



## Pengaruh *liquid hold-up* terhadap transisi pola aliran 2 fasa air-udara dari *stratified* ke *slug* pada pipa 50 mm

Andinusa Rahmandhika <sup>\*a</sup>, Ali Saifullah <sup>a</sup>, Pathur Razi Ansyah <sup>b</sup>, Ali Mokhtar <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang, Jawa Timur 65145

<sup>b</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat, Kalimantan Selatan 70123

\* Corresponding E-mail: [andinusa@umm.ac.id](mailto:andinusa@umm.ac.id)

Received 09th July 2020  
Accepted 18th August 2020  
Published 20th December 2020

Open Access

DOI: 10.35472/jsat.v4i2.279

**Abstract:** The slug flow pattern is one of the most avoiding factors in piping systems due to its destructive characteristics. Research on the criteria of the slug formation is still the concern. The present study focused on finding out the influence of liquid hold-up toward the transition of the flow pattern from stratified to slug pattern. It was conducted on a 50 mm-diameter horizontal acrylic pipe. The visual data was obtained from a fully developed area (180-210 D) by variations of liquid superficial rate (J<sub>L</sub>) of 0,03-0,3 m/s and gas superficial rate (J<sub>G</sub>) from 0,7 to 3,77 m/s. The high-speed camera with 2000 fps recording speed was the instrument to obtain the visual data. The measurement of the liquid hold-up is made by Constant Electric Current Method (CECM). The drastic decrement of liquid hold-up value on the wave growth mechanism (J<sub>G</sub> ≤ 1,88 m/s) indicated the changes in flow patterns from the stratified to the slug pattern, while on the wave coalescence mechanism (J<sub>G</sub> > 1,88 m/s) the liquid hold-up remains increases. The pattern change from pseudo slug to the slug pattern was not decreasing on its film thickness, yet, it tends to increase the frequency and the liquid slug length.

**Keywords:** CECM, liquid hold-up, slug, stratified, wave coalescence, wave growth

**Abstrak:** Pola aliran *slug* merupakan salah satu yang paling dihindari pada sistem perpipaan karena bersifat destruktif. Sehingga, diperlukan penelitian mengenai kriteria pembentukan aliran *slug*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *liquid hold-up* terhadap transisi pola aliran dari *stratified* ke *slug*. Penelitian dilakukan pada pipa acrylic horizontal berdiameter dalam 50 mm. Pengambilan data visual dilakukan pada daerah *fully developed* (180 – 210 D) dengan variasi kecepatan superfisial *liquid* (J<sub>L</sub>) dari 0,03-0,3 m/s dan kecepatan superfisial *gas* (J<sub>G</sub>) dari 0,7-3,77 m/s. Pengambilan data visual menggunakan kamera *high speed* dengan kecepatan perekaman 2000 fps. Pengukuran *liquid hold-up* dilakukan menggunakan *Constant Electric Current Method* (CECM). Berdasarkan hasil penelitian, penurunan nilai *liquid hold-up* secara drastis pada mekanisme *wave growth* (J<sub>G</sub> ≤ 1,88 m/s) dapat mengindikasikan perubahan pola aliran dari *stratified* ke *slug*. Sementara pada mekanisme *wave coalescence* (J<sub>G</sub> > 1,88 m/s), nilai *liquid hold-up* tetap meningkat. Perubahan pola dari *pseudo slug* ke *slug* tidak mengalami penurunan tebal film, namun cenderung mengalami peningkatan frekuensi serta panjang *liquid slug*.

**Kata Kunci :** CECM, liquid hold-up, slug, stratified, wave coalescence, wave growth

### Pendahuluan

Penggunaan jaringan sistem perpipaan banyak dijumpai di berbagai industri, seperti perminyakan dan pembangkit energi. Hal tersebut dikarenakan mayoritas proses transportasi bahan mentah serta pengolahannya yang efektif bila menggunakan pipa. Namun, seringkali bahan baku tersebut tidak homogen dalam 1 fase saja. Oleh karena itu, diperlukan pengetahuan lebih lanjut untuk memahami aliran fluida 2 fase.

Aliran 2 fase memiliki karakteristik dan hukum yang berbeda dengan aliran 1 fase. Pada aliran 2 fase terdapat istilah pola aliran. Pola aliran dipengaruhi oleh banyak faktor seperti

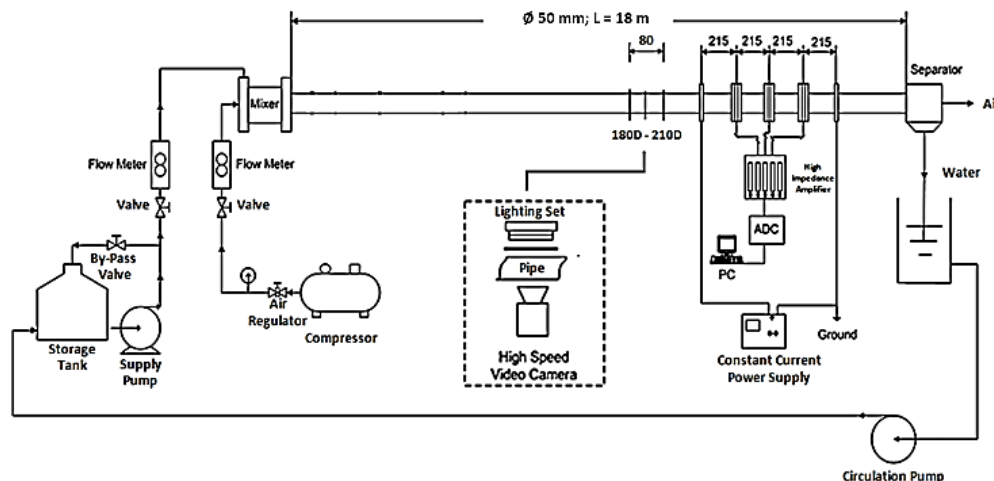
ukuran dan dimensi pipa, tegangan permukaan, densitas fluida, gravitasi, elevasi pipa, dan kecepatan aliran fluida padat, cair, serta gas. Beberapa pola aliran yang banyak dijumpai pada proses industri adalah *bubbly*, *stratified*, *slug*, dan *annular*. Pola-pola tersebut tidak lepas dari perubahan fraksi fluida akibat proses pemanasan dan kondensasi. Salah satu aliran yang berbahaya dan sering dihindari adalah *slug*. *Slug* merupakan pola aliran dimana *liquid* menutupi seluruh luas penampang pipa. Akibatnya terjadi penyumbatan aliran gas. Bila laju aliran massa campuran tetap, peningkatan fraksi gas yang memiliki sifat kompresibel mendorong *liquid* dengan kecepatan tinggi. Kondisi tersebut dapat mengakibatkan osilasi maupun *cracking* pada pipa.

Peneliti terdahulu telah memetakan kriteria pola aliran *slug* sehingga daerah pipa yang diperkirakan pecah akibat terjadi *slugging* dapat diantisipasi. Penelitian pertama mengenai peta pola aliran dua fasa pada pipa horizontal dilakukan oleh Baker pada tahun 1954 [1]. Obyek pengamatan yang dilakukan menggunakan media udara dan air. Parameter yang divariasikan adalah laju aliran massa, serta parameter tidak berdimensi  $\psi$  dan  $\lambda$ . Namun, pada penerapannya, sulit untuk melakukan variasi laju aliran massa. Sehingga, Mandhane (1974) membuat pengembangan *flow pattern map* untuk aliran *gas-liquid* pada pipa horizontal berdasarkan kecepatan superfisial gas dan *liquid* yang dilambangkan dengan  $V_{SL}$  dan  $V_{SG}$  [2]. Penelitian mengenai efek dari diameter pipa terhadap pola aliran dilakukan oleh Lin dan Hanratty (1987) pada pipa horizontal berdiameter 25,4 dan 95,3 mm [3]. Penelitian tersebut bertujuan untuk menjelaskan bahwa peta pola aliran 2 fasa tidak dapat digeneralisir untuk semua ukuran pipa. Hal tersebut diperkuat oleh Nusirwan (2016), dimana terjadi pergeseran pola aliran menuju *slug* untuk diameter pipa yang berbeda [4].

Thaker dan Banerjee (2015) melakukan investigasi mengenai kondisi *onset of slugging* berdasarkan kecepatan superfisial gas dan *liquid* [5]. Perbandingan beberapa eksperimen mendapatkan hasil yang hampir mirip untuk kecepatan superfisial udara dan *liquid* di sisi *inlet* pada daerah transisi *stratified* ke *slug*. Eksperimen tersebut bertujuan sebagai validasi dari eksperimen yang dilakukan oleh Andritsos dkk [6] dan Lin terhadap teori *Viscous Kelvin-Helmholtz*. Hasil tersebut relevan untuk kecepatan superfisial gas yang rendah. Hal tersebut dikarenakan pada teori *Viscous Kelvin-*

*Helmholtz*, pengaruh inersia semakin besar dengan kenaikan kecepatan superfisial gas, sementara pada *Inviscid Kelvin-Helmholtz*, efek tersebut diabaikan [3]. Dinaryanto (2017) dan Rahmandhika (2017) melakukan eksperimen visual mengenai terbentuknya aliran *slug* akibat pengaruh kecepatan superfisial gas dan *liquid*. Eksperimen dilakukan pada pipa berdiameter 26 mm pada daerah inisiasi [7][8][9][10][11]. Dinaryanto menyimpulkan bahwa semakin tinggi  $J_G$ , semakin tinggi pula nilai  $J_L$  yang harus dipenuhi untuk *onset of slugging*.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, efek kecepatan superfisial dan diameter pipa berpengaruh terhadap perubahan peta pola aliran 2 fasa, khususnya untuk kondisi transisi ke *slug*. Namun, pada kondisi nyata, kecepatan superfisial akan mengalami penurunan seiring dengan adanya *pressure drop* pada pipa pada daerah *fully developed*. Pada kondisi lain, penelitian menggunakan pengamatan visual tidak dapat diimplementasikan pada keadaan riil, hanya sebatas validasi saja. Oleh karena itu, diperlukan metode lain yang dapat mengakomodasi kekurangan tersebut. Salah satunya adalah metode yang dikembangkan oleh Fukano [8], Deendarlianto dkk. [9][12], serta Ousaka dkk. [10], yaitu menggunakan *Constant Electric Current Method* (CECM). Metode CECM dapat memberikan nilai *liquid hold-up* dimana perbandingan luas penampang *liquid* terhadap luas penampang pipa diketahui. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *liquid hold-up* terhadap pola aliran *slug* dengan metode CECM yang diperkuat dengan pengamatan visual.



Gambar 1. Skema

**Metode**

Penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika Fluida, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Terdapat dua bahan utama yang digunakan dalam penelitian dua fasa ini, yaitu terdiri dari fluida cair (*liquid*) yang berupa air dan gas berupa udara. Beberapa peralatan yang dipergunakan pada penelitian ini disusun membentuk skema alat uji sesuai dengan yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Pada penelitian ini digunakan pipa acrylic transparan dengan diameter dalam 50 mm. Untuk pengambilan gambar dan video menggunakan Phantom Miro M310 *high speed video camera*. Digunakan sensor CECM untuk pengukuran nilai *liquid hold-up*. Tegangan yang didapatkan dari hasil pengukuran CECM dikuatkan dengan *amplifier*, kemudian diubah oleh *Analog to Digital Converter* (ADC) agar dapat dibaca oleh komputer.

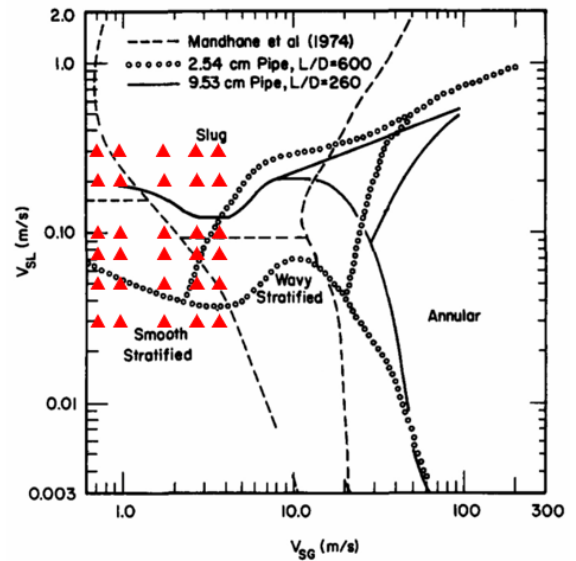
Terdapat tiga sensor CECM digunakan untuk mengukur resistansi cairan dari aliran fluida. Resistansi *liquid* didefinisikan sebagai rasio *liquid* terhadap luas penampang pipa. Untuk mencegah adanya distorsi karena sensitivitas tinggi dari sensor CECM, *liquid* tidak dibuang keluar tangki. Dalam penelitian ini, masing-masing sensor diatur berjajar dengan jarak 215 mm. Di kedua tepi seksi uji CECM, elektroda dipasang untuk mengalirkan arus listrik konstan dari catu daya ke sensor. Karena perbedaan ketahanan air dan udara, masing-masing sensor menghasilkan tegangan sesuai dengan resistansi *liquid* yang melewati sensor.

$$\eta = \frac{R_L}{R_{TP}} = \frac{I_0 R_L}{I_0 R_{TP}} = \frac{V_L}{V_{TP}} \quad (1)$$

Pada persamaan (1),  $R_L$  dan  $R_{TP}$  berturut-turut adalah resistansi liquid dan resistansi aliran 2 fase. Sementara  $I_0$  merupakan arus listrik konstan yang diberikan pada pipa dengan arah arus berlawanan aliran fluida.  $V_{TP}$  adalah tegangan aliran 2 fase yang terbaca pada *data logger*. Sementara  $V_L$  merupakan tegangan yang terbaca ketika pipa terisi penuh oleh air.  $V_L$  juga berperan sebagai tegangan awal untuk mengkalibrasi sensor. Resistansi *liquid* yang rendah mengakibatkan tegangan yang terbaca saat kalibrasi juga rendah.

Pada penelitian ini, variabel yang digunakan meliputi variasi kecepatan superfisial udara ( $J_G$ ) dan air ( $J_L$ ). Kecepatan superfisial air bervariasi mulai dari 0,03 m/s sampai 0,3 m/s, sesuai nilai  $J_L$  dimana aliran *stratified* mengalami transisi ke *slug*. Kecepatan superfisial udara mulai dari 0,7 m/s sampai 3,77 m/s. Pengambilan variabel kecepatan tersebut

dilakukan secara diskrit. Matriks yang menunjukkan variasi  $J_G$  dan  $J_L$  pada penelitian ini mengacu pada peta pola aliran Mandhane serta Lin dan Hanratty seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Matriks data penelitian [2,3]

**Hasil dan Pembahasan**

Berdasarkan pengamatan visual menggunakan kamera *high speed*, setiap variasi nilai  $J_L$  dan  $J_G$  pada pipa acrylic diplot untuk diketahui jenis pola alirannya. Pola aliran dikelompokkan menjadi 5 jenis yang meliputi *stratified smooth*, *wavy*, *pseudo slug*, *slug*, serta *plug*. Pembagian pola aliran terlihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Pembagian pola aliran berdasarkan pengamatan visual

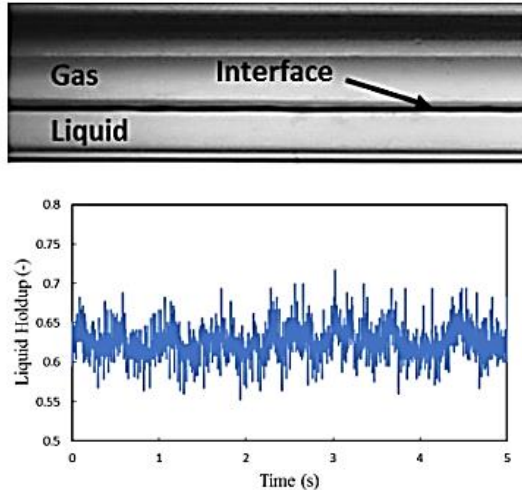
$J_L$ (m/s)	$J_G$ (m/s)				
	0,7	0,94	1,88	2,83	3,77
0,03	O	O	O	□	□
0,05	O	O	□	□	□
0,075	O	O	□	□	Δ
0,1	O	O	X	X	Δ
0,2	Y	X	X	X	X
0,3	Y	X	X	X	X

Keterangan :

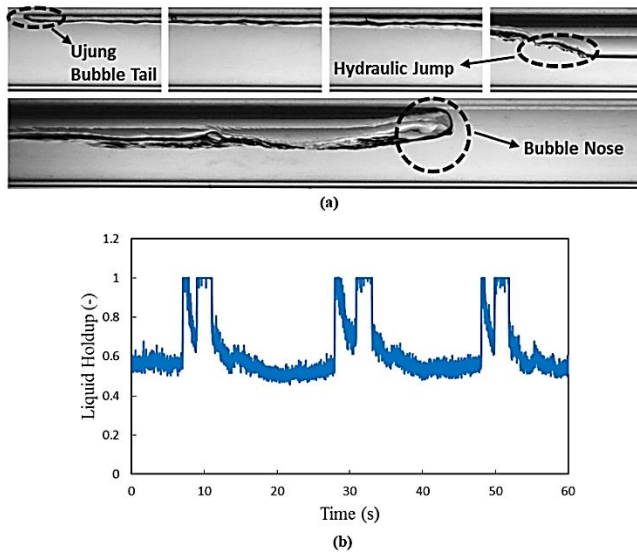
- O = *Stratified Smooth*      Δ = *Pseudo Slug*      Y = *Plug*
- = *Stratified Wavy*      X = *Slug*

**Proses Slugging melalui mekanisme wave growth**

Mekanisme *wave growth* umumnya terjadi pada peningkatan kecepatan superfisial *liquid*. Aliran yang semula *stratified* mengalami penambahan debit air sehingga membentuk *film thickness* yang semakin tinggi.



**Gambar 3.** Karakteristik visual dan *liquid hold-up* aliran *stratified smooth* pada  $J_L = 0,1$  m/s dan  $J_G = 0,7$  m/s

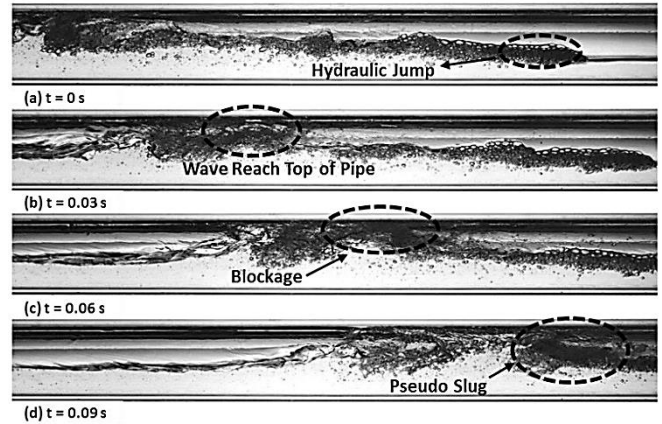


**Gambar 4.** Karakteristik (a) visual dan (b) *liquid hold-up* aliran *slug* pada  $J_L = 0,2$  m/s dan  $J_G = 0,7$  m/s

**Proses Slugging melalui mekanisme wave coalescence**

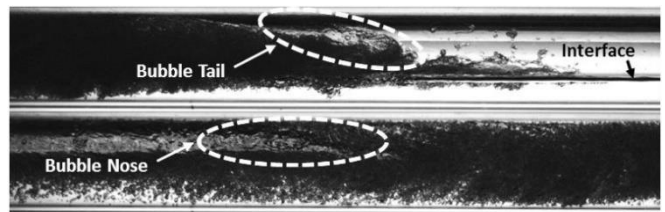
Pada daerah *fully developed*, kecepatan gas dan *liquid* yang tidak sama menyebabkan gesekan di daerah *interface*, sehingga terbentuk pengulangan gelombang. Gelombang tersebut yang dijelaskan pada teori Kelvin-Helmholtz. Pada kondisi tertentu, gesekan pada

*interface* yang semakin besar mengakibatkan amplitudo gelombang semakin besar. Hal tersebut memungkinkan puncak gelombang menyentuh bagian atas dari diameter dalam pipa dan menyumbat aliran gas. Mekanisme ini menginisiasi terbentuknya aliran *slug*. **Gambar 3** menunjukkan visualisasi dan nilai CECM aliran *stratified smooth* pada  $J_L = 0,1$  m/s dan  $J_G = 0,7$  m/s. Peningkatan kecepatan superfisial *liquid* ( $J_L = 0,2$  m/s), terbentuk *less aerated slug* seperti pada **Gambar 4**.



**Gambar 5.** Visualisasi *pseudo slug* pada  $J_L = 0,075$  m/s dan  $J_G = 3,77$  m/s

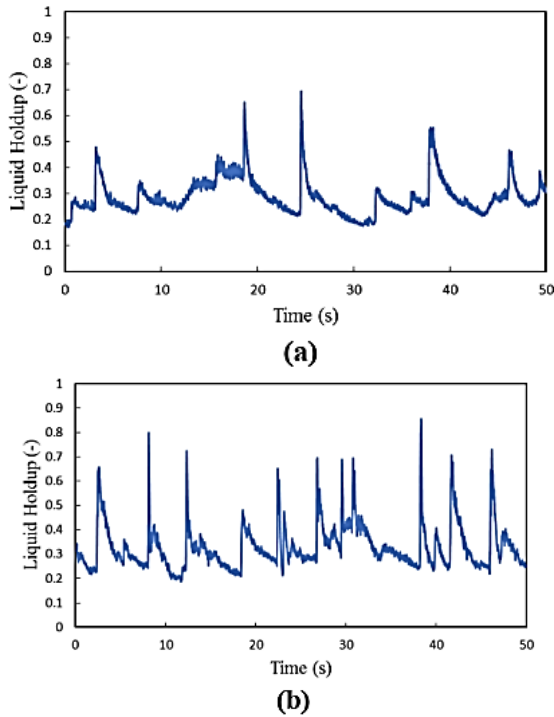
*Slugging* melalui *wave coalescence* terjadi pada kecepatan superfisial gas yang tinggi. Perbedaan kecepatan gas dan *liquid* yang yang besar tidak lagi membentuk gelombang normal, melainkan *roll wave*. Pada proses pembentukan *slug* dengan mekanisme *wave coalescence* aliran gas tertutup akibat penggabungan *roll wave* hingga mencapai dinding pipa bagian atas. **Gambar 5** menunjukkan bahwa kuantitas *liquid* tidak cukup untuk memblokade gas secara kontinyu. Blokade *liquid* yang masih dapat tertembus gas mengakibatkan terjadinya *pseudo slug*.



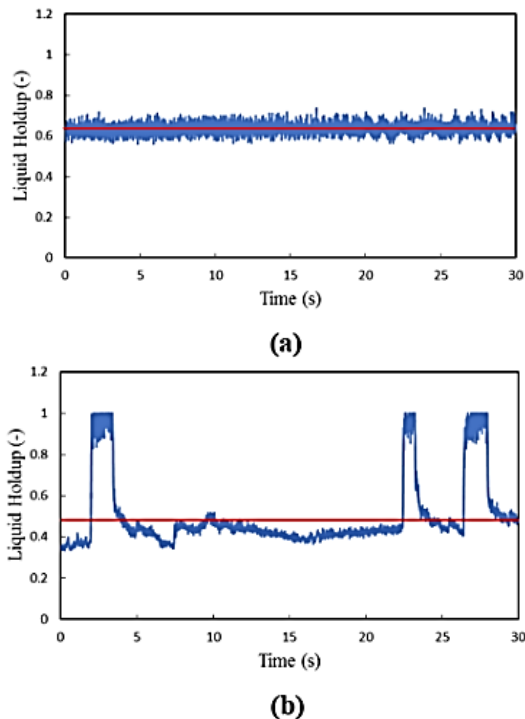
**Gambar 6.** Visualisasi *high aerated slug* pada  $J_L = 0,2$  m/s dan  $J_G = 3,77$  m/s

**Gambar 6** menunjukkan visualisasi dari *high aerated slug* saat  $J_L$  ditingkatkan menjadi 0,2 m/s pada  $J_G$  tetap. *Mixing zone* yang cukup panjang di belakang *bubble tail* mengindikasikan penetrasi gas pada daerah *dispersed bubble* sulit terlihat. *Bubble nose* terlihat di belakang *dispersed bubble* dengan bentuk yang runcing.





Gambar 7. Karakteristik liquid hold-up pseudo slug dan high aerated slug pada  $J_G = 3,77$  m/s dan (a)  $J_L = 0,075$  m/s (b)  $J_L = 0,2$  m/s

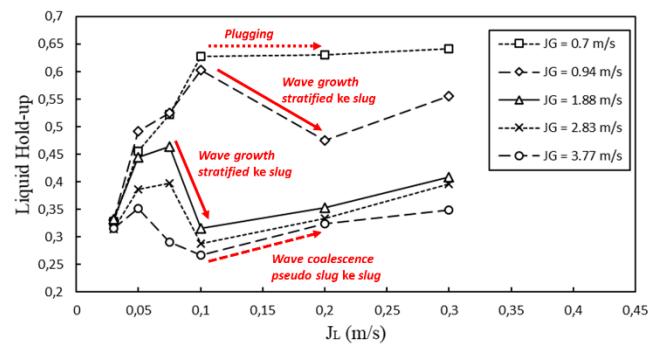


Gambar 8. Nilai rerata liquid hold-up untuk  $J_G = 0,94$  m/s dan (a)  $J_L = 0,1$  m/s (b)  $J_L = 0,2$  m/s

Gambar 7(a) menunjukkan grafik CECM untuk pseudo slug pada  $J_L = 0,075$  m/s dan  $J_G = 3,77$  m/s, sementara Gambar 7(b) menunjukkan grafik CECM untuk high aerated slug. Pada Gambar 7(a), terlihat kenaikan sinyal liquid hold-up akibat peningkatan gelombang sebelum terjadi pseudo slug. Peningkatan gelombang tidak terlihat pada high aerated slug, melainkan hydraulic jump yang langsung membentuk liquid slug. Nilai puncak liquid hold-up pada pseudo slug sekitar 0,7 dimana tampak beberapa peningkatan liquid hold-up akibat terjadinya roll wave. Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan pada high aerated slug mencapai 0,85. Frekuensi terjadinya slug juga lebih tinggi, dapat dilihat pada lebih banyaknya puncak liquid hold-up dalam jangka waktu yang sama.

**Menentukan nilai liquid hold-up rerata**

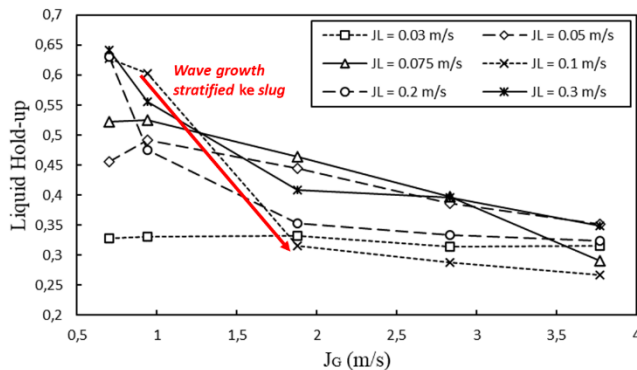
Pembacaan data CECM dari data logger merupakan nilai liquid hold-up sesaat, sehingga selalu berubah berdasarkan fungsi waktu. Oleh karena itu, diperlukan jangka waktu tertentu untuk menentukan nilai liquid hold-up yang dapat merepresentasikan matriks data yang telah dibuat. Gambar 8 menunjukkan rerata liquid hold-up untuk 2 jenis pola aliran selama 30 detik. Peningkatan liquid hold-up rerata tidak selalu ditunjukkan oleh kenaikan kecepatan superficial liquid. Hal tersebut terlihat pada perbandingan kedua grafik dimana rerata liquid hold-up pola aliran stratified (Gambar 8(a)) membutuhkan kecepatan superficial air yang lebih rendah dibandingkan aliran slug pada Gambar 8(b).



Gambar 9. Perbandingan nilai liquid hold-up rerata terhadap kecepatan superficial liquid

Gambar 9 menunjukkan grafik hubungan antara liquid hold-up rerata dengan  $J_L$ . Tidak terjadi penurunan liquid hold-up rerata pada  $J_G$  0,7 m/s menandakan transisi terjadi dari stratified ke plug. Berdasarkan pengamatan visual, tebal film minimum pada saat elongated bubble

pada aliran *plug* hampir sama dengan aliran *stratified*, sehingga *liquid hold-up* rerata tidak mengalami penurunan. Transisi ke *slug* mulai terjadi pada  $J_G = 0,94$  m/s dan  $J_L = 0,2$  m/s. Begitu pula pada  $J_G \geq 1,88$  m/s, *slug* terjadi pada  $J_L = 0,1$  m/s. Transisi *stratified* ke *slug* tersebut ditandai pada gambar visual bahwa tebal film minimum saat *elongated bubble* lebih kecil saat *stratified smooth*. Hal tersebut berlangsung pada waktu yang cukup lama hingga terbentuk *hydraulic jump*, sehingga nilai rerata *liquid hold-up* mengalami penurunan. Dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan nilai rerata *liquid hold-up* saat  $J_G$  ditingkatkan. Sementara itu, nilai rerata *liquid hold-up* tetap meningkat pada pembentukan *slug* melalui mekanisme *wave coalescence*. Hal ini diakibatkan oleh peningkatan  $J_L$  yang lebih tinggi untuk membentuk *slug* dengan pola yang hampir mirip dengan *pseudo slug*.



**Gambar 10.** Perbandingan nilai *liquid hold-up* rerata terhadap kecepatan superficial gas

Pada **Gambar 10**, terlihat bahwa penambahan kecepatan superficial gas akan menurunkan nilai *liquid hold-up* untuk semua nilai  $J_L$ . Namun, terdapat penurunan nilai *liquid hold-up* dengan gradien yang curam seperti pada  $J_L = 0,1$  m/s dan  $J_L = 0,2$  m/s. Hal tersebut merupakan salah satu indikasi terbentuknya aliran *slug* dari *stratified*, karena akan terjadi akumulasi debit aliran air pada *liquid slug*. Pembacaan fase *liquid slug* pada *data logger* terjadi pada waktu yang singkat, sebelum akhirnya fase menjadi gas slug pada waktu yang lama untuk menginisiasi *slug* kembali. Kondisi tersebut terjadi pada pembentukan slug melalui mekanisme *wave growth*.

## Kesimpulan

Pengamatan visual serta pengambilan data *liquid hold-up* aliran 2 fasa pada pipa horizontal berdiameter dalam 50 mm telah dilakukan. Berdasarkan hasil yang telah diperoleh, perubahan nilai *liquid hold-up* dapat

memberikan indikasi terhadap perubahan pola aliran dari *stratified* ke *slug*. Pada mekanisme *wave growth* untuk kecepatan superficial gas rendah, terbentuk aliran *slug less aerated*. Bagian *liquid slug* mengakumulasi debit air, sehingga *film thickness* pada *elongated bubble* menjadi rendah. Fenomena tersebut tidak terjadi pada transisi pola aliran dari *stratified* ke *plug*. Pada mekanisme *wave coalescence*, transisi terjadi melalui fenomena *pseudo slug* dan membentuk *high aerated slug*. Pada kasus tersebut, terdapat peningkatan frekuensi *slug* dan panjang *liquid slug* sehingga nilai *liquid hold-up* rerata semakin meningkat.

## Konflik Kepentingan

Tidak ada konflik kepentingan dalam penelitian ini.

## Penghargaan

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Muhammadiyah Malang yang telah memberikan dana hibah Penelitian dan Pengembangan Iptek (P2I) tahun 2019-2020.

## Daftar Pustaka

- [1] Baker, O., "Design of Pipelines for Simultaneous Flow of Oil and Gas," Oil and Gas J., pp.26, 1954.
- [2] Mandhane, J.M., Gregory, G.A., Aziz, K., "A Flow Pattern Map For Gas Liquid Flow In Horizontal And Inclined Pipes," Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 1, pp. 537-553, 1974.
- [3] 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, pp. 549-563, 1987.
- [4] Nusirwan, Y.A., "Studi Eksperimental Tentang Inisiasi dan Perkembangan Aliran Slug pada Pipa Horizontal," Tesis, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, 2016.
- [5] Thaker, J., Banerjee, J., "Characterization of two-phase slug flow sub-regimes using flow visualization," Journal of Petroleum Science and Engineering, Elsevier, Vol. 135, pp. 561-576, 2015.
- [6] Andritsos, N., Hanratty, T.J., "Interfacial Instabilities for Horizontal Gas-liquid Flows in Pipelines," Int. J. Multiphase Flow, Elsevier, Vol. 13, No. 5, pp. 583-603, 1989.
- [7] Dinaryanto, O., "Experimental investigation on the initiation and flow development of gas-liquid slug two-phase flow in a horizontal pipe," Experimental Thermal and Fluid Science Journal, Elsevier, Vol. 81, pp. 93-108, 2017.
- [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, Vol. 184, pp 363-377, 1998.
- [9] Deendarlianto, Ousaka, A., Kariyasaki, A., Fukano, T., “Investigation of liquid film behavior at the onset of flooding during adiabatic countercurrent air–water two-phase flow in an inclined pipe,” Int. J. Nuclear Engineering and Design, Elsevier, Vol. 235, pp. 2281–2294, 2005.
- [10] Ousaka, A., Deendarlianto, Kariyasaki, A., Fukano, T., “Prediction of flooding gas velocity in gas-liquid counter-current two-phase flow in inclined pipes,” Int. J. Nuclear Engineering and Design, Elsevier, Vol. 263, pp. 1282-1292, 2006.
- [11] Rahmandhika, A., Dinaryanto, O., “Visualization Study in the Transition Flow Pattern of Stratified to Slug Flow of Air-Water Two Phase Flow in a Horizontal Pipe,” in 9<sup>th</sup> International Conference on Thermofluids, 2006, AIP Conference Proceedings 2001, 030003.
- [12] Deendarlianto, Rahmandhika, A., “Experimental study on the hydrodynamic behavior of gas-*liquid* air-water two-phase flow near the transition to *slug* flow in horizontal pipes,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Elsevier, Vol. 130, pp. 187-203, 2019.