

STUDI EKSPERIMEN MENGENAI FLUKTUASI TEKANAN DAN TEGANGAN GESER ANTARMUKA PADA ALIRAN *STRATIFIED AIR* UDARA PADA PIPA *HORIZONTAL*

Dony Gunawan¹⁾, Akhmad Zidni Hudaya²⁾, Indarto³⁾,

¹²³⁾ Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,
Jalan Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia
Correspondent author : ^{a)}zidni01@gmail.com

Abstrak

Pola aliran *stratified* merupakan salah satu aliran dua fasa gas-cairan yang sederhana, akan tetapi pembahasan yang komprehensif 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. Banyak sistem perpipaan didesain untuk beroperasi pada daerah aliran *stratified* karena mempunyai tingkat keamanan operasional yang tinggi. Prediksi dari aliran *stratified* telah lama menjadi area yang menarik untuk penerapan dari model-model aliran terpisah (*two fluid model*), akan tetapi kesulitan utamanya adalah prediksi dari tegangan geser cairan-dinding dan tegangan geser antarmuka.

Metodologi yang digunakan adalah visualisasi dan pengukuran beda tekanan. Pipa *acrylic* transparan ID 26 mm dan panjang total 9 m digunakan agar perilaku aliran dapat diamati. Seksi uji visualisasi mempunyai panjang 1 meter, ditempatkan pada jarak 200 D dari *mixer*. Tebal film aliran diamati menggunakan kamera video kecepatan tinggi, kemudian diolah menjadi data kuantitatif menggunakan metode *image processing*. Fluida kerja air dan udara dicampur melalui *mixer* berjenis simpel T yang dilengkapi plat pemisah mengalir searah sepanjang pipa horisontal. Pengukuran fluktuasi beda tekanan pada seksi uji diukur dengan menggunakan sensor tekanan *valdyne* dengan posisi *pressure tap* berjarak 75 D dari *mixer* dan jarak antar *pressure tap* 3,38 m. Sinyal keluaran sensor tekanan diubah oleh *Analog to Digital Converter* (ADC) menjadi sinyal tekanan fungsi waktu. Penelitian dilakukan pada tekanan atmosfer dan kondisi adiabatik dengan variabel pada penelitian ini meliputi kecepatan superfisial air (J_L) dari 0,025 m/s sampai 0,1 m/s dan kecepatan superfisial udara (J_G) dari 0,94 m/s sampai 12 m/s.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa : 1). Pola aliran *stratified* yang meliputi *stratified smooth*, *stratified wavy + ripple*, *stratified wavy + roll* dan *pseudo-slug* telah berhasil diidentifikasi baik secara visual dan sinyal tekanan. 2). Semakin besar J_G dan J_L maka *pressure gradient* akan semakin besar. 3). Pada J_L dijaga konstan, semakin tinggi nilai J_G maka tegangan geser antarmuka semakin tinggi. 4). Pada J_G yang konstan dengan nilai kecil, perubahan J_L tidak berpengaruh terhadap nilai tegangan geser antarmuka. Sedangkan pada J_G yang konstan dengan nilai besar, semakin besar nilai J_L maka tegangan geser antarmuka cenderung semakin besar. 5). Semakin besar nilai Re_L dan J_G maka nilai f_i akan semakin besar.

Kata kunci : aliran *stratified air-udara*, penurunan tekanan, tegangan geser antarmuka.

PENDAHULUAN

Aliran dua fasa banyak dijumpai di dalam proses-proses industri dan lingkungan. Sebagai contohnya adalah transportasi produk-produk migas,

pendinginan dari reaktor nuklir, kolom destilasi, dan lain-lain. Korosi yang sering terjadi dan keamanan proses sangat tergantung pada pola alirannya. Pada aliran *stratified* di dalam pipa, cairan mengalir

pada bagian bawah pipa dan gas terdapat pada bagian atas. Hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan berat jenis antara kedua fase dan juga gaya gravitasi bumi. Meskipun pola aliran *stratified* merupakan pola aliran yang paling sederhana dan mempunyai tingkat keamanan operasi yang tinggi, namun masih jauh dari pemahaman yang mendalam tentang pola aliran ini.

Terdapat banyak sekali sekali korelasi penurunan tekanan pada aliran horisontal yang telah dipublikasikan di seluruh dunia. Salah satu yang paling awal adalah Lockhart dan Martinelli (1949). Pada paper aslinya, Lockhart dan Martinelli (1949) mengembangkan korelasi empiris yang menghubungkan antara faktor pengali penurunan tekanan dua fasa dan parameter Martinelli X yang ditentukan dari data eksperimen pada kondisi isothermal dua komponen. Korelasi ini ditampilkan dalam bentuk grafik logaritmik dari *pressure drop*. Chilsom (1967) melakukan pencocokan terhadap korelasi grafis Lockhart dan Martinelli dan melakukan modifikasi parameter X dengan memasukkan suatu parameter C yang nilainya tergantung dari masing-masing jenis aliran satu fasa cairan dan gas. Pada fluks masa yang tinggi, korelasi Chilsom (1967) dan korelasi Friedel (1976) perlu dipertimbangkan untuk mendapatkan hasil prediksi penurunan tekanan yang lebih akurat.

Taitel dan Dukler (1976) mengajukan model aliran terpisah (*two fluid model*) satu dimensi yang mengasumsikan geometri antarmuka flat. Persamaan Blassius digunakan untuk menghitung faktor gesekan gas-dinding dan cairan-dinding. Pengaruh dari tegangan geser antarmuka diperhitungkan dengan mengasumsikan bahwa faktor gesekan antarmuka sama dengan faktor gesekan gas-dinding untuk aliran *stratified-smooth* dan 0,014 untuk aliran *stratified wavy*. Andritsos dan Hanratty (1987) melakukan penelitian dengan menggunakan udara sebagai fluida kerja gas dan larutan air/gliserin dengan viskositas yang berbeda-beda sebagai fluida

kerja cair. Analisis dari data eksperimen menunjukkan bahwa faktor gesekan antarmuka meningkat secara linier sesuai dengan peningkatan kecepatan superfisial gas. Faktor gesekan antarmuka juga dipengaruhi oleh viskositas cairan dan flow rate cairan, tetapi pengaruh tersebut tidak begitu signifikan. Shi dan Kocamustafaogullari (1994) melakukan pengukuran penurunan tekanan dan tebal film yang digunakan untuk mengevaluasi beberapa model prediksi tegangan geser antarmuka yang ada. Hasil evaluasi pada rentang kondisi operasi penelitiannya menunjukkan bahwa model yang paling cocok dengan hasil penelitiannya adalah model yang diajukan oleh Hanratty, dkk. Vlancos, dkk (1997) melakukan pengukuran tegangan geser cairan-dinding pipa dengan teknik electrochemical pada berbagai posisi disekeliling pipa dan menghitung faktor gesekan cairan-dinding. Hasil penelitian menunjukkan kesesuaian dengan persamaan Blassius dan korelasi Kowalski (1987) yang menggunakan Reynold number dari kecepatan superfisial cairan sebagai dasar menyusun korelasi faktor gesekan cairan-dinding. Faktor gesekan antarmuka berhasil dikembangkan dengan memasukkan bentuk antarmuka yang benar dari hasil pengukuran dan rata-rata tegangan geser cairan-dinding rata-rata.

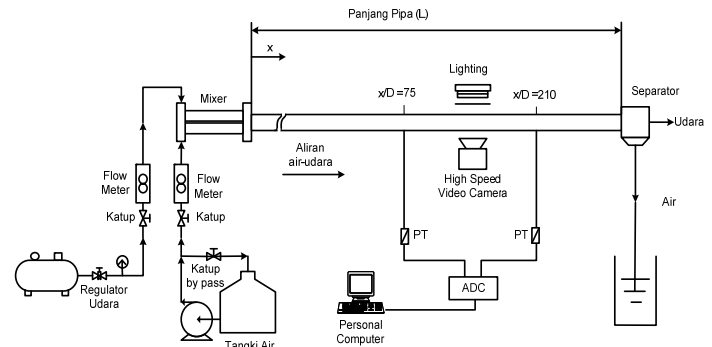
Prediksi dari aliran *stratified* telah lama menjadi area yang menarik untuk penerapan dari model-model aliran terpisah (*two fluid model*), akan tetapi kesulitan utamanya adalah prediksi dari tegangan geser cairan-dinding dan tegangan geser antarmuka. Pencarian model atau hubungan yang dapat diaplikasikan secara umum untuk tegangan geser antarmuka membuktikan dari kesulitan ini. Pada paper ini, pertama kali akan dijelaskan mengenai setup alat penelitian untuk mendapatkan data hasil pengukuran beda tekanan. Disamping itu, pengamatan visual yang didalamnya termasuk pengolahan data gambar (*image processing*) dilakukan untuk mendapatkan data tebal film. Data

kemudian diolah untuk mendapatkan parameter-parameter yang dibutuhkan dalam diskusi dan pembahasan.

1. Alat dan Metodologi Penelitian

Penelitian dilakukan di fasilitas aliran dua fasa pada pipa *horizontal* di Laboratorium Mekanika Fluida, Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada seperti yang terlihat pada Gambar 1. Pengamatan visual difasilitasi dengan sistem perpipaan yang terbuat dari pipa akrilik transparan dengan diameter dalam 26 mm dan panjang total 9 m. Seksi uji visualisasi mempunyai panjang 1 meter, ditempatkan pada jarak 200 D dari *mixer*, dilengkapi kotak koreksi yang diisi air dan lampu LED yang digunakan sebagai sumber penerangan. Tebal film aliran diamati menggunakan kamera video kecepatan tinggi dengan kecepatan perekaman video maksimum 1200 frame per detik. Aliran direkam menggunakan video dan gambar diolah menjadi data kuantitatif menggunakan *metode image processing* seperti yang telah dikembangkan oleh Kuntoro dkk (2013). Air dan udara yang berfungsi sebagai fluida kerja dicampur melalui *mixer* berjenis simpel T yang dilengkapi plat pemisah untuk mempercepat aliran *stratified* berkembang penuh, mengalir searah sepanjang pipa horisontal. Pengukuran fluktuasi beda tekanan pada seksi uji diukur dengan menggunakan sensor tekanan *valdyne* dengan posisi *pressure tap* berjarak 75 D dari *mixer* dan jarak antar *pressure tap* 3,38 m. Sinyal keluaran dari sensor tekanan diubah oleh *Analog to Digital Converter* (ADC) menjadi sinyal tekanan fungsi waktu. Selanjutnya dilakukan analisis data untuk mengetahui karakteristik fluktuasi fluktuasi tekanan menggunakan *Probability Distribution Function* (PDF) dan *Power Spectral Density* (PSD). Pengambilan data perbedaan tekanan dilakukan pada 500 Hz. Penelitian dilakukan pada tekanan atmosfer dan kondisi adiabatik dengan variabel pada penelitian ini meliputi kecepatan superfisial air (J_L) dari 0,025 m/s sampai 0,1 m/s dan

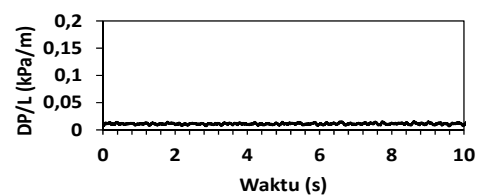
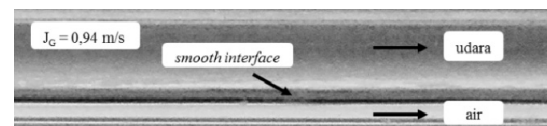
kecepatan superfisial udara (J_G) dari 0,94 m/s sampai 12 m/s.

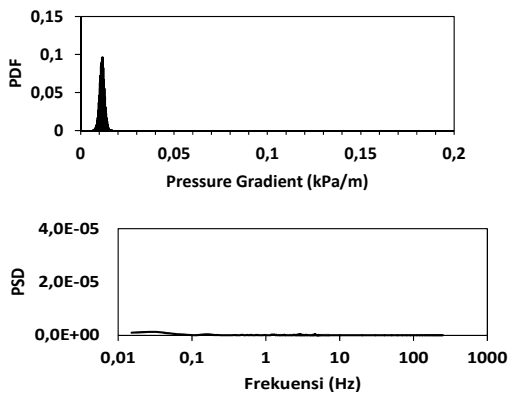


Gambar 1. Skema Alat penelitian

2. Hasil dan pembahasan

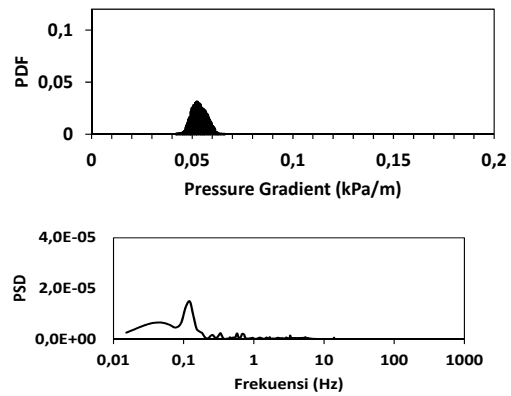
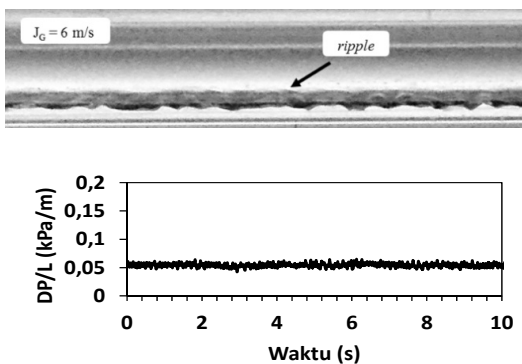
Pengamatan pola aliran *stratified* dilakukan pada keadaan *fully developed* dengan jarak 190D - 200D dari *mixer*. Sub daerah *stratified smooth* terjadi pada kecepatan superfisial air dan udara yang rendah ($J_G = 0,94$ dan $J_L = 0,025$ m/s) seperti yang terlihat pada gambar 2, dimana antarmuka antara fase cair dan gas tampak datar dan tidak ada gangguan. *Pressure gradient* yang terjadi menunjukkan nilai yang stabil, tidak ada amplitudo yang tinggi. Hal tersebut dikarenakan karena antarmuka antara udara dan air yang terjadi adalah rata. Hasil analisis *Probability Distribution Function* (PDF) menunjukkan persebaran nilai *pressure gradient* menyempit sebesar 10 %. Sedangkan hasil analisis *Power Spectral Density* (PSD) pada sub daerah *stratified smooth* tidak menunjukkan nilai frekuensi dominan.





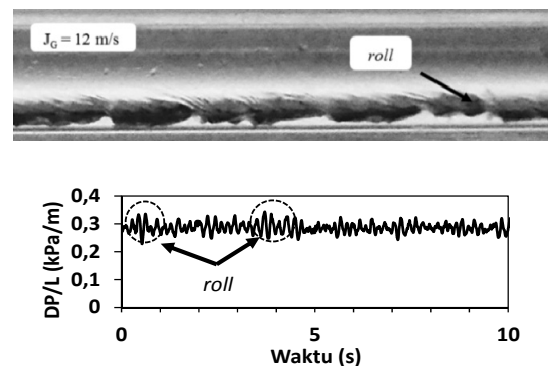
Gambar 2. Karakteristik *Stratified Smooth* ($J_G = 0,94$ dan $J_L = 0,025$ m/s)

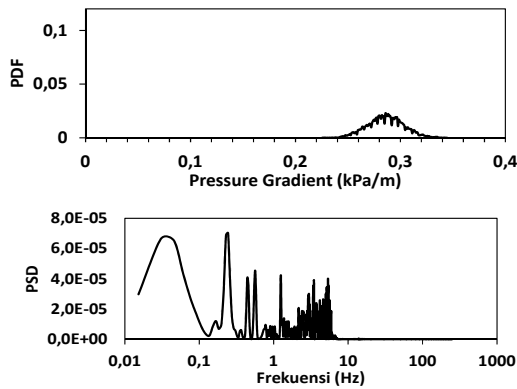
Jika kecepatan superfisial gas pada aliran *stratified smooth* dinaikkan ($J_G = 6$ m/s dan $J_L = 0,025$ m/s), maka pada antarmuka cair dan gas akan terjadi gelombang yang mempunyai amplitudo kecil dan panjang gelombang pendek serta bentuk gelombang yang teratur. Sub-daerah aliran *stratified* ini oleh Spedding dan Nguyen (1979) disebut *stratified wavy + ripple* (gambar 3). Terlihat juga kenaikan amplitudo dan fluktuasi *pressure gradient*. Hal ini dikarenakan adanya gelombang yang mulai terbentuk tetapi masih dalam keadaan stabil. Hasil analisis PDF menunjukkan nilai *pressure gradient* yang lebih menyebar dan amplitudo yang lebih besar. Pada analisis PSD mulai terlihat beberapa frekuensi pembentuk gelombang dengan nilai frekuensi paling dominan berkisar 0,1 Hz.



Gambar 3. Karakteristik *Stratified Ripple* ($J_G = 6$ m/s dan $J_L = 0,025$ m/s)

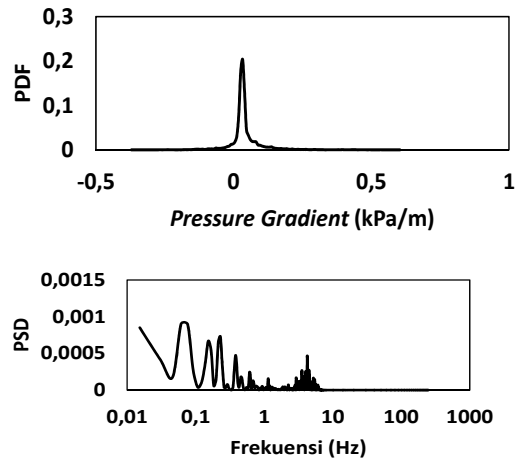
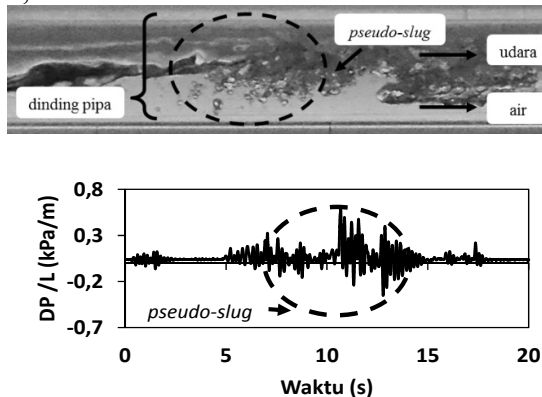
Pada kecepatan superfisial kecil dan gas yang tinggi ($J_G = 6$ m/s dan $J_L = 0,025$ m/s), akan terlihat amplitudo gelombang yang besar pada antarmuka dan bentuk gelombang menggulung. Amplitudo *pressure gradient* yang terjadi juga semakin besar menandakan bahwa gelombang yang terbentuk semakin tinggi. Sub-daerah aliran *stratified* ini oleh Spedding dan Nguyen (1979) disebut *stratified wavy + roll* (gambar 4). Hasil analisis PDF menunjukkan nilai *pressure gradient* yang lebih menyebar dan bergeser ke kanan. Pada analisis PSD mulai terlihat semakin banyak frekuensi pembentuk gelombangnya, nilai frekuensi paling dominan berkisar 0,3 Hz.





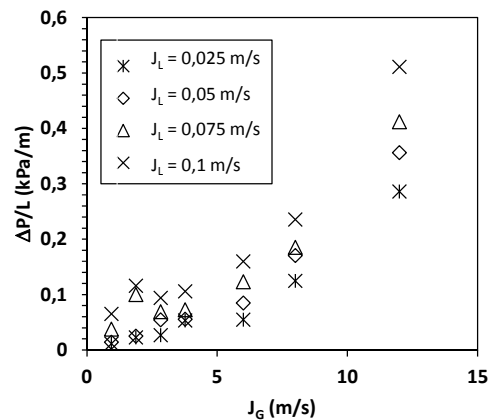
Gambar 4. Karakteristik *Stratified Roll* ($J_G = 12$ m/s dan $J_L = 0,025$ m/s)

Pada kondisi kecepatan gas dan cairan yang lebih tinggi lagi, amplitudo gelombang akan semakin tinggi dan tampak menyentuh dinding atas. Hal tersebut mengakibatkan amplitudo *pressure gradient* menjadi tinggi. Kondisi dimana visualisasi pola aliran ini menyerupai *slug*, akan tetapi tidak terjadi penyumbatan cairan pada pipa (gambar 5). Keadaan pola aliran ini oleh Lin dan Hanratty (1987) disebut subdaerah *pseudo-slug*. Hasil analisis PDF menunjukkan sebaran yang menyempit, hal ini disebabkan aliran *pseudo-slug* didominasi oleh *stratified layer* dan mempunyai frekuensi yang jarang, berkisar 0,08 Hz.



Gambar 5. Karakteristik *Pseudo – Slug* ($J_G = 3,77$ m/s dan $J_L = 0,05$ m/s)

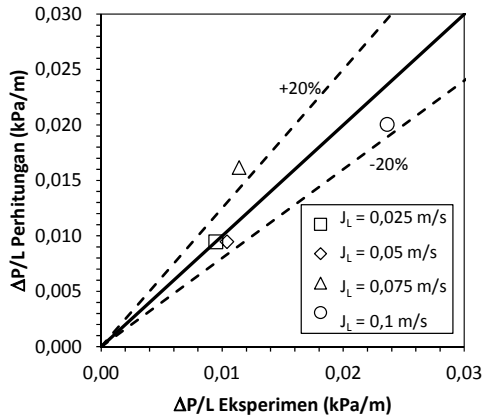
Gambar 6 menunjukkan hubungan antara J_G dan J_L terhadap *pressure gradient*. Pada gambar 6 terlihat bahwa semakin besar J_G maka *pressure gradient* akan semakin besar. Begitu pula saat J_L semakin besar, maka *pressure gradient* juga semakin besar. Hal ini karena peningkatan kecepatan akan menyebabkan gelombang di *interface* makin besar sehingga gesekan antar muka akan naik dengan kenaikan J_G dan J_L .



Gambar 6. Grafik *Pressure Gradient* dengan Variasi J_G dan J_L

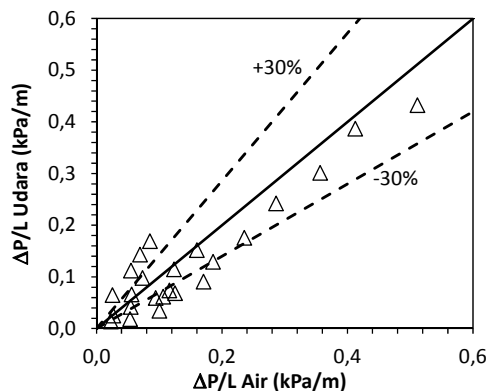
Pressure gradient satu fase pada fase air dihitung dengan faktor gesekan menggunakan persamaan Blasius. Gambar 7, menunjukkan perbandingan antara nilai dari *pressure gradient* satu fase air

perhitungan dan eksperimen. Pada gambar 7, terlihat bahwa perbandingan antara nilai dari *pressure gradient* satu fase air perhitungan dan eksperimen mempunyai nilai yang hampir sama dengan *error* 20 %. Hal ini menunjukkan bahwa perhitungan Blasius dapat memprediksi dengan baik *pressure gradient* pada penelitian ini.



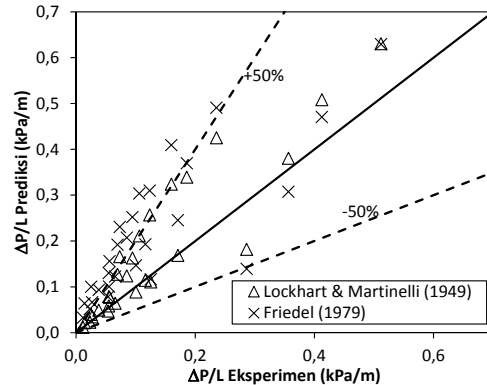
Gambar 7. Perbandingan *Pressure Gradient* Eksperimen dari 1 Fase Air dengan *Pressure Gradient* Perhitungan Menggunakan f_L Blasius

Gambar 8, memperlihatkan perbandingan *pressure gradient* dua fase dari pengukuran pada fase air dan gas. Dapat dilihat bahwa perbandingan *pressure gradient* dua fase dari fase air dan udara menunjukkan nilai yang hampir sama dengan *error* sebesar 30 % dengan kecenderungan makin tinggi kecepatan superfisial gradien tekanan pada arah radial makin kecil.



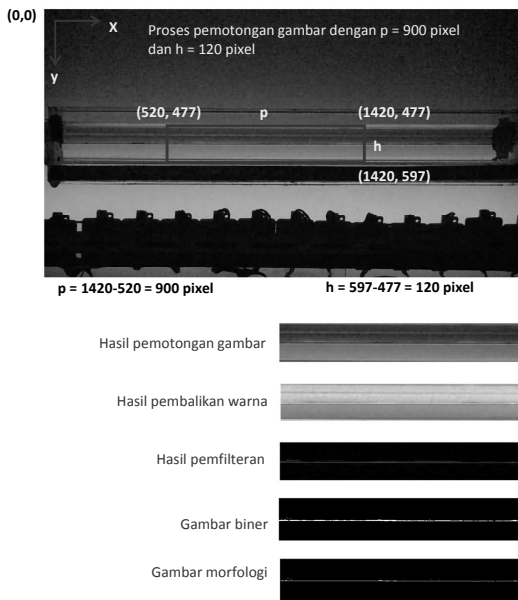
Gambar 8. Perbandingan *Pressure Gradient* Eksperimen antara Udara dan Air

Gambar 9, menunjukkan perbandingan antara hasil pengukuran *pressure gradient* dengan prediksi *pressure gradient* hasil dari korelasi Lockhart-Martinelli dan Friedel. Hasil pengukuran *pressure gradient* menunjukkan nilai yang hampir sama dengan korelasi Lockhart-Martinelli dan Friedel dengan nilai eror berkisar $\pm 50\%$. Kecenderungan hasil dari korelasi dan hasil eksperimen masih sesuai. Hasil ini juga bersesuaian dengan pendapat dari Shi dan Kocamustafaogullari (1994), bahwa pengukuran *pressure drop* pada aliran *stratified* selalu lebih rendah dari prediksi Lockhart dan Martinelli (1949).

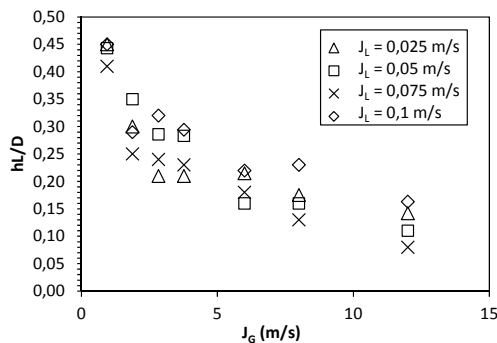


Gambar 9. Perbandingan Korelasi Lockhart dan Martinelli (1949) dan Friedel (1979)

Gambar 10 dan 11, berturut-turut menunjukkan gambar contoh tahapan proses pengolahan gambar (*image processing*) dari hasil perekaman *high speed video camera* pada $J_G = 0,94$ m/s dan $J_L = 0,025$ m/s, serta gambar tebal film rata-rata hasil ekstraksi melalui *image processing*. Dapat dilihat bahwa semakin besar J_G maka tebal film rata-rata akan semakin kecil.

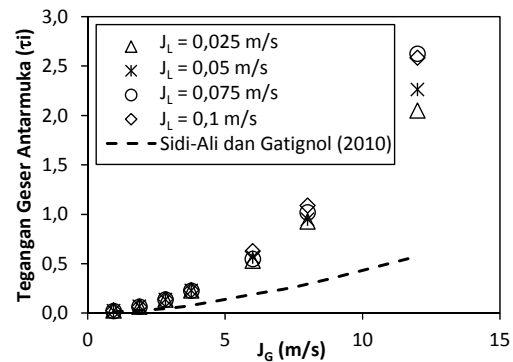


Gambar 10. Tahapan Proses *Image Processing*



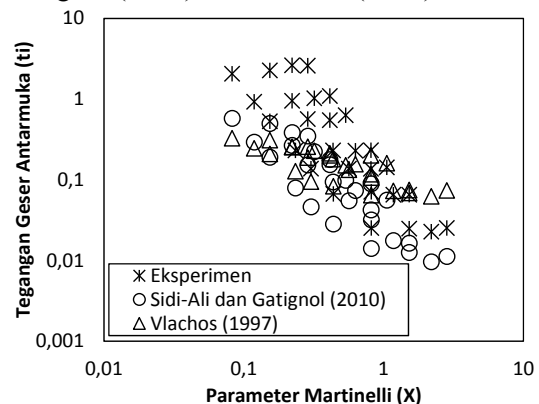
Gambar 11. Tebal Film Rata-Rata Hasil Ekstraksi dengan *Image Processing*

Gambar 12, memperlihatkan pengaruh kecepatan superfisial gas dan cairan terhadap tegangan geser antarmuka. Pada gambar terlihat bahwa semakin tinggi J_G dan J_L dijaga konstan maka tegangan geser antarmuka semakin tinggi, Hal ini mempunyai kecenderungan yang sama dengan korelasi Sidi-Ali dan Gatignol (2010). Pada J_G yang konstan dengan nilai kecil, perubahan J_L tidak berpengaruh terhadap nilai tegangan geser antarmuka. Sedangkan pada J_G yang konstan dengan nilai besar, semakin besar nilai J_L maka tegangan geser antarmuka cenderung semakin besar.



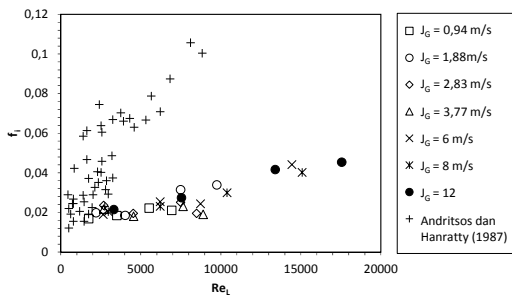
Gambar 12. Pengaruh J_G dan J_L Terhadap Tegangan Geser Antarmuka

Gambar 13 memperlihatkan pengaruh Parameter Martinelli terhadap tegangan geser antarmuka, pada gambar terlihat bahwa tegangan geser antarmuka pada eksperimen mendekati nilai dari perhitungan tegangan geser dengan menggunakan korelasi faktor gesekan dari Sidi-Ali dan Gatignol (2010) dan Vlachos (1997).

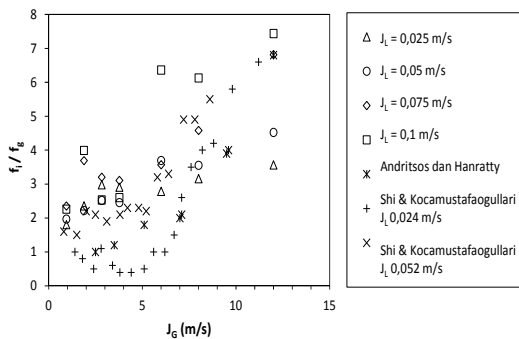


Gambar 13. Pengaruh Parameter Martinelli Terhadap Tegangan Geser Antarmuka

Gambar 14 merupakan grafik pengaruh antara Re_L dan J_G terhadap faktor gesekan antarmuka (f_i). Dilihat dari gambar dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai Re_L dan J_G maka nilai f_i akan semakin besar juga. Terlihat juga bahwa nilai f_i percobaan mempunyai kecenderungan yang sama dengan f_i hasil dari Andritsos dan Hanratty (1987) meskipun nilai *slope*-nya lebih kecil.



Gambar 14. Pengaruh Re_L dan J_G Terhadap Faktor Gesekan Antarmuka



Gambar 15. Pengaruh kecepatan superfisial gas (J_G) terhadap f_i/f_g

4. Kesimpulan

(1) Karakteristik visual dan sinyal tekanan aliran *stratified* ditandai dengan bentuk atau pola antarmuka cairan dan gas. Pola aliran *stratified smooth* mempunyai bentuk antarmuka yang datar. *Pressure gradient* pada *stratified smooth* menunjukkan nilai yang stabil. Pada grafik *stratified wavy + ripple* terlihat kenaikan amplitudo dan fluktuasi *pressure gradient*. Kenaikan kecepatan superfisial gas akan menyebabkan bertambah tingginya gelombang dan kemudian terbentuk aliran *stratified wavy + roll*. Amplitudo *pressure gradient* yang terjadi semakin besar menandakan bahwa gelombang yang terbentuk semakin tinggi dan terbentuk *roll wave*. (2) Semakin besar J_G dan J_L maka *pressure gradient* akan semakin besar. Hal ini karena peningkatan kecepatan akan menyebabkan gelombang di *interface* makin besar sehingga gesekan antar muka akan naik dan menaikkan *pressure gradient*. (3)

Pada J_L dijaga konstan, semakin tinggi nilai J_G maka tegangan geser antarmuka semakin tinggi. (4) Pada J_G yang konstan dengan nilai kecil, perubahan J_L tidak berpengaruh terhadap nilai tegangan geser antarmuka. Sedangkan pada J_G yang konstan dengan nilai besar, semakin besar nilai J_L maka tegangan geser antarmuka cenderung semakin besar. (5) Semakin besar nilai Re_L dan J_G maka nilai f_i akan semakin besar.

Daftar Pustaka

- Andritsos, N., Hanratty, T.J., 1987, Influence of Interfacial Waves in Stratified Gas-Liquid Flows, *AIChE Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 444-454.
- Baker, O., 1954, Design of Pipelines for Simultaneous Flow of Oil and Gas, *Oil and Gas J.*, pp.26.
- Chilshom, D., 1967, A Theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli Correlation for Two-Phase Flow, *Int J Heat Mass Transfer*, Vol. 10, pp. 1767-1778.
- Friedel, L., 1979, Improved Friction Pressure Drop Correlations for Horizontal and Vertical Two-Phase Pipe Flow, *European Two-Phase Flow Grup Meeting, Ispra, Italy*, Paper E2.
- Kowalski, J.E., 1987, Wall and Interfacial Shear Stress in Stratified Flow in a Horizontal Pipe. *AIChE Journal*, Vol. 33, No.2.
- Kuntoro, H. Y., Hudaya, A.Z., Dinaryanto, O., Deendarlianto, Indarto, 2015, Experimental Study of the Interfacial Waves in Horizontal Stratified Gas-liquid Two-phase Flows by Using the Developed Image Processing Technique, *The 10th International Forum on Strategic Technology*.
- Lin, P.Y., Hanratty, T.J., 1987, Effect of Pipe Diameter on Flow Patterns for Air-Water Flow in Horizontal. *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 13, No. 4.
- Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C, 1949, Proposed Correlation of Data for

- Isothermal Two-Phase, Two Component Flow in Pipes, *Chem. Eng. Prog.*, Vol.45, pp. 39-48.
- Mandhane, J.M., Gregory, G.A., Aziz, K., 1974, A Flow Pattern Map For Gas Liquid Flow In Horizontal And Inclined Pipes. *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 1, pp. 537-553.
- Massoud, M., 2005, *Engineering Thermofluids*, Berlin, Springer.
- Shi, J., Kocamustafaogullari, G., 1994, Interfacial Measurements in Horizontal Stratified Flow Patterns, *Nuclear Engineering and Design*, 149, 81-96.
- Sidi-Ali, K., Gagnol, R., 2010, Interfacial Friction factor Determination Using CD Simulation in a Horizontal Stratified Two-Phase Flow, *Chemical Engineering Science* 65, 5160–5169.
- Spedding, P.L., Nguyen, V.T., 1979, Regime Maps For Air Water Two Phase Flow, *Chemical Engineering Science*, 35, 779-793.
- Taitel, Y., Dukler, A. E., 1976a, A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow. *AIChE Journal*, Vol. 22.
- Taitel, Y., Dukler, A. E., 1976b, A Theoretical Approach to the Lockhart Martinelli Correlation for Stratified Flow, *Int. J. Multiphase Flow*, 2,591.
- Taitel, Y., Dukler, A. E., 1978, Transient Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes: Modeling the Flow Pattern Transitions, *AIChE Journal*, Vol. 24, No.5.
- Thome, J. R., 2010, *Wolverine Engineering Data Book III*, Wolverine Tube, Inc.
- Vlachos, N. A, Paras, S.V, Karabelas, A.J., 1997, Liquid to Wall Shear Stress Distribution in Stratified/Atomization Flow, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 23, No.55, pp 845-863.
- Wallis, G.B, 1969, *One-Dimensional Two-Phase Flow*, McGraw-Hill.