



## Analisis pengaruh diameter pipa terhadap perubahan sub-regime pola aliran 2 fasa stratified air-udara pada pipa horizontal

*Analysis of the effect of pipe diameter on changes in sub-regime flow patterns of 2-phase stratified water-air in horizontal pipes*

**A. Rahmandhika\*, H. Hendaryati, A. Mokhtar**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang, Jl. Raya Tlogomas no. 246, Malang, Jawa Timur, 65144, Indonesia. HP. 082134714380

\*E-mail: andinusa@umm.ac.id

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article History:

Received 10 May 2023

Accepted 15 March 2024

Available online 01 April 2024

#### Keywords:

Stratified flow

Liquid hold-up

Superficial velocity

CECM



Stratified water-air flow is very common and expected to occur in piping systems. Understanding the characteristics of liquid hold-up in stratified flow patterns is considered one of the important factors in operational financing for gas and liquid transportation in various industries. This study aims to determine the pipe diameter effect on the parameters of stratified flow pattern sub-regime. The data obtained in this study is used as a supporting database as a basis for developing the piping system design. The research was conducted on acrylic pipes with diameters of 16 and 26 mm and a length of 9.5 m. The method applied to determine the characteristics of the stratified flow pattern is the constant current (CECM). The observation area is located 220 – 260 D from the inlet. The value range of  $J_L = 0.03 - 0.1$  m/s and  $J_G = 2.83 - 10$  m/s. Based on the experiment, the results obtained from the liquid hold-up affect the criteria for sub-regime changes in stratified flow patterns. The liquid hold-up is affected by the superficial velocity of the liquid, gas, and inner pipe diameter. The higher the liquid's superficial velocity, the greater the liquid hold-up value. The higher the gas superficial velocity, the smaller the liquid hold-up value. At low  $J_L$ , an increase in  $J_G$  causes a sub-regime transition of the flow pattern from smooth stratified to wavy stratified. At high  $J_L$ , an increase in  $J_G$  causes a transition of the flow pattern sub-regime from pseudo slug to roll wave and wavy stratified.

*Dinamika Teknik Mesin*, Vol. 14, No. 1, April 2024, p. ISSN: 2088-088X, e. ISSN: 2502-1729

## 1. PENDAHULUAN

Aliran dua fase merupakan jenis aliran yang didalamnya terdapat lebih dari satu fase, seperti *gas-liquid*, *gas-solid*, dan *liquid-solid*. Pada suatu proses di industri, aliran dua fase *gas-liquid* merupakan aliran yang paling sering dijumpai. Aliran dua fase di industri sering terjadi pada beberapa peralatan proses, yakni *heat exchanger* akibat perpindahan panas dan jaringan sistem perpipaan pada transportasi fluida. Oleh sebab menariknya topik

aliran dua fase dan sering dijumpai kondisi aliran dua fase di industri, perlu dilakukan riset yang lebih mendalam agar didapat detail kompleksitas fenomena aliran dua fase.

Penelitian mengenai aliran dua fase telah dilakukan sejak lama, sebab pengetahuan mengenai peristiwa aliran dua fase berperan penting pada jalannya suatu proses industri. Beragam penelitian mengenai sub topik aliran dua fase telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, salah satu sub topik yang menjadi objek penelitian adalah peta pola aliran dua fase. Peta pola aliran dua fase dapat dibedakan sesuai dengan arah aliran (*co-current* dan *counter current*) dan koordinat pipa (horizontal dan vertikal). Pemahaman mengenai peta pola aliran merupakan aspek penting pada penelitian aliran dua fase untuk melakukan analisis basis pemodelan matematis dan memprediksi perilaku aliran dua fase.

Bonzanini dan Picchi (2019) melakukan penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan model persamaan transient 1-Dimensi yang sebelumnya telah digunakan untuk menggambarkan aliran *stratified*, *wavy*, dan *slug* dalam pipa horizontal dan mendekati horizontal. Fokusnya adalah mempertimbangkan aliran penampang melintang dengan memasukkan faktor bentuk ke dalam persamaan keseimbangan momentum model tersebut. Dalam penelitian tersebut, digunakan model yang telah diintegrasikan sebelumnya untuk mendapatkan profil kecepatan pada setiap langkah waktu dan sel komputasi. Profil kecepatan yang dihasilkan kemudian dibandingkan dengan data eksperimental yang diukur dengan teknik PIV (Bonzanini dan Picchi, 2019). Rahmandhika (2018) melakukan penelitian dengan menggunakan pipa akrilik horizontal berdiameter 26 mm dan panjang 10 m dimana air dan udara digunakan sebagai fluida kerja. Pengambilan gambar visual dilakukan menggunakan kamera kecepatan tinggi Phantom Miro M310 pada bagian L/D 180-210 dari *inlet* pipa. Selain itu, metode CECM digunakan untuk mengukur jumlah cairan dalam aliran. Berdasarkan riset tersebut, ditunjukkan bahwa pembentukan *slug* dari aliran berlapis setidaknya terbagi menjadi dua mekanisme dasar. Pada kecepatan gas rendah, kondisi stabilitas *slug* tercipta melalui mekanisme pertumbuhan gelombang, dan peningkatan kecepatan gas menghasilkan peningkatan aerasi dan panjang *slug* cairan. Selain itu, ditemukan bahwa pembentukan *slug* dengan tingkat aerasi tinggi terjadi pada  $J_L = 0,3$  m/s ketika  $J_G$  dipertahankan pada 3,77 m/s (Rahmandhika dkk., 2018).

Arabi menginvestigasi frekuensi *slug* dalam berbagai *sub-regime* yang mungkin ditemukan dalam aliran gas-cair intermittensi pada tekanan atmosfer dalam pipa horizontal berdiameter dalam 30 mm dan panjang 13 meter. Studi mencakup *regime plug*, aliran *slug* kurang teraerasi, dan aliran *slug* sangat teraerasi. Perbandingan dilakukan antara berbagai metode pengukuran frekuensi *slug* dari sinyal penurunan tekanan, termasuk penghitungan, metode Wilkens dan Thomas, serta metode Power Spectral Density (PSD). Setelah melakukan perbandingan yang substansial antara hasil penelitian ini dan pemodelan, sebuah korelasi baru ditemukan untuk menunjang penelitian sebelumnya (Arabi dan Salhi, 2020). Pada tahun berikutnya, Arabi juga melakukan hal yang sama melalui *sudden expansion* secara eksperimental. Dua pipa dengan diameter dalam (ID) 30 dan 40 mm yang terhubung oleh *sudden expansion* dengan aspek rasio  $\sigma = 0,562$ . Penelitian ini fokus pada aliran *Plug*, *Less Aerated Slug* (LAS), dan *Highly Aerated Slug* (HAS). Hasil visualisasi aliran menunjukkan bahwa *slug* cairan, pada aliran *Plug* dan LAS, pecah setelah melewati singularitas, yang tidak terjadi pada aliran HAS. Analisis kualitatif dan kuantitatif, melalui visualisasi aliran dan standar deviasi sinyal menunjukkan bahwa aliran memiliki fluktuasi yang lebih rendah di hilir singularitas. Selain itu, persistensi frekuensi *slug* bergantung pada sifat dari *sub-regime* tersebut (Arabi dan Zenati, 2021).

Sementara itu, aliran *slug* pada pipa horizontal juga dibahas oleh banyak peneliti. Deendarlianto (2019) meneliti karakteristik hidrodinamika pada daerah transisi menjadi aliran *slug* pada aliran dua fase udara-air dalam pipa horizontal dengan diameter beragam. Kecepatan superficial air dan udara berkisar dari  $J_L = 0,03$  hingga 0,30 m/s dan  $J_G = 0,7$  hingga 10,0 m/s. Perilaku hidrodinamis diperoleh dari gabungan visualisasi yang dideteksi dengan menggunakan kamera video berkecepatan tinggi, gradien tekanan, dan pengukuran fraksi volume. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pertumbuhan gelombang dan peleburan gelombang terlibat dalam mekanisme pembentukan aliran *slug* (Deendarlianto et al., 2019). Pola tersebut kemudian dibahas kembali oleh Rahmandhika (2020) dan (2022) pada pipa berdiameter dalam yang lebih spesifik, yaitu 50 mm dan 16 mm. Dengan menggunakan metode *Constant Electric Current Method* (CECM), Rahmandhika mengemukakan bahwa penurunan nilai *liquid hold-up* secara drastis pada mekanisme *wave growth* ( $J_G \leq 1,88$  m/s) dapat mengindikasikan perubahan pola aliran dari *stratified* ke *slug*. Sementara pada mekanisme *wave coalescence* ( $J_G > 1,88$  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* (Rahmandhika & Mokhtar, 2020; Rahmandhika & Suprianto, 2022). *Slug* juga diteliti menggunakan beberapa metode yang berbeda, seperti eksperimen-simulasi yang dilakukan pada *elbow*/belokan (Cao et al., 2022), pemodelan mekanistik dengan deposisi (Gonçalves dan Matar, 2022), bahkan metode prediktif yang digunakan untuk mengetahui aliran *slug* pada kondisi lampau hingga setelahnya (Abdalellah dan Osman, 2021).

Penelitian mengenai aliran *slug* juga mendukung data yang dibutuhkan untuk karakteristik transisi aliran *stratified* pada kecepatan superficial *liquid* yang lebih rendah. Beberapa peneliti terfokus pada parameter tekanan/*pressure drop* untuk menentukan *sub-regime* aliran *stratified* (Al-Dogail & Gajbhiye, 2021; Hudaya et

al., 2019; Seo et al., 2021). Dengan metode yang sebelumnya dikemukakan (CECM), seharusnya *sub-regime* aliran *stratified* juga dapat ditentukan. Penelitian ini membahas mengenai penggunaan metode tersebut bila diaplikasikan untuk menentukan pola aliran *stratified*. Pengolahan data secara statistik juga ditujukan untuk memperjelas karakteristik aliran *stratified*. Dengan metode yang berbeda, diharapkan penentuan pola aliran dapat tervalidasi dengan parameter yang lain, sehingga kesepakatan tentang batasan pola aliran antar *sub-regime* dapat lebih jelas.

## 2. METODE PENELITIAN

Eksperimen mengenai penelitian aliran dua fase air-udara dilakukan pada kondisi tekanan dan temperatur ruangan, yakni 1 atm dan 30°C. Tabel 1 berikut ini disajikan properti dari masing-masing fluida:

Tabel 1. Properti fluida kerja

Property pada 30°C	Fluida air	Fluida udara
Massa jenis (kg/m <sup>3</sup> )	996	1,163
Viskositas dinamik (N.s/m <sup>2</sup> )	0,799 x 10 <sup>-3</sup>	1,85 x 10 <sup>-5</sup>
Viskositas kinematik (m <sup>2</sup> /s)	0,802 x 10 <sup>-6</sup>	1,597 x 10 <sup>-5</sup>

Pada penelitian ini, air dan udara masuk ke pipa melalui *mixer*. Pengamatan fenomena aliran *stratified* untuk mengetahui karakteristiknya diketahui dengan memasang beberapa sensor dan peralatan, yakni menggunakan sensor CECM. Setelah melalui pipa, fluida air dan udara dipisahkan dengan menggunakan separator. Udara dibuang ke lingkungan sedangkan air ditampung oleh tangki outlet untuk dialirkan kembali ke tangki inlet.

Pada pengambilan data, dilakukan langkah-langkah untuk mendapatkan data yang valid. Sebelum memulai pengamatan, terdapat beberapa persiapan, yaitu pengisian tangki inlet dengan air sebanyak minimal 75 %. Guna validitas grafik CECM yang berhubungan dengan konduktivitas, air disaring terlebih dahulu dan dipastikan bersih dari kotoran-kotoran agar tidak mengganggu dalam eksperimen. Semua katup ditutup agar udara dan air tidak masuk ke seksi uji. Setelah itu, kompresor dinyalakan. Selanjutnya katup pada flowmeter udara dibuka sesuai dengan kecepatan superfisial udara ( $J_G$ ) sesuai data matriks yang diinginkan. Kecepatan dijaga konstan. Lalu, pompa utama dan pompa sirkulasi dihidupkan. Langkah selanjutnya adalah membuka katup air sampai flowmeter menunjukkan kecepatan superfisial air ( $J_L$ ) yang sesuai data matriks. Sebelum melakukan pengujian, dilakukan kalibrasi CECM dengan cara mengisi seksi uji secara penuh, kemudian arus konstan dialirkan ( $I_0$ ) dan masing-masing sensor diukur tegangannya ( $V_L$ ). Nilai tegangan pada kondisi penuh ( $V_L$ ) dipakai sebagai faktor kalibrasi.

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

Pengambilan data pada pasangan  $J_G$  dan  $J_L$  dilakukan dengan pengakuisisian perbedaan jarak pada dua sensor CECM. Apabila ingin dilakukan variasi data  $J_G$  dan  $J_L$  maka prosedur penelitian dapat dilakukan seperti pada langkah sebelumnya.

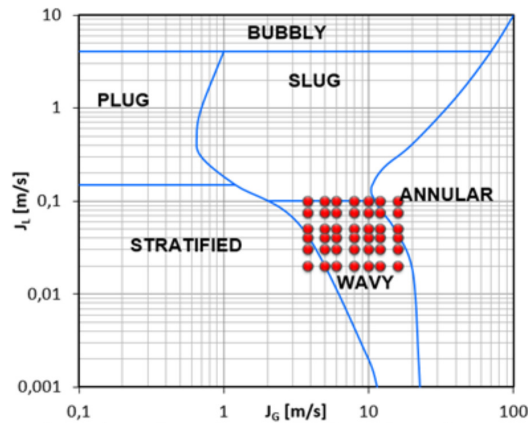
Penelitian ini menggunakan variasi kecepatan superfisial air ( $J_L$ ) mulai dari 0,03 m/s sampai dengan 0,1 m/s, sedangkan nilai kecepatan superfisial udara ( $J_G$ ) divariasi mulai dari 2,83 m/s sampai dengan 10 m/s.

Tabel 2. Matriks data penelitian

		Kecepatan superfisial <i>gas</i> ( $J_G$ )			
		2,83 m/s	3,77 m/s	6,2 m/s	10 m/s
Kecepatan superfisial <i>liquid</i> ( $J_L$ )	0,03 m/s	1	2	3	4
	0,05 m/s	5	6	7	8
	0,075 m/s	9	10	11	12
	0,1 m/s	13	14	15	16

Seperti yang telah dijelaskan diatas bahwa variabel kecepatan superfisial fluida telah ditentukan. Berdasar peta pola aliran Mandhane dkk. (1974), variabel kecepatan fluida yang telah ditentukan diatas termasuk dalam

pola aliran stratified. Gambar 1 menunjukkan kisaran daerah penelitian pada peta pola aliran tersebut (Mandhane, 1974).

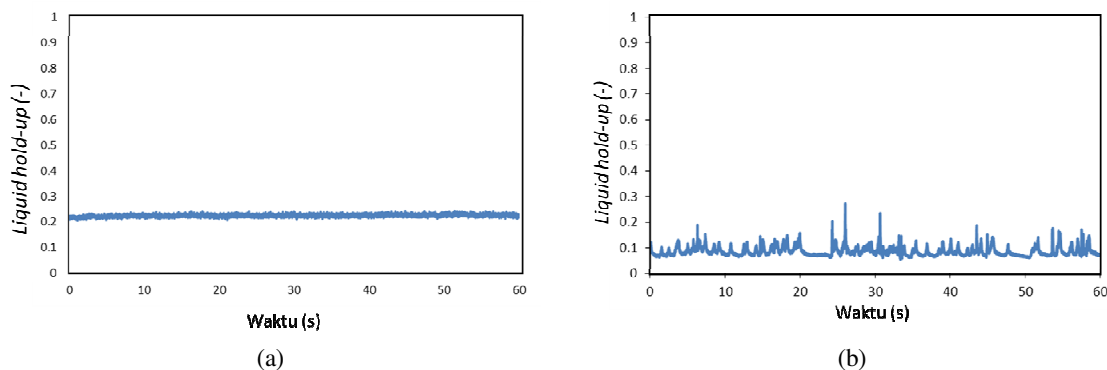


Gambar 1. Kisaran daerah penelitian berdasarkan peta Mandhane

Adapun pengolahan data untuk mengetahui karakteristik aliran *stratified* pada penelitian ini yakni melakukan pemrosesan sinyal dari keluaran sensor CECM. Keluaran sensor CECM diolah dengan menggunakan Microsoft Excel, sehingga didapatkan data berupa *liquid holdup* ( $\eta$ ). Data *liquid holdup* yang merupakan fungsi waktu dilakukan analisis secara statistik.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

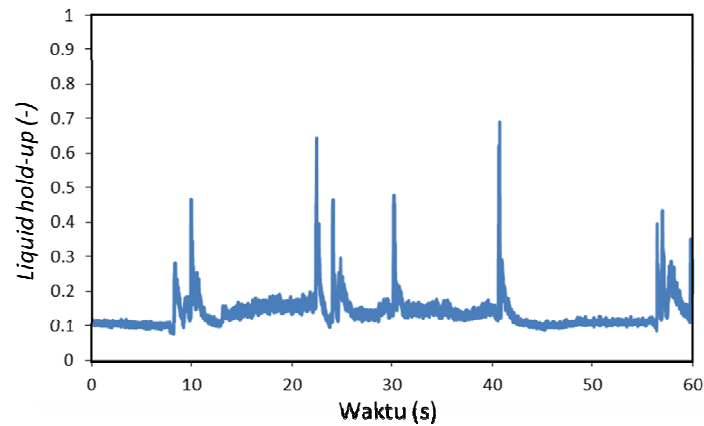
Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan pada pipa akrilik berdiameter dalam 16 mm dan 26 mm, terdapat beberapa perbedaan. Pada kecepatan superficial *liquid* ( $J_L$ ) dan gas ( $J_G$ ) yang sama, keduanya memiliki nilai serta pola aliran yang beragam. Secara umum, pada  $J_L$  yang rendah (0,03 m/s), pola aliran dapat dikategorikan *smooth stratified* (Gambar 2(a)). Hal tersebut dikarenakan debit air yang melewati luas penampang pipa sedikit. Aliran gas mendominasi, terutama pada  $J_G$  yang semakin tinggi. Dengan gaya gesek di permukaan *liquid* yang semakin besar akibat kenaikan  $J_G$ , maka terjadi perubahan aliran dari *smooth* menjadi *wavy stratified*. Hal ini ditunjukkan pada grafik CECM yang mengalami beberapa lonjakan secara merata dalam rentang waktu tertentu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2(b). Walaupun demikian, terlihat bahwa rata-rata *liquid hold-up* pada *wavy stratified* lebih rendah akibat tingginya debit gas yang melalui pipa, sehingga menekan debit air pada luas penampang tertentu.



Gambar 2. Bentuk pola aliran 2 fasa pada  $J_L = 0,03$  m/s (a)  $J_G = 2,83$  m/s berupa *smooth stratified* dan (b)  $J_G = 6,2$  m/s berupa *wavy stratified*

Peningkatan nilai  $J_L$  akan meningkatkan nilai *liquid hold-up*. Hal ini memperbesar kemungkinan terjadinya variasi/perubahan pola aliran karena dinamika tebal film yang membesar. Semakin tinggi permukaan air, semakin besar kemungkinan variasi bentuk aliran. Hal tersebut salah satunya juga dipengaruhi oleh besar gesekan permukaan yang terjadi antara air dan udara. Sebagai contoh, pada  $J_L = 0,05$  m/s dan  $J_G = 2,83$  m/s terjadi setidaknya 3 lonjakan nilai *liquid hold-up* selama 1 menit, seperti yang terlihat pada Gambar 3. Nilai yang semula hampir konstan di 0,1 – 0,2 berubah menjadi hingga 0,7 pada waktu yang singkat. Beberapa peneliti sebelumnya mengategorikan aliran tersebut sebagai *pseudo slug*, seperti yang diulas oleh Deendarlianto

(Deendarlianto et al., 2019). *Pseudo slug* adalah kondisi dimana aliran gas tersumbat oleh *liquid* yang memiliki aerasi sangat tinggi. Terdapat 2 kemungkinan yang timbul nantinya, yaitu transisi menuju aliran *slug* atau sumbatan pecah berubah menjadi *roll wave* (seperti bentuk ombak di laut), seperti yang telah dibahas oleh Rahmandhika (Rahmandhika & Mokhtar, 2020; Rahmandhika & Suprianto, 2022).



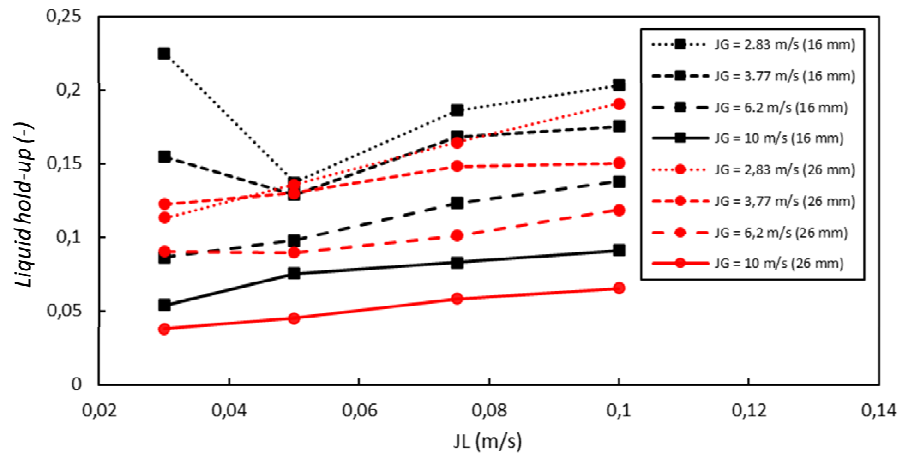
Gambar 3. Lonjakan nilai *liquid hold-up* secara singkat pada  $J_L = 0,05$  m/s dan  $J_G = 2,83$  m/s menginisiasi pola aliran *pseudo slug*

Tabel 3. Bentuk pola aliran 2 fase pada variasi  $J_L$  dan  $J_G$  untuk pipa berdiameter dalam 16 dan 26 mm.

Pipa (mm)	$J_L \backslash J_G$ (m/s)	2,83	3,77	6,2	10
16	0,03	$\alpha$	$\alpha$	$\beta$	$\beta$
	0,05	$\gamma$	$\gamma$	$\delta$	$\beta$
	0,075	$\gamma$	$\gamma$	$\beta$	$\beta$
	0,1	$\gamma$	$\gamma$	$\beta$	$\beta$
26	0,03	$\alpha$	$\alpha$	$\beta$	$\beta$
	0,05	$\gamma$	$\delta$	$\beta$	$\beta$
	0,075	$\gamma$	$\delta$	$\beta$	$\beta$
	0,1	$\gamma$	$\delta$	$\beta$	$\beta$

Ringkasan terkait bentuk pola aliran pada matriks  $J_L$ - $J_G$  untuk kedua pipa ditunjukkan pada Tabel 3, dimana  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , dan  $\delta$  berturut-turut adalah aliran *smooth stratified*, *wavy stratified*, *pseudo slug*, dan *roll wave*. Terlihat bahwa *smooth stratified* pada kedua pipa terjadi pada  $J_L$  dan  $J_G$  yang rendah. Hal tersebut dapat dipahami, karena aliran *liquid* dan gas yang lambat menghasilkan gesekan permukaan yang tidak terlalu besar. Pada  $J_G$  yang tinggi, yaitu sekitar 6,2 hingga 10 m/s, gesekan permukaan meningkat drastis menyebabkan terbentuknya aliran *wavy stratified*. Hal tersebut sesuai dengan yang dikemukakan oleh (Al-Dogail & Gajbhiye, 2021). Peningkatan  $J_L$  dari 0,05 hingga 0,1 m/s pada  $J_G$  rendah (2,83 m/s) cukup mengakumulasi *liquid* sehingga semakin naik *liquid hold-up* nya pada daerah inisiasi. Imbasnya pada area *fully developed*, *liquid* memblokade aliran udara dan terbentuklah *pseudo slug*. Hal tersebut juga terjadi pada  $J_G$  3,77 m/s. Namun, pada diameter pipa yang lebih besar, diperlukan *liquid hold-up* yang lebih besar. Pengaruh geometri juga mempengaruhi ketinggian *liquid* pada luas area tertentu. Bila *liquid* tidak cukup tinggi untuk memblokade aliran gas, atau bila debit gas terlalu tinggi sehingga *liquid* tidak mampu terakumulasi pada dinding atas pipa, maka terjadi *roll wave*. *Roll wave* muncul lebih cepat pada pipa berdiameter 26 mm karena pengaruh geometri tersebut. *Roll wave* pada pipa 16 mm muncul pada  $J_G = 6,2$  m/s (lebih tinggi dibandingkan pipa 26 mm), diindikasikan dengan *liquid holdup* yang tidak mencapai 0,7 namun *trend*-nya landai.

Bentuk *sub-regime* pola aliran *stratified* pada dua diameter pipa yang berbeda diinterpretasikan pada nilai grafik rerata *liquid hold-up*. Nilai *liquid hold-up* seperti pada Gambar 2 dan Gambar 3 nilainya tidak konstan. Hal tersebut tentu saja belum memberikan informasi praktis untuk mengetahui kriteria perubahan *sub-regime* pola aliran *stratified*. Fluktuasi *liquid hold-up* selama rentang waktu tertentu kemudian dibuat nilai rata-ratanya. Berdasarkan hasil yang diperoleh, terdapat grafik kriteria perubahan pola aliran yang tidak linear, ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Perubahan nilai *liquid hold-up* rerata berdasarkan variasi kecepatan superfisial *liquid* dan gas

Pada Gambar 4, nilai *liquid hold-up* dengan variasi  $J_L$  dan  $J_G$  pada pipa 16 mm ditunjukkan dengan warna hitam, sementara pada pipa 26 mm ditunjukkan dengan warna merah. Terlihat bahwa peningkatan nilai  $J_L$  dari 0,03 m/s hingga 0,1 m/s akan meningkatkan nilai *liquid hold-up* secara landai. Debit *liquid* yang semakin tinggi akan meningkatkan luas area *liquid* pada total luas penampang pipa. Sebaliknya, pada  $J_G$  yang semakin tinggi, terjadi penurunan *liquid hold-up* rerata. Hal tersebut dikarenakan debit udara yang lebih tinggi akan menekan *liquid* ke arah bawah, atau ke depan. Dorongan ke depan ini juga menyebabkan adanya akumulasi *liquid* sehingga terjadi transisi *sub-regime*, baik *wavy stratified*, *roll wave*, maupun *pseudo slug*. *Pseudo slug* lebih sering terjadi pada  $J_G$  yang rendah. Indikasinya adalah penurunan *liquid hold-up* rerata secara drastis. Bila Gambar 2(a) dan Gambar 3 dibandingkan, maka terlihat bahwa Gambar 3 *smooth stratified* pada Gambar 2(a) memiliki nilai *liquid hold-up* hampir konstan di rentang 0,23. Sebaliknya, *pseudo slug* yang beberapa kali mengalami lonjakan *liquid hold-up* mengakumulasi debit air hingga terbentuk *pseudo slug* pada periode selanjutnya. Terbukti pada grafik bahwa diantara 2 lonjakan, nilai *liquid hold-up* berkisar antara 0,1-0,2 pada jangka waktu yang lama. Sehingga, nilai rata-rata *liquid hold-up* pada *pseudo slug* menurun dibandingkan *smooth stratified*.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan dari nilai *liquid hold-up* menggunakan metode CECM bahwa kriteria perubahan *sub-regime* pola aliran dipengaruhi oleh nilai kecepatan superfisial *liquid* dan gas yang berbeda. Kriteria tersebut mengalami pergeseran ketika diameter pipa yang digunakan juga berbeda. Semakin tinggi kecepatan superfisial *liquid*, semakin besar nilai *liquid hold-up*. Sebaliknya, semakin tinggi kecepatan superfisial gas, semakin kecil nilai *liquid hold-up*. Pada  $J_L$  rendah, peningkatan  $J_G$  menyebabkan transisi *sub-regime* pola aliran dari *smooth stratified* ke *wavy stratified*. Pada  $J_L$  tinggi, peningkatan  $J_G$  menyebabkan transisi *sub-regime* pola aliran dari *pseudo slug* ke *roll wave* dan *wavy stratified*.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis pada kesempatan ini mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu baik berupa materi maupun pikiran sehingga penelitian dan paper ini dapat terselesaikan. Yang kedua penulis mengucapkan terimakasih kepada Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Malang atas bantuan dana penelitian melalui program penelitian hibah internal 2022 yang dibiayai melalui Puskarekatek.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abdalellah, O., Osman, A.B., Investigations on the slug two-phase flow in horizontal pipes: Past, presents, and future directives, *Journal of Chemical Engineering Science*, 238, 2021.
- Al-Dogail, A.S., Gajbhiye, R.N., Effects of density, viscosity and surface tension on flow regimes and pressure drop of two-phase flow in horizontal pipes, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 2021.
- Arabi, A., Salhi, Y., On gas-liquid intermittent flow in a horizontal pipe: Influence of sub-regime on slug frequency, *Journal of Chemical Engineering Science*, 211, 2020.

- Arabi, A., Zenati, Y., Experimental investigation of sudden expansion's influence on the hydrodynamic behavior of different sub-regimes of intermittent flow, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 2021.
- Bonzanini, A., Picchi, D., Velocity profiles description and shape factors inclusion in a hyperbolic, one-dimensional, transient two-fluid model for stratified and slug flow simulations in pipes, *Journal of Petroleum*, 5(2), 191-198, 2019.
- Cao, X., Zhang, P., Li, X., Li, Z., Zhang, Q., Bian, J., Experimental and numerical study on the flow characteristics of slug flow in a horizontal elbow, *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2(4), 2022.
- Deendarlianto, Rahmandhika, A., Widyatama, A., Dinaryanto, O., Widyaparaga, A., & Indarto, 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*, 130, 187-203, 2019.
- Gonçalves, G. F. N., Matar, O.K., Mechanistic modelling of two-phase slug flows with deposition, *Journal of Chemical Engineering Science*, 259, 2022.
- Hudaya, A.Z., Widyatama, A., Dinaryanto, O., Juwana, W.E., Indarto, Deendarlianto, The liquid wave characteristics during the transportation of air-water stratified co-current two-phase flow in a horizontal pipe, *Experimental Thermal and Fluid Science Journal*, 103, 304-317, 2019.
- Mandhane, J.M., A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, 1, 537-553, 1974.
- Rahmandhika, A., Dinaryanto, O., Widyatama, A., Hudaya, A. Z., Indarto, Deendarlianto, Visualization study in the transition flow pattern of stratified to slug flow of air-water two phase flow in a horizontal pipe. Paper presented at the AIP Conference Proceeding of the 9th International Conference on Thermofluids, Yogyakarta, 2018.
- Rahmandhika, A., Mokhtar, A., Pengaruh liquid hold-up terhadap transisi pola aliran 2 fasa air-udara dari stratified ke slug pada pipa 50 mm, *Journal of Science and Applicative Technology*, 4(2), 2020.
- Rahmandhika, A., Suprianto, H, Characterization of slug flow pattern formation in 16 mm diameter horizontal pipe. Paper presented at the AIP Conference Proceeding of 1st International Conference on Technology, Informatics, and Engineering, Malang, 2022.
- Seo, K., Kim, I., Park, K.-J., Jung, M., Yoon, H., Kim, S., Corradini, M., An analysis of air-water flow phenomena due to a pipe break under sub-atmospheric pressures using TRACE, *Journal of Nuclear Engineering and Design*, 374, 2021.