

## Pengaruh Viskositas Terhadap *Liquidhold-Up* Dan Kecepatan Gelombang Aliran *Annular* Dua Fase Gas-Cair Pada Pipa Horisontal

Agus Suandi, Ade Indra Wijaya, Deendarlianto, Khasani, Indarto

Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri,  
Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281, Indonesia  
e-mail: suandi.agus@gmail.com

### Abstrak

Informasi yang rinci mengenai karakteristik aliran dua fase penting untuk dipelajari karena berkaitan dengan kinerja peralatan yang dapat bersifat merusak sehingga berakibat fatal bagi keselamatan. Salah satu faktor yang dianggap menjadi variabel penting dan dianggap berpengaruh terhadap karakteristik aliran *annular* adalah viskositas cairan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki pengaruh viskositas cairan pada *hold-up* dan kecepatan gelombang aliran *annular* horisontal searah dua fase gas-cair sebagai fungsi waktu. Untuk mevariasikan viskositas cairan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan air dan larutan gliserin-air 30% volume untuk mengubah viskositas kinematik cairan dari  $0,855 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  hingga  $6,0198 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Penelitian telah dilakukan secara eksperimental untuk meneliti *hold-up* cairan terhadap variasi waktu dalam pipa *acrylic* transparan dengan diameter dalam 26,0 mm dan panjang total 9,5 m. Untuk mengamati profil *hold-up* cairan juga dilakukan variasi pada kecepatan superfisial gas ( $J_G$ ) dari 12 m/s hingga 40 m/s dan kecepatan superfisial cairan ( $J_L$ ) 0,05 m/s. Pengukuran dilakukan menggunakan metode arus konstan CECM dengan memasang tiga unit sensor *hold-up* cairan yang diatur dengan jarak 215 mm. Kecepatan gelombang ditentukan menggunakan korelasi silang data dari dua sensor *hold-up* cairan. Hasil dari sinyal variasi waktu terhadap penampang rata-rata *hold-up* cairan dideteksi menggunakan perangkat CECM yang dapat digunakan untuk menentukan profil *hold-up* dan kecepatan gelombang aliran *annular*. Sebagai hasilnya, viskositas memiliki peran penting pada *hold-up* dan kecepatan gelombang cairan pada aliran *annular* dua fase gas-cairan pada pipa horisontal dan hasil penelitian ini bisa menjadi referensi untuk aliran *annular* dengan perubahan viskositas cairan.

**Kata kunci:** aliran multifase, aliran *annular*, viskositas, *hold-up*, kecepatan gelombang

### Pendahuluan

Aliran *annular* dua fase gas-cair, dimana *liquidfilm* dengan berbagai ukuran gelombang mengalir pada dinding, dan arus fase gas di pusat tabung dengan kecepatan yang sangat besar dari lapisan cairan, sering dijumpai di banyak industri yang menggunakan generator uap di pembangkit listrik, berbagai boiler, pipa yang membawa uap basah, dan peralatan pendingin gas.

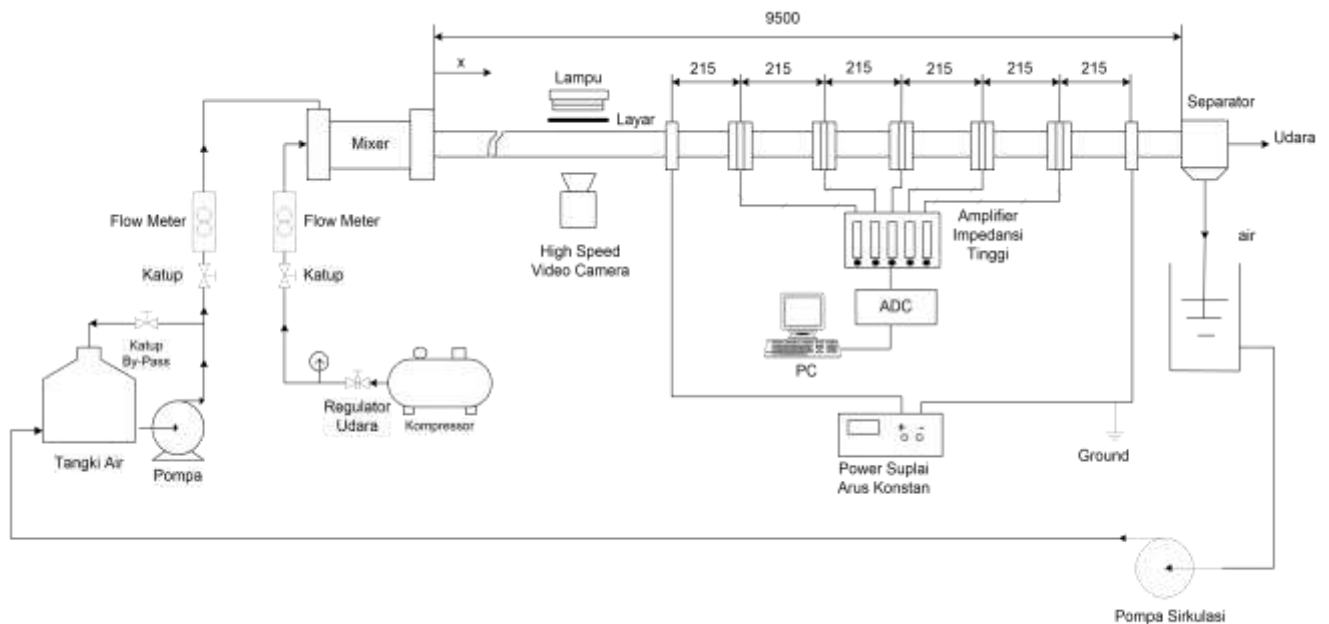
Pola aliran *annular* terjadi dikarenakan kecepatan gas yang jauh lebih cepat dibandingkan dengan kecepatan cairan (*liquid*) sebagai pengaruh dari massa jenis (*density*) yang berbeda.

Di antara banyak penelitian beberapa peneliti memperlakukan pengaruh sifat-sifat fisik fluida pada aliran lapisan tipis cairan [4]. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai analisa visual dan sinyal tentang pengaruh viskositas terhadap *liquidhold-up*

dan kecepatan gelombang aliran *annular* gas-cair pada pipa horisontal. Kondisi penelitian ini dilakukan pada tekanan atmosfer dan diasumsikan tidak ada transfer panas yang terjadi.

Analisa sinyal *output* sensor meliputi *liquidhold-up* sebagai fungsi waktu, *cross correlation* sebagai fungsi waktu, *probability distribution function* (PDF), dan kecepatan gelombang [5]. Hal-hal tersebut merupakan bagian penting untuk mengetahui karakteristik aliran.

Fukano (1998) mengembangkan metode konduktansi yang dikenal dengan *Constant Electric Current Method* (CECM) [3]. Dalam CECM, sumber tenaga arus konstan digunakan untuk memberi tenaga listrik pada dua buah elektroda. Sumber arus inilah yang digunakan sensor untuk mendapatkan sinyal. Keutamaan CECM adalah keluaran elektroda sensor tidak tergantung pada lokasi fluida, sensitivitas mendeteksi perubahan *hold-up* lebih tinggi, dan interaksi diantara kedua elektroda diabaikan.



Gambar 1. Skema fasilitas penelitian

### Metode Eksperimen dan Fasilitas yang Digunakan

Penelitian ini menggunakan pipa *acrylic* diameter 26 mm dengan panjang total 9.5 m. Pipa *acrylic* yang digunakan transparan sehingga pola aliran yang terjadi dapat diamati dengan baik. Pengambilan data pada seksi uji dilakukan pada jarak 5 m dari mulai awal masuknya fluida. Dengan demikian diharapkan fluida sudah terbentuk secara sempurna. Gas dan dua cairan berbeda digunakan pada penelitian ini yaitu air dan larutan air-gliserin 30% volume sebagai fluida pengujian. Properti fluida kerja ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Properti fluida kerja yang digunakan

Fluida	$v_L$ (m <sup>2</sup> /s)	$\rho_L$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Air 100%	0.885	998
larutan gliserin 30%	3.200	1090

$v_L$ : kinematic viscosity,  $\rho_L$ : density

Tabel 2. Matrik penelitian

$J_L$ (m/s)	$J_G$ (m/s)				
	12	18	25	30	40
0.05	1	2	3	4	5

Pengambilan data sinyal menggunakan metode *Constant Electric Current Method* (CECM). Untuk mendapatkan sinyal *liquidhold-up* digunakan 3 buah sensor dan 2 buah elektroda dengan jarak masing-masing sensor dan elektroda 215 mm. Elektroda ini berfungsi mengalirkan arus listrik konstan yang bersumber dari *power supply*.

Sinyal *liquidhold-up* yang mengalir melalui sensor akan dikuatkan oleh amplifier dan diteruskan

melalui *Analog Digital Converter* (ADC). ADC berfungsi mengubah sinyal analog menjadi data *digital* sehingga sinyal dapat terdeteksi oleh komputer seperti terlihat pada Gambar 1.

Fungsi *cross correlation* digunakan untuk menghitung *time lag* antar duasingkal keluaran sensor sehingga jika jarak kedua sensor diketahui maka kecepatan gelombang dapat diketahui juga. Perhitungan kecepatan gelombang didapat dari rasio perbandingan antara jarak sensor (215 mm) dengan keterlambatan waktu antara 2 buah sensor.

Prinsip kerja dari CECM didasarkan pada tahanan cairan dan gas yang melewati sensor, dimana tahanan cair dan gas memiliki perbedaan. Tahanan gas lebih besar dibandingkan dengan tahanan cairan. Dari prinsip inilah Fukano mengembangkan CECM sebagai metode berbasis sinyal.

Tahanan dua fase  $R_{TP}$  dapat diekspresikan dengan [3]:

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

dimana:  $R_G$  = Tahanan dari fase gas yang menempati luasan potongan pipa.

$R_L$  = Tahanan dari fase cairan yang menempati luasan potongan pipa.

$R_{TP}$  = Tahanan dari dua fase yang menempati luasan potongan pipa.

*Liquidhold-up* dinyatakan dengan tegangan dalam satuan panjang, ( $V_{TP}$ ) ketika arus konstan diberikan ( $I_0$ ). Pada kasus dua fase gas-air kondisi  $R_G \gg R_L$ , *liquidhold-up* dinyatakan dengan Persamaan (2):

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

dimana:  $V_L$  = penurunan tegangan saat cairan memenuhi permukaan penampang mengalir melalui sensor.  
 $V_{TP}$  = penurunan tegangan saat fluida dua fase mengalir melalui sensor.

Pada analisis sinyal, rata-rata keterlambatan waktu antara dua sensor *liquidhold-up* dapat dihitung dari fungsi *cross correlation*, untuk data digital dari sensor 1 dan 2, yaitu:

$$\pi_{12}(\tau) = \frac{R_{12}(\tau)}{\sqrt{R_{11}(\tau)R_{22}(\tau)}} \quad (3)$$

dimana:  $\pi_{12}$  = fungsi *cross-correlation* yang dinormalisasi  
 $\tau$  = *time lag* antara dua sinyal *liquidhold-up*.

Fungsi *cross correlation* (R) dinyatakan dalam

$$R_{12}(\tau) = E\{X_1(\tau)X_2(t + \tau)\} \quad (4)$$

dimana E adalah nilai rata-rata.

PDF digunakan untuk mengetahui sebaran nilai *liquid hold-up* yang dominan sehingga dari grafik PDF dapat diamati ketebalan lapisan dasar cairan dan tinggi gelombang dari aliran.

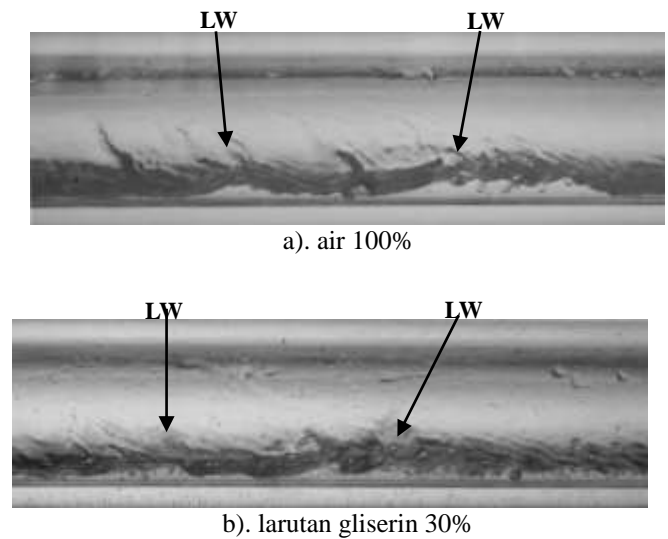
## Hasil dan Pembahasan

### a. Pengukuran *liquidhold-up*

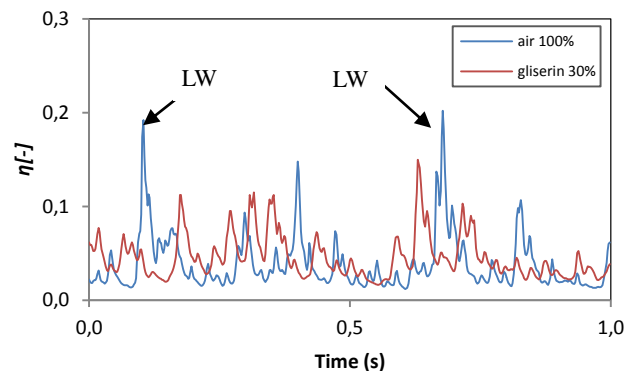
Setelah dilakukan pengujian untuk kedua jenis cairan dengan viskositas berbeda untuk kecepatan superficial cairan dan gas yang sama,  $J_L = 0.05$  m/s dan gas  $J_G = 12$  m/s, dapat kita amati secara visual pembentukan aliran *annular* pada fluida air 100% (Gambar 2.a) dan larutan gliserol 30% (Gambar 2.b) dimana aliran yang terjadi membentuk aliran *wavy-annular* walaupun lapisan cairan pada bagian atas penampang pipa masih terlihat samar-samar.

Tanda SW pada gambar merupakan gelombang kecil dan LW gelombang besar. Fukano dkk.(1983) [2] telah mengusulkan sebuah model aliran untuk aliran lapisan cairan dalam aliran *annular* gas-cairan horisontal. Menurut model aliran ini, aliran lapisan cairan terdiri dari gelombang yang kacau dan lapisan cairan kontinu. Lapisan cairan disebut sebagai lapisan dasar, dan riak yang terbentuk pada lapisan dasar yang disebut sebagai gelombang dasar. LW menunjukkan gelombang yang kacau pada sistem gas-cairan. Pada Gambar

2.a dan 2.b memperlihatkan gelombang-gelombang besar.

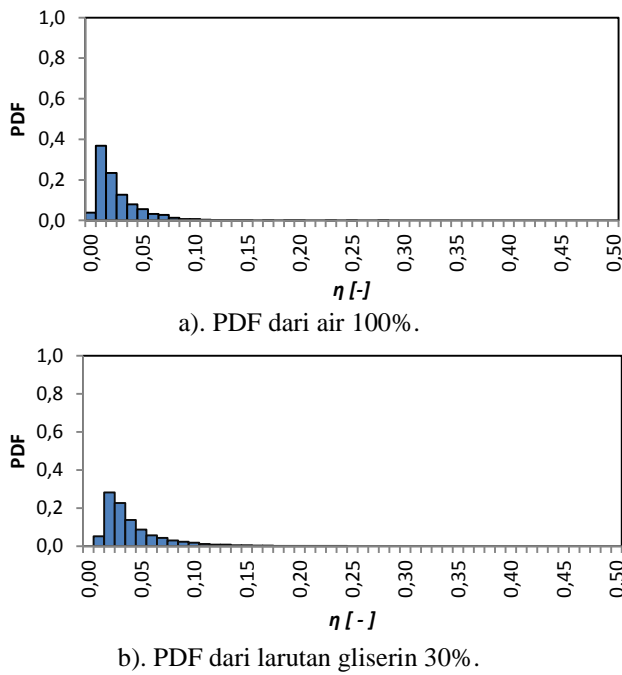


**Gambar 2.** Foto struktur antar muka gas-cairan aliran *wavy-annular* pada  $J_L = 0.05$  m/s dan  $J_G = 12$  m/s.



**Gambar 3.** *Liquidhold-up* terhadap variasi waktu pada  $J_L = 0.05$  m/s dan  $J_G = 12$  m/s

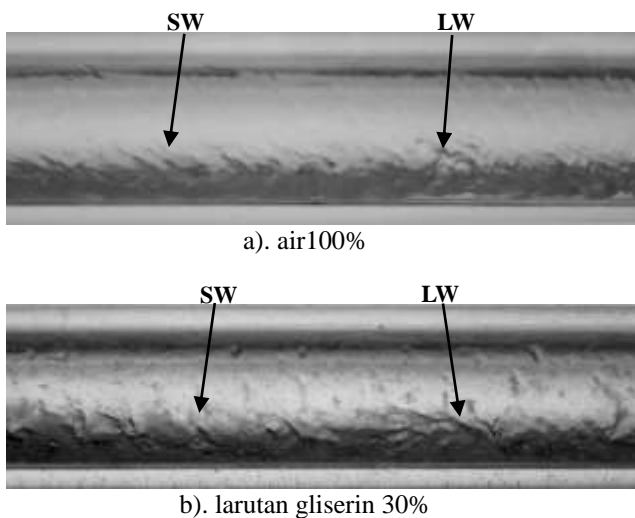
Gambar 3 memperlihatkan grafik perbandingan *liquid hold-up* untuk kedua jenis viskositas cairan terhadap fungsi waktu ( $J_L = 0.05$  m/s dan  $J_G = 12$  m/s). Terlihat gelombang besar yang sesuai dengan pengamatan visual pada Gambar 2. Pada grafik Gambar 3 juga dapat diamati ketebalan lapisan dasar kedua jenis cairan berbeda. Dari pengamatan tersebut dapat dicocokkan dengan sebaran data yang telah diklasifikasi pada Gambar 4, dimana terbukti bahwa lapisan dasar larutan gliserin 30% terlihat sedikit lebih tebal.



**Gambar 4.** PDF aliran *annular* pada  $J_L = 0.05$  m/s dan  $J_G = 12$  m/s

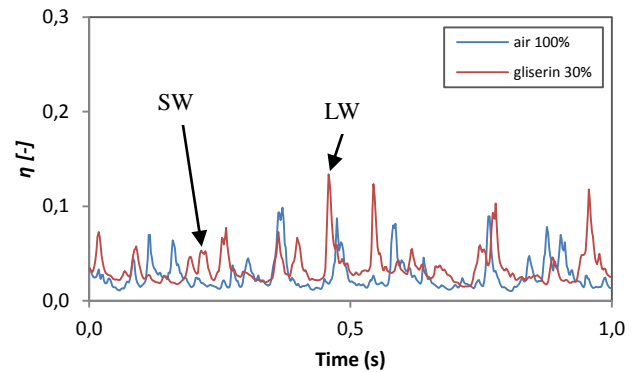
Gambar 4 memperlihatkan sebaran nilai *liquid hold-up* pada kecepatan superficial yang masih rendah. Gambar 4.a memperlihatkan nilai PDF untuk nilai *liquid hold-up* paling dominan dengan persentase terbesar bernilai 0,01 sebesar 36% data, sedangkan pada Gambar 4.b larutan gliserin 30% persentase terbesar bernilai 0,02 sebesar 28% data.

Dari Gambar 5.a dan 5.b terlihat pembentukan aliran *annular*. Secara visual dapat terlihat masih terdapat gelombang-gelombang besar namun telah terjadi penurunan jumlah gelombang yang kacau.



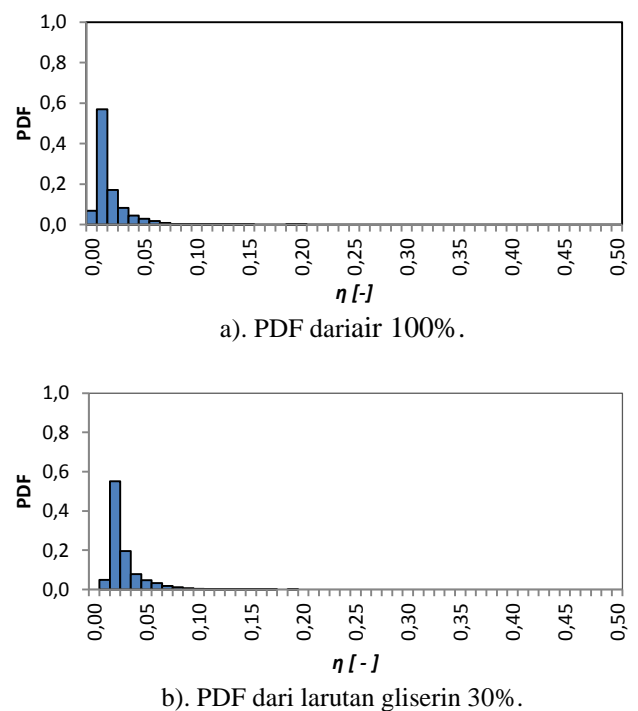
**Gambar 5.** Foto struktur antar muka gas-cairan aliran *annular* pada  $J_L = 0.05$  m/s dan  $J_G = 18$  m/s

Pada Gambar 6 terlihat penurunan jumlah gelombang besar (LW) dan mulai terbentuknya gelombang-gelombang kecil (SW), dimana sesuai dengan pengamatan visual pada Gambar 5 tidak ada lagi gelombang yang kacau. Pada grafik Gambar 6 juga dapat diamati ketebalan lapisan dasar kedua jenis cairan berbeda dengan lapisan dasar larutan gliserin 30% tetap terlihat sedikit lebih tebal, akan tetapi lapisan dasar kedua jenis cairan sedikit lebih tipis dari pengamatan pada Gambar 3.



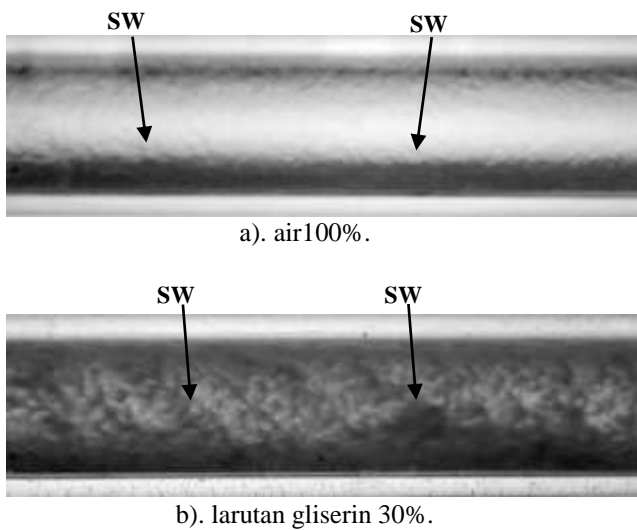
**Gambar 6.** *Liquid hold-up* terhadap variasi waktu pada  $J_L = 0.05$  m/s dan  $J_G = 18$  m/s

Dari analisa PDF terlihat jelas bahwa pengaruh viskositas sangat berperan. Terlihat nilai *liquid hold-up* yang dominan berbeda untuk air 100% nilai *liquid hold-up* terbesar pada 0,01 sebesar 57% (Gambar 7.a), sedangkan untuk larutan gliserin 30% (Gambar 7.b) terbesar pada 0,02 sebesar 55%. Dari grafik ini dapat dilihat bahwa seiring kenaikan kecepatan superficial gas, lapisan dasar cairan semakin menipis yang ditandai oleh menurunnya nilai sebaran *liquid hold-up*.

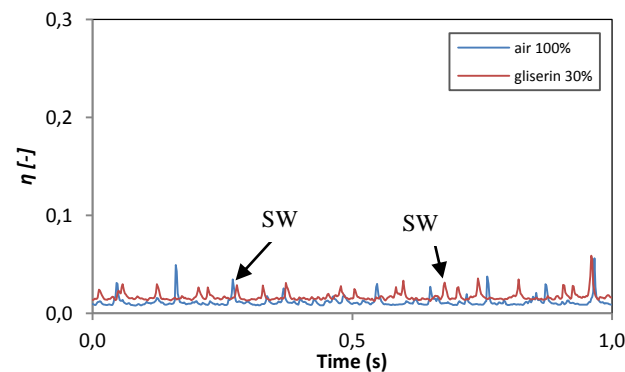


**Gambar 7.** PDF aliran *annular* pada  $J_L = 0.05$  m/s dan  $J_G = 18$  m/s

Contoh pengamatan visual terakhir ditunjukkan pada Gambar 8 dimana kecepatan superfisial gas terbesar yaitu  $J_G = 40$  m/s. Tampak bahwa tidak ada gelombang yang kacau dan hanya terjadi riak. Bila diamati, pengaruh viskositas pada nilai *liquid hold-up* serta gelombang yang terjadi mendekati bentuk riak.



**Gambar 8.** Foto struktur antar muka gas-cairan aliran *annular* pada  $J_L = 0.05$  m/s dan  $J_G = 40$  m/s.

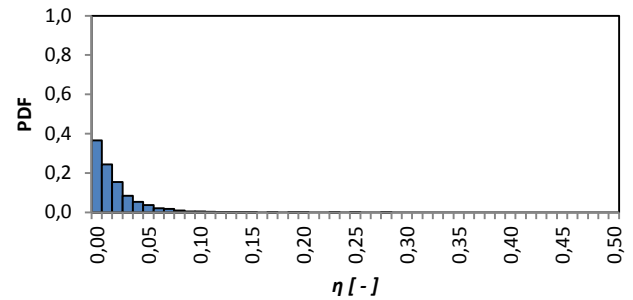


**Gambar 9.** *Liquid hold-up* terhadap variasi waktu pada  $J_L = 0.05$  m/s dan  $J_G = 40$  m/s

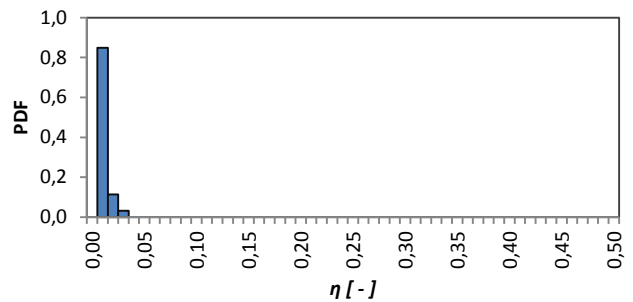
Gambar 9 menunjukkan bahwa pembentukan aliran *annular* sudah sempurna untuk kecepatan superfisial gas terbesar pada penelitian ini yaitu  $J_G = 40$  m/s. Viskositas berpengaruh pada nilai *liquid hold-up* serta gelombang kecil yang terjadi mendekati bentuk riak. Di sisi lain keberadaan SW menjadi lebih jelas menunjukkan bahwa jika viskositas meningkat, maka fluktuasi ketebalan lapisan tipis cairan terhadap waktu juga menjadi kuat seperti terlihat pada gambar 9.

Fakta ini menunjukkan bahwa faktor gesekan antar muka, yang akan terkait erat dengan karakteristik gelombang, sangat dipengaruhi oleh viskositas.

Dari analisa PDF pada Gambar 10 memperkuat keyakinan bahwa terlihat jelas pengaruh viskositas terhadap *liquid hold-up*. Terlihat pada nilai *liquid hold-up* dominan yang berbeda untuk air 100% (Gambar 10.a) dan larutan gliserin 30% (Gambar 10.b), dimana semakin besar nilai superfisial gas maka nilai *liquid hold-up* semakin bernilai rendah.



a). PDF dari air 100%

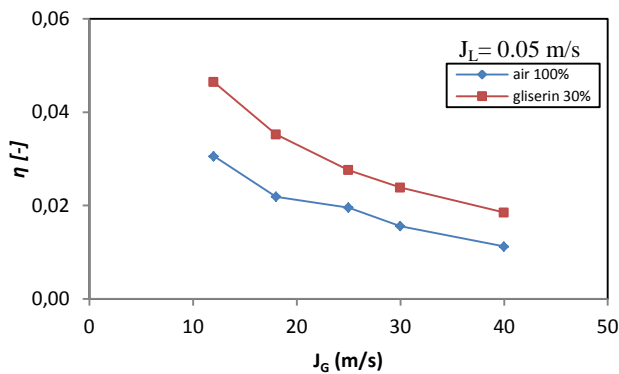


b). PDF dari larutan gliserin 30%

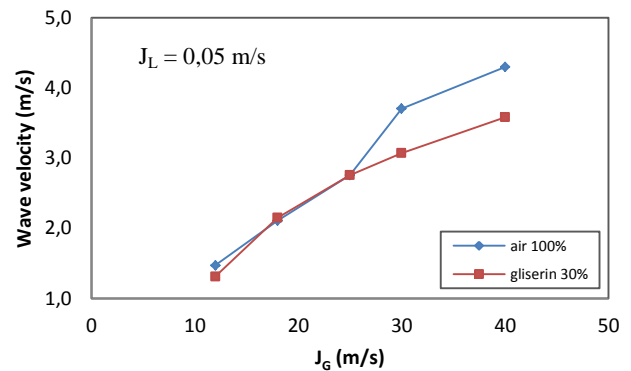
**Gambar 10.** PDF aliran *annular* pada  $J_L = 0.05$  m/s dan  $J_G = 40$  m/s

### b. *Liquid hold-up* rata-rata

Dari Gambar 11, terlihat viskositas berpengaruh terhadap *liquid hold-up* rata-rata. Dengan meningkatnya viskositas cairan maka nilai *liquid hold-up* rata-rata akan meningkat. Ini dapat diartikan bahwa ketebalan lapisan dasar cairan di pengaruhi oleh besaran viskositas dari cairan tersebut. Begitu pun sebanding dengan meningkatnya kecepatan superfisial gas, dimana semakin besar nilai  $J_G$  (m/s) maka nilai *liquid hold-up* rata-rata akan semakin kecil yang berarti lapisan dasar cairan makin menipis.



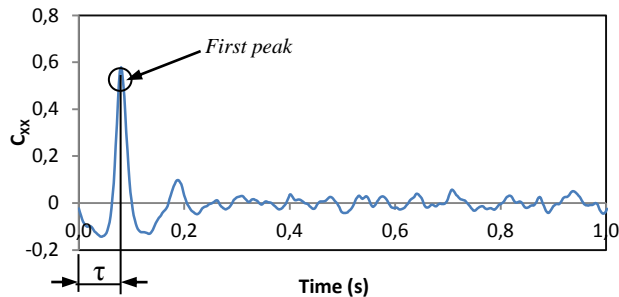
**Gambar 11.** Hubungan antara kecepatan superficial gas ( $J_G$ ) dan air ( $J_L = 0.05$  m/s) terhadap nilai rata-rata *liquid hold-up*



**Gambar 13.** Hubungan antara kecepatan superficial gas ( $J_G$ ) terhadap kecepatan gelombang pada  $J_L = 0,05$  m/s

### c. Kecepatan gelombang

Perhitungan kecepatan gelombang rata-rata ditentukan dari keterlambatan waktu ( $\tau$ ) pada puncak pertama dari fungsi *cross correlation* [1].



**Gambar 12.** Keterlambatan waktu (*time lag*) antara 2 sensor metode *cross correlation* ( $J_L = 0.05$  m/s dan  $J_G = 25$  m/s).

Gambar 12 merupakan contoh keterlambatan waktu ( $\tau$ ) yang didapat menggunakan metode *cross correlation*.

Gambar 13 menunjukkan grafik fungsi dari kecepatan gelombang. Terlihat fenomena bahwa dengan naiknya kecepatan superficial gas maka grafik kecepatan gelombang cenderung naik untuk kedua jenis cairan. Akan tetapi, pada grafik ini terlihat pengaruh viskositas cairan dimana dengan nilai viskositas lebih besar, maka nilai kecepatan gelombang akan lebih rendah untuk kecepatan superficial gas yang lebih tinggi.

### Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Pola aliran *annular* secara detail pada penelitian ini telah berhasil diidentifikasi dengan jelas baik secara visual maupun melalui sinyal *liquid hold-up* dari hasil keluaran sensor CECM.
2. *Constant Electric Current Method* (CECM) dapat digunakan untuk mengukur karakteristik *liquid hold-up* terhadap fungsi waktu dengan nilai amplitudo yang sangat kecil. Nilai ini dapat terlihat jelas pada kecepatan superficial gas yang tinggi.
3. Pengaruh viskositas terhadap nilai *liquid hold-up* sangat kuat. Keterangan yang dapat diambil dari perbandingan nilai PDF dapat menjelaskan perbedaan lapisan dasar yang mendominasi kedua jenis cairan untuk setiap kenaikan kecepatan superficial gas.
4. Pengaruh viskositas terhadap *liquid hold-up* ditandai dengan nilai *liquid hold-up* rata-rata larutan gliserin 30% yang lebih tinggi dibandingkan dengan *liquid hold-up* air 100% seiring meningkatnya kecepatan superficial gas.
5. Pengaruh viskositas terhadap kecepatan gelombang terlihat jelas dimana cairan gliserin 30% dengan nilai viskositas yang lebih besar memiliki kecepatan gelombang lebih rendah dibandingkan air 100% seiring meningkatnya kecepatan superficial gas.
6. Semakin meningkatnya kecepatan superficial gas, maka *liquid hold-up* rata-rata masing-masing cairan akan semakin rendah pula, sedangkan untuk kecepatan gelombang masing-masing cairan akan semakin besar.

### Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai oleh DIKTI melalui hibah Pascasarjana UGM tahun anggaran 2012.

## Referensi

- [1] Deendarlianto, dkk., 2005, Investigation of Liquid Film 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.
- [2] Fukano, Ousaka, Morimoto, and Sekoguchi, 1983, Air-water Annular Two-phase Flow in a Horizontal Tube, *Bulletin of the JSME*, Vol. 26, No. 218.
- [3] Fukano, T., 1998, Measurement of Time Varying Thickness of Liquid Film Flowing with High Speed Gas Flow by a Constant Electric Current Method (CECM), *Proc. of OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques*, Santa Barbara.
- [4] Fukano, T., dan Furukawa, T., 1998, Prediction of The Effects of Liquid Viscosity On Interfacial Shear Stress And Frictional Pressure Drop In Vertical Upward Gas-Liquid Annular Flow, *Int. J. Multiphase Flow* Vol. 24, No. 4, Pp. 587-603.
- [5] Zidni Hudaya A., dkk., 2012, Measurements of Time Varying of Liquid Hold-up and Wave Velocity Air-Water Stratified Flow, *Proceeding SNTTM XI*, 162-167.