

Perilaku Aliran *Stratified* Ditinjau dari Karakteristik Visual dan Tebal Film Cairan pada Pipa Horizontal

I. D. Arirohman^{1,*}, A. Z. Hudaya^{1,2}, Deendarlianto^{1,3}, Indarto^{1,3}

¹Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muria Kudus Gondangmanis, Bae, Kudus 59324

³Pusat Studi Energi, Universitas Gadjah Mada Sekip K-1A Kampus UGM, Yogyakarta 55281

*e-mail: ilhamd.ari@gmail.com

Abstract

The characteristics of the liquid film of the air-water stratified co-current two-phase flow were investigated experimentally. The inner diameter and the pipe length were 26 mm and 9.5 m respectively. The superficial water and air velocities ranged (0,01 – 0,1) m/s and (4 – 20) m/s, respectively. The liquid film thickness data were obtained by using the developed parallel wire sensors. The results indicated that the averaged liquid film thickness decreases with the increase of the superficial gas velocity. Next, the wave velocity increases with the increase both of gas and liquid superficial velocities

Keywords: *Stratified flow, parallel wire, liquid film thickness, horizontal flow.*

Abstrak

Perilaku aliran stratified searah horizontal diteliti secara eksperimental dengan menggunakan metode *parallel wire* dan visual. Eksperimen dilakukan pada pipa akrilik berdiameter 26 mm dan panjang 9,5 m. Beberapa sub pola aliran stratified yang telah dilaporkan oleh peneliti-peneliti sebelumnya dapat teramati dengan melakukan variasi kecepatan superfisial udara (J_G) dari 4 – 20 m/s dan kecepatan superfisial air (J_L) dari 0,01 – 0,1 m/s. Ketebalan film cairan diukur dengan menggunakan sensor *parallel wire*, sementara kecepatan gelombang dihitung berdasarkan waktu delay yang diperoleh dari teknik *cross correlation*. Dari hasil penelitian disimpulkan bahwa ketebalan rerata film cairan menurun seiring meningkatnya J_G , sementara kecepatan gelombang secara umum meningkat dengan meningkatnya J_G dan J_L .

Kata kunci: *Stratified, parallel wire, ketebalan film cairan, kecepatan superfisial, kecepatan gelombang*

1. PENDAHULUAN

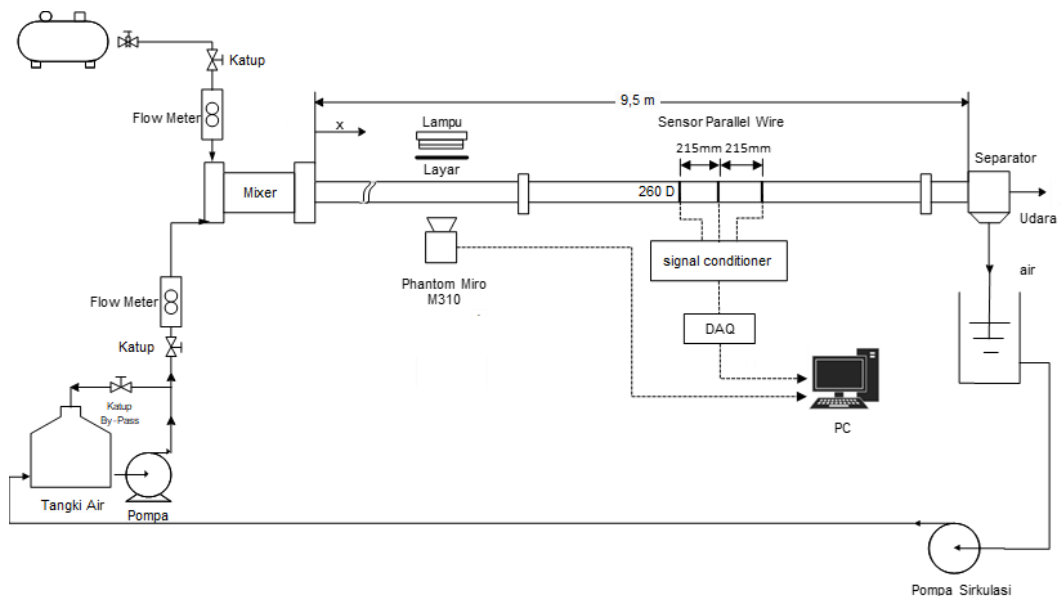
Aliran *stratified* adalah salah satu tipe aliran dua fase yang sering dijumpai dalam industri, misal pada *shell-tube heat exchanger*, sistem perpipaan minyak, *pressurized water reactor* (PWR), dan lainnya. Pada aliran *stratified* dalam pipa horizontal, kedua fase mengalir secara terpisah. Fase cair mengalir pada bagian bawah, sementara fase gas mengalir pada bagian atas pipa. Aliran *stratified* adalah jenis aliran yang cukup aman untuk sistem perpipaan karena tidak ada fluktuasi tekanan yang sangat besar yang dapat memicu terjadinya *blasting*.

Bae dkk. (2017) mengamati karakteristik beberapa sub pola aliran *stratified* pada saluran kotak dengan lebar 40 mm dan tinggi 50 mm. Dari hasil penelitiannya disimpulkan bahwa kecepatan gelombang antarmuka (*interfacial wave*) meningkat seiring meningkatnya Re_g dan Re_l .

Sementara menurut penelitian yang dilakukan oleh Hudaya dkk. (2016), kecepatan gelombang antarmuka meningkat dengan bertambahnya kecepatan superficial udara pada sub pola aliran yang sama.

Peneliti-peneliti sebelumnya telah mengembangkan beberapa metode pengukuran untuk aliran *stratified*, salah satunya adalah metode konduktansi menggunakan sepasang kawat sejajar atau lebih dikenal sebagai metode *parallel wire*. Metode ini memanfaatkan sifat konduktansi cairan dan kawat. Secara teoretik, nilai resistansi antara dua kawat sejajar akan berubah nilainya sebagai fungsi dari ketebalan *film* cairan yang membasahi kedua kawat. Dengan mengukur beda tegangan listrik antara kedua kawat, maka ketebalan *film* cairan pada waktu tertentu dapat diperkirakan. Brown dkk. (1978) menggunakan *wire probes* berbahan platinum berdiameter 0,06 mm dengan jarak *spacing* antar kawat 3 mm untuk mengukur ketebalan *film* cairan dan mendeteksi gelombang gangguan pada aliran *annular downward*. Badaruddin dkk. (2016) juga menggunakan metode ini untuk mengidentifikasi aliran *counter-current* dengan pola aliran *stratified*, *wavy*, dan *slug* pada pipa *botleg* akrilik berdiameter 25,4 mm.

Tujuan penelitian ini adalah mempelajari perilaku ketebalan *film* cairan pada aliran *stratified* searah horizontal dengan menggunakan metode *parallel wire*. Parameter kajian meliputi ketebalan *film* cairan dan kecepatan gelombang.



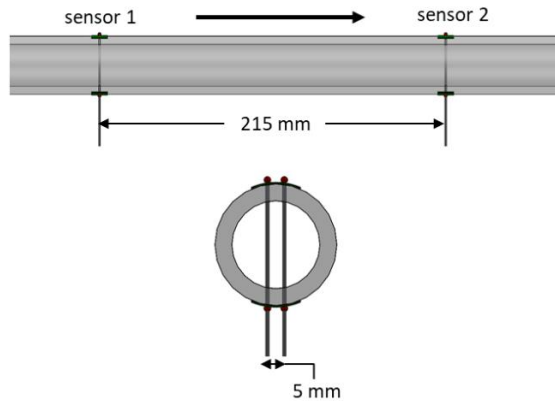
Gambar 1. Skema alat penelitian

2. METODE PENELITIAN

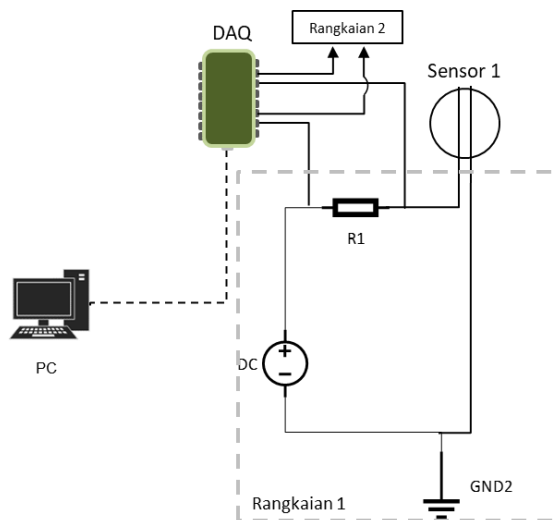
Penelitian ini dilakukan di Instalasi Riset Aliran Dua Fase Air-Udara, Laboratorium Mekanika Fluida, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Eksperimen dilakukan pada kondisi tekanan dan temperatur atmosferik, 1 atm dan 30 °C. Fluida kerja yang digunakan adalah air kran dan udara. Gambar 1 menunjukkan skema alat penelitian, air dan udara masuk ke pipa melalui *mixer*. Pengamatan fenomena aliran *stratified* dilakukan secara visual dan pengukuran kuantitatif dengan menggunakan sensor *parallel wire*. Pada pipa *outlet*, fluida air dan udara dipisahkan dengan menggunakan separator. Udara

dilepaskan ke lingkungan sedangkan air ditampung dalam tangki *outlet* untuk dialirkan kembali ke tangki *inlet*.

Sensor *parallel wire* terdiri dari sepasang kawat sejajar yang terbuat dari tembaga berlapis perak dengan diameter 0,51 mm dan jarak *spacing* 5 mm. Ada dua sensor *parallel wire* yang dipasang pada pipa akrilik transparan berdiameter 26 mm dan panjang 9,5 m, dengan jarak antar sensor 215 mm. Sensor dihubungkan dengan sebuah rangkaian *signal conditioner* yang dicatu dengan sumber listrik DC 12 Volt. Sinyal keluaran dari *signal conditioner* kemudian dikirimkan ke sistem akuisisi data (DAQ). Pada penelitian ini pengambilan data menggunakan *sampling rate* 500 sampel/s. Gambar 2 dan 3 menunjukkan sistem pengukuran dengan metode *parallel wire*.



Gambar 2. Mounting sensor parallel wire pada pipa uji



Gambar 3. Skema sistem pengukuran ketebalan film cairan

Kalibrasi sensor dilakukan dengan cara mengukur sinyal keluaran berupa nilai beda tegangan listrik pada ketebalan *film* cairan tertentu, ketebalan diukur menggunakan mikrometer. Kalibrasi dilakukan pada kondisi statis (tanpa aliran). Kemudian, pengukuran sinyal keluaran dari sensor dilanjutkan dengan menaikkan tebal cairan 1 mm secara bertahap.

Eksperimen ini dilakukan dengan mengalirkan air dan udara secara simultan ke dalam pipa akrilik. Kecepatan superfisial air (J_L) divariasikan antara 0,01–0,1 m/s dan kecepatan superfisial udara (J_C) divariasikan antara 4 – 20 m/s. Pengambilan data beda tegangan dilakukan pada 72 variasi kecepatan superfisial air dan udara. Untuk mendapatkan visualisasi aliran digunakan kamera *highspeed* Phantom Miro M310.

Data beda tegangan yang diperoleh dari hasil pengukuran kemudian dikonversi menjadi data ketebalan *film* cairan menggunakan *piecewise Lagrange interpolation* dengan data kalibrasi sebagai acuannya. Data ketebalan *film* selanjutnya dianalisis menggunakan teknik *cross correlation* untuk mendapatkan waktu *delay* sinyal dari kedua sensor. Informasi waktu *delay* digunakan untuk menghitung kecepatan gelombang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam aliran dua fase pada pipa horizontal terdapat beberapa jenis pola aliran yang bergantung pada kecepatan masing-masing fase. Peneliti-peneliti sebelumnya setidaknya telah mengklasifikasi aliran dua fase horizontal menjadi enam pola aliran, yaitu aliran *stratified smooth*, *stratified wavy*, *plug*, *slug*, *annular*, dan *dispersed bubble* (Taitel dkk., 1978). Chen dkk.. (1997) lebih detail lagi membagi aliran *stratified wavy* menjadi empat sub pola aliran, yaitu aliran 2-D *wave*, 3-D *wave*, *roll wave*, dan *entrained droplet*. Pada penelitian ini, kajian dilakukan untuk mempelajari perilaku ketebalan *film* cairan dari aliran *stratified* searah horizontal.

Gambar 4 menunjukkan hasil pengamatan visual dan grafik ketebalan *film* cairan. Sub pola aliran yang telah disebutkan oleh peneliti-peneliti sebelumnya berhasil teramati dalam penelitian ini. Gambar 4.a mengilustrasikan aliran *stratified smooth*, yang dicirikan dengan batas antarmuka fase yang relatif datar tanpa adanya gangguan (*flute line*). Jenis aliran ini terjadi pada kecepatan superfisial udara yang rendah. Dengan meningkatnya kecepatan superfisial udara, gelombang pada batas antarmuka fase mulai muncul akibat adanya *interfacial instability*, yaitu terjadi ketidakseimbangan antara energi angin yang diumpankan ke batas antarmuka dan *viscous dissipation* (Andritsos dan Hanratty, 1987).

Gambar 4.b menunjukkan sub pola aliran 2-D *wave* ditandai dengan adanya gelombang-gelombang teratur dengan ukuran yang kecil dan relatif sama pada batas antarmuka. Lebih jauh lagi, penambahan kecepatan superfisial udara meningkatkan ketidakstabilan di batas antarmuka. Pola aliran bergeser menjadi 3-D *wave*, gelombang-gelombang yang terbentuk tidak teratur baik ukuran dan jarak antar gelombangnya. Menurut Chen dkk. (1997) pada pola aliran ini terjadi *wave spreading effect*, yaitu ketika fase cair menaiki dinding dalam pipa dan membentuk kurvatur pada batas antarmuka yang dekat dengan dinding pipa. Sub pola aliran 3-D *wave* ditunjukkan pada Gambar 4.c.

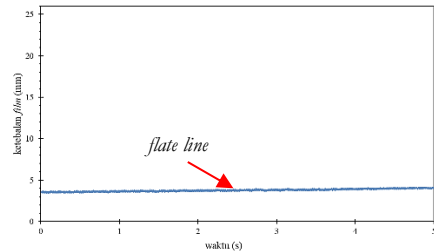
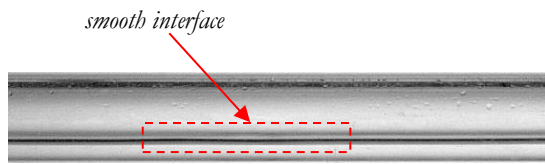
Aliran 3-D *wave* dapat berkembang menjadi aliran *roll wave* ketika kecepatan superfisial udara dan/atau air dinaikkan. Aliran ini ditandai dengan adanya gelombang yang menggulung serta beberapa gelembung udara yang terperangkap di sekitarnya. Terjadi lonjakan ketebalan *film* cairan pada aliran *roll wave* yang lebih besar daripada aliran 3-D *wave*. Menurut Hudaya dkk. (2016) pada aliran *roll wave*, *shear stress* yang searah aliran meningkat dan menekan cairan sehingga *liquid holdup*-nya turun, namun karena *liquid discharge* tetap sama maka akan terjadi lonjakan *liquid holdup* tiba-tiba pada daerah tertentu di dalam aliran. Gambar 4.d mengilustrasikan sebuah sub pola aliran *roll wave*.

Lin dan Hanratty (1987) mengusulkan sub pola aliran *pseudo-slug*. Aliran ini teramati pada daerah transisi antara aliran *stratified* dan *slug*. Pada aliran ini terjadi fenomena dimana puncak gelombang mencapai bagian atas pipa dan menyebabkan *blockage* pada aliran walaupun

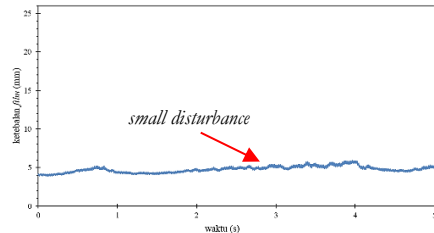
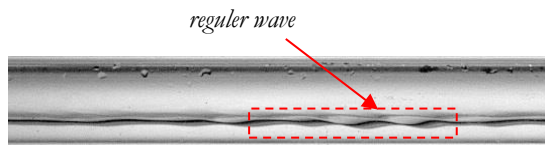
hanya sesaat. Gambar 4.e adalah visualisasi dari sub pola aliran *pseudo-slug*. Gambar 4.f menunjukkan sub pola aliran *entrained droplet*. Aliran ini teramati pada kecepatan superfisial udara > 14 m/s dan kecepatan superfisial air > 0,02 m/s. Aliran ini dicirikan dengan adanya *droplet* cairan yang lepas dari batas antarmuka dan terbawa aliran udara. Ketika kecepatan superfisial udara dinaikkan pola aliran akan bertransisi menjadi aliran *annular* (Gambar 4.g).

Ketebalan rerata *film* cairan akan menurun saat J_G dinaikkan. Desakan udara terhadap batas antarmuka menyebabkan terjadinya *wave spreading effect*. Ketebalan rerata *film* berkurang karena sebagian volume air mulai menyebar dan menaiki dinding di bagian samping. Kondisi ini terus berlangsung hingga keseluruhan bagian dinding pipa terlapisi cairan, pada kondisi ini lapisan *film* cairan berbentuk seperti cincin dan disebut sebagai aliran *annular*. Perubahan ketebalan rerata *film* cairan terhadap J_L dan J_G ditunjukkan Gambar 5.

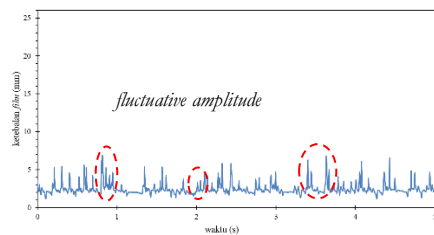
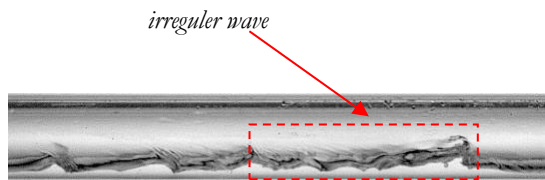
Gambar 6.a adalah tipikal grafik dari fungsi *cross correlation* terhadap *shift time*. Waktu *delay* adalah nilai *shift time* dimana fungsi bernilai maksimum. Gambar 6.b adalah grafik hubungan antara kecepatan gelombang dengan kecepatan superfisial udara dan air. Kecepatan gelombang dihitung dengan membagi jarak antar sensor dengan waktu *delay* yang sudah diperoleh dengan teknik *cross correlation*.



a. *Stratified smooth* ($J_L = 0,02$ m/s; $J_G = 4$ m/s)

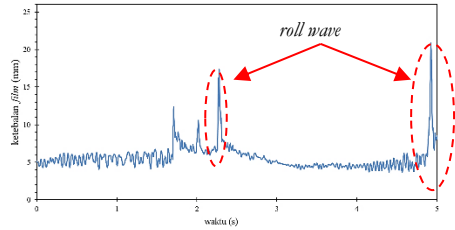
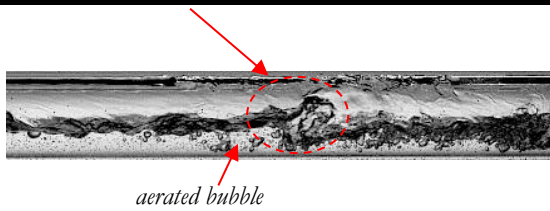


b. *2-D wave* ($J_L = 0,03$ m/s; $J_G = 5$ m/s)

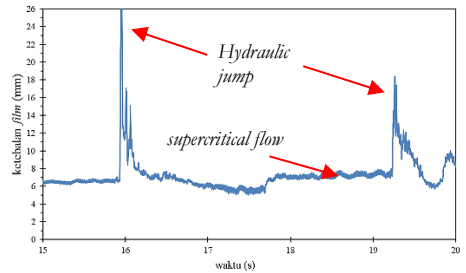
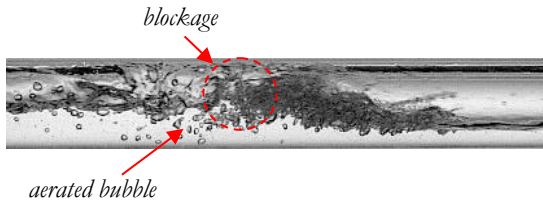


roll wave

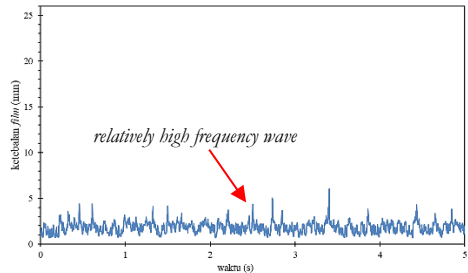
c. *3-D wave* ($J_L = 0,03$ m/s; $J_G = 9$ m/s)



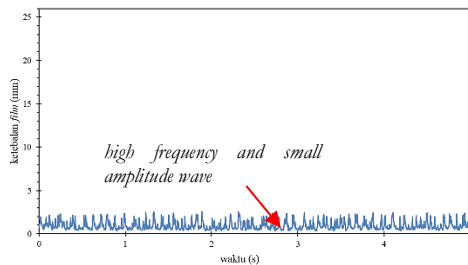
d. Roll wave ($J_L = 0,075$ m/s; $J_G = 5$ m/s)



e. Pseudo-Slug ($J_L = 0,1$ m/s; $J_G = 4$ m/s)



f. Entrained droplet ($J_L = 0,075$ m/s; $J_G = 14$ m/s)

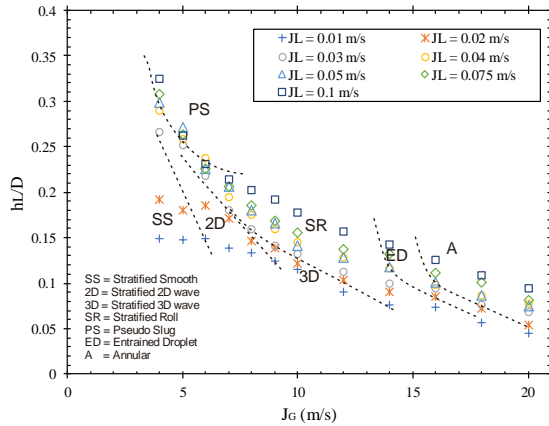


g. Annular ($J_L = 0,075$ m/s; $J_G = 20$ m/s)

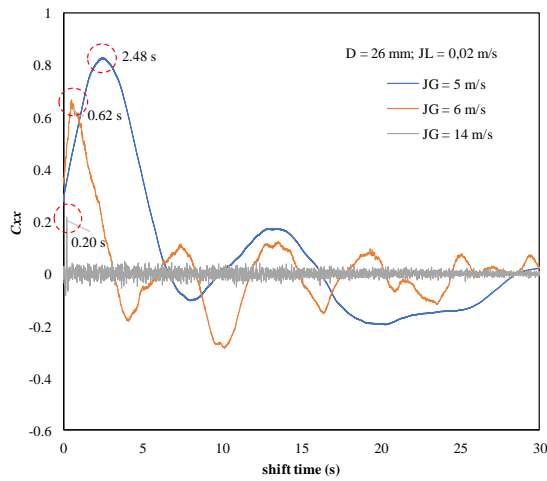
Gambar 4. Visualisasi sub pola aliran dan grafik ketebalan film cairan dalam domain waktu

Dapat dilihat pada grafik bahwa secara umum kecepatan gelombang meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan superfisial air dan udara. Hasil ini sama dengan apa yang telah dilaporkan Bae dkk. (2017) untuk aliran *stratified* pada saluran kotak 40 mm × 50 mm. Namun ada hasil yang sedikit berbeda yaitu pada $J_L = 0,075$ m/s dan 0,1 m/s pada $J_G = 4$ m/s,

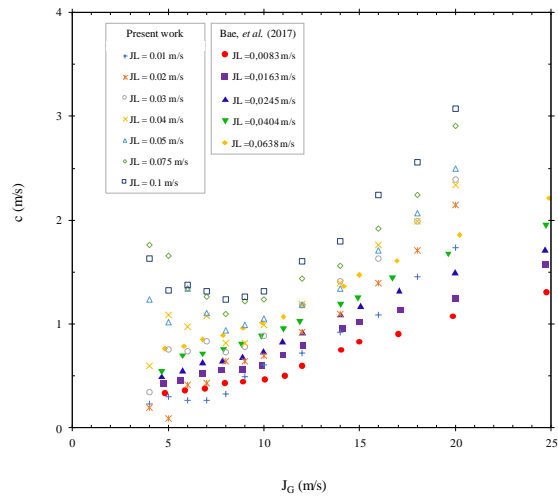
kecenderungan kecepatan gelombang menurun terhadap kenaikan J_G hingga nilai $J_G = 8$ m/s, kemudian kecepatan gelombang meningkat terhadap kenaikan J_G . Hal ini disebabkan terbentuknya aliran *pseudo-slug* pada J_L yang tinggi dan J_G yang rendah. Kecepatan gelombang dapat cukup tinggi karena gas tersumbat sehingga gradien tekanan naik dan memberikan gaya dorong yang cukup besar pada gelombang di depannya (Rahmandhika, 2018).



Gambar 5. Perubahan ketebalan rerata film cairan terhadap J_L dan J_G



(a)



(b)

Gambar 6. (a) Fungsi *cross correlation* (b) Pengaruh J_L dan J_G terhadap kecepatan gelombang

4. KESIMPULAN

Metode *parallel wire* dapat digunakan untuk mengukur ketebalan *film* cairan pada aliran *stratified* searah horizontal. Ketebalan rerata *film* cairan menurun seiring meningkatnya kecepatan superfisial udara. Sementara kecepatan gelombang secara umum meningkat dengan meningkatnya kecepatan superfisial udara dan air. Kecepatan gelombang pada aliran *pseudo-slug* cukup tinggi walaupun nilai J_G rendah dikarenakan adanya mekanisme *blockage* aliran udara.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Bae, B., Ahn, T., Jeong, J., Kim, K., Yun, B., Characteristics of an Interfacial Wave in a Horizontal Air-Water Stratified Flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 97 (2017) pp. 197-205.
- Hudaya, A.Z., Kuntoro, H.Y., Dinaryanto, O., Deendarlianto, Indarto, Experimental Investigation on the Interfacial Characteristics of Stratified Air-Water Two-Phase Flow in a Horizontal Pipe, *AIP Coonference Proceedings 1737* (2016), 040012-1 – 040012-10.
- Brown, R. C., Andreussi, P., Zanelli, S., The Use of Wire Probes for The Measurement of Liquid Film Thickness in Annular Gas-Liquid Flows, *The Canadian of Chemical Engineering*, Vol. 36 (1978) pp. 754-757.
- Badarudin, A., Arman, M., Interpretasi Hasil Pengukuran Tebal Cairan pada Aliran Dua Fase Udara-Air Berlawanan Arah Menggunakan Metode Parallel-Wire dalam Pipa Kompleks, *Prosiding Seminar Nasional XI STTN Yogyakarta*, (2016) pp. 369-374.
- Taitel, Y., Lee, N., Dukler, A.E., Transient Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes : Modeling The Flow Pattern Transitions, *AIChE Journal*, Vol. 24, No. 5 (1978) pp. 920-934.
- Chen, X.T., Cal, X. D.; Brill, J. P., Gas-Liquid Stratified-Wavy Flow in Horizontal Pipelines, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 119 (1997) pp. 209-216.
- Andritsos, N., Hanratty, T.J., Interfacial instabilities for horizontal gas-liquid flow in pipelines. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 13 (1987) pp. 583-603.
- Lin, P.Y., Hanratty, T.J., Effect of Pipe Diameter on Flow Patterns for Air-Water Flow in Horizontal Pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 13, No. 4 (1987) pp. 549-563.
- Rahmandhika, A, Studi Eksperimental Mengenai Transisi Aliran Stratified ke Slug pada Aliran Dua Fasa Air-Udara dalam Pipa Horizontal, Tesis, Universitas Gadjah Mada, 2018.