

KAJIAN EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK PERILAKU ANTARMUKA ALIRAN BERLAWANAN ARAH DI GEOMETRI 1:30 HOT LEG PWR MENGGUNAKAN SENSOR KAWAT SEJAJAR

EXPERIMENTAL STUDY OF BEHAVIORAL CHARACTERISTICS OF COUNTERFLOW INTERFACE IN GEOMETRY 1:30 HOT LEG PWR USING PARALLEL WIRE SENSORS

Alfikri Ikhsan^{1*}, Achilleus Hermawan Astyanto^{1,2}, Indarto¹, Deendarlianto¹

¹Universitas Gadjah Mada Departemen Teknik Mesin dan Industri

²Universitas Sanata Dharma Program Studi Teknik Mesin

^{1*}alfikri.ikhsan@mail.ugm.ac.id, ²achil.herma@mail.ugm.ac.id, ³indarto@ugm.ac.id,

⁴deendarlianto@ugm.ac.id

***penulis korespondensi**

Abstrak

Loss of coolant accident (LOCA) mendeskripsikan hipotesis kebocoran sirkuit primer pada *pressurized water reactor (PWR)* direaktor nuklir yang mengakibatkan perubahan fase cair menjadi uap jenuh. Fenomena ini dapat menyebabkan kemunculan aliran kondensat dari steam generator (SG) yang awalnya mengalir berlawanan arah dengan aliran uap berbalik arah kembali. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji fenomena aliran berlawanan arah di sirkuit primer PWR dengan geometri referensi hot leg PWR skala 1:30 dan rasio I/D= 1,9. Fluida kerja yang digunakan adalah campuran air destilasi dengan 60% gliserin sebagai fluida cair, dan udara sebagai fluida gas. Akuisisi data fluktuasi tebal film cairan didapatkan dari sensor parallel wire. Visualisasi memperlihatkan bahwa mekanisme flooding terjadi diawali dengan munculnya wavy flow yang berkembang menjadi roll wave hingga membentuk blockage yang menandakan onset of flooding. Analisis statistik terhadap fluktuasi tebal film cairan disajikan dalam kurva PDF dan wavelets energy.

Kata kunci : PWR , CCFL, parallel wire, PDF, wavelet energy

Abstract

Loss of coolant accident (LOCA) describes the hypothesis of a primary circuit leakage in a *pressurized water reactor (PWR)* in a nuclear reactor which causes a change in the liquid phase to saturated steam. This phenomenon can cause the appearance of condensate flow from the steam generator (SG) which initially flows in the opposite direction with the steam flow reversed back. This study aims to examine the phenomenon of countercurrent flow in the PWR primary circuit with a PWR hot leg reference geometry of 1:30 scale and I/D ratio = 1.9. The working fluid used is a mixture of distilled water with 60% glycerin as a liquid fluid, and air as a gas fluid. Data acquisition of liquid film thickness fluctuation is obtained from parallel wire sensor. Visualization shows that the flooding mechanism begins with the appearance of wavy flow which develops into a roll wave to form a blockage which indicates the onset of flooding. Statistical analysis of liquid film thickness fluctuations is presented in PDF curves and wavelets decomposition.

Keywords: PWR, CCFL, parallel wire, PDF, wavelet energy.

1. PENDAHULUAN

Pada tipe *pressurized water reactor (PWR)* reaktor memiliki sirkuit primer dan sekunder. Fluida kerja pada sirkuit primer bertekanan tinggi melewati *reactor pressure vessel (RPV)*, lalu menuju *steam generator (SG)* dan berlangsung proses perpindahan panas ke sirkuit sekunder. Pada

sirkuit sekunder, aliran air bertekanan rendah diubah menjadi uap bertekanan tinggi yang digunakan untuk memutar sudu turbin. Sebuah PWR memiliki tiga komponen utama yaitu RPV, *hot leg*, dan SG. *Hot leg* merupakan sebuah pipa horizontal yang terhubung antara RPV dan SG. Pada pipa *hot leg* terdapat belokan pada sisi di dekat SG. Fenomena kecelakaan *loss of coolant accident* (LOCA) yang diakibatkan oleh kebocoran pada sirkuit primer akan menyebabkan penurunan tekanan secara tiba-tiba, sehingga air bertekanan tinggi berubah fasa menjadi uap. Pada saat uap mengalir melalui SG, tekanan dan suhu mengalami penurunan sehingga uap terkondensasi menjadi cairan. Akibat posisi SG memiliki ketinggian di atas RPV, kondensat akan mengalir kembali menuju *hot leg* dan RPV melawan arah aliran uap dari RPV dan membentuk aliran berlawanan arah. Perbedaan ketinggian merupakan desain skenario agar kondensat membantu pendinginan dari RPV pada saat terjadinya fenomena kecelakaan LOCA. Apabila laju aliran uap terlalu tinggi, maka aliran kondensat sebagian atau seluruhnya akan berhenti dan mengalir searah dengan aliran uap sehingga kondensat tidak dapat mendinginkan RPV, fenomena ini disebut dengan *countercurrent flow limitation* (CCFL) atau *onset of flooding* [1].

Kajian eksperimental mengenai pengaruh (I/D) terhadap fenomena *flooding* telah dilakukan oleh peneliti terdahulu. (I/D) merupakan perbandingan antara diameter dalam pipa *hot leg* terhadap panjang riser *hot leg* [2]. Variasi rasio (I/D) yaitu 1,9 ; 3,9 ; 8,3. Fenomena *flooding* dianalisis menggunakan pemrosesan sinyal tekanan pada aliran dan diolah menggunakan metode statistik PDF dan PSD. *Hot leg* yang digunakan berukuran 1:30 terhadap *hot leg* PWR Konvoi Jerman. Debit aliran yang digunakan 0,1 lpm - 3 lpm, dengan suplai udara dengan kenaikan interval 5 lpm dari 0. Kurva permulaan *flooding* memiliki perbedaan pada rasio terbesar yaitu permulaan *flooding* terjadi lebih cepat namun hanya pada $0,2 < (J_L^*)^{1/2} < 0,3$ tidak linear. Fluktuasi voltase sinyal tekanan meningkat seiring peningkatan rasio (I/D) pada suatu nilai debit air dan udara yang sama. Pada analisis PSD, peningkatan rasio (I/D) menurunkan nilai frekuensi dominan namun meningkatkan frekuensi tertinggi. Kenaikan harga simpangan baku juga terjadi pada peningkatan rasio (I/D). Pada geometri yang sama penelitian tentang pengaruh variasi panjang pipa *hot leg* dan kecepatan superfisial gas dan cairan telah dilakukan [4]. Terdapat 3 wilayah pembagian kecepatan. Pada wilayah pertama ($J_L^{*0,5} \leq 0,24$), *onset of flooding* lebih cepat terjadi pada kecepatan superfisial gas rendah seiring bertambahnya kecepatan superfisial cairan. Pada wilayah kedua ($0,24 \leq J_L^{*0,5} \leq 0,34$), *onset of flooding* tidak dipengaruhi oleh penambahan kecepatan superfisial cairan. Pada wilayah ketiga ($J_L^{*0,5} \geq 0,34$), seiring bertambahnya kecepatan superfisial cairan menyebabkan *onset of flooding* terjadi pada kecepatan superfisial gas yang lebih rendah [3,6].

Eksperimen untuk mengetahui pola karakteristik aliran pada pipa horizontal juga telah diteliti untuk mengetahui tebal film cairan dan karakteristik dari *Probability Density Function* (PDF) [9]. Penelitian tersebut menggunakan sensor resisif yang dicetak pada papan sirkuit yang terdiri dari dua kawat sejajar. Grafik PDF dipengaruhi oleh nilai *void fraction*. *Void fraction* merupakan rasio antara volume fasa gas pada sebuah channel dengan volume total seluruh channel. Jika nilai *void fraction* rendah, mengidentifikasi bahwa terjadi aliran *slug* maka nilai PDF akan cenderung lebih kecil dan grafik mempunyai luasan yang kecil. Pada kecepatan superfisial cairan yang sama, peningkatan kecepatan superfisial gas meurunkan kurva PDF, hal ini menandakan fluida semakin bergelombang. Pada kecepatan superfisial gas yang sama, peningkatan kecepatan superfisial cairan kurva PDF cenderung mengalami penurunan [2].

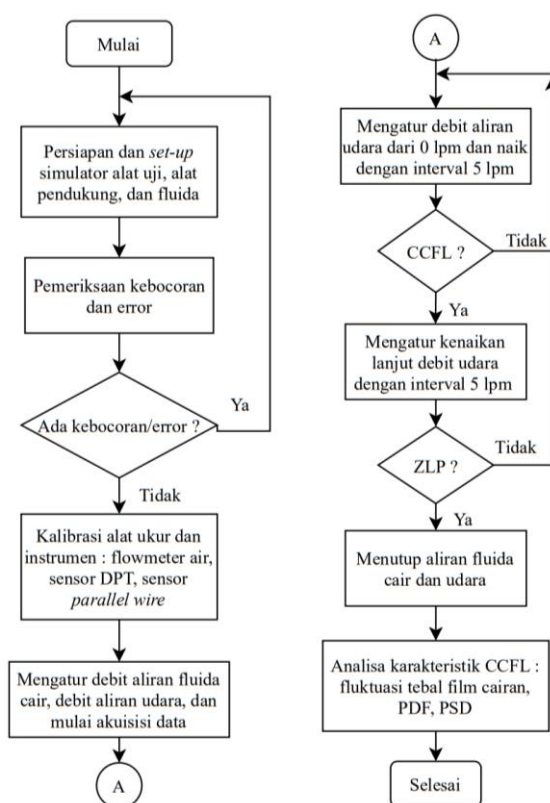
Penelitian tentang pengaruh viskositas fluida terhadap fenomena *counter current fluid limitation* (CCFL) menggunakan simulator *hot leg* dengan referensi UPTF Jerman dengan skala dari simulator *hot leg* yang digunakan adalah 1:15, dengan diameter *hot leg* 50 mm dengan sudut

kemiringan *bend* 50° . Terdapat tiga jenis fluida cair yang digunakan yaitu air, campuran air dan 40% gliserin, serta campuran air dan 60% gliserin. Peningkatan viskositas fluida memiliki pengaruh terhadap kurva CCFL. Peningkatan viskositas fluida akan meningkatkan gaya gesek fluida dengan permukaan dinding dari *hot leg* sehingga fenomena CCFL akan lebih cepat terjadi alirannya. Berdasarkan hasil plotting kurva wallis pada saat nilai kecepatan cairan yang sama, peningkatan viskositas fluida memengaruhi nilai kecepatan udara yang dibutuhkan mengalami penurunan. Hal ini mengidentifikasi semakin cepat fenomena CCFL terjadi [8].

Fenomena *flooding* merupakan fenomena kompleks yang perlu dikaji secara berkesinambungan. Data yang telah ditabulasikan perlu terus diperbaharui untuk melengkapi ketersediaan informasi yang mendukung pemahaman menyeluruh terhadap fenomena *flooding*. Hal ini bermanfaat pada analisis desain dan keamanan sebuah reaktor PWR. Pada penelitian ini, pembaruan eksperimental ditekankan pada karakteristik aliran berlawanan arah berbasis pemrosesan sinyal menggunakan *parallel wire* pada fluida gliserin 60% dengan udara. Data yang didapatkan dianalisis dengan metode stokastik untuk mendapatkan karakteristik perilaku antarmuka aliran.

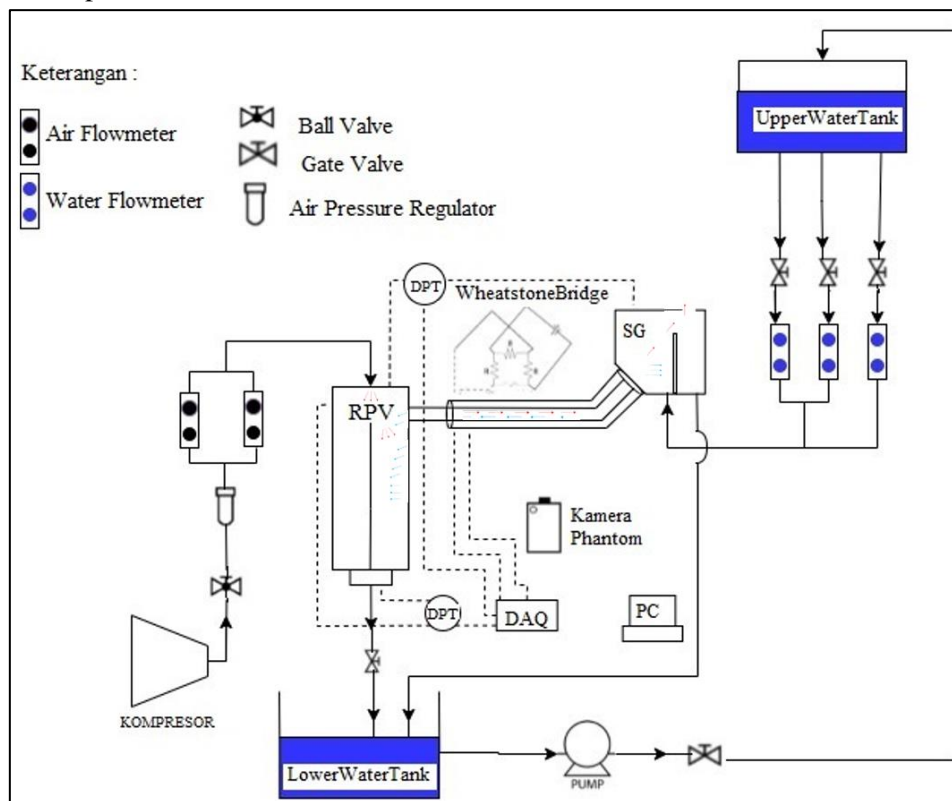
2. DASAR TEORI /MATERIAL DAN METODOLOGI/PERANCANGAN

Diagram alir penelitian ini diperlihatkan di Gambar 1. Penelitian dimulai dengan persiapan simulator alat uji dan alat pendukung lainnya serta memastikan tidak terjadi kebocoran. Selanjutnya dilakukan kalibrasi dari alat ukur dan instrumen agar data yang diperoleh memiliki keakuratan yang baik. Proses pengambilan data dilakukan setelah pengaturan debit aliran fluida cair dan udara dilanjutkan dengan penambahan laju debit udara sampai terjadinya fenomena *onset of flooding* hingga tercapai *zero liquid penetration* (ZLP). Setelah dicapai ZLP, aliran ditutup dan dilanjutkan dengan analisis data



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Alat uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulator PWR dengan skala 1:30. Rasio panjang pipa horizontal terhadap diameter (L/D) adalah 24, dan rasio panjang pipa miring terhadap diameter (I/D) adalah 1,9. Diameter dalam seksi uji adalah 25,4 mm yang merujuk pada diameter hot leg PWR tipe Konvoi Jerman (750 mm). Skema kerja dari alat ini dijelaskan sebagai berikut. Fluida cair dipompa dari *lower water tank* menuju *upper water tank* hingga penuh. Selanjutnya gaya gravitasi menyebabkan fluida cair mengalir melewati *water flowmeter* untuk mengatur kecepatan aliran hingga cairan mengisi SG. Cairan masuk melalui *water inlet* dan mengalir ke *riser*, *bend*, *hot leg* dan ditampung pada RPV. Sementara itu, aliran udara dari kompresor dialirkan menuju *pressure regulator* untuk menyesuaikan tekanan dan menuju *air flow meter* untuk pengaturan kecepatan aliran. Udara diatur dari debit pembacaan 0 lpm dan ditambah bertahap dengan interval 5 lpm hingga terjadi fenomena *onset of flooding* dan dilanjutkan hingga tercapai ZLP. Dari *flowmeter*, udara masuk ke dalam RPV, dan mengalir berlawanan arah melalui *hot leg*, *bend*, *riser* yang kemudian keluar melalui *air exit* di SG. Skema alat uji simulator pada penelitian ini diperlihatkan di Gambar 2.



Gambar 2. Skema Alat Uji Simulator *Hot Leg*

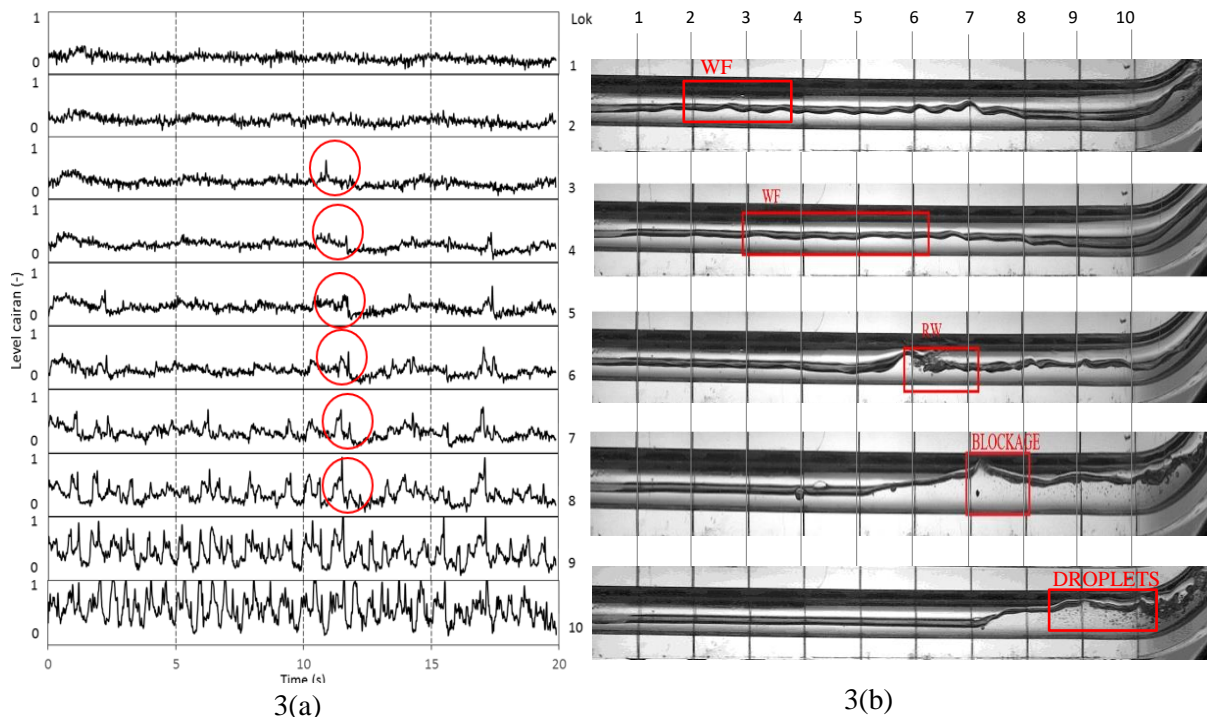
Fluida cair yang digunakan dalam penelitian ini adalah campuran air destilasi dan gliserin dengan perbandingan komposisi 60% gliserin. Komposisi ini sebelumnya juga digunakan untuk mengetahui karakteristik CCFL pada geometri serupa [8]. Sifat fisis dari fluida yang digunakan dapat dilihat pada Tabel.1.

Tabel.1. Sifat fisis fluida

Fluida	Densitas (kg/m^3)	Viskositas (kg/ms)	Tegangan Permukaan (kg/s^2)
60 % Gliserin	1126,33	0,0095718	0,058
Udara	1,17	0,000019	-

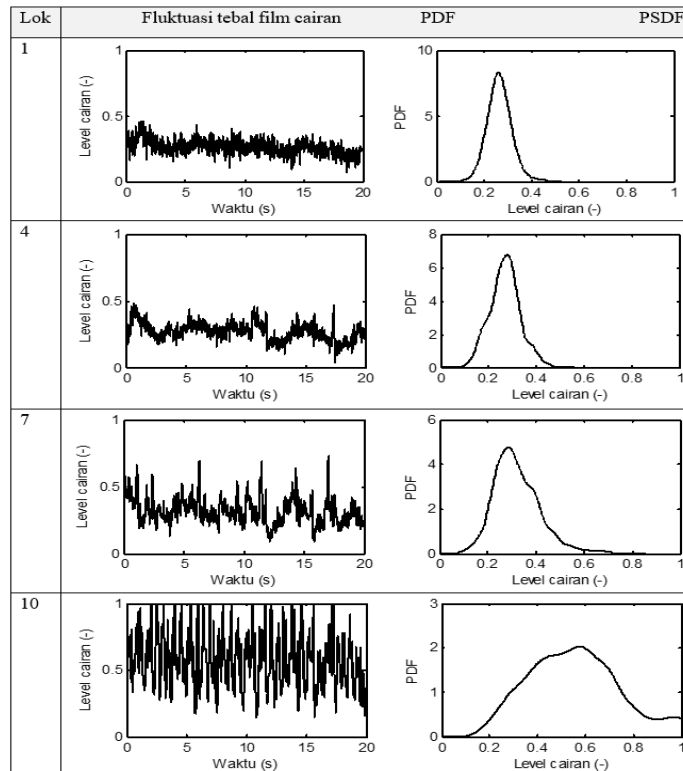
3. PEMBAHASAN

Gambar 3 memperlihatkan fluktuasi tebal film cairan pada $QL=24$ gph dan $QG=45$ lpm di setiap lokasi sensor (*locus*). Dari gambar terlihat bahwa amplitudo fluktuasi meningkat dari *Locus* 7 ke *Locus* 10. Di *Locus* 10 *liquid blockage* mendominasi. Sementara itu, di *Locus* 3 hingga *Locus* 7 terlihat bahwa sesekali tumbuh gelombang besar dengan tinggi gelombang meningkat seiring lokasi mendekati belokan. Permulaan *liquid blockage* terbentuk di *locus* 8 pada $t=12$ detik, disusul *liquid blockage* kedua di *locus* yang sama pada $t=15$ detik. Dapat dilihat pada Gambar 3(b), *onset of flooding* dimulai dengan terbentuknya pola aliran *wavy flow*, lalu *roll wave*, hingga aliran *slug* [5].

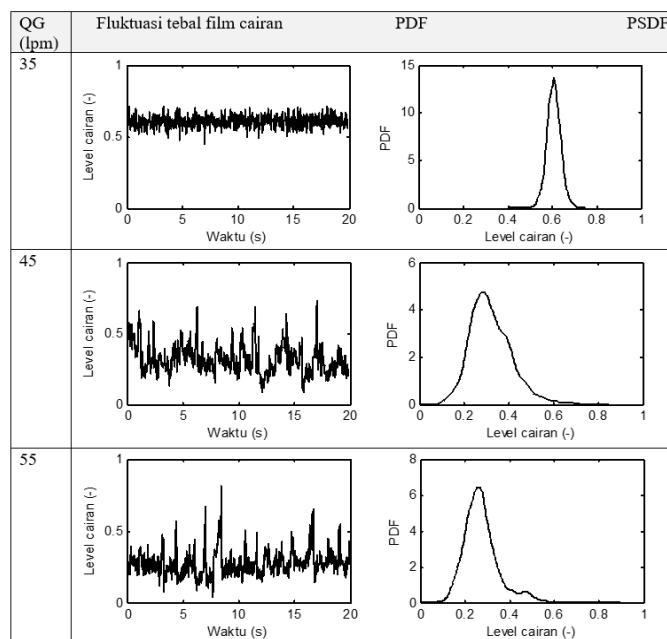


Gambar 3. (a) Fluktuasi tebal film pada $QL=24$ gph dan $QG=45$ lpm di masing-masing *locus*. (b) fenomena *onset of flooding*

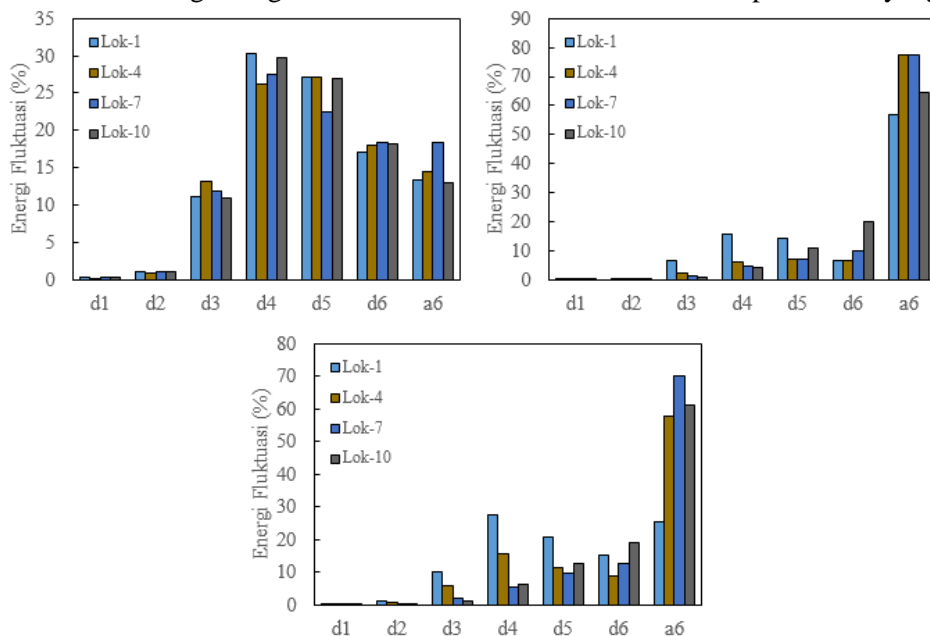
Gambar 4 menunjukkan kurva PDF (*probability density function*) yang merupakan sekumpulan fungsi yang pada teknik statistik untuk menjelaskan kemungkinan data yang muncul dari pengambilan data secara acak. Pada gambar tersebut menampilkan kurva PDF menunjukkan kecenderungan bergeser ke kanan dari *locus* 1 hingga 10 kemudian memiliki kecenderungan miring ke kiri pada *locus* 10 karena ketinggian air dominan mengalami penurunan di *locus* 10. Secara umum penurunan nilai sumbu tegak pada kurva PDF mengidentifikasi ketebalan film yang terjadi semakin besar, menandakan aliran *slug* [9]. Grafik fluktuasi tebal film cairan setiap *locus* memiliki kecenderungan yang sama dan terkonfirmasi oleh gambar visual yang telah diambil menggunakan kamera *high speed*. Dapat terlihat pada *locus* 1 aliran bersifat *stratified* dengan pola grafik fluktuasi cenderung memiliki rentang yang sama dan stabil. Pada *locus* 4, grafik menunjukkan gelombang yang mulai bergerak fluktuatif, hal ini dapat ditandai bahwa aliran telah berubah kategori menjadi *wavy flow*. Pada *locus* 7, grafik menunjukkan fluktuasi yang semakin jelas menandakan telah terbentuk *roll wave*. Kemudian pada *locus* 10 dapat dilihat grafik telah berfluktuasi maksimal dari gelombang level cairan, hal ini dapat dikatakan bahwa aliran pada kondisi *partial delivery*.

Gambar 4. Analisis PDF pada $QL=24$ gph dan $QG=45$ lpm di setiap locus

Gambar 5 merupakan analisis kurva PDF di locus 7 (sebelum *onset of flooding*) pada variasi $Q_G=35$ lpm, $Q_G=45$ lpm dan $Q_G=55$ lpm. Pada kurva PDF terhadap fluktuasi cairan, level cairan yang paling lebar berada pada $Q_G=45$ lpm, dimana debit udara tersebut merupakan debit terjadinya awal dari CCFL. Pada saat 55 lpm kurva berpindah ke arah kiri menandakan ketinggian aliran telah menurun dikarenakan telah terjadi CCFL [10]. Peningkatan debit aliran udara (Q_G), mengakibatkan fluktuasi tebal level cairan semakin meningkat seperti terlihat pada grafik fluktuasi tebal film cairan [2,7].

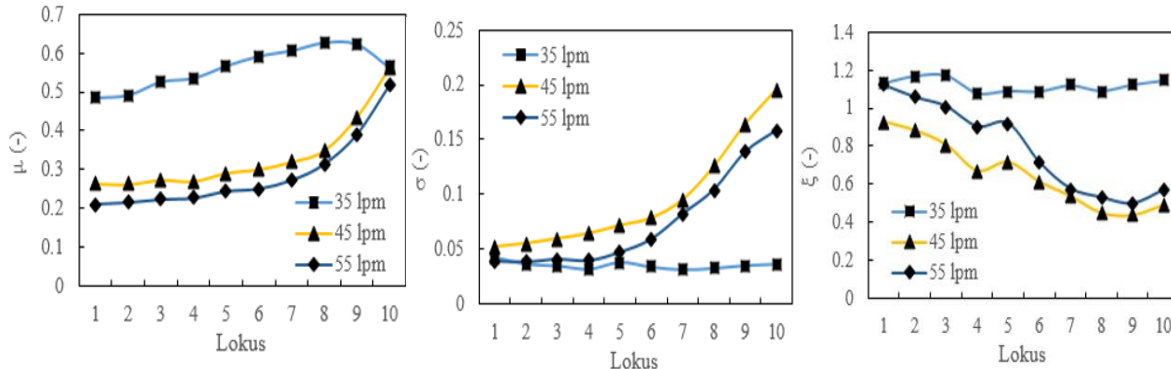
Gambar 5. Analisis PDF pada $QL=24$ gph dan beberapa Q_G di Locus 7

Gambar 6 memperlihatkan energi fluktuasi terhadap karakteristik aliran pada beberapa *locus* yang terdistribusi dari d1 hingga d6 dengan puncak d4. Pada *locus* 1 dan *locus* 4 tampak pola meningkat hingga d4 lalu menurun sampai d6. Pola aliran ini memiliki kemiripan yaitu aliran *stratified*. Sementara itu, pada *locus* 7 dan *locus* 10, pola grafik energi menunjukkan kenaikan dari d1 hingga d6. Grafik energi seragam menandakan bahwa aliran memiliki pola aliran yang sama.



Gambar 6. Energi fluktuasi tebal film cairan pada QL= 24gph dan QG= 45lpm di masing-masing *locus*.

Lebih lanjut, Gambar 7 memperlihatkan fungsi statistik yaitu *average*, *standar deviasi*, dan *aproksimasi*. Terlihat pada semua nilai fungsi, QG= 45 lpm dan QG=55 lpm memiliki kecenderungan yang sama, dan berbeda dengan QG=35 lpm. Hal ini menunjukkan bahwa pada QG=45 lpm terjadi *onset of flooding*. Pada nilai *average*, QG=35 lpm memiliki kecenderungan naik hingga *locus* 8 dan mengalami penurunan hingga *locus* 10. Pola ini dapat dikatakan bahwa aliran belum mengalami CCFL. Pada QG=45 lpm dan QG=55 lpm, nilai *average* mengalami kenaikan yang tajam pada *locus* 8 hingga *locus* 10. Hal ini menunjukkan bahwa terjadinya CCFL. Nilai standar deviasi memiliki pola yang sama untuk QG= 45 lpm dan QG= 55 lpm lalu mengalami perubahan kecenderungan pada *locus* 8 hingga 10. Pada nilai aproksimasi, pendekatan nilai dengan data sebenarnya memiliki pola yang sama pada 45 lpm dan 55 lpm dan perubahan kecenderungan terjadi pada *locus* 8



Gambar 7. Pengaruh debit udara terhadap sifat stokastik fluktuasi tebal film cairan pada QL= 24gph di berbagai Lokus

4. KESIMPULAN

Karakteristik fenomena aliran berlawanan arah pada fluida 60% gliserin dengan analisis sinyal *parallel wire* pada *hot leg* telah dikaji pada penelitian ini. Pengaruh debit udara terhadap fenomena ini juga telah diinvestigasi. Hasil dari analisis statistik yang diperoleh, dikomparasi dengan penelitian terdahulu yang menggunakan geometri sejenis. Diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Mekanisme *flooding* terjadi diawali dengan berubahnya aliran *stratified flow* menjadi *wavy flow* kemudian menjadi *roll wave* hingga berubah menjadi *slug* atau *liquid blockage* yang menyebabkan terjadinya CCFL.
2. Perubahan pola aliran pada masing-masing *locus* terjadi pada rentang waktu yang sangat cepat, dan cenderung tiba-tiba.
3. Pada QG=45 lpm dan QL=24 gph, *onset of flooding* terjadi anatara wilayah *locus* 7 dan *locus* 8. Hal ini ditandai dengan mulai munculnya *slug* pada wilayah ini.
4. Fluktuasi tebal film cairan semakin meningkat seiring dengan penambahan nilai dari QG. Hal ini dibuktikan dari kurva PDF yang semakin kekiri hingga terjadi CCFL dan mengalami penurunan setelah terjadinya CCFL.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Al Issa, S. and Macian-Juan, R. (2014) 'Experimental investigation of countercurrent flow limitation in a large-diameter hot-leg geometry: interfacial structure in a 1/3.9 scale of PWR geometry', *Nuclear Engineering and Design*, 280, pp. 550–563. doi: 10.1016/j.nucengdes.2014.08.021.
- [2] Astyanto, A. H., Rahman, Y. and Adhikara, A. Y. (2021) 'Time-series differential pressure fluctuations of a flooding regime : investigation on a 1 / 30 down-scaled PWR hot leg geometry Time-Series Differential Pressure Fluctuations of a Flooding Regime : on a 1 / 30 Down-Scaled PWR Hot Leg Geometry', 060001(December).
- [3] Astyanto.A.H., Rahman,Y., Medha,A.Y.A., Deendarlianto., Indarto (2021) 'Pengaruh Rasio I/D terhadap Permulaan Flooding dan Fluktuasi Voltase Sinyal Tekanan Rezim Flooding pada Geometri Kompleks', *Jurnal Rekayasa Mesin*, pp.447–457. doi: 10.21776/ub.jrm.2021.012.02.21.
- [4] Badarudin., Setyawan,A., Dinaryanto, O., Widyatama,A., Indarto, Deendarlianto. (2018) 'Interfacial behavior of the air-water counter-current two-phase flow in a 1/30 scale-down of (PWR) hot leg', *Annals of Nuclear Energy*, 116, pp. 376–387. doi: 10.1016/j.anucene.2018.03.007.
- [5] Badarudin, A., Setyawan A., Indarto., Deendarlianto.(2016)'Characteristics of the air-water counter current two-phase flow in a 1/30 scale of PWR: Interfacial behavior and CCFL data', *AIP Conference Proceedings*, 1737. doi: 10.1063/1.4949303.
- [6] Deendarlianto, Vallée, C., Beyer, M., Lucas, D., Carl, H. (2008) 'Experimental study on the air / water counter-current flow limitation in a model of the hot leg of a pressurized water reactor', 238, pp. 3389–3402. doi: 10.1016/j.nucengdes.2008.08.003.
- [7] Jana, A. K., Das, G. and Das, P. K. (2006) 'Flow regime identification of two-phase liquid – liquid upflow through vertical pipe', 61, pp. 1500–1515. doi: 10.1016/j.ces.2005.09.001.
- [8] KINOSHITA, I. I., Nrial,T., Tomiyama,A., Lucas, D., Murase, M. (2011) 'Effects of Liquid Properties on CCFL in a Scaled-Down Model of a PWR Hot Leg', *Journal of Power and Energy Systems*, 5(3), pp. 316–329. doi: 10.1299/jpes.5.316.
- [9] Rodrigues, R. L. P., Cozin,C., Naidek,B., Neto,M., Silva, M., Morales, R. (2020) 'Statistical features of the flow evolution in horizontal liquid-gas slug flow', *Experimental Thermal and Fluid Science*, 119(May), p. 110203. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110203.

- [10] Weisman, J. (1983) 'Two-Phase Flow Patterns and Void Fractions in Downward Flow Part I: Steady-State Flow Patterns', 1(6), pp. 761–782.