

FLUKTUASI BEDA TEKANAN DARI POLA ALIRAN SLUG AIR-UDARA PADA ALIRAN DUA FASE SEARAH PIPA HORIZONTAL

^{1,4)}Budi Santoso*, ²⁾Indarto, ²⁾Deendarlianto dan ³⁾Thomas S. W.

¹⁾Program Pascasarjana Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, UGM

²⁾Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, UGM

³⁾Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, UGM

⁴⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, UNS

*E-mail: msbudis@yahoo.co.id

ABSTRAK

Karakteristik fluktuasi beda tekanan aliran slug dua fase udara-air diselidiki dalam pipa horisontal dengan panjang 10 m dan diameter dalam 24 mm. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi karakteristik dari fluktuasi beda tekanan pola aliran slug menggunakan analisis statistik, probability density function (pdf), autokorelasi dan power spectral density (psd). Sebuah sensor Differential Pressure Transducer (DPT) dipasang untuk merekam fluktuasi beda tekanan aliran slug. Sinyal beda tekanan dikondisikan oleh pressure amplifier/signal conditioning dan diubah menjadi sinyal digital menggunakan peralatan Analog to Digital Converter (ADC). Karakteristik dari fluktuasi beda tekanan aliran slug sangat dipengaruhi oleh kecepatan superfisial fluida. Perubahan kecepatan superfisial udara dan kecepatan superfisial air dapat dibedakan dengan jelas menggunakan analisis statistik, PDF, autokorelasi dan PSD.

Kata kunci: aliran dua-fase, pola aliran slug, fluktuasi beda tekanan, *autokorelasi*, *probability density function*, *power spectral density*

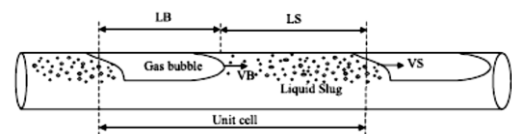
PENDAHULUAN

Aliran dua fase digunakan secara ekstensif dalam pembangkit nuklir, industri kimia, pembangkit tenaga uap dan industri perminyakan. Permasalahan unik yang terjadi pada aliran dua fase adalah pola aliran dan fluktuasi tekanan yang tinggi. Pola aliran dua fase melibatkan berbagai parameter, yaitu: diameter pipa, konfigurasi pipa, slip antar fase, sifat fluida, dan laju aliran dari tiap-tiap fase. Parameter lainnya adalah batas transisi pola aliran, perubahan temperatur dan kondisi tekanan. Alasan identifikasi pola aliran merupakan hal penting adalah pola aliran tertentu akan diperoleh efisiensi produksi yang lebih dibanding dengan pola aliran lain, pola aliran tertentu dapat berbahaya (pola aliran slug), dan dalam perencanaan fasilitas aliran dua fase perlu mempertimbangkan pola aliran sebelum mengkaitkan dengan penurunan tekanan.

Aliran slug adalah aliran gelembung panjang dan slug cair bergantian dalam ruang dan waktu. Unit slug ini terdiri dari tubuh slug dan gelembung gas memanjang yang bergerak melalui pipa. Dalam analisa pola aliran slug, struktur aliran sering dinyatakan dalam "unitcell". Rosa [1] menyatakan bahwa konsep ini pertama kali diusulkan oleh Dukler [2]. Dalam konsep ini struktur aliran slug dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu *liquid slug* dan *elongated gas bubble*. *Liquid slug* merupakan bagian yang terdiri dari fase cair dengan kemungkinan adanya gelembung gas

sedangkan *elongated gas bubble* adalah gelembung panjang yang mengalir di atas lapisan *film* cairan.

Gambar sebuah *unit cell* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Gambar skematis dari sistem slug dengan kantong gas, liquid slug, dan total slug unit [1].

Marruaz dkk [3] menyatakan bahwa pengetahuan tentang karakteristik aliran slug seperti frekuensi, kecepatan *unit cell*, panjang gelembung, dan panjang *liquid slug* sangat penting dalam menentukan ukuran jaringan perpipaan dan desain *receiving vessel* serta peralatan *pre-processing*. Sebagai contoh, kecepatan *unit cell* menentukan laju aliran sesaat gas dan cairan yang masuk pada *receiving vessel* dan panjang *liquid slug* mempunyai korelasi yang kuat dengan penurunan tekanan.

Upaya *identifikasi* pola aliran dua fase menggunakan respon sensor yang berbasis pada metode objektif telah dilakukan di masa lalu. Dua parameter yang biasa dimonitor untuk penentuan pola aliran adalah fluktuasi tekanan lokal dan fluktuasi fraksi hampa. Penelitian awal yang mendorong kearah

penggunaan parameter berfluktuasi dilakukan oleh Jones dan Zuber [4], Matsui [5] dan Tutu [6]. Sinyal deret waktu yang dikumpulkan dianalisis secara statistik untuk menyimpulkan informasi yang diinginkan. Perhitungan statistik yang digunakan adalah rata-rata nilai sinyal, standar deviasi (SD), koefisien of skewness (CoS), probability density function (PDF) dan power spectral density (PSD) dari sinyal tekanan dan sinyal fraksi hampa.

Penggunaan sensor fluktuasi tekanan lokal mutlak dan fluktuasi tekanan diferensial telah dilakukan oleh Matsui [5], Matsui [7], Lin dan Hanratty [8], Spedding [9], Wu [10], Xie dkk [11], Wilkens [12], Bin Sun [13] dan Yunlong dkk [14]. Para peneliti ini menggunakan karakteristik statistik untuk mengidentifikasi pola aliran. Karakteristik sinyal tekanan dan perbedaan tekanan juga telah digunakan sebagai kriteria untuk penggolongan pola aliran multifase [15]. Weisman dkk [16] memperoleh karakteristik fluktuasi dari aliran slug dalam bentuk sinyal urutan waktu dan amplitudo dan frekuensi fluktuasi tekanan diferensial.

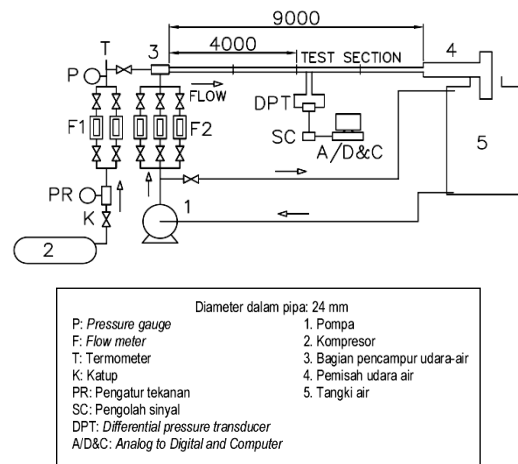
Santoso dkk [17] mengkaji pola aliran *plug* dan *slug* aliran dua fase air-udara beserta parameter-parameternya (kecepatan *unit cell*, panjang *unit cell*, frekuensi *slug*, dan kecepatan gelembung). Pengukuran parameter-parameter dalam aliran *plug* dan *slug* dilakukan dengan menggunakan *high-speed video camera*. Penelitian dilakukan pada kecepatan superficial air 0,14 m/s – 1,95 m/s dan kecepatan superficial udara 0,52 m/s – 3,65 m/s. Penelitian dilakukan pada pipa horisontal dengan diameter dalam pipa 24 mm. Pola aliran yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah pola aliran kantung (*plug*), sumbat likuid (*slug*) dan transisinya. Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa peneliti (Nydal dkk [18], Gu Hanyang [19], Eissa [20]; Guo Liejin dkk [21] memfokuskan penelitiannya pada karakteristik fluktuasi dari parameter aliran slug.

Penelitian ini memperlihatkan bagaimana analisis statistik, PDF, autokorelasi dan PSD dari data kuantitatif lokal yang disediakan oleh peralatan yang handal untuk aliran slug. Pada artikel ini, sinyal direkam dengan sensor beda tekanan (DPT) dalam pipa horisontal.

METODOLOGI

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 2. Air dialirkan dari tanki oleh pompa dan mengalir melalui flowmeter kedalam pencampur udara-air. Udara disuplai dari kompresor dan mengalir melalui *flow meter* udara ke pencampur udara-air. Kemudian udara-air yang tercampur mengalir melalui seksi uji dan pemisah udara-air, dimana udara dipisahkan ke atmosfer dan air mengalir ke dalam tangki untuk disirkulasikan. Pipa uji terbuat dari pipa transparan dengan diameter dalam (D) 24mm.

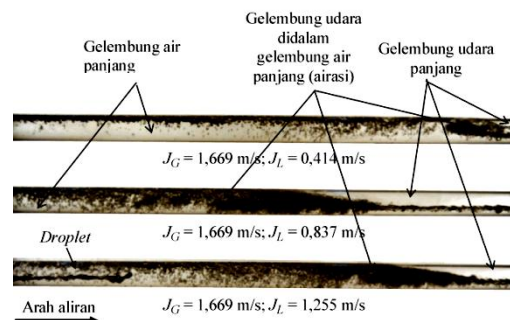
Panjang inlet ke seksi uji adalah 4,5 m dan panjang seksi uji adalah 2,5 m. Panjang seksi uji ke outlet adalah 2 m. Sebuah sensor beda tekanan validyne DP15-32 digunakan mengukur penurunan tekanan aliran dua fase udara air. Jarak lubang tap tekanan adalah 5D. Data akuisisi yang dipakai adalah PCL-816 buatan Advantech. Kecepatan pengambilan data adalah 400 Hz selama 50 dt. Pola aliran diobservasi pada seksi uji. Visualisasi pola aliran menggunakan *high speed camera*. Pengolahan data menggunakan program MATLAB untuk memperoleh grafik tekanan diferensial dalam rangkaian waktu, *probability density function (PDF)* dan *power spectral density (PSD)*.



Gambar 2. Susunan peralatan eksperimen.

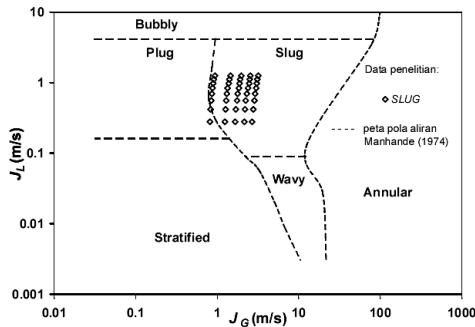
Hasil dan Diskusi

Pola aliran slug mempunyai ciri khusus dimana aerasi terjadi pada seluruh bagian likuid slug. Selain itu, batas antara kantung dan liquid slug tidak halus. Pola aliran kantung yang diamati ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tipe pola aliran slug hasil observasi penelitian.

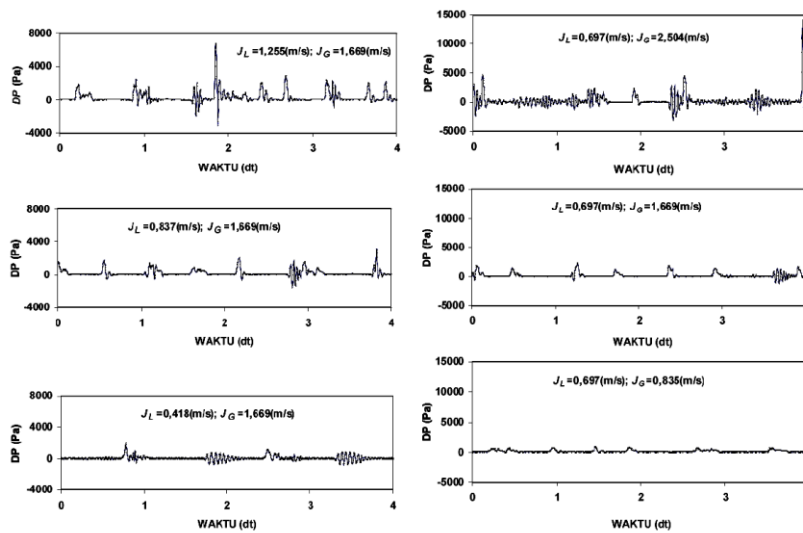
Kemudian, data pola aliran slug yang didapat dibandingkan dengan peta pola aliran Mandhane dkk. (1974) seperti ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. Peta pola aliran

Gambar 4 mengindikasikan bahwa data pola aliran slug yang didapat adalah sesuai dengan hasil penelitian Mandhane dkk. (1974). Pengukuran beda tekanan sebagai fungsi kecepatan superficial fluida ditunjukkan pada Gambar 4, dengan rentang kecepatan superficial udara: $J_G = 0.417-2.504$ m/s dan rentang kecepatan superficial air: $J_L = 0.279-1.255$ m/s.

Sinyal beda tekanan aliran slug diperlihatkan Gambar 5. Sinyal ini mempunyai harga puncak yang banyak yang disebabkan oleh kecepatan gelembung air yang dimasuki gelembung udara mengalir dengan kecepatan tinggi. Sedangkan diantara rentang harga puncak cenderung bernilai nol yang mengindikasikan adanya aliran gelembung udara. Gambar 5 juga memperlihatkan bahwa kenaikan kecepatan superficial fluida mengakibatkan kenaikan harga puncak beda tekanan. Kenaikan kecepatan superficial air memperpendek rentang harga beda tekanan yang berharga nol, sebaliknya kenaikan kecepatan superficial udara memperpanjang rentang harga beda tekanan yang berharga nol. Gambar ini jelas menunjukkan karakteristik fluktuasi beda tekanan dari aliran slug horizontal. Sinyal seperti ini termasuk dalam data random perlu dianalisis secara statistik, PDF, autokorelasi dan PSD.



(a) Kecepatan superficial udara konstan,

(b) Kecepatan superficial air konstan

Gambar 5. Tekanan diferensial dalam rangkaian waktu

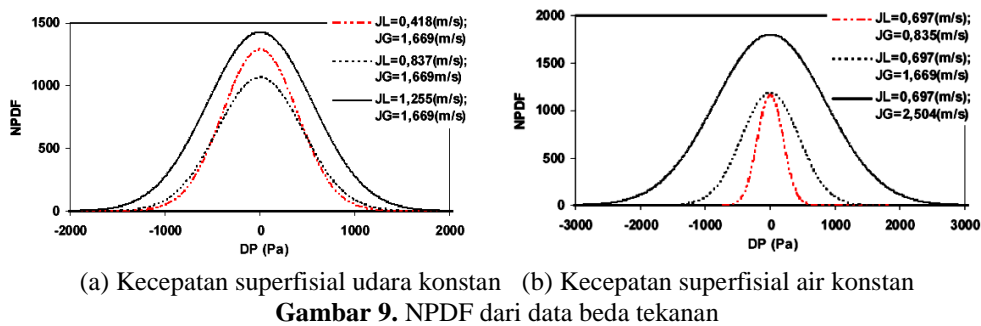
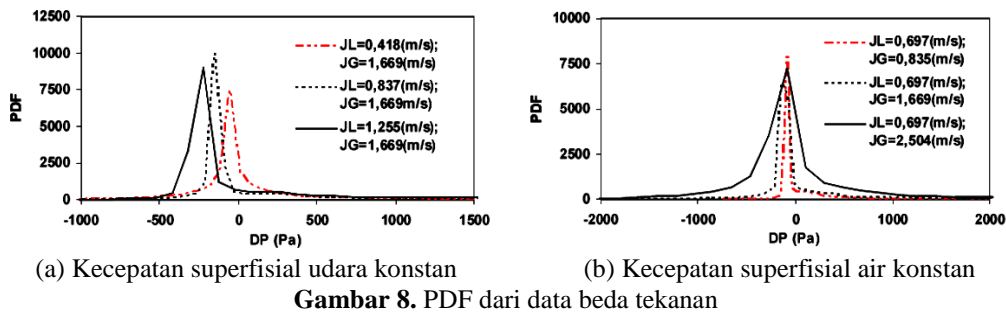
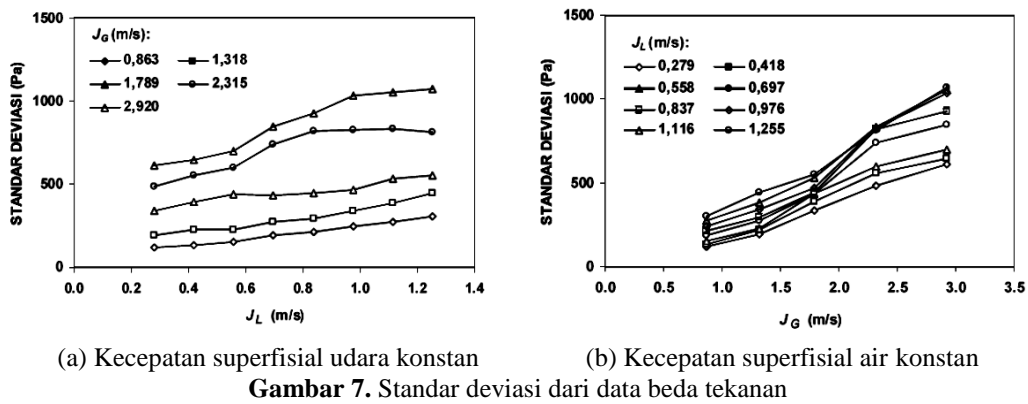
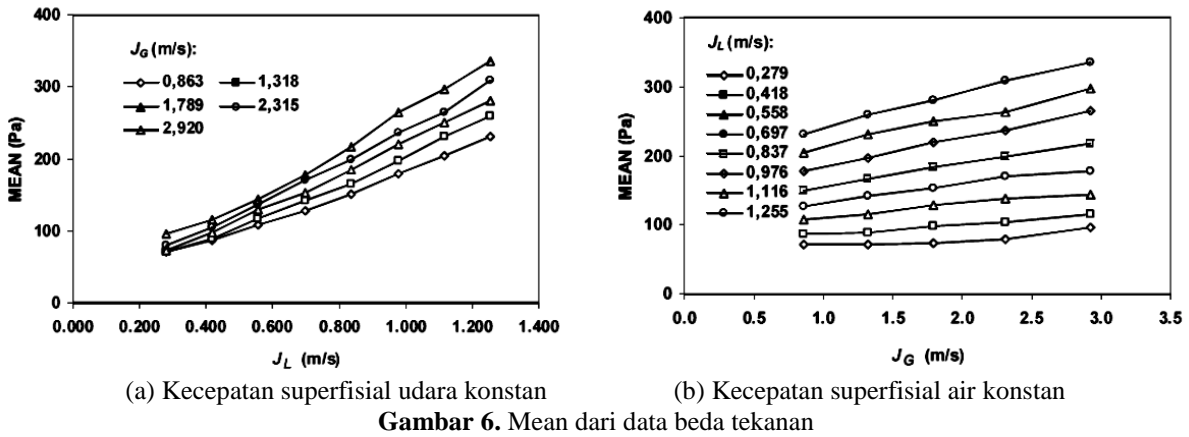
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 6(a) menunjukkan kecepatan superficial air meningkat dan kecepatan superficial udara konstan, sebaliknya Gambar 6(b) menyajikan kecepatan superficial cairan konstan sementara kecepatan superficial gas meningkat. Akibat kecepatan superficial air dan gas meningkat maka harga mean beda tekanan meningkat. Ini cukup menunjukkan bahwa perubahan kecepatan superficial fluida adalah faktor dominan yang mempengaruhi harga mean beda tekanan aliran slug.

Gambar 7 memperlihatkan harga standar deviasi dari data beda tekanan, yang serupa dengan Gambar 5.

Gambar ini menjelaskan bahwa makin tinggi harga standar deviasi makin besar harga simpangan terhadap harga mean (makin tinggi fluktuasi beda tekanan).

Gambar 8 memperlihatkan PDF dari data beda tekanan. Gambar ini menggambarkan data beda tekanan tidak simetri atau semakin tinggi kenaikan kecepatan superficial fluida mempunyai kecenderungan bergeser ke kiri. Selain itu semakin tinggi kenaikan kecepatan superficial fluida juga memperlebar penyebaran data beda tekanan. Ini dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 9 yang memperlihatkan *normalized probability density function* (NPDF).



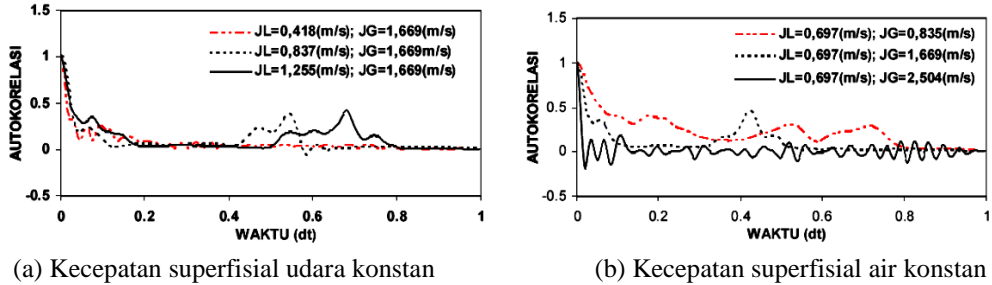
Gambar 10 memperlihatkan autokorelasi data beda tekanan aliran slug. Titik puncak terjadi pada waktu nol detik, kemudian diikuti dengan penurunan harga koefisien autokorelasi yang tajam. Aliran slug mempunyai osilasi periodik sepanjang

sumbu x (waktu) dengan harga amplitudo koefisien autokorelasi sekitar harga nol. Perbedaan yang tajam terlihat pada awal (waktu=0), kenaikan kecepatan superficial air mengakibatkan penurunan kemiringan harga koefisien autokorelasi dan

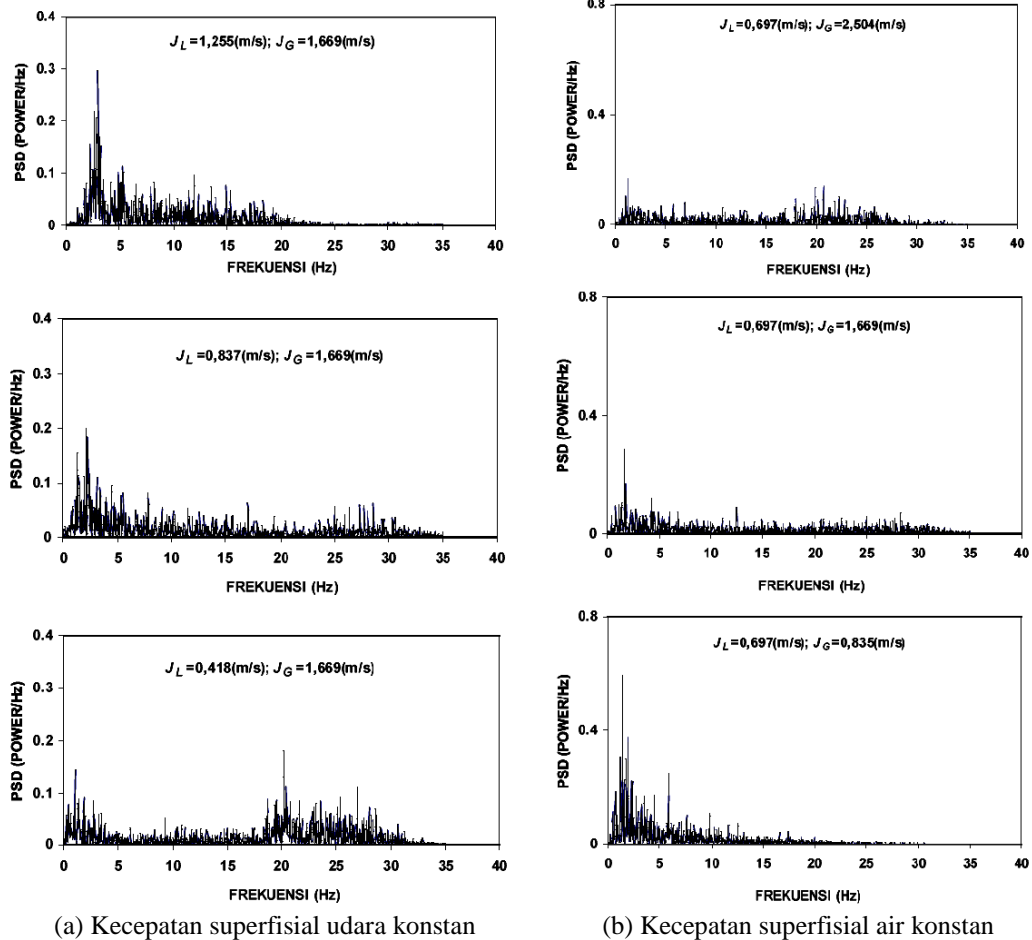
kenaikan kecepatan superficial udara mengakibatkan kenaikan kemiringan harga koefisien autokorelasi.

Gambar 11 memperlihatkan grafik PSD pada frekuensi 0-30 Hz. Gambar 11(a) menunjukkan bahwa penyebaran titik-titik puncak PSD

cenderung bergeser ke frekuensi rendah dengan kenaikan kecepatan superficial air. Sebaliknya Gambar 11(b) menunjukkan bahwa penyebaran titik-titik puncak PSD cenderung bergeser ke frekuensi tinggi dengan kenaikan kecepatan superficial udara.



Gambar 10. Autokorelasi dari data beda tekanan



Gambar 11. PSD dari data beda tekanan

KESIMPULAN

Karakteristik fluktuasi beda tekanan aliran slug dua fase udara-air sangat dipengaruhi oleh kecepatan superficial fluida. Perubahan kecepatan superficial udara dan kecepatan superficial air dapat dibedakan dengan analisis statistik, PDF, autokorelasi dan PSD.

Daftar Notasi

- JL = kecepatan superficial air (m/s)
- JS = kecepatan superficial udara (m/s)
- DP = tekanan diferensial atau bedatekanan (Pa)
- PDF = *probability density function*
- NPDF = *normalized probability density function*
- PSD = *power spectral density*

DPT = *differential pressure transducer*

VB = kecepatan gelembung gas

VS = kecepatan slug

LB = panjang gelembung gas

LS = panjang slug

Ucapan Terima Kasih

Sebagian dari penelitian ini dibiayai oleh dari skim Penelitian Hibah Bersaing DIKTI Tahun Anggaran 2011.

REFERENSI

- [1] Rosa, E.S., 2004. *Flow Structure In The Horizontal Slug Flow*, Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecanica Departamento de Energia, Campinas Brasil.
- [2] Dukler, E. and Hubbard, M.G., 1975. "A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes", *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, Vol. 14, pp.377-347.
- [3] Marruaz, Keyla S., Gonçalves, Marcelo A. L., Gaspari, Eduardo, Ribeiro, Geraldo S., França, Fernando A., Rosa, Eugênio S., 2001. "Horizontal Slug Flow in a Large-Size Pipeline: Experimentation and Modeling", *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, vol.23, no.4, Rio de Janeiro.
- [4] Jones Jr. dan N. Zuber, 1975. "The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 2, pp. 273–306.
- [5] Matsui, G., 1984. "Identification of flow regimes in vertical gas-liquid two-phase flow using differential pressure fluctuations", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 10, pp. 711–720.
- [6] Tutu, 1982, "Pressure fluctuations and flow pattern recognition in vertical two phase gas-liquid flows", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 8, pp. 443–447.
- [7] Matsui, G., 1986. "Automatic identification of flow regimes in vertical two-phase flow using differential pressure fluctuations", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 95, pp. 221-231.
- [8] Lin dan Hanratty, 1987. "Detection of Slug Flow from Pressure Measurements", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 13, pp. 13-21.
- [9] Speeding dan Spence, 1993. "Flow regimes in two-phase gas-liquid flow", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 19, pp. 245-280.
- [10] Wu Haojiang, Zhou Fangde, Wu Yuyuan, 2001. "Intelligent identification system of flow regime of oil-gas-water multiphase flow", *Int. J. Multiphase Flow*, 27, 459-475.
- [11] Xie Tao, 2004. "Hydrodynamic Characteristics of Gas/Liquid/Fiber Three-Phase Flows Based on Objective and Minimally-Intrusive Pressure Fluctuation Measurements", *Dissertation*, Georgia Institute of Technology.
- [12] Wilkens, R. J., D. K. Thomas, 2008. "A Simple Technique for Determining Slug Frequency Using Differential Pressure", *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 130
- [13] Bin Sun, Yongjun Zheng, (2008). "Hilbert-Huang Transform Analysis of Dynamic Differential Pressure Signal of Gas-liquid Two-phase Flow", *Congress on Image and Signal Processing*, IEEE.
- [14] Yunlong, Sun Bin, dan Li Yaxia, 2003. "PDF Characteristic of Differential Pressure Fluctuation Gas-liquid Two-phase Flow in Horizontal Pipe", *Instrument Science*, China.
- [15] Franca F., Acikgoz M., Lahey R. T., Clausse A., 1991. "The use of fractal techniques for flow regime identification", *Int. J. Multiphase Flow*, 17, 545-552.
- [16] Weisman J., Duncan D., Gibson J. et al, 1979. "Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines", *Int. J. Multiphase Flow*, 5(6), 437-462.
- [17] Santoso, B., Fithroh D. R., Indarto, Deendarlianto, Thomas S. W., (2010). "Kaji Eksperimen Pola Aliran Plug Dan Slug Air-Udara Pada Pipa Mendatar", *Seminar RAPI IX UMS*, Surakarta.
- [18] Nydal O. J., Pintus S., Andreussi P., 1992. "Statistical characterizations of slug flow in horizontal pipes", *Int. J. Multiphase Flow*, 18, 439-453.
- [19] Gu Hanyang, Guo Liejin, 2008. "Experimental Investigation of Slug Development on Horizontal Two-phase Flow", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16(2) 171-177
- [20] Eissa Al-Safran, 2009. "Investigation and prediction of slug frequency in gas/liquid horizontal pipe flow", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 143–155
- [21] Guo Liejin, Bai Bofeng, Zhao Liang, Wang Xin, Gu Hanya, (2009). "Online recognition of the multiphase flow regime and study of slug flow in pipeline", *The 6th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows*, IOP Publishing.
- [22] Taitel, Y. and Dukler, A. E., 1976. "A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow," *AIChE Journal*, Vol.22, No. 1, pp. 47-55.
- [23] Wallis, G.B., 1969. *One Dimensional Two Phase Flow*, Mc Graw-Hill Book Company, New York.