

Pengaruh Diameter Pipa terhadap Sifat-Sifat Aliran *Slug* Air-Udara pada Pipa Horizontal

Okto Dinaryanto^{1,a*}, Yuli Purwanto^{2,b}, Deendarlianto^{3,c}, Indarto^{4,d}

¹ Program S3 Ilmu Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia.

² Program S2 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia.

^{3,4} Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia.

^aoktodinaryanto@yahoo.co.id, ^bjoeli_8783@yahoo.com, ^cdeendarlianto@ugm.ac.id, ^dindarto@ugm.ac.id

Abstrak

Aliran *slug* amatlah dihindari karena menyebabkan pipa pecah, kerusakan struktur akibat getaran, atau memicu terjadinya korosi akibat kavitas. Untuk itu diperlukan pemahaman mendalam mengenai perilaku pola aliran *slug* dari parameter-parameter utama seperti: kecepatan, frekuensi, dan *liquid hold-up* yang dipengaruhi oleh diameter pipa. Penelitian ini membahas tentang pengaruh diameter terhadap karakteristik aliran *slug* melalui studi visualisasi maupun metode *signal processing*. Metodologi yang digunakan adalah kaji eksperimental visualisasi dan pengukuran *liquid hold-up* menggunakan *Constant Electric Current Method* (CECM). Pencampuran udara dan air menggunakan *mixer* dengan pipa *porous*. Pipa acrylic transparan dengan diameter dalam 26 mm dan 50 mm digunakan agar perilaku aliran dapat diamati secara visual menggunakan kamera video kecepatan tinggi. Sinyal dari sensor CECM dikuatkan dengan amplifier, kemudian diubah oleh *Analog to Digital Converter* dan kemudian diubah menjadi data *liquid hold-up*, kecepatan, dan frekuensi *slug*. Hasil penelitian pada kedua diameter pipa menunjukkan *liquid hold-up* rata-rata berkurang terhadap peningkatan kecepatan superfisial udara dan meningkat terhadap kenaikan kecepatan superfisial air. Selanjutnya kecepatan gelombang meningkat terhadap peningkatan kecepatan superfisial air dan udara. Sedangkan untuk frekuensi gelombang hanya meningkat terhadap kecepatan superfisial air saja. Diameter pipa berpengaruh terhadap *liquid hold-up* rata-rata, kecepatan, dan frekuensi gelombang aliran *slug*.

Kata kunci : Aliran *slug*, *Constant Electric Current Method* (CECM), *Liquid hold-up*, Kecepatan gelombang, Frekuensi gelombang.

Latar belakang

Aliran *slug* cair-gas dua-fase banyak ditemui pada berbagai aplikasi industri antara lain transportasi fluida menggunakan pipa, pembangkit tenaga listrik, alat penukar kalor, proses pada industri kimia, proses pengolahan minyak, reaktor nuklir, sistem refrigerasi dan tata udara. Aliran *slug* terjadi ketika laju aliran gas yang tinggi yang mengakibatkan gelombang mencapai bagian atas pipa dan membentuk kantung fase cair dan juga kantung fase gas. Kantung fase cair kemudian terbawa oleh aliran gas dengan kecepatan tinggi.

Keberadaan aliran *slug* dapat menjadi masalah bagi operator dan desainer. Pembentukan, pertumbuhan, dan lenyapnya pola aliran *slug* sangatlah komplek [1]. Hal ini menimbulkan perubahan tekanan yang besar dan mendadak serta dapat menyebabkan pipa pecah. Bahaya lain pada aliran *slug* adalah frekuensi aliran ini dapat beresonansi dengan struktur perpipaan dan

menyebabkan kerusakan parah. Selain itu momentum yang besar pada kantong cairan tersebut akan menyebabkan gaya yang besar ketika melewati siku, sambungan-T, katup, sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada struktur. Pada kasus produksi dan transportasi hidrokarbon kehadiran aliran *slug* dapat menimbulkan dan meningkatkan kecepatan korosi [2]. Kehadiran aliran *slug* pada reaktor nuklir pada *fenomena direct contact condensation* selama terjadi *loss of coolant accident* di mana uap jenuh akan terkondensasi karena injeksi air dingin pada *hot leg*. Selanjutnya akan menyebabkan gelembung-gelembung yang terperangkap pada bagian belakang *slug* terkondensasi. Hal ini menyebabkan kenaikan tekanan yang tinggi atau disebut *water hammer* dan menyebabkan kerusakan pada reaktor [3].

Diameter pipa yang berbeda akan memberikan karakteristik aliran *slug* yang berbeda [4,5,6,7].

Namun demikian beberapa peneliti tersebut masih berbeda pendapat tentang pengaruh diameter tersebut terhadap jenis dan besarnya parameter aliran *slug* yang dipengaruhinya. Sehubungan dengan hal tersebut maka perlu dipelajari pengaruh diameter pipa terhadap sifat-sifat aliran *slug* dan mekanisme yang mempengaruhinya.

Metodologi

Penelitian ini menggunakan metoda visualisasi dan signal *processing* yang digunakan untuk mengkaji bentuk dan kecepatan topologi dan karakteristik aliran *slug*. Fasilitas yang digunakan berada di Laboratorium Mekanika Fluida, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada dengan skema pada gambar 1. Pada penelitian ini pipa acrylic transparan dengan diameter dalam 26 mm dan 50 mm digunakan agar perilaku aliran dapat diamati. Panjang pipa sebelum seksi uji didesain lebih dari 200 diameter pipa agar menjamin aliran berkembang penuh. Panjang pipa seksi uji untuk visualisasi 1 m dan untuk *liquid hold-up* 1,72 m. Untuk mengukur *liquid hold-up* digunakan sensor *Constant Electric Current Method* (CECM) sebanyak 3 buah dengan jarak radial antar sensor 215 mm guna menjamin sensor dapat membaca panjang gelombang [8]. Sensor CECM terdiri dari sepasang elektroda kuningan dengan tebal 1 mm dan jarak antar elektroda 5 mm. Pada ujung-ujung seksi uji dipasang elektroda yang berfungsi untuk mengalirkan arus listrik konstan yang berasal dari power suplai. Sinyal *liquid hold-up* dari sensor dikuatkan dengan amplifier, kemudian diubah oleh *Analog to Digital Converter (ADC)* agar dapat dibaca oleh komputer.

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

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

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.

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

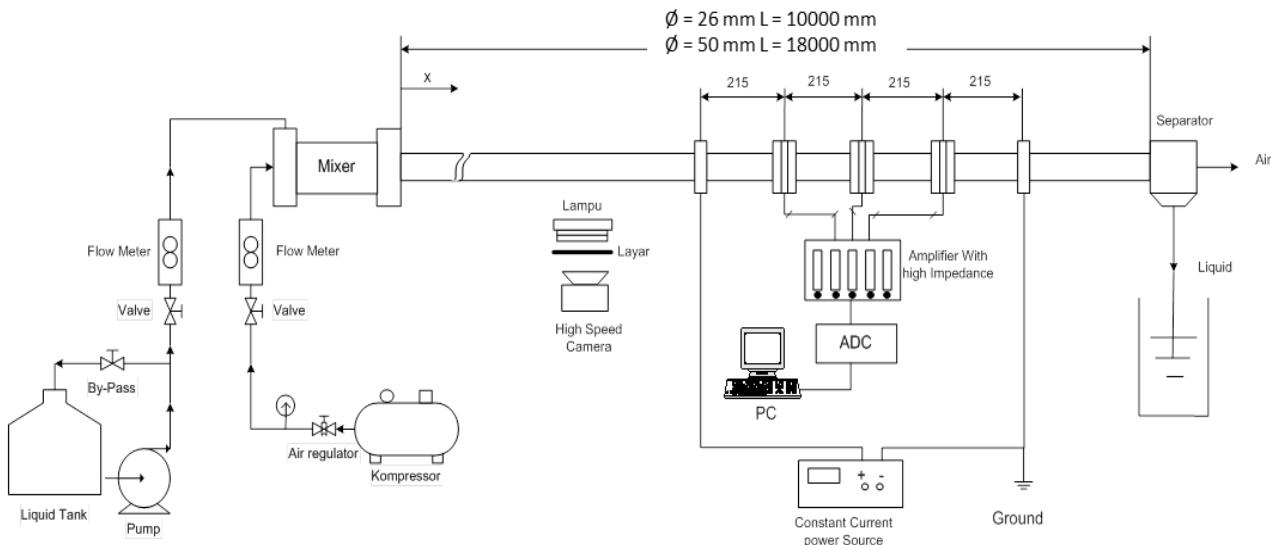
$$\eta_0 = \frac{I_0 R_L}{I_0 R_{TP0}} = \frac{V_L}{V_{TP0}} \quad (3)$$

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

$$\eta = \frac{I_0 R_{TP0}}{I_0 R_L} \eta_0 = \frac{V_{TP0}}{V_{TP}} \eta_0 \quad (4)$$

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

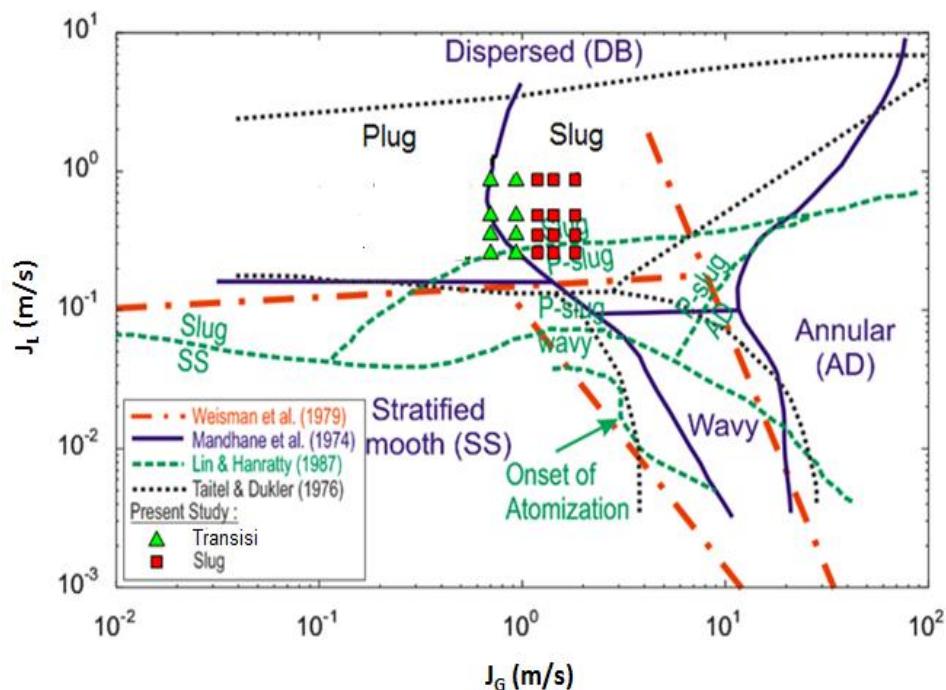
Pada analisa sinyal, sinyal rangkaian waktu yang dikumpulkan dianalisa secara statistik/*stochastic* untuk mendapatkan informasi yang diinginkan. Pada analisa *Power Spectra Density* aliran *slug* akan mempunyai nilai frekuensi dominan yang merupakan frekuensi gelombang aliran *slug*. Sedangkan rata-rata keterlambatan waktu (*time lag*) antara dua sensor *liquid hold-up* dapat dihitung dari fungsi *cross correlation*. Dalam rangka memverifikasi hasil dari CECM yang terekam dikomputer dilakukan pengamatan visual menggunakan *high speed video camera*.



Gambar 1. Skema alat penelitian

Penelitian pada kondisi atmosfir dan diasumsikan sistem tidak dipengaruhi lingkungan dan tidak terjadi perpindahan kalor. Variabel pada penelitian ini meliputi kecepatan superficial air (J_G) dari 0,25 m/s sampai 0,77 m/s dan kecepatan

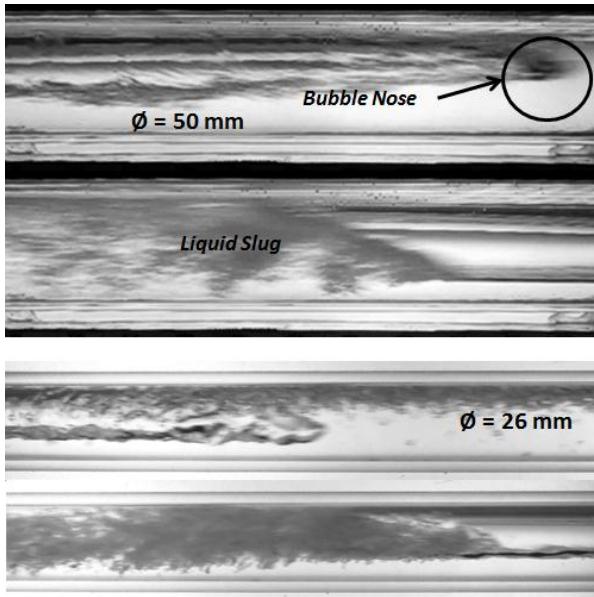
superfisial udara (J_G) dari 0,7 m/s sampai 1,88 m/s dan selanjutnya dibandingkan dengan peta pola yang ada. Pada gambar 2 terlihat kesesuaian antara hasil penelitian ini dengan peta pola aliran dari beberapa peneliti terdahulu [5,6,7,9].



Gambar 2. Data Eksperimen \triangle Transisi, \blacksquare Slug

Hasil

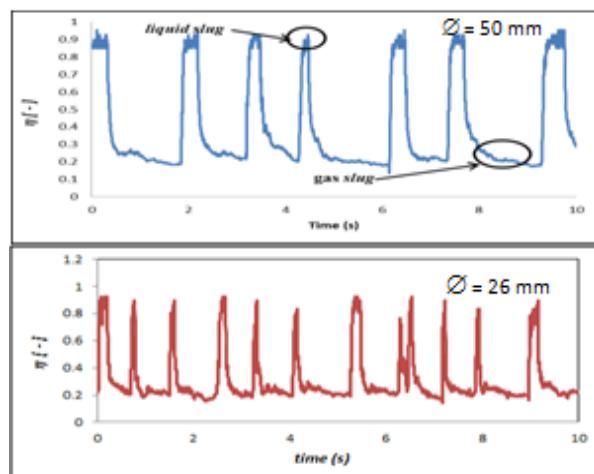
Pada gambar 3 terlihat karakteristik visual dari aliran *slug* ditandai dengan aerasi di *liquid slug* yang merata pada kecepatan gas yang tinggi.



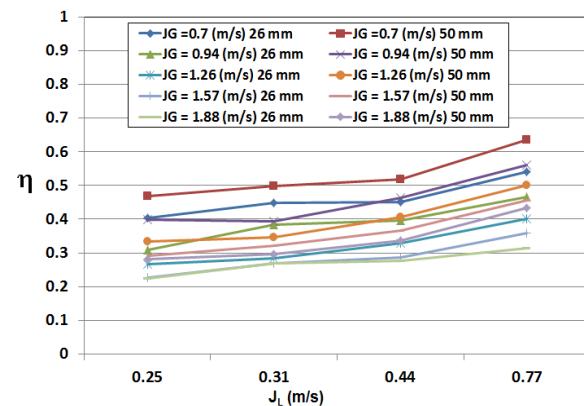
Gambar 3. Contoh visualisasi aliran *slug* ($J_L=0,77\text{ m/s}$ dan $J_G=1,88\text{ m/s}$) pada pipa 50 mm dan 26 mm.

Bentuk topologi untuk kedua diameter tersebut hampir serupa namun terlihat bahwa pada pipa 26 mm *bubble nose* menuju ketengah pipa karena pengaruh gesekan pada dinding pipa lebih dominan pada pipa kecil dan aerasi terlihat lebih merata. Hal tersebut karena turbulensi pada bagian muka *slug* tersebut lebih besar untuk pipa diameter kecil. Selain itu pada pipa diameter besar pengaruh dari stabilisasi gravitasi akan lebih dominan. Oleh karena beberapa hal tersebut maka *slug* akan lebih mudah terbentuk pada pipa dengan diameter yang lebih kecil.

Dilihat dari karakteristik transien *liquid hold-up slug* seperti pada gambar 4, 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. Mendukung pengamatan visual bentuk karakteristik *liquid hold-up* adalah serupa untuk pipa 26 mm dan 50 mm. Perbedaannya adalah pada pipa 26 mm *liquid slug* cenderung lebih runcing dan variatif ketinggiannya yang menunjukkan aerasi yang lebih merata. Selain itu jumlah *slug* persatuan waktu juga lebih banyak untuk pipa yang lebih kecil.



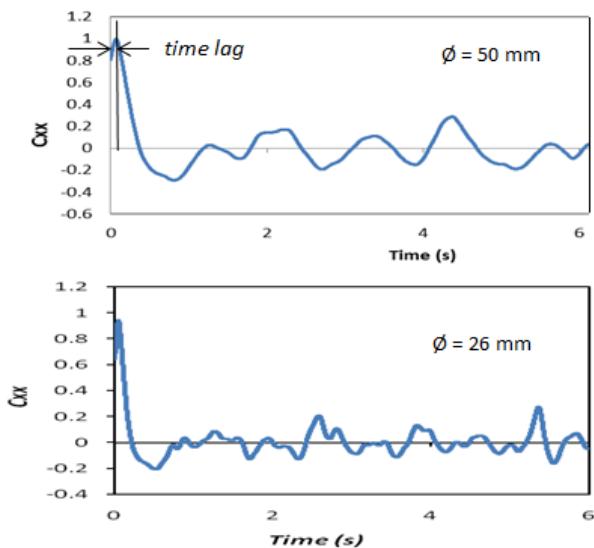
Gambar 4. Karakteristik *liquid hold-up* aliran *slug* ($J_L=0,77\text{ m/s}$ dan $J_G=1,88\text{ m/s}$) pipa 50 mm dan pipa 26 mm.



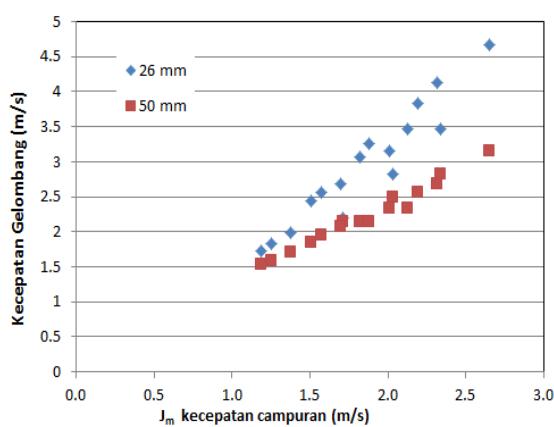
Gambar 5. Rata-rata *liquid hold-up* aliran *slug* pada pipa 50 mm dan 26 mm.

Pada gambar 5 terlihat pada pipa 50 mm maupun 26 mm, jika nilai kecepatan superfisial air (J_L) dijaga konstan dan nilai kecepatan superfisial udara (J_G) bertambah maka nilai *liquid hold-up* rata-rata cenderung semakin turun. Sedangkan pada nilai kecepatan superficial air (J_L) yang semakin besar dengan nilai kecepatan superfisial udara (J_G) yang konstan akan menyebabkan *liquid hold-up*-nya semakin naik. Selanjutnya pada pipa 50 mm terlihat nilai rata-rata *liquid hold-up* lebih besar dimana hal ini dapat disebabkan karena *gas slug* lebih terkompresi diameter yang lebih besar.

Kecepatan gelombang rata-rata ditentukan dari keterlambatan waktu (*time lag*) pada puncak pertama dari fungsi *cross correlation* antara dua sensor seperti yang terlihat pada gambar 6.



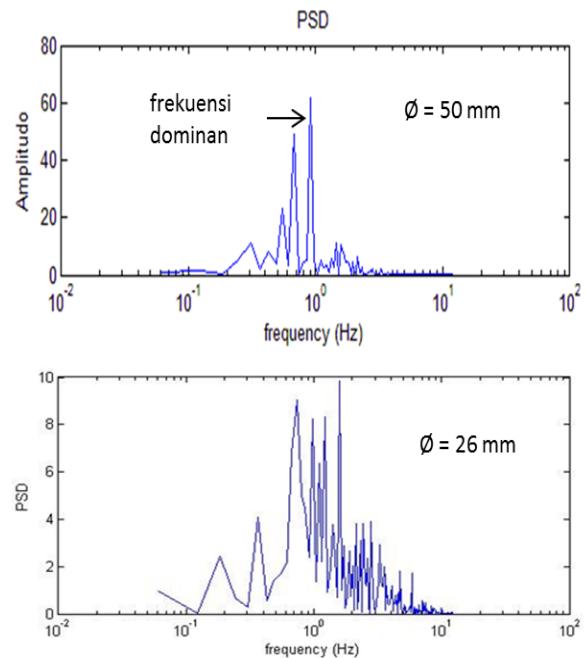
Gambar 6. Contoh *cross correlation* aliran *slug* ($J_L=0,77\text{m/s}$ dan $J_G=1,88\text{m/s}$) pada pipa 50 mm dan 26 mm.



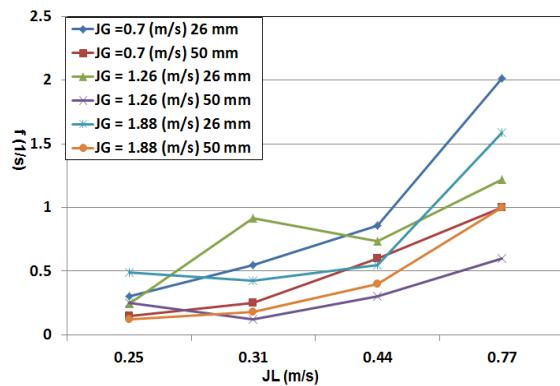
Gambar 7. Grafik kecepatan gelombang *slug* terhadap kecepatan campuran.

Pada gambar 7 terlihat bahwa kenaikan kecepatan campuran (J_m) yang merupakan penjumlahan dari superfisial udara (J_G) dan kecepatan superfisial air (J_L) akan menyebabkan kecepatan gelombang meningkat. Pada pipa 50 mm terlihat nilai kecepatan gelombang lebih kecil. Hal ini dapat disebabkan karena gas *slug* bergerak dengan kecepatan lebih lambat untuk pipa dengan diameter yang lebih besar.

Power Spectra Density (PSD) merupakan metode untuk menggambarkan sinyal dalam frekuensi domain dengan menggunakan *fast fourier transform* dimana frekuensi yang paling dominan adalah frekuensi yang mempunyai magnitude PSD terbesar seperti yang terlihat pada gambar 8.



Gambar 8. Contoh *Power Spectra Density* aliran *slug* ($J_L=0,77\text{m/s}$ dan $J_G=1,88\text{m/s}$) pada pipa 50 mm dan 26 mm.



Gambar 9. Grafik frekuensi gelombang *slug* terhadap kecepatan superfisial udara dan air.

Pada gambar 9 terlihat pada kedua pipa frekuensi gelombang *slug* akan cenderung naik jika kecepatan superfisial air (J_L) diperbesar. Sedangkan pengaruh perubahan kecepatan superfisial udara (J_G) tidaklah signifikan terhadap frekuensi gelombang. Selanjutnya pada pipa 26 mm mempunyai frekuensi *slug* yang lebih besar dibanding 50 mm. Hal ini menunjukan bahwa diameter pipa sangat berpengaruh terhadap frekuensi *slug*.

Kesimpulan

Dari hasil penelitian pada kedua diameter dapat disimpulkan bahwa *liquid hold-up* rata-rata berkurang terhadap peningkatan kecepatan superfisial udara dan meningkat terhadap kenaikan

kecepatan superfisial air. Selanjutnya kecepatan gelombang meningkat terhadap peningkatan kecepatan superfisial air dan udara. Sedangkan untuk frekuensi gelombang meningkat terhadap kecepatan superfisial air saja. Diameter pipa berpengaruh terhadap *liquid hold-up* rata-rata, kecepatan, dan frekuensi gelombang *slug*.

Referensi

- [1] Ujang, P.M., Lawrence, C. J., Hale, C.P., Hewitt, G.F., Slug Initiation and Evolution in Two-Phase Horizontal Flow, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 32, (1996) 527-552.
- [2] Villarreal, J., Laverde, D., Fuentes, C., Carbon-steel corrosion in multiphase slug flow and CO₂, *Corrosion Science* 48 (2006) 2363–2379.
- [3] Strubelj, L., Ezsol, G. Tiselj, I., Direct Contact Condensation Induced Transition From Stratified to Slug Flow, *Nuclear Engineering and Design*, 240 (2010) 266-274.
- [4] Jepsont., W,P and R.E., Taylor., Slug Flow and Its Transitions in Large-Diameter Horizontal Pipes, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.19, (1993) 411-420.
- [5] Lin, P.Y. and Hanratty, T.J., Effect of pipe diameter on flow patterns for air-water flow in horizontal pipes, *Int. J. Multiphase Flow* Vol. 13, No.4 (1987) 549-563.
- [6] Taitel, Y. and Duckler, A. E., A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow, *AIChE Journal*, Vol. 22, No. 1 (1976) 47-55.
- [7] Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J., and Crawford, T., Effect of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines. *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 5, (1978) pp. 437-462.
- [8] 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*, (1998) 363-377.
- [9] 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, (1974) pp. 537-553.