

Identifikasi Pola Aliran Dua Fasa Uap-Kondensat Berdasarkan Pengukuran Beda Tekanan pada Pipa Horisontal

(Identification of Two-Phase Flow Patterns of Steam-Condensate Based on Differential Pressure Measurement in a Horizontal Tube)

SUKAMTA, INDARTO, PURNOMO, TRI AGUNG ROHMAT

ABSTRACT

An experiment of two-phase flow patterns of steam-condensate based on differential pressure measurement in horizontal tube was conducted by varying the flow rate of the steam. The experiment utilised annulus pipe with inner section test pipe was made from copper and outer section was made from Galvanized Iron Pipe (GIP) wrapped with a 10-mm-thick insulation. The pipe was 1.6 meter length, and 4 inch outer diameter and 17 mm inner diameter. The two-phase flow regime was investigated based on pressure gradient between its inlet and outlet. In order to support the result, visualization was conducted using a $\frac{3}{4}$ inch diameter and 1.3 m length of transparent pipe connected with the test pipe section. Five variations of steam flow rate ranging from $0.00211361 \text{ m}^3/\text{s}$ to $0.007078511 \text{ m}^3/\text{s}$ were selected. The results show that for lowest steam flow rate, stratified flow pattern was identified while for the other variations, stratified, wavy, plug and slug flow pattern were observed. Wavy flow pattern occurred on transition of stratified to slug or plug. Annular flow pattern was not observed in this experiment. Generally speaking, an increase in steam flow rate resulted in a more significant pressure gradient signals.

Keywords: two-phase flow pattern, condensation, steam-condensate, pressure gradient, horizontal pipe.

PENDAHULUAN

Aliran dua fasa adalah bentuk yang paling sederhana dari aliran multifasa. Untuk mendeskripsikan aliran ini biasanya digunakan dua komponen yang memiliki substansi kimia berbeda, seperti aliran uap-air atau aliran udara-air. Hal yang sangat penting untuk dipelajari dari suatu aliran, baik satu fasa maupun dua fasa adalah pola aliran. Pola aliran menjadi poin penting dalam studi kasus aliran dua fasa, misal pada fasa cair-gas. Perilaku campuran antara cair-gas mengandung banyak hubungan yang saling terkait yang diperlukan dalam penyelesaian persamaan konservasi dua fasa (*two-phase conservation equation*), yang ini bergantung pada seberapa jauh identifikasi pola aliran bisa dilakukan. Begitu pula pada kasus aliran air-uap air pada proses kondensasi aliran internal. Aliran dua fasa pada kondensasi mempunyai beberapa karakteristik

yang berbeda dari umumnya aliran dua fasa lainnya. Perpindahan kalor (laju kondensasi) dan hidrodinamika menjadi dua faktor berpasangan yang sangat berpengaruh dan sensitif terhadap pola aliran.

Metode untuk memprediksi jarak atau daerah munculnya pola aliran dua fasa yang umum terjadi pun menjadi sangat penting untuk dikembangkan, dan sering dibutuhkan. Salah satunya dengan menggunakan analisa dan permodelan sistem aliran dua fasa. Pola aliran dan jarak terjadinya tiap-tiap pola aliran sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat fluida, bentuk atau posisi pipa (miring, vertikal, atau horisontal), besar sistem, terjadinya perubahan fasa, dan lain-lain (Ghiaasiaan, 2008).

Penelitian tentang pola aliran kondensasi pada berbagai sudut kemiringan telah dilakukan oleh Wang et al. (1998) dengan menggunakan pipa berdiameter 16 mm dan panjang 1,2 m

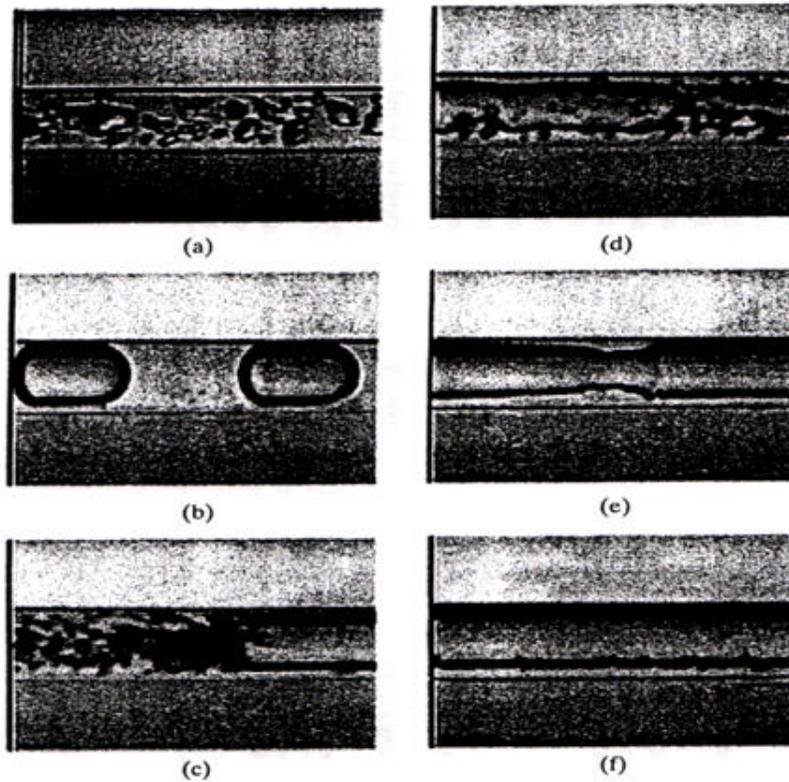
menggunakan fluida kerja *refrigerant* R-11. Hasilnya, ternyata pola aliran yang paling variatif terjadi pada saluran horisontal

Berdasarkan uraian di atas, pengkajian terhadap pola aliran dua fasa masih sangat luas cakupannya. Banyak ilmu yang masih bisa digali untuk menjelaskan fenomena pola aliran dua fasa yang beragam, baik dari sisi geometri, orientasi atau posisi pipa, maupun proses yang terjadi di dalam pipa (*boiling*, kondensasi, campuran cair-gas, dan sebagainya). Untuk itu dalam penelitian ini diambil obyek spesifik identifikasi pola aliran dua fasa air-uap air yang dihasilkan dari proses kondensasi berdasarkan gradien tekanan antara titik *inlet* dan *outlet* pipa kondensat pada pipa horisontal. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangsih ilmu bagi perkembangan pengetahuan dunia keteknikan secara umum, maupun dalam bidang fluida dan energi secara khusus, guna memperluas wacana tentang rekayasa mekanik.

TINJAUAN PUSTAKA

Pola aliran yang umum terjadi pada minichannel, pipa dengan diameter hidrolis $100 \mu\text{m} < D_H < 1 \text{ mm}$, ditunjukkan oleh Gambar 1, menggunakan fotografi dari Triplett, et al. (1999). Pola aliran pokok pada Gambar 1 ini sesuai dengan hasil penelitian sebagian besar peneliti yang lain, seperti Kawaji dan Chung (2004), untuk diameter pipa uji $250 \mu\text{m} < D_H < 526 \text{ mm}$. Walaupun, pada literatur yang lain, beberapa pola aliran diberi nama yang berbeda oleh penulis lain.

Aliran *bubbly* mempunyai karakteristik bentuk gelembung yang berbeda (*nonspherical*), umumnya jauh lebih kecil dari diameter salurannya. Dengan meningkatkan j_G ketika j_L dipertahankan konstan (yaitu untuk memicu peningkatan *void fraction*), aliran yang muncul adalah gelembung yang banyak sehingga muncul aliran *plug/slug*, yang mempunyai karakteristik gelembung silindris yang panjang.



GAMBAR 1. Fotografi pola aliran pada pipa uji berdiameter 1,1 mm: a. *Bubbly* ($j_L = 6 \text{ m/s}; j_G = 0,396 \text{ m/s}$); b. *Plug* ($j_L = 0,213 \text{ m/s}; j_G = 0,154 \text{ m/s}$); c. *Churn* ($j_L = 0,66 \text{ m/s}; j_G = 6,18 \text{ m/s}$); d. *Churn* ($j_L = 1,21 \text{ m/s}; j_G = 4,63 \text{ m/s}$); e. *Slug-annular* ($j_L = 0,043 \text{ m/s}; j_G = 4,040 \text{ m/s}$); f. *Annular* ($j_L = 0,082 \text{ m/s}; j_G = 73,30 \text{ m/s}$).

SUMBER: Triplett et al. (1999)

Pola aliran ini disebut *slug* oleh beberapa peneliti (Suo & Griffith, 1964; Mishima & Hibiki, 1996) dan *plug* oleh peneliti yang lain (Damianides & Westwater, 1988; Barajas & Panton, 1993).

Gambar 1.c dan 1.d menunjukkan pola aliran *churn*. Dalam proses pertama, gelembung yang panjang menjadi tidak stabil karena laju aliran gas ditingkatkan dan ekor (*tail*) gelombang koyak menjadi gelembung yang menyebar (*dispersed bubbles*) (Gambar 1.c). Pola aliran ini disebut sebagai *pseudo-slug* (Suo & Griffith, 1964), *churn* (Mishima & Hibiki, 1996), dan *frothy-slug* (Zhao & Rezkallah, 1993). Proses kedua menunjukkan karakteristik aliran *churn* adalah mengocok gelombang yang secara periodik menyebabkan perubahan pola aliran mejadi pola aliran *wavy-annular* (Gambar 1.d). Pola aliran ini juga disebut sebagai *frothy slug-annular* (Zhao & Rezkallah, 1993). Pada kecepatan *superficial* aliran cairan yang relatif rendah, peningkatan flux volumetrik campuran memicu terjadinya penggabungan gelembung panjang slug dan berkembang menjadi pola aliran *slug-annular* (Gambar 1.e). Pada pola aliran ini bagian panjang dari saluran terbentuk aliran *wavy-annular*, yang disela oleh gelombang dengan amplitudo yang besar pada tempat tertentu (*large-amplitude solitary wave*), yang tidak tumbuh sampai menutupi penampang lintasan aliran. Dengan peningkatan kecepatan *superficial* gas, *large-amplitude solitary wave* hilang dan muncul aliran *annular* yang stabil (Gambar 1.f).

Pola aliran yang diidentifikasi sebagai aliran *churn* oleh Triplett, et al. (1999) (Gambar 1.c. dan Gambar 1.d) muncul bertepatan dengan pola aliran yang diidentifikasi sebagai *dispersed* (menyebarkan) oleh Damianides dan Westwater (1988). Selanjutnya, pola aliran *slug* dan *slug-annular* pada eksperimen Triplett (Gambar 1.e. dan Gambar 1.f) bertepatan dengan aliran *plug* dan *slug* pada eksperimen Damianides dan Westwater (1988). Perbedaan ini adalah hasil dari identifikasi dan penamaan pola aliran yang subyektif dari masing-masing peneliti.

METODE PENELITIAN

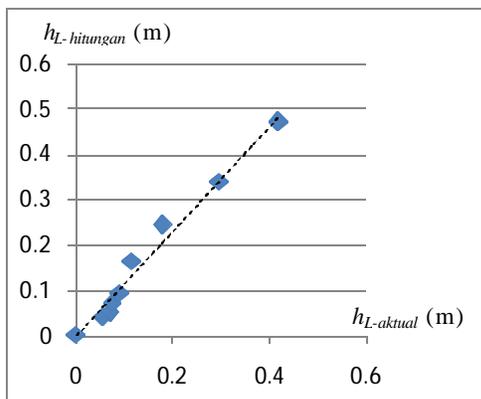
Penelitian ini dilakukan di Laboratorium *Heat and Mass Transfer* Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada (PSIT UGM) Yogyakarta. Bahan penelitian ini adalah aquades, digunakan sebagai bahan penghasil uap air yang akan dikondensasikan untuk membentuk aliran dua fasa pada pipa horisontal yang dipanaskan dengan menggunakan *boiler*, dan air yang digunakan sebagai pendingin pada pipa anulus bagian luar. Alat penelitian (Gambar 2) terdiri atas pipa anulus bagian dalam dari bahan tembaga berdiameter 17 mm dengan panjang 1,6 m, sedangkan pipa anulus bagian luar adalah pipa besi berdiameter 4 inci dengan panjang 1,6 m. Pipa kaca dengan diameter 17 mm dan panjang 1,2 m digunakan untuk mengetahui visualisasi pola aliran dua fasa yang terjadi.



GAMBAR 2. Skema alat uji

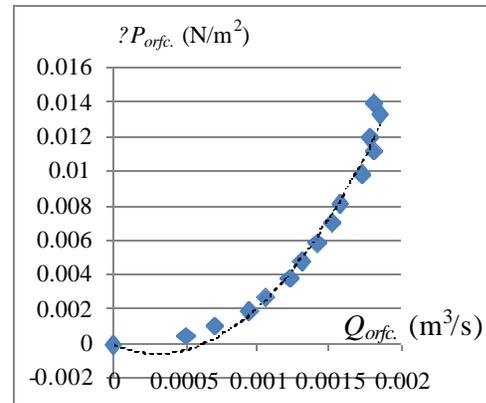
Sensor beda tekanan digunakan untuk mendeteksi gradien tekanan yang terjadi di sepanjang pipa ($L=1,6$ m). Peralatan akuisisi data (*data logger*) digunakan untuk merekam data yang terbaca oleh sensor tekanan. Akuisisi data ini sudah dilengkapi dengan bahasa pemrograman *Delphi 7* dan diatur dengan *sampling rate* 7.353 data/detik.

Validasi *sampling rate* telah dilakukan dengan memberikan *trigger* berasal dari generator yang besarnya telah diketahui kebenarannya kepada peralatan data akuisisi, hasilnya peralatan akuisisi yang digunakan ini valid. Proses kalibrasi terhadap hasil pengukuran beda tekanan oleh data akuisisi dilakukan dengan mengalirkan air ke dalam pipa uji, kemudian dilakukan pengukuran beda tekanan dengan menggunakan peralatan data akuisisi tersebut dan dengan melakukan perhitungan beda tekanan (rug-rugi mayor) akibat adanya aliran air pada pipa tersebut dengan jarak 1,6 m (Gambar 3).



GAMBAR 3. Hubungan antara $h_{L-aktual}$ (m) dan $h_{L-hitungan}$ (m), $h_{L-hitungan} = 1,153 h_{L-aktual} = 1,153 \times 0,265 \times P_{volt}$ (m) dengan tingkat kebenaran 97,8 %.

Kalibrasi debit uap dilakukan dengan menggunakan udara, hal ini dipilih dengan pertimbangan bahwa persentase *error* jika uap dianggap gas ideal (udara) pada tekanan *gauge* keluar uap rata-rata 1,75 atm ($P_{abs} = 2,75$ atm) masih dapat ditoleransi, yaitu sekitar 2,65 %. Dengan menggunakan persamaan umum gas ideal ($P.V = M.R.T$), maka dapat dihitung laju massa waktu yang dibutuhkan tangki untuk mencapai tekanan sebagaimana tekanan pada manometer *orifice* $P.V = M.R.T$ dan $P.V = n \cdot t.R.T$ sehingga $n = (P.V)/(t.R.T)$. Grafik hasil perhitungan ditunjukkan dalam Gambar 4.

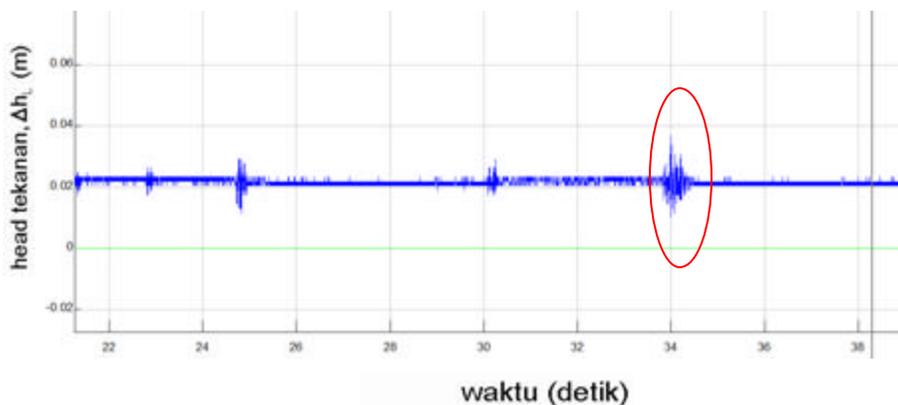


GAMBAR 4. Hubungan antara debit udara orifice ($Q_{orifice}$) dengan beda tekanan orifice ($P_{orifice}$), $P_{orifice} = -2547 Q_{orifice}^2 - 3,367 Q_{orifice}$ tingkat kebenaran 97,5 %.

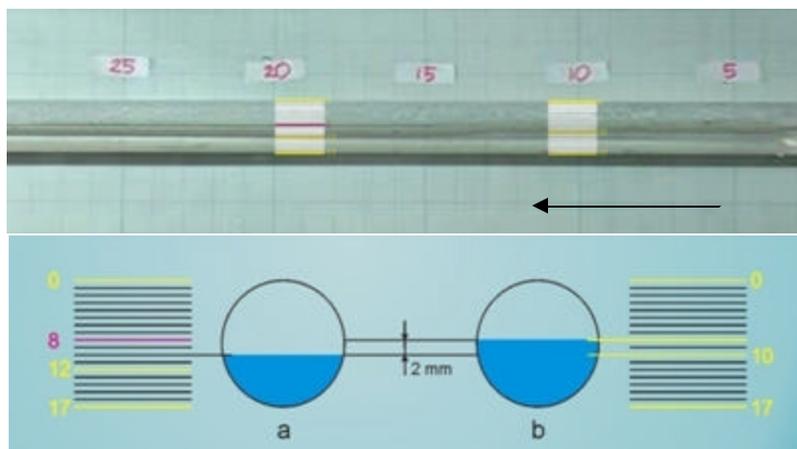
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian terhadap grafik gradien tekanan h_L di sepanjang pipa horizontal aliran dua fasa air-uap air yang dihasilkan dari proses kondensasi disajikan dalam beberapa variasi debit uap. Grafik gradien tekanan yang terekam selama kurang lebih 140 detik dan telah diolah dengan menggunakan perangkat lunak *Sigview*, dipilih beberapa rentang waktunya yang memiliki gradien tekanan mencolok dan kemudian dianalisis dan diinterpretasikan. Hasil dari grafik gradien tekanan tersebut kemudian didukung dengan visualisasi hasil perekaman video yang telah diubah menjadi pecahan-pecahan (*frame-frame*) gambar, sehingga dapat diketahui pola aliran yang terbentuk dan fenomena dominan yang menyebabkan terjadinya gradien tekanan mencolok tersebut. Yang perlu menjadi catatan sebagaimana sudah dijelaskan di depan, bahwa visualisasi yang terjadi pada pipa transparan dan gradien tekanan antara titik *inlet* dan *outlet* adalah hasil kumpulan gejala yang terjadi di sepanjang pipa kondensat. Grafik gradien tekanan yang dikelompokkan berdasarkan variasi debit uap yang masuk ke dalam pipa kondensasi, serta fenomena gradien tekanan dengan beberapa variasi debit uap pada detik-detik tertentu dapat dilihat pada Gambar 5 sampai dengan Gambar 21.

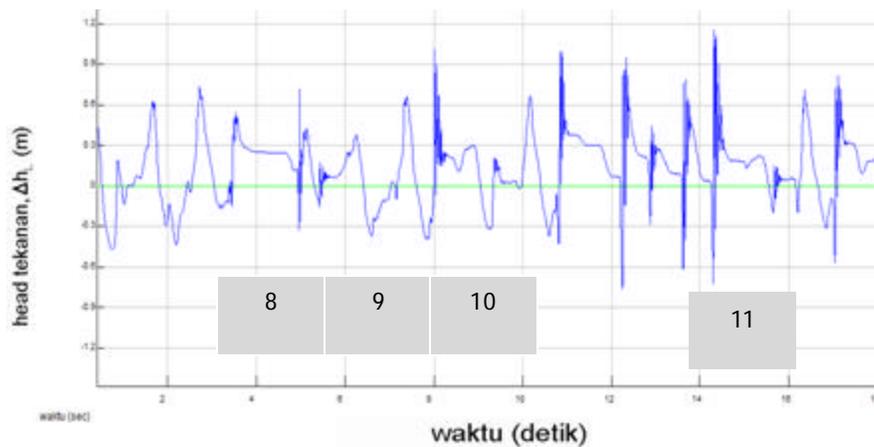
Pada Gambar 5 dan 6 dapat dilihat bahwa fenomena yang terjadi pada detik ke-34 adalah aliran strata licin (*stratified*) dengan gradien tekanan sebesar 26,7 mm yang terjadi disebabkan adanya penambahan kondensat yang terbentuk pada detik tersebut dengan



GAMBAR 5. Gradien tekanan dengan $Q_{uap} = 0,00211361 \text{ m}^3/\text{s}$ detik ke 22-38



GAMBAR 6. Fenomena gradien tekanan dengan $Q_{uap} = 0,00211361 \text{ m}^3/\text{s}$ pada detik ke-34 (*stratified*)



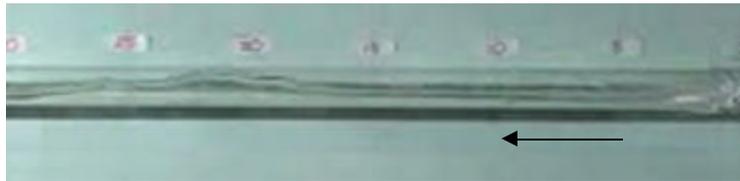
GAMBAR 7. Gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,005456701 \text{ m}^3/\text{s}$ detik ke 0-18



GAMBAR 8. Fenomena gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,005456701 \text{ m}^3/\text{s}$ pada detik ke-2,75 (*pre-slug*)



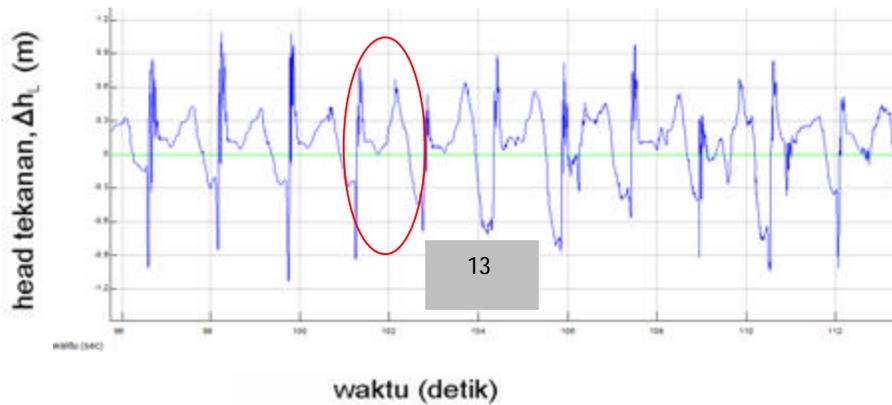
GAMBAR 9. Fenomena gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,005456701 \text{ m}^3/\text{s}$ pada detik ke-4,1 (*pre-slug*)



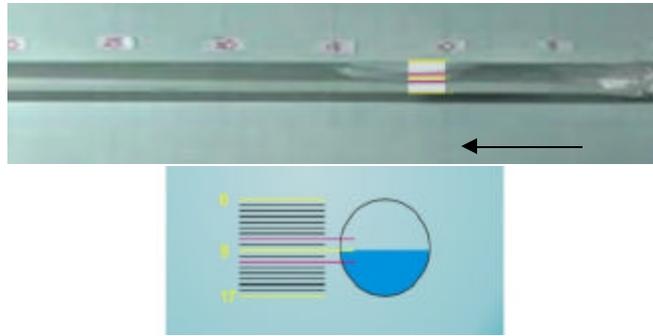
GAMBAR 10. Fenomena gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,005456701 \text{ m}^3/\text{s}$ pada detik ke-6 (*wavy*)



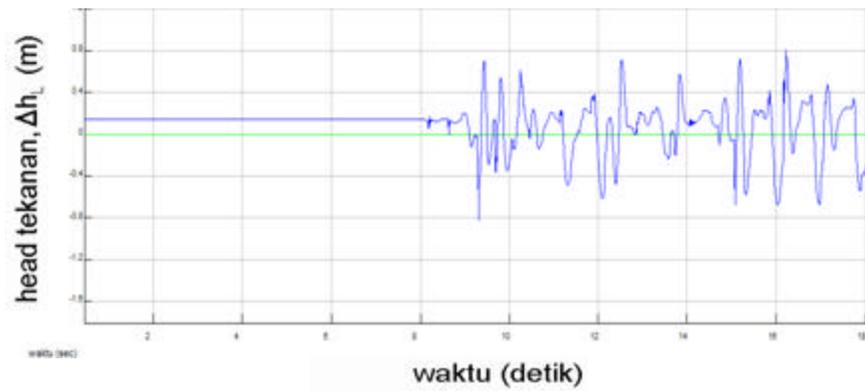
GAMBAR 11. Fenomena gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,005456701 \text{ m}^3/\text{s}$ pada detik ke-13,5 (*pre-slug*)



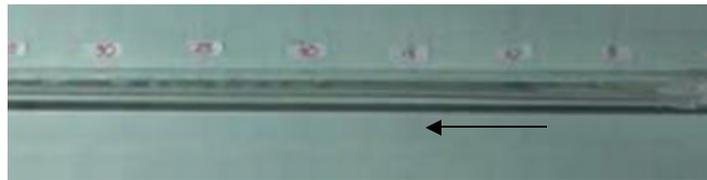
GAMBAR 12. Gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,005456701 \text{ m}^3/\text{s}$ detik ke 96-112



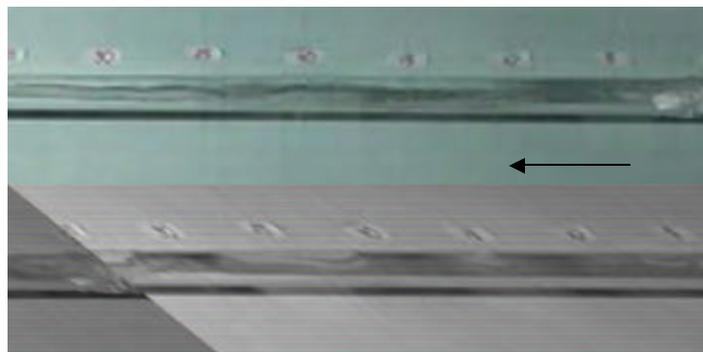
GAMBAR 13. Fenomena gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,005456701 \text{ m}^3/\text{s}$ pada detik ke-102 (*plug*)



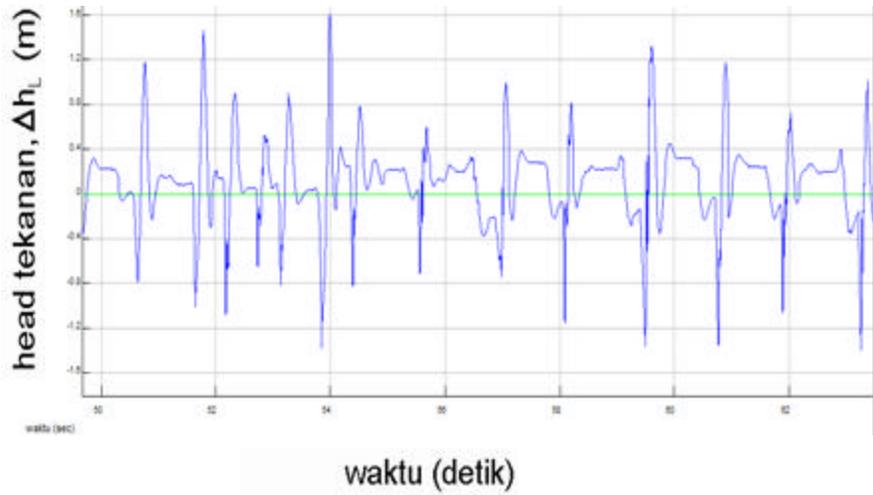
GAMBAR 14. Gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,007078511 \text{ m}^3/\text{s}$, detik ke 0 hingga 18



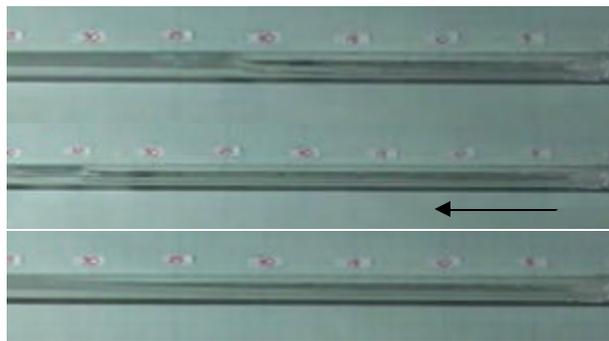
GAMBAR 15. Fenomena gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,007078511 \text{ m}^3/\text{s}$ pada detik ke-4 (*stratified*)



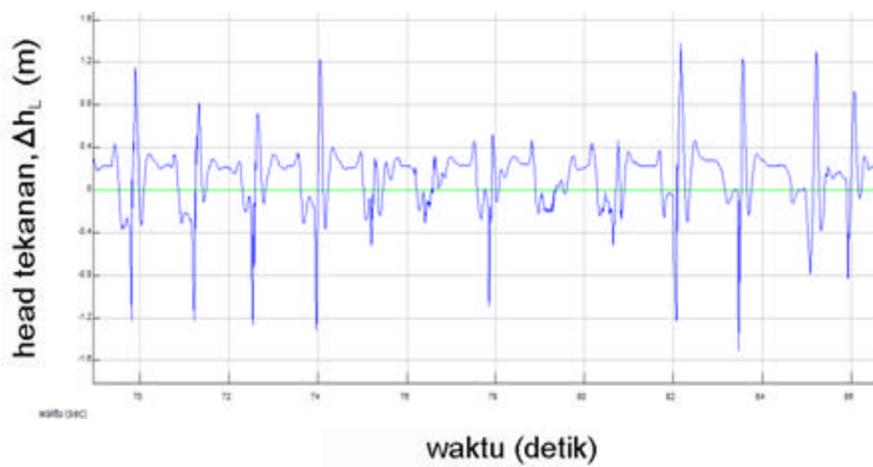
GAMBAR 16. Fenomena gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,007078511 \text{ m}^3/\text{s}$ pada detik ke-9 hingga 10 (*wavy-pre-slug*)



GAMBAR 17. Gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,007078511 \text{ m}^3/\text{s}$ detik ke 50-62



GAMBAR 18. Fenomena gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,007078511 \text{ m}^3/\text{s}$ pada detik ke-52-54 (*long slug*)



GAMBAR 19. Gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,007078511 \text{ m}^3/\text{s}$ detik ke-70 - 86

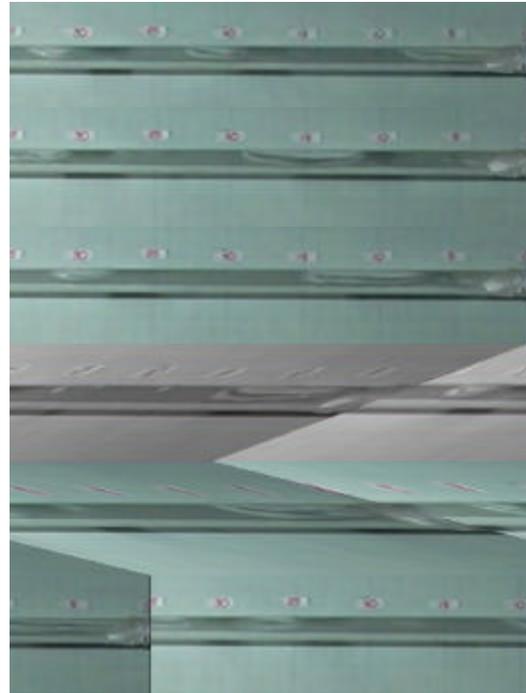


GAMBAR 20. Fenomena gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,007078511 \text{ m}^3/\text{s}$ berturut-turut pada detik ke-70,5; 71,9; 72,4; 72,9; 73,4; 73,9; 74,25; 74,8 (*slug*)

Visualisasi ketebalan lapisan 2 mm pada Gambar 6 dilakukan dengan pertimbangan bahwa visualisasi yang tampak pada fotografi tidak diambil pada kemiringan 0° arah horisontal terhadap arah depan, maka dilakukan kalibrasi pengukuran ketebalan.

Jika Gambar 6 diamati maka tampak ada dua garis permukaan, yaitu sisi depan dan sisi belakang pipa (secara dua dimensi terlihat atas dan bawah). Maka selisih jarak atas dan bawah tersebut dihitung kemudian dibagi dua untuk menambahkan ketinggian kondensat pada pipa.

Dengan melihat Gambar 7 kemudian mencocokkannya dengan visualisasi aliran pada pipa berdiameter $D = 17 \text{ mm}$ pada detik yang sama (Gambar 8 sampai dengan Gambar 11), maka didapatkan analisa bahwa pada detik 0-18 menit grafik gradien tekanan untuk debit uap masuk $0,002985188 \text{ m}^3/\text{s}$ terjadi transisi pola aliran yang variatif, yaitu dari *wavy-plug-slug* atau strata gelombang-kantung uap-sumbat



GAMBAR 21. Fenomena gradien tekanan untuk $Q_{uap} = 0,007078511 \text{ m}^3/\text{s}$ berturut-turut pada detik ke-77,4; 78,4; 78,8; 79,4; 80,0; 80,5 (*slug*)

Dari Gambar 12 dan 13 dapat dilihat bahwa fenomena yang terjadi pada detik ke-102,1 adalah aliran *plug* dengan gradien tekanan sebesar 1,325 m yang disebabkan karena adanya kantung gas yang terjebak (*plug*) dengan panjang 50 mm dan perbandingan luasan uap dibandingkan luasan kondensat sekitar 9:8. Pada rentang waktu grafik gradien tekanan di atas, terjadi aliran balik dengan pola aliran *plug* yang dominan pendek.

Pada Gambar 14 sampai dengan Gambar 16 tampak bahwa grafik gradien tekanan dan visualisasi pada detik-detik awal variasi uap $0,007078511 \text{ m}^3/\text{s}$ menunjukkan fenomena yang sangat kontras. Delapan detik awal adalah aliran strata licin (*stratified*) yang merupakan proses awal menuju terbentuknya *slug*. *Slug* terbentuk karena proses kondensasi terus-menerus yang menghasilkan kondensat, sehingga terjadi perbedaan kecepatan laju aliran masing-masing fluida hingga terbentuklah *slug*.

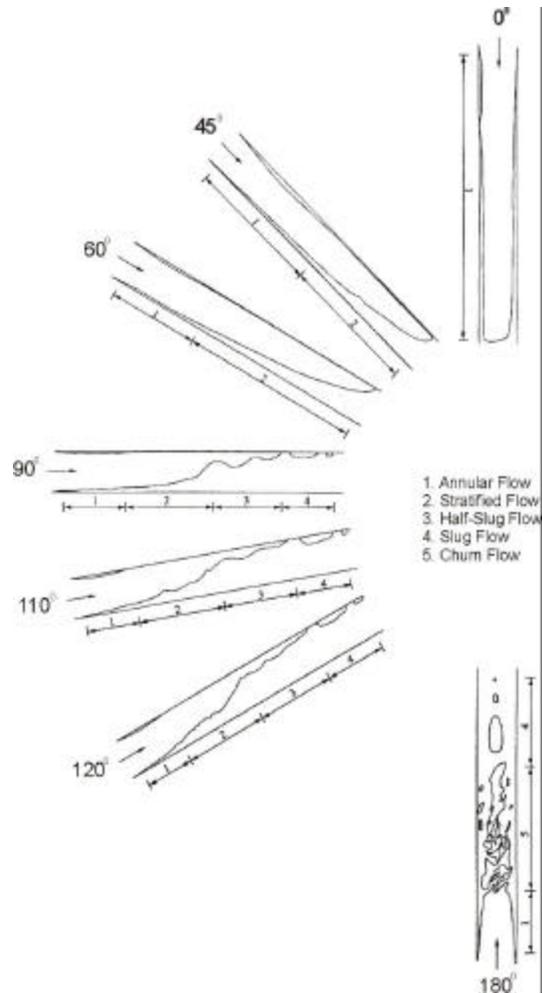
Gambar 17 dan 18 menunjukkan bahwa pada detik ke-52 hingga 54 terjadi fenomena yang cukup unik, karena dalam rentang waktu dua menit tersebut terjadi tiga kali lonjakan gradien tekanan yang tidak terjadi pada detik-detik lainnya. Setelah visualisasi pada detik tersebut

diamati, ternyata pada dua detik tersebut terjadi tiga kali *slug* yang sangat panjang dengan diiringi terjadinya aliran balik. *Slug* yang panjang menunjukkan fenomena di sepanjang pipa pada detik tersebut tidak banyak terbentuk *slug*, tetapi ada *slug* dominan yang mampu mendorong kondensat, sehingga tampak *slug* yang sangat panjang.

Dengan melihat visualisasi pada dua fenomena Gambar 20 dan Gambar 21, perbedaan grafik gradien tekanan yang terjadi pada detik-detik tersebut dapat diketahui. Kedua gambar memang menunjukkan bentuk *slug* yang hampir sama, tetapi waktu terjadinya *slug* yang satu ke yang lain pada masing-masing gambar mempunyai perbedaan. Gambar 20 mempunyai jarak waktu yang lebih panjang dibandingkan Gambar 21. Hal ini disebabkan fenomena aliran yang terjadi pada Gambar 20 adalah aliran balik, sedangkan pada Gambar 21 aliran tertahan. Bentuk *slug* pada ujung titik nol menunjukkan *slug* mampu mendorong kondensat hingga terjadinya aliran balik. Pada detik ke-71-73 fenomena cenderung mirip dengan Gambar 21, yaitu tidak terbentuk *slug* panjang di ujung titik 0. Hal ini menunjukkan sebab terjadinya penurunan gradien tekanan pada detik tersebut dengan membandingkan gradien tekanan pada detik ke 70 dan 74. Aliran tertahan pada detik ke-75-81 ditunjukkan dengan visualisasi Gambar 21 dengan bentuk *slug* yang hampir sama pada posisi yang tidak berjauhan selama tujuh detik tersebut.

Dari hasil penelitian di atas didapatkan berbagai pola aliran yang menarik pada peristiwa kondensasi pipa horisontal. Peningkatan debit uap masuk ke dalam pipa kondensat berpengaruh terhadap pola aliran yang terbentuk di sepanjang pipa kondensat dan peningkatan sinyal gradien tekanan secara umum dengan laju air pendingin (*cooling water*) rata-rata sebesar 9013,57 Watt, dimana $Q = 33$ L/menit, $\dot{m}_{\text{pendingin}} = 0,5489$ kg/s, $\Delta T_{\text{rata-rata}} = 3,925$ K).

Pada penelitian ini didapatkan pola aliran yang terbentuk meliputi *stratified*, *wavy*, *plug*, *pre-slug*, dan *slug*. Pola aliran *wavy* yang teramati terjadi tidak terlalu lama. *Wavy* di sini merupakan tahap peralihan dari pola *stratified* menjadi *slug*. Pada penelitian Wang, et al. (1998) pola aliran ini disebut dengan *half-slug*, seperti ditunjukkan dalam Gambar 22 dan 23.

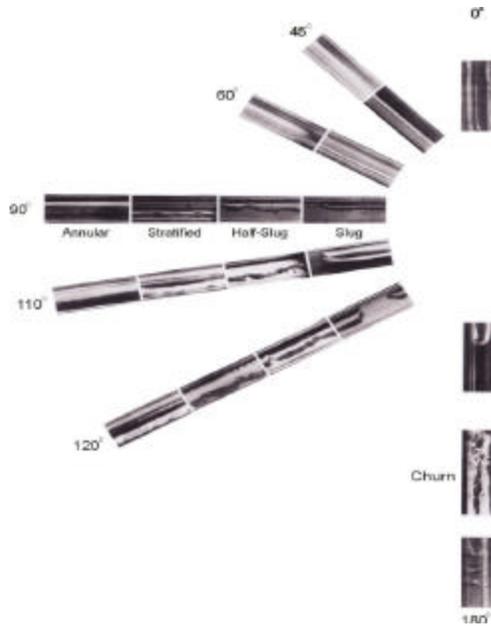


GAMBAR 22. Skema gambar pola aliran kondensasi pada variasi θ

SOURCE Wang, et al. (1998)

Fenomena menarik terjadi pada semua aliran *slug*, yaitu terjadinya fenomena osilasi kondensat (aliran bolak-balik) di sepanjang pipa uji. Sebagai perbandingan, penelitian yang dilakukan oleh Boyer et al. (1994) pada peristiwa kondensasi uap pipa vertikal dengan fluida kerja *refrigerant*, didapatkan fenomena osilasi cairan pada semua kondisi pengujian. Osilasi terjadi tidak teratur dan tidak sinusoidal. Pada pipa vertikal, osilasi ini terjadi karena pengaruh gaya gravitasi dan gerak *upstream* aliran cairan (kondensat).

Berdasarkan pengamatan terhadap visualisasi video, fenomena osilasi yang terjadi pada aliran *slug* di dalam penelitian ini disebabkan banyaknya *slug* yang terbentuk di sepanjang pipa kondensat hingga pipa transparan.



GAMBAR 23. Fotografi pola aliran kondensasi pada variasi f

SOURCE Wang et al. (1998)

Merujuk pada tulisan Kirsner (1999), diketahui bahwa efek *slug* yang banyak dan bergerak cepat dan tertahan-tahan menyebabkan fenomena *waterhammer* yang disebabkan oleh kondensasi, yaitu gejala kenaikan tekanan sesaat pada sistem aliran fluida yang disebabkan oleh pemampatan air dengan gerakan semacam piston yang terbentuk oleh gerakan *plug of water* atau sumbat air. Peristiwa ini disebut juga sebagai peristiwa pecahnya gelembung uap (*plug*) secara cepat (*rapid steam bubble collapse*), tepatnya yaitu ketika kantung uap terjebak secara menyeluruh di dalam kondensat pendinginan lanjut (*subcooled condensate*). Pecahnya gelembung uap ini terjadi karena uap terjebak di dalam gelembung akan memberikan *transfer* kalor ke kondensat di sekelilingnya, sehingga tekanan dan suhu menjadi semakin turun, dan akhirnya pecah.

Gejala yang mirip seperti dijelaskan oleh Kirsner (1999) telah terjadi pada penelitian ini. *Plug* yang terjebak di dalam kondensat bagian ujung belakangnya kacau, karena adanya uap di dalam *plug* yang terkondensasi secara cepat. Visualisasi gambarnya mirip dengan pola aliran churn yang terjadi pada penelitian Wang et al. (1998) dan penelitian pola aliran dua fasa cair-gas pada *minichannel* oleh Triplett, et al. (1999). Gejala uap yang terkondensasi secara

cepat pada penelitian ini mirip seperti tembakan peluru terhadap ujung belakang gelembung atau *plug* [disebut *tail* oleh Triplett et al. (1999)]. Gejala ini terjadi pada variasi debit uap ke-5 dan ke-6, tetapi terlihat jelas pada variasi debit uap ke-6. Jika pola aliran ini digambar manual, akan terlihat seperti pada Gambar 24 dan 25. Pola aliran *bubbly* tidak terlihat pada penelitian ini. Sedangkan pola aliran *annular* kemungkinan besar terbentuk didalam pipa kondensat hanya saja sulit diamati karena pipa kondensat tidak transparan.



GAMBAR 24. Penggambaran gejala uap di dalam plug yang terkondensasi cepat pada pipa horizontal



GAMBAR 25. Gejala uap di dalam plug yang terkondensasi cepat pada pipa horizontal

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang tersebut di atas, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pola aliran yang teridentifikasi pada aliran dua fasa air-uap air (kondensat) dari hasil kondensasi uap pada pipa horisontal ini meliputi pola aliran *stratified*, *wavy*, *plug*, *pre-slug*, dan *slug*.
2. Dari sinyal grafik gradien tekanan berdasarkan variasi debit uap yang masuk diketahui bahwa semakin tinggi debit uap masuk dengan laju air pendingin (*cooling water*) yang dianggap tetap, sinyal gradien tekanan di sepanjang pipa kondensat juga semakin meningkat secara umum.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih dan penghargaan penulis sampaikan kepada 1). Wildan Salim dan Faris

yang telah banyak berkontribusi dalam pengambilan data, 2). Kepala Laboratorium *Heat and Mass Transfer* Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada (PSIT UGM) Yogyakarta yang telah mengizinkan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Boyer, B. D., Robinson, G. E. & Hughes, T. G. (1994). Experimental investigation of flow regimes and oscillatory phenomena of condensing steam in a single vertical annular passage *International Journal of Multiphase Flow* 21(1), pp.61-74.
- Barajas A M and Panton R L. (1993) *Int. J. Multiph. Flow*, pp. 19-337
- Damianides, C.A. and Westwater J.W. (1988). *Proc. 2nd UK Natl Conf. on Heat Transfer*, pp. 1257-68
- Ghiaasiaan, S.M. (2008). *Two-phase Flow, Boiling, and Condensation in Conventional and Miniatur System*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kawaji, M., and Chung, P.M.Y. (2004). "Adiabatic Gas-Liquid Flow in Microchannels," *Microscale Thermophysical Engineering*, Vol. 8, pp. 239-257.
- Kirsner, W. (1999). Condensation induced water hammer. *Heating/Piping/ Air Conditioning Magazine*, pp. 112-122. Retrieved from www.kirsner.org/kce/media/pdfs/KirsnerHammer.pdf.
- Mishima K., Hibiki T. (1996). Quantitative method to measure void fraction of two-phase flow using electronic imaging with neutrons. *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 124, pp.327-338.
- Suo M and Griffith P. (1964). *J. Basic Eng.*, pp. 86-576
- Triplett, K.A., Ghiaasiaan, S. M., Abdel-Khalik, S. I., and Sadowski, D. L. (1999). "Gas-Liquid Two-Phase Flow in Microchannels – Part I: Two-Phase Flow Pattern," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, pp. 377-394.
- Wang, W. C., Ma, X. H., Wei, Z. D. & Yu, P. (1998). Two-phase flow patterns and transition characteristics for in-tube condensation with different surface inclinations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(24), 4341-4349.
- Zhao L, Rezkallah KS. (1993). Gas-liquid flow patterns at micro-gravity conditions. *Int J Multiphase Flow*, pp. 19:751-63

PENULIS:

Sukamta✉

Mahasiswa Program Doktor Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia.

Indarto

Promotor Program Doktor Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

Purnomo, Tri Agung Rohmat

Co-Promotor Program Doktor Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

Konversi Energi, Thermofluid Program Studi Teknik Mesin dan Laboratorium *Heat and Mass Transfer* Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada (PSIT UGM), Yogyakarta, Indonesia.

✉Email: msukamta@yahoo.com

Diskusi untuk makalah ini dibuka hingga tanggal 1 April 2010 dan akan diterbitkan dalam jurnal edisi Mei 2010.