

JURNAL REKAYASA MESIN





About the Journal

Rekayasa Mesin is published by Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Brawijaya, Malang-East Java-Indonesia. **Rekayasa Mesin** is an open-access peer reviewed journal that mediates the dissemination of academicians, researchers, and practitioners in mechanical engineering. **Rekayasa Mesin** accepts submission from all over the world, especially from Indonesia.

Rekayasa Mesin aims to provide a forum for national and international academicians, researchers and practitioners on mechanical engineering to publish the original articles. All accepted articles will be published and will be freely available to all readers with worldwide visibility and coverage.

The scope of **Rekayasa Mesin** is **specific topics issues** in mechanical engineering such as design, energy conversion, manufacture, and metallurgy.

In terms of plagiarism and self-plagiarism, the similarity index from multiple sources **should not exceed 20 %** and from a single source **should not exceed 5%**. **Rekayasa Mesin** uses a plagiarism detector to screen articles for detecting plagiarism. Detection of overlapping and similar text is used there and so quotations and appropriate citations have to be used whenever required.

All articles submitted to this journal can be written in **Bahasa and English Language**.

Rekayasa Mesin has been indexed in [Directory of Open Access Journals \(DOAJ\)](#), [SINTA](#), [Google Scholar](#), and [Garba Rujukan Digital \(GARUDA\)](#).

Rekayasa Mesin has been nationally **reaccredited** by the Ministry of Research and Technology/National Research and Innovation Agency of the Republic of Indonesia (Volume 11 No 2 2020 - Volume 16 No 1 2025) and indexed in **SINTA 2**.

Decree No. **200/M/KPT/2020 on December 23rd, 2020**

P-ISSN [2338-1663](#) | **E-ISSN** [2477-6041](#) | **DOI prefix** [10.21776/ub.jrm](#)

New Template for Rekayasa Mesin Publication

 2023-06-02

We would like to announce that **Rekayasa Mesin** has a new layout style. This change is starting from May 2023 edition. For articles written using the old layout will be asked to change it after the article is **Accepted**.

Thank you very much.

[Read More >](#)

Email Address of Author

 2022-02-17

Reaccredited of Rekayasa Mesin

 2021-02-21

Journal Subscription

 2016-08-26

Current Issue

Vol. 15 No. 2 (2024)



Published: 2024-08-15

Articles

PERBANDINGAN PENGGUNAAN KONDENSOR BERPENDINGIN UDARA DENGAN KONDENSOR BERPENDINGIN AIR PADA LEMARI PENDINGIN

Agus Dwi Korawan
561-571

 [PDF](#)

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK PENGABUTAN BAHAN BAKAR DIESEL, BIODIESEL DAN CAMPURANNYA

Intan Hardiatama, Muhammad Lutfi Aziz, Nasrul Ilimafik, Andi Sanata, Ahmad Adib Rosyadi
573-586

 [PDF](#)

PERSAMAAN REGRESI LINIER BERGANDA UNTUK MEMPREDIKSI EFISIENSI BOILER

Eko Sarwono, Martin Choirul Fatah , I Made Indradjaja Marcus Brunner Brunner
587-603



ANALISIS KINERJA MESIN ROTARY DRYER BERBAHAN BAKAR GAS LPG UNTUK PENDINGINAN GABAH

Abdul Mukhlis Ritonga, Mustaufik Mustaufik, Adeka Sangtraga Hitapriya , Jannata Utswatun Khasanah
605-618



A RECENT REVIEW ON THE FAILURE ANALYSIS OF BOILER TUBE

Faris Fadhil Utomo, Muhammad Ibnu Rashid, Ariyana Dwiputra Nugraha, Muhammad Akhsin Muflikhun
619-646



ANALISIS PENGARUH MEDAN MAGNET TERHADAP UKURAN ATOMISASI BAHAN BAKAR CAMPURAN GASOLINE DAN BIOETANOL

Tatun Hayatun Nufus, Dianta Mustofa Kamal, Gun Gun R Gunadi, Candra Damis Widiawati, Asep Apriana, Muhammad Todaro
647-655



INVESTIGASI MIKROSTRUKTUR DAN KEKERASAN MATERIAL GEARBOX TRAKTOR TANGAN DENGAN METODE PENGECORAN LOGAM

Roni Kusnowo, M. Rizki Gorbyandi Nadi, Gita Novian Hermana, Ari Siswanto , Muhammad Nahrowi , Cecep Ruskandi , Yun Gemilang
657-667



EFEK METODE FABRIKASI TERHADAP SIFAT MEKANIK PADA MATERIAL KOMPOSIT SANDWICH 3C3 KARBON UD 12 K 0°/DIVINYCELL CORE

Nurul Lailatul Muzayadah Muzayadah, Indah Fitri Hardiyant, Afid Nugroho Nugroho, Rian Suari Aritonang Aritonang, Taufiq Satrio Nurtiasto Nurtiasto
669-683



OPTIMASI PARAMETER PROSES 3D PRINTING TERHADAP KELENGKUNGAN SOFT PNEUMATIC GRIPPER DENGAN MENGGUNAKAN FILAMENT EFLEX

Hasdiansah Hasdiansah, Thala Viniolita Viniolita , Pristiansyah Pristiansyah , Herianto Herianto
685-692



OPTIMIZATIONS THE TENSILE-SHEAR STRENGTH OF TIG WELDING PARAMETERS FOR MILD STEEL AT DIFFERENT MATERIAL THICKNESSES

Tegar Dwicahyo, Arul Basit, Amar Amar, Sukarman Sukarman, Khoirudin Khoirudin, Ade Suhara
693-706



DESIGN AND TEST THE PERFORMANCE OF THE WATER HEATER BY UTILIZING THE EXHAUST HEAT OF THE LABORATORY SCALE AIR CONDITIONER

Gunarto Gunarto, Eko Julianto, Muhammad Iwan
707-717



UJI EFISIENSI ANODA KORBAN PADUAN ALUMINIUM DAN ZINC MENGGUNAKAN STANDAR UJI DNV RP-B401 TERHADAP VARIASI TEMPERATUR ELEKTROLIT

Tubagus Noor Rohmannudin, Sulistijono Sulistijono, Willy Deviet Kusuma, Grace Aghata Sitorus
719-728



OPTIMIZATION OF INJECTION MOLDING PARAMETERS TO MINIMIZE SHRINKAGE AND MAXIMIZE TENSILE STRENGTH IN THE RECYCLING PROCESS OF DISPOSABLE FACE MASKS

Irvan Bayu Widyasmoro, Indah Widiastuti, Yuyun Estriyanto, Khansa Qonitatillah Budiyanto
729-739



PEMBANGKITAN TEGANGAN MENGGUNAKAN KARBON AKTIF TEMPURUNG KELAPA DENGAN ELEKTROLIT AIR

Si Putu Gede Gunawan Tista, I Gusti Ngurah Nitya Santhiarsa, Ketut Astawa, I Gusti Ngurah Putu Tenaya, Komang Metty Trisna Negara
741-755



IMPLEMENTASI STOKASTIK PADA INVESTIGASI PENGARUH I/D TERHADAP PERILAKU ANTARMUKA ALIRAN BERLAWANAN ARAH DI GEOMETRI 1/30 HOT LEG PWR MENGGUNAKAN SENSOR KONDUKTANSI

Achilleus Hermawan Astyanto, Muchsin Muzafar Rasyidi, Akhlisa Nadiantya Aji Nugroho, Alfikri Ikhsan, Dede Rafico Saleh
757-769



SMART ANDON SYSTEM BASED ON INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS (IIOT)

Wahyudi Purnomo, Gun Gun Maulana, Fitria Suryatini, Adhitya Sumardi Sunarya
771-781



PENGARUH WATER COOLANT TERHADAP EFEKTIFITAS RADIATOR PADA MESIN TOYOTA KIJANG SERI 4K

Eddy Elfiano, Heri Suripto, Kurnia Hastuti, Jhonni Rahman, Purwo Subekti , Eho Zinomeza
783-795



PERANCANGAN SISTEM KONSTRUKSI MEKANIK 3D PRINTER GEOPOLYMER TYPE CARTESIAN

Heri Setiawan, Rani Nopriyanti, Antonius Adi Soetopo, Nandang Rusmana, Iwan Gunawan, Pandoe, Herman Budi Harja, Faisal Rahmat Hadi
797-807



RANCANGAN TRACKING MATERIAL SYSTEM UNTUK PELACAKAN DAN PEMINDAHAN KOMPONEN ANTAR GUDANG (STUDI KASUS PT. PINDAD)

Ilham Afif, Pratikto, Yeni Sumantri
809-821



PLANNING AND SCHEDULING IN AUTOMATIC TRAIN SIGNALING MAINTENANCE: A REVIEW

Rachmad Dwi Raharjo, Satrio Wicaksono, Bagus Budiwantoro
823-835



PENGARUH JUMLAH ISIAN PROPELAN TERHADAP KECEPATAN PROYEKTIL MUNISI KALIBER 40X46 MM NON-LETHAL

Yudistira Sanjiwani, Pratikto Pratikto, Yudy Surya Irawan
837-847



KARAKTERISASI SIFAT FISIK, KIMIA, DAN MEKANIK SERAT SELULOSA ALAMI DARI AMPAS TEBU

Sis Nanda Kus Andrianto, Femiana Gapsari Madhi Fitri, Widya Wijayanti
849-861



FEASIBILITY STUDY OF GROUND ENHANCEMENT MATERIAL (GEM) PRODUCTION STARTUP AS AN IMPORT SUBSTITUTION BASED ON TECHNOLOGICAL AND FINANCIAL ASPECTS

Jakah Jakah, Andis Prisantoro, Putra Zaki Farakhan, Herwin Syah, Eko Tri Sumarnadi, Wawan Herawan
863-874



PENGARUH PENAMBAHAN RADIUS PADA KECEPATAN DAN FREKUENSI SLUG DI DAERAH DOWNSTREAM T-JUNCTION MINICHANNEL

Leila Hanjani Hananto, Indarto, Untung Surya Dharma, Deendarlianto

875-884



PIROLISIS MENGGUNAKAN SCREW SEBAGAI PRESSURE DROP DAN SIRIP PADA KONDENSOR

Erlanda A Pane, Stevanus Budi Rahardjo, Ismail Ismail

885-899



DEVELOPMENT OF MESSAGE CHAIR MADE OF CARDBOARD MATERIALS: DESIGN, FABRICATION, AND STRENGTH EVALUATION

Siti Zulaikah, Farid Triawan , Bentang Arief Budiman , Yusuf Romadhon

901-910



REVIEW: VARIOUS TREATMENTS NAOH, SEA WATER, FUMIGATION, LIQUID SMOKE TO IMPROVE TENSILE STRENGTH AND SURFACE MORPHOLOGY OF NATURAL FIBER

Mukhlis Muslimin, Willy Artha Wirawan, Musa Bondaris Palungan

911-918



IMPLEMENTASI DAN PENGUJIAN PROTOTYPE TURBIN JENIS PROPELLER UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO

Rafiandi Dyaa Sudiro, Levin Halim, Bagus Made Arthaya

919-936



KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH PARAMETER OPERASI TERHADAP PEMECAHAN GELEMBUNG DAN KINERJA PEMBANGKIT GELEMBUNG MIKRO TIPE SWIRL

Drajat Indah Mawarni, Wiratni Budhijanto Budhijanto , Deendarlianto Deendarlianto , Hartono Guntur Ristiyanto Ristiyanto , Wawan Dedi Marahendra Marahendra , Indarto Indarto

937-944



EVALUASI KONVERSI DAN DISTRIBUSI ENERGI PADA RESEARCH TEST ENGINE TIPE 240PE BERBAHAN BAKAR GASOLINE JENIS PERTALITE

Marthen Paloboran, Thesya Atarezcha Pangruruk Pangruruk , Darmawang Darmawang, Yunus Tjandi Tjandi , Yasdin Yasdin , Wabdillah Wabdillah , Wabdillah Wabdillah , Udin Sidik Sidin, Asmeati Asmeati

945-954



SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA PADA KINCIR AIR MENGGUNAKAN METODE SLIDING MESH INTERFACE

Agato Agato, Deendarlianto Deendarlianto, Indarto Indarto, Alfeus Sunarso

955-966



PENGARUH VARIASI TEMPERATUR FURNANCE BRAZING TERHADAP SIFAT MEKANIK DALAM PEMBUATAN GRINDING ROLL MATERIAL FCD 500 DAN NI-HARD1

Ari Siswanto, Kus Hanaldi , Wiwik Purwadi , M. Rizki Gorbyandi Nadi

967-978



REVIEW OF SPEED PROFILE OPTIMIZATION METHODS FOR ENERGY EFFICIENCY IN TRAIN

Kusuma Abdilllah, Leonardo Gunawan Gunawan , Yunendar Aryo Handoko Handoko

979-996



PREDICTION OF LOCATOR PIN ERRORS IN FACING PROCESS USING NEURAL NETWORK AND SUPPORT VECTOR REGRESSION

Ramdhani Yusli Arbain Sugoro, Agung Wibowo, Kurniawan Aji Muhammad

997-1006



ANALISIS KINERJA KOMPOR GAS BERBAHAN BAKAR DIMETHYL ETHER DENGAN VARIASI DIAMETER LUBANG ANGIN PADA NOSEL

Seno Sutrisno, Sigit Iswahyudi, Rany Puspita Dewi

1007-1021



OBSERVASI PENURUNAN TEKANAN (PRESSURE DROP) PADA SISTEM PERPIPAAN: PENGARUH PANJANG DAN DIAMETER PIPA, ELBOW, DAN TEE

Nuryoto Nuryoto, Rahmayetty Rahmayetty, Yusuf Rumbino, Astrilia Damayanti, Doni Rahmat Wicakso

1023-1039



MOLD DESIGN AND FLOW ANALYSIS FOR PRODUCT PROPELLER APC SF 11X4.7 WITH MINIMUM SHRINKAGE AND WARPAGE

Wahyu Puji Sahputra, Cahyo Budiyanoro, Gesang Nugroho, Muhammad Kevin Adam

1041-1051



POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR HUJAN PLTAH SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK PIRANTI ELEKTRONIK RUMAH TANGGA

Zuffa Anisa, Erwanto Erwanto

1053-1065



PDF

PERANCANGAN ALAT BENCH TEST DENGAN 5 VALVE UJI CLASS 800 UNTUK SATU SIKLUS

Felix Dionisius, Muhammad Taqiyyudin Annabani , Suhardi Suhardi, Chaerul Chaerul

1067-1078



PDF

PENGARUH PERSENTASE ZIRCONIA BALL TERHADAP VOLUME MILL JAR PADA PROSES PENGHALUSAN SERBUK KERAMIK ALUMINA DENGAN ALAT HORIZONTAL BALL MILL

Ade Indra, Fadrian Wigianto Wigianto , Mastariyanto Perdana

1079-1090



PDF

PENGARUH SILIKA TERHADAP KARAKTERISTIK FILM LATEKS KARET ALAM DALAM PENGAPLIKASIAN BLADDER COMPRESSION MOULDING

M. Sagitra Pranata, G. Nugroho, Ihda Novia Indrajati, Indiah Ratna Dewi

1091-1098



PDF

ANALISIS EKSPERIMENTAL PENGARUH BELOKAN TAJAM DAN SUSUNAN PIPA TERHADAP PERPINDAHAN PANAS PADA SOLAR WATER HEATER

Muhammad Syukri Nasution, Ahmad Syuhada, Razali Razali

1099-1108



PDF

ANALISIS PENGARUH BENTUK LUBANG TERHADAP KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS PADA MENARA PENDINGIN TIPE PLAT DATAR BERLUBANG BERTINGKAT

Yulanda Dwi Mustika, Ahmad Syuhada, Razali Razali

1109-1119



PDF

EFFECT OF DIAMETER BEARING MOUNTS TO STRESS CONCENTRATION FACTOR ON TRUCK GEARBOX CASING

Rakhmad Arief Siregar, Muhammad Yusuf Rahmansyah Siahaan; Mahmud Rizal

1121-1128



PDF

ANALISIS PENGARUH PERBEDAAN SURFACE PREPARATION DENGAN VARIASI JENIS CAT TERHADAP KEKUATAN ADHESI DAN KETAHANAN IMPACT COATING PADA BAJA SS400

Zahra Sativa , Parlindungan Manik Manik , Ocid Mursid

1129-1141



PDF

STUDI PENGARUH PERLAKUAN ALKALI TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN MORFOLOGI KOMPOSIT SERAT PELEPAH KELAPA SAWIT BERMATRIK UREA FORMALDEHIDA

Budi Istana, Lega Putri Utami
1143-1151



RANCANGAN SISTEM HIDROLIK PADA FRONT ATTACHMENT ALAT PERAGA MINI EXCAVATOR

Sigit Purwanto , Nyayu Aisyah , Braam Delfian Prihadianto, Radhian Krisnaputra , F. Eko Wismo , Irfan Bahiuddin
1153-1163



KINERJA SISTIM HIDROLIK PADA UNIT EXCAVATOR 320D2 CATERPILLAR

Abdul Halim , Ma'arif Fadli , Mangkona Mangkona
1165-1174



MEL-FREQUENCY CEPSTRAL COEFFICIENTS (MFCC) FEATURE FOR PUMP ANOMALY DETECTION IN NOISY ENVIRONMENTS

Anindita Adikaputri Vinaya, Tiffani Febiola Aciandra
1175-1186



DYNAMIC ANALYSIS OF NON-PNEUMATIC TIRES WITH HONEYCOMB SPOKES ON SPEED BUMPS

Rachmat Sriwijaya, Fakhri Ghiffari , Zahran Ra'if , Burhani Wijaya
1187-1201



[View All Issues >](#)

[Open Journal Systems](#)

[Make a Submission](#)

About Rekayasa Mesin

[Focus and Scope](#)

[Editorial Team](#)



IMPLEMENTASI STOKASTIK PADA INVESTIGASI PENGARUH I/D TERHADAP PERILAKU ANTARMUKA ALIRAN BERLAWANAN ARAH DI GEOMETRI 1/30 HOT LEG PWR MENGGUNAKAN SENSOR KONDUKTANSI

Achilleus Hermawan Astyanto

<https://orcid.org/0000-0002-0199-3839>

Muchsin Muzafar Rasyidi

Akhliisa Nadiantya Aji Nugroho

Alfikri Ikhsan

Dede Rafico Saleh

DOI: <https://doi.org/10.21776/jrm.v15i2.1531>

Keywords: Statistical Parameter, Flow Pattern, Flow Rate, Two-Phase Flow, Gas flow rate

Abstract

A small leakage in the primary circuit of a nuclear power plant reactor may trigger the occurrence of countercurrent flow which probably develops into a flooding regime followed by the zero penetration caused core cooling failure. During extensive studies in the flooding phenomena in the PWR hot leg, the geometry effects have been widely investigated. The present study investigates the effects of I/D ratios of the riser on the interfacial fluctuations during the counter-current flow on a 1/30 scaled down PWR hot leg geometry. Here, the liquid film fluctuations were acquired by using parallel wire array probes on the basis of a conductance concept. Three I/D ratios which were varied consisted 1.9 (R1), 3.9 (R2) and 8.3 (R3). The obtained data were analyzed on the basis of both time and frequency domains. From the PDF the flooding regime obtains multimodal distributions, while the PSD approaches lower frequencies with higher magnitudes corresponding to either the occurrence of water blockage or slugs.

Keywords: I/D ratio, water level fluctuation, counter-current flow, PWR hot leg, parallel wire array probe, stochastic analysis.

References

Deendarlianto, A. Ousaka, A. Kariyasaki, and T. Fukano, "Investigation of liquid film behavior at the onset of flooding during adiabatic counter-current air-water two-phase flow in an inclined pipe," Nucl. Eng. Des., vol. 235, no. 21, pp.

2281–2294, 2005, doi: 10.1016/j.nucengdes.2005.03.006.

Deendarlianto et al., "The effects of surface tension on flooding in counter-current two-phase flow in an inclined tube," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 34, no. 7, pp. 813–826, 2010, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.01.010.

Deendarlianto, C. Vallée, D. Lucas, M. Beyer, H. Pietruske, and H. Carl, "Erratum: 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)," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 241, no. 8, pp. 3359–3372, 2011, doi: 10.1016/j.nucengdes.2011.02.028.

A. Badarudin, Indarto, Deendarlianto, and A. Setyawan, "Characteristics of the air-water counter current two-phase flow in a 1/30 scale of pressurized water reactor (PWR): Interfacial behavior and CCFL data," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1737, 2016, doi: 10.1063/1.4949303.

A. Badarudin et al., "The effect of horizontal pipe length to the onset of flooding position on the air-water counter current two-phase flow in a 1/30 scale of pressurized water reactor (PWR)," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2001, no. June 2020, 2018, doi: 10.1063/1.5049983.

A. Badarudin, A. Setyawan, O. Dinaryanto, A. Widyatama, Indarto, and 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," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 116, pp. 376–387, 2018, doi: 10.1016/j.anucene.2018.03.007.

Y. V. Yoanita, S. Tirtha, E. Kumolosari, and B. G. Purnomo, "Fenomena aliran udara-air berlawanan arah pada pipa horizontal pada $L/D = 25$ dan $L/D = 50$," *J. Automot. Technol. Vocat. Educ.*, vol. 1, no. 1, pp. 21–32, 2020, doi: 10.31316/jatve.v1i1.670.

S. Wijayanta, Deendarlianto, Indarto, A. Prasetyo, and A. Z. Hudaya, "International Journal of Multiphase Flow The effect of the liquid physical properties on the wave frequency and wave velocity of co-current gas-liquid stratified two-phase flow in a horizontal pipe," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 158, no. 2, p. 104300, 2023, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104300.

A. H. Astyanto, A. N. A. Nugroho, Indarto, I. Gusti Ngurah Bagus Catrawedarma, D. Lucas, and Deendarlianto, "Statistical characterization of the interfacial behavior captured by a novel image processing algorithm during the gas/liquid counter-current two-phase flow in a 1/3 scaled down of PWR hot leg," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 404, no. 2, p. 112179, 2023, doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112179.

A. H. Astyanto, Indarto, and Deendarlianto, "A Brief on Optical-based Investigation towards The Interfacial Behaviors during High Viscous Liquid / Gas Countercurrent Two-Phase Flow in a Complex Conduit Representing 1 / 30 Down- Scaled of PWR Hot Leg Geometry," *Int. J. Appl. Sci. Smart Technol.*, p. 30.

J. E. Koskie, I. Mudawar, and W. G. Tiederman, "Parallel-wire probes for measurement of thick liquid films," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 15, no. 4, pp. 521–530, 1989, doi: 10.1016/0301-9322(89)90051-7.

I. Kinoshita, T. Nriai, A. Tomiyama, D. Lucas, and M. Murase, "Effects of Liquid Properties on CCFL in a Scaled-Down Model of a PWR Hot Leg," *J. Power Energy Syst.*, vol. 5, no. 3, pp. 316–329, 2011, doi: 10.1299/jpes.5.316.

- R. L. P. Rodrigues, C. Cozin, B. P. Naidek, M. a. Marcelino Neto, M. J. da Silva, and R. E. M. Morales, "Statistical features of the flow evolution in horizontal liquid-gas slug flow," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 119, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110203.
- A. Ikhsan, A. H. Astyanto, Indarto, and Deendarlianto, "Kajian Eksperimental Karakteristik Perilaku Hot Leg Pwr Menggunakan Sensor Kawat Sejajar Experimental Study of Behavioral Characteristics of Counterflow Interface in Geometry 1 : 30 Hot Leg," *Semin. Nas. Multidisiplin Ilmu Univ. Respati Yogyakarta*, vol. 3, no. 1, pp. 141–149, 2021.
- A. H. Astyanto, J. A. E. Pramono, I. G. N. B. Catrawedarma, Deendarlianto, and Indarto, "Statistical characterization of liquid film fluctuations during gas-liquid two-phase counter-current flow in a 1/30 scaled-down test facility of a pressurized water reactor (PWR) hot leg," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 172, p. 109065, 2022, doi: 10.1016/j.anucene.2022.109065.
- H. Canière et al., "Horizontal two-phase flow characterization for small diameter tubes with a capacitance sensor," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 9, pp. 2898–2906, 2007, doi: 10.1088/0957-0233/18/9/020.
- E. dos Reis and L. J. Goldstein, "Characterization of slug flows in horizontal piping by signal analysis from a capacitive probe," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 21, no. 3, pp. 347–355, 2010, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2010.04.006.
- A. Z. Hudaya, A. Widyatama, O. Dinaryanto, W. E. Juwana, Indarto, and Deendarlianto, "The liquid wave characteristics during the transportation of air-water stratified co-current two-phase flow in a horizontal pipe," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 103, no. January, pp. 304–317, 2019, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.01.021.
- S. Wijayanta, Indarto, Deendarlianto, I. G. N. B. Catrawedarma, and A. Z. Hudaya, "Statistical characterization of the interfacial behavior of the sub-regimes in gas-liquid stratified two-phase flow in a horizontal pipe," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 83, no. 2, p. 102107, 2022, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.102107.
- I. G. N. B. Catrawedarma, Deendarlianto, and Indarto, "Statistical Characterization of Flow Structure of Air–water Two-phase Flow in Airlift Pump–Bubble Generator System," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 138, p. 103596, 2021, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103596.
- I. G. N. B. Catrawedarma, F. A. Resnaraditya, Deendarlianto, and Indarto, "Statistical characterization of the flow Structure of air–water–solid particles three-phase flow in the airlift pump–bubble generator system," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 82, no. 2018, p. 102062, 2021.
- A. H. Astyanto, Y. Rahman, A. Y. Adhikara, Indarto, and Deendarlianto, "Time-series differential pressure fluctuations of a flooding regime : A preliminary experimental results investigation on a 1 / 30 down- scaled PWR hot leg geometry," *AIP Conf. Proc.*, vol. 060001, no. 2011, 2021.
- A. H. Astyanto, Y. Rahman, A. Y. A. Medha, Deendarlianto, and Indarto, "Pengaruh Rasio I/D terhadap Permulaan Flooding dan Fluktuasi Voltase Sinyal Tekanan Rezim Flooding pada Geometri Kompleks," *Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. August, pp. 447–457, 2021, doi: <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.02.21>.
- A. H. Astyanto, "Pengaruh Sifat Fisis Cairan terhadap Karakteristik Flooding pada Geometri 1/30 Hot Leg PWR," *Universitas Gadjah Mada*, 2023.

A. H. Astyanto, Indarto, K. V. Kirkland, and Deendarlianto, "An experimental study on the effect of liquid properties on the counter-current flow limitation (CCFL) during gas / liquid counter-current two-phase flow in a 1 / 30 scaled-down of Pressurized Water Reactor (PWR) hot leg geometry," Nucl. Eng. Des., vol. 399, no. 2, p. 112052, 2022, doi: 10.1016/j.nucengdes.2022.112052.

A. K. Jana, G. Das, and P. K. Das, "Flow regime identification of two-phase liquid-liquid upflow through vertical pipe," Chem. Eng. Sci., vol. 61, no. 5, pp. 1500–1515, 2006, doi: 10.1016/j.ces.2005.09.001.

S. Ghosh, D. K. Pratihar, B. Maiti, and P. K. Das, "Identification of flow regimes using conductivity probe signals and neural networks for counter-current gas-liquid two-phase flow," Chem. Eng. Sci., vol. 84, pp. 417–436, 2012, doi: 10.1016/j.ces.2012.08.042.

S. Ghosh, D. K. Pratihar, B. Maiti, and P. K. Das, "Automatic classification of vertical counter-current two-phase flow by capturing hydrodynamic characteristics through objective descriptions," Int. J. Multiph. Flow, vol. 52, pp. 102–120, 2013, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.12.007.

K. Samal and S. Ghosh, "Kerosene-water counter-current two-phase flow-structures varying flow-orientation in 15 mm diameter duct," Flow Meas. Instrum., vol. 81, no. July, p. 102016, 2021, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.102016.

F. Johnsson, R. C. Zijerveld, J. C. Schouten, C. M. Van Den Bleek, and B. Leckner, "Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations," Int. J. Multiph. Flow, vol. 26, no. 4, pp. 663–715, 2000, doi: 10.1016/S0301-9322(99)00028-2.

IMPLEMENTASI STOKASTIK PADA INVESTIGASI PENGARUH I/D TERHADAP PERILAKU ANTARMUKA ALIRAN BERLAWANAN ARAH DI GEOMETRI 1/30 *HOT LEG* PWR MENGGUNAKAN SENSOR KONDUKTANSI

Achilleus Hermawan Astyanto ¹⁾ ✉, Muchsin Muzafar Rasyidi ²⁾, Akhlisa Nudiantya Aji Nugroho ²⁾, Alfikri Ikhsan ²⁾, Dede Rafico Saleh ²⁾, I Gusti Ngurah Bagus Catrawedarma ³⁾, Deendarlianto ²⁾, Indarto ²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin
Universitas Sanata Dharma
Kampus III USD Maguwaharjo,
Yogyakarta, 55282
achil.herma@usd.ac.id

²⁾Departmen Teknik Mesin dan Industri
Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM,
Yogyakarta, 55281
muchsinmuzafar2017@mail.ugm.ac.id
akhlisa.nudiantya.a@mail.ugm.ac.id
alfikri.ikhsan@mail.ugm.ac.id
dede.rafico.s@mail.ugm.ac.id
deendarlianto@ugm.ac.id
indarto@ugm.ac.id

³⁾Program Studi Teknik Mesin
Politeknik Negeri Banyuwangi
Jl. Raya Jember km. 13, Lebanasem,
Banyuwangi, Jawa Timur, 68461
ignb.catrawedarma@poliwangi.ac.id

Abstract

A small leakage in the primary circuit of a nuclear power plant reactor may trigger the counter-current flow which probably develops into a flooding regime followed by zero penetration and results on a core cooling failure. During extensive studies on the flooding phenomena in the pressurized water reactor (PWR) hot leg, the geometry effects have been widely investigated. The present study investigates the effects of riser length to diameter ratio (I/D) on interfacial fluctuations during the counter-current flow on a small scale of a PWR typical hot leg geometry. Here, the liquid film fluctuations were acquired by using parallel wire array probes. Three I/D ratios were assessed. They comprised 1.9 (R1), 3.9 (R2), and 8.3 (R3). The obtained data were analyzed on both time and frequency domains. From the PDF the flooding regime obtains multimodal distributions, while the PSD approaches lower frequencies with higher magnitudes corresponding to water blockages.

Keywords: *I/D, Water Level Fluctuation, Counter-Current Flow, PWR Hot Leg, Parallel Wire Array Probe, Stochastic Analysis.*

1. PENDAHULUAN

Identifikasi perilaku antarmuka maupun morfologi dalam aliran dua-fase dipelajari secara masif, tidak terkecuali pada aliran udara-air berlawanan arah. Metode yang digunakan dapat berbasis pada observasi visual citra hasil teknik fotografi ^[1-13], maupun pengukuran fisis berbasis instrumentasi elektronik yang dikolaborasikan dengan teknik pemrosesan sinyal. Dengan mengaplikasikan konsep konduktansi ataupun kapasitansi, sinyal struktur aliran dapat diperoleh dari pengukuran fisis baik dalam parameter fluktuasi tekanan maupun fraksi hampa. Selanjutnya dengan menggunakan pendekatan statistik, besaran sinyal tersebut dapat dikuantitatifkan untuk memperoleh karakteristik aliran.

Investigasi perilaku antarmuka aliran dua-fase berbasis konsep konduktansi pertama kali diajukan untuk mengukur tebal film cairan dengan menggunakan dua kawat yang diposisikan sejajar dan tegak lurus terhadap arah aliran ^[14]. Di sini, fluktuasi sinyal tampak berkorespondensi dengan harga bilangan Reynolds aliran. Konsep ini kemudian juga

Corresponding Author:
✉ Achilleus Hermawan Astyanto
Received on: 2023-05-15
Revised on: 2023-08-21
Accepted on: 2023-09-26

diaplikasikan dalam pengukuran tebal film cairan dengan menggunakan kawat sejajar berbahan platinum pada saluran yang merepresentasikan 1/15 geometri *hot leg* reaktor air bertekanan (*pressurized water reactor/PWR*)^[15]. Lebih lanjut, konsep konduktansi ini juga berhasil dimanfaatkan untuk mengukur fluktuasi fraksi hampa untuk menginvestigasi perilaku aliran *slug* di pipa vertikal berdiameter 25 mm^[16] maupun pipa mendatar berdiameter 26 mm^[17], serta identifikasi perilaku antarmuka pada aliran berlawanan arah di geometri yang merepresentasikan 1/30 *hot leg* PWR^{[18][19]}. Melalui identifikasi karakteristik berbasis fungsi kerapatan probabilitas (*probability density function/PDF*) tampak perilaku sinyal berkorespondensi dengan karakteristik masing-masing rezim aliran.

Sementara itu, kajian perilaku antarmuka aliran berbasis prinsip kapasitansi berhasil diaplikasikan dalam identifikasi rezim aliran dua-fase dengan menginvestigasi karakteristik kerapatan spektrum daya (*power spectral density/PSD*) dari sinyal fraksi hampa^[20]. Lebih lanjut, identifikasi karakteristik *slug* pada saluran mendatar juga telah dilaporkan berbasis prinsip ini^[21]. Hasil-hasilnya memperlihatkan bahwa melalui analisis domain frekuensi, keberadaan gelombang, serta loncatan hidrolik dapat dideteksi dengan memperhatikan wilayah-wilayah dari konsentrasi sinyal.

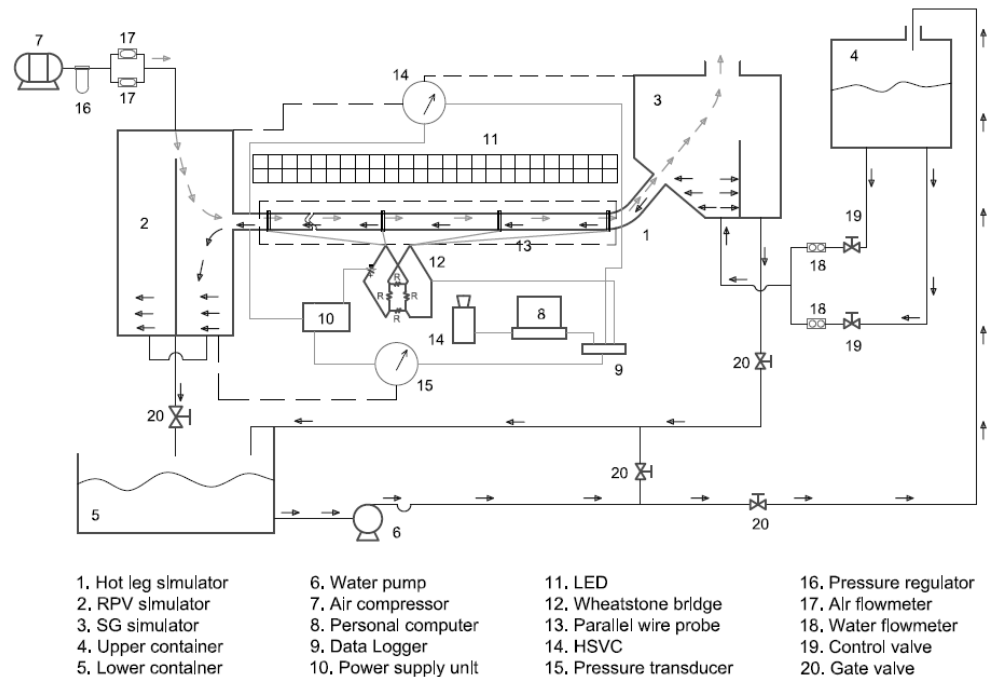
Selain mendasarkan pada karakteristik fraksi hampa, identifikasi perilaku antarmuka aliran dua-fase juga dilakukan berbasis pada fluktuasi tekanan yang diperoleh. Dalam hal ini, karakteristik gelombang antarmuka dapat diinvestigasi melalui analisis frekuensi gelombang yang diekstraksi dari PSD sinyal fluktuasi tekanan di pipa mendatar^[22], maupun di sistem *airlift pump*^{[23][24]}. Di sini, karakteristik sinyal yang diekstrak melalui transformasi *Fourier* cepat (*fast fourier transform/FFT*) dapat memperlihatkan struktur masing-masing rezim aliran. Terbaru, dalam investigasi karakteristik rezim aliran pada aliran berlawanan arah, pengaruh parameter aliran yang meliputi debit air dan udara terhadap fluktuasi tekanan juga dilaporkan^[25]. Lebih lanjut, pengaruh rasio panjang pipa miring terhadap diameter (*riser length to diameter ratio*; *I/D*) terhadap analisis domain waktu pada karakteristik fluktuasi tekanan menunjukkan harga *pressure drop* yang cenderung meningkat seiring peningkatan panjang *riser*^[26]. Namun demikian, di penelitian tersebut harga *I/D* yang digunakan belum memperlihatkan pengaruh signifikan terhadap fluktuasi tekanan untuk mendapatkan secara jelas karakteristik rezim *flooding*.

Dari survei literatur yang dilakukan terlihat bahwa identifikasi perilaku antarmuka aliran dua-fase berbasis konsep konduktansi berkorespondensi dengan sifat konduktif cairan^[14-19]. Di sini, sensor yang berkontak fisik secara langsung dengan fluida kerja memiliki potensi menyajikan data fisis yang objektif. Bahkan, dalam analisis domain waktu, instrumentasi akusisi data sensor konduktansi memungkinkan laju akusisi sampel yang tinggi. Hal ini kemudian memberi peluang untuk mendapatkan ukuran data yang teliti. Namun demikian, untuk aliran berlawanan arah di geometri kompleks yang merepresentasikan 1/30 *hot leg* PWR, tidak banyak peneliti yang mengaplikasikannya, terutama dengan melakukan variasi pada *I/D*. Oleh karenanya, pada penelitian ini pengaruh *I/D* terhadap karakterisasi statistik fluktuasi tebal film cairan diinvestigasi. Keterbaruan penelitian ditekankan pada kombinasi analisis domain waktu dan frekuensi untuk mendapatkan perilaku antarmuka aliran didasarkan pada karakteristik fluktuasi tebal film cairan.

2. METODOLOGI

Dalam penelitian ini digunakan seksi uji berupa geometri 1/30 *hot leg* PWR tipe Konvoi-Jerman. Diameter internal seksi uji adalah 25,4 mm dengan panjang pipa mendatar 635 mm. Sementara itu *I/D* yang digunakan adalah 1,9 (R_1); 3,9 (R_2); serta 8,3 (R_3). Dengan demikian panjang *riser* yang digunakan masing-masing adalah 50 mm, 100 mm dan 210 mm. Pipa mendatar dan pipa miring terkoneksi oleh belokan (*bend*) dengan sudut kemiringan 50°

terhadap arah mendatar serta radius kurva 67,5 mm. Instalasi seksi uji serta komponen-komponen pendukung utama dalam penelitian ini diperlihatkan di Gambar 1.

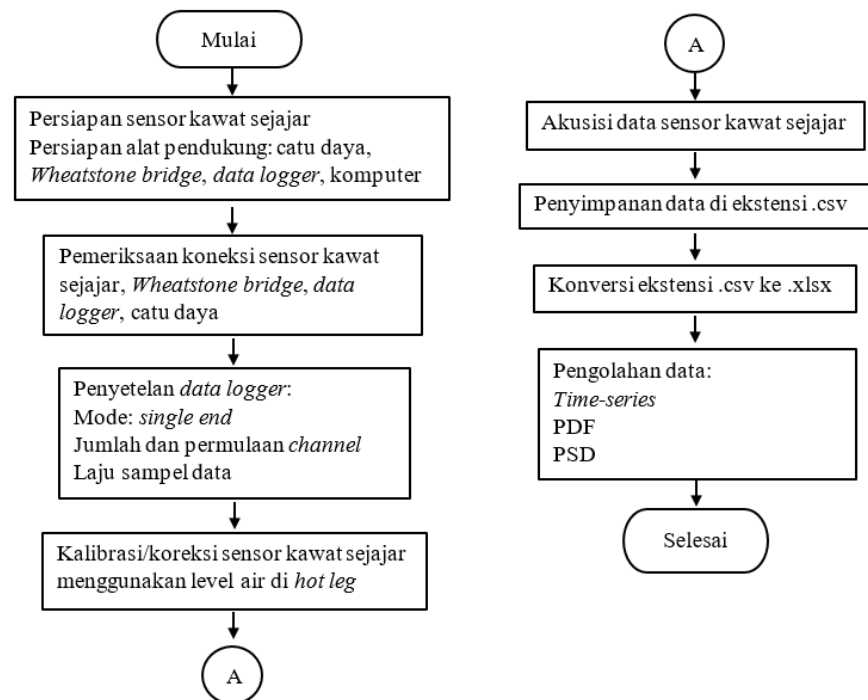


Gambar 1. Skema aparatus penelitian

Secara umum kajian ini merupakan bagian investigasi berkelanjutan mengenai karakteristik aliran berlawanan arah di geometri kompleks yang merepresentasikan model *hot leg* PWR dalam kerangka riset dasar dalam upaya promosi keamanan dan keselamatan manajemen operasional dalam kerangka mitigasi insiden kecelakaan pada pembangkit nuklir akibat kegagalan pendinginan inti reaktor [4-7,10,18,19,25-27]. Fasilitas riset yang dibangun merupakan simulator dari sirkuit primer PWR pada skala 1/30. Instalasi serta akusisi data penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Fluida dan Perpindahan Kalor, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada. Lebih lanjut, mekanisme kerja aparatus eksperimen telah dideskripsikan di laporan sebelumnya [26].

Gambar 2 menunjukkan diagram alir akusisi data menggunakan sensor kawat sejajar. Untuk mendapatkan sinyal fluktuasi tebal film cairan, 10 pasang sensor kawat sejajar berbahan nikel berdiameter 0,5 mm dipasang pada bagian mendatar dari seksi uji dengan jarak aksial 20 mm. Sementara itu, pada simulator SG dan simulator RPV juga dipasang *pressure tap* yang dihubungkan dengan sensor tekanan berupa *differential pressure transducer* (DPT). Kedua sensor tekanan ini digunakan untuk mengidentifikasi tercapainya permulaan *water blockage* sebagai suatu transisi *separated flow* ke *intermittent flow*. Fenomena ini berkorespondensi dengan fluktuasi tekanan mendadak dengan amplitudo yang besar [1][3][4][6]. Lebih lanjut, sensor kawat sejajar dikoneksikan dengan modul jembatan Wheatstone untuk meningkatkan sensitifitas sensor. Teknik ini telah diaplikasikan secara luas sebelumnya [15][16][28][29][30]. Sensor-sensor kawat sejajar serta kedua sensor tekanan dihubungkan dengan catu daya 12 VDC. Seluruh sensor terkoneksi dengan sistem akusisi data (DAQ) yang dilengkapi sistem konverter sinyal analog ke digital (ADC) yaitu *Advantech 4716AE*. Data yang diakusisi disimpan dan ditabulasikan dalam *format comma-separated values* (.csv) di ruang penyimpanan data komputer.

Pada kenyataannya, ketika terjadi LOCA di sirkuit primer PWR, fluida yang berinteraksi adalah kondensat dalam fase cair dan uap panas (*steam*) pada fase gas. Namun demikian, dalam penelitian ini, fluida kerja yang digunakan adalah air distilasi sebagai fasa cair serta udara untuk fase gas. Meskipun terdapat perbedaan sifat fisis uap air dan udara, penskalaan ini relatif telah umum digunakan dan dilaporkan oleh para peneliti yang melakukan investigasi aliran berlawanan arah di geometri yang merepresentasikan *hot leg* PWR. Selanjutnya, sifat-sifat fisis air distilasi dan udara yang digunakan pada temperatur 30°C dan tekanan 1 atm diperlihatkan di Tabel 1. Ketika pengambilan data, rentang debit air yang digunakan adalah 6 – 42 *gallons per hour* (gph) atau setara 0,2 – 2.8 *liters per minute* (lpm). Harga ini mengacu pada beberapa penelitian terdahulu yang dilakukan pada tipe seksi uji serupa. Untuk setiap harga debit air, suplai udara diberi inkremen kenaikan sebesar 5 lpm hingga dicapai permulaan *flooding* dan empat kenaikan lanjutan paska permulaan *flooding* (*partial delivery region*).



Gambar 2. Diagram alir akuisisi data sinyal kawat sejajar.

Alat ukur debit air dan udara yang digunakan dalam penelitian ini adalah *flowmeter* udara dan *flowmeter* air, keduanya bertipe *floating* (rotameter). Sementara itu, untuk meyakinkan bahwa aliran yang terjadi telah stabil akibat perubahan debit udara, akuisisi setiap data dilakukan dalam durasi 20 detik di mana setiap kenaikan diberi jeda 7 detik untuk mengatur pada kenaikan harga selanjutnya. Data akuisisi dilakukan pada laju sampling 1000 sampel/detik. Dengan demikian dalam 20 detik akan peroleh 20000 harga tegangan yang berkorespondensi dengan fluktuasi tebal film cairan. Lebih lanjut, dalam pra-pemrosesan sinyal, frakuensi Nyquist dalam pengolahan data adalah 333 Hz atau 1/3 dari laju sampling. Tabel 2 memperlihatkan tipe dan spesifikasi instrumen ukur yang digunakan.

Tabel 1. Sifat fisis fluida yang dipergunakan dalam penelitian.

Properti fisis	Air distilasi	Udara
Massa jenis (kg/m^3)	996	1,2
Tegangan permukaan (kg/s^2)	$71,97 \times 10^{-3}$	-
Viskositas dinamik (kg/m.s)	$7,97 \times 10^{-4}$	$1,87 \times 10^{-5}$

Investigasi terhadap data yang diakusisi dan ditabulasikan dilakukan melalui analisis berbasis domain waktu dan frekuensi. Suatu skrip kode program berbasis bahasa pemrograman MATLAB digunakan untuk mendapatkan grafik-grafik sekuensial waktu fluktuasi tebal film cairan, PDF dan PSD pada setiap lokasi sensor/lokus (x/L_h) dalam parameter aliran (debit air dan debit udara) serta variasi I/D pada suatu harga debit air dan udara tertentu. Analisis stokastik ini secara sukses telah difungsikan untuk mengkarakterisasikan perilaku antarmuka dalam identifikasi pola aliran berbasis pengaruh debit aliran di saluran vertikal^[31], juga di saluran horisontal^{[8][22]}, serta di sistem *airlift pump* tipe pembangkit gelembung mikro^{[23][24]}. Analisis ini memungkinkan transformasi sinyal acak ke dalam harga-harga kuantitatif dalam momen statistik meliputi simpangan baku (*standard deviasi/Sd*), kemenjuluran (*skewness/Sk*) dan keruncingan (*kurtosis/Ku*) kurva distribusi. Lebih lanjut, detail analisis berbasis domain waktu dan frekuensi yang digunakan dalam perhitungan telah dilaporkan sebelumnya^[31].

Tabel 2. Sifat fisis fluida yang dipergunakan dalam penelitian.

Instumentasi ukur	Tipe	Spesifikasi
Flowmeter udara	<i>Floating</i> , Dwyer RMA	0 – 70 lpm, galat error 4%
Flowmeter air	<i>Floating</i> , Dwyer RMB	0 – 20 gph, galat error 3%
Sensor tekanan	<i>Differential Pressure transducer</i> , Validyne P55D	Rentang ΔP 80 psi, galat error 0,25-0.5%
Data akusisi sistem	ADC DAQ, Advantech 4716AE	200 kS/s; 16-bit; 16 saluran

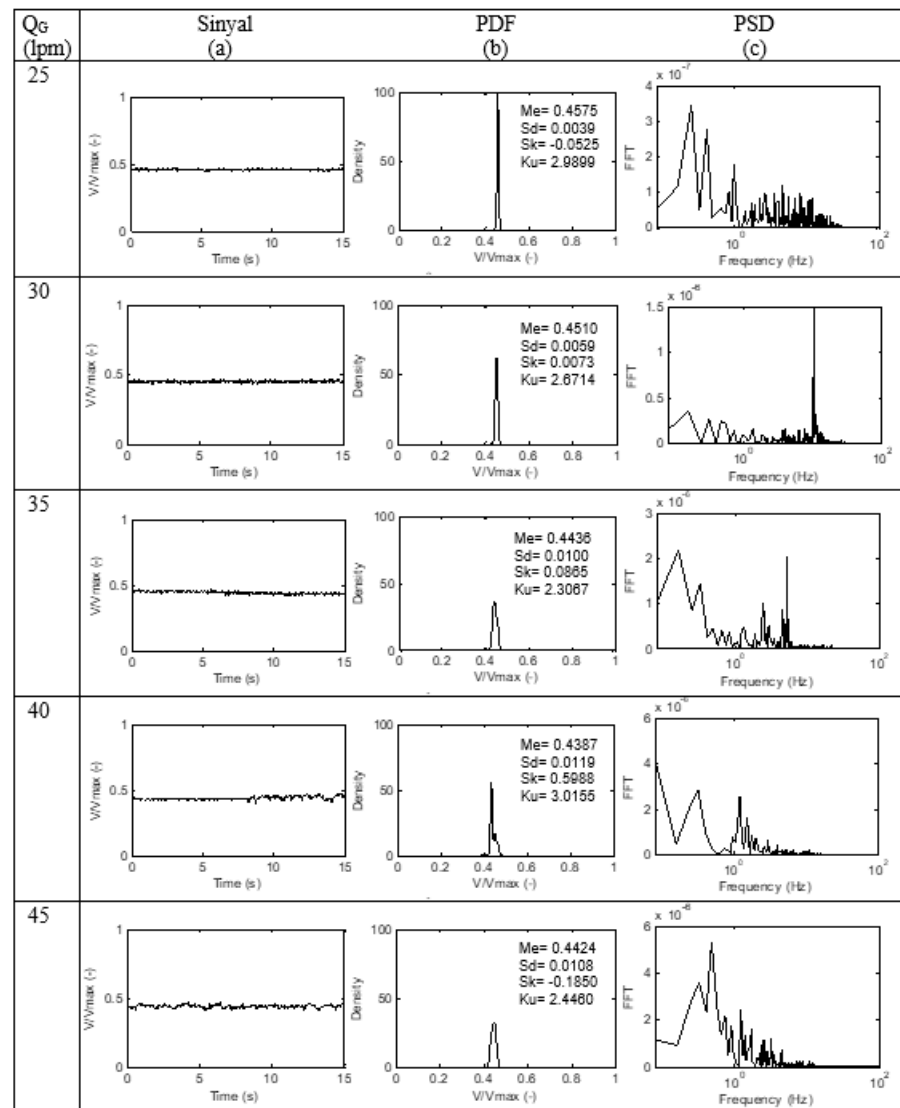
3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Karakteristik Fluktuasi Tebal Film Air Berbasis Debit Aliran

Tipikal karakterisasi statistik fluktuasi sinyal menggunakan fungsi kerapatan peluang (*probability density function*/PDF) dan fungsi kerapatan spektrum daya (*power spectral density*/PSD) pada kondisi $Q_L = 24$ gph dengan variasi debit aliran udara diperlihatkan di Gambar 3. Dari gambar terungkap bahwa pada debit gas rendah dihasilkan magnitudo spektrum (FFT) yang relatif lebih kecil dalam kurva PSD. Di sini, magnitudo yang relatif kecil itu memberikan distribusi puncak yang tersebar di sekitar interval frekuensi tinggi, dan menunjukkan bahwa rezim aliran *stratified* teramati. Peningkatan lebih lanjut aliran udara berdampak pada penurunan frekuensi dominannya, di mana pengamatan visual mengungkapkan bahwa aliran yang terbentuk adalah *wavy*. Ketika inisiasi *water blockage* tercapai, magnitudo meningkat secara signifikan. Lebih lanjut, kombinasi karakteristik kurva PDF dan peningkatan magnitudo pada kurva PSD terjadi bersamaan ketika *slug* terbentuk. Investigasi lebih rinci dijelaskan sebagai berikut.

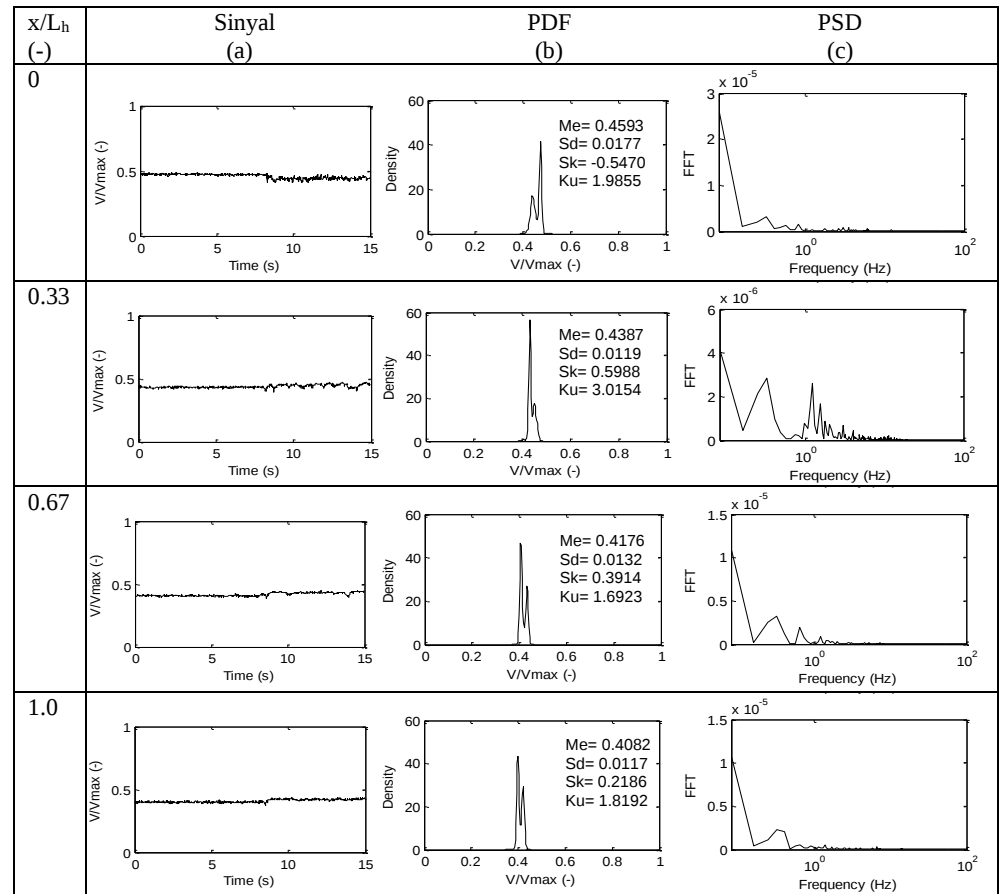
Ketika udara dialirkan bertahap sebesar 25 lpm hingga mencapai 35 lpm, sinyal fluktuasi tegangan normalisasi, $V/V_{\max}$, juga meningkat landai seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3. Di sini, domain waktu dari sinyal mendekati-stabil yang diperoleh ditunjukkan pada kolom (a). Distribusi sinyal pada debit air ini cenderung menghasilkan kurva PDF berpuncak tunggal dengan simpangan baku rendah seperti ditunjukkan pada kolom (b). Jenis

sinyal ini sebelumnya telah dilaporkan tampak mendukung antarmuka yang stabil ke satu titik yang mengkonfirmasi kontinuitas cairan [30]. Selain itu, terlihat pergeseran titik frekuensi maksimum dalam kurva PSD ke magnitudo yang lebih rendah seperti yang ditunjukkan pada kolom (c). Lebih lanjut, dari Gambar 3(ii) dan (iii) terlihat bahwa magnitudo dari fluktuasi sinyal meningkat secara eksponensial ketika aliran udara meningkat dari 35 lpm menjadi 40 lpm. Di sini, domain waktu sinyal diperoleh sebagian berfluktuasi seperti yang ditunjukkan pada kolom (a) dan diikuti oleh pergeseran titik puncak ke frekuensi yang lebih tinggi seperti yang ditunjukkan pada kolom (c). Selanjutnya, pada Gambar 3(iii) dan (iv) amplitudo fluktuasi sinyal semakin meningkat seiring dengan peningkatan aliran gas dari 40 lpm menjadi 45 lpm. Di sini, domain waktu sinyal berfluktuasi seperti yang ditunjukkan pada kolom (a) diikuti dengan pergeseran titik puncak ke frekuensi yang lebih tinggi seperti yang diperlihatkan di kolom (c). Pergeseran lain dari kemenjuluran kurva negatif ke positif tampak berkorespondensi dengan perubahan landai pada antarmuka.



Gambar 3. Tipikal sinyal, PDF dan PSD pada QL= 24 gph untuk berbagai debit udara menggunakan I/D= 3,9 di x/Lh= 0,33

Pada umumnya, sebelum terjadinya *water blockage*, grafik PDF memperlihatkan kurva berpuncak tunggal pada nilai tertentu dari sinyal. Hal ini menunjukkan bahwa aliran fluida cenderung tetap pada nilai tebal film cairan ataupun fraksi hampa tertentu. Perilaku kurva ini menunjukkan bahwa aliran *stratified* ataupun *small wave* terbentuk. Ketika inisiasi *water blockage* tercapai, grafik PDF memberikan kurva multi-puncak (multimodal) yang menunjukkan bahwa lebih dari satu nilai tebal film cairan muncul secara signifikan. Puncak di ujung bawah kurva sesuai dengan nilai tebal film yang lebih tinggi (*stratified*), sedangkan ujung yang lebih tinggi berkorespondensi dengan nilai tebal film lebih rendah yang menunjukkan *slug* air terbentuk^[17].



Gambar 4. Tipikal sinyal, PDF dan PSD pada $Q_L = 24$ gph, $Q_G = 40$ lpm, $I/D = 3,9$ di berbagai lokasi sensor

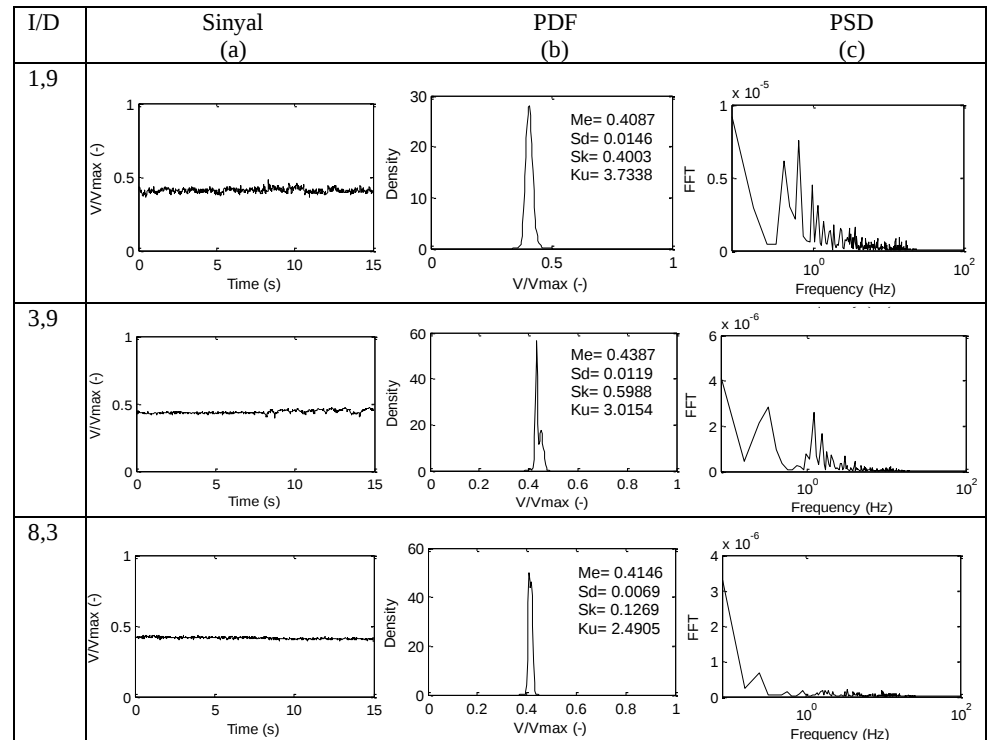
3.2. Pengaruh I/D terhadap Fluktuasi Tebal Film Air

Tipikal karakterisasi statistik sinyal pada kondisi aliran $Q_L = 24$ gph dan $Q_G = 40$ lpm di $x/L_h = 0,33$ diperlihatkan di Gambar 4. Dari gambar diperoleh bahwa rerata aritmatik (*mean/Me*) sinyal, menurun seiring posisi bergeser lebih dekat ke *water exit*. Di sini, domain waktu dari sinyal yang diperoleh memperlihatkan perubahan fluktuasi seperti yang ditunjukkan di kolom (a), yang tampak sebagai transisi dari aliran *wavy* ke *slug* melalui pengamatan visual. Selanjutnya, terlihat juga distribusi sinyal yang fluktuatif dengan beberapa puncak (multimodal) seperti yang digambarkan di kolom (b), juga tanpa pergeseran titik puncak ke frekuensi yang lebih rendah ataupun lebih tinggi seperti yang ditunjukkan di kolom (c).

Lebih lanjut, parameter aliran pada kondisi ini memberikan informasi transisi dari *separated regime* (wavy) ke *intermittent regime* (partial delivery/flooded) yang dibatasi oleh permulaan *flooding* (water blockage). Di sini, pada lokasi sensor paling dekat *water exit*, tampak dari dua harga fraksi hampa yang mendominasi, densitas lebih rendah didapatkan dari rezim *stratified*, juga ditunjukkan dengan harga kemenjuluran negatif. Hal ini berarti lokasi sensor ini masih didominasi oleh aliran wavy. Sementara itu, di ketiga lokasi sensor lainnya aliran *slug* lebih mendominasi.

3.3. Pengaruh I/D terhadap Fluktuasi Tebal Film Air

Gambar 5 memperlihatkan tipikal karakterisasi statistik perilaku antarmuka aliran pada $Q_L = 24$ gph untuk ketiga I/D yang digunakan. Dari gambar diperoleh bahwa fluktuasi sinyal menurun seiring dengan peningkatan I/D. Bahkan fluktuasi yang dapat diabaikan, ditandai dengan harga simpangan baku yang sangat rendah, terlihat pada penggunaan I/D= 8,3 seperti ditunjukkan di kolom (a) dan dipertegas di kolom (b). Observasi visual pada video rekaman menunjukkan rezim aliran berbeda dari ketiga I/D, meskipun diperoleh dari debit air dan udara yang sama. Penjelasan yang mungkin dari fenomena ini adalah peningkatan panjang riser pada kondisi aliran ini menyebabkan dibutuhkan lebih banyak massa udara untuk menginisiasi *water blockage* di pipa mendatar.

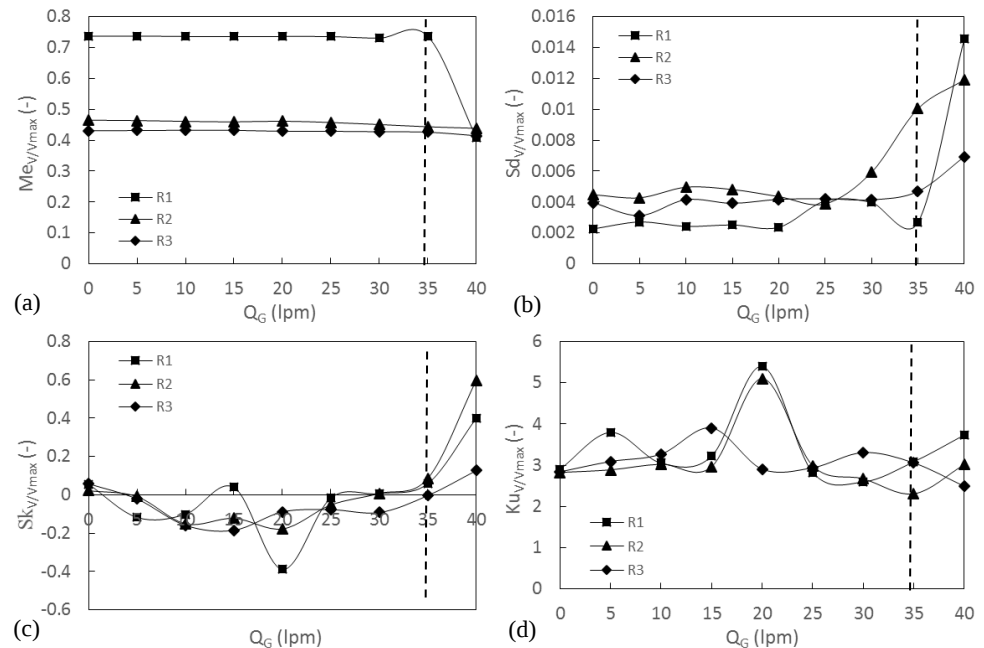


Gambar 5: Tipikal sinyal, PDF dan PSD pada $Q_L = 24$ gph dan $Q_G = 40$ lpm di $x/L_h = 0,33$ pada berbagai I/D

Karakteristik sinyal pada kolom (a) memperlihatkan bahwa pada parameter aliran ini, untuk I/D= 1,9 aliran telah masuk pada wilayah *partial delivery/flooding*. Di sini, sebagian air mengalir berlawanan arah dengan aliran udara, dan sebagian lainnya searah. Lebih lanjut, aliran wavy diikuti inisiasi *water blockage* dan *partial delivery* terlihat untuk I/D= 3,9. Dalam hal ini, puncak bimodal kurva PDF memperlihatkan bahwa ada dua harga *water level* yang dominan. Harga pertama berkorespondensi dengan aliran wavy, lainnya adalah harga rerata

di rezim *partial delivery*. Sementara itu, hanya aliran *wavy* teramati untuk $I/D = 8,3$ pada parameter aliran ini.

Gambar 6 memperlihatkan pengaruh I/D terhadap karakterisasi statistik fluktuasi antarmuka pada $Q_L = 24$ gph untuk berbagai debit udara di $x/L_h = 0,33$. Dari Gambar 6(a) terlihat bahwa harga sinyal memperlihatkan penurunan seiring peningkatan I/D pada semua debit gas sebelum tercapai permulaan *water blockage*. Artinya, seiring peningkatan I/D , tebal film cairan meningkat. Secara fisis hal ini dapat dipahami. *Riser* yang lebih panjang akan menempatkan kedudukan simulator SG semakin tinggi yang kemudian menuntun pada harga energi potensial semakin tinggi serta peningkatan waktu akselerasi aliran air dari *water inlet* ke pipa mendatar. Lebih lanjut, hal ini menyebabkan kecepatan air lebih tinggi di pipa mendatar seiring dengan peningkatan panjang *riser*. Pada saat bersamaan, peningkatan debit udara tidak menuntun pada kenaikan tebal film cairan sepanjang rezim *stratified*, kecuali setelah aliran mengalami transisi dari *separated* ke *intermittent* di lokasi pengukuran yang dipilih. Namun demikian, setelah mencapai *water blockage*, terlihat jelas terjadi perubahan signifikan tebal film air ketika menggunakan $I/D = 1,9$.



Gambar 6: Pengaruh I/D terhadap (a) rerata; (b) simpangan baku; (c) kemencjulan; dan (d) keruncing distribusi data fluktuasi tebal fim cairan pada $x/L_h = 0,33$ and $Q_L = 24$ gph

Sementara itu, Gambar 6(b) menunjukkan bahwa pada debit gas rendah dimana rezim aliran yang teramati adalah *stratified*, fluktuasi sinyal yang diidentifikasi dari simpangan baku kurva cenderung rendah untuk semua harga I/D . Sesaat sebelum mencapai permulaan *water blockage*, terjadi peningkatan fluktuasi sinyal yang berkorespondensi dengan kemunculan gelombang. Ketika mencapai permulaan *water blockage*, fluktuasi sinyal meningkat tajam. Alasan yang masuk akal adalah di rezim aliran ini, *slug* air muncul bertubi-tubi dan pecah menjadi gulungan gelombang akibat aliran udara. Pada rezim aliran ini juga, pengaruh I/D terhadap perilaku antarmuka aliran tampak fluktuatif.

Gambar 6(c) memperlihatkan pengaruh I/D terhadap kemencjulan kurva distribusi dari data fluktuasi tebal film cairan pada kondisi aliran $Q_L = 24$ gph untuk berbagai debit udara di $x/L_h = 0,33$. Di sini terlihat bahwa pada debit udara rendah hingga sesaat sebelum mencapai permulaan *water blockage*, kemencjulan kurva didominasi harga negatif. Hal ini

mengindikasikan distribusi tebal film rendah lebih mendominasi pada debit udara rendah. Di rezim *partial delivery*, ketiga I/D memberikan harga kemenjuluran positif yang berkorespondensi dengan *slug* air yang mendominasi. Lebih lanjut, I/D= 3,9 serta 8,3 memberikan kecenderungan sama dengan harga yang nyaris berimpit untuk semua debit udara. Sementara itu, pengaruh I/D terhadap harga keruncingan kurva distribusi dari data fluktuasi tebal film cairan pada kondisi aliran $Q_L = 24$ gph untuk berbagai debit udara di $x/L_h = 0,33$ ditunjukkan di Gambar 6(d). Dari gambar teramati bahwa pada $Q_G = 10$ lpm hingga 30 lpm, I/D= 1,9 serta 3,9 memberikan kecenderungan sama dengan nilai yang berimpit.

4. KESIMPULAN

Pengaruh I/D terhadap perilaku antarmuka aliran berlawanan arah pada geometri 1/30 *hot leg* PWR telah investigasi. Tiga I/D yang digunakan adalah 1,9; 3,9 dan 8,3. Data fluktuasi yang diperoleh dikuantitatifkan dengan metode statistik berbasis analisis pada domain waktu dan frekuensi. Beberapa simpulan umum yang dicapai adalah:

1. Peningkatan I/D menyebabkan tebal film cairan cenderung meningkat untuk harga debit air dan udara yang sama sebelum permulaan flooding tercapai.
2. Analisis berbasis domain waktu maupun frekuensi yang digunakan dalam penelitian ini belum mengungkapkan secara signifikan pengaruh I/D terhadap perilaku antarmuka aliran. Tanpa klasterisasi sinyal dengan band frekuensi yang lebih spesifik fenomena detail seperti dinamika pergerakan gelombang belum teramati.

Lebih lanjut, teknik analisis dalam penelitian ini dapat dikembangkan. Karakterisasi statistik yang lebih detail dan mampu mendekomposisi sinyal didasarkan band frekuensi membuka peluang diperolehnya karakteristik struktur antarmuka aliran dua-fase yang lebih spesifik seperti dinamika gelombang ^{[16][23][24]}.

PERNYATAAN TERIMA KASIH

Berkenaan dengan beberapa teknis eksperimentasi, penulis mengapresiasi dukungan dari Dr. Apip Badarudin, Dr. Drajat Indah Mawarni, Dr(cand). Untung Surya Dharma, Dr(cand). Haslinda Kusumaningsih, Ir. Yulia Venti Yoanita, M.Eng., Christina Deni Rumiarti, M.T.I., Arif Muhlisin, S.Pd.T., Yusuf Rahman, S.T., Akbar Yuga Adhikara Medha, S.T., Josi Aldo Emanuel Pramono, S.T., juga kepala laboratorium Mekanika Fluida dan Perpindahan Kalor, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada. Atas dukungan pendanaan riset, peneliti juga berterima kasih kepada Yayasan Sanata Dharma.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Deendarlianto, A. Ousaka, A. Kariyasaki, and T. Fukano, "Investigation of liquid film behavior at the onset of flooding during adiabatic counter-current air-water two-phase flow in an inclined pipe," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 235, no. 21, pp. 2281–2294, 2005, doi: 10.1016/j.nucengdes.2005.03.006.
- [2] Deendarlianto et al., "The effects of surface tension on flooding in counter-current two-phase flow in an inclined tube," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 34, no. 7, pp. 813–826, 2010, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.01.010.
- [3] Deendarlianto, C. Vallée, D. Lucas, M. Beyer, H. Pietruske, and H. Carl, "Erratum: 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)," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 241, no. 8, pp. 3359–3372, 2011, doi: 10.1016/j.nucengdes.2011.02.028.

- [4] A. Badarudin, Indarto, Deendarlianto, and A. Setyawan, "Characteristics of the air-water counter current two-phase flow in a 1/30 scale of pressurized water reactor (PWR): Interfacial behavior and CCFL data," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1737, 2016, doi: 10.1063/1.4949303.
- [5] A. Badarudin et al., "The effect of horizontal pipe length to the onset of flooding position on the air-water counter current two-phase flow in a 1/30 scale of pressurized water reactor (PWR)," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2001, no. June 2020, 2018, doi: 10.1063/1.5049983.
- [6] A. Badarudin, A. Setyawan, O. Dinaryanto, A. Widyatama, Indarto, and 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," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 116, pp. 376–387, 2018, doi: 10.1016/j.anucene.2018.03.007.
- [7] Y. V. Yoanita, S. Tirtha, E. Kumolosari, and B. G. Purnomo, "Fenomena aliran udara-air berlawanan arah pada pipa horisontal pada $L/D = 25$ dan $L/D = 50$," *J. Automot. Technol. Vocat. Educ.*, vol. 1, no. 1, pp. 21–32, 2020, doi: 10.31316/jatve.v1i1.670.
- [8] S. Wijayanta, Deendarlianto, Indarto, A. Prasetyo, and A. Z. Hudaya, "International Journal of Multiphase Flow The effect of the liquid physical properties on the wave frequency and wave velocity of co-current gas-liquid stratified two-phase flow in a horizontal pipe," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 158, no. 2, p. 104300, 2023, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104300.
- [9] A. H. Astyanto, A. N. A. Nugroho, Indarto, I. Gusti Ngurah Bagus Catrawedarma, D. Lucas, and Deendarlianto, "Statistical characterization of the interfacial behavior captured by a novel image processing algorithm during the gas/liquid counter-current two-phase flow in a 1/3 scaled down of PWR hot leg," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 404, no. 2, p. 112179, 2023, doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112179.
- [10] A. H. Astyanto, Indarto, and Deendarlianto, "A Brief on Optical-based Investigation towards The Interfacial Behaviors during High Viscous Liquid / Gas Countercurrent Two-Phase Flow in a Complex Conduit Representing 1 / 30 Down- Scaled of PWR Hot Leg Geometry," *Int. J. Appl. Sci. Smart Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 101–112, 2023, doi: <https://doi.org/10.24071/ijasst.v5i1.6302>.
- [11] H. Kusumaningsih, M. R. A. Madani, M. F. Alfath, A. F. Ritonga, Deendarlianto, and Indarto, "Karakteristik pola aliran dua fase gas-cairan non-newtonian di dalam microchannels berpenampang persegi," *Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 3, pp. 443–450, 2022, doi: <https://doi.org/10.21776/jrm.v13i2.1293>.
- [12] D. I. Mawarni, Indarto, Deendarlianto, and W. Budhijanto, "Pengaruh jarak nosel udara dengan outlet terhadap distribusi bubble yang dihasilkan oleh MBG tipe swirl," *Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. May, pp. 361–371, 2022, doi: <https://doi.org/10.21776/jrm.v13i2.977>.
- [13] U. S. Dharma, C. A. Dwiputri, E. Nugroho, A. Asroni, D. Deendarlianto, and I. Indarto, "Analisa kecepatan slug aliran dua fase di downstream T-junction minichannel horizontal dengan radius belokan (r/dh) 0.7," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 3, pp. 931–938, 2023, doi: 10.21776/jrm.v13i3.1432.
- [14] J. E. Koskie, I. Mudawar, and W. G. Tiederman, "Parallel-wire probes for measurement of thick liquid films," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 15, no. 4, pp. 521–530, 1989, doi: 10.1016/0301-9322(89)90051-7.
- [15] I. Kinoshita, T. Nriai, A. Tomiyama, D. Lucas, and M. Murase, "Effects of Liquid Properties on CCFL in a Scaled-Down Model of a PWR Hot Leg," *J. Power Energy Syst.*, vol. 5, no. 3, pp. 316–329, 2011, doi: 10.1299/jpes.5.316.

- [16] A. K. Jana, G. Das, and P. K. Das, "Flow regime identification of two-phase liquid-liquid upflow through vertical pipe," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 61, no. 5, pp. 1500–1515, 2006, doi: 10.1016/j.ces.2005.09.001.
- [17] R. L. P. Rodrigues, C. Cozin, B. P. Naidek, M. a. Marcelino Neto, M. J. da Silva, and R. E. M. Morales, "Statistical features of the flow evolution in horizontal liquid-gas slug flow," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 119, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110203.
- [18] A. H. Astyanto, J. A. E. Pramono, I. G. N. B. Catrawedarma, Deendarlianto, and Indarto, "Statistical characterization of liquid film fluctuations during gas-liquid two-phase counter-current flow in a 1/30 scaled-down test facility of a pressurized water reactor (PWR) hot leg," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 172, p. 109065, 2022, doi: 10.1016/j.anucene.2022.109065.
- [19] A. Ikhsan, A. H. Astyanto, Indarto, and Deendarlianto, "Kajian Eksperimental Karakteristik Perilaku Hot Leg Pwr Menggunakan Sensor Kawat Sejajar Experimental Study of Behavioral Characteristics of Counterflow Interface in Geometry 1 : 30 Hot Leg," *Semin. Nas. Multidisiplin Ilmu Univ. Respati Yogyakarta*, vol. 3, no. 1, pp. 141–149, 2021.
- [20] H. Canière et al., "Horizontal two-phase flow characterization for small diameter tubes with a capacitance sensor," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 9, pp. 2898–2906, 2007, doi: 10.1088/0957-0233/18/9/020.
- [21] E. dos Reis and L. J. Goldstein, "Characterization of slug flows in horizontal piping by signal analysis from a capacitive probe," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 21, no. 3, pp. 347–355, 2010, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2010.04.006.
- [22] S. Wijayanta, Indarto, Deendarlianto, I. G. N. B. Catrawedarma, and A. Z. Hudaya, "Statistical characterization of the interfacial behavior of the sub-regimes in gas-liquid stratified two-phase flow in a horizontal pipe," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 83, no. 2, p. 102107, 2022, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.102107.
- [23] I. G. N. B. Catrawedarma, Deendarlianto, and Indarto, "Statistical Characterization of Flow Structure of Air–water Two-phase Flow in Airlift Pump–Bubble Generator System," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 138, p. 103596, 2021, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103596.
- [24] I. G. N. B. Catrawedarma, F. A. Resnaraditya, Deendarlianto, and Indarto, "Statistical characterization of the flow Structure of air–water–solid particles three-phase flow in the airlift pump–bubble generator system," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 82, no. 2018, p. 102062, 2021.
- [25] A. H. Astyanto, Y. Rahman, A. Y. Adhikara, Indarto, and Deendarlianto, "Time-series differential pressure fluctuations of a flooding regime : A preliminary experimental results investigation on a 1 / 30 down- scaled PWR hot leg geometry," *AIP Conf. Proc.*, vol. 060001, no. 2011, 2021.
- [26] A. H. Astyanto, Y. Rahman, A. Y. A. Medha, Deendarlianto, and Indarto, "Pengaruh Rasio I/D terhadap Permulaan Flooding dan Fluktuasi Voltase Sinyal Tekanan Rezim Flooding pada Geometri Kompleks," *Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. August, pp. 447–457, 2021, doi: <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.02.21>.
- [27] A. H. Astyanto, Indarto, K. V. Kirkland, and Deendarlianto, "An experimental study on the effect of liquid properties on the counter-current flow limitation (CCFL) during gas / liquid counter-current two-phase flow in a 1 / 30 scaled-down of Pressurized Water Reactor (PWR) hot leg geometry," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 399, no. 2, p. 112052, 2022, doi: 10.1016/j.nucengdes.2022.112052.

- [28] S. Ghosh, D. K. Pratihar, B. Maiti, and P. K. Das, "Identification of flow regimes using conductivity probe signals and neural networks for counter-current gas-liquid two-phase flow," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 84, pp. 417–436, 2012, doi: 10.1016/j.ces.2012.08.042.
- [29] S. Ghosh, D. K. Pratihar, B. Maiti, and P. K. Das, "Automatic classification of vertical counter-current two-phase flow by capturing hydrodynamic characteristics through objective descriptions," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 52, pp. 102–120, 2013, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.12.007.
- [30] K. Samal and S. Ghosh, "Kerosene-water counter-current two-phase flow-structures varying flow-orientation in 15 mm diameter duct," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 81, no. July, p. 102016, 2021, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.102016.
- [31] F. Johnsson, R. C. Zijerveld, J. C. Schouten, C. M. Van Den Bleek, and B. Leckner, "Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 26, no. 4, pp. 663–715, 2000, doi: 10.1016/S0301-9322(99)00028-2.