

ANALISIS MEKANISME ALIRAN PLUG AIR- UDARA DENGAN CECM BERDASARKAN PERUBAHAN DIAMETER INLET PIPA (ANALYSIS OF WATER-AIR PLUG FLOW MECHANISM BY CECM BASED ON CHANGE OF PIPE INLET DIAMETER)

Bilhan Gamaliel Hartanto

Program Studi S-1 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Krisnadwipayana
Jl. Kampus Unkris Jatiwaringin. Jakarta 13077, Indonesia

e-mail : hartantobilhan@gmail.com

ABSTRAK

Pola aliran *plug* merupakan transisi pola aliran dari *stratified* menuju *slug*. Pola aliran *plug* memiliki kemiripan karakteristik dengan aliran *slug* yang dapat berpotensi bahaya dalam sistem struktur reaktor nuklir pada kasus *Loss of Coolant Accident* (LOCA). Mekanisme terbentuknya pola aliran *plug* telah diteliti dengan memvariasikan kecepatan superfisial gas (JG) dari 0,12 sampai 0,70 m/s dan kecepatan superfisial air (JL) sebesar 0,25 m/s untuk masing-masing diameter pipa uji 16 dan 26 mm. Metoda yang digunakan adalah dengan membandingkan hasil pengukuran dengan metoda CECM (*constant electric current method*) dan visualisasi gambar. Hasil pengukuran dengan metoda CECM digunakan untuk menganalisis *liquid hold up*, *cross correlation*, *Probability Distribution Function* (PDF), dan *Power Spectra Density* (PSD). Analisis dan perbandingan diketahui bahwasemakin besar kecepatan superfisial udara, maka semakin besar kecepatan kantung udara untuk masing-masing diameter pipa. Besarnya *liquid hold-up* terhadap waktu dapat menunjukkan karakteristik *transient* dari aliran *plug*.

Kata kunci: Aliran *plug*, Diameter pipa, *Constant electric current method* (CECM).

PENDAHULUAN

Aliran multi fase dapat ditemukan pada sistem perpipaan di berbagai bidang industri seperti di industri minyak bumi, pembangkit listrik tenaga panas bumi, pembangkit listrik tenaga nuklir, industri kimia, dll. Pada aliran tersebut pola aliran *slug* dapat mengakibatkan kerusakan struktur akibat terjadi perbedaan tekanan yang cukup besar pada aliran tersebut. Aliran *slug* di pipa horisontal terjadi karena gesekan yang terjadi antara *liquidslug* dengan penampang dalam pipa bagian atas dan pipa bagian bawah, serta slip antar fase. Gesekan inilah yang menyebabkan fluktuasi perbedaan tekanan lokal (ΔP) menjadi semakin besar sehingga dapat menyebabkan pipa pecah.

Salah satu contoh aliran *slug* terjadi pada sistem pendingin di sistem reaktor nuklir. Tekanan air yang sangat tinggi untuk proses pendinginan tersebut dinamakan *Pressurized Water Reactors* (PWR). Kecelakaan akibat dari adanya aliran *slug* tersebut salah satunya adalah *Loss of Coolant Accident* (LOCA). Aliran *slug* berpotensi bahaya di sistem struktur reaktor nuklir dengan tingkat tekanan yang kuat. Hal ini ditandai dengan adanya percepatan berubahnya fase gas dan transisi aliran *slug* secara cepat dengan energi kinetik yang tinggi. Parameter yang mempengaruhi aliran utama *slug* adalah : panjang *slug*, frekuensi, kecepatan propagasi dan *pressure drop*.

Peta pola aliran di dalam pipa horizontal telah diusulkan oleh : Baker (1954) [1], Mandhane (1974) [2], dan Taitel dan Dukler (1976) [3]. Tetapi, peta pola aliran yang telah dibuat tersebut, tidak dapat digunakan sebagai acuan secara umum karena banyaknya parameter yang harus dibandingkan, misalnya : kecepatan superficial, viskositas, densitas, tegangan permukaan, geometri pipa dan percepatan gravitasi. Dalam beberapa penelitian, sebagian ilmuwan memfokuskan untuk mengetahui pengaruh diameter di pipa ujinya. Biasanya dilakukan pada dua pipa atau lebih. Ini berguna untuk mengetahui percepatan transisi dari pola aliran *stratified* hingga *slug*. Pola aliran transisi dari pola aliran *stratified* hingga *slug* sering disebut sebagai aliran *plug*. Pola aliran *plug* memiliki kemiripan karakteristik dengan aliran

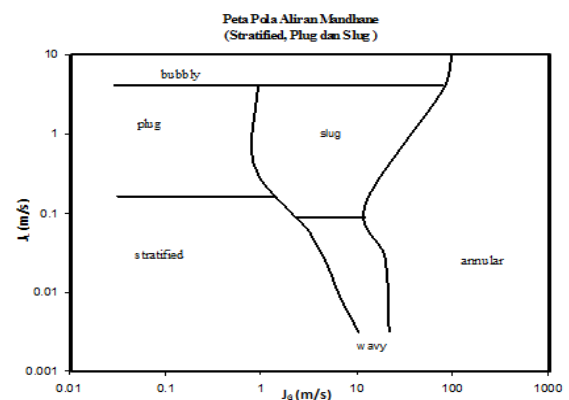
slug. Pola aliran *plug* merupakan bagian dari aliran *slug*.

Banyak metoda yang digunakan untuk mengetahui mekanisme terbentuknya pola aliran dalam aliran multi fase, salah satu metoda yang telah dikembangkan oleh Fukano (1998) [4] adalah CECM (*constant electric current method*). CECM merupakan metoda untuk mengetahui pola aliran dan sifatnya melalui analisis sinyal dan metode konduktansi berdasarkan perbedaan konduktivitas fluida dan gas. CECM menggunakan arus daya listrik yang konstan. Keunggulan CECM adalah keluaran elektroda sensor tidak tergantung pada lokasi fase gas, lebih sensitif mendeteksi perubahan *liquid hold up* dan mudah berinteraksi dengan mengabaikan kedua elektrodanya.

Berdasarkan uraian diatas mengenai pentingnya pengetahuan tentang aliran *slug* khususnya untuk pola aliran *plug* dalam perbedaan diameter pipa, serta keunggulan dari metoda CECM, maka dilakukan penelitian dengan memvariasikan diameter pipa sehingga didapat pengaruh diameter pipa terhadap mekanisme terbentuknya aliran *plug*. Ini dapat diketahui dari analisis *liquid hold up*, *cross correlation*, *Probability Distribution Function* (PDF), dan *Power Spectra Density* (PSD) dengan metoda CECM serta membandingkan dengan hasil visualisasi gambar.

Dasar Teori

Peta pola aliran berdasarkan pemetaan Mandhane adalah sebagai berikut :



Gambar 1. Peta Mandhane *Constant Electric Current Method* (CECM)

Constant Electric Current Method (CECM) adalah pengembangan dari metode konduktansi. Karakteristik dari CECM adalah arus konstan digunakan sebagai sumber tenaga listrik. Keutamaan CECM adalah keluaran elektroda sensor tidak tergantung pada lokasi fase gas, sensitivitas mendeteksi perubahan *hold up* lebih tinggi, dan bisa mengabaikan interaksi antara kedua elektroda.

CECM diaplikasikan dari sepasang elektroda. Lokasi sensor untuk mendeteksi waktu fluktuasi *hold up* dipisahkan dari elektroda tenaga. Jarak antara elektroda tenaga harus dipertimbangkan dan sensor elektroda dipasang diantara elektrode tenaga. Prinsip kerja dari CECM di dasarkan atas perbedaan tahanan pada cairan dan gas. Tahanan listrik aliran dua fase, R_{TP} , dalam unit panjang dari saluran diekspresikan sebagai berikut :

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

Dimana R_G dan R_L adalah tahanan listrik fase gas dan liquid yang masing-masing menempati bidang potongan pipa. *Liquid hold-up* (η) diekspresikan dalam unit panjang (V_{TP}) pada saat arus konstan (I_0) dicatukan.

$$\eta = \frac{R_L}{R_{TP}} = \frac{I_0 R_L}{I_0 R_{TP}} = \frac{V_L}{V_{TP}}$$

Dimana V_L adalah tegangan yang hilang saat cairan yang mengalir menempati sejumlah area dari pipa. 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 pada nilai yang sama dengan persamaan diatas, maka persamaannya :

$$\eta_0 = \frac{I_0 R_L}{I_0 R_{TP0}} = \frac{V_L}{V_{TP0}}$$

Analisis Sinyal

Untuk analisis sinyal, rangkaian waktu yang dikumpulkan kemudian dianalisis secara statistik untuk mendapatkan informasi yang akurat. Jenis perhitungan statistik yang digunakan adalah *mean value of the signal*, *Standard Deviation (SD)*, *Coefficient of*

Skewness, *Coefficient of Kurtosis*, dan *Probability Distribution Frequency (PDF)*. Rata-rata keterlambatan waktu (*time lag*) antara dua sensor *liquid hold-up* dapat dihitung dengan fungsi *cross correlation*, yaitu :

$$\pi_{12}(\tau) = \frac{R_{12}(\tau)}{[R_{11}(\tau)R_{22}(\tau)]^{1/2}}$$

Dimana π_{12} adalah fungsi *cross-correlation* yang dinormalisasi dan τ adalah *time lag* antara dua sinyal *liquid hold-up*. Fungsi *cross correlation* R dimana E adalah nilai rata-rata diberikan sebagai berikut :

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

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

$$P_{xx}^i(f) = \frac{1}{N_s U} \left| \sum_{n=1}^{N_s} x_i(n) w(n) \exp(-j2\pi f n) \right|^2$$

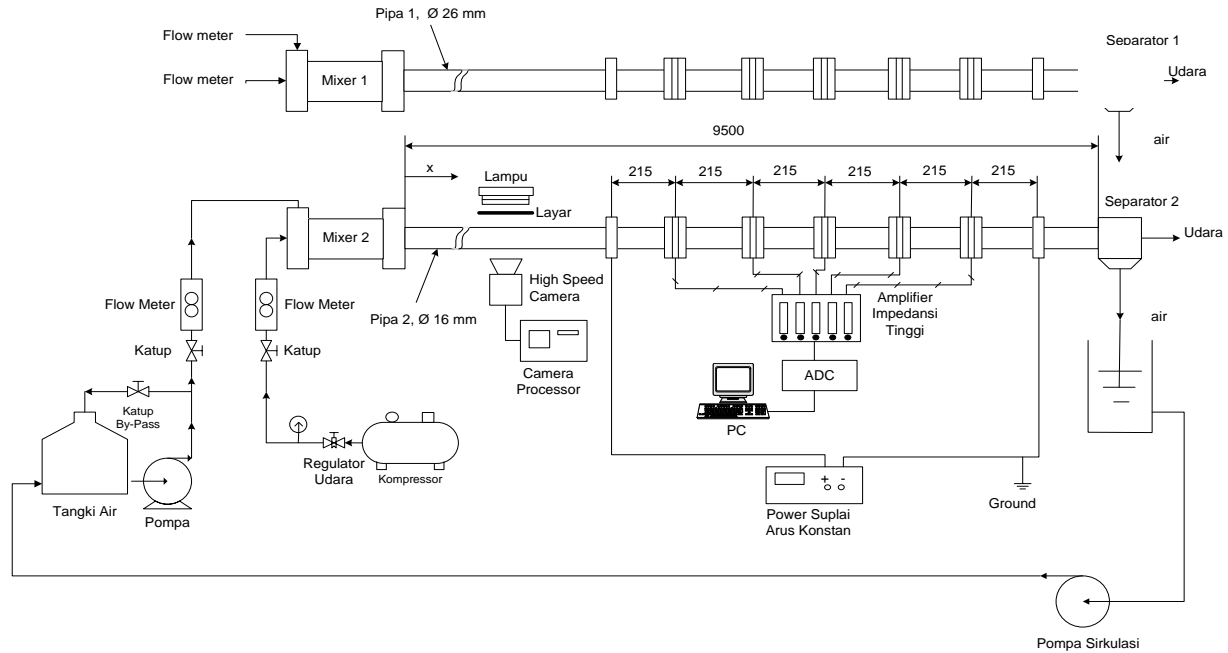
Dimana U adalah :

$$U = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} w^2$$

METODE PENELITIAN

Peralatan penelitian dirangkai seperti pada gambar berikut, dengan dilengkapi tangki air, pompa, *flowmeter* air dan udara, *high speed camera*, sensor CECM, amplifier, ADC, dan PC komputer. Sensor CECM terbuat dari elektroda kuningan dengan tebal 1 mm dan jarak antar elektroda 5 mm. Variabel penelitian adalah memvariasikan diameter pipa yaitu diameter 16 mm dan 26 mm. Untuk masing-masing diameter pipa, ditentukan nilai (J_L) sebesar 0,25 m/s dengan perubahan nilai (J_G) yang menghasilkan pola aliran *plug* seperti pada tabel.

J_L [m/s]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
J_G [m/s]	0,12	0,18	0,24	0,31	0,51	0,70



Gambar 2. Skema diagram penelitian

Prosedur Penelitian

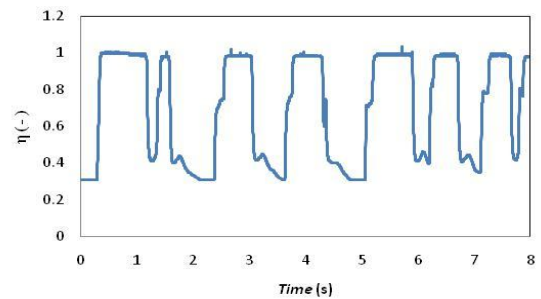
Penelitian diawali dengan membuka perlahan-lahan katup pada *flowmeter* air sampai didapatkan debit tertentu, kemudian dihitung dan dicatat kecepatan superfisial air (J_L) sesuai pada tabel. Dengan menjaga kecepatan superfisial air (J_L) tetap konstan, maka katup udara dibuka secara perlahan-lahan sampai mendapatkan pola aliran *plug*. kemudian diukur debit udaranya dan dihitung serta dicatat kecepatan superfisial gas (J_G). Dalam pengambilan data (J_G) dan (J_L), dilakukan pengambilan gambar dengan kamera video kecepatan tinggi dengan 120 fps dan resolusi 640 x 480 pixel selama 30 detik. Untuk selanjutnya dilakukan beberapa variasi data (J_G) dan (J_L) lainnya. Akuisisi data *time series* dilakukan dengan 500 data perdetik untuk jumlah data hingga 10.000. Dilakukan pencatatan awal untuk arus mula-mula dan tegangan pada saat cairan memenuhi sensor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

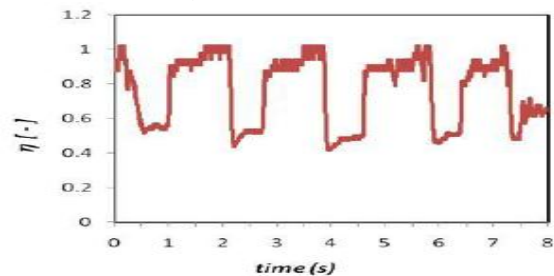
Liquid hold up

Untuk data pembanding diambil data dari pipa uji diameter 26 mm yang telah dilakukan Okto dinaryanto (2012) [5].

Pembahasan *liquid hold up* antara diameter 16 mm dan diameter 26 mm adalah sebagai berikut:



(a) Diameter 16 mm



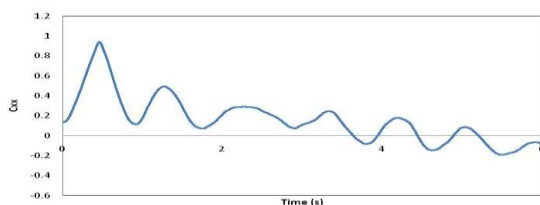
(b) Diameter 26 mm

Gambar 3. *Liquid hold up* dengan $J_L = 0.25$ m/s dan $J_G = 0.12$ m/s.

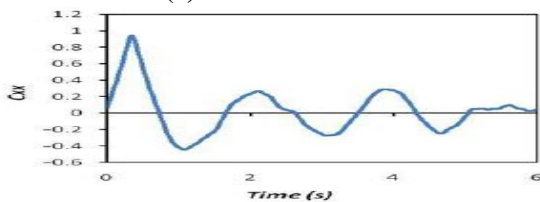
Gambar 3 menjelaskan untuk hasil *liquid hold up* didiameter 16 mm tidak terlihat adanya perubahan dibandingkan didiameter 26

mm pada variasi J_G dan J_L yang sama. Ini menandakan pola aliran yang terbentuk didiameter yang berbeda mempunyai karakteristik yang sama. Hanya sedikit yang mengalami perubahan untuk beberapa gelembungnya. Pola aliran *plug* yang terbentuk dipipa diameter kecil lebih banyak dibandingkan dengan pipa berdiameter 26 mm dengan waktu yang sama. Pada analisis sinyal *liquidhold* up dari sensor CECM, aliran *plug* akan dapat diketahui karakteristik transienya.

Cross correlation



(a) Diameter 16 mm

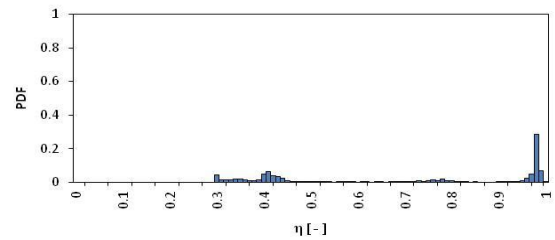


(b) Diameter 26 mm

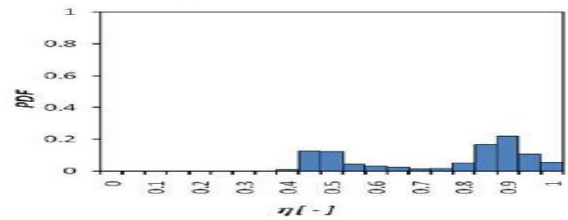
Gambar 4. *Cross correlation* (C_{xx}) dengan $J_L = 0.25$ m/s dan $J_G = 0.12$ m/s.

Gambar 4 menjelaskan untuk hasil *cross correlation* didiameter 16 mm terlihat berbeda dengan hasil *cross correlation* didiameter 26 mm. Perbedaannya untuk mencapai titik konvergen didiameter 16 mm memerlukan waktu yang lama dibandingkan pada pipa berdiameter 26 mm. Ini dikarenakan dua sensor yang bekerja dipipa berdiameter 16 mm mengalami tegangan geser yang sedikit sehingga pola aliran *plug* yang terbentuk lebih banyak sehingga transisi mencapai titik nol membutuhkan waktu yang relatif lebih lama dibandingkan pipa berdiameter 26 mm. Untuk kecepatan superfisial air dan udara yang relatif rendah di dapat *time lag* yang relatif besar yang berarti kecepatan gelombangnya relatif kecil. Selanjutnyadengan bertambahnya kecepatan superfisial air dan udara, maka *time lag* semakin mengecil.

Probability Distribution Function (PDF)



(a) Diameter 16 mm

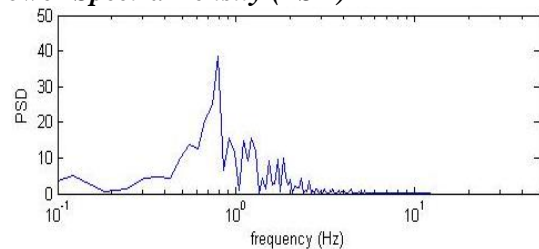


(b) Diameter 26 mm

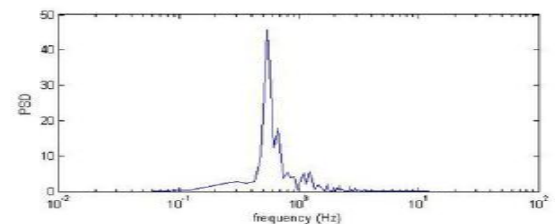
Gambar 5. *Probability Distribution Function* (PDF) dengan $J_L = 0.25$ m/s dan $J_G = 0.12$ m/s.

Gambar5 menjelaskan untuk hasil *Probability Distribution Function* (PDF) dipipa berdiameter 16 mm terlihat lebih mendekati ke titik 1 dibandingkan hasil di pipa berdiameter 26 mm yang cenderung lebih merata. Ini dikarenakan pola aliran *plug* yang terbentuk di pipa berdiameter kecil lebih banyak dibandingkan pola aliran *plug* didiameter besar.

Power Spectra Density (PSD)



(a) Diameter 16 mm



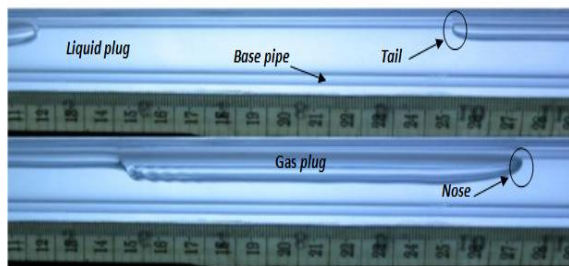
(b) Diameter 26 mm

Gambar 6. *Power Spectra Density*(PSD) dengan $J_L = 0.25$ m/s dan $J_G = 0.12$ m/s.

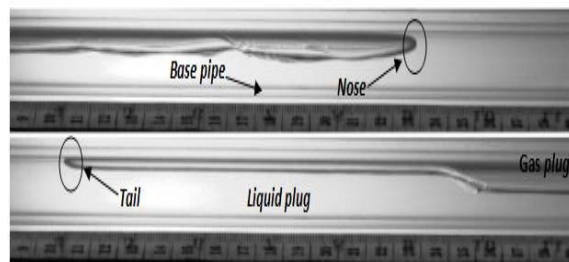
Gambar 6 menjelaskan untuk hasil *Power Spectra Density*(PSD) di pipa berdiameter 16 mm menunjukkan titik awal gelombang di frekuensi 0,6 Hz dengan ketinggian sekitar 38. Hasil *Power Spectra Density*(PSD) di pipa berdiameter 26 mm sedikit berbeda dengan titik awal gelombang di frekuensi 0,7 Hz dengan ketinggian sekitar 48. Dari hasil *Power Spectra Density* untuk kecepatan superfisial air dan udara yang relatif rendah terlihat frekuensi gelombang relatif kecil. Hasil analisis data ini menunjukkan pertambahan frekuensi gelembung udara sebagai bagian dari pembentukan frekuensi gelombang pada aliran *plug*, akan bertambah sejalan dengan penambahan kecepatan superfisial udara dan air.

Visualisasi dan Perbandingan

Untuk hasil visualisasi dilakukan pengamatan dengan menggunakan kamera berkecepatan 240 fps. Ini berguna untuk mendeteksi secara akurat pola aliran *plug* yang terjadi didalam pipa. Untuk hasilnya, gambar 7 menjelaskan di pipa berdiameter kecil pola aliran *plug* yang terbentuk hampir sama dengan pipa berdiameter besar. Ini dikarenakan variasi J_G dan J_L yang sama untuk kedua pipanya.

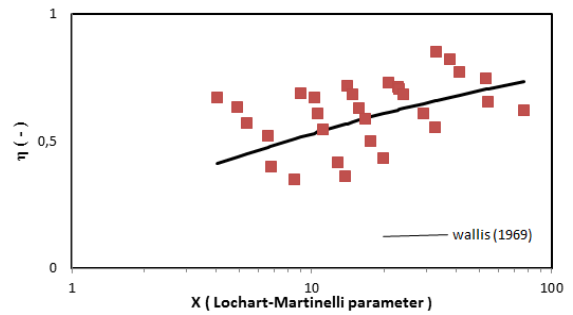


(a) Diameter 16 mm

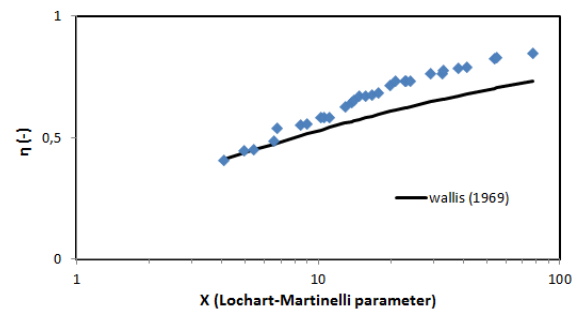


(b) Diameter 26 mm

Gambar 7. Hasil kamera pengamat dengan $J_L = 0.25$ m/s dan $J_G = 0.12$ m/s.



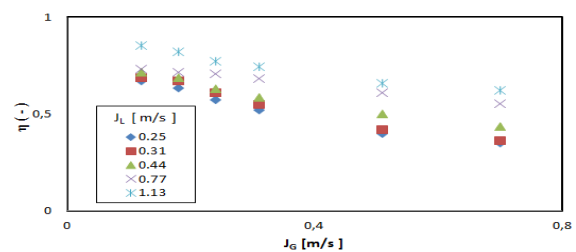
(a) Diameter 16 mm



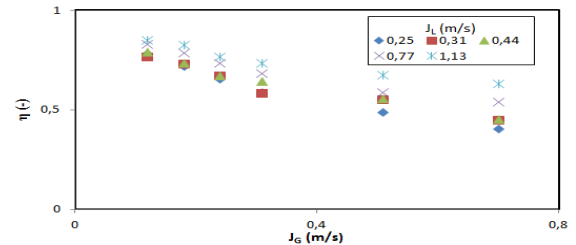
(b) Diameter 26 mm

Gambar 8. *Liquid hold up* rata-rata berdasarkan parameter Lochart-Martinelli.

Gambar 8 menjelaskan nilai *liquid hold up* rata-rata masih berada di area parameter Lochart-Martinelli. Ini menandakan aliran *plug* yang terjadi sesuai dengan transisinya.



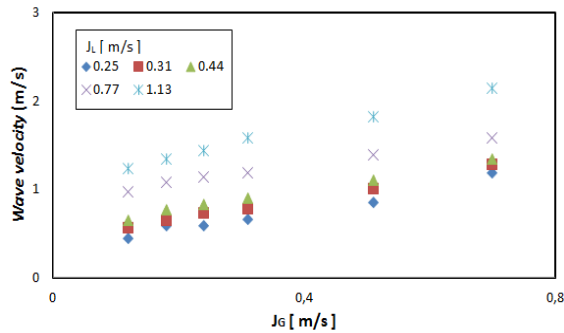
(a) Diameter 16 mm



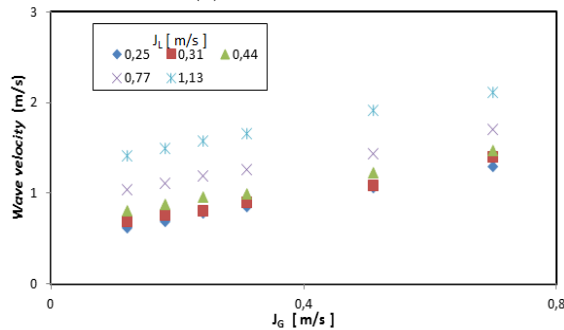
(b) Diameter 26 mm

Gambar 9. Hubungan kecepatan superfisial udara (J_G) dan kecepatan superfisial air (J_L) terhadap *Liquid Hold up* rata-rata.

Gambar 9 menjelaskan *liquid hold up* rata-rata yang ada, dengan bertambahnya kecepatan superfisial gas (J_G), maka semakin rendah untuk kecepatan superfisial airnya (J_L).



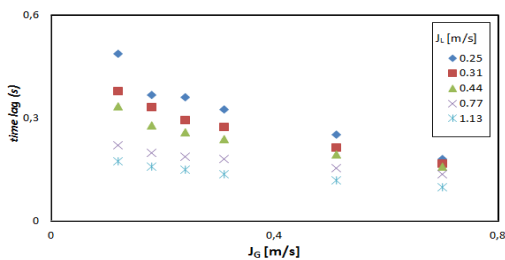
(a) Diameter 16 mm



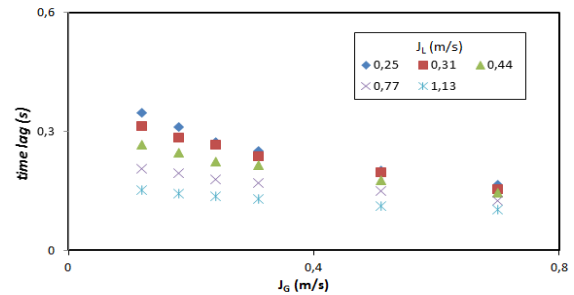
(b) Diameter 26 mm

Gambar 10. Hubungan kecepatan superfisial udara (J_G) dan kecepatan superfisial air (J_L) terhadap kecepatan gelombang (*wave velocity*).

Gambar 10 menjelaskan data kecepatan gelombang yang diambil dari titik puncak fungsi *cross correlation* berbanding dengan jarak antar sensornya. Maka terlihat seiring dengan bertambahnya kecepatan superfisial gas (J_G), maka bertambah tinggi pula untuk kecepatan gelombangnya.

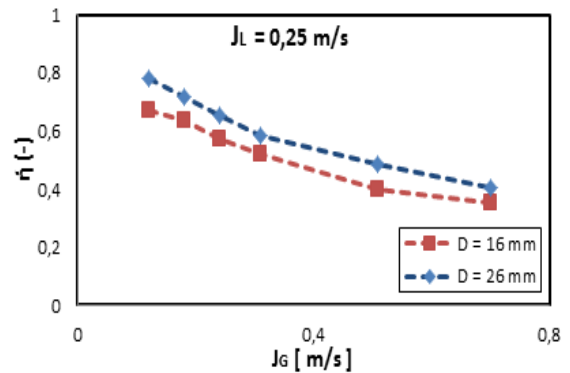


Gambar 11. Hubungan kecepatan superfisial udara (J_G) dan kecepatan superfisial air (J_L) terhadap *time lag* atau waktu keterlambatan rata-rata di diameter 16 mm.



Gambar 12. Hubungan kecepatan superfisial udara (J_G) dan kecepatan superfisial air (J_L) terhadap *time lag* atau waktu keterlambatan rata-rata di diameter 26 mm.

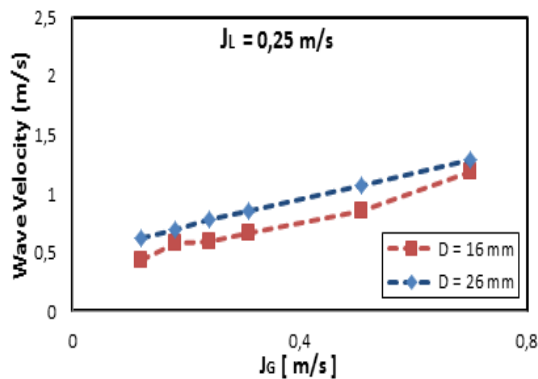
Gambar 11 dan 12 menjelaskan *Time lag* atau waktu keterlambatan rata-rata semua pengujian yang sudah dilakukan. Ini dapat terlihat *time lag* yang semakin turun seiring dengan bertambahnya kecepatan superfisial gas (J_G). Untuk menghitung rata-rata keterlambatan waktu (*time lag*) antara dua sensor dapat menggunakan fungsi *cross correlation* yang selanjutnya digunakan untuk mendapatkan kecepatan gelombang (*wave velocity*).



Gambar 13. Perbandingan *Liquid hold up* rata-rata.

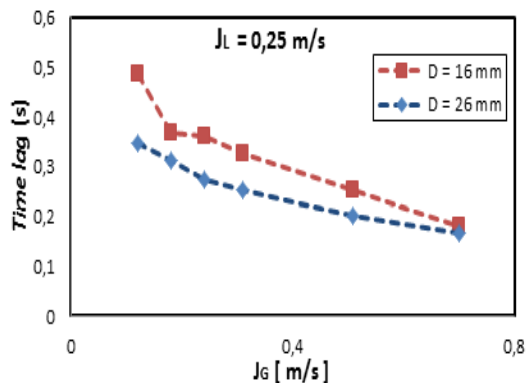
Gambar 13 menjelaskan untuk *Liquid hold up* rata-rata, terlihat lebih tinggi untuk diameter pipa 26 mm dibandingkan dengan diameter pipa 16 mm. Ini menandakan dibutuhkan lebih banyak air dan udara supaya terbentuknya *liquid hold up* yang diinginkan

dengan variasi kecepatan superfisial air (J_L) dan kecepatan superfisial udara (J_G) yang sama



Gambar 14. Perbandingan kecepatan gelombang (wave velocity).

Gambar 14 menjelaskan kecepatan gelombang, terlihat lebih tinggi di pipa berdiameter pipa 26 mm dibandingkan dengan pipa berdiameter pipa 16 mm. Ini menandakan dengan semakin besarnya diameter pipa dapat menghasilkan kecepatan gelombang yang besar juga meskipun dengan variasi kecepatan superfisial air (J_L) dan kecepatan superfisial udara (J_G) yang sama.



Gambar 15. Perbandingan *Time lag* atau waktu keterlambatan rata-rata.

Gambar 15 menjelaskan *time lag* atau waktu keterlambatan rata-rata, terlihat lebih rendah di pipa berdiameter 26 mm dibandingkan dengan pipa berdiameter 16 mm. Ini berhubungan dengan kecepatan gelombang yang besar di pipa berdiameter besar. Semakin besar kecepatan gelombang yang dihasilkan, maka

semakin kecil untuk *time lag* atau waktu keterlambatannya. Untuk kecepatan gelombang di pipa berdiameter 16 mm lebih rendah dibandingkan pipa berdiameter 26 mm, sehingga pembacaan di dua sensor lebih lama dan mengakibatkan *time lag* yang besar.

KESIMPULAN

Dari hasil perbandingan data di pipa berdiameter 16 mm dan 26 mm tidak berbeda jauh secara signifikan. Ini menandakan pola aliran *plug* di diameter yang berbeda dapat terbentuk secara bersamaan dengan variasi kecepatan superfisial air (J_L) dan kecepatan superfisial udara (J_G) yang sama. Untuk *liquid hold up* pada aliran *plug* lebih banyak terbentuk di pipa diameter 16 mm. Untuk hasil *cross correlation* di pipa berdiameter 16 mm membutuhkan waktu yang cukup lama dibandingkan pipa berdiameter 26 mm untuk mencapai titik konvergen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Baker, O. ,1954. Design of Pipelines for Simultaneous Flow of Oil and Gas. *Oil and Gas J.*, July, pp.26.
- [2]. Mandhane, J.M., Gregory, G.A., Aziz, K., 1974. A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal and Inclined Pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 1, pp. 537-553.
- [3]. Taitel, Y. and Duckler, A. E., 1976. A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow. *AIChE Journal*, Vol. 22, No. 1, pp. 47-55.
- [4]. Fukano, T., 1998. 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.
- [5]. Okto dinaryanto., 2012. Visualisasi dan *Signal Processing Data Liquid hold up* Aliran *Plug* Air-udara Pada Pipa Horizontal, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI, Yogyakarta.