

KARAKTERISTIK ALIRAN MINYAK-AIR DENGAN RASIO VISKOSITAS RENDAH DI PIPA HORIZONTAL DENGAN CFD

CHARACTERISTICS OF LOW VISCOSITY RATIO OF OIL-WATER FLOW IN A HORIZONTAL PIPE USING CFD

Eli Kumolosari¹⁾, Teguh Wibowo²⁾, Ndaru Atmi Purnami³⁾

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Kedirgantaraan, ITD Adisutjipto, Yogyakarta, Indonesia

³Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, ITD Adisutjipto, Yogyakarta, Indonesia
email: elikumolosari@itda.ac.id¹⁾, teguhwibowo@itda.ac.id²⁾*, ndaru.atmi.p@mail.ugm.ac.id³⁾

Received:
11 Juli 2024

Accepted:
12 November
2024

Published:
31 Desember
2024



Abstrak

Aliran dua fasa merupakan fenomena penting yang dapat terjadi di berbagai bidang, salah satunya industri minyak. Dalam industri tersebut, aliran minyak-air seringkali terjadi di sumur produksi di lepas pantai. Minyak dialirkan bersama dengan air dalam proses transportasinya. Salah satu pola aliran yang membuat transportasi tersebut lebih ekonomis adalah *core annular flow* (CAF). Penelitian ini melakukan studi CFD terhadap pola aliran minyak-air dengan rasio viskositas rendah pada pipa horizontal dengan L/d 30. Tujuannya adalah untuk mendapatkan kecepatan superficial minyak dan air (J_o dan J_w) yang sesuai untuk mendapatkan pola aliran CAF serta mengetahui nilai *pressure drop* dan *water hold up*. Validasi dilakukan dengan data eksperimen penelitian sebelumnya untuk mendapatkan hasil yang akurat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola aliran yang terbentuk dari variasi J_o dan J_w adalah stratified flow, *Core Annular Flow* (CAF), dan wavy flow. Kemudian, nilai *pressure drop* naik secara linier seiring naiknya nilai J , mulai 0,0413499 kPa pada J 0,21 m/s hingga 0.6898102 pada J 2 m/s. Hubungan antara *pressure drop* dengan *water hold up* tidak spesifik yang dimungkinkan terjadi karena pengaruh faktor gesekan aliran dua-fasa. Terakhir, nilai *pressure drop* pola aliran CAF lebih rendah dari *stratified flow* pada nilai J yang sama. Hal tersebut mengindikasikan kesesuaian hasil dengan teori.

Kata Kunci: CFD, aliran minyak-air, aliran dua-fasa, CAF

Abstract

Two-phase flow is crucial in various fields, particularly in the oil industry, where oil-water flows are common in offshore production wells. Oil is transported with water during its process, and Core Annular Flow (CAF) is one flow pattern that enhances transportation efficiency. This study uses CFD simulations to analyze oil-water flow with a low viscosity ratio in a horizontal pipe ($L/d = 30$). The aim is to determine the superficial velocities of oil and water (J_o and J_w) that form CAF flow patterns and calculate pressure drop and water hold up. Validation was conducted using experimental data for accuracy. Results show three flow patterns: stratified flow, CAF, and wavy flow. Pressure drop increases linearly with rising J values, from 0.0414 kPa at $J_o = 0.21$ m/s to 0.6898 kPa at $J_2 = 2$ m/s. The relationship between pressure drop and water

hold up is nonspecific, likely due to shear stress in two-phase flow. Pressure drop in the CAF pattern is lower than in stratified flow at the same J values, aligning with theoretical predictions.

Keywords: CFD, oil-water flow, two-phase flow, CAF

DOI:10.20527/sjmekinematika.v9i2.324

How to cite: Kumolosari, E., Wibowo, T., & Purnami, N.A., "Karakteristik Aliran Minyak-Air dengan Rasio Viskositas Rendah di Pipa Horizontal dengan CFD". *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 9(2), 244-253, 2024.

PENDAHULUAN

Aliran dua fasa merupakan fenomena penting yang dapat terjadi di berbagai bidang, seperti industri minyak dan gas, reaktor nuklir, sistem pendingin, dan banyak lagi. Pola aliran yang teramati mempengaruhi beberapa kondisi yang diperlukan sistem, sehingga memicu banyak peneliti untuk mempelajari hal ini [1-4]. Keamanan, optimalisasi, dan efisiensi adalah contoh parameter yang terkait dengan pola aliran. Karena fakta bahwa faktor desain, termasuk penurunan tekanan, laju aliran, dan perpindahan panas, sangat dipengaruhi oleh pola aliran, maka memahami pola aliran sangatlah penting [5].

Dalam industri perminyakan, aliran minyak-air seringkali terjadi di sumur produksi di lepas pantai. Minyak dialirkan bersama dengan air dalam proses transportasinya. Perbedaan sifat kimia dan polaritas menyebabkan kedua cairan tersebut tidak menyatu, sehingga kedua cairan bisa mengalir bersamaan di dalam pipa tanpa tercampur. Salah satu pola aliran yang membuat transportasi tersebut lebih ekonomis adalah *Core Annular Flow* (CAF) [6]. Minyak mengalir di tengah pipa dengan air di sekelilingnya. Tujuannya adalah minyak tidak berinteraksi langsung dengan pipa, sehingga meminimalisir gesekan, yang kemudian meminimalisir penurunan tekanan. Air diatur untuk melapisi minyak karena memiliki viskositas yang lebih rendah sehingga rugi-rugi karena gesekan dengan pipa tidak sebesar minyak.

Selain pola aliran, *pressure drop* dan *water hold up* juga merupakan parameter yang penting dalam aliran minyak-air. Nilai *pressure drop* yang rendah diharapkan, sebagai indikasi rugi-rugi yang kecil selama berlangsungnya transportasi minyak-air di dalam pipa. *Water hold up* merupakan parameter untuk menunjukkan persentase kandungan air di dalam suatu aliran dua-fasa. *Pressure drop* dan *water hold up* terkait dengan beberapa hal yang *urgent* dalam distribusi minyak, salah satunya desain dan operasi dalam aplikasi teknik [7].

CFD (*Computational Fluid Dynamics*) merupakan salah satu metode untuk memodelkan pola aliran di dalam saluran. CFD memiliki kemampuan untuk mengeksplorasi area yang tidak dapat diakses dan dilakukan dengan studi eksperimental [8]. Selain itu, metode CFD memiliki biaya dan risiko yang lebih rendah dibandingkan dengan studi eksperimental. Di sisi lain, hasilnya mungkin tidak akurat akibat pengaturan pemodelan yang tidak tepat. Konsekuensinya, harus divalidasi dengan data eksperimen [8].

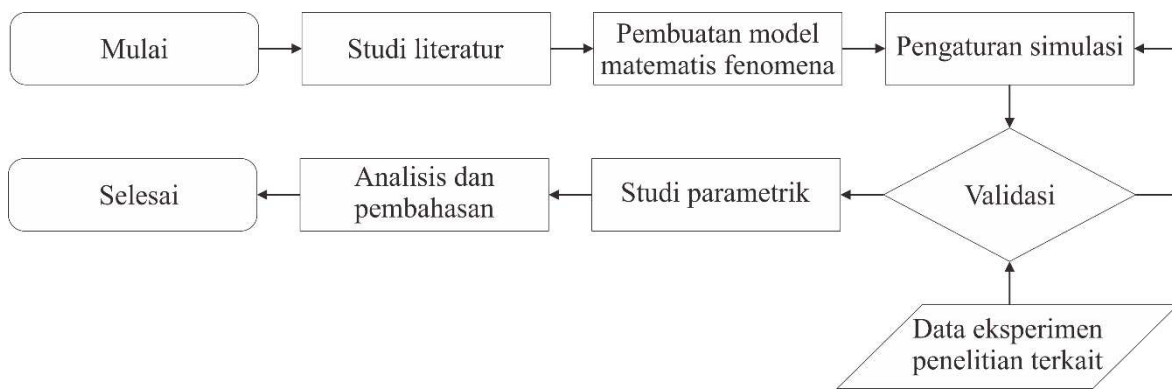
Deendarlianto dkk. [2] melakukan studi CFD dan eksperimental untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang karakteristik plug gas-cair pada saluran horizontal. Data eksperimen digunakan untuk memvalidasi CFD. Hasilnya menunjukkan kesesuaian yang baik dari kedua metode. Shi dkk. [6] juga melakukan studi CFD untuk mengetahui perilaku aliran minyak-air (dengan rasio viskositas tinggi) pada saluran horizontal. Penelitian numerik pada aliran minyak-air juga dilakukan oleh Benziane dkk. [9]. Tujuan penelitian tersebut adalah untuk mensimulasikan aliran emulsi yang merupakan fenomena kompleks di industri perminyakan, sehingga bisa memberikan solusi kasus korosi selama transportasi hidrokarbon. Benziane dkk. merekomendasikan CFD sebagai alat investigasi karena keakuratannya. Dehkordi dkk. [10] melakukan studi CFD tentang CAF pada aliran minyak-air. *Flow pattern*, *pressure drop*, dan *water hold up* yang dihasilkan menunjukkan konsistensi dengan hasil eksperimen. Ismail dkk. [11] melakukan investigasi *pressure drop*

dan *water hold up* pada aliran minyak-air di dalam pipa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *pressure drop* meningkat seiring meningkatnya laju aliran, sedangkan *water hold up* sedikit menurun pada *water cut* yang lebih tinggi, kemungkinan diakibatkan adanya emulsi pada minyak.

Penelitian ini melakukan studi CFD terhadap pola aliran minyak-air dengan rasio viskositas rendah pada pipa horizontal dengan L/d 30. Tujuannya adalah untuk mendapatkan kecepatan superfisial minyak dan air (J_o dan J_w) yang sesuai untuk mendapatkan pola aliran CAF serta mengetahui nilai *pressure drop* dan *water hold up*.

METODE PENELITIAN

Alur penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Alur penelitian ini menjelaskan tentang langkah-langkah penelitian yang dilaksanakan. Dengan adanya alur penelitian ini diharapkan bisa memudahkan peneliti untuk menjalankan penelitian sehingga penelitian dapat mencapai tujuan sesuai harapan.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Studi literatur

Pada tahap ini, jurnal-jurnal terkait dipelajari untuk mendapatkan pandangan mengenai arah penelitian serta gap penelitian yang kemudian diteliti di jurnal ini. Selain itu, studi literatur juga dilakukan untuk mendapatkan jurnal sebagai rujukan validasi data.

Pembuatan model matematis fenomena

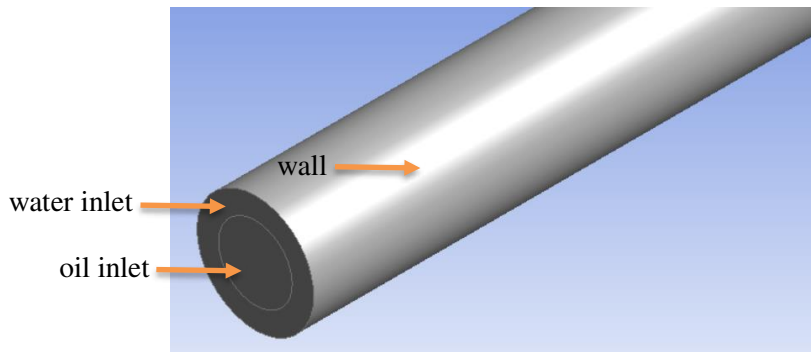
Penurunan persamaan-persamaan yang terkait, sesuai dengan fenomena yang terjadi pada aliran minyak-air di pipa horizontal. Dilakukan juga penentuan parameter-parameter yang diperlukan, sebagai langkah awal simulasi.

Pengaturan simulasi

Penelitian simulasi dilakukan dengan Ansys Student dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pembuatan geometri

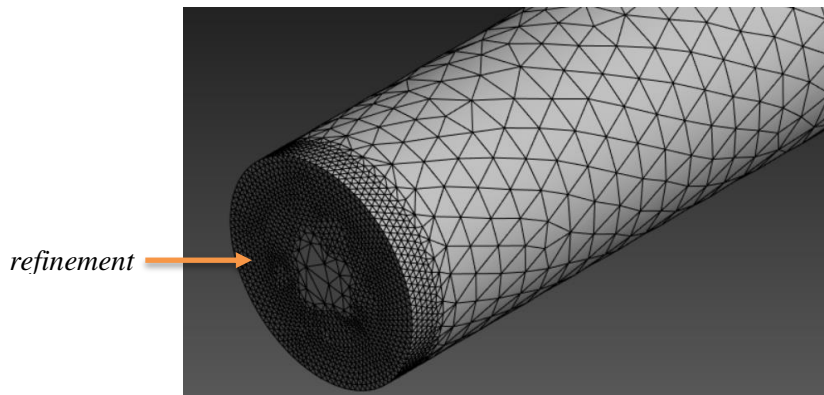
Penelitian ini memodelkan objek sebagai aliran transien dengan geometri 3D. Pipa diatur dengan diameter 25,4 mm dan panjang 762 mm ($L/d = 30$). Gambar 2 menunjukkan geometri pipa pada penelitian ini.



Gambar 2. Geometri pipa 3D

2. Proses *meshing*

Proses *meshing* adalah proses pembagian geometri menjadi elemen-elemen lebih kecil sehingga bisa dilakukan penyelesaian persamaan-persamaan di dalamnya. Dalam simulasi ini, jenis *mesh* yang digunakan adalah tetrahedral dengan proses *refinement* di diameter luar (dekat dinding). Tujuan *refinement* adalah memperhalus *mesh* agar fenomena kritis di area dinding bisa dideteksi dengan lebih akurat. Gambar 3 menunjukkan hasil *meshing* tetrahedral.



Gambar 3. *Meshing tetrahedral* pada pipa

3. *Setup*

Volume of Fluid (VoF) digunakan untuk menggambarkan perilaku aliran dua fasa di dalam pipa seperti penelitian-penelitian sebelumnya [2,6,12]. Aliran minyak-air dideskripsikan dengan Persamaan 1-3.

Konservasi massa:

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

Konservasi 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:

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

Model *shear stress transport* (SST) $k - \omega$ digunakan untuk memodelkan aliran turbulen. Metode solusi yang diaplikasikan adalah skema SIMPLE serta diskritisasi spasial PRESTO!, dan skema interpolasi fraksi volum adalah *Geo-Reconstruct*.

Validasi

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen penelitian sebelumnya. Tujuannya untuk mendapatkan hasil simulasi yang akurat sesuai dengan eksperimen.

Studi parametrik

Dalam studi parametrik, minyak diatur memiliki densitas 910 kg/m^3 dan viskositas 20 cP ($0,02 \text{ kg/m.s}$). Tegangan permukaan dimasukkan sebesar $0,02 \text{ N/m}$. J_o dan J_w diatur dalam rentang $0,11-1,2 \text{ m/s}$ dan $0,1-0,8 \text{ m/s}$ secara berturut-turut. Variasi tersebut diatur untuk mendapatkan pola aliran serta nilai *pressure drop* dan *water hold up* kasus terkait.

Nilai *pressure drop* aliran dua-fasa di dalam pipa terkait dengan rumus berikut:

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

Dengan f_m merupakan faktor gesekan dua fase, ρ_m merupakan densitas campuran, dan J_m merupakan kecepatan campuran.

$$\rho_m = \alpha_{oil}\rho_{oil} + \alpha_{water}\rho_{water} \quad (5)$$

$$J_m = \alpha_{oil}J_{oil} + \alpha_{water}J_{water} \quad (6)$$

Dengan α_{oil} dan α_{water} adalah fraksi volumetrik masing-masing volum.

Nilai *water hold up* aliran dua-fasa di dalam pipa terkait dengan rumus berikut:

$$\alpha_{oil} + \alpha_{water} = 1 \quad (7)$$

$$\alpha_{water} = 1 - \alpha_{oil}$$

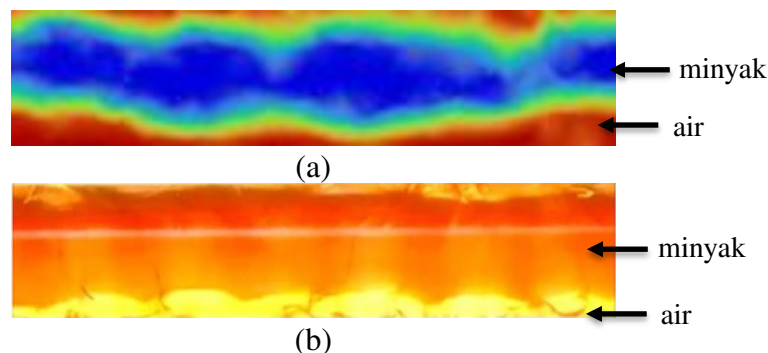
Analisis dan pembahasan

Langkah selanjutnya setelah simulasi selesai adalah analisis data dan pembahasan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi

Penelitian oleh Shi dkk.[7] menjadi rujukan dalam validasi penelitian ini. Parameter yang divalidasi berupa pola aliran (Gambar 4) serta nilai *pressure drop* dan *water hold up* (Tabel 1).



Gambar 4. Perbandingan pola aliran (a) hasil CFD dengan (b) hasil eksperimen[6]

Simulasi diatur sesuai dengan kondisi eksperimen hingga mendapatkan pola aliran yang sesuai. Pada penelitian ini, digunakan model *VoF*, dan $(SST) k - \omega$. Metode solusi yang diaplikasikan adalah skema SIMPLE serta diskritisasi spasial PRESTO, dan skema interpolasi fraksi volum adalah *Geo-Reconstruct*. Sudut kontak dengan dinding diatur hingga mendapatkan pola aliran yang sesuai. Dalam penelitian ini, sudut kontak yang sesuai adalah 130° . Jumlah *nodes* dan *elements* adalah 16118 dan 75465 secara berturut-turut.

Perbandingan pola aliran hasil simulasi dan eksperimen terlihat pada Gambar 4. Dari gambar tersebut terlihat pola aliran yang teramati adalah *core annular flow* di mana minyak mengalir di tengah pipa dengan air mengelilinginya. Berdasarkan hasil studi validasi juga didapatkan nilai *pressure drop* dan *water hold up* yang dibandingkan dengan hasil eksperimen[6]. Tabel 1 menunjukkan nilai hasil validasi *pressure drop* dan *water hold up*.

Tabel 1. Nilai hasil studi validasi

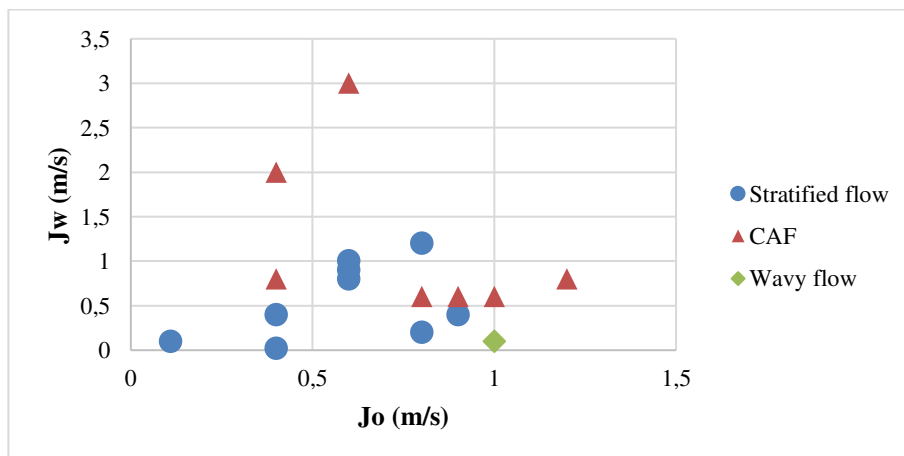
<i>Pressure Drop (kPa)</i>			<i>Water Hold up</i>		
CFD	Eksperimen	Error	CFD	Eksperimen	Error
1,77371719	1,31	35,40%	0,61872434	0,5	23,74%

Pola Aliran

Pada studi CFD ini, J_o dan J_w diatur dalam rentang 0,11-1,2 m/s dan 0,1-0,8 m/s secara berturut-turut untuk mendapatkan pola aliran yang paling menguntungkan dalam kasus aliran minyak-air. Pola aliran yang diharapkan adalah CAF. Tabel 2 menunjukkan pola aliran yang terbentuk dari variasi J_o dan J_w , sedangkan Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan J_o dan J_w dengan pola aliran yang teramati.

Tabel 2. Pola aliran yang terbentuk dari variasi J_o dan J_w

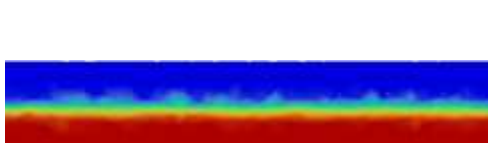
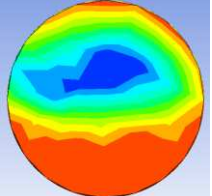
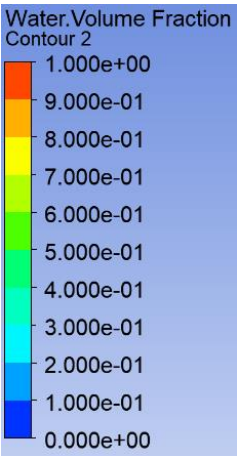
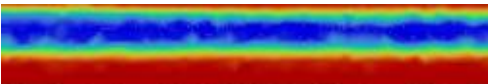
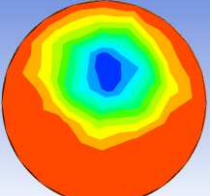
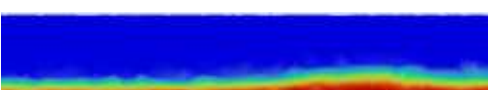
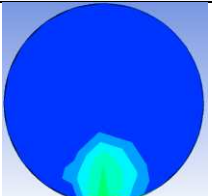
Var	J_o (m/s)	J_w (m/s)	Pola Aliran
1	0,11	0,1	Stratified flow
2	0,4	0,02	Stratified flow
3	0,4	0,4	Stratified flow
4	0,4	2	CAF
5	0,4	0,8	CAF
6	0,6	0,8	Stratified flow
7	0,6	0,9	Stratified flow
8	0,6	1	Stratified flow
9	0,6	3	CAF
10	0,8	0,2	Stratified flow
11	0,8	0,6	CAF
12	0,8	1,2	Stratified flow
13	0,9	0,4	Stratified flow
14	0,9	0,6	CAF
15	1	0,1	Wavy flow
16	1	0,6	CAF
17	1,2	0,8	CAF



Gambar 5. Pola aliran pada variasi J_o dan J_w

Gambar 3 menunjukkan bahwa pola aliran *stratified flow* terbentuk pada nilai J_o dan J_w yang cenderung rendah, yaitu di bawah 1 m/s dan 1,5 m/s secara berturut-turut. Pola aliran ini menunjukkan aliran minyak dan air yang terpisah. Minyak berada di bagian atas, dan air di bawah. Hal tersebut terkait dengan densitas minyak yang lebih rendah dari air. Kemudian pola aliran CAF terbentuk pada variasi J_o dan J_w yang beragam. Pola CAF teramati sebagai aliran di mana minyak mengalir di inti dengan air mengalir mengelilinginya. Sementara itu, pola aliran *wavy flow* hanya teramati sekali, yaitu pada nilai J_o rendah dan J_w menengah. Tabel 3 menunjukkan visual pola aliran jika ditangkap dari *wall* dan *outlet*. Di Tabel 3, minyak direpresentasikan berwarna biru, dan air berwarna merah.

Tabel 3. Visual pola aliran ditangkap dari *wall* dan *outlet*

Pola Aliran	Plane	Outlet	Keterangan
Stratified Flow			
CAF			
Wavy Flow			

Pressure Drop dan Water Hold up

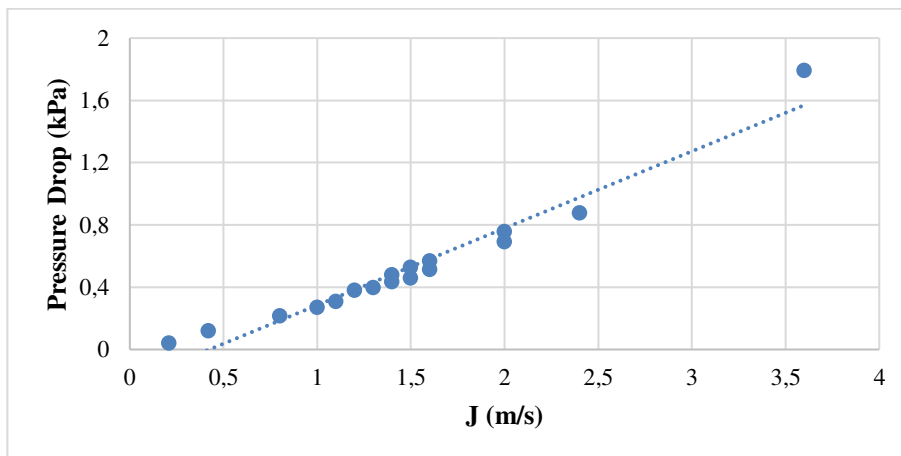
Tabel 4 menunjukkan nilai *pressure drop* dan *water hold up* hasil CFD. Sedangkan Gambar 6 dan 7 menunjukkan grafik hubungan J (kecepatan superfisial campuran) dengan *pressure drop* serta grafik hubungan *pressure drop* dengan *water hold up* secara berturut-turut.

Tabel 4. Nilai *pressure drop* dan *water hold up* hasil CFD

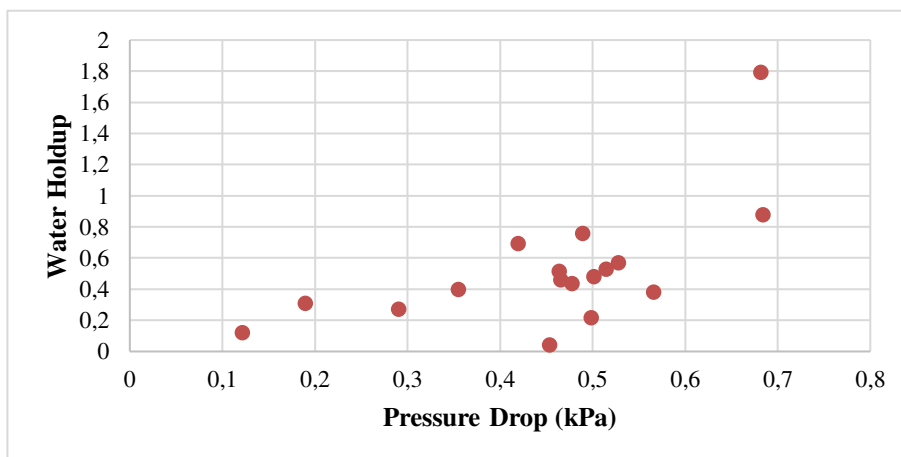
Var	J_o (m/s)	J_w (m/s)	J (m/s)	Pressure Drop (kPa)	Water Hold up
1	0,11	0,1	0,21	0,0413499	0,45406071
2	0,4	0,02	0,42	0,1170838	0,12193508
3	0,4	0,4	0,8	0,2129056	0,49883908
4	0,4	2	2,4	0,8753237	0,68437533
5	0,4	0,8	1,2	0,3796178	0,56625656
6	0,6	0,8	1,4	0,4787854	0,50144454
7	0,6	0,9	1,5	0,5253519	0,51518636
8	0,6	1	1,6	0,5663833	0,52814968
9	0,6	3	3,6	1,7891285	0,68226208
10	0,8	0,2	1	0,2683884	0,29045891
11	0,8	0,6	1,4	0,4350934	0,47832677

Var	J_o (m/s)	J_w (m/s)	J (m/s)	Pressure Drop (kPa)	Water Hold up
12	0,8	1,2	2	0,7541732	0,48975895
13	0,9	0,4	1,3	0,3949005	0,3550744
14	0,9	0,6	1,5	0,4564615	0,46606147
15	1	0,1	1,1	0,3069958	0,19010665
16	1	0,6	1,6	0,5138923	0,46425498
17	1,2	0,8	2	0,6898102	0,42011406

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara J dengan *pressure drop* di mana *pressure drop* naik secara linier seiring naiknya nilai J . Nilai *pressure drop* terendah terjadi pada nilai J_o dan J_w 0,11 m/s dan 0,1 m/s secara berturut-turut. Kemudian, nilai *pressure drop* tertinggi dialami aliran pada J_o dan J_w 0,6 m/s dan 3 m/s secara berturut-turut. Sedangkan di Gambar 7 terlihat hubungan antara *pressure drop* dengan *water hold up*. Dari grafik terlihat bahwa hubungan antara *pressure drop* dengan *water hold up* tidak spesifik. Hal tersebut dimungkinkan terjadi karena pengaruh faktor gesekan aliran dua-fasa yang masih di luar batasan studi CFD ini.



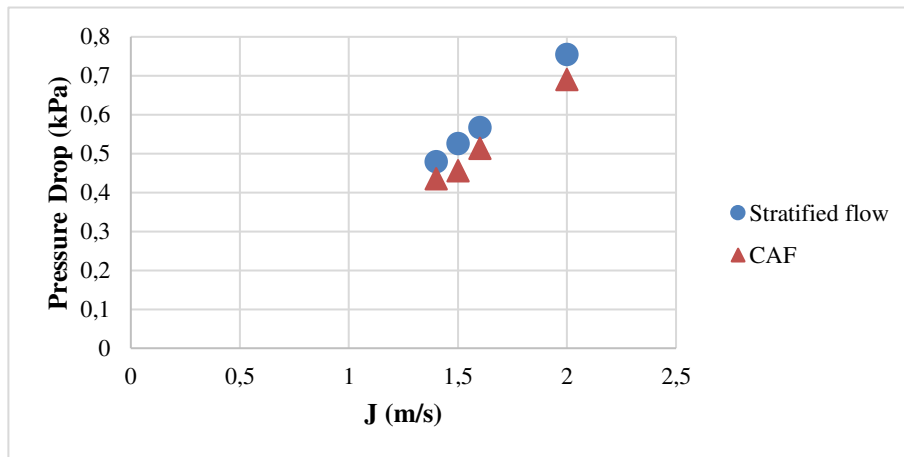
Gambar 6. Grafik hubungan J (kecepatan superfisial campuran) dengan *pressure drop*



Gambar 7. Grafik hubungan *pressure drop* dengan *water hold up*

Gambar 8 menunjukkan grafik perbandingan *pressure drop* pada pola CAF dan stratified flow. Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai *pressure drop* pola aliran CAF lebih rendah dari stratified flow pada nilai J yang sama. Hal ini sesuai dengan teori bahwa ketika aliran minyak-air mengalir bersamaan di dalam pipa dengan posisi minyak di inti dan air di sekelilingnya (pola CAF), maka nilai *pressure drop* lebih rendah dibanding pola aliran

lain[6]. Hal tersebut tentu saja menguntungkan, karena dengan nilai J yang sama, nilai rugi-rugi yang dialami lebih rendah. Oleh karena itu pola CAF sangat disarankan pada industri perminyakan, khususnya pada proses distribusinya.



Gambar 8. Grafik perbandingan nilai *pressure drop* pada pola aliran CAF dan *stratified flow*

KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang bisa ditarik dari studi CFD aliran minyak-air ini adalah sebagai berikut:

1. Pola aliran yang teramati pada aliran minyak-air studi ini adalah *stratified flow*, *core annular flow* (CAF), dan *wavy flow*.
2. Nilai *pressure drop* naik secara linier seiring naiknya nilai J .
3. Hubungan antara *pressure drop* dengan *water hold up* tidak spesifik yang dimungkinkan terjadi karena pengaruh faktor gesekan aliran dua-fasa.
4. Nilai *pressure drop* pola aliran CAF lebih rendah dari *stratified flow* pada nilai J yang sama.

UCAPAN TERIMA KASIH (Jika ada)

Penelitian ini merupakan hasil dari skema penelitian internal institusi penulis. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM), Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto Yogyakarta yang telah mendanai keseluruhan penelitian ini.

REFERENSI

- [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] 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.
- [3] Sudarja, Sukamta, and F. Saputra, "Investigation of Flow Pattern and Void Fraction of Air and Low Surface Tension Liquid in A 30° Inclined Small Pipe," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 83, no. 2, pp. 73–83, 2021, doi: 10.37934/ARFMTS.83.2.7383.
- [4] E. Kumolosari and B. Jalaali, "Numerical study of pressure drops and flow characteristic in high temperature air-water stratified flow using the AIAD model", doi: 10.28989/angkasa.vxxx.xxx.

- [5] S. Passoni, I. M. Carraretto, R. Mereu, and L. P. M. Colombo, “Two-phase stratified flow in horizontal pipes: A CFD study to improve prediction of pressure gradient and void fraction,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 191, pp. 38–49, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.cherd.2023.01.016.
- [6] 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.
- [7] J. Shi, L. Lao, and H. Yeung, “Water-lubricated transport of high-viscosity oil in horizontal pipes: The water hold up and pressure gradient,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 96, pp. 70–85, 2017, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.07.005.
- [8] 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.
- [9] M. Meriem-Benziane, B. Bou-Saïd, and B. Abdelkader, “A CFD modeling of oil-water flow in pipeline: Interaction analysis and identification of boundary separation,” *Petroleum Research*, vol. 6, no. 2, pp. 172–177, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.ptlrs.2020.10.004.
- [10] P. Babakhani Dehkordi, L. P. M. Colombo, M. Guilizzoni, and G. Sotgia, “CFD simulation with experimental validation of oil-water core-annular flows through Venturi and Nozzle flow meters,” *J Pet Sci Eng*, vol. 149, pp. 540–552, 2017, doi: 10.1016/j.petrol.2016.10.058.
- [11] I. Ismail, S. Misnan, A. S. Izwan Ismail, and R. Mohsin, “Pressure drop and water hold up 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.
- [12] 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.