

Pemantauan Rerugi Energi Aliran Dua Fase Dara Pada Saluran Pipa Horisontal

Suwidodo

Jurusan Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Bandung

E-mail: suwi.dodo @ yahoo.co.id

Abstrak

Sistem transportasi fluida melalui saluran pipa tidak lepas dari fenomena aliran multi fase. Aliran tersebut cenderung menunjukkan tekanan lokal berfluktuasi, distribusi kecepatan tidak sama atau terjadi slip antar fase pada pola aliran tertentu. Hasil eksperimen aliran dua fase air-udara melalui saluran pipa acrylic dapat menggambarkan keadaan tersebut. Dengan transduser selisih tekanan, fluktuasi tekanan pada saluran pipa aliran dua fase air-udara, yang diberikan gangguan slot atau lubang persegi panjang 12 X 2 [mm] pada dinding saluran pipa horizontal direkam. Dan selanjutnya besaran fisik dikonversi ke besaran elektrik disimpan pada osiloskop penyimpan digital (DSO) dan dipantau pada layar komputer digital. Pola aliran yang diamati adalah aliran strata(stratified), kantung (plug) dan aliran sumbat (slug). Pembahasan dengan pendekatan (korelasi) model aliran homogen dan model aliran terpisah. Disajikan dalam bentuk diagram /gambar. Diagram tersebut memberikan gambaran bahwa semakin tinggi laju aliran fluida, maka penurunan tekanan (pressure drop)-nya atau rerugi energi juga bertambah besar. Rerugi energi dan massa karena bocor dihitung berdasarkan keseimbangan energi dan massa secara menyeluruh.

Kata kunci : aliran dua-fase,air-udara, rerugi energy.

Abstract

The fluid transportation system through a pipeline are local pressure which tends to fluctuate, the distribution is not the same speed or slip between phases at a specific flow pattern. Results experiment two phase of air-water through a pipeline are guide information for that condition. With use difference pressure transducer, that difference fluctuates pressure two phase flow of air-water in pipeline, give an obstacle leaks hole rectangular slot of 12 x12 [mm] at wall pipeline. For event physical quantity is converted into electrical magnitude (volt) by the ADC , the information discrete pulse (oscillations) discrete read, recorded and stored on DSO or digital computer. On that experiment to observation stratified flow, plug flow ,and slug flow pattern. Resultan discussion of experimental with using homogeneous flow model and separate flow model. Performance of resultan for discussion in table form, diagram form. That diagram can be give information of higher rate of fluid flow, the pressure drop or energy losses was also getting bigger. Energi and mass losses leak effect a calculating use overall energy and mass balance.

Key words: two-phase flow, water-air, energy losses.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem transportasi fluida melalui saluran pipa tidak lepas dari fenomena aliran multi fase. Aliran tersebut cenderung menunjukkan tekanan lokal berfluktuasi, distribusi kecepatan tidak sama atau terjadi slip antar fase pada pola aliran tertentu. Dampak dari hal tersebut, menyebabkan saluran pipa akan bocor , retak bahkan pecah pada lokasi tertentu. Jika hal tersebut terjadi tidak hanya menyebabkan kerugian produk tetapi juga kerusakan lingkungan yang serius.

Satu di antara penyebab pecahnya saluran pipa

adalah perubahan tekanan yang tiba-tiba. Kecenderungan tekanan lokal berfluktuasi dan terjadinya slip antar fase pada pola aliran tertentu, diperlukan suatu kaji eksperimen yang berkenaan dengan perubahan fluktuasi tekanan dalam kaitannya dengan gangguan bocor pada lokasi tertentu. Melalui media ini akan dibahas tentang Rerugi energi dan massa karena bocor dihitung berdasarkan keseimbangan energi dan massa secara menyeluruh, korelasi fluktuasi beda tekanan pada saluran pipa aliran dua fase air-udara dengan diberikan gangguan slot atau lubang persegi panjang 12 X 2 [mm] pada dinding saluran pipa horisontal . Pola aliran yang diamati adalah aliran strata(stratified), kantung (plug) dan aliran sumbat (slug).Pembahasan dengan

pendekatan (korelasi) model aliran homogen dan model aliran terpisah.

1.2 Tujuan

Secara umum penelitian bertujuan membangun metode deteksi kebocoran saluran pipa aliran dua fase. Sasaran utama dari eksperimen ini adalah untuk mengetahui rugi-rugi energi dan massa karena bocor, dihitung berdasarkan keseimbangan energi dan massa secara menyeluruh.

1.3 Manfaat Penelitian

Dengan diketahuinya rugi-rugi energi dan massa karena bocor dihitung berdasarkan keseimbangan energi dan massa secara menyeluruh adalah merupakan informasi besaran fluktuasi selisih tekanan pada sekitar lokasi gangguan bocor, maka dapat digunakan untuk menentukan sikap dan tindaklanjutnya. Misalnya, tindak pengamanan sistem perpipaan dari dampak fluktuasi tekanan dengan metoda monitoring secara periodik Hal ini dapat diaplikasikan pada industri kimia, perminyakan, sistem refrigerasi, sistem pembangkit uap, dan sistem tenaga nuklir. Pada sistem tersebut banyak ditemukan aliran dua-fase. Metoda monitoring fluktuasi tekanan dapat juga digunakan pada bidang perawatan untuk mencegah dan menanggulangi terjadinya kebocoran fluida berbahaya.

1.4. Review Penelitian Terdahulu

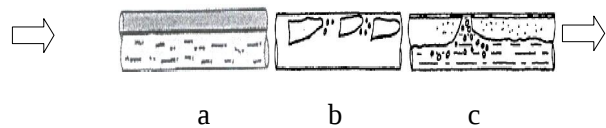
Lin dan Hanraty (1987), Speeding dan Spence (1993), Wang Wenran (1995), Ferreira (1997), Lamari (2001), Sun dan Zheng (2008). Dari hasil penelitiannya dijelaskan bahwa pola aliran yang terbentuk oleh adanya peningkatan laju aliran gas, akan timbul fluktuasi tekanan bergelombang.

Billman dan Inermann (1987), Baghdadi dan Mansy (1987), Rajtar dan Muthiah (1997), Macias dan Pereira (2003), Scott (2003) dan Seung (2009), Kebocoran akan menyebabkan penyimpangan pengukuran tekanan dari kondisi normal. Penyimpangan tekanan dideteksi dan dianalisis menggunakan metoda deteksi kebocoran masing-masing berurutan, simulasi dan eksperimen model matematika dinamik, verifikasi temuan teoritik secara eksperimen lubang bocor berbentuk lingkaran dan persegi panjang, intensitas suara, analisa statistik dan perhitungan numerik melalui distribusi tekanan.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Pola Aliran

Pada aliran dua fase cair dan gas melalui saluran pipa horizontal, pola aliran yang sering dijumpai adalah aliran gelembung (*bubble*), aliran kantung (*plug*), aliran strata (*stratified*), aliran gelombang (*wavy*), aliran sumbat (*slug*), aliran cincin (*annular*) dan aliran *spray*. Pola aliran slug terjadi bila gelombang amplitudonya meningkat, sehingga mencapai bagian atas dari saluran pipa mendatar lihat gambar 1c, sedangkan pola aliran strata terbentuk jika terjadi pemisahan fase cairan dan fase gas, cairan mengalir di bagian bawah dan gas mengalir di bagian atas dalam saluran horizontal (Gambar 1 a). Pola aliran gabungan gelembung akan membentuk kantung gas yang bergerak di bagian atas dalam saluran (Gambar 1b).



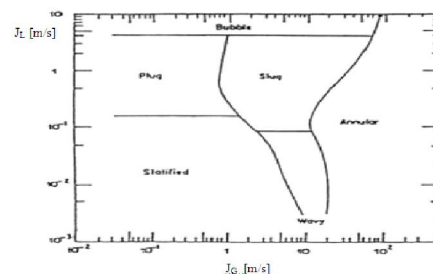
Gambar 1 Pola aliran Strata, Plug, Slug

Gambar 1. a = aliran strata, b = aliran kantung, c = pola aliran slug (sumbat), amplitudonya besar^[6]

2.2 Peta Pola Aliran (Flow Pattern Map)

Data yang dikumpulkan dari pengamatan pola aliran dapat dinyatakan dalam peta pola aliran (*flow pattern map*). Peta pola aliran ini digunakan untuk menentukan pola aliran yang terjadi berdasarkan pada kondisi yang diberikan. Peta untuk aliran searah horizontal yang biasa digunakan adalah peta Baker (Delhaye dkk., 1981).

Madhane dkk, 1974 (dalam Delhaye dkk., 1981) juga membuat peta dengan koordinat adalah kecepatan superfisial cairan (J_L) dan kecepatan superfisial gas (J_G) dalam [m/s]



Gambar 2. Peta Madhane dkk (1974) untuk aliran searah pada pipa horizontal (Delhaye dkk., 1981)^[9]

2.3 Tekanan

Dalam statika fluida, tekanan secara mekanika didefinisikan sebagai gaya yang bekerja tegak lurus pada satuan luas permukaan atau

$$p = F/A \quad (1)$$

Definisi tekanan ini bersama-sama dengan tiga sifat tekanan yaitu: Di dalam suatu fluida yang diam (statis), besarnya tekanan bergantung kepada posisi kedalaman/ketinggian. Tetapi pada posisi tertentu besarnya tekanan tidak bergantung kepada arah. Perubahan tekanan terhadap kedalaman/ketinggian dinyatakan dengan

$$dp = \gamma dh \quad \gamma = \rho \quad (2)$$

Tekanan tidak dipengaruhi oleh bentuk wadah dari fluida. Oleh karena itu bentuk transduser tekanan tidak mempengaruhi hasil pengukuran. Tekanan yang diberikan kepada suatu fluida dalam wadah melalui suatu permukaan yang dapat bergerak akan diteruskan oleh fluida tersebut ke seluruh permukaan batas. Teori kinetika gas menganggap tekanan pada suatu dinding wadah disebabkan oleh adanya tumbukan molekul - molekul pada dinding tersebut. Oleh sebab itu, menurut teori kinetika tekanan sama dengan kinetik energi molekul per satuan volume atau

$$p = \frac{2 KE}{3 V} = \frac{1}{3} \rho c^2 = NRT \quad (3)$$

Penurunan tekanan (pressure drop)

Penurunan tekanan didefinisikan sebagai gradien tekanan dp/dz yang diintegrasikan terhadap panjang tabung (pipa), L .

$$p = \int (dp/dz) \cdot Dz \quad (4)$$

Gradien tekanan dua-fase sering dinyatakan dalam kaitannya dengan pengali dua-fase diberi symbol ϕ_{lo}^2

ϕ_{lo}^2

Gradien tekanan dua-fase = gradient tekanan satu-fase X pengali dua -fase ϕ_{lo}^2

Penurunan tekanan total

$$(-p)_F = \left(-\frac{dp}{dz} \right)_{lo} \frac{L}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \phi_{lo}^2 dx \quad (5)$$

Perubahan tekanan yang terjadi pada aliran dua-fase melalui sistem merupakan parameter penting dalam penelitian. Tidak ada korelasi umum untuk penurunan tekanan aliran dua-fase yang akurat. Untuk menghitung penurunan tekanan diadakan

pendekatan. Misalnya aliran dianggap homogen (*homogeneous*) atau terpisah (*separated*).

Aliran Homogen

Aliran homogen adalah model khusus dari aliran dua-fase. Dalam model ini diasumsikan bahwa kedua fase tercampur dengan baik dan mengalir dengan kecepatan yang sama $U_g = U_l$. Dari persamaan kontinuitas didapat kesetimbangan massa untuk tiap fase. [6-p.35]

$$\text{Gas : } A \cdot G_g = A \cdot G \cdot x = \rho_g \cdot U_g \cdot A_g = \rho_g \cdot U_g \cdot \alpha \cdot A \quad (6)$$

$$\text{Likuid : } A \cdot G_l = A \cdot G \cdot (1-x) = \rho_l \cdot U_l \cdot A_l = \rho_l \cdot U_l \cdot (1-\alpha) \cdot A \quad (7)$$

Model aliran homogen kecepatan aliran tiap fase

$$U_g = U_l. \text{ Fraksi hampa : } \alpha = \frac{1}{1 + \left[\frac{(1-x)\rho_g}{x\rho_l} \right]}$$


(8) densitas homogeny

(9) Viskositas homogeny

$$\mu_h = \frac{\mu_g \mu_l}{x(\mu_l - \mu_g) + \mu_g} \quad (10)$$

Model aliran terpisah

Model aliran terpisah, fase-fase secara fisik mengalir terpisah dengan kecepatan berbeda $U_g > U_l$, U_g/U_l disebut rasio slip $S > 1$, dan fraksi hampa α .

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_g(1-x)\rho_g}{u_l \cdot \rho_l} \right)} \quad (11)$$

Metoda mengenai aliran terpisah ini telah dilaporkan secara mendalam oleh Chisholm (1983). Dengan menggunakan control volume :

$$\begin{aligned} \text{Gaya tekan} + \text{gaya geser dinding} + \text{gaya gravitasi} &= \text{perubahan momentum/waktu, atau} \\ -\frac{dp}{dz} \frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \delta z [\alpha \rho_g + (1-\alpha) \rho_l] g \sin \theta \\ &= \frac{\pi d^2}{4} \frac{d}{dz} [\alpha \rho_g u_g + (1-\alpha) \rho_l u_l] \delta z \end{aligned} \quad (12)$$

Dengan menggunakan identitas

$$u_g = \frac{x G}{\alpha \rho_g}; \quad u_l = \frac{(1-x)G}{(1-\alpha)\rho_l}; \quad u_g^2 = \frac{x^2 G^2}{\alpha^2 \rho_g^2}$$

$$\rho_l u_l^2 = \frac{(1-x)^2 G^2}{\alpha \rho_l}$$

persamaan menjadi

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{4\tau}{d} + [a\rho_g + (1-a)\rho_l]g \sin\theta + G^2 \left[\frac{x^2}{dz} \frac{a\rho_g}{a\rho_l} + \frac{(1-x)^2}{a\rho_l} \right] \quad (13)$$

Gradien Tekanan Gesekan

Penurunan tekanan dalam aliran dua-fase merupakan penurunan tekanan dari tiap fase dengan pengalinya yang ditentukan secara empiris. Persamaan dasarnya adalah :

$$\left(-\frac{dp}{dz}\right)_F = \phi_g^2 \left(-\frac{dp}{dz}\right)_g = \phi_{lo}^2 \left(-\frac{dp}{dz}\right)_{lo} \quad (14)$$

Lockhart dan Martinelli menghubungkan pengali ϕ_{lo}^2 dan ϕ_g^2 terhadap parameter X^2 yang

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_l}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_g} \quad (15)$$

didefinisikan sebagai:

Korelasi Chisholm

[sumber: Chemical Process Equipment: Selection and Design (6)]

$$\phi_{lo}^2 = 1 + (Y^2 - 1) \left[B x^{\frac{2-n}{2}} \left(1 - x^{\frac{2-n}{2}} + x^{\frac{2-n}{2}} \right) \right] \quad (16)$$

Dengan: $n=0,25$; $Y = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_g}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{lo}}$

$$B = 55/G^{0.5} \rightarrow 0 < Y < 9,5$$

$$B = \frac{520}{Y G^{0.5}} \rightarrow 9,5 < Y < 28$$

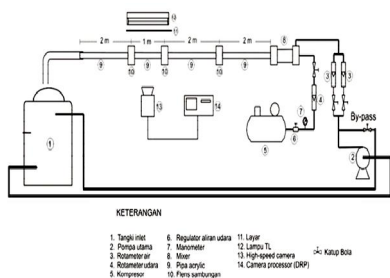
$$B = 15000/Y^2 G^{0.5} \rightarrow Y > 28$$

x = kualitas uap/gas

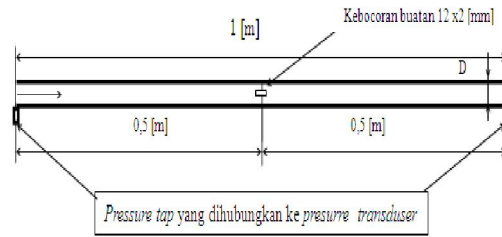
Laju bocor dihitung menggunakan persamaan $Q_x = C_d \cdot A \cdot (2 \cdot g \cdot \Delta p / \rho)^{0.5}$ (17)

3. METODOLOGI

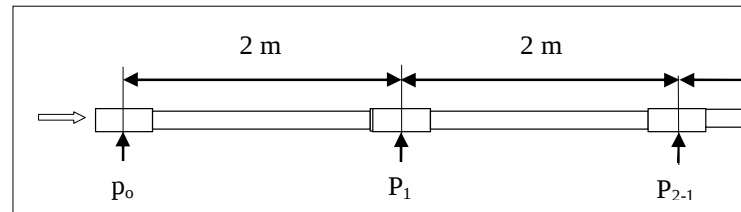
3.1. Instalasi eksperimen



Gambar 3. Susunan peralatan eksperimen



Gambar 3a. Pipa eksperimen



Gambar 4. Saluran pipa acrylic sepanjang 7 [m]

2.000

3.2 Pengambilan data

Langkah pengambilan data adalah sebagai berikut:

1. Menghubungkan *pressure transducer* dengan modulator tekanan.
2. Mengatur sensitivitas *pressure transducer*.
3. Menghubungkan modulator tekanan dengan DC amplifier
4. Memilih kondisi operasi DC amplifier.
5. Menghubungkan DC-amplifier dengan *Digital Store Oscilloscope* (DSO)
6. Menghubungkan *Digital Store Oscilloscope* (DSO) dengan Unit Komputer.
7. Mengoperasikan program DSO dan memilih kondisi operasi
8. Mengoperasikan pompa dan kompresor.
9. Mengatur kondisi operasi peralatan penelitian.
10. Menunggu sampai kondisi steady, pengambilan data dimulai.
11. Pengambilan data selesai dan disimpan dalam file xls atau Microsoft Excel
12. Ulangi langkah 9.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil eksperimen pola aliran strata, kantung (*plug*) dan sumbat (*slug*) dengan kecepatan superfisial air dan udara masing-masing berurutan $J_L=0,139$ [m/s] dan $J_G=0,417$; $1,043$; $1,461$ [m/s] untuk aliran strata. Laju air ditahan tetap, laju udara ditingkatkan. $J_G=0,417$ dan $J_L=0,279$; $0,418$; $0,558$ [m/s], untuk aliran kantung, laju udara ditahan tetap dan laju air ditingkatkan. $J_L=0,279$ dan $J_G=1,043$; $1,461$; $2,067$ [m/s] untuk aliran sumbat. Rekaman data disajikan pada tabel untuk masing-masing pola aliran.

Tabel 1. Matrik Pola Aliran Air-Udara

Ql 10 ⁻⁶ [m ³ /s]	Qg [10 ⁻⁶ m ³ /s]				J _L [m/s]
	188.8	472	660,8	944	
63	strata	strata	strata		0.139
126	plug	slug	slug	slug	0.279
189	plug				0.418
252	plug				0.558
J _G [m/s]	0.417	1.043	1.461	2.087	

Tabel 2 Laju Energi (laju kerja aliran per satuan volume)

notasi tekanan Strata	Model aliran homogen		model aliran terpisah	
	tanpa bocor [kPa]	bocor [kPa]	Tanpa bocor [kPa]	bocor [kPa]
p ₀	100.910170	100.90612	100.879446	100.875396
p ₁	100.87850	100.87445	100.8785	100.87445
p ₂₋₁	100.84683	100.84278	100.877554	100.873504
p _x		100.83487		100.8732675
p ₂₋₂	100.830997	100.82695	100.877081	100.873031
p ₃	100.830999	100.79528	100.876135	100.872085

Tabel 3 Laju Energi (laju kerja aliran per satuan volume)

notasi tekanan plug	Model aliran homogen		model aliran terpisah	
	tanpa bocor [kPa]	bocor [kPa]	tanpa bocor [kPa]	bocor [kPa]
p ₀	109.54952	100.95652	109.444466	100.851466
p ₁	109.44300	100.85	109.443	100.85
p ₂₋₁	109.33648	100.74348	109.441534	100.848534
p _x		100.71685		100.8481675
p ₂₋₂	109.28322	100.69022	109.440801	100.847801
p ₃	109.17670	100.5837	109.4393345	100.846335

Tabel 4. Laju Energi (laju kerja aliran per satuan volume)

notasi tekanan Slug	Model aliran homogen		model aliran terpisah	
	tanpa bocor [kPa]	bocor [kPa]	tanpa bocor [kPa]	bocor [kPa]
p ₀	101.821564	101.47458	101.606173	101.2591926
p ₁	101.605000	101.25802	101.605	101.25802
p ₂₋₁	101.388436	101.04146	101.603827	101.2568474
p _x		100.98732		101.2565543
p ₂₋₂	101.280154	100.93317	101.603241	101.2562611
p ₃	101.063590	100.71661	101.602069	101.2550885

Tabel 5. Laju kerja alir hasil eksperimen

notasi tekanan Strata	tanpa bocor [kPa]	bocor [kPa]
p ₀	101.3865	101.45011
p ₁	100.8785	100.87445
p ₂₋₁	100.3705	100.29879
p _x		100.154875
p ₂₋₂	101.6405	100.01096
p ₃	99.6085	99.4353

Tabel 6. Laju kerja alir hasil eksperimen

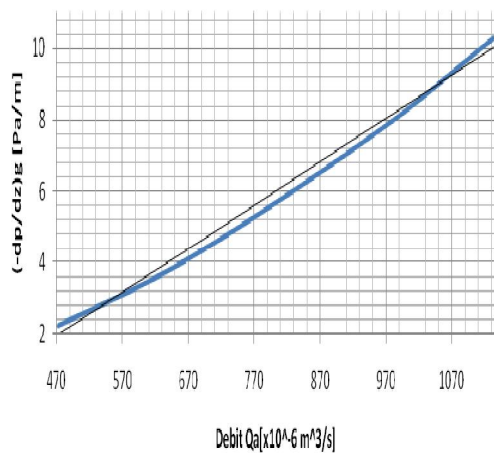
notasi tekanan Plug	tanpa bocor [kPa]	bocor [kPa]
p ₀	109.88743	101.571
p ₁	109.443	100.85
p ₂₋₁	108.99857	100.129
p _x		99.94875
p ₂₋₂	108.776355	99.7685
p ₃	108.331925	99.0475

Tabel 7. Laju kerja alir hasil eksperimen

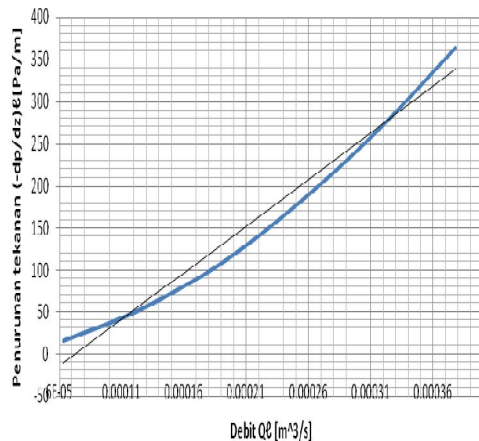
notasi tekanan Slug	tanpa bocor [kPa]	bocor [kPa]
p ₀	102.0722	102.88082
p ₁	101.605	101.25802
p ₂₋₁	101.1378	99.634522
p _x		99.22952
p ₂₋₂	100.9042	98.82382
p ₃	100.437	97.20102

Laju energi (laju kerja aliran) per satuan volume [$\text{Nm/m}^3 = \text{J/m}^3$] air –udara melintasi saluran pipa *acrylic* sepanjang $L = 7 \text{ [m]}$ dengan diameter $d = 24 \text{ [mm]}$. Tabel 1 disajikan matrik pola aliran yang dibentuk oleh campuran air dan udara dengan kecepatan superficial $J_L - J_G$, dan Q_l dan Q_g tertentu. Dengan digunakan pendekatan model aliran homogen dan model aliran terpisah hasil perhitungan energi (kerja aliran) yang dihitung berdasarkan penurunan tekanan (*pressure drop*) disajikan pada tabel 2, 3 dan 4. Sedangkan tabel 5, 6 dan 7 perhitungan energi didasarkan kepada hasil eksperimen.

Model aliran homogen. Dalam hal ini diasumsikan bahwa kedua fase tercampur dengan baik dan mengalir dengan kecepatan yang sama. Untuk perhitungan model aliran homogen digunakan persamaan (6) sampai (11) Hubungan antara laju aliran dengan penurunan tekanan (*pressure drop*) secara grafis disajikan pada Gambar 5 dan 6



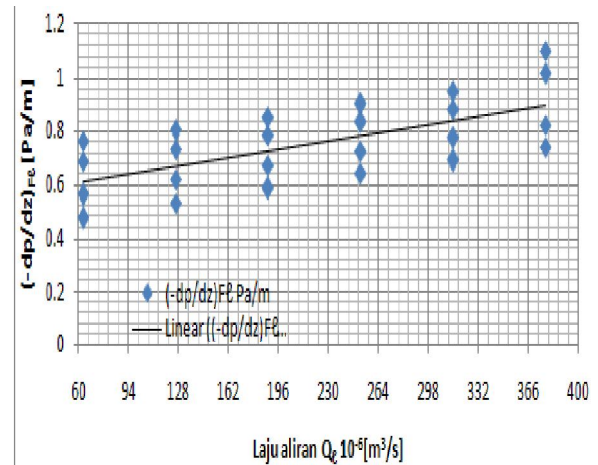
Gambar 5. Penurunan tekanan model aliran homogen $(-dp/dz)_g$ terhadap laju aliran Q_g



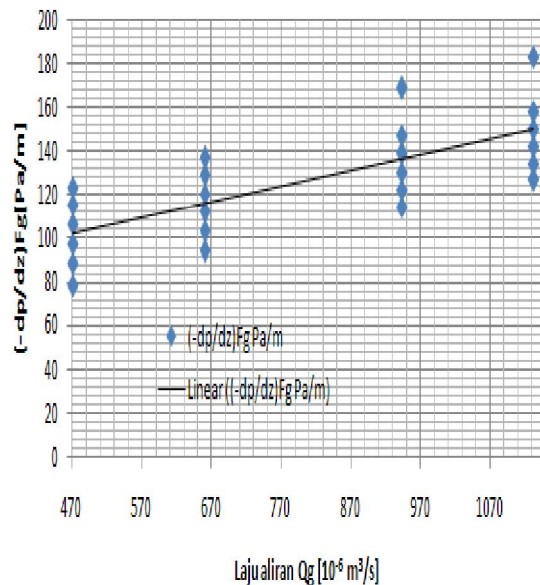
Gambar 6. Penurunan tekanan model aliran homogen $(-dp/dz)_e$ terhadap laju aliran Q_e

Komentar: Gambar 5 dan 6 memberikan gambaran bahwa semakin tinggi laju aliran fluida, maka penurunan tekanan (*pressure drop*)-nya juga bertambah besar.

Model aliran terpisah, dalam hal ini fase-fase secara fisik mengalir terpisah dengan kecepatan berbeda. Rasio kecepatan u_g/u_l disebut rasio slip S , biasanya untuk aliran terpisah $S > 1$. Untuk perhitungan model aliran terpisah digunakan persamaan (12) sampai (16). Hubungan antara laju aliran dengan penurunan tekanan (*pressure drop*) secara grafis disajikan pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 7. Penurunan tekanan model aliran terpisah $(-dp/dz)_{Fe}$ terhadap laju aliran Q_e



Gambar 8. Penurunan tekanan model aliran terpisah $(-dp/dz)_g$ terhadap laju aliran Q_g

Komentar: Gambar 7 dan 8 memberikan gambaran bahwa semakin tinggi laju aliran fluida, maka penurunan tekanan (*pressure drop*)-nya juga bertambah besar.

Tabel 8. Perhitungan laju bocor

P_x [kPa]	p_3 [kPa]	Δp [kPa]	$\Delta p/\rho g$ [mka]	$\Delta h^{0.5}$	Q_x [$10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$]	Q_x/Q_1	Pola aliran
Model aliran homogen							
100.834865	100.795279	39.586	0.004052697	0.063660794	1.561237	0.024781541	strata
100.71685	100.5837	133.15	0.0136315	0.116754016	2.863312	0.015149798	plug
100.987315	100.71661	270.705	0.027713971	0.166475137	4.082688	0.032402286	slug
Model aliran terpisah							
100.8732675	100.872085	1.1825	0.000121061	0.011002764	0.269835	0.004283099	strata
100.8481675	100.846335	1.8325	0.000187606	0.01369693	0.335908	0.00177729	plug
101.2565543	101.2550885	1.4658	0.000150064	0.012250071	0.300425	0.002384322	slug
Hasil eksperimen							
100.154875	99.4353	719.575	0.073667944	0.271418394	6.656349	0.105656334	strata
99.7685	99.0475	721	0.073813832	0.271687011	6.662937	0.035253633	plug
99.22952	97.20102	2028.5	0.207671786	0.455710199	11.17598	0.088698243	slug

Laju bocor

P_x (gambar 4) menunjukkan lokasi lubang bocor. Pada posisi ini laju alir volume terbagi menjadi Q_2 dan Q_x . Besarnya Q_x dihitung menggunakan persamaan (17) dan hasil perhitungan disajikan pada tabel 8. Tampak pada kolom Q_x/Q_1 masing-masing berturut-turut untuk pola aliran Strata, kantung, sumbat dengan pendekatan model aliran homogen, model aliran terpisah dan eksperimen.

Tabel 9. Rangkuman Rugi-rugi energy per satuan volume

Rugi energy [Nm/m ³]	Homogen		terpisah		Eksperimen	
	Tb	Bb	Tb	Bb	Tb	Bb
Strata	0.079171	0.110841	0.003311	0.003311	1.778	2.01481
kantung	0.37282	0.37282	0.0051315	0.005131	1.555505	2.5235
sumbat	0.757974	0.757974	0.004104	0.0041041	1.6352	5.6798

merupakan bentuk laju kerja alir fluida untuk melintas saluran pipa sepanjang L [m]. Sedangkan P_3 [Nm/(m³.s) = W/m³] merupakan besaran energy pasca melintas saluran pipa sepanjang L [m]. Total energy yang digunakan untuk melintas saluran pipa sebesar $P_0 - P_3$ (Tabel 9)

Tabel 10. Rangkuman rugi-rugi massa dalam persen volume

Rugi Massa [% volume]	Homogen	Terpisah	Eksperimen
strata	2,48	0,43	10,57
kantung	1,52	0,18	3,53
sumbat	3,24	0,24	8,87

Massa yang melintas saluran pipa sebesar Q_1 [m³/s] dan pasca melintas sebesar Q_2 [m³/s], sedangkan Q_x merupakan massa yang lepas dari saluran pipa (bocor), besarnya adalah $Q_1 - Q_2$, maka persen kebocoran disajikan pada tabel 10.

5. KESIMPULAN

5.1. Rangkuman hasil

Energi awal tiap satuan volume ditunjukkan oleh besaran P_0 [Nm/(m³.s) = W/m³] merupakan bentuk laju kerja alir fluida untuk melintas saluran pipa sepanjang L [m]. Sedangkan P_3 [Nm/(m³.s) = W/m³] merupakan besaran energy pasca melintas saluran pipa sepanjang L [m]. Total energy yang digunakan untuk melintas saluran pipa sebesar $P_0 - P_3$ (Tabel 9)

Dari rangkuman di atas dapat disimpulkan bahwa rugi-rugi energi dan massa dapat dipantau (*monitoring*) dengan alat bantu (instrument ukur) tekanan (*pressure gage*) dan laju alir (*flowmeter*) di pasang pada lokasi-lokasi tertentu.

5.2 Saran-Saran

Kaji eksperimen ini perlu pengembangan lebih lanjut, guna mencapai metoda deteksi kebocoran yang akurat. Antara lain dengan pemanfaatan instrument-instrumen ukur yang telah dipasang pada sistem sebagai alat bantu *monitoring* (pemantau) harian.

6. Ucapan Terima Kasih

Dalam proses penelitian dan penulisan makalah ini, banyak pihak yang berperan aktif memberikan dukungan baik berupa moril, materiil, finansial dan kerjasama, sehingga dapat terbitnya tulisan ini. Untuk hal tersebut, perkenankan penulis menghaturkan ucapan terima kasih. Semoga Allah SWT mencatatnya sebagai amal shaleh. Amiin.

7. DAFTAR PUSTAKA

1. Baghdadi A.H.A, Mansy H.A., 1988, *A Mathematical Model For Leak Location in Pipelines*, Butterworth Publisher, Cairo.
2. Billmann L, Isermann R, 1987, *Leak Detektion Methods for Pipeline*, Automatica Vol.23, No.3, pp.381-385, Printed in Great Britain, England.
3. Doebelin Ernest O, Artonang Edigom, Jr, M Sc. Dkk, 1992, *Sistem Pengukuran Aplikasi dan Perancangan*, Erlangga, Jakarta 10430.
4. Ferreira V.C.S, 1997, *Differential pressure spectral analysis for two-phase flow through an orifice plate*, Elsevier Science Limited, Printed in Northern Ireland. Alegre, Brazil.
5. Kiederle G, Mayinger, *Pressure Loss in valves during horizontal two-phase flow*, Technische Universitat Muechen, D-80290 Muechen.
6. Koestoer Raldi Artono, DR, Ir; Sasanti Proborini, Ir; 1994, *Aliran Dua Fase dan Fluks Kalor Kritis*, PT Pradnya Paramita, Jakarta.
7. Lamari Muhamed Limayem, 2001, *An Experimental Investigation Of Two-Phase Air-Water Flow Regimes In a Horizontal Tube at Near Atmospheric Conditions*, Canada.
8. Lin dan Hanraty, 1987, *Identifikasi aliran slug menggunakan 2 buah pressure transducer yang terpisah pada pipa aliran dua fase horizontal udara dan air*
9. Pasek Ari darmawan, 1993, *Dasar-Dasar dan Teknik Pengukuran Tekanan*, PAU-Rekayasa ITB Bandung.
10. Masias I.B, Cruz S.L, Pereira J.A.F.R, 2003, *Leak Detection In Pipelines*, UNICAM 13083-970, Campinas, SP, Brazil.
11. Rajtar J.M, Muthiah R., 1997, *Pipeline Leak Detection System For Oil and Gas Flowline*, Copyright by ASME., New Mexico Tech, Scorro NM 87801.
12. Scott Stuart L. Dr, Barrufet Maria A. Dr, 2003, *Worldwide Assessment of Industry Leak Detection Capabilities For Single & Multiphase Pipelines*, Texas A&M University, Texas.
13. Seung Ihl Kam, 2009, *Mechanistic modeling of pipeline leak detection at fixed inlet rate*, PII: S0920-4105(09)00214-9, Journal of Petroleum Science and Engineering.
14. Please Spedding P.L., Spence D.R., 1992, *Flow Regimes in Two-Phase Gas-Liquid Flow*, Copyright © 1993 Pergamon Press Ltd., Ireland.
15. SUN, Yongjun ZHENG Bin; 2008, *Hilbert-Huang Transform Analisis of Dynamic Differential Pressure Signal of Gas-Liquid Two-phase Flow*, bsun555@cjlu.edu.cn, davidzhhyj@cjlu.edu.cn, China.
16. Wang Wenran and Tong Yunxian, 1995, *A New method of two-phase flow measurement by orifice plate differential pressure noise*, Institute of Nuclear Technology, Tsinghua University, Beijing 100084

Notasi Huruf Roman

A=area=luas [m²] [L²]
 D=diameter pipa [m] [L]
 d= diameter tabung [m] [L]
 dp=delta tekanan [Pa=N/m²] [ML⁻²T⁻²]
 (-dp/dz)=gradient tekanan [Pa/m=N/(m².m)]
 f= friksi=koefisien gesekan
 G=laju fluks massa [kg/(m².s)] [ML⁻²T⁻¹]
 Gpm= gallon per menit = satuan laju aliran volumetrik

$$G_g = \text{laju fluks massa gas} \left(\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] \right)$$

$$G_L = \text{laju fluks massa likuid} \left(\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] \right)$$

g=percepatan gravitasi [m/s²] [LT⁻²]
 h=tinggi kolom fluida pada manometer tabung [mH₂O] [tor=tar]

J = kecepatan supersial, [m/s]
 J_L = kecepatan superficial likuid, [m/s]
 J_G = kecepatan superficial gas [m/s]
 L = panjang pipa [m]
 M = massa [kg]
 p = tekanan [Pa=N/m²]
 P = power = daya = laju energy [J/s = Nm/s = W]
 PSD = Power Sppektral Density = laju energi per gaya berat fluida [W/N]
 Q = kapasitas alir = laju aliran volumetric [m³/s]
 Q_l = laju aliran volumetrik air [m³/s]
 Q_g = laju aliran volumetrik udara [m³/s]
 R = radius cavity [m] S = slip = rasio kecepatan antar fase
 T = temperatur [K]
 T = waktu perekaman [sekon]
 U = vektor kecepatan [m/s]
 u = kecepatan aktuial [m/s], u_l = kecepatan aktual likuid, u_g = kecepatan aktual gas
 V = Volume [m³] , v = volume spesifik [m³/kg]
 W = laju aliran massa [kg/s],
 W_G = laju aliran massa gas [kg/s],
 W_L = laju aliran massa likuid [kg/s]
 X = parameter Lockhart dan Martinelli
 x = fraksi uap/gas
 z = jarak dari saluran masuk.

Notasi huruf Yunani

α = fraksi hampa
 ϵ = kekasaran permukaan [mikron]
 η = θ = sudut kemiringan pipa
 λ = kalor laten penguapan [J/kg]
 π = ρ = massa jenis [kg/m³]
 σ = tegangan permukaan [N/m]
 τ = tegangan geser [N/m²]
 μ = kekentalan dinamik [Pa.s]
 ν = kekentalan kinematik [m²/s]
 γ = berat jenis [N/m³]
 ϕ^2 = faktor pengali aliran dua fase

~~ϕ^2 = faktor pengali aliran dua fase likuid~~

Notasi Bilangan tak berdimensi

C = para meter dari Chisholm bergantung pada jenis aliran
 F = bilangan Froude
 Nu = bilangan Nusselt
 Pr = bilangan Prandtl
 Re = bilangan Reynolds
 We = bilangan Weber
 X = parameter Lockhart dan Martenelli