

Studi Visualisasi terhadap Fenomena *Flooding* Air-udara pada Pipa Kompleks

Apip Badarudin^{2,5,a*}, Indarto^{1,b}, Deendarlianto^{1,c}, Hermawan^{1,d}, Aji Saka^{3,e},
M. Fikri Haykal Syarif^{4,f}, Aditya Wicaksono^{4,g}

¹Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia.

²Program Studi S3 Ilmu Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia.

³Program Studi S2 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia.

⁴Program Studi S1 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia.

⁵Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Jalan Gegerkalong Hilir Ciwaruga, Bandung, Indonesia

email: apipbdr@gmail.com, indarto@ugm.ac.id, deendarlianto@ugm.ac.id, hermawan_jtmi@ugm.ac.id, saka_aji@ymail.com, m.fikri.haykal.s@gmail.com, physicadit@gmail.com

Abstrak

Pada penelitian ini dilakukan studi visualisasi menggunakan pipa kompleks yang merupakan simulasi pipa *hot-leg* pada reaktor nuklir dengan perbandingan 1: 30. Pipa kompleks tersebut terdiri pipa horizontal, belokan dan pipa miring dengan sudut kemiringan 50° dari horizontal dengan diameter dalam 25,4 mm. Sebagian besar seksi uji dibuat dari bahan transparan sehingga pengamatan fenomena *flooding* dapat dilakukan dengan mudah, baik secara visual maupun saat proses perekaman video. Pada saat yang sama, dilakukan pengukuran terhadap debit cairan keluar dari seksi uji guna menentukan *onset of flooding* dan *zero penetration*. Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa fenomena *flooding* dapat diamati. Pada laju aliran massa air yang rendah (aliran massa udara tetap) lompatan hidraulik terjadi agak jauh dari belokan, sedangkan dengan penambahan laju aliran massa air menunjukkan lompatan hidraulik mendekati belokan bagian *hot-leg*. Sedangkan untuk laju aliran massa air yang sama dengan meningkatnya laju aliran massa udara lompatan hidraulik semakin mendekati belokan. Posisi terjadinya *slug* tergantung laju aliran air dimana semakin meningkatnya laju aliran air maka *slug* yang terjadi semakin menjauhi belokan. Sedangkan terjadinya *zero-liquid penetration* tidak tergantung oleh laju aliran air. Pada eksperimen ini didapatkan korelasi Wallis dengan nilai m adalah 1,3137 dan C adalah 0,489.

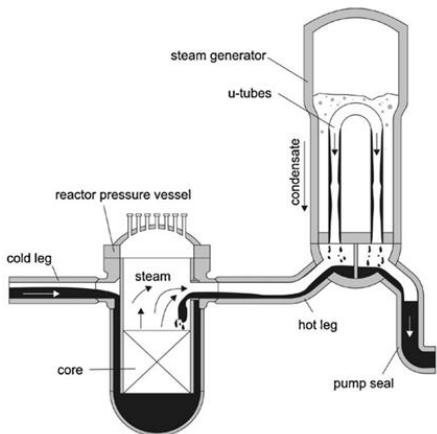
Kata kunci : *Flooding*, *Counter-current flow*, *Hot-leg*, Wallis Parameter

Latar belakang

Fenomena *flooding* aliran berlawanan sudah banyak diteliti namun kebanyakan berfokus pada pipa vertikal, pipa horizontal dan pipa miring. Sebagian kecil dari peneliti melakukan pengamatan pada geometri pipa seperti vertikal-horizontal, vertikal-miring yang dilengkapi belokan dengan berbagai sudut serta pipa horizontal-miring.

Geometri pipa horizontal yang disambungkan dengan belokan dan pipa miring merupakan tiruan dari pipa *hot-leg* yang menghubungkan *reactor*

pressure vessel (RPV) dan *steam generator* (SG) pada *pressurized water reactor* (PWR) seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Dengan alasan faktor keselamatan reaktor, *flooding* pada pipa *hot-leg* tetap diteliti untuk menyempurnakan desain reaktor tersebut.

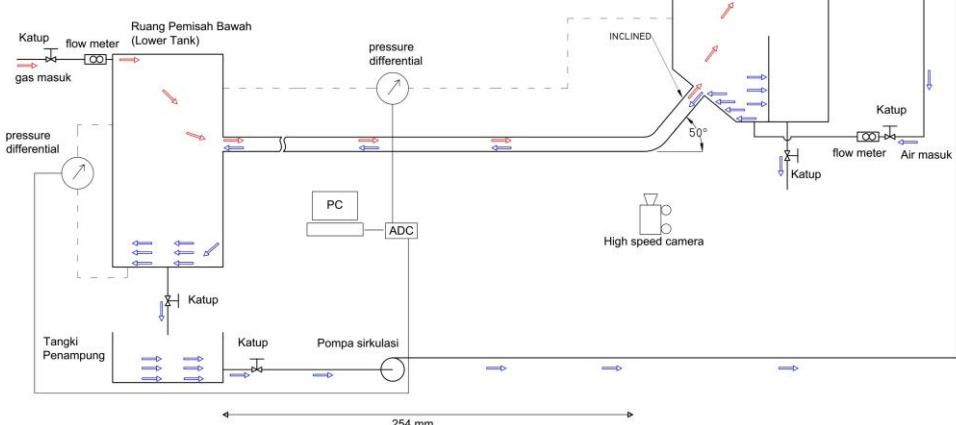


Gambar 1 Konfigurasi pemipaan PWR Konvoi German, Seidel dkk [1]

Pada penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap fenomena *flooding* pada pipa *hot-leg* dengan ukuran yang lebih kecil. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi secara visual *onset of flooding* dan *zero penetration* pada geometri tersebut. Proses identifikasi tersebut mengadopsi cara yang sudah dilakukan oleh Zabaras dkk [2] dan Deendarlianto [3].

Metodologi

Seksi uji pipa kompleks pada penelitian ini terdiri dari pipa horizontal transparan panjang 240 mm, belokan dan pipa miring (50°). Diameter dalam dari seksi uji ini 25,4 mm.



Gambar 2. Diagram skematis alat uji

Pengamatan data fenomena *flooding* dalam pipa kompleks meliputi aliran *stratified*, *onset flooding* dan *zero penetration*.

Air dipompa menuju tangki penampung selanjut dialirkan melalui rotameter menuju *upper tank* (simulator generator uap, SG). Setelah mencapai ketinggian tertentu air akan mengalir melewati seksi uji menuju *lower tank* (simulator bejana reaktor bertekanan, RPV).

Pada saat bersamaan udara diinjeksikan ke dalam *lower tank* dan mengalir berlawanan arah dengan arah aliran air melalui seksi uji menuju *upper tank*.

Pengamatan *onset of flooding* diperoleh dari variasi ketinggian air keluar yang diukur dalam *lower tank* dengan peningkatan laju aliran udara bertahap terhadap laju aliran air konstan. Metode ini telah digunakan dalam penelitian sebelumnya oleh Deendarlianto dkk [4]. Terjadinya *onset of flooding* didefinisikan sebagai titik batas ketebalan aliran berlawanan arah oleh laju aliran udara maksimum dimana laju aliran air yang keluar sama dengan laju aliran air yang masuk.

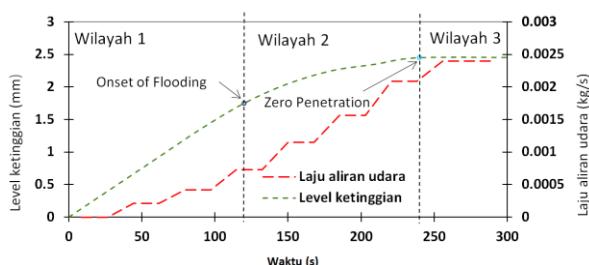
Kondisi *zero-liquid penetration* didapatkan saat laju aliran air yang masuk dipertahankan konstan dan secara bertahap laju aliran udara dinaikkan sampai tidak ada air yang keluar menuju tangki bawah.

Pengamatan dilakukan secara visual dan menggunakan kamera video berkecepatan tinggi.

Hasil rekaman video diputar dengan kecepatan rendah agar dapat dilakukan klasifikasi dan identifikasi aliran *stratified*, *onset flooding* dan *zero penetration* serta fenomena pendukung lainnya. Hasil pengolahan data ditampilkan dalam bentuk grafik menggunakan parameter Wallis.

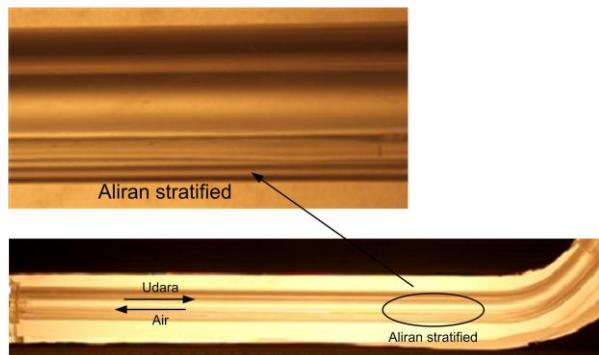
Hasil

Gambar 3 merupakan hasil eksperimen yang menunjukkan level ketinggian cairan yang bertambah secara konstan pada *lower tank* untuk input dengan laju aliran massa air 0,006 kg/detik. Hal tersebut menandakan semua air mengalir sepenuhnya dari *upper tank* ke *lower tank*. Pada kurva tersebut terlihat masih berada pada wilayah 1. Kondisi ini terjadi pada rentang laju aliran udara yang rendah. Pada kondisi ini terbentuk pola aliran *stratified* berlawanan arah [5,6] seperti terlihat seperti pada Gambar 4.



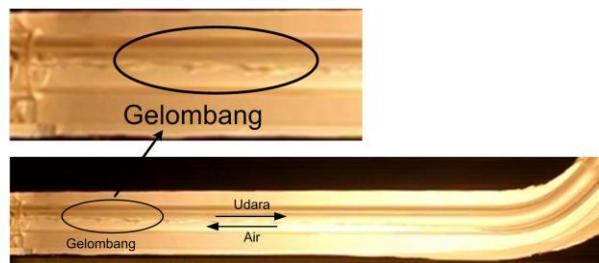
Gambar 3 Variasi level ketinggian air dan laju aliran massa udara pada laju aliran massa air 0,006 kg/s

Gambar 4 menunjukkan aliran air yang membentuk lapisan sangat tipis pada bagian miring dan *elbow*. Air dari *upper tank* mengalir dipercepat pada bagian tersebut oleh gaya gravitasi. Air melambat pada bagian horizontal dan mulai terjadi penebalan lapisan dengan aliran superkritis. Selanjutnya eksperimen dilakukan dengan menaikkan laju aliran udara dari 0,0004 kg/s menjadi 0,0007 kg/s (Gambar 3: t = 120 detik). Pada grafik tersebut menunjukkan kurva level ketinggian mulai mengalami perubahan yaitu lebih landai dari sebelumnya. Hal ini menunjukkan ada sebagian air yang melewati dari *upper tank* tidak mengalir ke *lower tank*. Keadaan ini disebut sebagai kondisi *onset of flooding*. Dengan kenaikan laju aliran secara bertahap, selanjutnya wilayah 2 ini disebut sebagai wilayah pengiriman parsial (*partial delivery region*).

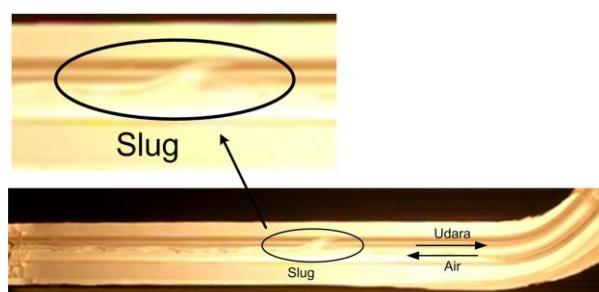


Gambar 4 Aliran *stratified* ($\dot{m}_{\text{air}} = 0,006 \text{ kg/s}$ dan $\dot{m}_{\text{udara}} = 0,0004 \text{ kg/s}$; $t = 65 \text{ detik}$)

Pengamatan visual menunjukkan pada kondisi ini batas antar-muka sudah mulai tidak stabil, timbul gelombang seperti pada Gambar 5. Dengan meningkatnya laju aliran massa udara maka gelombang yang terbentuk semakin besar, akibatnya ruang aliran untuk udara semakin berkurang. Pada akhirnya gelombang menyentuh dinding atas bagian dalam pipa kemudian ter dorong oleh udara sehingga terjadilah aliran *slug* seperti pada Gambar 6.



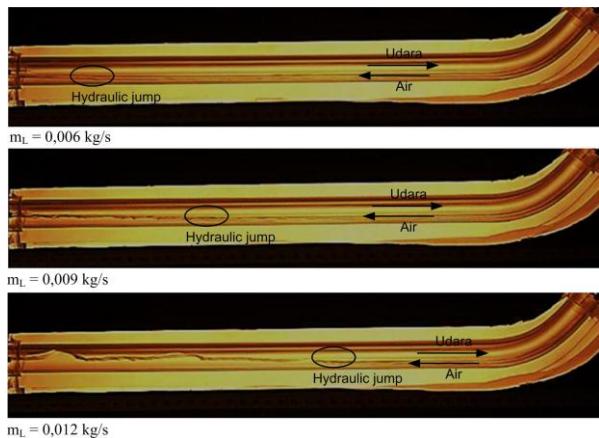
Gambar 5 Aliran bergelombang $\dot{m}_{\text{air}} = 0,0015 \text{ kg/s}$; $t = 165 \text{ detik}$



Gambar 6 Aliran bergelombang $\dot{m}_{\text{air}} = 0,0015 \text{ kg/s}$; $t = 178 \text{ detik}$

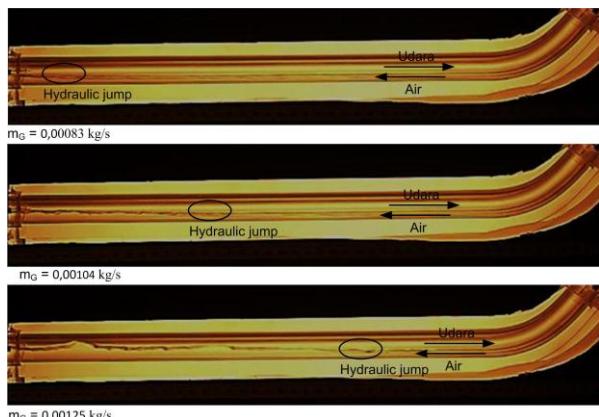
Sebelum terjadinya *flooding*, teramati pola aliran *stratified* terbentuk di seluruh bagian pipa panas (*hot-leg*). Pada laju aliran massa air yang rendah (aliran massa udara tetap $\dot{m}_G = 0,0008 \text{ kg/detik}$) menunjukkan lompatan hidraulik terjadi agak jauh dari belokan, sedangkan dengan penambahan laju aliran massa air menunjukkan lompatan hidraulik mendekati belokan bagian *hot-*

leg. Fenomena ini ditampilkan pada Gambar 7. Pada laju aliran massa air yang tinggi, *slug* mudah terbentuk meskipun pada laju aliran massa udara yang rendah.



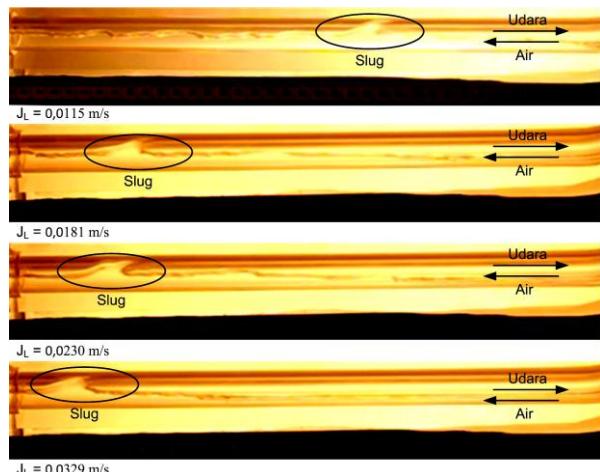
Gambar 7 Posisi *Hidraulic jump* ($\dot{m}_G = 0,0008$ kg/detik)

Pada laju aliran massa air yang sama ($\dot{m}_G = 0,009$ kg/detik) dengan meningkatnya laju aliran massa udara terlihat lompatan hidraulik semakin mendekati belokan dari *hot-leg* seperti yang terlihat pada Gambar 8.

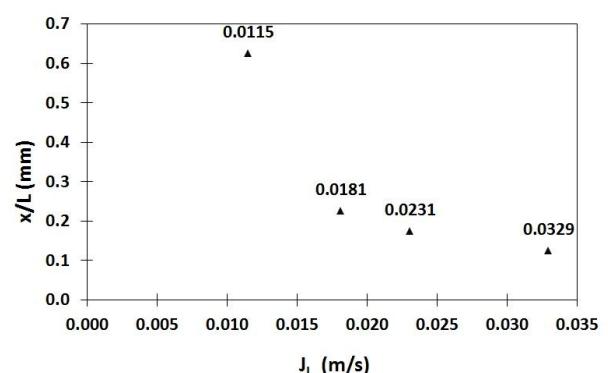


Gambar 8 Posisi *Hidraulic jump* ($\dot{m}_L = 0,009$ kg/detik)

Gelombang besar yang tidak stabil akan berkembang sampai menyentuh batas atas bagian dalam pipa sehingga terbentuk *slug*. Posisi terjadinya *slug* pada bagian horizontal *hot-leg* tergantung pada laju aliran air seperti pada Gambar 9.

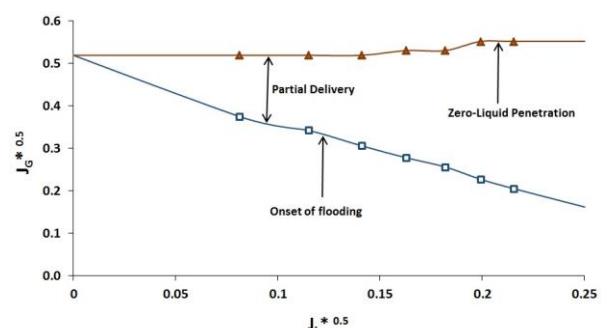


Gambar 9 Visualisasi *Slug* terhadap laju aliran air



Gambar 10 Kurva posisi *Slug* terhadap laju aliran air

Gambar 10 menunjukkan bahwa untuk laju aliran udara tetap dengan peningkatan laju aliran air maka *slug* yang terbentuk akan menjauhi *inlet* air.



Gambar 11 Kurva *zero-liquid penetration* untuk setiap laju aliran air

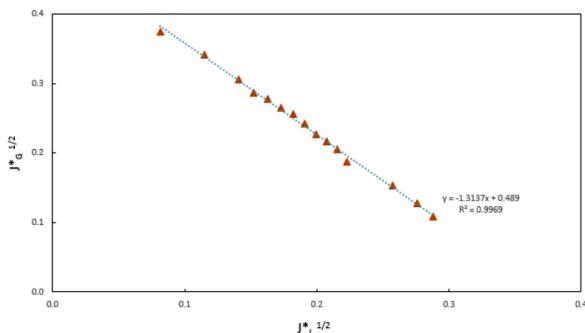
Dengan peningkatan lebih lanjut pada laju aliran massa udara yang tinggi, laju aliran air yang mengalir ke *lower tank* terhalang sepenuhnya dan mengalami pembalikan arah. Hal ini disebut *zero-liquid penetration*. Terjadinya *zero-liquid penetration* tidak tergantung oleh laju aliran air, pengamatan ini sama dengan yang dilakukan Kang dkk [7]. Gambar 11 menunjukkan batas *zero-liquid penetration* untuk setiap laju aliran air yang berbeda. Secara umum perilaku aliran pada

simulasi *hot-leg* untuk pembatasan aliran berlawanan arah mirip dengan beberapa penelitian sebelumnya, Wongwises [6], dan Deendarlianto dkk. [4].

Formulasi yang paling sering digunakan untuk korelasi *flooding* diberikan oleh Wallis (1961) dengan persamaan sebagai berikut:

$$(J_G^*)^{0.5} + m(J_L^*)^{0.5} = C \quad (1)$$

dimana J_G^* dan J_L^* adalah kecepatan superficial untuk masing-masing fase gas dan fase cair yang tak berdimensi. Sedangkan m dan C ditentukan dari hasil eksperimen. Persamaan (1) didapatkan dari studi permukaan gelombang dalam pipa vertikal, dimana terjadinya gelombang dikaitkan dengan terjadinya ketidakstabilan yang disebabkan oleh *flooding*. Pada eksperimen ini didapatkan nilai m adalah 1,3137 dan nilai C adalah 0,489.



Gambar 12 Korelasi Data CCFL

Kesimpulan

Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa fenomena *flooding* dapat diamati dan dapat diidentifikasi menggunakan gabungan pengamatan visual dan pengukuran debit cairan yang keluar dari seksi uji.

Pada laju aliran massa air yang rendah (aliran massa udara tetap) lompatan hidraulik terjadi agak jauh dari belokan, sedangkan dengan kenaikan laju aliran massa air menunjukkan lompatan hidraulik mendekati belokan bagian *hot-leg*. Sedangkan untuk laju aliran massa air yang sama dengan meningkatnya laju aliran massa udara lompatan hidraulik semakin mendekati belokan dari *hot-leg*.

Posisi terjadinya *slug* tergantung laju aliran air dimana semakin meningkatnya laju aliran air maka *slug* yang terjadi semakin menjauhi belokan. Sedangkan terjadinya *zero-liquid penetration* tidak tergantung oleh laju aliran air. Dari hasil eksperimen didapatkan korelasi empiris dengan nilai m adalah 1,3137 dan C adalah 0,489.

Referensi

- [1] Seidel, T., Vallée, C., Lucas, D., Beyer, M., Deendarlianto, Two-Phase Flow Experiments in a Model of the Hot Leg of a Pressurised Water Reactor, Wissenschaftlich-Technische Berichte/Forschungszentrum Dresden-Rossendorf; FZD-531 (2010).
- [2] G. J. Zabaras, A. E. Dukler, Counter-current gas-liquid annular flow, including the flooding state, AIChE J. 34 (1988) 389–396.
- [3] Deendarlianto, A. Ousaka, A. Kariyasaki, T. Fukano, Investigation of liquid film behavior at the onset of flooding during adiabatic countercurrent air-water two phase flow in an inclined pipe, Nuclear Engineering and Design. 235 (2005) 2281–2294.
- [4] Deendarlianto, Vallée, C., Lucas, D., Beyer, M., Pietruske, H., Carl, H., Experimental Study on the Air/water Counter-current Flow Limitation in a Model of the Hot Leg of a Pressurized Water Reactor. Nuclear Engineering and Design (2008) 238 (12), 3389-3402.
- [5] G. B. Wallis, Flooding Velocities for Air and Water in Vertical Tubes, AEWR123, UKAEA, Harwell, England, 1961.
- [6] S. Wongwises, Two-phase countercurrent flow in a model of a pressurized water reactor hot leg, Nuclear Engineering and Design. 166 (1996) 121-133.
- [7] S. K. Kang, I. C. Chu, H. C. No, M. H. Chun, Air-water countercurrent flow limitation in a horizontal pipe connected to an inclined riser, Journal of the Korean Nuclear Society. 31 (1999) 548–560.