

**Achilleus Hermawan
Astyanto**

Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
achil.herma@mail.ugm.ac.id

Asisten Ahli (Dosen)
Universitas Sanata Dharma
Program Studi Teknik Mesin
achil.herma@usd.ac.id

Yusuf Rahman

Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
yusuf.rahman@mail.ugm.ac.id

**Akbar Yuga Adhikara
Medha**

Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
akbar.yuga@mail.ugm.ac.id

Deendarlianto

Guru Besar (Dosen)
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
deendarlianto@ugm.ac.id

Indarto

Guru Besar (Dosen)
Universitas Gadjah Mada
Departemen Teknik Mesin dan Industri
indarto@ugm.ac.id

PENGARUH RASIO I/D TERHADAP PERMULAAN FLOODING DAN FLUKTUASI VOLTASE SINYAL TEKANAN REZIM FLOODING PADA GEOMETRI KOMPLEKS

A nuclear power plant operation requires reliability safety systems. Therefore, an accidental scenario such as the LOCA becomes a specific attention. This relates to a countercurrent flow phenomenon which permits the occurrence of a flooding regime. This study aims to investigate the effects of I/D ratios of the riser on the onset of flooding and time-series voltage fluctuations of differential pressure signals of the flooding regime on a complex geometry representing a PWR hot leg. The test section contains a combination of a horizontal, an elbow and an inclined pipes. Three I/D ratios containing 1.9 (R1), 3.9 (R2) and 8.3 (R3) were assessed. The tabulated data are expressed in the term of a flooding curve. Meanwhile, the statistical features of the time-series voltage fluctuations of the signals are presented on both PDF and PSD graphs. The results obtained show that the assessed I/D ratios do not conduct significance effects on the onset of flooding. On the other hand, there are trends which can be obtained from the time-series signals with the increase of the I/D ratio. Those trends can also be observed in the such statistical features; the PDF and PSD graphs, respectively.

Keywords: *I/D Ratios, Time-Series Signal Fluctuations, Onset of Flooding, Complex Geometry.*

1. PENDAHULUAN

Reaktor air bertekanan (*pressurized water reactor/PWR*) merupakan jenis reaktor air ringan (*light water reactor*) yang bekerja pada tekanan tinggi. Tekanan dan temperatur fluida kerja di inti reaktor (*reactor pressure vessel/RPV*) PWR masing-masing mencapai 15 MPa dan 325 °C. Di PWR, RPV terhubung pada suatu saluran yang disebut lengan panas (*hot leg*) yang terdiri dari pipa horisontal, belokan (*elbow*) dan pipa miring (*riser*) dan membentuk suatu sirkuit yang disebut sirkuit primer [1].

Pada suatu skenario kecelakaan reaktor yang disebut *loss of coolant accident* (LOCA), kebocoran kecil di sirkuit primer menyebabkan penurunan tekanan mendadak yang mengakibatkan sebagian cairan menjadi uap. Uap kemudian mengalir melalui *hot leg*, dan ketika melewati SG, terjadi proses kondensasi dan dihasilkan kondensat. Akibat perbedaan elevasi, kondensat yang terbentuk mengalir kembali menuju RPV, melawan arah aliran uap dari RPV, membentuk aliran berlawanan arah (*countercurrent flow/CCF*) *stratified*. Aliran kondensat ini dipergunakan untuk mendinginkan RPV. Keberhasilan pendinginan sangat bergantung pada mekanisme ini [2, 3].

Di aliran cairan-gas berlawanan arah *stratified* kedua fluida mengalir berlawanan dan stabil pada interval tertentu. Jika debit gas meningkat berlebih, aliran cairan berhenti, dan berbalik arah terbawa oleh aliran gas sebagian ataupun seluruhnya. Fenomena ini dikenal sebagai pembatasan aliran berlawanan arah (*countercurrent flow limitation/CCFL*) [2]. Lebih lanjut, untuk debit gas rendah, cairan mengalir berlawanan dengan gas di dalam *hot leg*. Sementara itu perbedaan tekanan RPV dan SG menunjukkan nilai rendah, dan secara perlahan meningkat seiring peningkatan debit gas. Rezim aliran ini disebut rezim aliran berlawanan arah stabil. Ketika debit gas secara perlahan ditingkatkan hingga mencapai suatu harga maksimum di mana debit cairan masuk RPV sama dengan debit cairan di sisi inlet *hot leg*, titik ini disebut permulaan (*the onset*

of) *flooding* atau CCFL [3]. Rezim *flooding* dibatasi oleh permulaan *flooding* dan penetrasi cairan nol (*zero liquid penetration/ZLP*). Dalam mekanisme kerja PWR, baik *flooding* maupun ZLP adalah fenomena yang tidak diinginkan. Hal ini berkaitan dengan keamanan dan keselamatan operasional PWR tersebut.

Flooding merupakan suatu fenomena fisis yang kompleks. Ketersediaan informasi yang mendukung upaya pemahaman terhadap *flooding* secara utuh masih belum tuntas. Sejauh ini hanya pengembangan teoritis yang terbatas tersedia di dalam literatur [3]. Hal ini mengindikasikan bahwa masih diperlukan data eksperimental sebanyak mungkin untuk mendukung pemahaman mengenai mekanisme *flooding*. Pemahaman mendalam mengenai karakteristik *flooding* sangat penting untuk kajian desain dan analisis keamanan serta keselamatan operasional reaktor nuklir.

Dalam perkembangannya, studi mengenai *flooding* pada geometri kompleks yang merepresentasikan *hot leg* PWR dilakukan dalam bentuk kajian analitis dan pemodelan matematis, komputasi berbasis aplikasi volum hingga (CFD) ataupun pemodelan mekanis berbasis investigasi eksperimental. Parameter yang dikaji berupa pengaruh geometri saluran (rasio panjang karakteristik terhadap diameter, L/D [4, 5, 8], rasio panjang riser terhadap diameter, I/D [5, 8]), penampang saluran (segiempat [6], lingkaran/pipa [4, 5, 7]), geometri masuk (*entrance*) ataupun keluar (*exit*) saluran [4], serta sifat fisis fluida (viskositas dan tegangan permukaan) [7]. Kajian parameter-parameter tersebut dimaksudkan untuk mendapatkan basis data dalam upaya memprediksi permulaan *flooding* [2, 3].

Kajian eksperimental aliran berlawanan arah pada geometri kompleks yang merepresentasikan *hot leg* PWR dilakukan untuk mendapatkan informasi mekanisme-mekanisme yang menuntun pada fenomena *flooding*. Seksi uji berdiameter dalam 64 mm dengan radius kelengkungan dalam dan luar belokan masing-masing adalah 60 mm dan 135 mm dihubungkan dengan pipa horisontal sepanjang 1300 mm. Tekanan sistem diamati menggunakan *pressure transducer*. Hasil yang diperoleh digambarkan pada kurva *flooding* yang menunjukkan hubungan antar kecepatan superfisial cairan dan gas [4]. Sementara itu, pengaruh geometri seksi uji dan kecepatan cairan inlet terhadap permulaan *flooding* pada berbagai kemiringan sudut belokan dari geometri *hot leg* PWR juga telah diinvestigasi. Diameter seksi uji yang digunakan adalah 54 mm, 36 mm dan 44 mm. Sementara itu, panjang riser yang digunakan adalah 100 mm, 300 mm dan 500 mm. Pengaruh parameter yang sama juga dikaji terhadap penghantaran parsial cairan (*liquid partial delivery/LPD*) dan ZLP. Laju aliran dan temperatur fluida, tekanan di tangki atas, perbedaan tekanan antara tangki atas dan tangki bawah dan permukaan air dalam tiga posisi sepanjang bagian mendatar dari seksi uji diukur. Pengukuran ini dilakukan menggunakan pelemahan radiasi sinar gamma [5].

Investigasi studi eksperimental mekanisme CCFL pada model *hot leg Forschungszentrum Dresden-Rossendorf* (FZD) PWR telah dilaporkan. Parameter yang divariasikan antara lain tekanan kerja sistem serta laju aliran air. Nilai tekanan kerja yang divariasikan adalah 0,15 dan 0,3 Mpa, sedangkan variasi laju aliran air ada 4 yaitu: 0,15; 0,3; 0,6; dan 0,9 kg/s [6]. Sementara itu, pengaruh sifat fisis cairan terhadap CCFL dalam suatu geometri *hot leg* PWR berskala 1/15 juga telah dikaji. Diameter seksi uji yang digunakan adalah 50 mm dengan radius belokan 80 mm serta panjang pipa horisontal dan riser masing-masing adalah 430 mm dan 60 mm. Persentase berat gliserol digunakan sebagai campuran untuk mendapatkan harga-harga densitas, viskositas dan tegangan permukaan yang bervariasi [7]. Lebih lanjut, perilaku antarmuka aliran berlawanan arah melalui 1/30 diameter penurunan skala *hot leg* PWR juga telah dikaji secara eksperimental. Visualisasi aliran serta beda tekanan *upper* dan *lower tank* diamati sebagai penanda tercapainya permulaan *flooding* [8].

Sebagaimana para peneliti menggunakan fluktuasi tekanan untuk mengungkapkan karakteristik aliran dua fase, fluktuasi tekanan juga adalah salah satu parameter fisis yang dapat diamati untuk menandai permulaan *flooding*. Dalam hal ini, peningkatan mendadak *pressure drop* dengan karakteristik fluktuasi tekanan tinggi mengindikasikan hal tersebut [9]. Teknik pemrosesan sinyal memungkinkan data fluktuasi tekanan yang telah diperoleh untuk kemudian diolah secara statistik. Dengan demikian diperoleh informasi tentang karakteristik aliran tersebut dari tinjauan fluktuasi tekanannya.

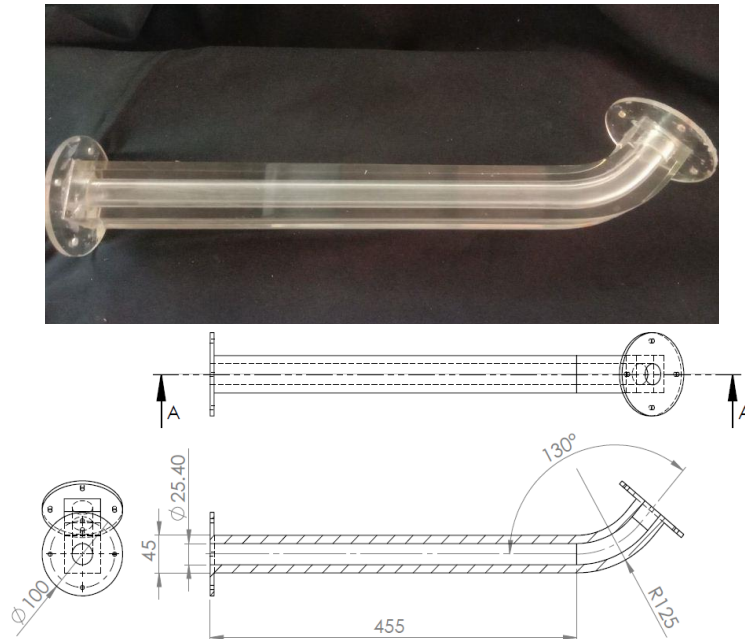
Karakteristik fluktuasi aliran *slug* telah diinvestigasi pada saluran horisontal berdiameter 50 mm dan panjang 40 m untuk mengetahui karakteristik fluktuasi *liquid holdup* dan perbedaan tekanannya [10]. Distribusi probabilitas dari aliran *slug* tersebut didekati menggunakan distribusi bimodal. Sementara itu, investigasi fluktuasi beda tekanan untuk pola aliran *slug* di saluran horisontal berdiameter 24 mm dengan panjang 10 m dilakukan berbasis analisis fitur-fitur statistik seperti *probability density function* (PDF), autokorelasi dan *power spectral density* (PSD) [11]. Lebih lanjut, fitur-fitur statistik yang sama juga digunakan untuk menginvestigasi evolusi aliran di pipa horisontal berdiameter 25,8 mm [12] serta pipa vertikal berdiameter 20 mm dan panjang 90 cm [13].

Pada penelitian ini dilakukan kajian eksperimental mengenai pengaruh rasio panjang riser terhadap diameter saluran (I/D) berbasis sinyal tekanan. Data sinyal yang diakusisi diolah menggunakan teknik

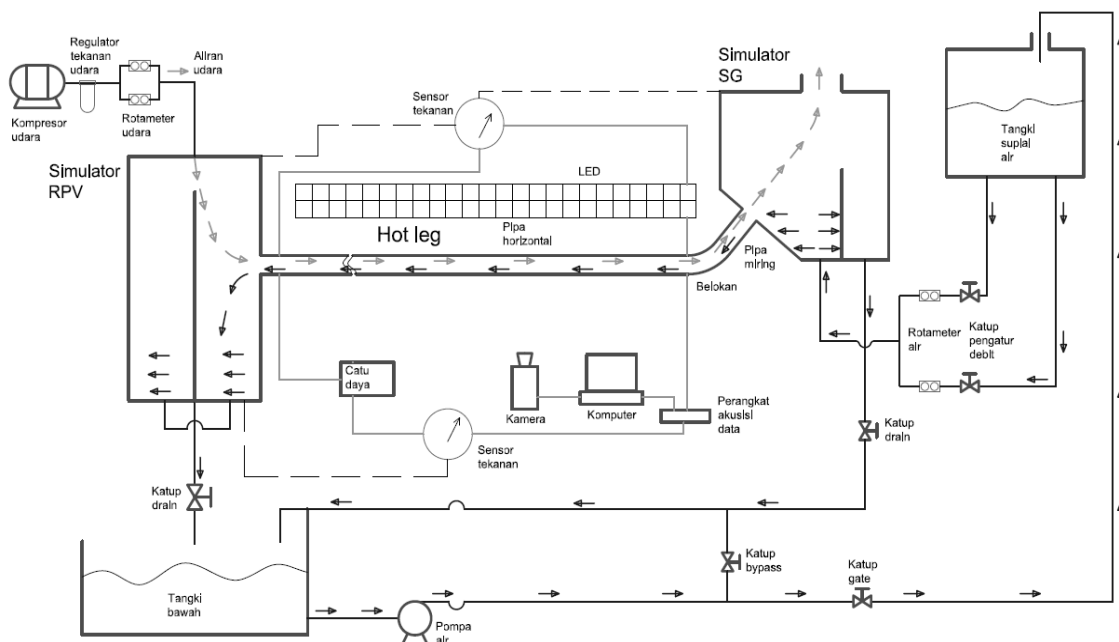
pemrosesan sinyal untuk mendapatkan karakterisasi statistiknya yang meliputi PDF dan PSD. Keterbaruan penelitian ditekankan pada kajian pengaruh rasio I/D berbasis teknik pemrosesan sinyal tekanan pada aliran berlawanan arah di geometri kompleks yang merepresentasikan 1/30 *hot leg* PWR.

2. METODE DAN BAHAN

Seksi uji pada eksperimen ini berupa suatu geometri kompleks yang merupakan model *hot leg* PWR dengan skala 1/30. Seksi uji berupa suatu kombinasi saluran horisontal, belokan dan saluran miring. Penampang melintang seksi uji berupa lingkaran dengan diameter dalam 25,4 mm. Panjang bagian horisontal adalah 455 mm dengan sudut kemiringan belokan adalah 50° terhadap horisontal. Sementara itu ada tiga rasio panjang *riser* terhadap diameter yang dipergunakan yaitu 1,9 (R1); 3,9 (R2); serta 8,3 (R3). Geometri seksi uji dalam penelitian ini diperlihatkan di Gambar 1.

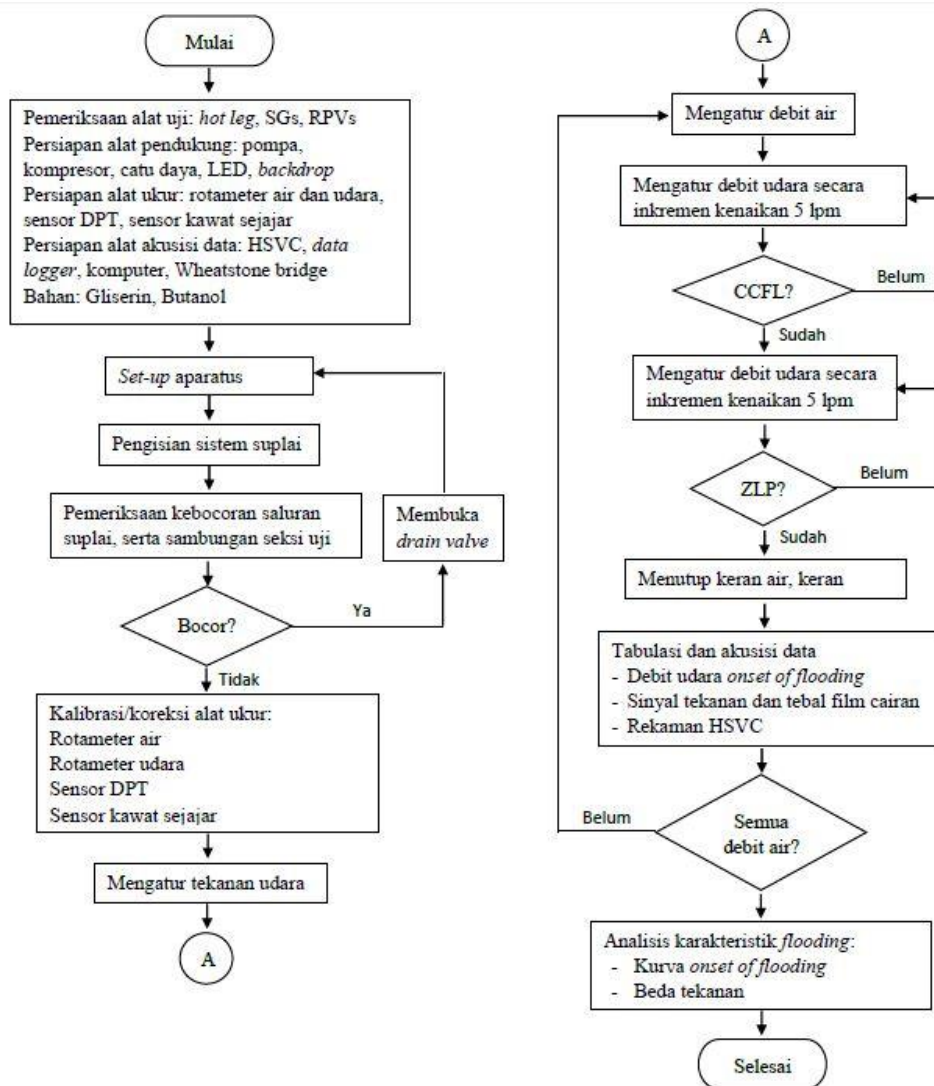


Gambar 1: Geometri dasar seksi uji.



Gambar 2: Skema aparatus penelitian.

Gambar 2 memperlihatkan skema aparatus penelitian ini. Sementara itu, Gambar 3 menunjukkan diagram alir pengambilan data. Dari tangki bawah, air dipompakan ke tangki suplai menggunakan pompa Grundfos tipe sentrifugal dengan spesifikasi debit maksimal 283 lpm pada putaran 2790 rpm. Akibat pengaruh gravitasi, air dari tangki suplai turun melalui dua saluran paralel. Debit air yang melalui tiap-tiap saluran diatur menggunakan katup pengatur debit. Nilai debit air terbaca pada masing-masing rotameter yang dipasangkan pada jarak tertentu setelah katup pengatur debit. Kemudian air masuk ke simulator SG. Dari simulator SG, akibat gravitasi air turun melalui seksi uji menuju simulator RPV.



Gambar 3: Diagram alir pengambilan data.

Sementara itu, udara disuplai menggunakan kompresor tipe torak dengan spesifikasi debit maksimum $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ pada putaran 530 rpm. Suatu regulator tekanan udara yang dilengkapi *water trap* digunakan untuk mengatur tekanan udara secara konstan pada 50 psi. Dua buah rotameter udara dengan total debit 95 lpm disusun paralel untuk mendapatkan pembacaan nilai debit udara yang melewati saluran suplai udara. Dari situ kemudian udara masuk ke dalam *lower tank*, melewati seksi uji menuju *upper tank* lalu keluar ke atmosfer. Tabel 1 menunjukkan alat dan bahan yang dipergunakan dalam penelitian ini.

Pada *upper* dan *lower tank* dipasang *pressure tap* yang dihubungkan dengan sensor *differential pressure transducer* (DPT) untuk mendapatkan data sekuensial waktu (*time-series*) fluktuasi voltase sinyal tekanan. Ketinggian permukaan air di *lower tank* diamati menggunakan garis ukur, dan divalidasikan dengan sekuensial waktu voltase sinyal tekanan statik sensor DPT yang ditempatkan di bagian bawah RPVs. Kedua DPT dihubungkan dengan perangkat 12 VDC *power supply*, Advantech 4716AE *data logger* dan komputer.

Ketika pengambilan data, visualisasi aliran direkam menggunakan kamera video pada *frame rate* 240 fps. Untuk mendapatkan pandangan keseluruhan seksi uji pada resolusi maksimal, kamera diletakkan pada

jarak tertentu di depan seksi uji. Rentang debit air yang digunakan adalah 0,1 – 3 lpm. Harga ini mengacu pada beberapa penelitian terdahulu yang dilakukan pada seksi uji serupa. Untuk setiap harga debit air, suplai udara diberi inkremen kenaikan sebesar 5 lpm. Sementara itu untuk meyakinkan bahwa aliran yang terjadi telah stabil akibat perubahan debit udara, ditunggu selama 15 detik sebelum menuju kenaikan selanjutnya.

Tabel 1: Alat dan bahan yang dipergunakan dalam penelitian.

ALAT DAN BAHAN	TIPE	SPESIFIKASI
Pompa air	Grundfos tipe sentrifugal	283 lpm pada 2790 rpm
Kompresor udara	Shark tipe torak	0,1 m ³ /s pada 530 rpm
Flowmeter udara	Dwyer RMA	0 – 70 lpm
	Wiebrock	0 – 25 lpm
Regulator tekanan udara	Tekiro dengan <i>water trap</i>	0 – 1 Mpa
Flowmeter air	Dwyer RMB	0 – 20 gph
	Omega	6 – 60 gph
Sensor tekanan	Validyne P55D	Rentang ΔP 55 kPa
Data akuisisi sistem	Advantech 4716AE	200 kS/s; 16-bit; 16 saluran
Kamera	Phantom Miro LAB310	3260 fps pada resolusi 1280 × 800 piksel

Analisis data dilakukan melalui komparasi hasil terhadap penelitian terdahulu serta analisis statistik. Aplikasi *Microsoft Excel* 2013 digunakan untuk mendapatkan grafik-grafik sekuensial waktu fluktuasi voltase sinyal tekanan, PDF dan PSD dengan variasi rasio I/D pada suatu harga debit air dan udara tertentu. Lebih lanjut, titik-titik permulaan *flooding* yang diperoleh dikomparasikan dengan beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan geometri kompleks sejenis yaitu Wongwises [4], Navarro [5], Deendarlianto *et al.* [6], Kinoshita *et al.* [7], serta Badarudin *et al.* [8]. Kurva permulaan *flooding* diperoleh dengan mengaplikasikan parameter-parameter tak berdimensi Wallis.

Parameter Wallis (J_K^*) seperti pada Persamaan 1 merupakan rasio gaya inersia terhadap gaya hidrostatik [14]. Parameter ini menjelaskan bahwa kecepatan superfisial fluida (J_K) seperti pada Persamaan 2 merupakan fungsi dari densitas fluida (ρ), percepatan gravitasi (g) serta diameter saluran (D), dan diformulasikan sebagai berikut:

$$J_K^* = J_K \sqrt{\frac{\rho_K}{gD(\rho_L - \rho_G)}} \tag{1}$$

$$J_K = \frac{Q_K}{A} \tag{2}$$

Subskripsi K pada Persamaan (1) dan (2) mengindikasikan masing-masing fase. Sementara itu Q adalah debit aliran, dan A merupakan luas penampang saluran. Dalam eksperimen ini, fluida yang dipergunakan adalah air dan udara. Sifat-sifat fisis air dan udara pada temperatur 30°C dan tekanan 1 atm diperlihatkan di Tabel 2.

Tabel 2: Sifat fisis fluida yang dipergunakan dalam penelitian.

SIFAT FISIS	AIR	UDARA
Massa jenis (kg/m ³)	996	1,165
Tegangan permukaan (kg/s ²)	71,97×10 ⁻³	-
Viskositas dinamik (kg/m.s)	7,97×10 ⁻⁴	1,87×10 ⁻⁵

Sementara itu, pemrosesan sinyal memungkinkan diperolehnya statistik data yang diakuisisi, di antaranya adalah PSD dan PDF. PSD memberikan informasi rentang frekuensi kuat untuk analisis lanjutan. Sementara itu, dari PDF, ukuran-ukuran data yang meliputi harga *mean* dan simpangan baku dapat dianalisis kecenderungannya. Persamaan 3 digunakan untuk menghitung *mean* (\bar{x}) yang diperoleh dengan membagikan harga keseluruhan data yang dijumlahkan terhadap banyaknya data merupakan ukuran pemusatan yang menyatakan harga rerata dari sekumpulan n data. Lebih lanjut, Persamaan 4 digunakan untuk menentukan seberapa dekat sebaran masing-masing data dari harga *mean*-nya digunakan suatu ukuran keragaman yang disebut simpangan baku (s) [16].

$$x = \frac{\sum x_i}{n} \tag{3}$$

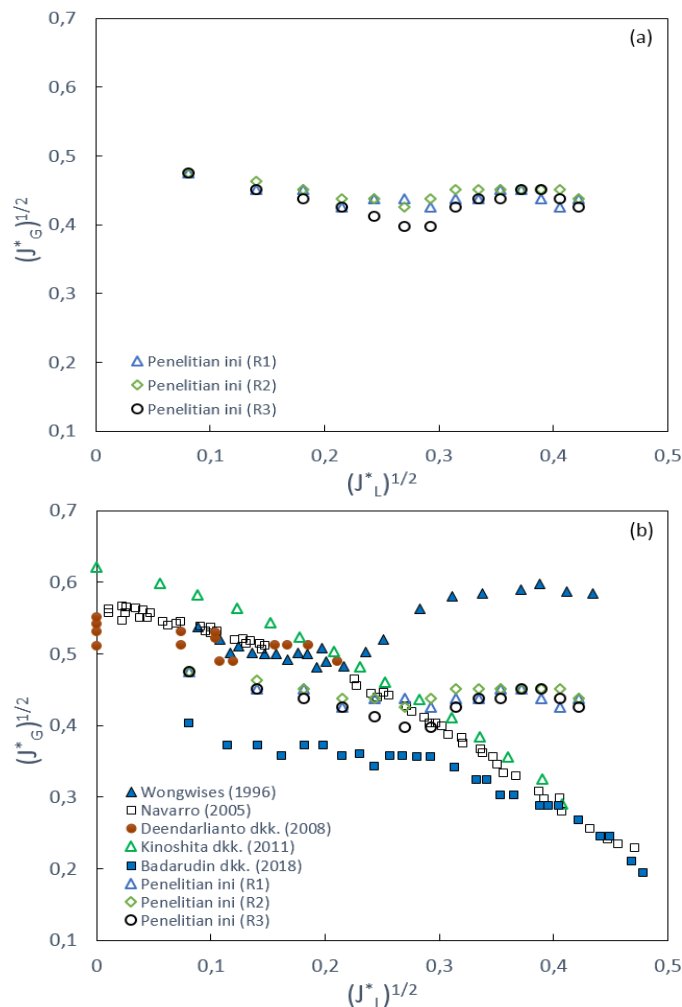
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x_i)^2}{(n-1)}} \tag{4}$$

3. HASIL DAN DISKUSI

Bagian ini memuat data yang diperoleh melalui pengamatan visual dan diperkuat akuisisi sinyal tekanan. Data ini kemudian diolah untuk mendapatkan grafik yang merepresentasikan sebagian karakteristik *flooding* berupa kurva permulaan *flooding*. Kurva ini digambarkan dalam grafik hubungan parameter tak berdimensi kecepatan superfisial masing-masing fase. Sementara itu, dari fluktuasi voltase sinyal tekanan yang menandai rezim *flooding* disajikan dalam suatu grafik sekuensial waktu. Dari fluktuasi ini, harga amplitudo maksimum dapat diketahui. Pengolahan data fluktuasi sinyal juga dilakukan dengan menyajikan grafik PDF dan PSD untuk setiap rasio I/D. Dari PDF dapat terlihat sebaran harga fluktuasi voltase sinyal tekanan. Sementara itu, dari PSD diperoleh harga frekuensi dominan untuk masing-masing rasio I/D.

3.1 Permulaan *flooding*

Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa secara garis besar kurva permulaan *flooding* menunjukkan tiga kecenderungan berbeda. Kecenderungan pertama menunjukkan bahwa peningkatan debit air cukup signifikan mempercepat tercapainya permulaan *flooding*. Kecenderungan kedua memperlihatkan harga yang berkebalikan. Permulaan *flooding* justru dicapai lebih lambat seiring peningkatan debit air. Sementara itu kecenderungan ketiga menunjukkan harga fluktuatif di mana permulaan *flooding* memiliki kecenderungan lebih cepat tercapai seiring peningkatan debit air. Gambar 4(a) memperlihatkan ketiga kecenderungan tersebut untuk masing-masing rasio I/D.



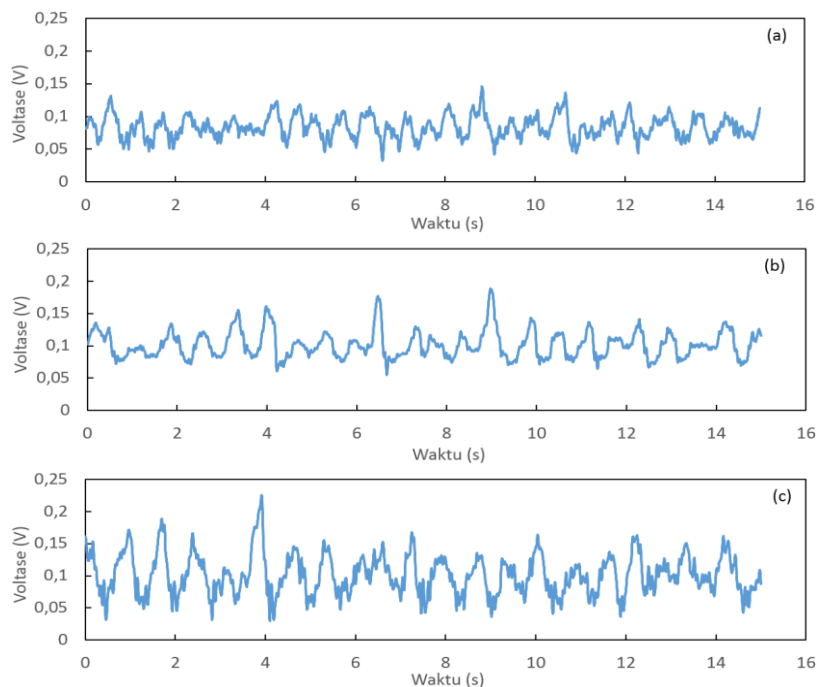
Gambar 4: (a) Kurva permulaan *flooding* untuk masing-masing rasio I/D, (b) Komparasi terhadap beberapa penelitian sebelumnya.

Lebih lanjut, dari grafik teramati bahwa R3 memberikan nilai permulaan *flooding* yang cukup berbeda terhadap R1 dan R2 pada rentang $0,2 < (J^*_L)^{1/2} < 0,3$. Pada rentang nilai ini, permulaan *flooding* lebih cepat dicapai oleh rasio I/D tertinggi. Namun demikian, secara garis besar tidak dapat disepakati bahwa rasio I/D memberikan pengaruh linier terhadap kecepatan tercapainya permulaan *flooding*. Hal ini kemudian tampak semakin jelas dari Gambar 3(a) yang masih memperlihatkan tren fluktuasi parameter Wallis seiring peningkatan rasio I/D. Secara umum, juga menyepakati hasil Navarro [5], dari ketiga kecenderungan yang didapatkan, tidak tampak suatu kurva linier sempurna seperti korelasi *flooding* yang diajukan oleh Wallis [14].

Pada perbandingan terhadap hasil-hasil penelitian terdahulu, disajikan komparasi hasil yang didapatkan terhadap data Wongwises [4], Navarro [5], Deendarlianto *et al.* [6], Kinoshita *et al.* [7] dan Badarudin *et al.* [8]. Dalam komparasi tersebut didapatkan kecenderungan yang relatif sama pada rentang nilai $0,1 < (J^*_L)^{1/2} < 0,2$ terhadap data penelitian Wongwises [4], Navarro [5], Deendarlianto *et al.* [6], Kinoshita *et al.* [7] dan Badarudin *et al.* [8]. Sementara itu, terlihat kecenderungan yang sama dengan data Wongwises [4] pada rentang nilai $(J^*_L)^{1/2} > 0,3$. Lebih lanjut, seperti yang dialami oleh Wongwises [4] dan Badarudin *et al.* [8], dalam penelitian ini juga terlihat perubahan kecenderungan untuk semua rasio I/D. Hal ini tidak seperti halnya dengan data Navarro [5] dan Kinoshita *et al.* [7] yang memperlihatkan tidak ada perubahan kecenderungan. Gambar 4(b) memperlihatkan komparasi-komparasi tersebut.

3.2 Sekuensial waktu fluktuasi voltase sinyal tekanan

Sekuensial waktu (*time-series*) fluktuasi voltase sinyal tekanan untuk masing-masing nilai rasio I/D diperlihatkan di Gambar 5. *Signal filtering* dilakukan dengan memperhatikan rentang frekuensi normalisasi. Dengan demikian, terjadi data reduksi dari 1000 sampel/detik menjadi 100 sampel/detik. Dari Gambar 5 tampak bahwa untuk nilai debit air dan udara yang sama, amplitudo fluktuasi voltase sinyal tekanan meningkat seiring peningkatan rasio I/D. Hal ini secara implisit menunjukkan bahwa peningkatan *pressure drop* terjadi seiring peningkatan rasio I/D untuk suatu harga debit air dan udara yang sama.

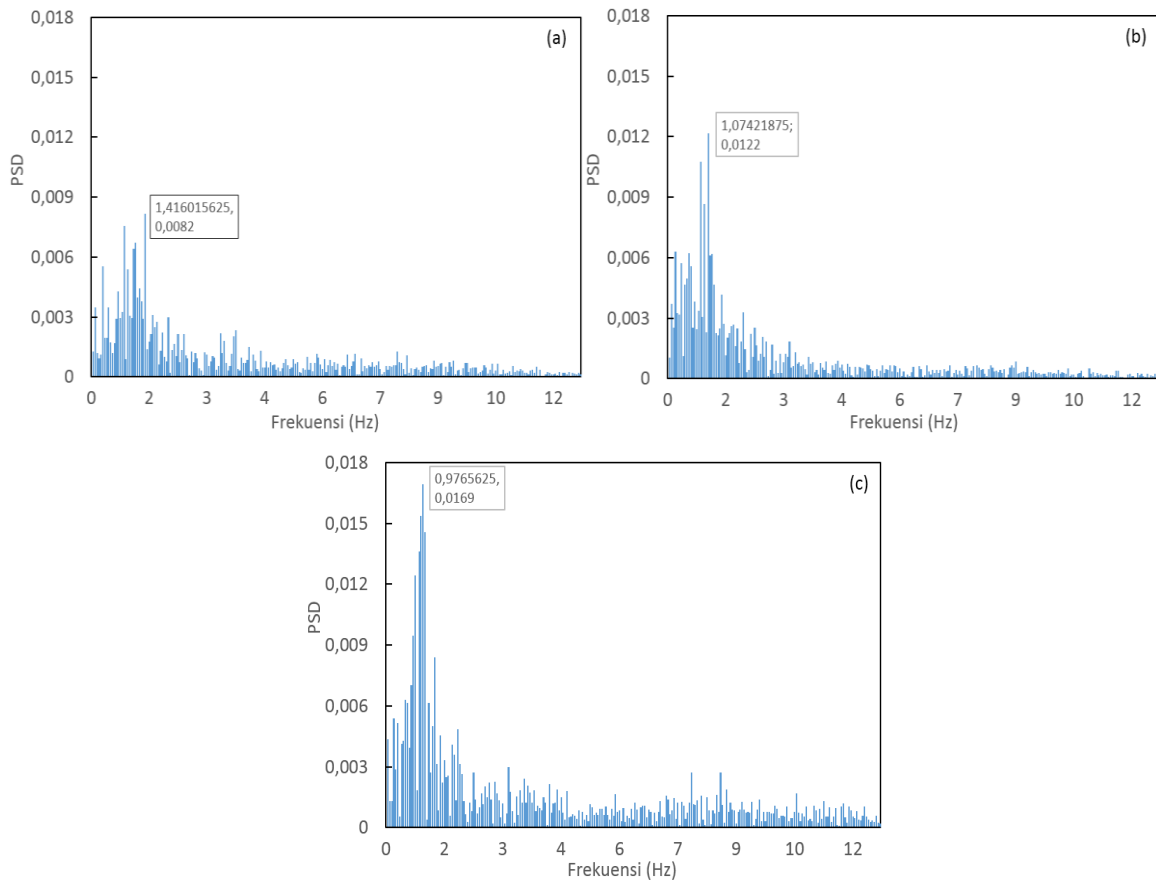


Gambar 5: Sekuensial waktu fluktuasi voltase sinyal tekanan pada debit air dan udara, 1,9 dan 90 lpm berturut-turut untuk setiap rasio I/D., (a) R1, (b) R2, dan (c) R3.

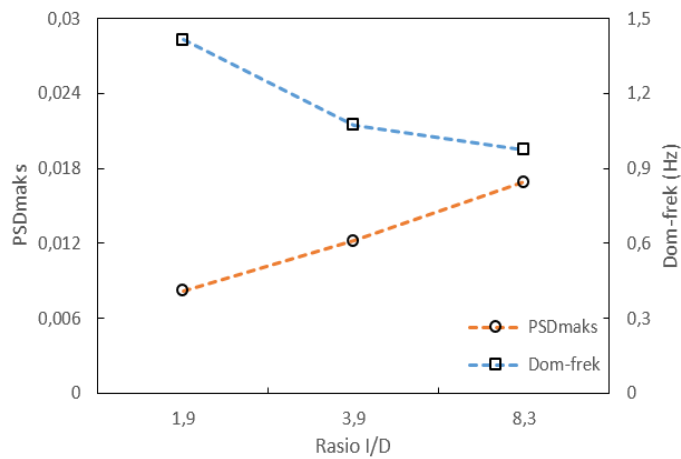
3.3 Kerapatan Spektrum Daya (*Power Spectral Density/PSD*)

PSD masing-masing harga rasio I/D diperlihatkan di Gambar 6. Sementara itu, Gambar 7 merepresentasikan pengaruh rasio I/D terhadap harga maksimum PSD (*PSDmax*) dan frekuensi dominan (*Dom-frek*) fluktuasi

sinyal tekanan. Dari gambar tersebut terlihat bahwa seiring peningkatan rasio I/D , frekuensi dominan turun ke frekuensi lebih rendah. Lebih lanjut, nilai spektrum frekuensi tertinggi meningkat seiring peningkatan rasio I/D . Menyepakati hasil Arabi *et al.* [15], frekuensi harmonik sebagai representasi frekuensi *slug* tampak stokastik.



Gambar 6: PSD fluktuasi voltase sinyal tekanan pada pada debit air dan udara, 1,9 dan 90 lpm berturut-turut untuk setiap rasio I/D ., (a) R1, (b) R2, dan (c) R3.

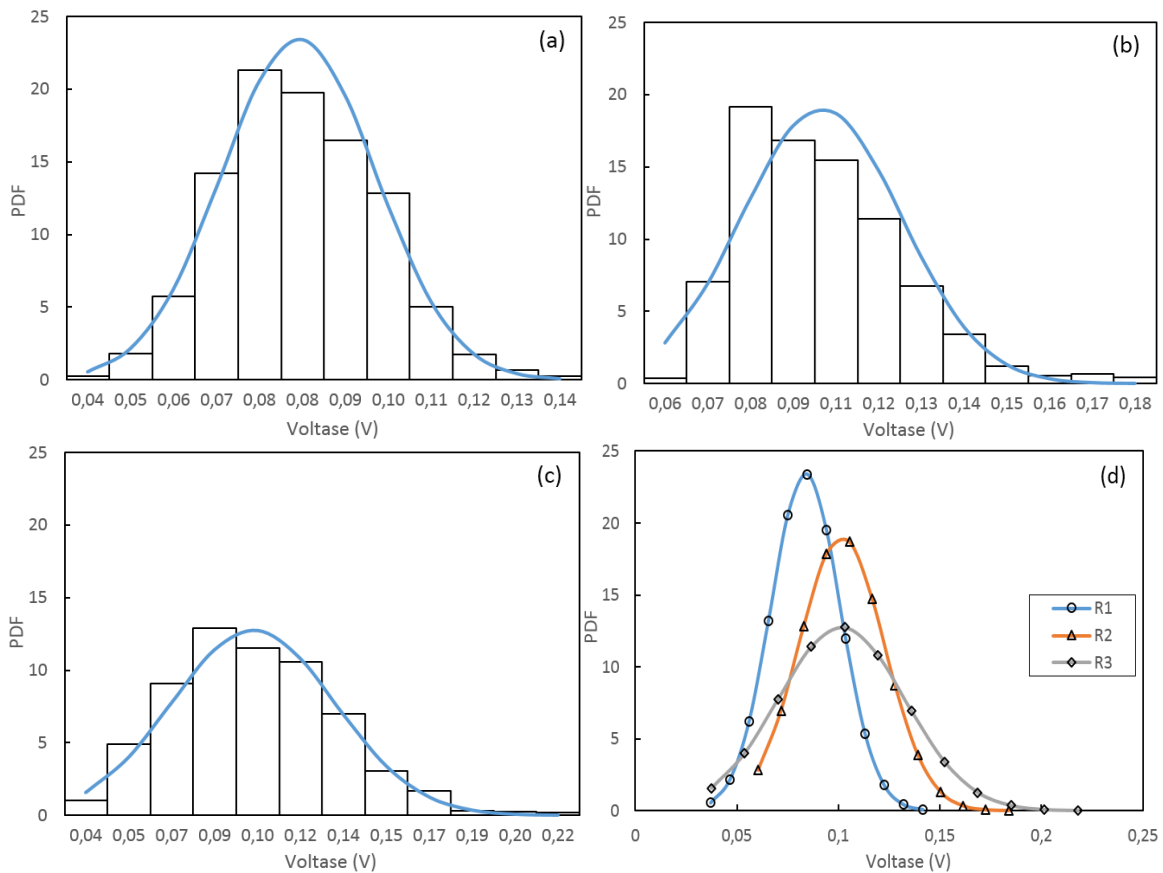


Gambar 7: Pengaruh rasio I/D terhadap harga maksimum PSD dan frekuensi dominan fluktuasi sinyal tekanan pada debit air dan udara, 1,9 dan 90 lpm untuk setiap rasio I/D .

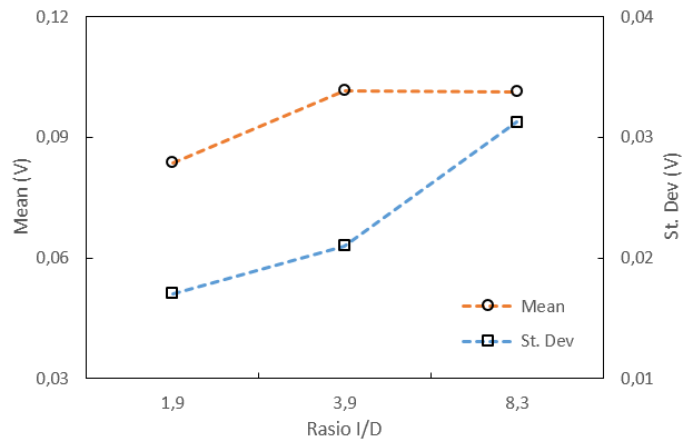
3.4 Fungsi Kerapatan Peluang (*Probability Density Function/PDF*)

Fungsi kerapatan peluang (PDF) untuk masing-masing rasio I/D diperlihatkan di Gambar 8. Sementara itu, Gambar 9 merepresentasikan pengaruh rasio I/D terhadap harga rerata (*mean*) dan simpangan baku (St. Dev) fluktuasi voltase sinyal tekanan. Dari gambar terlihat bahwa seiring peningkatan rasio I/D , voltase puncak mengalami penurunan kerapatan peluang. Lebih lanjut, terlihat pula bahwa peningkatan rasio I/D membawa

kenaikan harga simpangan baku dari data yang didapatkan. Sementara itu tidak terlihat kejelasan kecenderungan harga *mean* data untuk perubahan rasio-rasio I/D ini.



Gambar 8: Histogram dan PDF fluktuasi voltase sinyal tekanan pada debit air dan udara, 1,9 dan 90 lpm berturut-turut untuk setiap rasio I/D., (a) R1, (b) R2, (c) R3 dan (d) komparasi PDF nya.



Gambar 9: Pengaruh rasio I/D terhadap harga *mean* dan simpangan baku fluktuasi voltase sinyal tekanan pada debit air dan udara, 1,9 dan 90 lpm untuk setiap rasio I/D.

4. KESIMPULAN

Pengaruh rasio I/D terhadap permulaan *flooding* dan sekuensial waktu fluktuasi voltase sinyal tekanan pada suatu geometri kompleks telah dikaji dalam penelitian ini. Tiga rasio I/D, masing-masing R1, R2, dan R3 dikomparasikan, baik dalam suatu kurva permulaan *flooding*, maupun grafik-grafik statistik pengolahan data fluktuasi voltase sinyal tekanan, yaitu PSD dan PDF. Hasil-hasil permulaan *flooding* yang diperoleh juga dikomparasikan dengan beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan geometri sejenis. Secara umum hasil-hasil tersebut dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Beberapa kesesuaian terhadap penelitian terhadulu pada kurva CCFL telah diperoleh. Hal ini sekaligus mengimplikasikan bahwa metodologi penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.
2. Wilayah kedua pada kurva CCFL memberikan keuntungan apabila terjadi skenario LOCA. Pada rentang ini, permulaan *flooding* terjadi lebih lambat seiring peningkatan debit udara.
3. *Pressure drop* cenderung meningkat seiring peningkatan harga rasio I/D untuk harga debit air dan udara yang sama selama rezim *flooding*.
4. Harga-harga rasio I/D yang digunakan dalam penelitian ini belum memberikan pengaruh signifikan terhadap tercapainya permulaan *flooding*. Hanya pada rentang $0,2 < (J_L^*)^{1/2} < 0,3$ pengaruh rasio I/D cukup terlihat jelas, namun dengan tren yang relatif serupa.

Lebih lanjut, penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut. Harga rasio I/D yang dipilih dan tampaknya belum memberikan pengaruh signifikan terhadap fluktuasi tekanan tetap berpotensi memberikan pengaruh berbeda terhadap fraksi hampa fluida kerja. Beranjak dari beberapa literatur yang memberikan porsi cukup banyak mengenai analisis sinyal fraksi hampa tersebut, pangaruh rasio I/D terhadap fluktuasi sinyal fraksi hampa perlu dikaji.

5. PERNYATAAN TERIMAKASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Kemendikbud Ristek atas skema Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPPDN) 2019 serta Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat (DRPM) Kemendikbud Ristek atas skema hibah bersaing Penelitian Disertasi Doktor (PDD) 2021 yang memungkinkan pengembangan berkelanjutan penelitian ini. Manuskrip ini ditulis sebagai bagian dari rangkaian kegiatan riset akademis pendidikan doctoral tentang aliran multifase di Laboratorium Mekanika Fluida, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Berkenaan dengan beberapa hal teknis dalam penelitian ini, kami sangat mengapresiasi diskusi serta dukungan dari Dr. Andreas Prasetyadi, Dr. (Cand) I Gusti Ngurah Bagus Catrawedarma, Dr. (Cand) Setya Wijayanta dan Christina Deni Rumiarti, M.T.I.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] BREEZE, P., “*Power Generation Technologies*”, Chapter 17, pp. 353-378, Elsevier, Amsterdam, Netherland, 2014.
- [2] AL ISSA, S., MACIAN, R., “A review of CCFL phenomenon”, *Annals of Nuclear Energy*, v. 38, pp. 1795-1819, 2011.
- [3] DEENDARLIANTO, HOHNE, T., LUCAS, VIERO, K., “Gas-liquid countercurrent two-phase flow in a PWR hot leg: A comprehensive research review”, *Nuclear Engineering and Design*, v. 243, pp. 214-233, 2011.
- [4] WONGWISES, S., “Two-phase countercurrent flow in a model of pressurized water reactor hot leg”, *Nuclear Engineering and Design*, v. 166, pp. 121-133, 1996.
- [5] NAVARRO, M.A., “Study of countercurrent flow limitation in a horizontal pipe connected to an inclined one”, *Nuclear Engineering and Design*, v. 2235, pp. 1139-1148, 2005.
- [6] DEENDARLIANTO, VALLEE, 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*, V. 238, pp. 3389–3402, 2008.
- [7] KINOSHITA, I., NRIAI, T., TOMIYAMA A., LUCAS D., MURASE, M., “Effects of liquid properties on CCFL in a scaled-down model of a PWR hot leg”, *Journal of Power and Energy Systems*, v. 5, n. 3, pp. 316-329, 2011.
- [8] BADARUDIN, A., SETYAWAN, A., DINARYANTO, O., WIDYATAMA, A., INDARTO, DEENDARLIANTO, “Interfacial behavior of the air-water counter-current two-phase flow in a 1/30 scale -down of pressurized water reactor (PWR) hot leg”, *Annals of Nuclear Energy*, v. 116, pp. 376-387, 2008.
- [9] WAHYUDI, N., SOENOKO, R., WAHYUDI, S., “Pengaruh variasi diameter injector konvergen udara terhadap fenomena flooding dalam aliran dua fase gas-cairan berlawanan arah pada pipa vertikal”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 4, n. 3, pp. 204-211, 2013.

- [10] LUO, X.M., HE, L.M., LU, Y.L., “Fluctuation characteristics of gas liquid two phase slug flow in horizontal”, *AIP Conf. Proc.* 1207, 162, 2010.
- [11] RODRIGUES, R.L.P., COZIN, C., NAIDEK, B.P., NETO, M.A.M., DA SILVA, M.J., MORALES., R.E.M., “Statistical features of the flow evolution in horizontal liquid-gas slug flow”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 119, 110203, 2005.
- [12] SANTOSO, B., INDARTO, DEENDARLIANTO, THOMAS, S.W., “Fluktuasi beda tekanan dari pola aliran slug air-udara pada aliran dua fase searah pipa horizontal”, *Jurnal Teknik Mesin Rotasi*, v. 14, n. 2, pp. 1-6, 2012.
- [13] JAIBOON, O., CHALERMSINSUWAN, B., MEKASUT, L., PIUMSOMBOON, P., “Effect of flow pattern on power spectral density of pressure fluctuation in various fluidization regimes”, *Powder Technology*, v. 233, pp. 215-226, 2013.
- [14] WALLIS, G.B., “*One-dimensional two-phase flow*”, Chapter 11, pp. 336-345, New York, USA, McGraw Hill, 1969.
- [15] ARABI, A., SALHI, Y., ZENATI, Y., SI-AHMED, E.K., LEGRAND, J., “On gas-liquid intermittent flow in a horizontal pipe: Influence of sub-regime on slug frequency”, *Chemical Engineering Science*, v. 211, 115251, 2020.
- [16] WALPOLE, R.E., “*Pengantar Statistika*”, Jakarta, Indonesia, Gramedia Pustaka Utama, 1995.