

Analisis CFD Aliran Dua-Fasa Uap Air pada Pipa Geothermal Horizontal

Eli Kumolosari^{1*}, Okto Dinartyanto², Teguh Wibowo³, Dedet Hermawan Setiabudi⁴, Fajar Nugroho⁵,
Lazuardy Rahendra Pinandhita⁶, Freddy Kurniawan⁷

^{1,2,3,4,5,6}Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto

⁷Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto

Article Info

Article history:

Received October 31, 2024

Accepted December 16, 2024

Published May 20, 2024

Keywords:

Two-phase flow;
CFD;
Flow pattern;
Pressure drop;
Water holdup

ABSTRACT

Two-phase flow is a phenomenon that often found in various devices and fields, one of which is in the geothermal system. Two-phase flow parameters that are important to study include flow patterns, pressure drop, and water holdup. This study used the CFD method to obtain data on flow patterns, pressure drop, and water holdup in steam-water flow in horizontal pipes. Validation studies were conducted to obtain appropriate settings. The superficial velocities of steam and water were varied from 6-30 m/s and 0.05-0.1 m/s respectively. The results showed that the CFD results were in accordance with the experiments. Visually, the observed flow patterns were stratified-wavy flow and mist flow. Furthermore, the pressure drop and water holdup values obtained increased along with the increase in the J_w value.



Corresponding Author:

Eli Kumolosari,
Program Studi Teknik Mesin,
Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto,
Lanud Adisutjipto, Jl. Raya Janti Blok R, Karang Janbe, Banguntapan, Kec. Banguntapan, Kabupaten Bantul, DIY
Email: *elikumolosari@itda.ac.id

1. PENGANTAR

Aliran dua-fasa adalah fenomena yang sering muncul di berbagai perangkat dan bidang [1][2][3][4], salah satunya di sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Energi panas bumi merupakan energi bersih yang potensinya sangat besar di dunia, di mana salah satu negara yang memiliki potensi besar tersebut adalah Indonesia. Potensi panas bumi yang sangat besar tersebut menjadikannya sebagai energi bersih yang diminati [5][6].

Di PLTP, aliran dua-fasa uap-air banyak ditemukan mengalir bersamaan di dalam pipa, salah satunya di pipa horizontal setelah kepala sumur. Aliran dua-fasa merupakan fenomena yang penting dalam pengelolaan dan pengendalian berbagai proses dalam sistem PLTP [7]. Umumnya, aliran dua-fasa dikategorikan menurut distribusi setiap fasa yang juga dikenal sebagai pola aliran (*flow pattern*). Sejumlah variabel termasuk geometri pipa, properti fluida, jenis fluida, sudut kemiringan, dan kecepatan fasa tiap fluida, akan mempengaruhi pola aliran yang terbentuk [8].

Selain pola aliran, *pressure drop* juga merupakan parameter penting untuk dipertimbangkan pada aliran dua-fasa. Dibandingkan dengan aliran satu fasa, *pressure drop* dalam aliran dua-fasa biasanya lebih besar. Parameter *pressure drop* salah satunya terkait dengan penentuan spesifikasi pompa yang tepat, yang tujuannya untuk memaksimalkan kinerja sistem [9][10]. Parameter penting yang selanjutnya adalah *water holdup*. *Water holdup* didefinisikan sebagai proporsi luas penampang yang ditempati oleh air terhadap luas total pipa [11]. *Water holdup* dalam aliran multifasa harus diprediksi secara akurat untuk memprediksi pola aliran dan memantau proses aliran [12].

Banyak penelitian eksperimental dan numerik telah dilakukan terhadap parameter-parameter aliran dua-fasa. Penelitian tentang *pressure drop* dalam aliran R1234yf dalam pipa horizontal dilakukan oleh Fazelnia dkk [13]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju aliran massa dan kualitas uap berbanding lurus dengan *pressure*

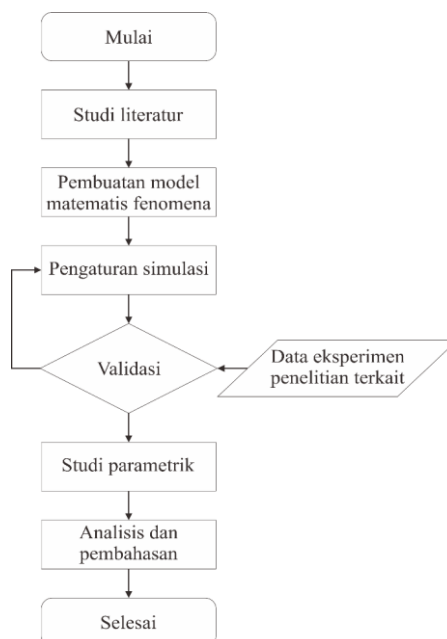
drop. Menurut Kong dkk [14], *pressure drop* dan pola aliran salah satunya dipengaruhi oleh diameter pipa. Leung dkk [15] mempelajari *pressure drop* aliran uap-air dalam pipa yang dipanaskan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola dan kondisi aliran berdampak pada *pressure drop* dalam aliran dua-fasa. Pemodelan numerik dapat menghasilkan hasil yang cukup akurat dan konsisten dengan temuan eksperimen dalam kasus dua-fasa [3][13]. Selain itu, Mubarak dkk [16] menggunakan pelat orifice untuk mengukur aliran dua-fasa dalam fluida panas bumi (pengujian lapangan dan validasi dengan CFD). Salah satu faktor yang diteliti adalah pemahaman mekanisme dua-fasa yang terkait dengan penurunan tekanan. Temuan penelitian menunjukkan bahwa pemodelan CFD sesuai dengan data lapangan yang tersedia saat ini.

Sejauh yang diketahui para peneliti, belum ada penelitian eksperimental yang dilakukan pada aliran dua-fasa uap-air dalam sistem perpipaan di PLTP. Hal tersebut kemungkinan besar terkait dengan masalah keselamatan dan tingginya biaya penelitian yang dibutuhkan. Salah satu alternatif solusinya adalah menggunakan metode CFD. CFD adalah teknik penelitian aliran dua-fasa yang populer di kalangan peneliti karena sejumlah alasan. CFD menawarkan lebih banyak fleksibilitas terutama untuk penelitian yang melibatkan perubahan topologi dan parametrik [17]. Transfer antarmuka menentukan bagaimana fasa berinteraksi dan CFD dapat menunjukkan interaksi ini [18]. Pendekatan ini juga dapat digunakan untuk meneliti area yang tidak dapat diakses dan tidak sesuai untuk penelitian eksperimental [19]. Berbagai teknik digunakan oleh para peneliti untuk mempelajari fenomena tertentu dalam CFD. Goudmi dkk [19] melakukan simulasi numerik 3D aliran udara-air dalam pipa anulus. Pendekatan CFD dipilih untuk studi ini karena sejumlah alasan termasuk pertimbangan risiko dan biaya. Validasi menggunakan data eksperimen diperlukan untuk mengatasi kekurangan ini dan menjamin keakuratan data yang dikumpulkan [19].

Penelitian ini menggunakan pendekatan 3D untuk mendapatkan data pola aliran, *pressure drop*, dan *water holdup* kasus aliran uap-air di pipa horizontal PLTP. Kecepatan superfisial uap dan air divariasikan untuk mendapatkan data yang kemudian dianalisis. Data tersebut diharapkan bisa menjadi acuan dalam analisis performa serta pengembangan model sistem PLTP.

2. METODE PENELITIAN

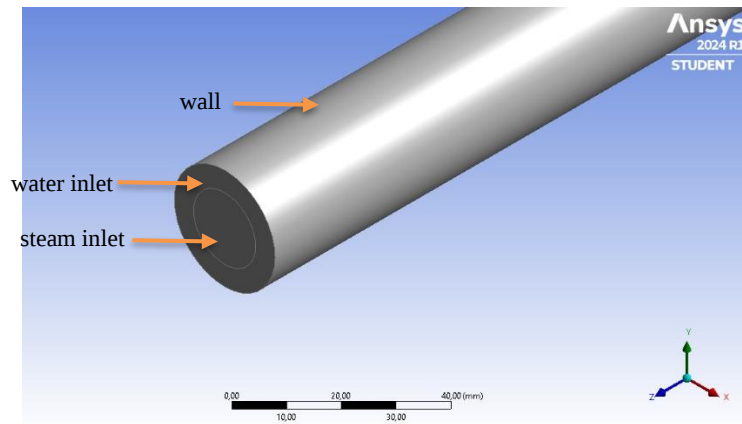
Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Penelitian dimulai dengan studi literatur, yaitu mempelajari penelitian terdahulu yang terkait dengan penelitian ini. Selanjutnya, dilakukan pembuatan model matematis fenomena yang dimulai dengan identifikasi fenomena aliran dua-fasa di PLTP, penentuan variasi penelitian (kecepatan superfisial), serta penentuan parameter penelitian (densitas, viskositas, suhu, tekanan, dll). Langkah berikutnya adalah pengaturan simulasi, seperti metode yang digunakan, ukuran *mesh*, jenis *mesh*, dan sebagainya. Berdasarkan hasil pengaturan tersebut, dilakukan simulasi dengan parameter sesuai dengan penelitian eksperimen terdahulu. Jika hasilnya sesuai, maka pengaturan tersebut bisa diterapkan untuk penelitian ini. Kemudian, dilakukan studi parametrik, yaitu dengan uji sensitivitas (mengubah metode atau parameter lain dan mengamati perubahannya). Setelah itu, dilakukan pengambilan data penelitian ini, dan dilakukan analisis data dan pembahasan.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

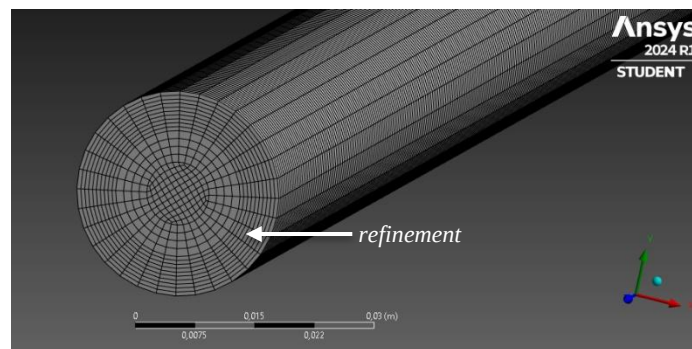
2.1 Pengaturan Simulasi

Studi simulasi dilakukan pada aliran uap-air dalam pipa horisontal. Gambar 2 menunjukkan geometri pipa yang digunakan dalam pendekatan 3D. Pipa tersebut memiliki diameter 26 mm dan panjang 1000 mm. Dalam pendekatan 3D, saluran masuk tengah ditujukan untuk uap, sedangkan saluran masuk luar untuk air [18].



Gambar 2. Geometri pipa

Penelitian ini menggunakan pendekatan 3D dengan *mesh hexahedra* dan penghalusan (*refinement*) *mesh* di tepinya. Tujuan penghalusan *mesh* adalah untuk meningkatkan akurasi, khususnya dalam mendeteksi fenomena kritis di dekat daerah dinding. Gambar 3 mengilustrasikan *mesh hexahedra*.



Gambar 3. Meshing pipa

Volume of Fluid (VoF) digunakan untuk memodelkan perilaku aliran dua-fasa dalam pipa, seperti yang dilakukan pada penelitian sebelumnya [18][20][21]. Model yang digunakan untuk memodelkan aliran turbulen adalah *shear stress transport* (SST) $k-\omega$. Ringkasan pengaturan simulasi penelitian ini disajikan di Tabel 1.

Tabel 1. Pengaturan simulasi penelitian

Parameter	Setting
Solver type	Pressure-based
Pendekatan simulasi	Transient with first order implicit
Percepatan gravitasi (m/s^2)	-9.81 in the y- axis
Pressure-velocity coupling	SIMPLE
Spatial discretization - gradient	Least squares cell based
Pressure	PRESTO!
Momentum	Second-order upwind
Volume fraction	Geo-reconstruct
Turbulent kinetic energy	Second-order upwind
Energy	Second-order upwind
Initialization method	Hybrid initialization

2.2 Persamaan

Persamaan yang diterapkan pada studi simulasi aliran uap-air ini didefinisikan di Persamaan 1-3.

Kekekalan massa:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Kekekalan momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

Persamaan Fraksi Volume:

$$\frac{\partial(\rho_o \alpha_o)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_o \alpha_o \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

Densitas uap dan air ditetapkan masing-masing sebesar 11,60 kg/m³ dan 840,3 kg/m³. Viskositas uap dan air ditetapkan masing-masing sebesar 1,641 x 10⁻⁵ kg/m·s dan 0,122 x 10⁻³ kg/m·s. Kedua fluida diatur pada suhu 220°C, dengan tekanan 2.318 kPa. Tegangan permukaan ditetapkan sebesar 0,0331 N/m. Kecepatan superfisial untuk uap (J_s) ditetapkan 6 dan 16 m/s dan untuk air adalah 0,05–0,1 m/s. Variasi ini disesuaikan untuk menganalisis pola aliran, *pressure drop*, dan *water holdup*.

Pressure drop aliran dua-fasa dalam pipa terkait dengan rumus berikut

$$\Delta P = f_m \frac{L}{D} \frac{\rho_m J_m^2}{2} \quad (4)$$

di mana,

f_m = faktor gesekan dua-fasa

ρ_m = densitas campuran

J_m = kecepatan campuran

$$\rho_m = \alpha_{uap} \rho_{uap} + \alpha_{air} \rho_{air} \quad (5)$$

$$J_m = \alpha_{uap} J_{uap} + \alpha_{air} J_{air} \quad (6)$$

dengan

α_{uap} dan α_{air} = fraksi volumetric tiap fasa

Nilai *water holdup* pada aliran dua-fasa dalam pipa terkait dengan rumus berikut.

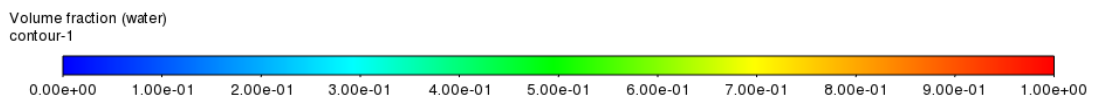
$$\alpha_{uap} + \alpha_{air} = 1 \quad (7)$$

$$\alpha_{air} = 1 - \alpha_{uap} \quad (8)$$

3. HASIL DAN ANALISIS

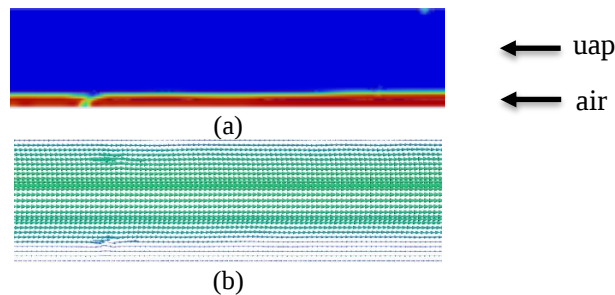
3.1. Studi Validasi

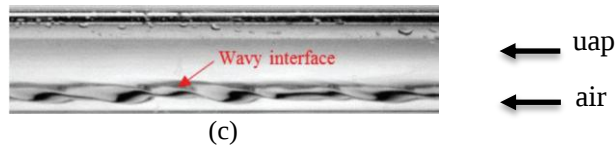
Studi validasi dilakukan dengan merujuk pada eksperimen yang dilakukan oleh Humami dkk [22] pada aliran udara-air dalam pipa horisontal dengan diameter dalam 26 mm. Dalam studi simulasi ini, skala warna ditunjukkan pada Gambar 4. Warna biru mewakili uap, sedangkan warna merah mewakili air. Hasil validasi pola aliran ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Skala warna pada simulasi

Gambar 5 menunjukkan bahwa pola aliran dari hasil eksperimen mirip dengan hasil simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran *mesh* dan parameter yang digunakan dalam simulasi selaras dengan kondisi eksperimen, sehingga cocok untuk digunakan dalam simulasi selanjutnya dengan variasi yang berbeda. Selain itu, studi validasi dilakukan menggunakan pendekatan 3D, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Validasi 3D juga dibandingkan dengan hasil eksperimen oleh Humami dkk [22].





Gambar 5. Perbandingan pola aliran (a) hasil CFD (b) vektor kecepatan aliran (c) hasil eksperimen [22]

Dalam studi validasi 3D, Gambar 5 menunjukkan kemiripan antara pola aliran yang diperoleh dari hasil simulasi dan data eksperimen. Konsistensi ini menunjukkan bahwa parameter dan ukuran *mesh* yang digunakan sesuai, sehingga memungkinkan penerapannya dalam simulasi mendatang.

3.2. Pola Aliran

Pola aliran merupakan salah satu parameter aliran dua-fasa yang sangat penting, salah satunya berkaitan dengan keamanan suatu sistem [9]. Pola aliran dalam penelitian ini divariasikan dengan kecepatan superfisial gas-cair masing-masing 6-30 m/s dan 0,05-0,1 m/s. Hasil simulasi uap-air ditunjukkan pada Tabel 2. Warna merah mewakili air dan warna biru mewakili udara. Pola aliran yang diperoleh dari simulasi dapat dibagi menjadi dua kategori dasar: (1) *stratified-wavy flow* dan (2) *mist flow*.

Tabel 2. Pola aliran

Var	J_s	$J_w = 0.05 \text{ m/s}$
1	6	
2	16	
3	30	
		$J_w = 0.1 \text{ m/s}$
4	6	
5	16	
6	30	

Seperti yang disajikan pada Tabel 2, pola aliran uap-air pada saluran horisontal dapat diidentifikasi secara visual. Pada nilai J_w yang konstan, seiring dengan peningkatan J_s , komposisi air pada aliran menurun. Var 1 menunjukkan pola *stratified-wavy flow* dengan sedikit *mist*. Pola aliran ini menunjukkan bahwa efek gravitasi masih dominan pada aliran dengan J_s yang relatif rendah. Kemudian, seperti yang disajikan pada Var 2, seiring dengan peningkatan J_s , energi kinetik uap juga meningkat. Hal ini menyebabkan *stratified-wavy flow* tidak stabil, beberapa cairan pecah, kemudian menghasilkan lebih banyak *mist*. Selanjutnya, seiring dengan peningkatan J_s , dalam kondisi tanpa slip, cairan akan terbawa ke tengah pipa, menyebabkan *stratified-wavy flow* dan membentuk *mist* (Var 3).

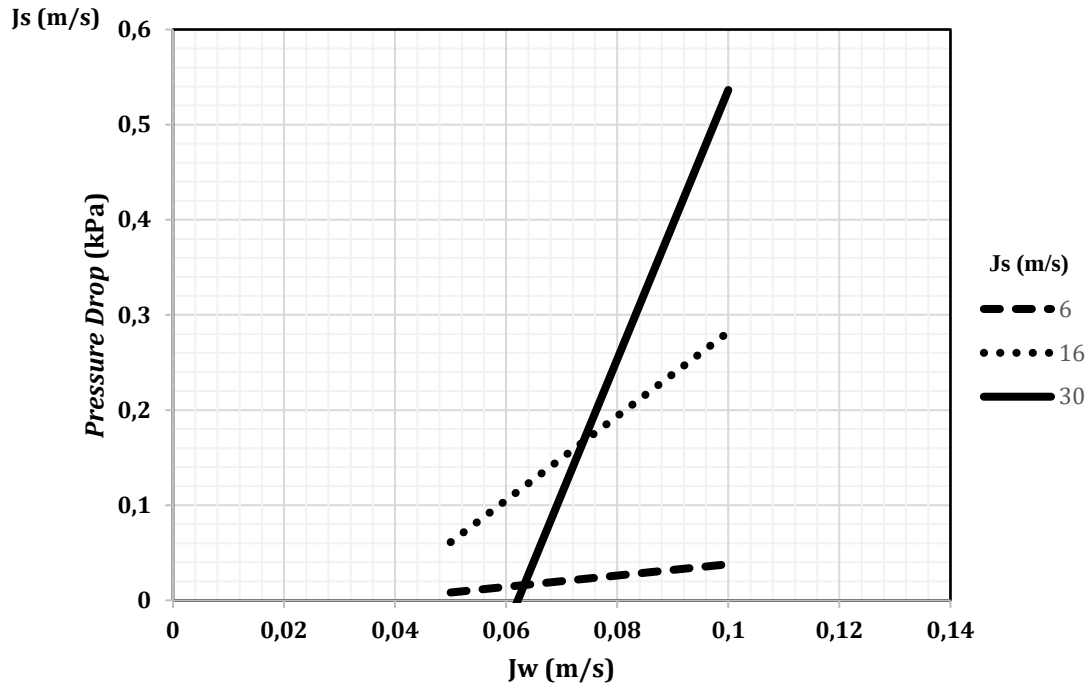
Fenomena serupa terjadi pada nilai $J_w = 0.1 \text{ m/s}$. Seiring peningkatan nilai J_s , proporsi air di dalam pipa terlihat semakin berkurang. Pada Var 4, teramati *stratified-wavy flow*, yang kemudian bertransformasi seiring perubahan nilai J_s .

Seperti yang disebutkan sebelumnya, pola aliran yang teramati adalah *stratified-wavy flow* dan *mist flow*. *Stratified-wavy flow* terbentuk ketika gas-cair mengalir dalam pipa horisontal, di mana cairan mengalir di sepanjang bagian bawah pipa dan gas mengalir di bagian atas. Pada kecepatan tertentu, aliran cairan dan gas yang relatif tenang dapat menjadi tidak stabil karena ketidakstabilan Kelvin-Helmholtz, yang kemudian

memicu pembentukan gelombang pada permukaan cairan [23]. Selanjutnya, seiring kenaikan kecepatan superfisial gas, ketidakstabilan tersebut juga meningkat dan menyebabkan cairan menjadi pecah dan berubah menjadi *mist flow*.

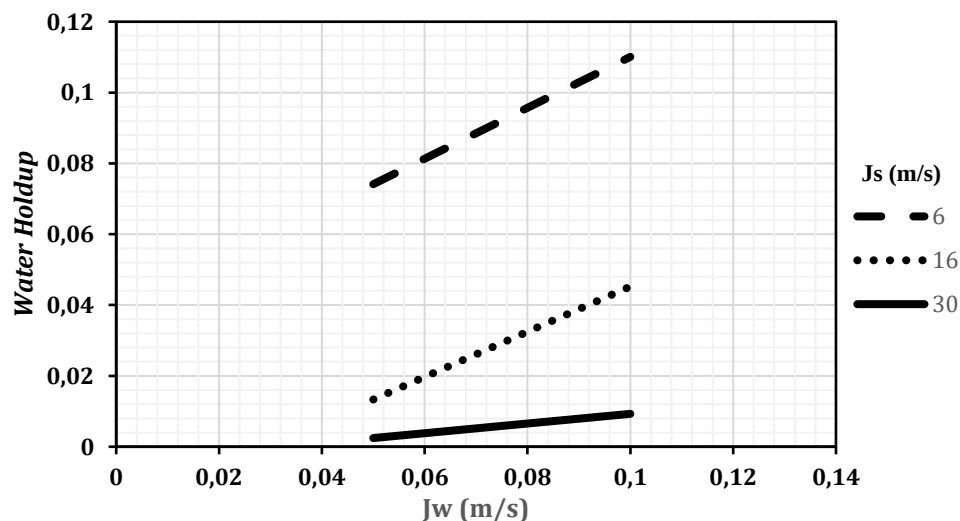
3.3. Pressure Drop dan Water Holdup

Gambar 6 menunjukkan data *pressure drop* hasil simulasi aliran uap-air di pipa horizontal. Dari diagram terlihat bahwa *pressure drop* meningkat seiring kenaikan nilai J_w . Secara umum, nilai *pressure drop* pada J_s 30 m/s terlihat paling besar dibandingkan J_s 16 m/s dan 6 m/s. Semakin tinggi kecepatan, maka gesekannya juga semakin besar. Hal tersebut menyebabkan nilai *pressure drop* juga meningkat.



Gambar 6. Diagram *pressure drop* hasil simulasi

Gambar 7 menunjukkan data *water holdup* hasil simulasi aliran uap-air di pipa horizontal. Dari diagram terlihat bahwa *water holdup* meningkat seiring kenaikan nilai J_w . Nilai *water holdup* pada J_s 6 m/s terlihat paling tinggi, yang disusul oleh J_s 16 m/s, dan paling rendah adalah pada J_s 30 m/s. Hal tersebut tentu saja sesuai, di mana semakin tinggi kecepatan udara pada J_w tetap, maka proporsi air di dalam pipanya semakin sedikit.



Gambar 7. Diagram *water holdup* hasil simulasi

4. KESIMPULAN

Dari hasil studi simulasi aliran dua-fasa uap-air di pipa horisontal didapatkan hasil sebagai berikut:

- 1) Hasil validasi CFD menunjukkan kesesuaian dengan hasil eksperimen.
- 2) Pola aliran yang teramati adalah *stratified-wavy flow* dan *mist flow*.
- 3) Nilai *pressure drop* dan *water holdup* secara umum meningkat seiring dengan peningkatan nilai J_w .

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari program penelitian yang didanai oleh Direktorat Riset, Teknologi dan Pengabdian kepada Masyarakat Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi tahun Anggaran 2024, SP Nomor DIPA-023.17.1.690523/2024 revisi ke-1 tanggal 4 Februari 2024.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Wang *et al.*, "Investigation of air-water two-phase flow characteristics in a 25.4 mm diameter circular pipe," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 138, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.pnucene.2021.103813.
- [2] Y. Zhang, C. He, and P. Li, "Numerical investigation of gas-liquid two-phase flow in horizontal pipe with orifice plate," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 138, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.pnucene.2021.103801.
- [3] B. Jalaali, M. R. E. Nasution, K. A. Yuana, Deendarlianto, and O. Dinaryanto, "Investigating the effects of viscosity and density ratio on the numerical analysis of Rayleigh-Taylor instability in two-phase flow using Lattice Boltzmann method: From early stage to equilibrium state," *Appl Math Comput*, vol. 411, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.amc.2021.126490.
- [4] Sudarja, Sukamta, F. A. K. Yudha, M. H. Susanto, and E. Kumolosari, "A Study on Two-Phase Flow with High Viscosity and Low Surface Tension Liquid in a 40-Degree Inclined Mini Channel," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 121, no. 1, pp. 39–55, 2024, doi: 10.37934/arfmts.121.1.3955.
- [5] M. J. Barasa Kabeyi and O. A. Olanrewaju, "Geothermal wellhead technology power plants in grid electricity generation: A review," Jan. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.esr.2021.100735.
- [6] H. Li, S. Rane, and Z. Yu, "Investigation of the performance and flow characteristics of two-phase reaction turbines in total flow geothermal systems," *Renew Energy*, vol. 175, pp. 345–372, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.05.022.
- [7] S. Helbig and S. J. Zarrouk, "Measuring two-phase flow in geothermal pipelines using sharp edge orifice plates," *Geothermics*, vol. 44, pp. 52–64, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.geothermics.2012.07.003.
- [8] L. A. A.-A. Mahdi, H. A. A. Wahhab, and M. T. Chaichan, "The Change of Flow Pattern from Stratified to Stratified-Wavy for Condensation in Wire on Tube Heat Exchangers," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 117, no. 2, pp. 105–115, May 2024.
- [9] J. Shao, X. Li, Z. Guo, T. Ma, R. Liu, and X. Tian, "Flow pattern, pressure drop and heat transfer coefficient during two-phase flow boiling of R134a in pump-assisted separate heat pipe," *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 85, pp. 240–247, 2017, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.03.007.
- [10] J. Shi, L. Lao, and H. Yeung, "Water-lubricated transport of high-viscosity oil in horizontal pipes: The water holdup and pressure gradient," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 96, pp. 70–85, 2017, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.07.005.
- [11] X. Zheng, B. Yang, and B. Bai, "Capacitance probe for water holdup measurement in crude oil-water flows," *Measurement: Sensors*, vol. 10–12, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.measen.2020.100028.
- [12] I. Ismail, S. Misnan, A. S. Izwan Ismail, and R. Mohsin, "Pressure drop and water holdup of Malaysian crude oil and water two-phase flow in pipes," in *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, 2014, pp. 1248–1252. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.931-932.1248.
- [13] H. Fazelnia, S. Azarhazin, B. Sajadi, M. A. A. Behabadi, S. Zakeralhoseini, and M. V. Rafieinejad, "Two-phase R1234yf flow inside horizontal smooth circular tubes: Heat transfer, pressure drop, and flow pattern," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 140, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103668.
- [14] R. Kong, S. Kim, S. Bajorek, K. Tien, and C. Hoxie, "Effects of pipe size on horizontal two-phase flow: Flow regimes, pressure drop, two-phase flow parameters, and drift-flux analysis," *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 96, pp. 75–89, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.02.030.
- [15] L. K. H. Leung, D. C. Groeneveld, A. Teyssedou, and F. Aubé, "Pressure drops for steam and water flow in heated tubes," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 235, no. 1, pp. 53–65, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.nucengdes.2004.08.020.
- [16] M. H. Mubarak, S. J. Zarrouk, and J. E. Cater, "Two-phase flow measurement of geothermal fluid using orifice plate: Field testing and CFD validation," *Renew Energy*, vol. 134, pp. 927–946, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.11.081.

- [17] E. Burlutskii, "CFD study of oil-in-water two-phase flow in horizontal and vertical pipes," *J Pet Sci Eng*, vol. 162, pp. 524–531, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.petrol.2017.10.035.
- [18] Deendarlianto, M. Andrianto, A. Widyaparaga, O. Dinaryanto, Khasani, and Indarto, "CFD Studies on the gas-liquid plug two-phase flow in a horizontal pipe," *J Pet Sci Eng*, vol. 147, pp. 779–787, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.petrol.2016.09.019.
- [19] S. Schmelter, M. Olbrich, E. Schmeyer, and M. Bär, "Numerical simulation, validation, and analysis of two-phase slug flow in large horizontal pipes," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 73, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101722.
- [20] J. Shi, M. Gourma, and H. Yeung, "A CFD study on horizontal oil-water flow with high viscosity ratio," *Chem Eng Sci*, vol. 229, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ces.2020.116097.
- [21] B. Jalaali, E. Kumolosari, and O. Dinaryanto, "CFD studies on the high-viscosity oil-water two-phase flow in a horizontal pipe," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Feb. 2023. doi: 10.1063/5.0114228.
- [22] F. Humami, O. Dinaryanto, A. Z. Hudaya, A. Widyatama, Indarto, and Deendarlianto, "Experimental study on the characteristics of flow pattern transitions of air-water two-phase flow in a horizontal pipe," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Aug. 2018. doi: 10.1063/1.5049977.
- [23] G. Liu, Y. Wang, G. Zang, and H. Zhao, "Viscous Kelvin-Helmholtz instability analysis of liquid-vapor two-phase stratified flow for condensation in horizontal tubes," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 84, pp. 592–599, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.054.