

Interfacial Behavior of Steam-Condensate Two Phase Flow in a Horizontal Pipe

(Perilaku Antar-Muka Aliran Dua-Fasa Uap-Kondensat di dalam Pipa Horisontal)

Sukamta¹, Indarto², Purnomo², Tri Agung Rohmat²

¹Lecturer of Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, Indonesia, Tel/HP: +622744360467/ +628157998996, fax : +622744360468, email : msukamta@yahoo.com, msukamta@gmail.com

²Lecturer of Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Gadjah Mada University, Jl. Grafika no. 2 Yogyakarta, Indonesia

Abstract : Steam condensing in a horizontal pipe experiences a transient flow behavior and the unique characteristics of the pressure drop. An experimental study using a counterflow steam condensing has been designed to obtain the flow behavior and pressure drop data. The experiment apparatus used in present experimental study consisted of an inner annulus pipe made of copper ($d_{in} = 17.2$ mm, $d_o = 19$ mm) with a length of 1.8 m. The outer pipe annulus was a galvanized iron pipe ($d_{in} = 108.3$ mm, $d_o = 114.3$ mm) with a length of 1.6 m. Tested liquid was water. In the experiment, the water was heated by using a boiler to generate steam which was then flowed and condensed inside the annulus pipe to form a steam-condensate two-phase flow in horizontal pipe. The experiments were conducted at a static pressure of $P_s = 108.825$ kPa and the temperature of $T = 119.7$ °C. Here, the water was used as a coolant fluid in the outer of annulus pipe. The pressure drop axial direction of the test was directly measured by using a differential pressure transducer (validyne, accuracy of $\pm 0.25\%$) with a sampling rate of 7.353 kHz. The obtained experimental data of differential pressure fluctuations during the steam condensation in a horizontal pipe was analyzed using a statistical analysis. As a result it was found the flow pattern area of non slugging (stratified and wavy flow), transition (wavy-slug flow), and slugging (slug and large-slug), here the transition flow pattern of slug and large-slug is defined as a initiating of water hammer.

Key Words : Interfacial Behavior, Steam-Condensate, two-phase flow, Slugging, horizontal pipe

Pendahuluan

Dalam rangka meningkatkan pemahaman tentang *water hammer* di dalam *pressurized water reactor* (PWR), pemerintah Amerika Serikat melalui *the U.S. Nuclear Regulatory Commision* telah melakukan penelitian mengenai permasalahan operasi dan kecelakaan, mekanisme inisiasi *water hammer*, proses *steam buble collapse* seperti dilaporkan oleh Block, dkk. (1977). Di dalam laporan tersebut dijelaskan elemen-elemen yang diperlukan untuk memprediksi inisiasi *water hammer* antara lain tentang *interfacial*

transport phenomena, dan data yang diperoleh pada waktu penelitian tersebut tidak cukup untuk digunakan dalam memprediksi inisiasi *water hammer*. Selanjutnya Gruel dkk., (1981) meneliti impuls yang dihasilkan oleh *condensation incuced-water hammer* dan kerusakan sistem perpipaan terkait, sementara Jones dkk., (1981) mengembangkan sebuah peralatan eksperimen baru untuk menemukan inisiasi *water hammer* selama aliran transien dan penjalaran tekanan dari kejadian *water hammer*.

Bjorge (1982) mengembangkan model matematis aliran satu dimensi untuk menggambarkan mekanisme inisiasi terkait dengan *water hammer* disebabkan oleh *steam bubble collapse* di dalam pipa yang berisi uap dan air sangat dingin. Bjorge juga mendefinisikan "batas stabilitas mutlak" yang merupakan prediksi konservatif pembentukan *water hammer*. Batas ini didalilkan sebagai laju aliran cairan minimum yang diperlukan untuk memenuhi kriteria yang disebut Taitel-Dukler [1976], dengan asumsi bahwa cairan sangat dingin memasuki pipa dengan cepat dipanaskan sampai temperatur jenuh oleh aliran uap. Parameter seperti tebal lapisan cairan, suhu cairan dan laju aliran massa uap di sepanjang pipa diselidiki. Kriteria Taitel-Dukler tersebut yang digunakan untuk memprediksi apakah terjadinya *water hammer* akan mulai atau tidak.

Jackobek dan Griffith [1984] menggunakan metodologi yang dikembangkan oleh Bjorge (1982) dan menghitung pengaruh kecepatan dan tekanan puncak selama terjadinya *water hammer* dengan asumsi: (a) tekanan nol yang terjadi di dalam *steam bubbles upon collapse*, (b) kecepatan cairan peluru berpengaruh mengurangi dampak, dan (c) Jika tekanan berkurang maka proses kondensasi sangat dominan. Sebuah ambang batas laju aliran massa uap diperlukan untuk mencapai kesetimbangan termal. Ini berarti bahwa energi yang ditransfer dari panas latent ke dalam panas *sensible* diperlakukan sebagai batas atas untuk pencampuran energi.

Ada beberapa penelitian yang berkaitan dengan transisi dari aliran *stratified* menuju aliran *slug* yang merupakan inisiasi *water hammer*. Kordyban dkk (1970) menyimpulkan bahwa untuk geometri saluran dan sifat fluida tertentu, faktor utama yang akan mempengaruhi transisi ini adalah kecepatan gas, tebal cairan, panjang gelombang, dan tinggi gelombang. Taitel-Dukler berasumsi bahwa perbedaan tekanan pada permukaan bergelombang disebabkan

karena adanya efek *Bernoulli*. Mereka menjelaskan bahwa pembentukan *slug* terjadi ketika terdapat perbedaan tekanan cukup besar akibat gaya gravitasi yang bekerja pada gelombang. Mishima dan Ishii [1980] memperkenalkan sebuah kriteria stabilitas dengan memperkenalkan batas deformasi gelombang dan konsep " gelombang paling berbahaya " dalam analisis stabilitas.

Ketika gas mengalir diatas permukaan cair dengan kecepatan yang relatif cukup besar pada pipa atau saluran horisontal, bidang pemisah gas dan zat cair menjadi berombak, yang kemudian meningkatkan kecepatan gas atau zat cair tersebut, dan akhirnya ombak menjadi tidak stabil dan membesar untuk mengisi semua bagian saluran / pipa. Hasilnya, transisi dari arus *stratified* bergelombang ke pola aliran sumbat likuid terjadi. Selama lebih dari 30 tahun, sejumlah penelitian baik eksperimental maupun teoritis telah dilakukan terkait dengan transisi ke pola aliran kantung. Sejumlah penelitian yang sama terkait dengan fenomena aliran arus berlawanan terbatas, yang umumnya dikenal dengan *flooding*, juga telah dilaksanakan selama periode yang sama. Kecuali penelitian yang paling baru dipublikasikan setelah tahun 1990, hampir sebagian besar teori tentang transisi aliran sumbat cairan telah secara teliti dilakukan oleh Kordyban (1990). Kordyban dan Ranov (1970) menyatakan bahwa pola aliran sumbat cairan mengikuti ketidakstabilan gelombang *Kelvin-Helmholtz*. Mereka mengakui ketidakstabilan gelombang amplitudo tetap di lapisan film tipis. Wallis dan Dobson (1973) juga melakukan eksperimen dan analisis tentang transisi aliran sumbat likuid pada saluran segiempat horisontal dengan udara dan air pada tekanan atmosfir. Untuk menganalisa stabilitas gelombang, Taitel dan Dukler (1976) mempertimbangkan ketidakstabilan *Kelvin - Helmholtz* terjadi ketika tekanan rendah (*low pressure*) mengatasi efek stabilisasi pada puncak gelombang. Gardner (1979) juga mengembangkan teori inisiasi aliran sumbat cairan berdasarkan perubahan energi. Mishima

dan Ishi (1980) di pihak lain, memperluas analisis Kordyban dan Ranov (1970) dan memperkenalkan konsep gelombang yang paling berbahaya (*most dangerous wave*), untuk memprediksi kriteria ketidakstabilan. Istilah fraksi hampa dari model Mishima dan Ishi identik dengan milik Wallis dan Dobson, hanya berbeda pada koefisien numerik dari model mereka. Perlu dicatat bahwa koefisien numerik dari model Chun (1996) adalah 0,47, yang menghasilkan derivasi teoritis, dimana koefisien numerik diperoleh Wallis dan Dobson (1973), Mishima dan Ishi (1980) secara berurutan adalah 0,5 dan 0,478.

Salah satu aplikasi yang paling penting dari kriteria transisi aliran sumbat cairan pada sistem reaktor nuklir adalah bahwa kriteria ini digunakan sebagai pengenalan kriteria *condensation-induced water-hammer* (CIWH), yang dikenal sebagai bentuk *water hammer* yang paling merusak dalam reaktor air tekan (PWR). Kriteria terbentuknya aliran kantung (*slug*) secara langsung digunakan sebagai kriteria mulai terjadinya CIWH (Chun dan Nam, 1992).

Chun dan Yu (2000) meneliti pengaruh kondensasi uap pada aliran berlawanan arah di dalam pipa dengan sudut kemiringan mendekati sumbu horizontal. Penelitian dilakukan pada pipa berdiameter 0,083 m, panjang 2,2 m, sudut kemiringan $0,25^\circ$ dan $0,5^\circ$. Serangkaian eksperimen dilakukan dengan total 34 data untuk memprediksi inisiasi *flooding*. Dari eksperimen tersebut dapat diperoleh kesimpulan berikut ini. Pertama, perbandingan inisiasi *flooding/CCFL/slugging* dengan menggunakan dengan model *liquid slug (slugging)* menunjukkan bahwa untuk laju aliran air yang diberikan $(j_f)_{crit}$, laju aliran gas kritis $(j_g)_{crit}$ dimana terjadi *slugging* untuk aliran uap-air lebih besar daripada aliran udara-air. Kesesuaian antara model dan data yang telah ada sekarang lebih kurang sama, kecuali bahwa deviasi dengan menggunakan

model Taitel dan Dukler adalah yang paling besar ketika $j_f < 0,04$ m/s.

Kedua, hasil studi parametrik atas efek kondensasi menggunakan model ini menunjukkan bahwa, jika semua kondisi lokal adalah mirip / serupa, model dan prediksi kecepatan gas lokal yang menyebabkan awal *slugging* sedikit lebih rendah ketika terjadi kondensasi.

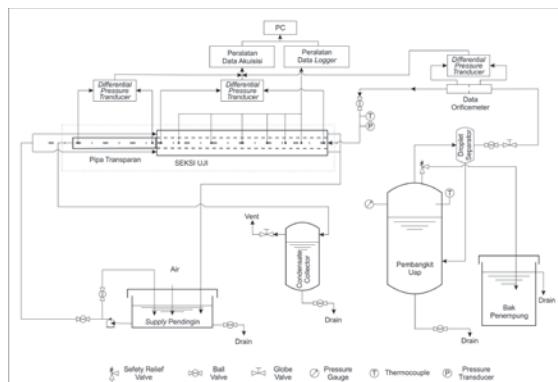
Ketiga, berdasarkan observasi eksperimen dan evaluasi kemampuan aplikasi dari model pembentukan *slugging* secara teoritis untuk memprediksi awal *slugging* mendekati aliran dua fase horizontal, dapat dibuat kesimpulan berikut. Pembentukan *slugging* mendekati aliran dua fase horizontal dapat dianggap sebagai perintis terjadinya *slugging / flooding*. Oleh karena itu, dalam *range* parameter aliran dari eksperimen ini, kriteria yang diperoleh untuk pembentukan *slugging* dapat digunakan secara langsung untuk memprediksi awal *slugging/flooding* pada kasus ini. Bagaimanapun, korelasi baru yang lebih akurat diperlukan, dengan menggunakan bilangan tak berdimensi semi-empiris Wallis.

Berlandaskan uraian di atas, maka penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menjelaskan secara kuantitatif perilaku antar-muka aliran dua-fasa uap-kondensat di dalam pipa horizontal melalui eksperimen kondensasi uap di dalam pipa horizontal dengan pendinginan dari luar pipa.

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Data dalam karya ilmiah ini diambil dari percobaan yang dilakukan di Laboratorium *Heat and Mass Transfer* Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada. Bahan yang digunakan dalam hal ini adalah air murni (H_2O), yang kemudian dipanaskan dengan menggunakan *boiler* untuk menghasilkan uap air yang kemudian dikondensasikan untuk membentuk aliran uap-kondensat

pada pipa horisontal, dan air yang digunakan sebagai pendingin pada pipa anulus bagian luar. Alat pengambilan data seperti ditunjukkan pada gambar 1, terdiri atas pipa anulus bagian dalam dengan bahan tembaga ($d_{in} = 17.2$ mm, $d_o = 19$ mm) dengan panjang 1,8 m, sedangkan pipa anulus bagian luar adalah *Galvanized Iron Pipe* ($d_{in} = 108.3$ mm, $d_o = 114.3$ mm) dengan panjang 1,6 m. Penelitian ini dilakukan pada tekanan statis dan temperatur sebelum memasuki pipa uji ialah $P_s=108,825$ kPa $T=119,7$ °C. *Differential pressure transducer* model *Validyne* digunakan untuk mengukur fluktuasi beda tekanan di sepanjang pipa uji dengan sampling rate 7.353 kHz.



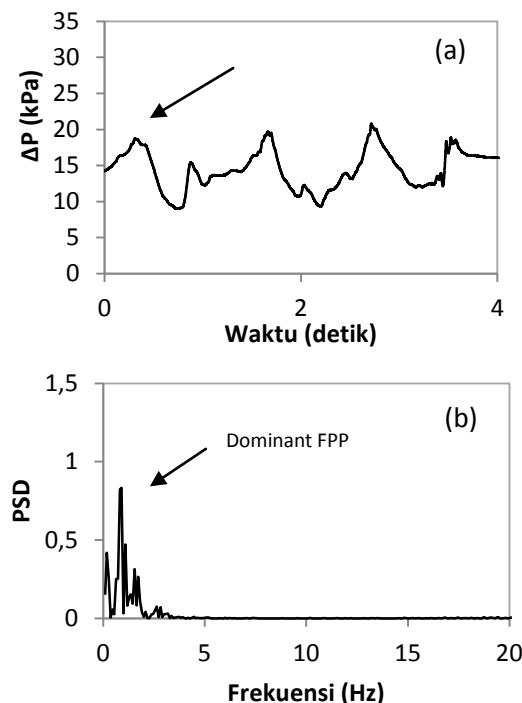
Gambar 1. Alat penelitian

Hasil dan Pembahasan

Data beda tekanan terhadap waktu dan *power spectra density* untuk aliran masa uap kecil (masuk pipa uji dan aliran masa air pendingin yang besar ($\dot{m}_{st}=1,6 \times 10^{-3}$ kg/s dan $\dot{m}_{st}=2,8 \times 10^{-3}$ kg/s, $\dot{m}_{co}=5,78 \times 10^{-1}$ kg/s) menunjukkan tidak adanya fluktuasi beda tekanan selama pengukuran, hal ini mengindikasikan tidak terjadinya *condensate passing wave*, yang bermakna fisis bahwa pola aliran yang terbentuk adalah *stratified*, di mana kondensat mengalir rata dengan lapisan tertentu yang halus, sementara uap mengalir secara terpisah di atas kondensat dan tidak sampai menyebabkan kondensat terkoyak karena adanya efek Bernoulli. Analisa ini

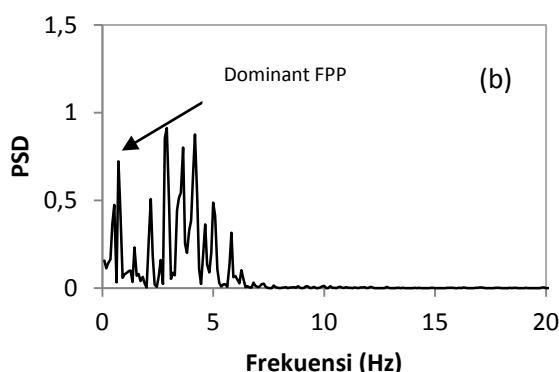
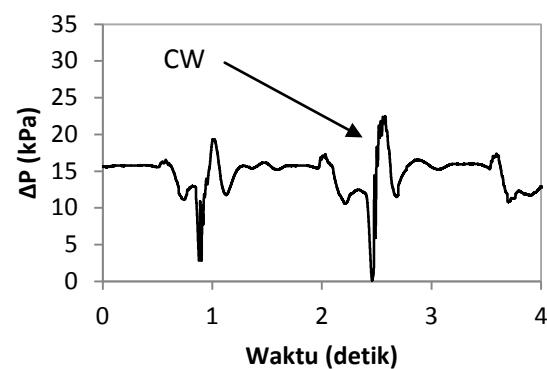
didukung oleh tidak adanya nilai frekuensi dominan pada gambar *power spectra density* dari data beda tekanannya.

Jika aliran masa uap ditingkatkan menjadi yaitu $\dot{m}_{st}=6,8 \times 10^{-3}$ kg/s sampai dengan $\dot{m}_{st}=8,1 \times 10^{-3}$ kg/s, maka nampak fluktuasi beda tekanan seperti ditunjukkan pada gambar 2. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa beda tekanan berfluktuasi dengan rerata amplitudo kecil (± 5 kPa) yang menunjukkan telah terbentuk *condensate passing wave* dengan jumlah yang kecil pula. Adanya *condensate passing wave* ini menunjukkan ada penambahan aliran masa kondensat di pipa uji dengan jumlah yang kecil (< 5 Hz). Dari data ini dapat dinterpretasikan bahwa kondensat mengalir dengan bergelombang kecil yang disebut dengan pola aliran *wavy*. Pola aliran *wavy* ini tidak akan mampu menyebabkan *vapor lock*, sehingga pada aliran ini dipastikan tidak akan terjadi *slugging* dan *water hammer*.



Gambar 2.(a). Fluktuasi beda tekanan terhadap waktu, (b) PSD dari data fluktuasi beda tekanan, ($\dot{m}_{st}=6,8 \times 10^{-3}$ kg/s ke $\dot{m}_{st}=8,1 \times 10^{-3}$ kg/s, $\dot{m}_{co}=5,78 \times 10^{-1}$ kg/s)

Namun ketika aliran masa uap terus ditingkatkan menjadi $m_{st} = 8,4 \times 10^{-3}$ kg/s sampai dengan $m_{st}=8,6 \times 10^{-3}$ kg/s maka nampak fluktuasi beda tekanan yang cukup signifikan seperti ditunjukkan pada gambar 3 (tipikal). Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa beda tekanan berfluktuasi dengan rerata amplitudo cukup besar (± 10 kPa) yang menunjukkan tingginya perbedaan tekanan yang terjadi di sepanjang pipa uji. Hal ini menunjukkan bahwa kondensat telah mendominasi aliran di dalam pipa uji. Dominasi kondensat ini terjadi karena terbentuk *condensate passing wave* dengan jumlah yang cukup besar pula. Dari data ini dapat dinterpretasikan bahwa kondensat mengalir dengan bergelombang besar dan mampu membentuk *vapor locked*, di mana uap terjebak di dalam kondensat, yang disebut dengan pola aliran *slug*. Pola aliran *slug* ini akan mampu menginisiasi terjadinya *water hammer*.



Gambar 3.(a). Fluktuasi beda tekanan terhadap waktu, (b) PSD dari data fluktuasi beda tekanan, ($m_{st}=8,4 \times 10^{-3}$ kg/s, $m_{co}=5,78 \times 10^{-1}$ kg/s)

Kesimpulan

Berdasarkan analisa dan pembahasan tersebut di atas, untuk tekanan statis rata-rata dan temperatur uap sebelum memasuki pipa uji $P_s = 108,825$ kPa dan $T = 119,7$ °C, diperoleh pola aliran daerah *non slug* meliputi aliran *stratified* dan *wavy*, transisi yaitu aliran *wavy-slug* dan *slugging* (*slug* dan *large-slug*). Pola aliran *slug* dan *large-slug* inilah yang didefinisikan sebagai inisiasi terjadinya fenomena *water hammer* karena kondensasi uap.

Ucapan Terima kasih

Terima kasih disampaikan kepada Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang telah memberikan kesempatan dan pendanaan pada penelitian ini.

Nomenklatur

CW	Condensate passing wave
ΔP	Beda tekanan (kPa)
FPP	First Peak Point
m	Laju aliran massa (kg/s)

Subscripts

st	steam
co	Cooling water

Referensi

Bjorge ,R.W., *Initiation of Water hammer in horizontal or nearly-horizontal pipes containing steam and subcooled water*, Ph.D. Thesis, MIT, 1982.

Bjorge, R.W., Griffith, P., 1984. *Initiation of Water Hammer in horizontal and nearly horizontal pipes containing steam and subcooled water*. ASME J. Heat Transfer 106, 835-840.

Block, J.A., Rothe, P.H., Crowley, C.J., Wallis, G.B., 1977. *An Evaluation of PWR Steam Generator Water Hammer*. NUREG-0291.

- Chun, M.H., Nam, H.Y., 1992. *Analysis of water hammer Induced by Steam-water counterflow in a long horizontal pipe*. Int. Commun. Heat Transfer 19, 507-518.
- Chun, M.H., Lee, B.R., Nam, H.Y., 1996. *Theoretical and experimental investigation of onset slugging in horizontal stratified air-water countercurrent flow*. Int. commun. Heat Transfer 23, pp 11-22.
- Chun M.H., dan Yu, S.O., 2000. *Effect of Steam Condensation on Countercurrent flow limiting in nearly horizontal two phase flow*, Nuclear and Engineering Design 196 (2000), pp 201-217
- Gruel, R.L., Huber, P.W., and Hurwitz, W.M., 1981, *Piping Response to Steam-Generated Water Hammer*, ASME J. Pressure Vessel Technology, 103, p. 219
- Jackobek A.B. and P. Griffith, *U.S. NRC Report, NUREG/CR-3895*, 1984.
- Jones, D.L., 1981, *Horizontal Water/Steam Flow Instability*, S.B. Thesis, MIT Dept. Of Mechanical Engineering
- Kordyban, E. S. & Ranov, T., 1970, *Mechanism of Slug Formation in Horizontal Two-Phase Flow*. J. Basic Engng 92, pp 857-864.
- Kordyban, E. S., 1990, *Horizontal slug Flow : A Comparation of Existing Theories*, ASME J. Fluids Eng., Vol. 112, pp 74-83
- Mishima, K. & Ishii, M. 1980 Theoretical prediction of onset of horizontal slug flow. *ASME J. Fluids Eng.*, *ASME Trans.* **102**, 441-445.
- Taitel, Y., and A.E. Dukler, 1976. *A Theoretical Approach to the Lockhart-Martinelli Correlation for Stratified Flow*, Int. J. Multiphase Flow, 2, pp 591
- Taitel, Y., and A.E. Dukler, 1976. *A Model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow*. *AIChE J.* 22, pp 47-55
- Wallis, G. B. & Dobson, J. E. 1973. *The onset of slugging in horizontal stratified air-water flow*. Int. J. Multiphase Flow **1**, 173-193.