

Observasi Pola Aliran Dua Fase Air-udara Berlawanan Arah pada Pipa Kompleks

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

¹Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

²Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 55281

³Program Studi S3, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 55281

⁴Program Studi S2, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 55281

⁵Program Studi S1, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 55281

^aapipbdr@gmail.com, ^bindarto@ugm.ac.id, ^cdeendarlianto@ugm.ac.id, ^dhermawan_jtmi@ugm.ac.id, ^esaka_aji@ymail.com,
^fm.fikri.haykal.s@gmail.com, ^gphysicadit@gmail.com

ABSTRAK

Pada penelitian ini dilakukan studi pola aliran di dalam pipa kompleks yang merupakan simulasi pipa *hot-leg* pada reaktor nuklir. Pengamatan pola aliran pada pipa *hot-leg* ini dilakukan di daerah *Stable Counter-current Flow* dan *Partial Delivery* yang meliputi kondisi *onset of flooding* sampai *zero-liquid penetration* yang dikenal sebagai kondisi *counter-current flow limitation* (CCFL). Pengamatan dilakukan dengan merekam menggunakan kamera video berkecepatan tinggi dan memutar pada kecepatan rendah agar dapat dilakukan klasifikasi dan identifikasi aliran. Pada penelitian ini terlihat bahwa pasangan J_L dan J_G tertentu memberikan kondisi pola aliran yang disimpulkan bahwa untuk kecepatan *superficial* udara yang kecil ($J_G < 0.99$ m/s), baik pada pipa horizontal, pipa belokan dan pipa miring akan terjadi pola *stratified flow*. Dengan menambah kecepatan *superficial* udara maka akan terbentuk pola *wavy flow*. Untuk kecepatan *superficial* udara yang besar ($J_G > 2.64$ m/s), baik pada pipa horizontal, pipa belokan dan pipa miring akan terjadi pola *slug flow*. Bila kecepatan *superficial* cairan diperbesar, maka pola *wavy flow* dan *slug flow* semakin mudah terjadi. Geometri pipa *hot-leg* pada penelitian ini mempunyai L/D yang lebih besar daripada geometri dalam eksperimen Minami [5] sehingga lebih mudah terbentuk *wavy flow* dan *slug flow*.

Kata Kunci

Counter-current flow, Hot-leg, Stratified flow, Wavy flow, Slug flow

1. PENDAHULUAN

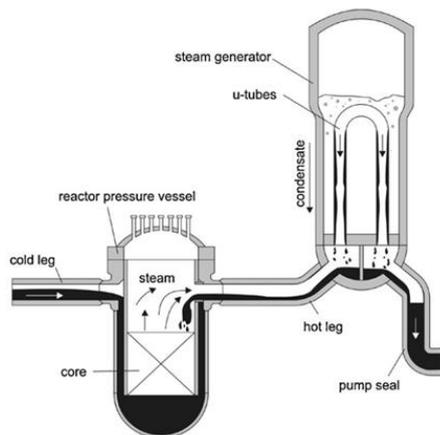
Pembangkit listrik tenaga nuklir yang menggunakan *pressurized water reactor* (PWR), mempunyai sistem pemipaan primer dengan konfigurasi tertentu sesuai desainnya. Salah satu bagian pemipaan tersebut ada yang disebut *hot-leg*. Pipa *hot-leg* menghubungkan *reactor pressure vessel* (RPV) dan *steam generator* (SG) pada PWR seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Geometri pipa *hot-leg* termasuk dalam pipa kompleks yang merupakan kombinasi sambungan pipa vertikal, pipa horizontal, pipa miring dan belokan.

Dalam skenario *loss-of-coolant-accident* (LOCA), terdapat kebocoran pada pemipaan primer, sehingga tekanan akan mengalami penurunan (*depressurized*). Hal ini akan memudahkan timbulnya proses penguapan cairan di pemipaan primer. Uap yang dihasilkan akan mengalir ke SG melalui pipa *hot-leg*. Ketika sampai di SG (di

dalam pipa primer), uap akan mengembun dan kondensat yang dihasilkan akan mengalir kembali melalui pipa *hot-leg* menuju RPV, sehingga di dalam pipa *hot-leg* terjadi aliran berlawanan arah (*counter-current*) antara uap dan air. Air yang kembali ke dalam RPV akan mendinginkan inti reaktor. Dalam beberapa skenario, keberhasilan pendinginan inti reaktor tersebut tergantung pada perilaku aliran berlawanan arah ini.

Aliran berlawanan arah antara uap dan kondensat hanya stabil pada jangkauan laju aliran massa dari uap dan air dalam jumlah tertentu. Untuk laju aliran kondensat yang diberikan, jika laju aliran massa uap dinaikkan pada nilai tertentu, sebagian dari kondensat akan menunjukkan pembalikan aliran dan akan tertahan oleh uap dengan arah aliran berlawanan sehingga menuju SG. Fenomena ini dikenal sebagai *Counter-current Flow Limitation* (CCFL). Pada situasi ini pendinginan inti reaktor tidak terjadi.

Pola aliran dua fase air-udara berlawanan arah yang berhubungan dengan fenomena CCFL sudah banyak diteliti, namun kebanyakan berfokus pada pipa vertikal, pipa horizontal dan pipa miring. Sebagian kecil dari peneliti melakukan pengamatan pada berbagai geometri pipa seperti vertikal-horizontal, horizontal-miring yang dilengkapi belokan dengan berbagai sudut kemiringan. Dengan alasan faktor keselamatan pada reaktor nuklir, maka pola aliran dua fase air-udara berlawanan arah pada pipa *hot-leg* tetap diteliti untuk menyempurnakan desain reaktor tersebut serta untuk melengkapi database CCFL.



Gambar 1: Konfigurasi pemipaan PWR Konvoi German [1].

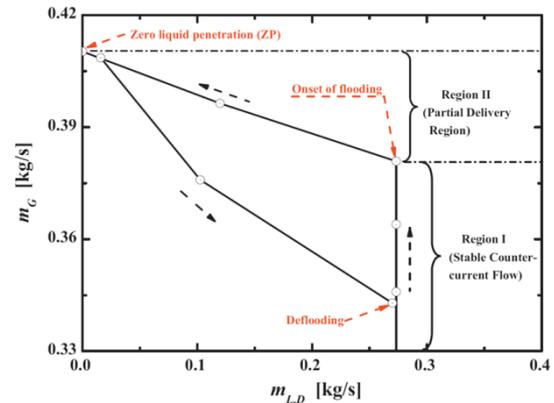
Pada penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap pola aliran dua fase air-udara berlawanan arah dalam pipa kompleks. Pola aliran tersebut didapatkan dengan mengamati kondisi *counter-current flow limitation* (CCFL) pada pipa *hot-leg* dengan ukuran 1/30 dari konfigurasi pemipaan PWR Konvoi German [1]. Simulasi pipa *hot-leg* tersebut merupakan pipa kompleks yang 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 pola aliran dapat dilakukan dengan mudah, baik secara visual maupun saat proses perekaman video. Seksi uji pipa kompleks pada penelitian ini menggunakan pipa horizontal transparan panjang 240 mm.

Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi secara visual pola aliran dua fase air-udara berlawanan arah dalam pipa kompleks. Proses identifikasi mengacu pada definisi CCFL yang sudah dikemukakan oleh Celata [2] dan Deendarlianto [3].

2. METODOLOGI

2.1 Seksi Uji

Pengamatan pola aliran pada pipa *hot-leg* ini dilakukan pada daerah *Stable Counter-current Flow* dan *Partial Delivery* yang meliputi kondisi *onset of flooding* sampai *zero-liquid penetration* seperti terlihat pada Gambar 2. Keseluruhan kondisi tersebut disebut CCFL.



Gambar 2: Terminologi aliran 2 fase gas-cairan berlawanan arah pada model *hot-leg* PWR [2]

Simulasi pada pipa kompleks ini dilakukan dengan memompa air 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*.

2.2 Pengukuran Tinggi Level Air

Pengukuran tinggi level air di dalam *lower tank* digunakan untuk mengamati kondisi *onset of flooding* sampai *zero-liquid penetration*. Data diperoleh dari variasi ketinggian air keluar yang diukur dalam *lower tank* dengan peningkatan laju aliran udara bertahap terhadap laju aliran air konstan. Metode yang sama telah digunakan dalam penelitian sebelumnya oleh Deendarlianto dkk [4]. Terjadinya *onset of flooding* didefinisikan sebagai titik batas kestabilan 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.

2.3 Pengamatan Visual

Pengamatan dilakukan dengan cara merekam menggunakan kamera video berkecepatan tinggi. Hasil rekaman video diputar dengan kecepatan rendah agar dapat dilakukan klasifikasi dan identifikasi aliran.

3. HASIL DAN PEMBASAN

Secara umum dari hasil pengamatan ditemukan pola *stratified flow*, *wavy flow* dan *slug flow*. Selanjutnya pengamatan dikelompokkan pada seksi uji pipa horizontal, pipa miring dan belokan.

3.1 Pola Aliran pada Pipa Horizontal

Gambar 3 memperlihatkan kondisi aliran pada pipa horizontal. Untuk kecepatan aliran cairan sebesar $J_L=0.012$ m/s dan aliran gas cukup kecil ($J_G=0.66$ m/s) akan terbentuk pola *stratified flow* seperti pada Gambar 3a. Dengan menambah kecepatan aliran gas ($J_G=2.31$ m/s) pola aliran di dalam pipa horizontal menjadi *wavy flow* seperti pada Gambar 3b. Pada permulaan terjadinya *wavy flow*, gelombang yang terjadi merupakan gelombang-gelombang kecil. Sering dengan waktu gelombang akan tumbuh dan menjadi gelombang yang lebih besar. Selanjutnya dengan menambah kecepatan aliran gas ($J_G=2.64$ m/s) pola aliran di dalam pipa horizontal menjadi *slug flow* seperti pada Gambar 3c. Hal ini disebabkan gelombang yang terjadi di dalam pipa horizontal akan tumbuh dan semakin membesar yang akan mempersempit fraksi hampa (*void fraction*) yaitu penampang lokal tempat udara lewat. Dengan semakin sempitnya fraksi hampa udara dan debit udara tetap maka kecepatan udara yang melewati daerah tersebut mempunyai kecepatan semakin tinggi. Ketika gelombang cairan berkembang maksimum dan memenuhi penampang pipa, tekanan udara akan naik sehingga mampu mendorong gelombang dan terbentuk *slug*.



Gambar 3a: *Stratified flow* pada pipa horizontal ($J_L=0.012$ m/s, $J_G=0.66$ m/s)



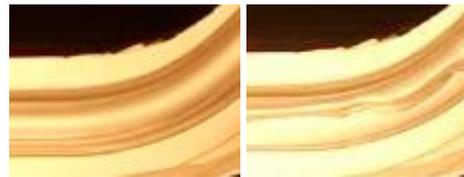
Gambar 3b: *Wavy flow* pada pipa horizontal ($J_L=0.012$ m/s, $J_G=2.31$ m/s)



Gambar 3c: *Slug flow* pada pipa horizontal ($J_L=0.012$ m/s, $J_G=2.64$ m/s)

3.2 Pola Aliran pada Pipa Belokan

Gambar 4 memperlihatkan kondisi aliran pada pipa belokan. Untuk kecepatan aliran cairan sebesar $J_L=0.012$ m/s dan aliran gas cukup kecil ($J_G=0.66$ m/s) akan terbentuk pola *stratified flow* seperti pada Gambar 4a.



Gambar 4a: *Stratified flow* pada pipa belokan ($J_L=0.012$ m/s, $J_G=0.66$ m/s)

Gambar 4b: *Wavy flow* pada pipa belokan ($J_L=0.012$ m/s, $J_G=2.31$ m/s)



Gambar 4c: *Slug flow* pada pipa belokan ($J_L=0.012$ m/s, $J_G=2.64$ m/s)

Dengan menambah kecepatan aliran gas ($J_G=2.31$ m/s) pola aliran di dalam pipa belokan menjadi *wavy flow* seperti pada Gambar 4b. Selanjutnya dengan menambah kecepatan aliran gas ($J_G=2.64$ m/s) pola aliran di dalam pipa belokan menjadi *slug flow* seperti pada Gambar 4c.

3.3 Pola Aliran pada Pipa Miring

Gambar 5 memperlihatkan kondisi aliran pada pipa miring. Untuk kecepatan aliran cairan sebesar $J_L=0.012$ m/s dan aliran gas cukup kecil ($J_G=0.66$ m/s) akan terbentuk pola *stratified flow* seperti pada Gambar 5a.



Gambar 5a: *Stratified flow* pada pipa miring ($J_L=0.012\text{ m/s}$, $J_G=0.66\text{ m/s}$)

Gambar 5b: *Wavy flow* pada pipa miring ($J_L=0.012\text{ m/s}$, $J_G=2.31\text{ m/s}$)

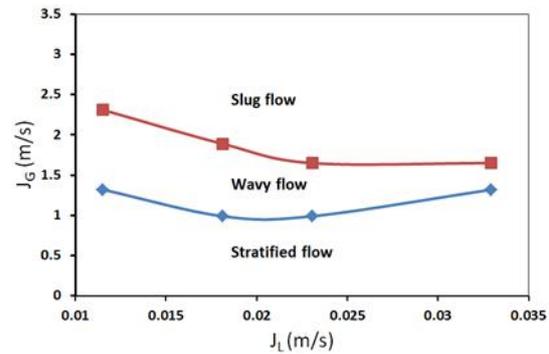


Gambar 5c: *Slug flow* pada pipa miring ($J_L=0.012\text{ m/s}$, $J_G=2.96\text{ m/s}$)

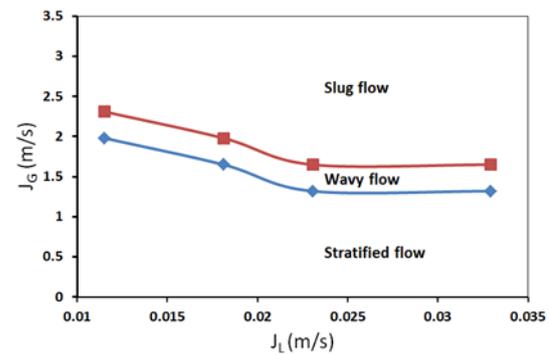
Dengan menambah kecepatan aliran gas ($J_G=2.31\text{ m/s}$) pola aliran di dalam pipa miring menjadi *wavy flow* seperti pada Gambar 5b. Selanjutnya dengan menambah kecepatan aliran gas ($J_G=2.96\text{ m/s}$) pola aliran di dalam pipa miring menjadi *slug flow* seperti pada Gambar 5c.

3.4 Kurva Pola Aliran

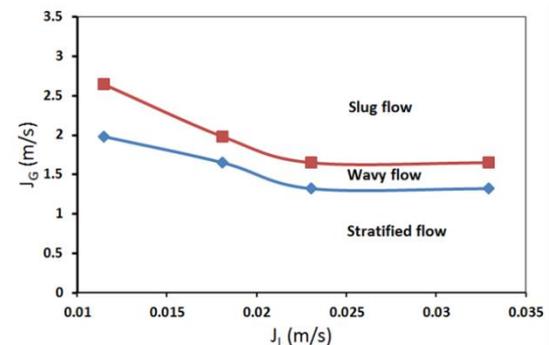
Gambar 6 menggambarkan kurva pola aliran pada pipa horizontal. Daerah *stratified flow* berada di bagian bawah daerah pola daerah *wavy flow*. Hal ini menunjukkan bahwa untuk debit aliran cairan yang sama, pada saat kecepatan *superficial* gas masih rendah ($J_G < 0.99\text{ m/s}$), di dalam pipa horizontal terbentuk *stratified flow*. Selanjutnya dengan menambah kecepatan *superficial* gas akan mengubah pola aliran di dalam pipa horizontal menuju daerah *wavy flow*. Bila kecepatan *superficial* gas lebih lanjut ditambah, maka akan mengubah pola aliran di dalam pipa horizontal menuju daerah *slug flow*. Begitu pula untuk Gambar 7 dan Gambar 8 mempunyai karakteristik yang sama.



Gambar 6: Pola aliran pada pipa horizontal.



Gambar 7: Pola aliran pada pipa belokan.



Gambar 8: Pola aliran pada pipa miring.

Kurva pola aliran pada Gambar 6 sampai Gambar 8 juga memperlihatkan bahwa pola *wavy flow* terjadi pada pasangan J_L dan J_G tertentu. Bila kecepatan aliran cairan (J_L) diperbesar maka untuk mendapatkan pola *wavy flow* diperlukan kecepatan aliran *superficial* udara J_G yang lebih kecil. Hal ini berarti ketika debit cairan diperbesar, maka pola *wavy flow* semakin mudah terjadi. Demikian pula untuk pola *slug flow*, akan terjadi pada pasangan J_L dan J_G tertentu. Bila debit aliran cairan (J_L) diperbesar maka untuk mendapatkan pola *slug flow* diperlukan kecepatan aliran *superficial* udara J_G yang lebih kecil. Hal ini berarti ketika debit cairan diperbesar, maka pola *slug flow* semakin mudah terjadi.

Gambar 9 menggambarkan kurva pola aliran yang dilakukan pada penelitian ini berada jauh di bawah

kurva pola aliran yang dilakukan oleh Minami [5] baik saat terbentuknya *wavy flow* maupun *slug flow*. Perbedaan ini mungkin disebabkan dari geometri seksi uji yang dipakai pada eksperimen. Hal yang paling signifikan penyebab penyimpangan ini adalah efek dari L/D (perbandingan panjang horizontal dan diameter dalam pipa). Pada eksperimen yang dilakukan Minami memiliki geometri L/D=8.47, sedangkan pada penelitian ini geometri yang dipakai memiliki L/D=94.5, sehingga terbentuknya *wavy flow* maupun *slug flow* lebih cepat terjadi karena ada pada laju aliran yang rendah seperti yang terlihat pada Gambar 9.

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini terlihat bahwa pasangan J_L dan J_G tertentu memberikan kondisi pola aliran yang disimpulkan sebagai berikut:

- Untuk kecepatan *superficial* udara yang kecil ($J_G < 0.99 \text{ m/s}$), baik pada pipa horizontal, pipa belokan dan pipa miring akan terjadi pola *stratified flow*. Dengan menambah kecepatan *superficial* udara maka akan terbentuk pola *wavy flow*.
- Untuk kecepatan *superficial* udara yang besar ($J_G > 2.64 \text{ m/s}$), baik pada pipa horizontal, pipa belokan dan pipa miring akan terjadi pola *slug flow*.
- Bila kecepatan cairan diperbesar, maka pola *wavy flow* dan *slug flow* semakin mudah

terjadi.

- Geometri dengan L/D yang lebih besar lebih mudah terbentuk *wavy flow* maupun *slug flow*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Seidel, C. Vallée, D. Lucas, M. Beyer, Deendarlianto, "Two-Phase Flow Experiments in a Model of the Hot Leg of a Pressurized Water Reactor," *Wissenschaftlich-Technische Berichte/ Forschungszentrum Dresden-Rossendorf*; FZD-531, 2010.
- [2] G.P. Celata, N. Cumo, G. E. Farello, T. Setaro, "The influence of flow obstructions on the flooding phenomenon in vertical channels," *International Journal of Multiphase Flow* 15 (2), 227–239, 1989.
- [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, 2281–2294, 2005.
- [4] Deendarlianto, C. Vallée, D. Lucas, M. Beyer, H. Pietruske, H. Carl, "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* 238 (12), 3389–3402, 2008.
- [5] N. Minami, D. Nishiwaki, H. Kataoka, A. Tomiyama, S. Hosokawa, M. Murase, "Countercurrent Gas-Liquid Flow in a Rectangular Channel Simulating a PWR Hot Leg (1) (Flow Pattern and CCFL Characteristics)," *Japanese J. Multiphase Flow* 22 (4), 403–412, 2008.