

## Pengukuran *Liquid Hold-up* dan Kecepatan Gelombang Aliran *Stratified Air-Udara* pada Pipa Horisontal

(*Measurements of Time Varying of Liquid Hold-Up And Wave Velocity in Horizontal Air-Water Stratified Flow*)

Akhmad Zidni Hudaya<sup>a</sup>, Okto Dinaryanto<sup>a</sup>, Indarto<sup>b</sup>, Deendarlianto<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Program Studi S-2 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada.  
Jl. Grafika No. 2 Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia.  
e-mail : zidni01@yahoo.com

<sup>b</sup>Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada.  
Jl. Grafika No. 2 Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia.

### Abstract

*Time variation of liquid hold-up in a horizontal air-water stratified flow (26.0 mm ID and 9.5 m in total length) has been investigated experimentally. In the present experimental study, the liquid film behavior was investigated by measure the instantaneous local liquid hold-up by using a Constant Electric Current Method. Here we used three pairs of liquid hold-up sensors arranged with an axial spacing of 215 mm. The wave velocity was computed by taking the ratio of the liquid hold-up sensor distance to calculated time lag. As a result it was found that the liquid hold-up signal obtained by CECM can be used to determine the liquid hold-up profile and the wave velocity of stratified wavy flow.*

**Keywords:** *stratified flow, CECM, liquid hold-up, wave velocity*

### Pendahuluan

Fenomena aliran stratified banyak dijumpai pada transportasi fluida yang menggunakan sistem perpipaan seperti pada pembangkit listrik tenaga panas bumi (*geothermal*). Pola aliran *stratified* merupakan pola aliran dua fasa yang mempunyai tingkat keamanan operasional yang tinggi. Pada aliran *stratified* fasa cairan dan fasa gas terpisah secara jelas oleh adanya perbedaan berat jenis antara kedua fasa sehingga fluktuasi perbedaan tekanan lokal ( $\Delta P/\Delta L$ ) yang terjadi karena gesekan kecil. Oleh karena itu pola aliran ini tetap dijaga pada kondisi operasionalnya.

Analisa sinyal *liquid hold-up* yang meliputi *liquid hold-up* sebagai fungsi waktu, parameter non dimensi  $H_L/D$  sebagai fungsi waktu, *probability distribution fuction* (PDF), frekuensi yang paling dominan (PSD) dan kecepatan gelombang, merupakan salah satu metode untuk menentukan pola dan karakteristik aliran dalam aliran dua fasa. Sedangkan pengukuran *Liquid hold-up* sebagai fungsi waktu masih menjadi permasalahan yang belum tuntas dalam permasalahan-permasalahan aliran dua fasa.

Metode untuk mendapatkan data sinyal *liquid hold-up* sebagai fungsi waktu pada umumnya menggunakan metode konduktansi. Shi dan Kocamustafaogullari (1994) mengukur antarmuka pada pola aliran *stratified* air-udara dengan

menggunakan parallel *wire conductance probe*. Parameter-parameter yang diteliti meliputi tinggi gelombang, frekuensi yang paling dominan, kecepatan gelombang dan rata-rata panjang gelombang. Tegangan geser dihitung dari pengukuran eksperimental tersebut dan selanjutnya dapat digunakan untuk pengembangan model-model tegangan geser antar muka (*interfacial*) secara luas.

Kang dan Kim (1992) menggunakan *multi-conductance probe* atau disebut *flush wire probe* untuk mengetahui karakteristik aliran *stratified wavy*. Data pengukuran diproses untuk mengetahui karakteristik aliran stratified wavy yang meliputi kecepatan gelombang, bentuk gelombang tiga dimensi, peta kontur dan rasio luas permukaan *interfacial*. Hasil analisa kemudian dibandingkan dengan gambar hasil fotografi.

*Constant Electric Current Method* (CECM) merupakan salah satu metode konduktansi yang dikembangkan oleh Fukano, (1989). Karakteristik dari CECM adalah sumber tenaga arus konstan digunakan untuk memberi tenaga listrik pada dua buah elektroda. Satu digunakan untuk memberi tenaga listrik dan yang lain untuk mendeteksi informasi ketebalan film. Keutamaan CECM adalah keluaran elektroda sensor tidak tergantung pada lokasi fase gas, sensitivitas mendeteksi perubahan *hold up* lebih tinggi, dan interaksi diantara kedua elektroda diabaikan.

Dari uraian di atas dan melihat pentingnya

pengetahuan mendetail tentang aliran *stratified*, serta belum banyak dijumpainya *data base*, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik *liquid hold-up* sebagai fungsi waktu dan kecepatan gelombang dari aliran *stratified* pada pipa horisontal.

**Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan**

Pada penelitian ini pipa *acrylic* transparan ID 26 mm digunakan agar perilaku aliran dapat diamati. Panjang pipa sebelum seksi uji didesain 5 m agar menjamin aliran berkembang penuh. Panjang pipa seksi uji untuk visualisasi 1 m dan untuk *liquid hold-up* 1,72 m. Untuk mengukur *liquid hold-up* digunakan sensor CECM sebanyak 3 buah dengan jarak radial antar sensor 215 mm guna menjamin sensor dapat membaca panjang gelombang. Sensor CECM terdiri dari sepasang elektroda kuningan dengan tebal 1 mm dan jarak antar elektroda 5 mm. Pada ujung-ujung seksi uji dipasang elektroda yang berfungsi untuk mengalirkan arus listrik konstan yang berasal dari power suplai. Sinyal *liquid hold-up* dari sensor dikuatkan dengan amplifiier, kemudian diubah oleh *Analog to Digital Converter* (ADC) agar dapat dibaca oleh komputer. Kecepatan gelombang aliran *stratified* dihitung berdasarkan jarak dan keterlambatan waktu antar sensor.

Prinsip kerja dari CECM di dasarkan atas perbedaan tahanan pada cairan dan gas. Tahanan listrik aliran dua fasa,  $R_{TP}$ , dalam unit panjang dari saluran diekspresikan sebagai berikut :

$$\frac{1}{R_{TP}} = \frac{1-\eta}{R_G} + \frac{\eta}{R_L} \tag{1}$$

Dimana  $R_G$  dan  $R_L$  adalah tahanan listrik fase gas

dan liquid yang masing-masing menempati bidang potongan pipa. *Liquid hold-up* ( $\eta$ ) diekspresikan dalam unit panjang ( $V_{TP}$ ) pada saat arus konstan  $I_0$  dicatukan. *Hold-up* diekspresikan oleh persamaan di bawah dan untuk kasus aliran dua fasa udara-air, nilai  $R_G \gg R_L$ .

$$\eta = \frac{R_L}{R_{TP}} = \frac{I_0 R_L}{I_0 R_{TP}} = \frac{V_L}{V_{TP}} \tag{2}$$

Dimana  $V_L$  adalah drop tegangan saat *liquid* yang mengalir menempati sejumlah area dari pipa. Jika tahanan listrik dan drop tegangan berturut-turut sebagai  $R_{TPO}$  dan  $V_{TPO}$  saat *hold-up* diketahui nilainya,  $\eta_0$  dan arus listrik  $I_0$  pada nilai yang sama dengan persamaan diatas, maka persamaan berikut didapatkan dari persamaan di atas :

$$\eta_0 = \frac{I_0 R_L}{I_0 R_{TPO}} = \frac{V_L}{V_{TPO}} \tag{3}$$

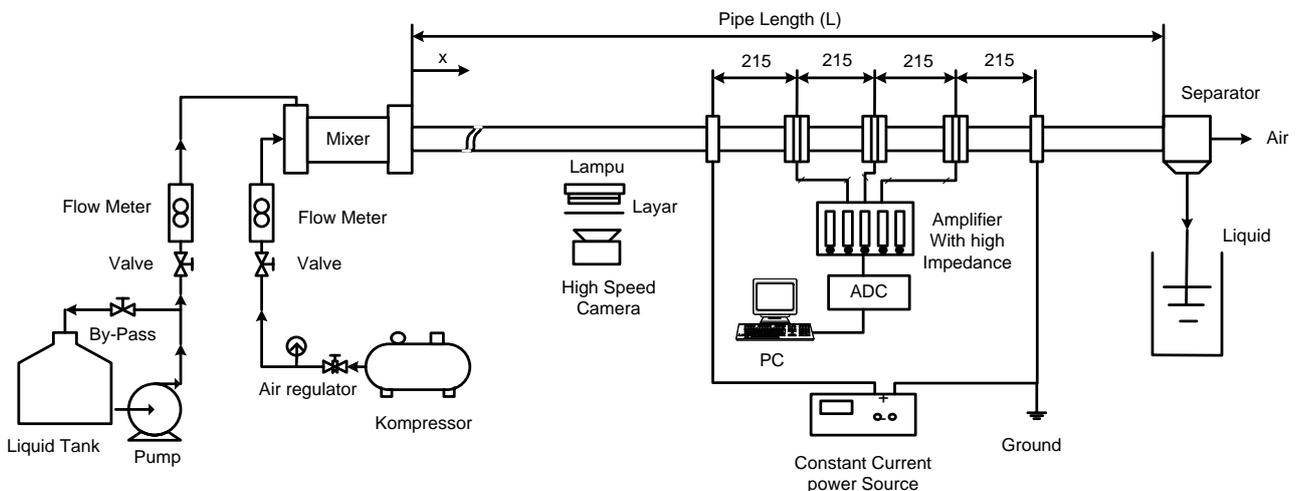
Dengan mengeliminasi  $V_L$  pada dua persamaan di atas maka diperoleh persamaan berikut :

$$\eta = \frac{I_0 R_{TPO}}{I_0 R_L} \eta_0 = \frac{V_{TPO}}{V_{TP}} \eta_0 \tag{4}$$

Jika  $V_{TP}$  diukur dibawah kondisi dari nilai yang diketahui ( $\eta_0, V_L$  atau  $V_{TPO}$  ) maka kita dapat menentukan *hold-up* ( $\eta$ ).

Pada analisis sinyal, sinyal rangkaian waktu yang dikumpulkan dianalisa secara statistik/*stochastic* untuk mendapatkan informasi yang diinginkan. Rata-rata keterlambatan waktu (*time lag*) antara dua sensor *liquid hold-up* dapat dihitung dari fungsi *cross correlation* yang untuk proses  $X_1$  dan  $X_2$ , sebagai berikut:

$$\pi_{12}(\tau) = \frac{R_{12}(\tau)}{[R_{11}(\tau)R_{22}(\tau)]^{1/2}} \tag{5}$$



Gambar 1. Skema diagram peralatan

Dimana  $\pi_{12}$  adalah fungsi *cross-correlation* yang dinormalisasi dan  $\tau$  adalah *time lag* antara dua sinyal *liquid hold-up*. Fungsi *cross correlation* R dimana E adalah nilai rata-rata diberikan sebagai berikut :

$$R_{12}(\tau) = E\{X_1(\tau)X_2(t + \tau)\} \quad (6)$$

Sedangkan *Power Spectra Density* atau PSD digunakan untuk menggambarkan sinyal dalam frekuensi domain yang menggunakan *fast fourier transform* dan dirumuskan sebagai berikut:

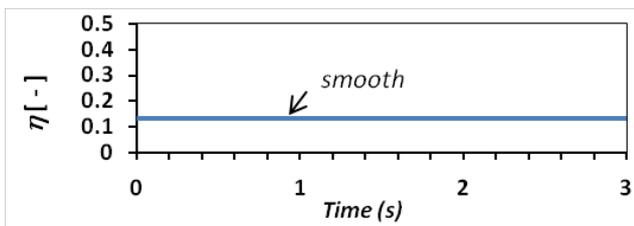
$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j)\omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (7)$$

**Hasil dan Pembahasan**

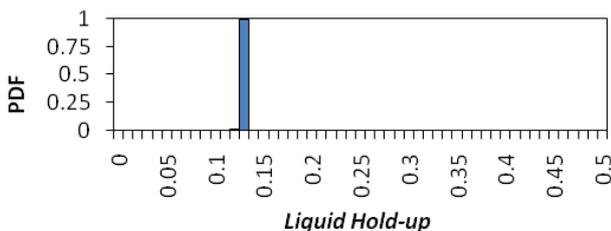
**Pengukuran Liquid-hold-up**

Aliran *stratified* terjadi karena adanya perbedaan berat jenis antara fluida cair dan gas. Ciri aliran *stratified* adalah gas dan cairan terpisah secara jelas. Pola aliran *stratified* secara detail dibagi menjadi subdaerah-subdaerah berdasarkan struktur antarmuka. Namun, Sebagian besar peneliti membagi aliran *stratified* menjadi dua subdaerah yaitu *stratified smooth* dan *stratified wavy*. Sedangkan *stratified wavy* dapat dibagi lagi menjadi sub-sub daerah yaitu *inertial wave*, *ripple wave* dan *roll wave*.

Gambar 2. menunjukkan grafik hasil pengukuran *liquid hold-up* sebagai fungsi waktu untuk aliran *stratified smooth* menggunakan CECM. Pada gambar tersebut terlihat bahwa data sinyal *liquid hold-up* cenderung tetap dan pada gambar 3, terlihat nilai *probability distribution function* (PDF) dominan satu nilai.

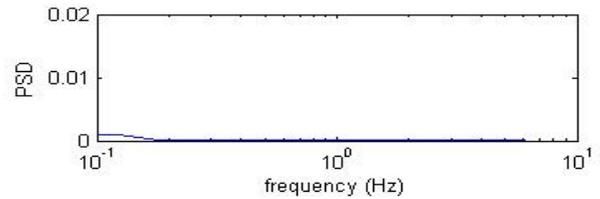


Gambar2. *Liquid hold- up* aliran *stratified smooth* ( $J_L = 0,016$  m/s dan  $J_G = 1.02$  m/s)



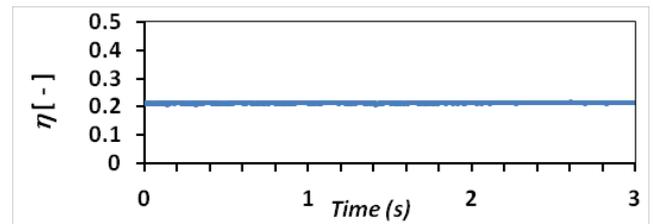
Gambar3. *Probability Distribution Function* (PDF) stratified smooth  $J_L = 0,016$  m/s dan  $J_G = 1.02$  m/s

Sedangkan analisis pada *power spektral density* (PSD) terlihat bahwa tidak tampak frekuensi pembentuk gelombang. Hal ini terlihat pada gambar4.

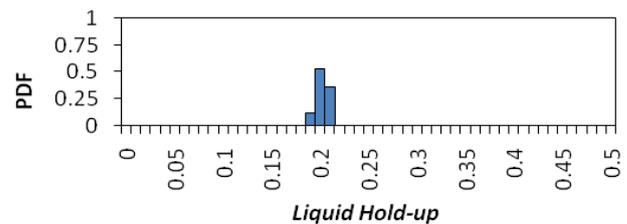


Gambar4. *Power Spectra Density* (PSD) stratified smooth ( $J_L = 0,016$  m/s dan  $J_G = 1.02$  m/s)

Gambar 5. menunjukkan grafik hasil pengukuran *liquid hold-up* sebagai fungsi waktu untuk aliran *stratified wavy + ripple* menggunakan CECM. Pola aliran ini terbentuk sejalan dengan penambahan kecepatan superficial udara dan kecepatan superficial air dijaga konstan. Pada kondisi ini riak-riak gelombang mulai terbentuk sehingga topologi pola alirannya akan berubah dari *stratified smooth* menjadi *stratified wavy+ripple*. Hal ini terlihat juga pada gambar 6, dimana nilai *liquid hold-up* pada PDF mempunyai kelas nilai yang mengumpul.

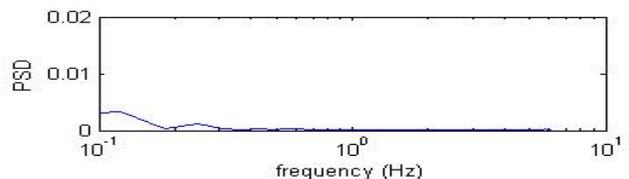


Gambar 5. *Liquid hold up* aliran *stratified wavy + ripple* ( $J_L = 0,016$  m/s dan  $J_G = 1.88$  m/s)



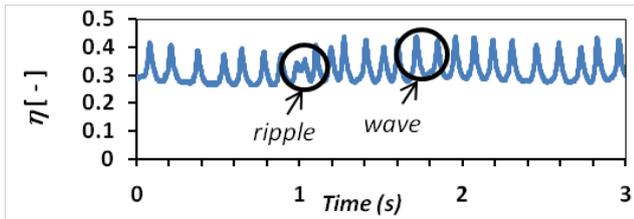
Gambar6. *Probability Distribution Fuction* (PDF)  $J_L = 0,016$  m/s dan  $J_G = 1.88$  m/s

Sedangkan dari analisa *power spectral density* (PSD) menunjukkan bahwa pada kondisi ini sudah mulai terdapat frekuensi pembentuk gelombang, seperti terlihat pada gambar 7.



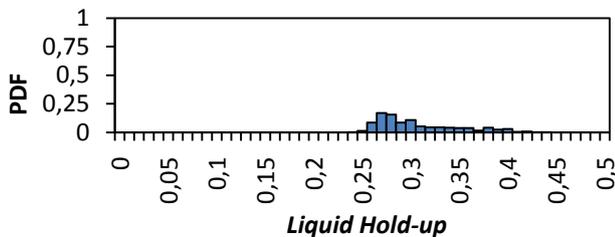
Gambar7. *Power Spectra Density* (PSD) stratified wavy+ripple ( $J_L = 0,016$  m/s dan  $J_G = 1.88$  m/s)

Gambar 8 menunjukkan grafik hasil pengukuran *liquid hold-up* sebagai fungsi waktu untuk aliran *stratified wavy + inertial* menggunakan CECM. Pola aliran ini terbentuk sejalan dengan penambahan kecepatan superfisial air dimana pada kondisi ini selain terdapat riak-riak gelombang (*ripple*), akan mulai terbentuk juga gelombang panjang sehingga topologi pola aliran akan berubah dari *stratified wavy + ripple* menjadi *stratified wavy + inertial*.

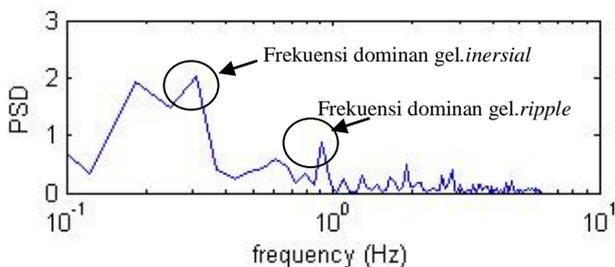


Gambar 8. *Liquid hold-up* aliran *Stratified wavy + inertial* ( $J_L = 0,092$  m/s dan  $J_G = 1.02$  m/s)

Dari data *liquid hold-up* di atas terlihat bahwa riak gelombang yang terjadi bercampur dengan gelombang yang mengalun panjang maka pada analisa *probability distribution fuction* (PDF) akan mempunyai kelas nilai yang cenderung lebih menyebar, seperti terlihat pada gambar 9. Sedangkan dari analisa *power spectral density* (PSD) menunjukkan bahwa pada kondisi ini terdapat dua frekuensi gelombang yang dominan, yaitu frekuensi gelombang *ripple* dan gelombang *inertial*, seperti terlihat pada gambar 10.

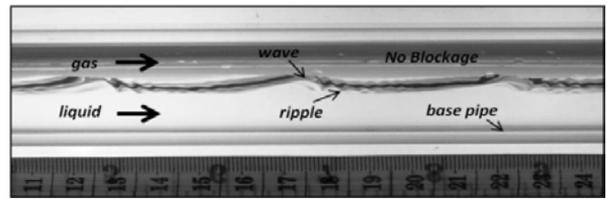


Gambar 9. PDF *stratified wavy + inertial* ( $J_L = 0,092$  m/s dan  $J_G = 1.02$  m/s)



Gambar 10. *Power Spectra Density* (PSD) *stratified wavy+inertial* ( $J_L = 0,092$  m/s dan  $J_G = 1.02$  m/s)

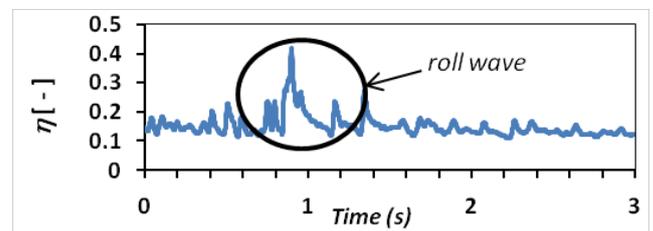
Data *liquid hold-up* pada gambar 8. jika dibandingkan dengan hasil foto kamera akan terlihat pada gambar 11.



Gambar 11. Foto *Stratified wavy + inertial*

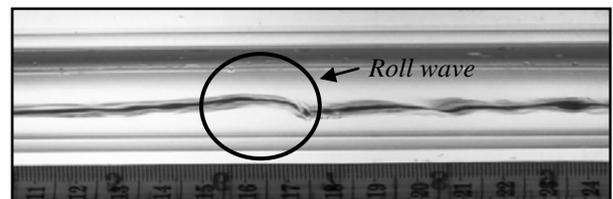
( $J_L = 0,092$  m/s dan  $J_G = 1.02$  m/s)

Gambar 12. menunjukkan grafik hasil pengukuran *liquid hold-up* sebagai fungsi waktu untuk aliran *stratified wavy + roll* menggunakan CECM. Pola aliran ini terbentuk sejalan dengan penambahan kecepatan superfisial udara dan air yang cukup signifikan dimana pada kondisi ini akan terbentuk gulungan-gulungan (*roll*) sehingga topologi pola aliran akan berubah menjadi *stratified wavy + roll*.



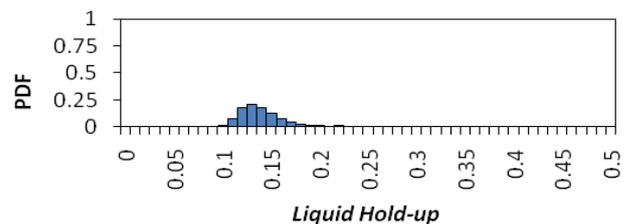
Gambar12. *Liquid hold-up* aliran *Stratified wavy+roll* ( $J_L = 0,047$  m/s dan  $J_G = 3.77$  m/s)

Data *liquid hold-up* pada gambar 12, jika dibandingkan dengan hasil foto kamera akan terlihat pada gambar 13.

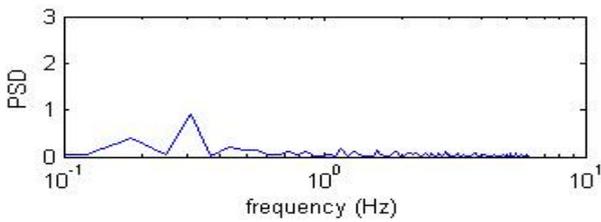


Gambar13. Foto *Stratified wavy + roll*, ( $J_L = 0,047$  m/s dan  $J_G = 3.77$  m/s)

Adanya gulungan-gulungan yang terjadi pada kondisi ini menyebabkan fluktuasi *liquid hold-up* lebih besar, hal ini ditandai dengan nilai PDF yang lebih menyebar. Sedangkan dari analisa *power spectral density* (PSD) menunjukkan bahwa pada kondisi ini terdapat satu frekuensi gelombang dominan yang merupakan frekuensi gelombang *roll*, seperti terlihat pada gambar 15.



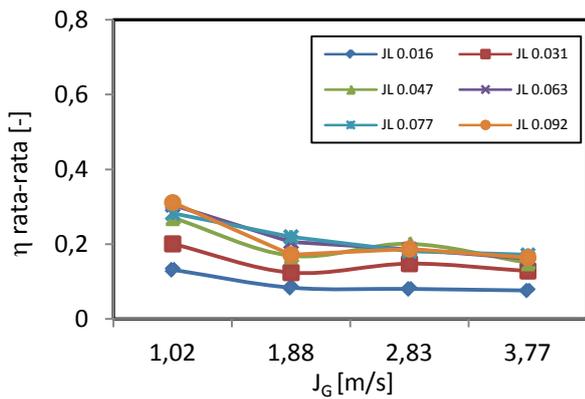
Gambar14. PDF *Stratified wavy+roll* ( $J_L = 0,047$  m/s dan  $J_G = 3.77$  m/s)



Gambar15. PSD Stratified wavy+roll ( $J_L = 0,047$  m/s dan  $J_G = 3.77$  m/s)

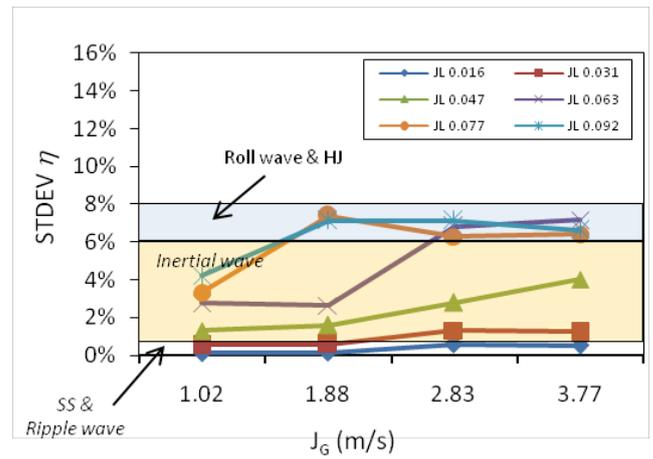
**Rata-rata Liquid Hold-up**

Gambar 16, menunjukkan hubungan antara kecepatan superficial udara ( $J_G$ ) dan nilai kecepatan superficial air ( $J_L$ ) terhadap nilai rata-rata liquid hold-up. Pada gambar 16, terlihat bahwa sejalan dengan kenaikan nilai  $J_G$  dan nilai  $J_L$  dijaga konstan maka nilai liquid hold-up rata-rata cenderung semakin turun, hal ini disebabkan karena semakin besar nilai  $J_G$  maka gaya inersia yang menekan air akan semakin besar. Sedangkan pada nilai  $J_L$  yang semakin besar dan nilai  $J_G$  yang konstan maka nilai liquid hold-up-nya akan semakin naik.



Gambar 14. hubungan antara kecepatan superficial udara ( $J_G$ ) dan nilai kecepatan superficial air ( $J_L$ ) terhadap nilai rata-rata liquid hold-up

Gambar 17. Menunjukkan hubungan antara kecepatan superficial udara ( $J_G$ ) dan nilai kecepatan superficial air ( $J_L$ ) terhadap standar deviasi liquid hold-up, terlihat bahwa semakin besar nilai  $J_G$  maka standar deviasi liquid hold-up akan semakin besar, hal ini disebabkan karena tekanan yang terjadi di atas puncak gelombang akan semakin kecil sejalan dengan kenaikan percepatan udara. Sedangkan pada nilai  $J_L$  yang semakin besar dan nilai  $J_G$  yang konstan maka nilai standar deviasi liquid hold-up-nya akan semakin besar dan pola alirannya akan berubah relatif cepat. Hal ini juga menunjukkan bahwa amplitudo gelombang akan semakin naik sejalan dengan kenaikan  $J_L$ . Jika nilai  $J_L$  semakin dinaikkan maka pola aliran akan berubah menjadi slug/plug.

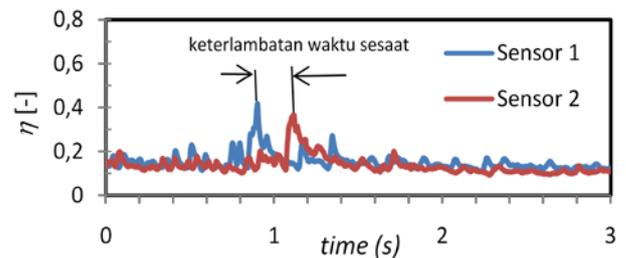


Gambar 17. hubungan antara kecepatan superficial udara ( $J_G$ ) dan nilai kecepatan superficial air ( $J_L$ ) terhadap standar deviasi liquid hold-up

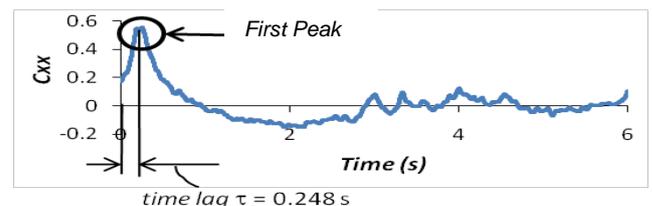
**Kecepatan Gelombang Aliran Stratified**

Kecepatan gelombang rata-rata ditentukan dari keterlambatan waktu ( $\tau$ ) pada puncak pertama dari fungsi cross correlation antara dua sensor. (Deendarlianto, 2005). Pada penelitian ini sinyal liquid hold-up yang keluar dari sensor CECM diukur dengan jarak 215 mm.

Gambar 18, merupakan contoh keterlambatan waktu sesaat yang terjadi pada dua sinyal liquid hold-up. Sinyal yang keluar dari sensor 1 dan sensor 2 mempunyai pola yang sama akan tetapi waktu yang ditempuh untuk membentuk pola tertentu yang sama terdapat selisih waktu atau disebut keterlambatan waktu. Sedangkan gambar 19 menunjukkan contoh keterlambatan waktu rata-rata antar dua sensor pada fungsi cross correlation.

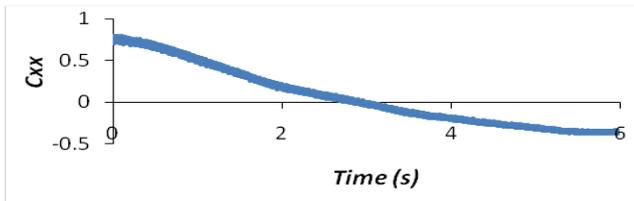


Gambar 18. Keterlambatan waktu sesaat pada dua sensor CECM



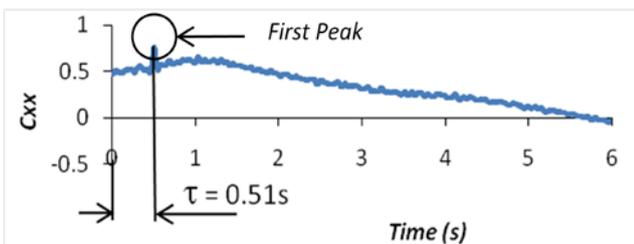
Gambar 19. keterlambatan waktu rata-rata antar dua sensor pada fungsi cross correlation

Gambar 20. merupakan fungsi *cross correlation* dari data *liquid hold-up* pada gambar 2 di atas. Pada aliran *stratified smooth* terlihat bahwa nilai *time lag* antara dua sensor adalah nol atau tidak terjadi terjadi gelombang pada pola aliran tersebut.



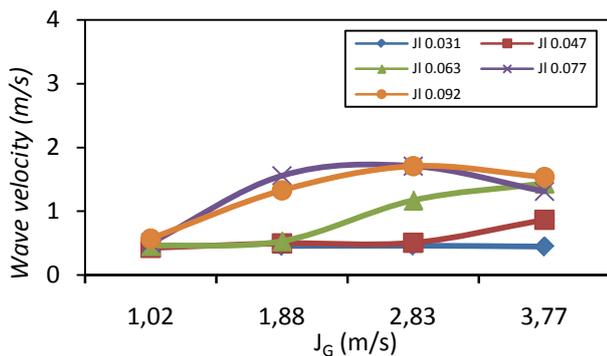
Gambar20. Cross Correlation stratified smooth ( $J_L = 0,016$  m/s dan  $J_G = 1.02$  m/s)

Gambar 21. merupakan fungsi *cross correlation* dari data *liquid hold-up* pada gambar 5 di atas. Pada aliran *Stratified wavy + ripple* terlihat bahwa terdapat nilai *time lag* antara dua sensor sebesar 0,51 s.



Gambar 21. Cross Correlation ( $J_L = 0,016$  m/s dan  $J_G = 1.88$  m/s)

Gambar 22. Menunjukkan Pengaruh kecepatan superfisial udara ( $J_G$ ) dan kecepatan superfisial air ( $J_L$ ) terhadap kecepatan rata-rata gelombang. Pada grafik tersebut terlihat bahwa sejalan dengan kenaikan nilai  $J_G$  maka kecepatan gelombang cenderung akan meningkat.



Gambar 20. Pengaruh kecepatan superfisial udara ( $J_G$ ) dan kecepatan superfisial air ( $J_L$ ) terhadap kecepatan rata-rata gelombang

**Kesimpulan**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sinyal keluaran sensor CECM dapat digunakan untuk menentukan karakteristik *liquid hold-up* fungsi waktu, dimana

metode ini mempunyai kemampuan mendeteksi amplitudo *gelombang hold-up* yang sangat kecil dan sensitivitas pendeteksian perubahan *hold-up* yang tinggi pada tebal film yang semakin tipis. Karakteristik kecepatan perambatan gelombang dari aliran *stratified* pada pipa horisontal sangat dipengaruhi oleh kecepatan superfisial gas dan kecepatan superfisial air. Pada kecepatan superfisial air yang konstan, variasi kecepatan superfisial gas yang semakin besar akan menyebabkan kecepatan gelombang cenderung semakin besar. Sedangkan pada kecepatan superfisial udara yang konstan, variasi kecepatan superfisial air yang semakin besar akan menyebabkan amplitudo gelombang semakin besar.

**Ucapan Terima Kasih**

Penelitian ini dibiayai dari hibah Pascasarjana UGM tahun anggaran 2012

**Daftar Pustaka**

Deendarlianto, Ousaka, A., Kariyasaki, A., Fukano, T., 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, (2005)

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, pp. 363-377(1998).

Kang, H.C., dan Kim, M.H., Measurement of three-dimensional wave form and antar muka area in an air water *stratified* flow, Nuclear Engineering and Design, pp. 347-360, (1992).

Shi, J., dan Kocamustafaogullari, G., Interfacial measurements in horizontal *stratified* flow pattern, Nuclear Engineering and Design, pp. 81-96, (1994)