

Karakterisasi Aliran Dua Fase Gas-Cair dalam Saluran Horisontal dengan Berbagai Kekentalan Cairan

Mahmuddin^{1*}, Muhammad Syaib Rahman², Muh. Syahrir Habiba³

^{1,3}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia

²Mahasiswa Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin, Universitas Muslim Indonesia

E-mail: * mahmud_umitek@yahoo.co.id

Abstrak

Penelitian ini menginvestigasi pengaruh viskositas cairan terhadap fenomena beda tekanan dalam aliran dua fase melalui sebuah pipa horisontal. Meskipun viskositas cairan diyakini tidak secara langsung mempengaruhi beda tekanan, namun temuan menunjukkan bahwa viskositas dipengaruhi oleh massa jenis cairan. Cairan dengan viskositas berbeda, yaitu $22,051 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dengan massa jenis 1300 kg/m^3 , $1,191 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dengan massa jenis 1200 kg/m^3 , dan $1,191 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dengan massa jenis 1031 kg/m^3 , menghasilkan variasi dalam beda tekanan. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui persamaan $dp = \rho \cdot g \cdot h$, di mana massa jenis cairan (ρ) mempengaruhi besarnya tekanan pada titik yang sama. Pola aliran yang teramati meliputi variasi gelembung, baik dalam ukuran kecil maupun besar, serta pola aliran acak dan sumbat. Ketika cairan diganti dengan viskositas $3,488 \times 10^{-6}$, karakteristik kurva beda tekanan terhadap peningkatan debit gas tetap sejalan, namun besarnya beda tekanan cenderung lebih rendah. Terlihat bahwa pada debit gas rendah, cairan dapat mencapai dinding bagian atas pipa, sementara pada debit gas yang lebih tinggi, pola aliran slug mendominasi dengan kecepatan tinggi yang mengakibatkan peningkatan beda tekanan.

Kata kunci: beda tekanan, massa jenis, pola aliran, variasi gelembung, viskositas cairan.

Abstract

This study investigates the influence of fluid viscosity on the phenomenon of pressure difference in two-phase flow through a horizontal pipe. Although fluid viscosity is believed not to directly affect pressure difference, findings indicate that viscosity is influenced by fluid density. Fluids with different viscosities, namely $22,051 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ with a density of 1300 kg/m^3 , $1,191 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ with a density of 1200 kg/m^3 , and $1,191 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ with a density of 1031 kg/m^3 , result in variations in pressure difference. This phenomenon can be explained using the equation $dp = \rho \cdot g \cdot h$, where fluid density (ρ) affects the magnitude of pressure at the same point. Observed flow patterns encompass variations of bubbles, both small and large, as well as random and plug flow patterns. When the fluid is replaced with a viscosity of $3,488 \times 10^{-6}$, the characteristics of the pressure difference curve against increasing gas flow remain consistent, but the magnitude of pressure difference tends to be lower. It is observed that at low gas flow rates, the fluid can reach the upper wall of the pipe, while at higher gas flow rates, slug flow patterns dominate with high velocity, resulting in an increase in pressure difference.

Keywords: bubble variation, density, fluid viscosity, flow pattern, pressure difference.

1. PENDAHULUAN

Air dan bahan cair lain seperti minyak, bensin adalah kebutuhan pokok yang bisa dikatakan terpenting. Pada penelitian-penelitian sebelumnya telah meninjau berbagai topik yang berkaitan dengan gerakan fluida [1-6]. Prinsip-prinsip aturan dasar yang menyangkut massa, momentum dan energi telah dikembangkan dan diterapkan, dengan menggunakan asumsi-asumsi pada banyak situasi aliran. Perpindahan fluida (cairan atau gas) dalam sebuah saluran tertutup (biasanya disebut sebuah pipa jika penampangnya bundar atau saluran *duct* jika bukan) sangat penting dalam kehidupan sehari-hari [7]. Perhatian sejenak pada keadaan sekeliling kita bahwa terdapat banyak variasi penerapan dari aliran pipa. Penelitian mengenai aliran dua fase dan fraksi hampa telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, penelitian dilakukan pada saluran pipa berdiameter kecil hingga besar. Mulai dari saluran nano (*nano channel*), mikro (*micro channel*), normal (*normal channel*), dan saluran besar (*large channel*) [8]. Penelitian tersebut menghasilkan hasil yang berbeda-beda. Perbedaan ini disebabkan karena tiap penelitian dilakukan dengan menggunakan metode yang berbeda. Aliran multi fase adalah aliran yang memiliki beberapa fase yang mengalir secara bersamaan. Aliran dua fase merupakan aliran simultan dari dua fluida yang terpisah satu sama lain baik itu fluida cair dengan gas maupun fluida cair atau gas dengan partikel padat yang telah tersuspensi [9]. Dalam aliran dua fase, terdapat beberapa kompleksitas yang dapat terjadi adalah, adanya interaksi antar tiap fase, adanya pengaruh deformasi permukaan serta pengaruh pergerakan yang terjadi antar fluida pada saat terjadi suatu aliran, pengaruh keseimbangan fase, pengaruh *pressure drop* dan lain sebagainya. Aliran dua fase juga banyak diaplikasikan dalam dunia industri, seperti pada pembangkit tenaga nuklir, industri kimia, pembangkit tenaga uap, industri perminyakan. Pada beberapa industri seperti industri kimia, pemindahan fluida umumnya dilakukan melalui sistem perpipaan. Dalam sistem perpipaan, selain memerlukan pipa-pipa utama, juga memerlukan beberapa komponen pipa, seperti belokan pipa, siku, katup, perbesaran saluran, pengecilan saluran, dan kombinasi saluran. Dalam sistem pipa yang besar, kerugian pada komponen pipa biasanya hanya merupakan kerugian yang kecil (rugi minor) dibandingkan dengan kerugian akibat gesekan sepanjang saluran (rugi mayor). Pada perubahan area saluran secara tiba-tiba (*sudden expansion*) terjadi adanya *pressure recovery*, yaitu adanya kenaikan tekanan setelah melewati ekspansi yang disebabkan karena penurunan kecepatan fluida tersebut secara signifikan dan selanjutnya tekanan akan turun kembali. Untuk merancang perangkat tersebut, sangat penting untuk memperkirakan karakteristik penurunan tekanan aliran dua fase. Oleh karena itu penelitian ini akan mendalami bagaimana pola aliran dan beda tekanan berbagai viskositas cairan melalui saluran horisontal.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan di antaranya adalah:

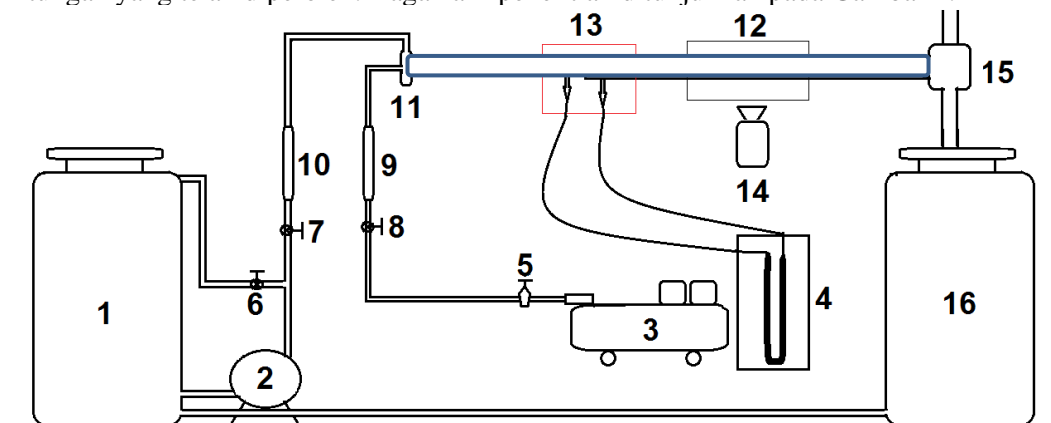
1. Skema instalasi penelitian dan komponen penelitian dapat dilihat pada Gambar 1
2. Tangki sebagai penampung cairan
3. Pompa digunakan untuk mensirkulasikan cairan dalam instalasi
4. Katup digunakan untuk mengatur debit cairan
5. Thermometer digunakan untuk mengukur temperatur cairan.
6. *Differential Pressure Transmitter* (DPT) untuk mengukur tegangan output
7. Flowmeter untuk mengukur debit cairan yang mengalir pada pipa instalasi penelitian
8. Mixer, tempat mencampur dua fluida yang dialirkan ke dalam pipa uji
9. Kamera digunakan untuk memotret pola aliran.

Bahan yang di gunakan adalah ;

1. Udara sebagai gas yang diperoleh dari kompresor.
2. Cairan dengan viskositas $22,051 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $3,488 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dan $1,191 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

2.2 Prosedur Pengujian

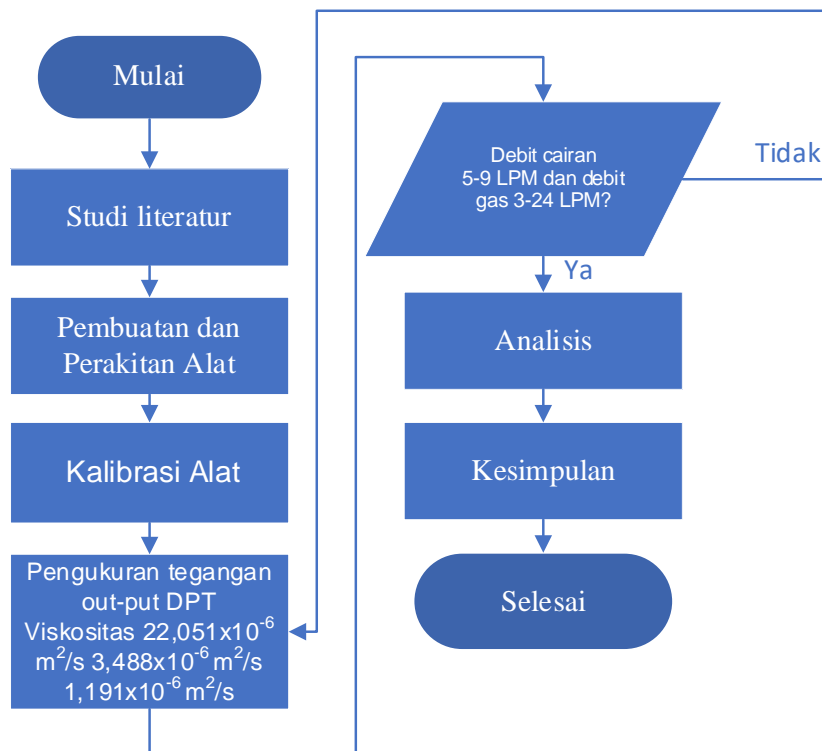
Penelitian ini mengikuti serangkaian tahapan yang terperinci. Pertama-tama, dimulai dengan persiapan alat penelitian yang diperlukan. Kemudian, pompa diaktifkan untuk memulai aliran cairan ke dalam pipa uji. Dalam rangka memantau proses ini, tegangan output diukur dengan menggunakan *Differential Pressure Transmitter* (DPT) yang terhubung dengan komputer. Sementara itu, pola aliran direkam melalui kamera ponsel. Tahap berikutnya melibatkan pengaturan skala flowmeter pada 5 LPM, dimana aliran gas stabil dialirkan dengan debit 3 LPM ke dalam pipa uji. Selanjutnya, tegangan output DPT diukur. Proses ini diulang saat debit gas dinaikkan secara bertahap dari 6 LPM hingga 24 LPM, dengan pengukuran tegangan output DPT yang serupa. Setelahnya, penelitian melanjutkan dengan kenaikan debit cairan dari 6 LPM hingga 9 LPM. Pada setiap kenaikan debit cairan, gas sebesar 6 LPM hingga 24 LPM diinjeksikan, dan proses pengukuran tegangan output DPT serta langkah-langkah serupa diulang seperti pada tahapan sebelumnya. Selanjutnya, fluida kerja diganti dengan cairan ber viskositas $3,488 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dan $1,191 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Kegiatan pengukuran seperti pada tahapan 5, 6, dan 7 dilakukan sesuai dengan viskositas cairan yang berbeda. Pada tahapan terakhir, temperatur cairan diukur menggunakan termokopel. Seluruh data hasil pengukuran tersimpan dalam file komputer untuk analisis lebih lanjut. Tahap akhir dari penelitian ini melibatkan analisis mendalam terhadap hasil perhitungan yang telah diperoleh. Bagan alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1 Skema instalasi penelitian

Keterangan :

- | | | | |
|---|--|----|-------------------------------|
| 1 | Tangki fluida cair | 9 | Flowmeter fluida gas |
| 2 | Pompa fluida cair | 10 | Flowmeter fluida cair |
| 3 | Kompressor | 11 | Mixer |
| 4 | DPT | 12 | Daerah pengamatan pola aliran |
| 5 | Regulator fluida gas | 13 | Pipa uji |
| 6 | Katup by pass fluida cair | 14 | Kamera |
| 7 | Katup pengatur debit aliran fluida cair | 15 | Separator |
| 8 | Katup pengatur debit aliran fluida udara | 16 | Tangki 2 fluida cair |



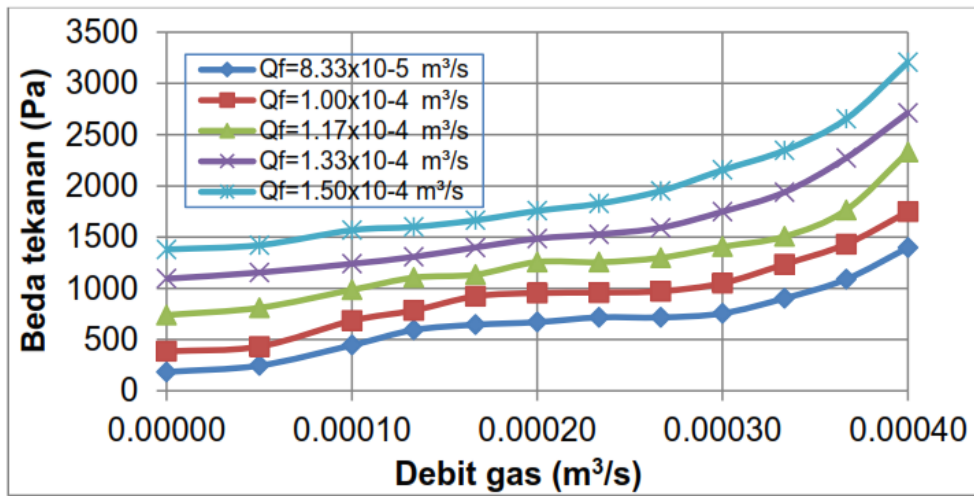
Gambar 2 Bagan alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

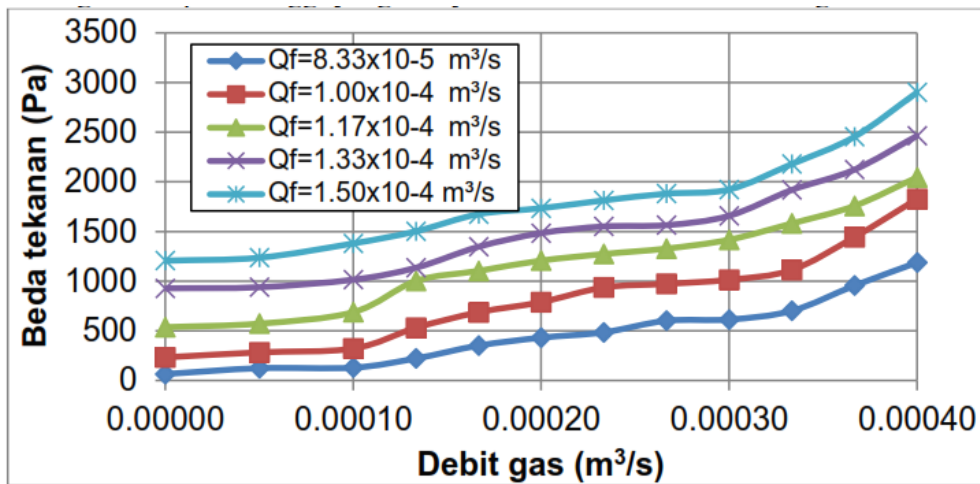
3.1 Beda Tekanan

Hasil kurva beda tekanan terhadap debit gas dengan debit aliran konstan yang ditunjukkan pada Gambar 3. Pada penelitian ini, cairan dengan viskositas $22,051 \times 10^{-6}$ dan debit aliran divariasikan mulai $Q_L = 8,33 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ hingga $Q_L = 1,50 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit gas dinaikkan secara bertahap mulai $Q_G = 1,30 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ hingga $Q_G = 4,00 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Pipa uji yang digunakan dalam penelitian, adalah pipa transparan dengan diameter 32 mm. Kurva tersebut menggambarkan bahwa saat diberikan aliran gas di dalam pipa, maka beda tekanan akan meningkat dengan naiknya tegangan output yang terbaca pada layar komputer. Apabila debit gas dinaikkan terus-menerus $1,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ hingga mencapai debit gas $3,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ pada debit cairan dijaga konstan, peningkatan beda tekanan terus mulai 445,31 Pa hingga 902,33 Pa. Akan tetapi bila debit gas dinaikkan $3,7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ hingga $4,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ menunjukkan peningkatan beda tekanan secara drastik mulai 1088,83 Pa hingga 1396,74 Pa. Peningkatan beda tekanan tersebut karena adanya dorongan gas terhadap cairan yang mengalir, sehingga kecepatan cairan akan meningkat, serta terbentuk pola aliran *slug*.

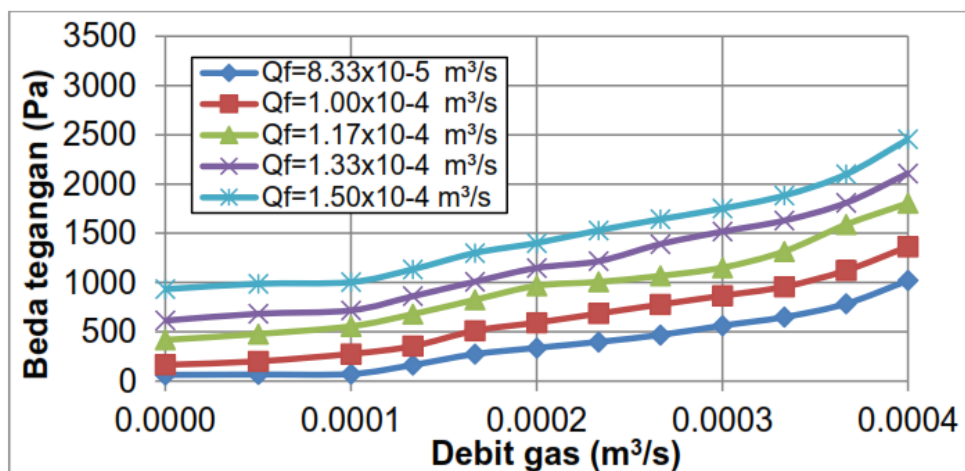
Apabila debit cairan dinaikkan mulai 6 LPM hingga 9 LPM dan injeksi gas dari 3 LPM hingga 24 LPM, menunjukkan beda tekanan akan semakin tinggi, karena dengan debit cairan semakin tinggi dan debit gas dijaga konstan, kecepatan cairan akan semakin tinggi dan mengakibatkan kerugian head akan mempengaruhi besarnya beda tekanan yang terjadi seperti pada Gambar 3. Jika cairan diganti dengan viskositas sebesar $3,488 \times 10^{-6}$, maka kurva beda tekanan terhadap peningkatan debit gas dapat dilihat pada Gambar 4. Kurva tersebut memiliki karakteristik peningkatan beda tekanan yang sama, namun besarnya beda tekanan akan lebih rendah seperti pada Gambar 4. dengan cairan yang memiliki viskositas berbeda dapat pula dilihat pada Gambar 4 dan 5. Pada debit gas rendah menyebabkan cairan dapat menyentuh dinding pipa bagian atas pipa. Semakin tinggi debit gas maka akan mendukung pola aliran *slug* terjadi dan bergerak dengan kecepatan tinggi yang menyebabkan beda tekanan meningkat.



Gambar 3 Kurva beda tekanan terhadap peningkatan debit gas pada debit cairan konstan dengan viskositas $22,051 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

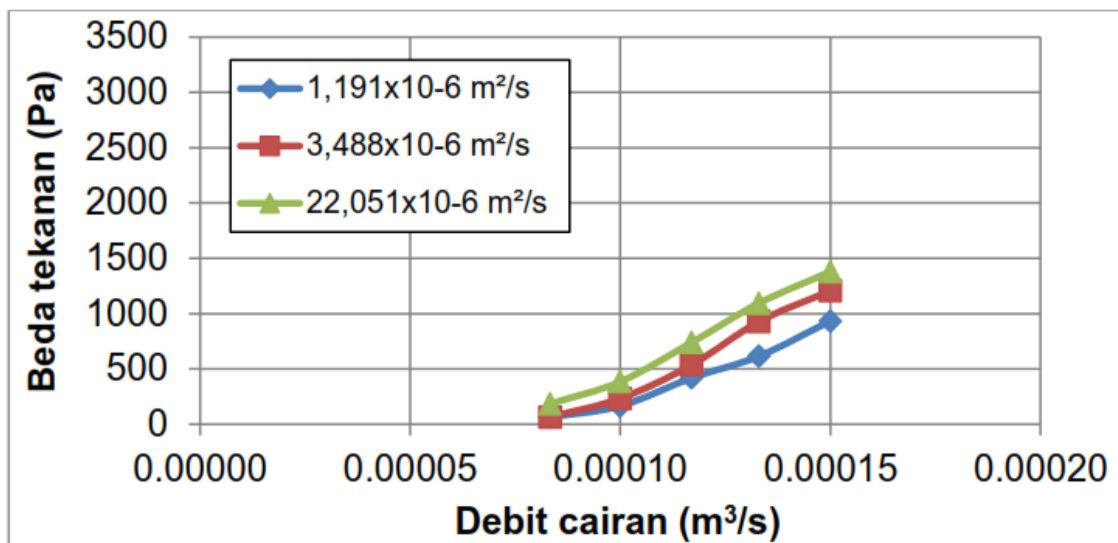


Gambar 4 Kurva beda tekanan terhadap peningkatan debit gas pada debit cairan konstan dengan viskositas $3,488 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$



Gambar 5 Kurva beda tekanan terhadap peningkatan debit gas pada debit cairan konstan dengan viskositas $1,191 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Hasil perhitungan dan kurva beda tekanan pada Gambar 3, 4 dan 5 menunjukkan bahwa cairan viskositas tinggi dengan debit cairan dan debit gas sama menghasilkan beda tekanan lebih tinggi, hal ini karena massa jenis cairan lebih besar. Pada penelitian ini viskositas cairan tidak mempengaruhi beda tekanan tetapi dipengaruhi oleh massa jenisnya yakni cairan dengan viskositas $22,051 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dengan massa jenisnya 1300 kg/m^3 , $1,191 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dengan massa jenis 1200 kg/m^3 dan $1,191 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dengan massa jenis 1031 kg/m^3 . Hal ini dijelaskan dari sebuah persamaan yang menyatakan bahwa beda tekanan statis $dp = \rho \cdot g \cdot h$, apabila massa jenis cairan (ρ) lebih besar maka tekanan pada titik yang sama akan menghasilkan tekanan besar. Perbandingan kurva beda tekanan tanpa aliran gas dapat dilihat pada Gambar 6.



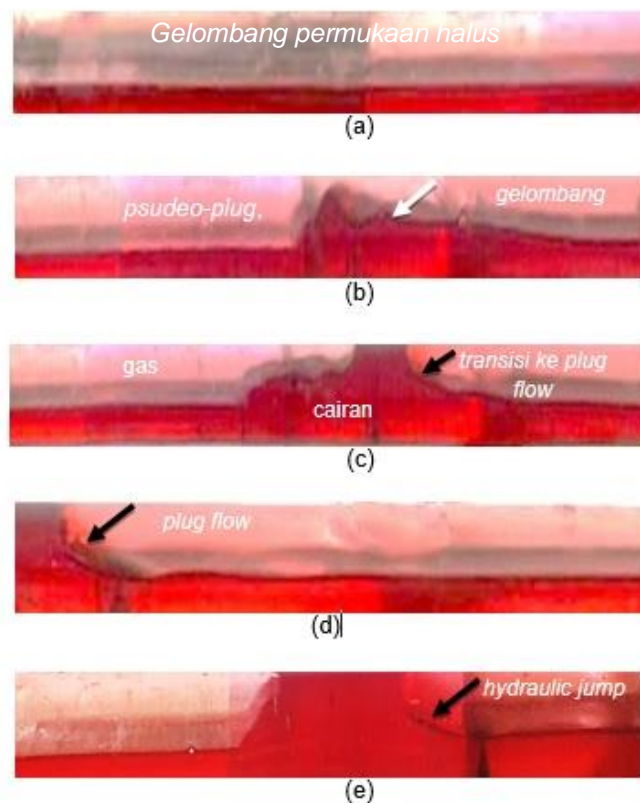
Gambar 6 Kurva beda tekanan terhadap debit cairan tanpa aliran gas dengan variasi viskositas

Hasil pengujian Mahadiputra, et al. [10] yang menyatakan bahwa gradien tekanan pada kecepatan superfisial cairan yang sama dan meningkatnya kecepatan superfisial gas mengakibatkan gradien tekanan meningkat. Pada kecepatan superfisial gas yang sama dan kecepatan superfisial cairan meningkat mempunyai nilai gradien tekanan yang lebih tinggi, hal tersebut dapat dijelaskan bahwa dengan meningkatkan kecepatan superfisial cairan dan kecepatan superfisial gas mengakibatkan nilai gradien tekanan meningkat. Hal ini memiliki karakteristik beda tekanan hasil yang diperoleh dalam penelitian ini. Selanjutnya hasil penelitian lain seperti karakteristik peningkatan gradien tekanan yang dikemukakan oleh Mahadiputra, et al. [10] bahwa hasil penelitiannya menunjukkan peningkatan gradien tekanan terhadap kenaikan kecepatan gas, hal ini memperlihatkan peningkatan beda gradien tekanan memiliki pola yang sama dalam penelitian ini.

3.2 Pola Aliran

Pola aliran yang dapat diamati dalam penelitian ini adalah pola aliran *slug* dan diikuti pola aliran gelombang kecil pada permukaan arus *stratified smooth+wavy*. Pada debit cairan dan gas rendah, pola aliran yang diamati pada daerah *interface* akan terjadi peralihan *smooth* menjadi *wavy* yang dapat dilihat atau diamati dalam aliran sepanjang pipa uji. Gelombang tersebut dapat terjadi adanya interaksi antar muka yang memiliki kecepatan berbeda dengan sisi bagian bawah cairan, dimana efek viskositas cairan pada permukaan bebas sangat rendah. Terbentuknya pola aliran *pseudo-slug*, dimana pola aliran tersebut dapat terjadi baik pada aliran cairan viskositas

tinggi dan cairan viskositas rendah walaupun ukuran yang berbeda. Pola aliran *pseudo-slug* bergerak dengan kecepatan tinggi, ketika bertambahnya kecepatan debit gas dan debit cairan cairan dijaga konstan. Bila, pada saat peningkatan kecepatan debit gas dengan debit cairan yang sama maka peralihan pola *pseudo-slug* ke pola aliran *slug* bergerak dan bergerak kecepatan tinggi. Selain pola *slug* tersebut dapat pula diamati pola aliran jelas yaitu loncatan cairan yang menutupi luas permukaan pipa, biasanya dinamakan *hydraulic jump*. Pola aliran tersebut menunjukkan interaksi gas dan cairan yang cukup kuat serta dorongan gas pada debit tinggi akan menyebabkan terjadinya *hydraulic jump*. Terbentuknya *hydraulic jump* dapat dijumpai pada 3 (tiga) variasi viskositas, tetapi dengan ukuran yang berbeda, untuk cairan viskositas tinggi panjang cairan pada *hydraulic jump* memiliki ukuran lebih panjang dibandingkan dengan cairan viskositas rendah, hal ini disebabkan karena gaya tarik partikel cairan viskositas tinggi lebih kuat.



Gambar 7 Polar aliran

Pada Gambar 7 berdasarkan terbentuknya pola aliran *psudeo-slug*, dapat dijelaskan bahwa awal mula pola aliran terbentuk *smooth* yang didominasi aliran udara seperti pada Gambar 7 (a), pola aliran ini menyerupai gelombang permukaan halus. Bila kecepatan superfisial udara, pola aliran *smooth* tersebut kemudian cairan mulai membentuk *plug* sehingga menunjukkan adanya loncatan cairan hingga menyentuh dinding bagian atas dalam pipa seperti pada Gambar 7 (b) dan (c). Pola aliran ini diikuti pola aliran yang berbentuk gelombang-gelombang pada permukaan bebas atau disebut dengan *ripple*, hal ini disebabkan karena adanya dorongan udara pada kecepatan tinggi yang akan mendukung terjadinya loncatan cairan atau disebut *hydraulic jump* seperti pada Gambar 7 (d) dan (e).

4. KESIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini terdiri atas:

- a. Pada penelitian ini viskositas cairan tidak mempengaruhi beda tekanan tetapi dipengaruhi oleh massa jenisnya yakni cairan dengan viskositas $22,051 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dengan massa jenisnya 1300 kg/m^3 , $1,191 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dengan massa jenis 1200 kg/m^3 dan $1,191 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ dengan massa jenis 1031 kg/m^3 . Hal ini dijelaskan dari sebuah persamaan yang menyatakan bahwa beda tekanan statis $\Delta p = \rho \cdot g \cdot h$, apabila massa jenis cairan (ρ) lebih besar maka tekanan pada titik yang sama akan menghasilkan tekanan besar. Pola aliran yang terjadi adalah pola aliran gelembung ukuran kecil dan besar, acak dan sumbat.
- b. Jika cairan diganti dengan viskositas sebesar $3,488 \times 10^{-6}$, maka kurva beda tekanan terhadap peningkatan debit gas memiliki karakteristik peningkatan beda tekanan yang sama, namun besarnya beda tekanan akan lebih rendah dengan cairan yang memiliki viskositas berbeda. Pada debit gas rendah menyebabkan cairan dapat menyentuh dinding pipa bagian atas pipa. Semakin tinggi debit gas maka akan mendukung pola aliran *slug* terjadi dan bergerak dengan kecepatan tinggi yang menyebabkan beda tekanan meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Awaluddin, S. Wahyudi, and A. S. Widodo, "Analisis aliran fluida dua fase (udara-air) melalui belokan 45° ," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 5, no. 3, pp. 217-224, 2014.
- [2] Mahmuddin, "Studi eksperimental penurunan tekanan aliran melewati belokan pipa horizontal dengan variasi rasio R/D," *Jurnal Teknologi*, vol. 18, no. 1, pp. 45-51, 2018.
- [3] M. Mustakim, I. Indarto, and P. Purnomo, "Pengurangan intensitas fluktuasi tekanan pada pembesaran mendadak aliran udara-air searah horizontal dengan penempatan ring," *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, vol. 1, no. 1, pp. 22-29, 2016.
- [4] S. Sukamta, A. R. Ilham, and S. Sudarja, "The investigation of void fraction of two-phase flow air-water and glycerine (0-30%) in the capillary pipe with slope of 50 to horizontal position," *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, vol. 20, no. 1, pp. 8-17, 2019.
- [5] L. Torres, J. Noguera, J. E. Guzmán-Vázquez, J. Hernández, M. Sanjuan, and A. Palacio-Pérez, "Pressure signal analysis for the characterization of high-viscosity two-phase flows in horizontal pipes," vol. 8, no. 12, p. 1000, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2077-1312/8/12/1000>.
- [6] C. Wang, M. Tian, J. Zhang, and G. Zhang, "Experimental study on liquid-liquid two-phase flow patterns and plug hydrodynamics in a small channel," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 129, p. 110455, 2021/11/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.exptthermflusc.2021.110455>.
- [7] R. Subagyo, "Analisis faktor gesekan pada pipa lurus dengan variasi debit aliran," *Jurnal Teknologi Technoscience*, vol. 3, no. 2, pp. 237-242, 2011.
- [8] Sudarja, Indarto, Deendarlianto, R. Noverdi, and A. Gutama, "Investigasi pola aliran dua-fase gas-cairan di dalam pipa berukuran mini pada aliran horizontal," in *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII (SNTTM XIII)*, 2014, pp. 423-429.
- [9] H. Kusumaningsih, W. Wijayanti, D. Widhiyanuriyawan, and M. Fauzi, "Analisis *pressure drop* dan pola aliran dua fase (air-udara) pada pipa horizontal melalui orifice," *Flywheel: Jurnal Teknik Mesin Untirta*, vol. 2, no. 1, pp. 14-21, 2018.
- [10] A. A. Mahadiputra, K. Karnowo, and S. Anis, "Studi eksperimental pengaruh kecepatan superficial aliran searah terhadap karakteristik dan parameter aliran *stratified* pada pipa horizontal," *Jurnal Inovasi Mesin*, vol. 1, no. 2, pp. 1-8, 2019.