

## ANALISIS LIQUID HOLD-UP DAN KECEPATAN GELOMBANG ALIRAN SLUG AIR-UDARA PADA PIPA HORIZONTAL MENGUNAKAN METODE CECM

Yuli Purwanto<sup>1</sup>, Indarto<sup>2</sup>, Khasani<sup>2</sup>, Deendarlianto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi S-2 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri,

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

Jalan Grafika No. 2 Yogyakarta

email : joeli\_8783@yahoo.com

### ABSTRAK

Aplikasi aliran dua fase ditemukan di berbagai sistem produksi seperti pada produksi pangan, pembangkit listrik, pabrik kimia, dan industri minyak bumi. Salah satu pola aliran yang perlu dihindari adalah aliran *slug*. Hal ini karena *liquid* yang dibawa oleh aliran gas menimbulkan perubahan tekanan yang mendadak dan osilasi tekanan yang besar. Hal tersebut dapat menyebabkan pipa pecah, kerusakan struktur akibat getaran, atau memicu terjadinya korosi akibat kavitasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat-sifat aliran *slug* ditinjau dari *liquid hold-up* dan kecepatan gelombang sebagai fungsi waktu pada pipa horizontal.

Pipa *acrylic* diameter 50 mm dengan panjang total 18 m menjadi seksi uji untuk dapat mengetahui secara visual. Kecepatan udara yang dialirkan dari kompresor divariasikan dari 0,7 m/s sampai 4,25 m/s, sedangkan kecepatan air yang dialirkan dari pompa 0,38 m/s sampai 0,68 m/s. *Constant Electric Current Method (CECM)* merupakan metode pengukuran yang digunakan untuk menganalisa *liquid hold-up* dan kecepatan gelombang. Tiga sensor dengan jarak masing-masing sensor 215 mm dipasang pada seksi uji. *Liquid hold-up* dihitung dari perbandingan antara fraksi *full liquid* dan fraksi dua fasanya. Kecepatan gelombang dihitung dengan menggunakan metode korelasi silang dari *liquid hold-up* dua sensor yang berurutan.

Peningkatan kecepatan fluida cair akan sebanding dengan meningkatnya *liquid hold-up*. Kecepatan gelombang akan bertambah cepat apabila kecepatan udara juga semakin cepat. Dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan metode pengukuran *Constant Electric Current Method (CECM)* dapat digunakan untuk mengetahui sifat-sifat aliran *slug* ditinjau dari karakteristik lokal.

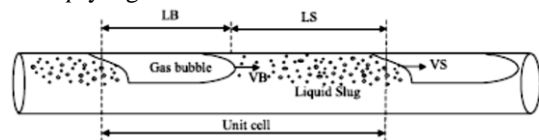
**Kata kunci** : Aliran Dua Fasa, Aliran *Slug*, *Liquid Hold-Up*, Kecepatan Gelombang, CECM

### PENDAHULUAN

Dalam proses industri misalnya di pengolahan minyak bumi, proses produksi kimia dan makanan, pengolahan limbah, dan produksi energy banyak dijumpai aliran multi fasa seperti aliran dua fasa air dan udara. 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 pemeliharannya. 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.

Pada aliran dua fasa, terdapat berbagai jenis pola aliran yang mungkin terjadi dalam sistem. Aliran *slug* adalah jenis aliran paling berbahaya. Aliran *slug* dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu *liquid slug* dan *elongated gas bubble*. *Liquid slug* merupakan bagian yang terdiri dari fase cair dengan kemungkinan adanya gelembung gas sedangkan *elongated gas bubble* adalah gelembung panjang yang mengalir di atas lapisan *film* cairan.

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 bedatekanan lokal ( $\Delta P/\Delta L$ ) 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 *slug* yang merupakan bagian dari aliran *slug* dikaji secara eksperimen. Oleh karena perlu dimulai sebuah kajian mendasar tentang pola aliran ini melalui studi visual maupun analisa signal *liquid hold-up* yang diukur.



Gambar 1. Gambar skematis sistem *slug* dengan kantung udara, *liquid slug*, dan total *slug* unit.

Beberapa peneliti telah mempelajari tentang karakteristik 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 di depan 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, sensitivitas 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 konfigurasi 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*.

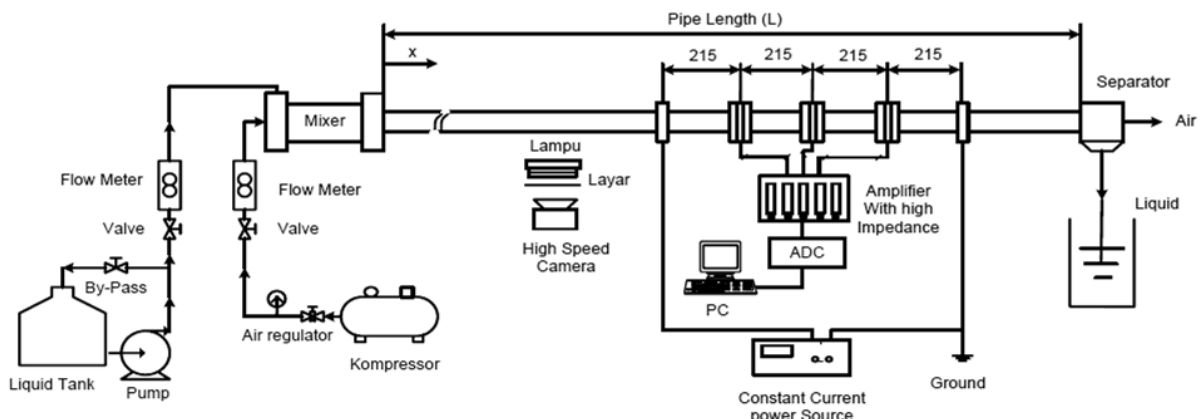
**METODE PENELITIAN**

Pada penelitian ini pipa *acrylic* transparan digunakan agar perilaku aliran dapat diamati

pada pipa uji berdiameter dalam 50 mm. Panjang pipa keseluruhan adalah 18 meter dengan panjang sebelum seksi uji didesain 12 meter 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.

Kondisi penelitian pada kondisi atmosfer dan diasumsikan sistem tidak dipengaruhi lingkungan dan tidak terjadi perpindahan kalor. Parameter pada penelitian ini meliputi kecepatan superfisial air ( $J_L$ ) dari 0,39 m/s sampai 0,68 m/s dan kecepatan superfisial udara ( $J_G$ ) dari 0,71 m/s sampai 4,25 m/s.

Pengambilan data sinyal menggunakan metode *Constant Electric Current Method* (CECM). Untuk mendapatkan sinyal *liquid hold-up* digunakan 3 buah sensor dengan jarak masing-masing 215 mm. Sensor tersebut terdiri dari sepasang elektroda kuningan dengan tebal 1 mm dan jarak antar elektroda 5 mm. Elektroda ini berfungsi mengalirkan arus listrik konstan yang bersumber dari power suplai. Sinyal *liquid hold-up* yang mengalir melalui sensor akan dikuatkan oleh amplifier dan diteruskan melalui *Analog Digital Converter* (ADC). *Analog Digital Converter* (ADC) berfungsi merubah sinyal analog menjadi digital sehingga sinyal dapat terdeteksi oleh komputer seperti terlihat pada Gambar 1. Perhitungan kecepatan gelombang didapat dari rasio perbandingan antara jarak sensor dengan keterlambatan waktu antara 2 buah sensor. Dalam hal ini keterlambatan waktu didapat melalui *cross correlation* dari 2 buah sensor.



Gambar 2. Skema alat penelitian

Prinsip kerja dari *Constant Electric Current Method* (CECM) didasarkan pada tahanan cairan dan gas yang melewati sensor, dimana tahanan cair dan gas memiliki perbedaan. Tahanan gas lebih

besar dibandingkan dengan tahanan cair. Dari prinsip inilah Fukano mengembangkan metode *Constant Electric Current Method* (CECM) sebagai metode berbasis sinyal.

Tahanan dua fasa  $R_{TP}$  dapat diekspresikan dengan:

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

Dimana :  $R_G$  = Tahanan dari fase gas yang menempati luasan potongan pipa.

$R_L$  = Tahanan dari fase cairan yang menempati luasan potongan pipa.

*Liquid hold-up* dinyatakan dengan tegangan dalam satuan panjang, ( $V_{TP}$ ) ketika arus konstan diberikan ( $I_0$ ). Pada kasus dua fase udara-air kondisi  $R_G \gg R_L$ , maka *liquid hold-up* dinyatakan dengan Persamaan (2):

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

Dimana :  $V_L$  = Drop tegangan saat liquid mengalir memenuhi permukaan penampang dari sensor.

Pada analisis sinyal, rata-rata keterlambatan waktu (*time lag*) antara dua sensor *liquid hold-up* dapat dihitung dari fungsi *cross correlation*, untuk proses  $X_1$  dan  $X_2$ , yaitu:

$$\pi_{12}(\tau) = \frac{R_{12}(\tau)}{\sqrt{R_{11}(\tau)R_{22}(\tau)}} \quad (3)$$

Dimana :  $\pi_{12}$  = fungsi *cross-correlation* yang dinormalisasi  
 $\tau$  = *time lag* antara dua sinyal *liquid hold-up*.

Fungsi *cross correlation* ( $R$ ) dinyatakan dalam

$$R_{12}(\tau) = E\{X_1(\tau)X_2(t + \tau)\} \quad (4)$$

Dimana  $E$  adalah nilai rata-rata

Sedangkan *Power Spectra Density* atau PSD digunakan untuk menggambarkan sinyal dalam frekuensi domain yang menggunakan *fast fourier transform* dan dirumuskan sebagai berikut:

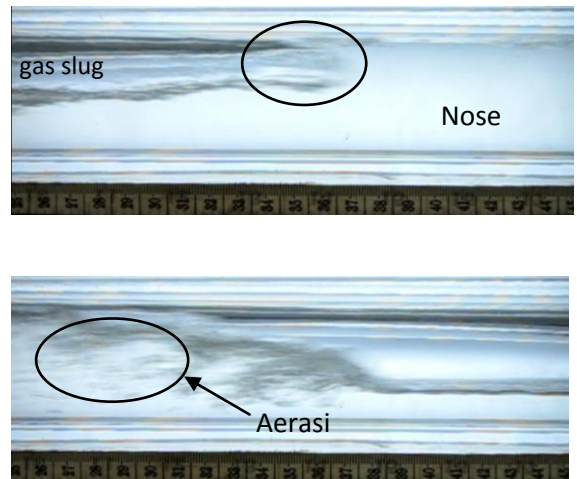
$$X(k) = \sum_{j=1}^N X(j)\omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (5)$$

**DATA DAN PEMBAHASAN**

Pola aliran yang terbentuk pada semua variasi debit yang digunakan pada penelitian ini adalah aliran *plug* (transisi) dan *slug*. Sejalan dengan

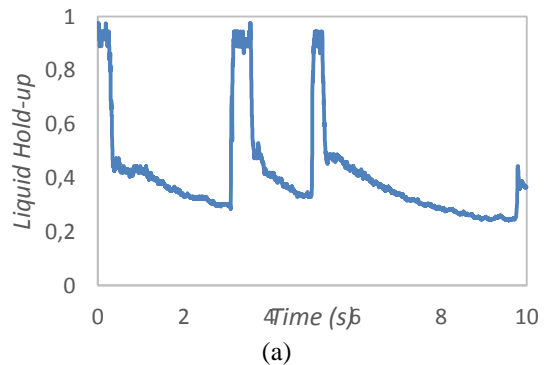
makin bertambahnya laju aliran udara maka *hydraulic jump* pada bagian depan *liquid plug* akan menyebabkan udara mulai terdispersi kedalam cairan. Hal ini menjadi pertandamulai terjadinya transisi aliran dari *plug* ke *slug*.

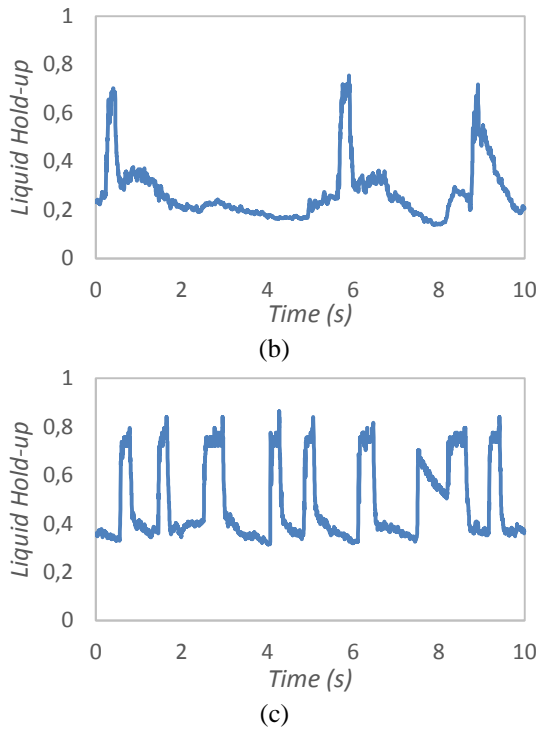
Pola aliran *slug* mempunyai ciri khusus dimana fase gas terdispersi dalam fase cair atau terjadi aerasi. Sedangkan contoh topologi pada aliran *slug* dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Visualisasi aliran slug pada  $JG = 0,39$  m/s dan  $JL = 0,71$  m/s

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 rendah, dari sinyal *liquid hold-up* pada gambar4 (a) terlihat adanya gelembung yang cukup panjang Pada gambar 4 (b) dengan bertambahnya kecepatan superfisial udara terlihat ukuran kantong akan membesar dan memanjang dan dapat dilihat dari nilai rata-rata *hold-up* yang turun untuk kantong udara. Pada gambar 4 (c) dengan bertambahnya kecepatan superfisial cairan terlihat dimana ukuran kantong akan mengecil dan memendek dan dapat dilihat bahwa nilai rata-rata *hold-up* akan naik, karena bertambahnya fluida cair yang mengalir.

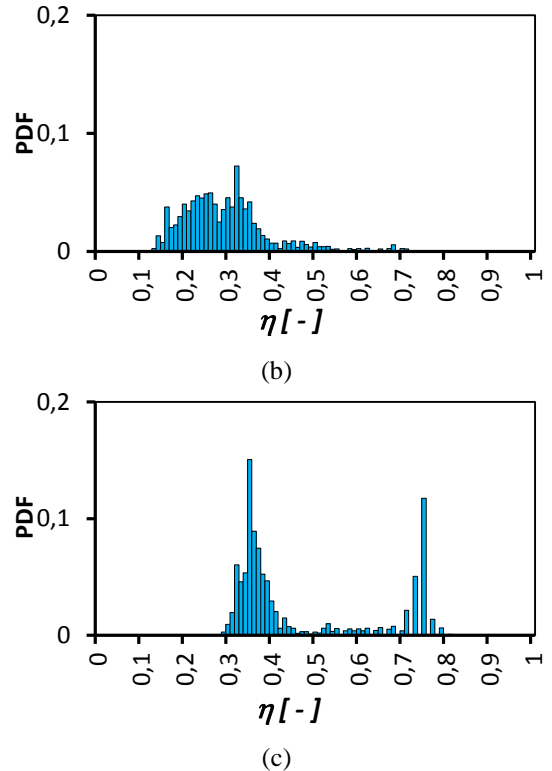
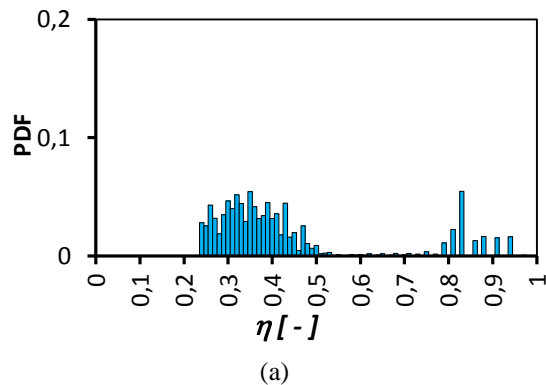




Gambar 4. Sampel sinyal *liquid hold up* aliran *slug*  
 (a)  $J_L = 0,39$  m/s dan  $J_G = 0,71$  m/s,  
 (b)  $J_L = 0,39$  m/s dan  $J_G = 3,55$  m/s,  
 (c)  $J_L = 0,68$  m/s dan  $J_G = 0,71$  m/s.

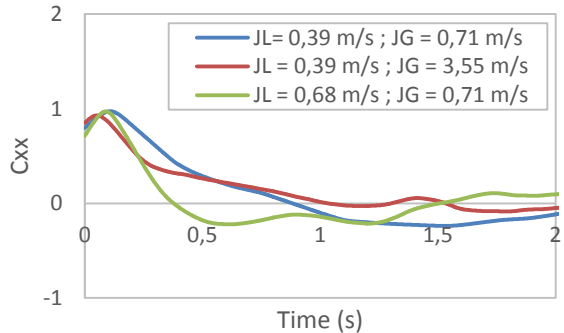
Dilihat dari karakteristik transien *liquid hold-up slug*, pola aliran *slug* mempunyai nilai *liquid hold-up* untuk *liquid slug* kurang dari satu yang berarti terjadi aerasi pada *liquid slug* dan nilai *liquid hold-up* yang rendah untuk gas *slug*. Semakin rendah nilai *hold-up* pada *liquid slug* menunjukkan semakin tinggi tingkat aerasinya. Dibandingkan dengan bentuk sinyal pada aliran *plug*, maka bentuk sinyal *liquid slug* lebih runcing.

Penurunan nilai tersebut dapat dilihat pada gambar 5 (b) dimana nilai sebaran *liquid hold up* melebar kebawah dibanding nilai dari gambar 5 (a). Sedangkan pada penambahan kecepatan superficial air pada gambar 4 (c) terlihat bahwa kantong udara akan semakin banyak untuk waktu yang sama sehingga kantong udara relative memendek.



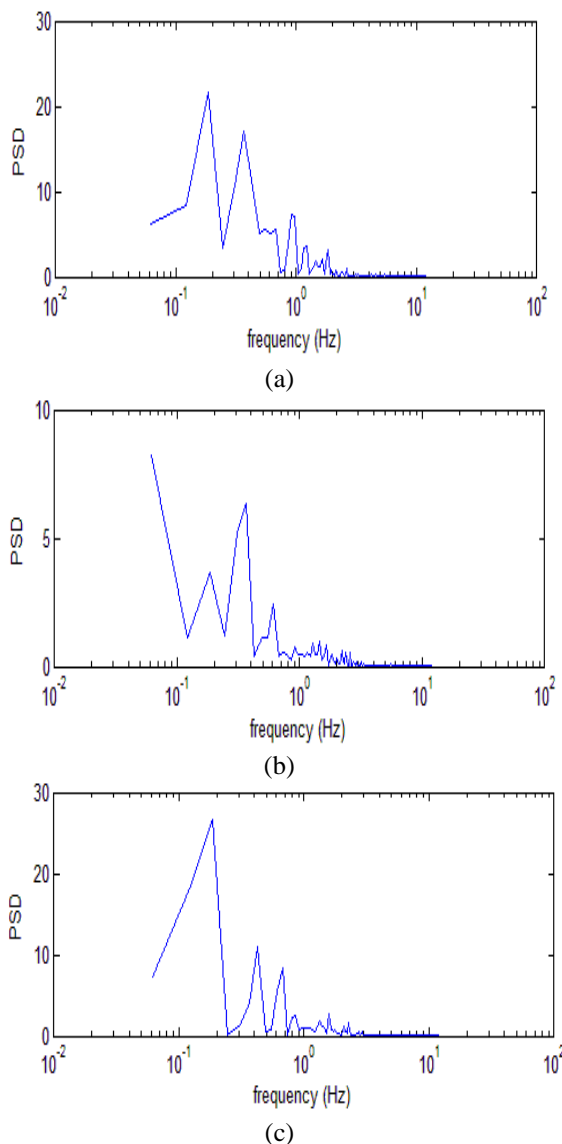
Gambar 5. *Probability Distribusi Fuction* pada aliran *slug* (a)  $J_L = 0,39$  m/s dan  $J_G = 0,71$  m/s,  
 (b)  $J_L = 0,39$  m/s dan  $J_G = 3,55$  m/s,  
 (c)  $J_L = 0,68$  m/s dan  $J_G = 0,71$  m/s.

Dari hasil *cross correlation* pada gambar 6 pada kecepatan superficial air dan udara yang relative rendah di dapat *time lag* yang relatif besar yang berarti kecepatan gelombangnya relatif kecil. Selanjutnya dengan bertambahnya kecepatan superficial udaraterlihat *time lag* mengecil yang berarti kecepatan gelombang bertambah. Sedangkan pada penambahan kecepatan superficial air didapat *time lag* mengecil yang berarti kecepatan gelombang bertambah. Hasil analisis data ini menunjukkan dimana kecepatan gelembung udara sebagai bagian dari pembentuk kecepatan gelombang pada aliran *slug* akan bertambah sejalan dengan pertambahan kecepatan superficial udara dan air.



Gambar 6. *Cross Correlation* pada aliran *plug*

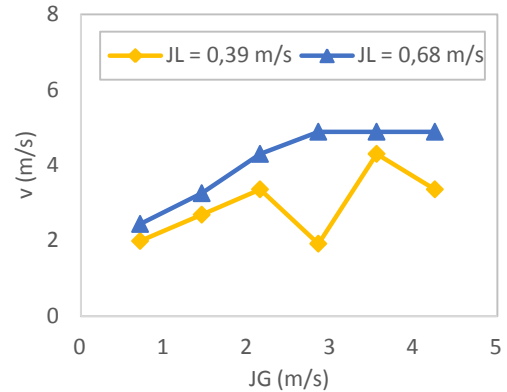
Dari hasil *Power Spectra Density* pada kecepatan superficial air dan udara yang relatif rendah pada gambar 7 (a) terlihat frekuensi gelombang relatif kecil. Pada gambar 7 (b) dengan bertambahnya kecepatan superficial udara tidak terlihat perubahan frekuensi gelombang secara signifikan. Sedangkan pada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



Gambar 7. *Power Spectra Density* pada aliran slug (a)  $J_L = 0,39$  m/s dan  $J_G = 0,71$  m/s, (b)  $J_L = 0,39$  m/s dan  $J_G = 3,55$  m/s, (c)  $J_L = 0,68$  m/s dan  $J_G = 0,71$  m/s.

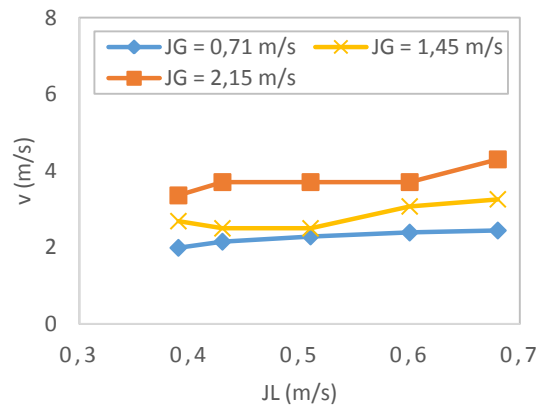
Kecepatan gelombang dari suatu aliran sangat tergantung pada masing-masing kecepatan superficial

dari fluida. Pada gambar 8 menunjukkan dimana kecepatan gelombang sangat dipengaruhi kecepatan superficial gas, terlihat jelas ketika kecepatan superficial gas meningkat, maka kenaikan kecepatan gelombang sangat besar.



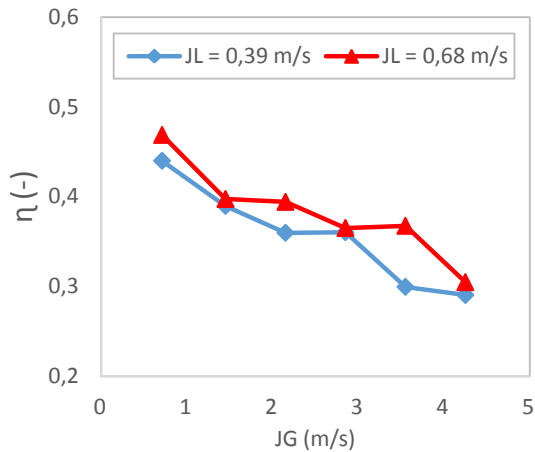
Gambar 8. Kecepatan gelombang dengan variasi  $J_G$

Penambahan kecepatan superficial dari cairan juga akan berpengaruh pada kecepatan gelombang, hanya saja tidak begitu mencolok, seperti terlihat pada gambar 9 di bawah ini.

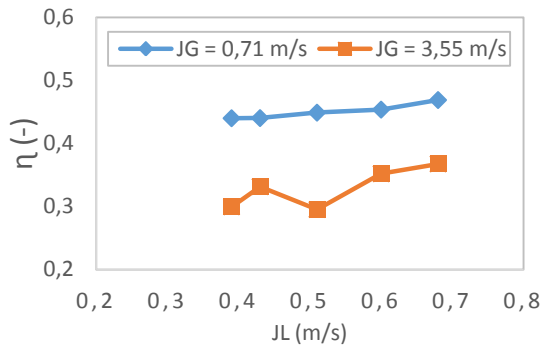


Gambar 9. Kecepatan gelombang dengan variasi  $J_L$

Kenaikan kecepatan superficial gas juga berpengaruh terhadap penurunan dari liquid hold-up rata-ratanya yang tampak pada gambar 10, hal ini dikarenakan cairan terbawa oleh gas yang mengalir dengan cepat.

Gambar 10. Liquid hold-up rata-rata variasi  $J_G$ 

Sementara itu kenaikan kecepatan superfisial cair akan menambah liquid hold-up rata-ratanya, seperti pada gambar 11.

Gambar 11. Liquid hold-up rata-rata variasi  $J_L$ 

## KESIMPULAN

Dari penelitian dapat disimpulkan bahwa :

1. Metode *Constant Electric Current Method* (CECM) dapat digunakan untuk mengukur karakteristik *liquid hold-up* terhadap fungsi waktu dengan nilai amplitudo yang sangat kecil. Nilai ini dapat terlihat jelas pada kecepatan superfisial gas yang tinggi.
2. Kenaikan kecepatan superfisial gas akan membuat udara terdispersi ke dalam cairan sehingga kantong udara akan semakin panjang.
3. Pengaruh kecepatan superfisial cairan akan membuat kantong semakin memendek dan jumlahnya akan semakin bertambah
4. Semakin besar kecepatan superfisial gas, maka nilai *liquid hold-up* akan semakin rendah pula, sedangkan untuk kecepatan gelombangnya akan semakin besar.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh DIKTI melalui hibah Pascasarjana UGM tahun anggaran 2012.

## DAFTAR PUSTAKA

- 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).
- Okto Dinaryanto, dkk., Visualisasi dan Signal Processing Data Liquid Hold-up Aliran Plug Air Udara Pada Pipa Horizontal
- 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)