Visualisasi dan *Signal Processing* Data *Liquid Hold-up* Aliran *Plug* Air-Udara Pada Pipa Horizontal

(Visualisation and signal processing studies on the liquid hold-up data of air-water plug co-current two-phase flow in a horizontal pipe)

Okto Dinaryanto[1], Akhmad Zidni Hudaya[1], Naufadhil Widarmiko[2], Indarto[3], Deendarlianto[3]

[1]Program Studi S-2 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia
[2]Program Studi S-1 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia
[3]Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia
e-mail: oktodinaryanto@yahoo.co.id

Abstract

The visualisation studies and the signal processing of the liquid hold-up data of the air-water plug two-phase flow in a horizontal pipe were conducted simultaneously. The liquid hold-up data were obtained by using a constant electric current method (CECM). The principle of this method is on the basis of the conductivity ratio of the two-phase components. The visualisation study was carried-out from the analizing of the visual data obatined from the video camera. In the present works the water and air superficial velocities range from 0.16 m/s - 1.13 m/s and from 0.12 m/s - 0.70 m/s, respectively. As a result, it is found that: (1) the length of the elongated bubble increases as the increase of the air superficial velocity, menawhile it decreases as the water superficial velocity increases, (2) the velocity and the frequency of the elongated bubble were affected by both of the water and air superficial velocities, (3) the signal of liquid hold-up in time domain indicated the transient characteristics of plug flow, and the visual analysis shows a good agreement with the analysis of the liquid hold-up signals.

Keywords: Plug flow, Constant electric current method (CECM), Liquid hold-up, Elongated bubble velocity and frequency.

Pendahuluan

Aliran multi fasa seperti aliran dua fasa air dan udara banyak dijumpai dalam proses industri misalnya di pengolahan minyak bumi, proses produksi kimia dan makanan, pengolahan limbah, dan produksi energi. Pada produksi minyak bumi fluida kerjanya terdiri dari campuran minyak mentah, air, lumpur, dan gas. Campuran multi fasa tersebut membutuhkan penanganan yang khusus karena berhubungan erat dengan resiko kegagalan selama proses produksi dan pemeliharaannnya. Pada instalasi pembangkit listrik tenaga nuklir adanya aliran air dan uap dapat membahayakan operasinya. Oleh karena itu perlunya diketahui secara detail pengetahuan tentang aliran multi fasa dan perpindahan panasnya dalam rangka pengoperasian sistem secara aman dan efisien.

Keakuratan perhitungan rekayasa untuk aliran dua fasa sangat tergantung dari pola aliran yang didasarkan pada karakteristik khusus dari pola alirannya. Beberapa penelitian yang terdahulu telah berhasil memetakan pola aliran dua fasa pada pipa horizontal menggunakan metode visualisasi. Salah satu yang biasa digunakan pada kasus-kasus pipa horisontal adalah yang dilaporkan oleh Mandhane (1974). Mandhane menggunakan kecepatan superfisial cairan (J_L) dan kecepatan superfisial gas (J_G) untuk mendeskripsikan peta pola alirannya. Namun demikian peta tersebut tidak dapat digunakan secara umum karena banyaknya parameter fisik yang tidak dipertimbangkan seperti densitas, viskositas, tegangan permukaan dan geometri pipa. Oleh karena itu untuk mendapatkan prediksi pola aliran yang tepat diperlukan pengembangan data base pola aliran yang komprehensif dengan mempertimbangkan parameter fisik tersebut di atas.

Pada aliran dua fasa, terdapat berbagai jenis pola aliran yang mungkin terjadi dalam sistem. Aliran *slug* adalah jenis aliran paling berbahaya. Dalam kasus pipa horizontal, gesekan yang terjadi meliputi gesekan antara *liquid slug* dengan penampang dalam pipa bagian atas, *liquid slug* dengan penampang

dalam pipa bagian bawah, serta slip antar fase. Gesekan inilah yang menyebabkan fluktuasi beda tekanan lokal (ΔP/ΔL) sehingga dapat menyebabkan pipa pecah *(blasting pipe)*. Selain itu, dapat mengakibatkan korosi yang diinisiasi oleh gejala kavitasi. Oleh karena itu, aliran *slug* harus dihindari. Pada penelitian ini topologi dari aliran *plug* yang merupakan bagian dari aliran *slug* dikaji secara experimen. Oleh karena perlu dimulai sebuah kajian mendasar tentang pola aliran ini melalui studi visual maupun analisa signal *liquid hold-up* yang diukur.

Beberapa peneliti telah mempelajari tentang karekteristik dan mekanisme pembentukan aliran tersebut. Bendiksen (1984) meneliti tentang gerakan dari gelembung panjang, menyatakan bahwa kecepatan gelembung dipengaruhi oleh bilangan Reynold, Froude, dan diameter pipa. Netto dkk. (1998) meneliti tentang bentuk dari gelembung panjang pada aliran *slug* horizontal menyatakan panjang gelembung merupakan fungsi dari diameter pipa, kecepatan cairan didepan gelembung, kecepatan gelembung dan volumenya. Franca dan Lahey (1992) menyatakan model drift flux dapat digunakan untuk menganalisis aliran dua fase horizontal dengan baik. Santoso (2010) meneliti pola aliran kantung *(plug)*, sumbat likuid *(slug)* dan transisinya. Kajian topologi aliran *plug* pada penelitian tersebut di atas telah dilakukan dengan baik, namun demikian belum dilakukan kajian secara mendalam mengenai karakteristik *transient* pola aliran plug.

Fukano (1998) telah mengembangkan metode konduktansi yang dikenal sebagai CECM (*constant electric current method)*. Keutamaan dari CECM adalah keluaran elektroda sensor tidak tergantung pada lokasi fase gas, sensivitas mendeteksi perubahan *hold up* lebih tinggi, dan interaksi diantara kedua elektroda diabaikan. Beberapa peneliti antara lain Deendarlianto dkk. (2005), Furukawa dan Fukano (1996), Ousaka dkk., (1999), menggunakan CECM (*constant electric current method)*, untuk mengukur *liquid hold-up* pada beberapa geometri dan kofigurasi aliran yang berbeda, namun kajian fisis seperti analisa *time domain* dan *frequency domain* pada aliran plug belum terdokumentasi dengan baik. Oleh karena itu penulis mempelajari secara detail mengenai aliran *plug* dengan menggunakan analisis visual dan *signal processing* yang meliputi *time domain* dan *frequency domain*

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Penelitian ini menggunakan metoda visualisasi dan *signal prossesing* yang digunakan untuk mengkaji bentuk dan kecepatan topologi dan karakteristik *transient* aliran *plug*. Fasilitas yang digunakan berada di Laboratorium Mekanika Fluida, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada. Kondisi penelitian pada kondisi atmosfir dan diasumsikan sistem tidak dipengaruhi lingkungan dan tidak terjadi perpindahan kalor. Parameter pada penelitian ini meliputi kecepatan superfisial air (J_L) dari 0,16 m/s sampai 1,13 m/s dan kecepatan superfisial udara (J_G) dari 0,12 m/s sampai 0,70 m/s

Pada penelitian ini pipa *acrylic* transparan digunakan agar perilaku aliran dapat diamati pada pipa uji berdiameter dalam 26 mm. Panjang pipa keseluruhan adalah 9,5 meter dengan panjang sebelum seksi uji didesain 5,0 m untuk menjamin aliran berkembang penuh. Video kamera kecepatan tinggi *(high speed video camera.)* digunakan untuk mengamati karakteristik visual aliran. Seksi Uji untuk visualisasi dilengkapi kotak koreksi yang terbuat dari lembar *acrylic* transparan. Daerah antara kotak koreksi dan seksi uji diisi dengan air untuk mengurangi distorsi visual.

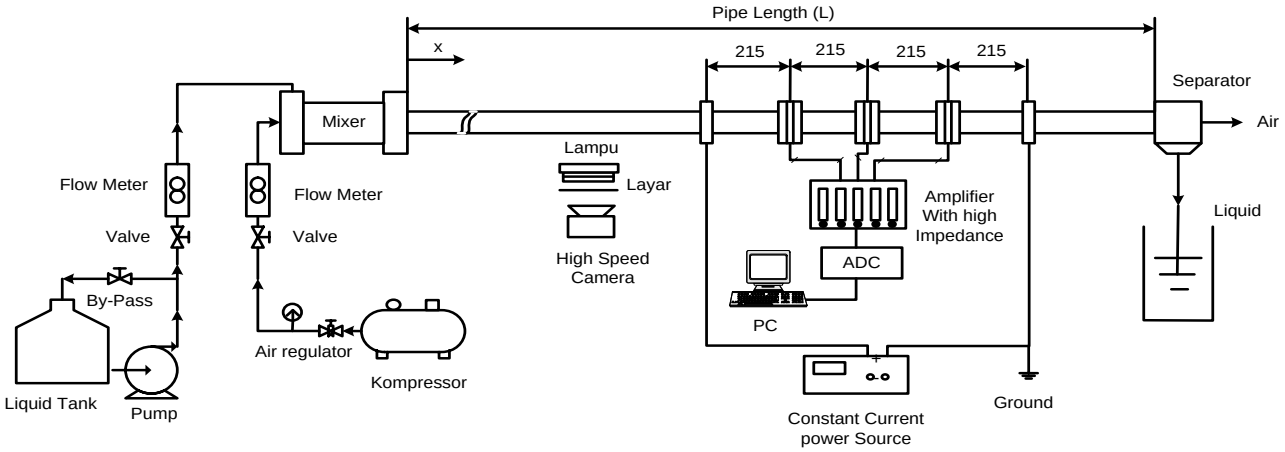
Pada penelitian ini pengambilan gambar video dilakukan pada 24 fps dan 120 fps selama 30 s. Hasil perekaman *high speed video camera* yang berupa file berekstensi *mov*. Kemudian file berekestensi *mov* tersebut diubah menjadi file berextensi dat dengan program FORMAT CONVERTER agar dapat dilakukan pengolahan data dengan virtualDub. Gambar video tersebut kemudian dipecah menjadi frame-frame kemudian dapat dilakukan perhitungan untuk dapat panjang, kecepatan, dan frekuensi *plug.*

Untuk analisis sinyal digunakan CECM (*constant electric current method).* Arus listrik konstan sebesar 1 mA dengan tegangan kerja mencapai 2000 Volt dialirkian pada elektroda pada ujung-ujung seksi uji. Sedang untuk pembacaan sinyal digunakan 3 buah CECM yang dengan jarak antar sensor 215 mm. Sensor tersebut terdiri dari sepasang elektroda kuningan dengan tebal 1 mm dan jarak antar elektroda 5 mm. Hasil sinyal keluaran dari sensor kemudian dikuatkan dengan amplifier. Sinyal dari amplifier selanjutnya diubah oleh *Analog to Digital Converter* (ADC) agar dapat dibaca komputer dengan kecepatan pembacaan 500 sampel per sekon.

Adapun prinsip kerja dari CECM di dasarkan atas perbedaan tahanan pada cairan dan gas. Tahanan listrik aliran dua fasa R_{TP}, dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{1}{R_{TP}} = \frac{1-\eta}{R_G} + \frac{1}{R_L} \qquad (1)$$

Dimana V_L adalah drop tegangan saat liquid yang mengalir melalui pipa. Dimana R_G dan R_L adalah tahanan listrik fase gas dan liquid.



Gambar 1. Skema diagram penelitian

Liquid hold-up (η) diekspresikan dalam unit panjang (V_{TP}) pada saat arus konstan I_0 dicatukan. Untuk kasus di mana nilai $R_G >> R_L$ didapat:

$$\eta = \frac{R_L}{R_{TP}} = \frac{I_0 R_L}{I_0 R_{TP}} = \frac{V_L}{V_{TP}} \quad (2)$$

Jika tahanan listrik dan drop tegangan berturut-turut sebagai R_{TP0} dan V_{TP0} saat hold-up diketahui nilainya, η_0 dan arus listrik I_0 dinyatakan dengan:

$$\eta_0 = \frac{I_0 R_L}{I_0 R_{TP0}} = \frac{V_L}{V_{TP0}} \quad (3)$$

Dengan mengeliminasi V_L pada dua persamaan di atas maka diperoleh persamaan berikut:

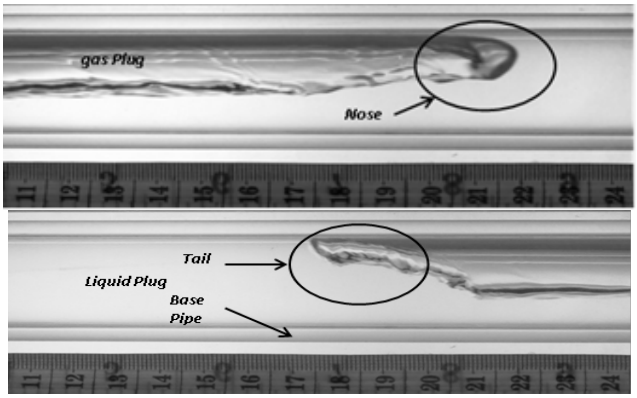
$$\eta = \frac{I_0 R_{TPO}}{I_0 R_L}\eta_0 = \frac{V_{TPO}}{V_{TP}}\eta_0 \quad (4)$$

Jika V_{TP} diukur dibawah kondisi dari nilai yang diketahui (η_0, V_L atau V_{TP0}) maka kita dapat menentukan *hold-up* (η).

Sinyal liquid hold-up sebagai fungsi waktu dianalisis secara stochastic untuk mendapatkan informasi yang diinginkan. Pada analisis *Power Spectra Density* aliran *plug* akan mempunyai nilai frekuensi dominan yang merupakan frekuensi gelombang *plug*. Sedangkan rata-rata keterlambatan waktu *(time lag)* antara dua sensor liquid hold-up dapat dihitung dari fungsi *cross correlation*. Deendarlianto dkk. (2005) menyatakan kecepatan gelombang *(wave velocity)* dapat ditentukan dari keterlambatan waktu pada puncak pertama dari fungsi *cross correlation* antara dua sensor.

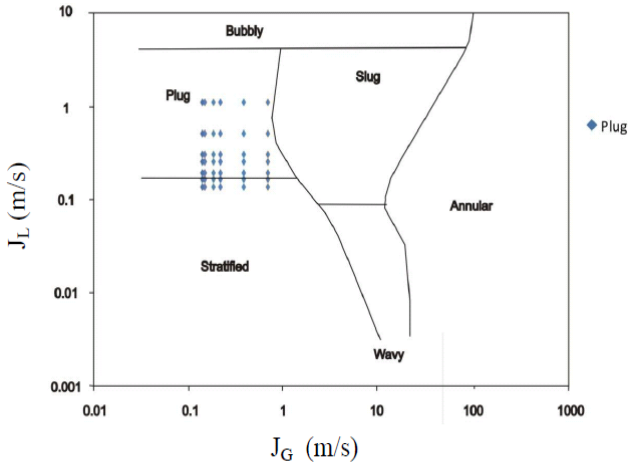
Hasil dan Pembahasan

Pola aliran *plug* mempunyai ciri khusus dimana fase gas membentuk kantung gas dengan batas antara kantung gas dan cairan terlihat jelas. Fase gas tidak terdispersi dalam fase cair atau tidak terjadi aerasi. Sedangkan contoh topologi pada aliran plug dapat dilihat pada gambar 2.



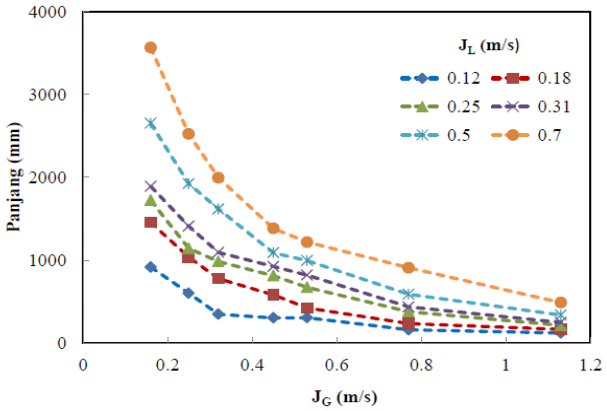
Gambar 2. Visualisasi pola aliran plug (J_L=0,77 m/s dan J_G = 0,31 m/s)

Dari analisis visual, pola aliran yang diamati dibandingkan dengan peta pola aliran aliran Mandhane (1974) seperti yang terlihat pada gambar 3. Dari gambar tersebut terlihat bahwa sebagian besar data pola aliran yang diperoleh melalui eksperimen ini sesuai dengan peta pola aliran Mandhane.



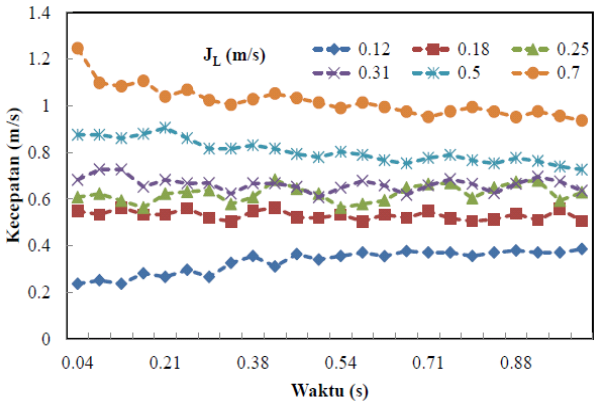
Gambar 3. Pemetaan data penelitian kedalam peta pola aliran Mandhane (1974)

Untuk parameter panjang kantong udara pada gambar 4. dapat disimpulkan dengan bertambahnya kecepatan superfisial udara pada kecepatan superfisial air konstan akan menghasilkan kantung udara yang lebih panjang. Sedangkan untuk kecepatan superfisial udara yang sama yang disertai dengan peningkatan kecepatan superfisial air, maka akan didapatkan kantung udara memendek. Pada kecepatan superfisial udara 0,7 m/s dan 0,5 m/s terjadi penurunan panjang yang drastis di banding pada kecepatan superfisial udara 0,31 m/s 0,25 m/s, 0,18 m/s, dan 0,12 m/s.



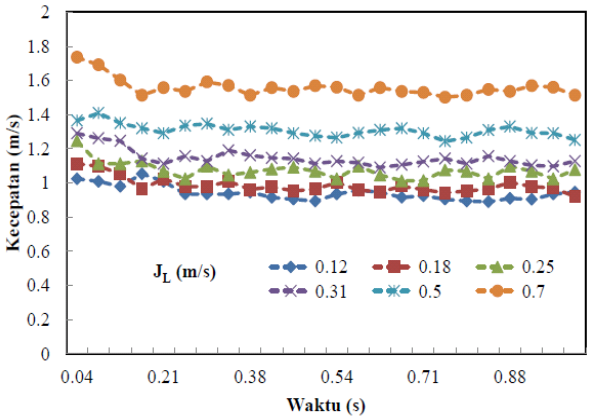
Gambar 4. Hubungan antara kecepatan superfisial air dan panjang kantung udara

Untuk parameter kecepatan kantung udara pada gambar 5 dapat diambil kesimpulan bahwa semakin tinggi kecepatan superfisial udara yang digunakan maka akan semakin tinggi pula kecepatan kantung udara. Kecepatan kantung kemudian mengalami fluktuasi kecepatan terhadap waktu. Dan perlahan-lahan kecepatan kantung pada aliran akan berkurang disebabkan oleh adanya pengaruh gaya gesek. Hal yang sama terjadi pada berbagai kecepatan superfisial



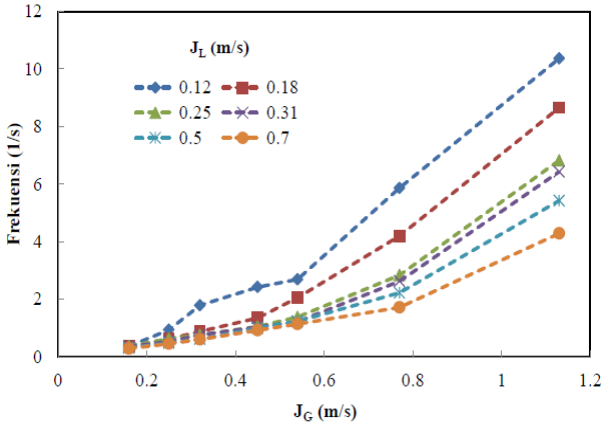
Gambar 5 Perubahan kecepatan satu kantung udara terhadap waktu J_L = 0,16 m/s

Sedangkan pada gambar 6. di banding gambar 5. terlihat untuk kecepatan superfisial udara yang sama maka kecepatan gelembung udara akan meningkat sejalan dengan peningkatan kecepatan superfisial air.



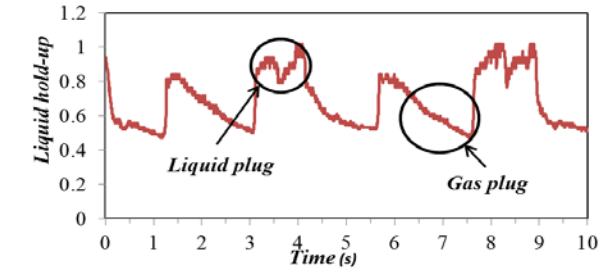
Gambar 6. Perubahan kecepatan satu kantung udara terhadap waktu J_L = 0,77 m/s

Pengaruh J_G dan J_L terhadap frekuensi timbulnya kantung udara diperlihatkan pada gambar 7. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa kenaikan superfisial air pada kecepatan superfisial udara tetap akan meningkatkan frekuensi kantong udara. Untuk kecepatan superfisial air yang relatif rendah, frekuensi yang dihasilkan karena perubahan variabel kecepatan superfisial udara tidak terlihat perbedaannya secara signifikan. Sedangkan untuk kecepatan superfisial air yang lebih tinggi dan diikuti dengan perubahan variabel dari kecepatan superfisial udara, maka akan terlihat perbedaannya secara signifikan.

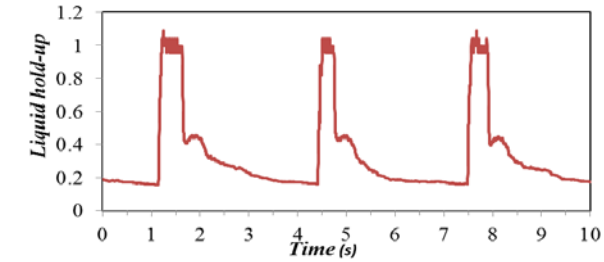


Gambar 7. Pengaruh J_G dan J_L terhadap frekuensi timbulnya kantung udara.

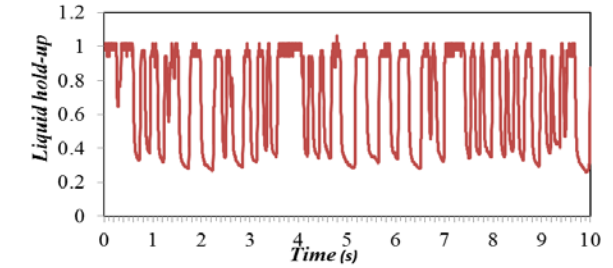
Pada analisis sinyal liquid *hold* up dari sensor CECM aliran *plug* akan dapat diketahui karakteristik transient dari aliran *plug*. Pada kecepatan superfisial air dan udara yang relatif rendah dari sinyal liquid hold-up pada gambar 8 (a) terlihat adanya gelembung yang cukup panjang Pada gambar 8 (b) dengan bertambahnya kecepatan superfisial udara terlihat ukuran kantung akan membesar dan memanjang dan dapat dilihat dari nilai rata-rata *hold-up* yang turun untuk kantong udara.



(a)



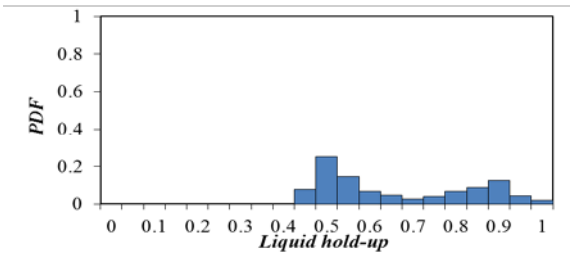
(b)



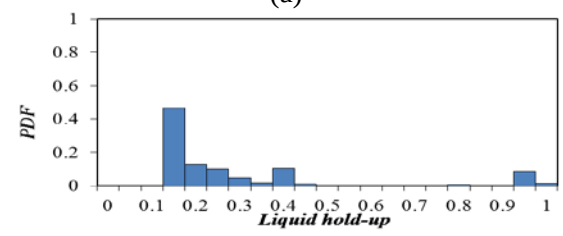
(c)

Gambar 8. Sampel sinyal *liquid hold up* aliran *plug* (a) J_L= 0,16 m/s dan J_G = 0,18 m/s, (b) J_L = 0,16 m/s dan J_G = 0,7 m/s, (c) J_L = 0,77 m/s dan J_G = 0,18 m/s.

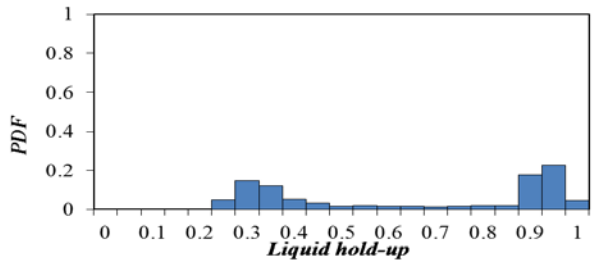
Penurunan nilai tersebut dapat dilihat pada gambar 9 (b) dimana nilai sebaran *liquid hold up* melebar kebawah dibanding nilai dari gambar 9 (a). Sedangkan pada penambahan kecepatan superfisial air pada gambar 8 (c) terlihat bahwa kantong udara akan semakin banyak untuk waktu yang sama sehingga kantong udara relatif memendek. Hasil analisis data *liquid hold up* tersebut sejalan dengan analisis visual yang ditunjukan oleh grafik pada gambar 4.



(a)



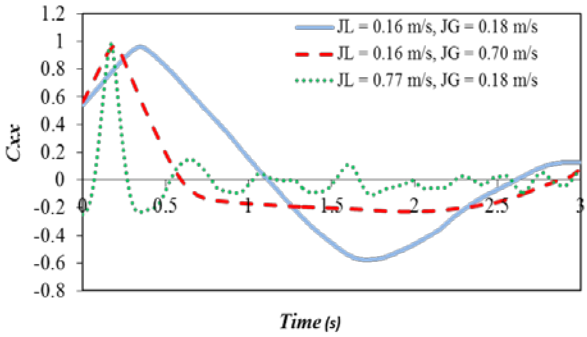
(b)



(c)

Gambar 9. *Probability Distribusi Fuction* pada aliran *plug* (a) J_L= 0,16 m/s dan J_G = 0,18 m/s, (b) J_L = 0,16 m/s dan J_G = 0,7 m/s, (c) J_L = 0,77 m/s dan J_G=0,18m/s.

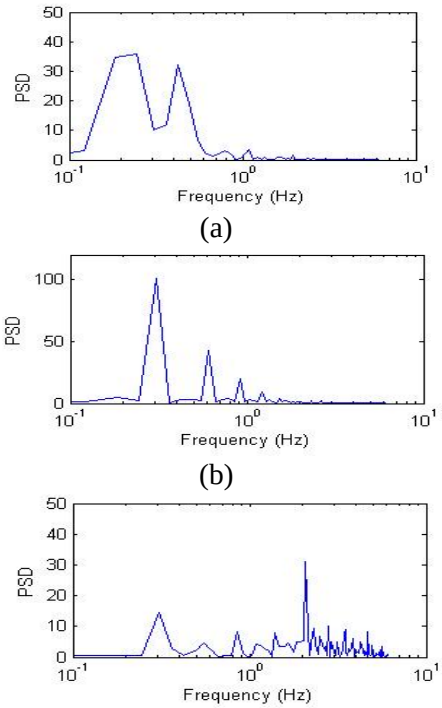
Dari hasil *cross correlation* pada gambar 10 pada kecepatan superficial air dan udara yang relatif rendah di dapat *time lag* yang relatif besar yang berarti kecepatan gelombangnya relatif kecil. Selanjutnya dengan bertambahnya kecepatan superfisial udara terlihat *time lag* mengecil yang berarti kecepatan gelombang bertambah. Sedangkan pada penambahan kecepatan superfisial air didapat *time lag* mengecil yang berarti kecepatan gelombang bertambah. Hasil analisis data ini sejalan dengan analisis visual yang ditunjukan oleh grafik pada gambar 5 dan 6, dimana kecepatan gelembung udara sebagai bagian dari pembentuk kecepatan gelombang pada aliran *plug* akan bertambah sejalan dengan pertambahan kecepatan superfisial udara dan air.



Gambar 10. *Cross Correlation* pada aliran *plug*

Dari hasil *Power Spectra Density* pada kecepatan superficial air dan udara yang relatif rendah pada gambar 11 (a) terlihat frekuensi gelombang relatif kecil. Pada gambar 11 (b) dengan bertambahnya kecepatan superfisial udara tidak terlihat perubahan frekuensi geombang secara signifikan. Sedangkan pada penambahan kecepatan superfisial air pada gambar 11 (c) terlihat bahwa terdapat penambahan frekuensi gelombang secara signifikan. Hasil analisis data ini sejalan dengan analisis visual yang ditunjukan oleh grafik pada gambar 7, dimana pertambahan frekuensi gelembung udara sebagai bagian dari pembentuk frekuensi gelombang pada aliran plug akan bertambah sejalan

dengan pertambahan kecepatan superfisial udara dan air.



Gambar 11. *Power Spectra Density* pada aliran *plug* (a) J_L= 0,16 m/s dan J_G = 0,18 m/s, (b) J_L = 0,16 m/s dan J_G = 0,7 m/s, (c) J_L = 0,77 m/s dan J_G = 0,18m/s.

Kesimpulan

Hasil penelitian dari visualisasi dibandingkan dengan analisis sinyal menunjukan bahwa variasi kecepatan superfisial udara yang lebih besar sementara kecepatan superfisial air dipertahankan konstan akan didapatkan kantung udara yang semakin panjang. Sedangkan jika variasi kecepatan superfisial air yang semakin besar dan kecepatan superfisial udara dipertahankan konstan, maka kantung udara akan semakin pendek. Variasi kecepatan superfisial udara yang semakin besar akan menyebabkan kecepatan kantung udara yang semakin besar jika kecepatan superfisial air dipertahankan konstan. Kenaikan kecepatan superfisial air pada kecepatan superfisial udara tetap akan meningkatkan frekuensi kantong udara. Untuk kecepatan superfisial air yang relatif rendah, frekuensi yang dihasilkan karena perubahan variabel kecepatan superfisial udara tidak akan terlihat perbedaannya secara signifikan. Sedangkan untuk kecepatan superfisial air yang lebih tinggi kenaikan kecepatan superfisial udara akan meningkatkan frekuensi kantong udara secara signifikan. Besarnya *liquid hold-up* terhadap waktu dapat menunjukan karakteristik *transient* dari aliran *plug*. Pada analisis *Power Spectra Density* aliran *plug* akan mempunyai nilai frekuensi dominan yang merupakan frekuensi gelombang *plug.* Sedangkan rata-rata keterlambatan waktu *(time lag)* antara dua sensor *liquid hold-up* dapat dihitung dari fungsi *cross correlation* yang selanjutnya digunakan untuk mendapatkan kecepatan gelombang *(wave velocity).* Hasil dari analisis sinyal tersebut telah sesuai dengan hasil yang didapat dari analisis visual.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai dari hibah Pascasarjana UGM tahun anggaran 2012.

Referensi

Bendiksen, K. H. , An experiment Investigation of the Motion of Long Bubbles in Inclined Tubes, *Int. J. Multiphase Flow,* Vol. 10, pp. 467-483 (1984).

Deendarlianto, Ousaka, A., Kariyasaki, A.,Fukano, T. , Investigation of liquid film behavior at the onset of flooding during adiabatic counter-current air–water two-phase flow in an inclined pipe, *Nuclear Engineering and Design* 235, pp. 2281–2294 (2005)

Furukawa, T., Fukano, T., Effect of liquid viscosity on flow patterns in vertical upward gas–liquid two-phase flow. *Trans. JSME* 62-601, pp. 3257–3264 (1996)

Fukano, T., Measurement of time varying thickness of liquid film flowing with high speed gas flow by a constant electric current method (CECM), *Nuclear Engineering and Design*, pp 363-377 (1998).

Franca, F. and Lahey, R.T., Jr, The use of Drift-flux Techniques for the Analysis of Horizontal Two Phase Flow. *Int. J. Multiphase Flow,* Vol 6., pp. 787-801 (1992).

Mandhane, J.M., Gregory, G.A., Aziz, K., A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 1, pp. 537-553 (1974).

Netto, J.R. Fagundes, Fabre, J. Peresson, L., Shape of long bubbles in horizontal Slug Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, pp. 1129-1160 (1999).

Ousaka, A., Kariyasaki, A., and Sugita, K., Effect of Air-Water Mixing Method on Behavior of Air Slug in Inclined Upward Flow. 3rd *ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference* (1999)

Santoso, B. , Fithroh D. R., Indarto, Deendarlianto, Thomas S. W., Kaji Ekperimen Aliran Plug dan Slug Air-Udara pada Pipa Mendatar. Simposium

Nasional RAPI IX 2010, M-136 – M-142 (2010)