

## Studi Eksperimen Mengenai Perilaku Aliran *Stratified* Air Udara Pada Pipa Horizontal

Akhmad Zidni Hudaya<sup>1,a\*</sup>, Rianto Wibowo<sup>1,b</sup>, Masruki Kabib<sup>1,c</sup>, Deendarlianto<sup>2,d</sup> dan Adhika Widyaparaga<sup>2,e</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muria Kudus  
Gondang Manis, Bae, Kudus PO BOX 53, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada.  
Jl. Grafika No. 2 Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia.

<sup>a</sup> zidni01@gmail.com, <sup>b</sup> Riantowibowo\_umk@yahoo.com, <sup>c</sup> maskabib@yahoo.com,

<sup>d</sup>deendarlianto@ugm.ac.id, <sup>e</sup>adhika@ugm.ac.id

### Abstrak

Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui perilaku aliran *stratified* dengan metode visual dan *signal processing*. Visualisasi dan *liquid hold-up* aliran *stratified* udara-air pada pipa horizontal sebagai fungsi waktu (dia. dalam pipa 26,0 mm dan total panjang seksi uji 9,5 m) telah diteliti secara eksperimental. Pada penelitian ini, studi visualisasi dilakukan dari analisa data visual yang dihasilkan kamera video kecepatan tinggi dan perilaku tebal film aliran diteliti dengan mengukur *liquid hold-up* menggunakan *Constant Electric Current Method (CECM)*. Prinsip dari metode ini didasarkan atas perbedaan konduktivitas pada cairan dan gas. Pada penelitian ini digunakan sensor CECM sebanyak 3 buah dengan jarak aksial antar sensor 215 mm. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa : (1). Pola aliran *stratified* dibagi menjadi sub-sub kelas yang meliputi *stratified smooth*, *stratified wavy + ripple*, *Stratified wavy + Roll*, dan *Pseudo-slug*. (2). Nilai *liquid hold-up* rata-rata cenderung turun, jika nilai  $J_G$  semakin besar dan nilai  $J_L$  dijaga konstan. (3). Pada pola aliran yang sama, kecepatan gelombang cenderung akan semakin meningkat jika nilai  $J_G$  semakin besar dan nilai  $J_L$  dijaga konstan. (4). Frekuensi gelombang aliran *stratified wavy+ripple* akan cenderung turun jika nilai  $J_L$  semakin besar. Sedangkan pengaruh perubahan  $J_G$  tidaklah signifikan terhadap frekuensi gelombang.

**Kata kunci** : aliran *stratified*, *CECM*, perilaku aliran, visualisasi, *signal processing*

### Pendahuluan

Pola aliran *stratified* merupakan salah satu aliran dua fasa gas-cairan yang sederhana, akan tetapi pembahasan yang mendalam tentang aliran ini masih kurang lengkap. Pada aliran *stratified* dalam pipa, fasa cairan dan fasa gas terpisah secara jelas oleh adanya perbedaan berat jenis antara kedua fasa. Pembahasan aliran *stratified* dalam pipa telah lama menjadi topik yang menarik baik secara praktis maupun teoritis. Banyak sistem perpipaan didesain untuk beroperasi pada daerah aliran *stratified* karena mempunyai tingkat keamanan operasional yang tinggi.

Di sisi lain, aliran *slug* dapat memicu terjadinya kerusakan dan kecelakaan pada pipa seperti abrasi, korosi dan pipa pecah (*blasting pipe*). Pada pola aliran *slug* pipa horizontal, gesekan yang terjadi meliputi gesekan antara *liquid slug* dengan pipa bagian atas, *liquid slug* dengan pipa bagian bawah serta slip antar fasa. Gesekan ini menyebabkan fluktuasi beda tekanan lokal ( $\Delta P/\Delta L$ ) yang terjadi sangat besar. Oleh

karena itu aliran *slug* harus dihindari dan aliran harus selalu dijaga pada kondisi *stratified*.

Beberapa peneliti terdahulu yang telah berhasil memetakan pola aliran pada pipa horizontal [1,2,3,4]. Sedangkan peneliti-peneliti lain yang khusus mempelajari perilaku aliran *stratified* [5,6,7,8].

Banyak metode telah dikembangkan untuk mempelajari perilaku antar muka aliran dua fasa dari pola aliran yang terjadi pada sistem perpipaan, seperti pengamatan visual [9,10], metode konduktansi [11,12] dan metode ultrasonik [13].

*Constant Electric Current Method (CECM)* merupakan salah satu metode konduktansi yang dikembangkan oleh Fukano [12]. Karakteristik dari CECM adalah sumber tenaga arus konstan digunakan untuk memberi tenaga listrik pada dua buah elektroda. Satu digunakan untuk memberi tenaga listrik dan yang lain untuk mendeteksi informasi ketebalan film. Keutamaan CECM adalah keluaran elektroda sensor tidak tergantung pada lokasi fase gas, sensitivitas mendeteksi

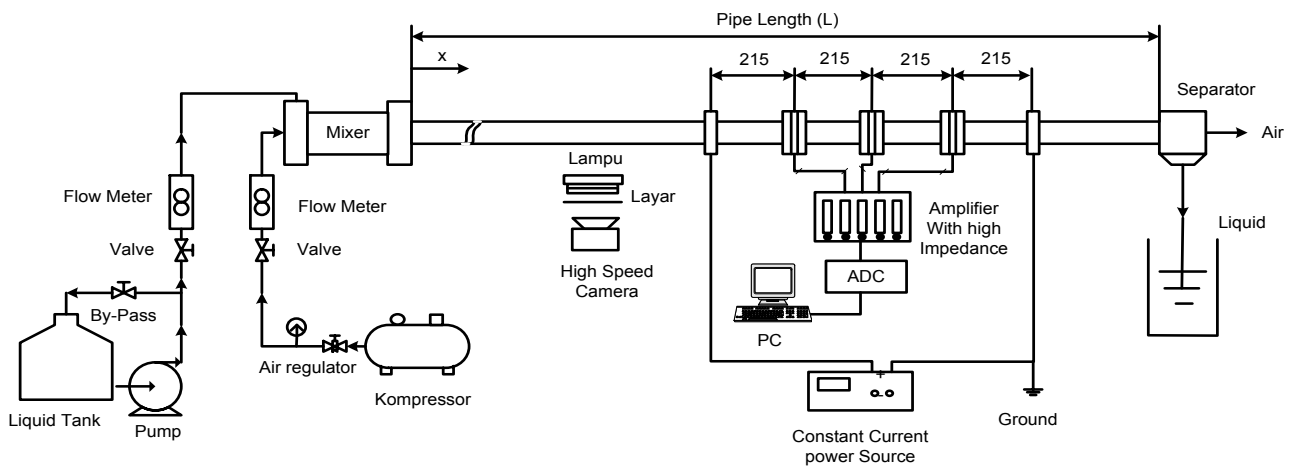
perubahan *hold up* lebih tinggi, dan interaksi diantara kedua elektroda diabaikan.

Dari uraian di atas dan melihat pentingnya pengetahuan mendetail tentang aliran *stratified*, maka perlu dilakukan studi lebih lanjut. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui perilaku aliran *stratified* air udara pada pipa horizontal dengan metode visual dan *signal processing*

### Metodologi

Pada penelitian ini pipa *acrylic* transparan ID 26 mm digunakan agar perilaku aliran dapat diamati. Panjang pipa sebelum seksi uji didesain 5 m 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 CECM sebanyak 3 buah dengan jarak radial antar sensor 215 mm guna menjamin sensor dapat membaca panjang gelombang. 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



Gambar 1. Skema diagram peralatan

Prinsip kerja dari CECM di dasarkan atas perbedaan tahanan pada cairan dan gas. Tahanan listrik aliran dua fasa,  $R_{TP}$ , dalam unit panjang dari saluran diekspresikan sebagai berikut :

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

Dimana  $R_G$  dan  $R_L$  adalah tahanan listrik fase gas dan liquid yang masing-masing menempati bidang potongan pipa. *Liquid hold-up* ( $\eta$ ) diekspresikan dalam unit panjang ( $V_{TP}$ ) pada saat arus konstan  $I_0$  dicatukan. Hold-up diekspresikan oleh persamaan di bawah dan untuk kasus aliran dua fasa udara-air, nilai  $R_G \gg R_L$ .

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

Dimana  $V_L$  adalah drop tegangan saat *liquid* 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,  $\eta_0$  dan arus listrik  $I_0$  pada nilai yang sama dengan persamaan diatas, maka persamaan berikut didapatkan dari persamaan di atas :

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

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 ( $\eta_0, V_L$  atau  $V_{TP0}$ ) maka kita dapat menentukan *hold-up* ( $\eta$ ).

Pada analisa sinyal, sinyal rangkaian waktu yang dikumpulkan dianalisa secara statistik/*stochastic* untuk mendapatkan informasi yang diinginkan. Pada analisa *Power Spectra Density* aliran *stratified* akan mempunyai nilai frekuensi dominan yang dari gelombang aliran *stratified*. Sedangkan rata-rata keterlambatan waktu (*time lag*) antara dua sensor *liquid hold-up* dapat dihitung dari fungsi *cross correlation*. Kecepatan gelombang (*wave velocity*) dapat ditentukan dari keterlambatan waktu pada puncak pertama dari fungsi *cross correlation* antara dua sensor [14].

### Hasil dan Pembahasan

Bentuk struktur antarmuka aliran *stratified* pada penelitian ini diamati dengan dua cara yaitu

secara visual dan analisa sinyal. Metode ini lebih obyektif dalam menentukan sub-sub daerah pada aliran *stratified* dibanding dengan pengamatan secara visual saja. Berdasarkan pada pengamatan visual, data hasil rekaman video dan data *liquid hold-up* sebagai fungsi waktu dari penelitian yang telah dilakukan, Pola aliran *stratified* dari hasil variasi kecepatan superfisial air dan udara yang digunakan dapat dikelompokkan menjadi *stratified smooth*, *stratified wavy + ripple*, *Stratified wavy + Roll*, dan *Pseudo-slug*.

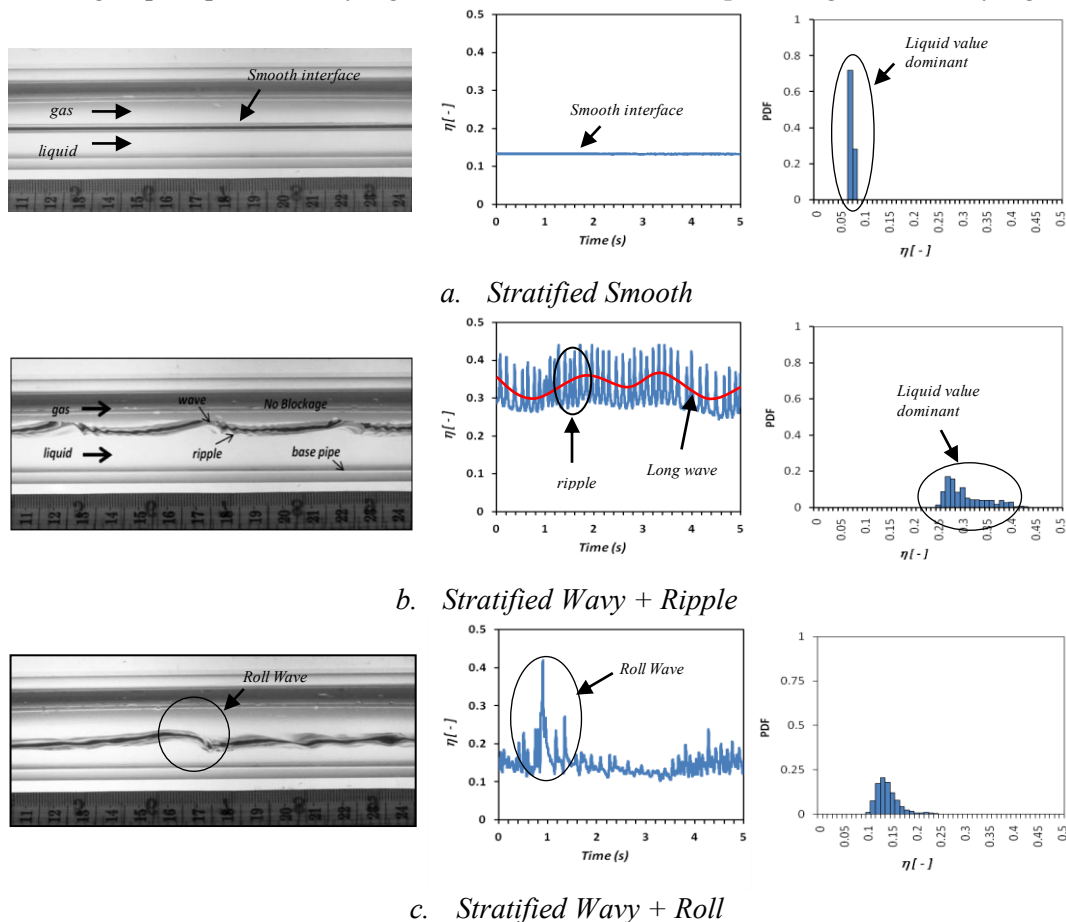
Pada gambar 2, menunjukkan visualisasi dan karakteristik transien sub-sub daerah *stratified*, pada pola aliran *stratified smooth* mempunyai bentuk antarmuka yang datar dengan sebaran nilai *liquid hold-up* pada *probability distribution function* (PDF) yang mengumpul. Ketiadaan fluktuasi gelombang ini mengindikasikan bahwa tidak ada fluktuasi tekanan yang terjadi pada pola aliran *stratified smooth*. Sedangkan pada pola aliran *stratified wavy + ripple*, *Stratified wavy + Roll*, dan *Pseudo-slug* mempunyai bentuk antarmuka bergelombang dan sebaran nilai *liquid hold-up* pada *probability distribution function* (PDF) yang melebar.

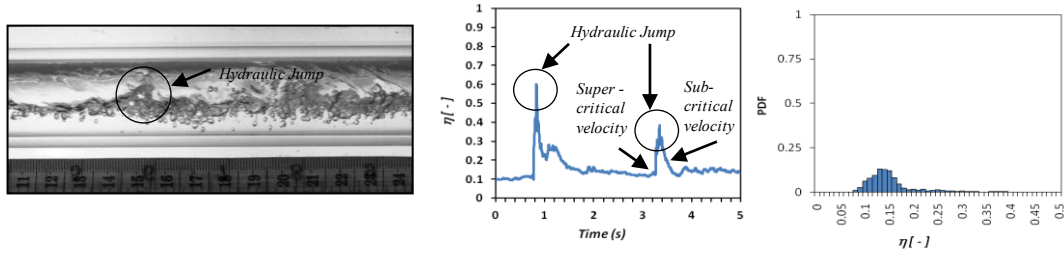
Gambar 3, pola aliran yang diamati dibandingkan dengan peta pola aliran yang sudah

ada sebagai bahan referensi [1,2,3,4]. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa garis transisi antara *stratified smooth* dan *wavy* dari hasil pengamatan jauh dari yang diprediksikan pada peta Mandhane[1] akan tetapi lebih mendekati garis transisi pada peta Weisman[3]. Aliran *stratified wavy* terjadi pada kecepatan superfisial air dan udara yang lebih rendah. Sedangkan untuk garis transisi dari aliran *stratified* ke aliran *slug*, prediksi pada peta Mandhane [1] lebih bagus dari yang diprediksikan pada peta Weisman[3].

Sedangkan daerah *Pseudo-slug* yang diperkenalkan oleh Lin dan Hanratty [4] tidak cocok dengan hasil pengamatan pada penelitian ini meskipun diameter pipa yang digunakan hampir sama. Pada penelitiannya, Lin dan Hanratty [4] menggunakan pipa horizontal dengan diameter dalam 25,4 mm sedangkan pada penelitian ini menggunakan diameter 26 mm. Studi lebih lanjut perlu dilakukan untuk mendapatkan pengetahuan yang benar tentang ketidakcocokan ini.

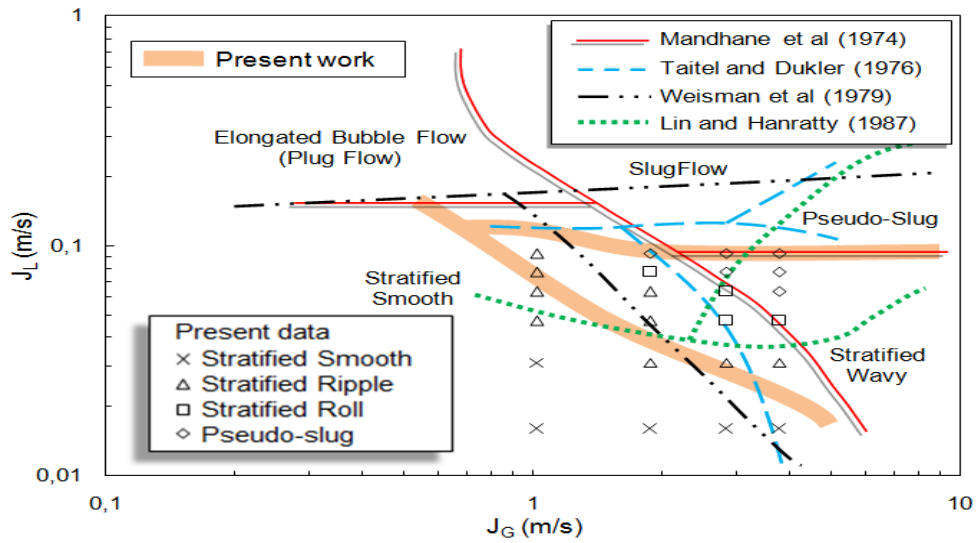
Disamping itu taitel dan Dukler [2] mengusulkan peta pola aliran yang didasarkan pada prediksi analitis. Hasil penelitian ini memperlihatkan kecocokan yang bagus dengan peta hasil metode prediksi analitis, meskipun tidak memberikan prediksi garis transisi yang akurat.





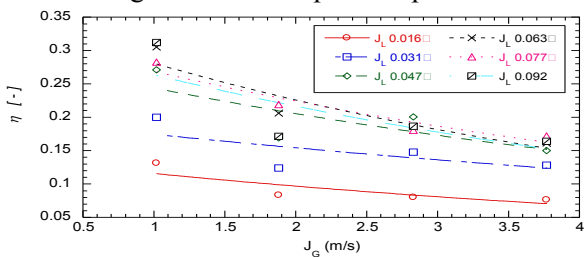
d. Pseudo-slug

Gambar 2. Contoh visualisasi, karakteristik transien liquid hold-up dan PDF untuk sub-sub daerah stratified



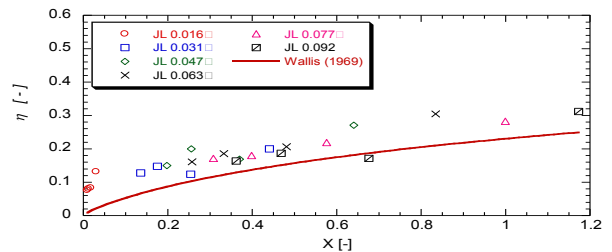
Gambar 3. Perbandingan pola aliran yang diamati dengan peta pola aliran referensi

Gambar 4, menunjukkan bahwa *liquid hold-up* rata-rata akan naik seiring kenaikan kecepatan superficial air dan *liquid hold-up* rata-rata akan turun seiring kenaikan kecepatan superficial udara.



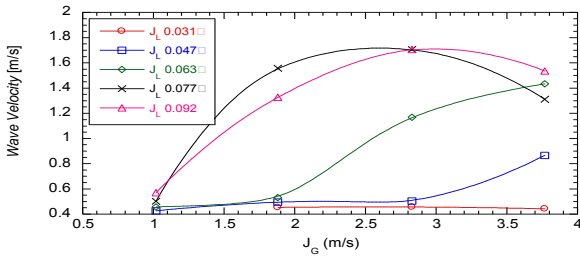
Gambar 4. Hubungan  $J_G$  dan  $J_L$  terhadap nilai *liquid hold-up* rata-rata

Lockhart dan Martinelli [15] menghubungkan antara *friction multipliers* aliran dua fasa dengan parameter X. Lockhart dan Martinelli menghasilkan korelasi grafis untuk fraksi hampa rata-rata. Korelasi empiris ini kemudian direpresentasikan secara baik oleh Wallis [16]. Gambar 5, menunjukkan bahwa *liquid hold-up* yang diukur lebih besar dari prediksi yang menggunakan model Lockhart-Martinelli.



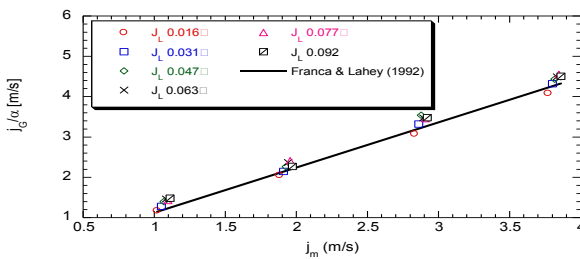
Gambar 5. Perbandingan antara *liquid hold-up* yang diukur dengan prediksi menggunakan model Lockhart-Martinelli

Gambar 6, menunjukkan hubungan antara kecepatan superficial air dan udara terhadap kecepatan gelombang. Pada gambar 8, terlihat bahwa semakin naik kecepatan superficial udara maka kecepatan gelombang cenderung semakin naik.



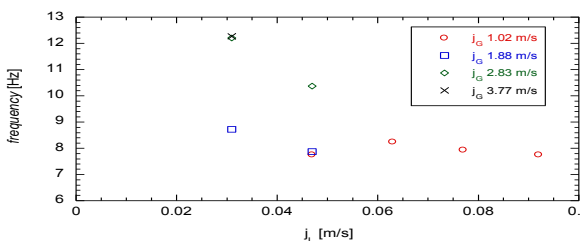
Gambar 6. Hubungan antara  $J_G$  dan  $J_L$  terhadap kecepatan rata-rata gelombang

Pada gambar 7, terlihat bahwa semakin besar kecepatan campuran maka kecepatan gas akan semakin besar. Hal ini sesuai dengan korelasi yang diajukan oleh Franca dan Lahey 17 yang menyatakan bahwa kecepatan gas merupakan fungsi kecepatan campuran dan *drift velocity*.



Gambar 7. Hubungan antara kecepatan campuran terhadap kecepatan gas.

Gambar 8, menunjukkan hubungan antara kecepatan superfisial air dan udara terhadap frekuensi dominan pada pola aliran *stratified+ripple*. Pada gambar 9, terlihat bahwa semakin kecepatan superfisial liquid maka frekuensi pembentuk gelombang mempunyai kecenderungan yang semakin menurun. Sedangkan pengaruh perubahan kecepatan superfisial udara ( $J_G$ ) tidaklah signifikan terhadap frekuensi gelombang



Gambar 8. Hubungan antara  $J_G$  dan  $J_L$  terhadap frekuensi dominan pada pola aliran *stratified+ripple*

### Kesimpulan

1. Pola aliran stratified dibagi menjadi sub-sub kelas yang meliputi *stratified smooth*, *stratified wavy + ripple*, *Stratified wavy + Roll*, dan *Pseudo-slug*.

2. Nilai *liquid hold-up* rata-rata cenderung turun, jika nilai  $J_G$  semakin besar dan nilai  $J_L$  dijaga konstan.
3. Pada pola aliran yang sama, kecepatan gelombang cenderung akan semakin meningkat jika nilai  $J_G$  semakin besar dan nilai  $J_L$  dijaga konstan.
4. Frekuensi gelombang aliran *stratified wavy+ripple* akan cenderung turun jika nilai  $J_L$  semakin besar. Sedangkan pengaruh perubahan  $J_G$  tidaklah signifikan terhadap frekuensi gelombang.

### Referensi

- [1.] Mandhane, JM, Gregory, GA, Aziz, K., 1974, A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes, International Journal of multiphase flow 1 pp. 537-553.
- [2.] Taitel, Y. and Dukler, AE, 1976, A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow, AIChE J., Vol. 22, pp. 47-55.
- [3.] Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J., Crawford, T., 1979, Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines, Int. J. Multiphase Flow, 5, 437-462.
- [4.] Lin, P.Y. and Hanratty, TJ, 1987, Effect of Pipe Diameter on flow patterns for air-water flow in horizontal. Int. J. Multiphase Flow, Vol. 13, no. 4, pp. 549-563.
- [5.] Andritsos, N. and Hanratty, T.J. 1987, Interfacial instabilities for horizontal gas-liquid flows in pipelines, . Int. J. Multiphase Flow, Vol 13., Pp. 583-603
- [6.] Kawaji, M., Anoda, Y., Nakamura, H., Tasaka, T., 1987, Phase and velocity distributions and holdup in high-pressure steam/water stratified flow in a large diameter horizontal pipe, Int. J. Multiphase Flow, 13(2), 145-159.
- [7.] Vlachos, N.A., Paras, S.V., Karabelas, A.J. 1998, Prediction of Hold-up, axial pressure gradient and wall shear stress in wavy stratified and stratified / Atomization gas/ liquid flow, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 25, pp. 365-376.
- [8.] Wongwises, 1998, Prediction of Liquid holdup in Horizontal Stratified Two-Phase Flow, Thammasat Int. J. Sc. Tech., Vol.3
- [9.] Gopal, M., Jepson, W.P., 1997, Development of digital image analysis techniques for the study of velocity and void

- profiles in slug flow, *Int. J. Multiphase Flow*, 23(5), 945-965.
- [10.] Mayor, T.S., Pinto, A.M.F.R., Campos, J.B.L.M., 2007, An image analysis technique for the study of gas-liquid slug flow along vertical pipes – associated uncertainty, *Flow Measurement and Instrumentation*, 18,139-147.
- [11.] Kang, H.C., Kim, M.H., 1992, Measurement of three-dimensional wave form and interfacial area in an air-water stratified flow, *Nuclear Engineering and Design*, 136, 347-360.
- [12.] Fukano, T., 1998. Measurement of time varying thickness of liquid films flowing with high speed gas flow by a constant electric current method (CECM), *Nuclear Engineering and Design*, pp. 363-377.
- [13.] Murai, Y., Tasaka, Y., Nambu, Y., Takeda, Y., A., S. Roberto Gonzales., 2010, Ultrasonic detection of moving interfaces in gas-liquid two-phase flow, *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(3), 356-366
- [14.] Deendarlianto, Ousaka, A., Kariyasaki, A., Fukano, T., 2005, Investigation of liquid films 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
- [15.] Lockhart, R.W., Martinelli, R.C., 1949, Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes, *Chemical Engineering Progress*, 45(1), 39-48.
- [16.] Wallis, Graham B., 1969, *One-dimensional two-phase flow*, McGraw-Hill, New York.
- [17.] Franca, F. and Lahey, RT, Jr., 1992, The use of drift-flux Techniques for the Analysis of Horizontal Two Phase Flow. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 6., Pp. 787-801.