kecil. Hal ini sebagai akibat dari hukum kekekalan energi dimana kenaikan energi kinetik fluida gas diimbangi oleh penurunan pada energi tekan, sehingga perubahan beda tekanan menurun. Jika debit fluida cair diperbesar (debit fluida gas dijaga konstan), maka perubahan beda tekanan pada kedua pipa *sudden enlargement* makin besar. Hal ini dikarenakan sifat fluida cair yang lebih viskos daripada fluida gas dapat mengakibatkan efek tarikan pada fluida gas sehingga perubahan beda tekanan meningkat.
2. Beda tekanan pada hasil percobaan sedikit lebih kecil dibandingkan dengan beda tekanan pada hasil perhitungan (teoritis). Hal ini sebagai akibat adanya asumsi penyederhanaan pada persamaan teoritis yang digunakan.
3. Jika kualitas (x) dan fraksi hampa (α) diperbesar, maka beda tekanan makin berkurang. Hal ini disebabkan jumlah fluida gas yang lebih dominan justru akan berakibat pada penurunan energi tekan yang menyertai kenaikan pada energi kinetik fluida gas.

Daftar Pustaka

Ansys, Inc., 2009, "Ansys 12.1 in Workbench User's Guide", Ansys, Inc.

Chen, Youn Ing., Tseng, Chih-Yung., Wang, Chi-Chuan., 2010, "Two-Phase Flow Pressure

Change Across Sudden Expansion In Small Channels", 7th International Conference On Multiphase Flow ICMF, Tampa, FLUSA, 30 May - 4 June, hlm 1 – 6.

Collier, John G., 1981, *Convective Boiling And Condensation*, 2nd edition, McGraw-Hill Book Company, UK.

Eskin, Nurdil., Deniz, Emrah., 2012, "Pressure Drop Of Two – Phase Flow Through Horizontal Channel With Smooth Expansion", *International Refrigeration And Air Conditioning Conference.*, Purdue, 16 – 19 July, hlm 1 – 10.

Fox, Robert W., McDonald, Alan T., Pritchard, Philip J., 2004, *Introduction To Fluid Mechanics*, 6th edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

Irawan, Didik., 2008, Studi Eksperimental Pengaruh Kapasitas Aliran Fluida Terhadap Beda Tekanan Melalui Pipa Venturi Pada Operasi Pompa Sentrifugal, *Tugas Akhir Teknik Mesin*, IST AKPRIND, Yogyakarta.

Koestoyer, Raldi A., & Proborini, S., 1994, *Aliran Dua Fase dan Fluks Kalor Kritis*, Pradnya Paramita, Jakarta.

Mahmuddin., 2008, "Karakteristik Penurunan Tekanan Aliran Dua Fase Dalam Pipa Dengan Pembesaran Penampang Tiba – Tiba", *Teknologi.*, Vol. 7, hlm 203 – 209.

Mujahir, K., 2009, "Karakterisasi Aliran Fluida Gas – Cair Melalui Pipa Sudden Contraction", *Jurnal Teknologi.*, Vol. 2 No. 2, hlm 176 – 184.

Munson, Bruce R., Young, Donald F. & Okiishi, Theodore H., 2003.a, *Mekanika Fluida*, Jilid 1, Edisi ke 4, Alih Bahasa: Harinaldi & Budiarso, Erlangga, Jakarta.

Munson, Bruce R., Young, Donald F. & Okiishi, Theodore H., 2003.b, *Mekanika Fluida*, Jilid 2, Edisi ke 4, Alih Bahasa: Harinaldi & Budiarso, Erlangga, Jakarta.

Putra, Riki A., 2007, Karakteristik Aliran Gas-Cair Searah Ke Atas pada Pipa Vertikal Berdiameter Dalam 32 mm, *Skripsi Teknik Mesin*, IST AKPRIND, Yogyakarta.

Sihombing., 2010, Karakteristik Aliran Gas-Cair Berlawanan Arah pada Pengecilan Mendadak Berpenampang Segiempat Saluran Vertikal, *Jurnal Teknik Mesin*

Streeter, Victor L., & Wyle E.B., 1992, *Mekanika Fluida*, Jilid 1, Edisi Delapan, Alih Bahasa: Arko Prijono, Erlangga, Jakarta.

Tuakia, Firman., 2008, *Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*, Informatika, Bandung.

Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995, *An Introduction To Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*, Longman Group Ltd., England.

White, Frank M., 1979, *Mekanika Fluida*, Terjemahan oleh Liek Wilardjo, Ph.D, 1986, Penerbit Erlangga, Jakarta.