

INVESTIGASI GRADIEN TEKANAN DUA – FASE UDARA – AIR DAN GLISERIN (40-70%) PADA PIPA KAPILER DENGAN KEMIRINGAN 45⁰ TERHADAP POSISI HORIZONTAL

Muhammad Rocky Pratama^a, Sukamta^b, Sudarja^c

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183

^aRockypratama6@gmail.com, ^bmsukamta@gmail.com, ^csudarja_msn@yahoo.com

Abstrak

Aliran dua fase adalah aliran aliran multifase yang paling sederhana. Aliran dua fase terdiri dari 3 keadaan yaitu liquid-solid, gas-liquid dan gas-solid. Karakteristik dasar dari aliran dua fase meliputi pola aliran dan peta pola aliran, fraksi hampa, dan gradien tekanan. Pada penelitian ini akan dibahas tentang investigasi gradien tekanan pada aliran dua fase. Gradien tekanan digunakan pada dunia industri perpipaan untuk mengetahui tekanan fluida pada aliran didalam pipa. Penelitian ini dilakukan pada seksi uji berupa pipa gelas yang memiliki diameter 1,6 mm dengan sudut kemiringan 45⁰ terhadap posisi horisontal. Cairan yang digunakan adalah campuran air dan gliserin dengan presentasi 40%, 50%, 60%, dan 70%. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh kecepatan superfisial gas (J_G), liquid (J_L) dan pengaruh viskositas terhadap gradien tekanan. Untuk mendapatkan data gradien tekanan yaitu dengan menggunakan sensor tekanan fluida MPX system yang dapat mendeteksi adanya beda tekanan atau penurunan tekanan pada suatu aliran yang dihubungkan dengan komputer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai gradien tekanan dipengaruhi oleh kecepatan cairan, gas dan viskositas. Pengaruh J_L pada kisaran 0,091; 0,149; 0,232; 0,539; 0,7; 0,879, dan 2,297 m/s dengan memvariasikan J_G (0 - 66,3) m/s dan J_G pada kisaran 0,025; 0,116; 0,423; 1,941; 7; 9,62 dan 50 m/s dengan memvariasikan J_L (0,033 - 4,935) m/s mengalami peningkatan pada gradien tekanan disetiap kenaikan nilai J_G dan J_L yang divariasikan. Viskositas juga mempengaruhi gradien tekanan, dari hasil penelitian data pada GL 40%, 50%, 60%, dan 70% dengan memvariasikan $J_G = 22,6$ m/s dan $J_L = 0,879$ m/s. Hal ini menunjukkan dengan meningkatnya viskositas cairan maka gradien tekanan yang dihasilkan akan meningkat.

Kata kunci: dua fase, gradien tekanan, pipa kapiler, kecepatan superfisial, viskositas

Abstract

Two-phase flow is a stream of the most simple of multiphase flow. The two-phase flow consists of 3 states, namely liquid-solid, gas-liquid and gas-solid. Basic characteristics of two-phase flow include flow patterns and flow pattern maps, vacuum fractions, and pressure gradients. This research will discuss the investigation of pressure gradients in two-phase flow. Pressure gradients are used in the piping industry to determine the pressure of the fluid in the flow in the pipe. This research was conducted in the test section in the form of a glass pipe that has a diameter of 1.6 mm with a slope angle of 45° towards the horizontal position. The liquid used is a mixture of water and glycerin with presentations of 40%, 50%, 60%, and 70%. This research was conducted to determine the effect of superficial gas (JG), liquid (JL) velocity and the effect of viscosity on pressure gradients. To get the pressure gradient data using the MPX system's fluid pressure sensor that can detect any pressure difference or pressure drop in a flow that is connected to a computer. The results showed that the pressure gradient is influenced by the velocity of the liquid, gas and viscosity. The influence of JL in the range of 0,091; 0,149; 0,232; 0,539; 0,7; 0,879, and 2,297 m / s by varying JG (0 - 66.3) m / s and JG in the range of 0,025; 0,116; 0,423; 1,941; 7; 9,62 and 50 m / s by varying JL (0.033 - 4.935) m / s experienced an increase in the pressure gradient with each increase in the value of the JG and JL varied. Viscosity also affects the pressure gradient, from the results of research data on GL 40%, 50%, 60%, and 70% by varying JG = 22,6 m / s and JL = 0,879 m / s. This shows that as the viscosity of the liquid increases, the resulting pressure gradient will increase.

Keyword: two-phase, pressure gradient, capillary pipe, superficial velocity, viscosity

1. Pendahuluan

Aliran dua fase adalah aliran yang paling sederhana dari aliran multifase (*multiphase flow*), Aliran multifase (*multiphase flow*) merupakan aliran simultan yang mengalir dalam satu pipa kecil lebih dari satu fase (wujud/bentuk) fluida (cair-gas, padat-cair, gas-padat). Berdasarkan arahnya, aliran dua fase dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu aliran satu arah dan aliran berlawanan arah. Sedangkan berdasarkan posisi saluran, aliran dua fase dapat dibedakan menjadi tiga yaitu aliran horizontal, aliran vertikal dan arah aliran miring. Interaksi antar fase dapat membentuk karakteristik, antara lain : pola aliran (*flow pattern*) dan peta pola aliran (*flow pattern map*), fraksi hampa (*void fraction*) dan gradien tekanan (*pressure gradient*).

Aliran dua fase merupakan ilmu pengetahuan yang mengkaji parameter dasar, dengan investigasi pengujian yang dilakukan menggunakan campuran air-udara dan gliserin dengan metode aliran multi fase yang paling sederhana. Gliserin pada fluida menyebabkan sifat dari fluida akan mengalami perubahan viskositas, sehingga penelitian aliran dua fase dilakukan dengan memvariasikan campuran cairan untuk meningkatkan viskositasnya.

Gradien tekanan adalah penurunan tekanan per satuan panjang. Gradien tekanan banyak digunakan pada dunia industri perpipaan yang digunakan untuk mengetahui perbedaan tekanan fluida pada pipa. Pipa yang digunakan dalam penelitian aliran dua fase bermacam – macam, diantaranya saluran pipa berukuran nano (*nano channel*), mikro (*micro channel*), mini (*mini channel*), normal (*normal channel*), saluran pipa berukuran besar (*large channel*) dan pada penelitian ini dilakukan pengukuran viskositas dengan menggunakan kecepatan superficial gas (J_G) dan kecepatan superficial liquid (J_L) secara bervariasi. Gradien tekanan diperoleh dengan mengolah data yang didapatkan dari pengendali mikro *single-board* yaitu *Pressure Transducer MPX System*. Metode ini mampu memberikan data yang sangat banyak dalam kurun waktu yang singkat dan akurat.

Pengertian gradien tekanan adalah penurunan tekanan persatuan panjang sepanjang jalur alir. Pada penelitian gradien tekanan sebelumnya pernah dilakukan oleh Fukano dkk. (1993) yang mengatakan bahwa viskositas berpengaruh pada gradien

tekanan sedangkan sudut kemiringan pipa tidak berpengaruh pada gradien tekanan, dilakukan juga oleh Dutkowski (2009), Ismail (2015), Passos dkk. (2015) dan Vera-Garcia dkk. (2015) yang meneliti tentang gradien tekanan terhadap karakteristik aliran dua fase.

Berdasarkan uraian diatas, pembahasan terpusat pada fraksi hampa dan pola aliran sedangkan informasi mengenai gradien tekanan pada pipa kapiler dengan variasi viskositas masih sangat kurang, maka perlu dilakukan penelitian ini untuk mendapatkan informasi mengenai pengaruh kecepatan *superfisial liquid* dan gas serta mendapatkan informasi mengenai pengaruh viskositas campuran air-gliserin (40 %, 50%, 60%, dan 70%) terhadap gradien tekanan pada pipa kapiler posisi horizontal dengan kemiringan 45° . .

Aliran dua fase pernah dilakukan penelitian oleh Triplett dkk. (1999) berkonsentrasi tentang fraksi hampa dan gradien tekanan (*pressure gradient*) pada pipa mikro yang terjadi gesekan pada aliran dua fase. Ukuran dari pipa mikro dengan diameter 1,1 (mm) dan 1,45 (mm) berkecepatan *superfisial* gas sebesar 0,02-80 (m/s) dan *superfisial liquid* sebesar 0,02-8 (m/s). Pengujian tersebut menggunakan bahan campuran dari udara-air. Dari korelasi yang digunakan menghasilkan data signifikan untuk tekanan gesekan yang menurun dari aliran homogen karena aliran anular yang didapatkan

Hassan dkk. (2006) meneliti secara experimental tentang penurunan tekanan aliran dua fase dalam saluran pipa mini berukuran milimeter. Pada percobaan ini digunakan tiga model meliputi *homogen*, model *friedel* dan model *chisholm*. Gradien tekanan akibat gesekan aliran dua fase dilakukan pada diameter pipa 3 mm, 1 mm dan 0,8 mm menunjukkan hasil yang berbeda antara hasil percobaan pengujian dengan kerelasi pengujian sebelumnya oleh Ekberg (1997). Aliran bergelembung, *intermiten*, *churn* dan *anular* merupakan aliran yang dipengaruhi oleh tegangan permukaan dan aliran dengan pengaruh inersia.

Awaludin dkk. (2014) melakukan penelitian tentang analisis aliran dua fase udara-air pada belokan 45° dengan posisi horizontal kearah atas dengan diameter pipa 26,64 mm menunjukkan bahwa terjadi perbedaan *pressure drop* eksperimental dan teoritis disebabkan karena perhitungan secara teoritis menggunakan beberapa asumsi tidak memperhitungkan keadaan dilapangan misalnya sambungan pipa, belokan pipa dan kerugian aliran lainnya. Penelitian ini mendapatkan hasil bahwa penurunan aliran dua fase melalui belokan 45° mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya gas volume fraction (β).

Barreto dkk. (2015) melakukan penelitian dengan fluida adibiotik udara-air pada pipa melingkar arus keatas dengan diameter 1,2 mm. Pada penelitian ini dengan kecepatan *superfisial* gas (JG) = 0,1-34,8 m/s dan kecepatan *superfisial liquid* (JL) = 0,1-3,5 m/s. Korelasi pada tabung kecil dengan udara-air menunjukkan data prediksi penurunan tekanan terbaik pada pola anular dengan kecepatan *superfisial* gas lebih dari 18,6 m/s.

Abubakar et al.(2015) mengatakan bahwa gradien tekanan akan meningkat seiring dengan peningkatan viskositas campuran. Pada aliran satu fase *pressure drop* hanya dipengaruhi oleh *Reynold number* yang merupakan fungsi dari viskositas, berat jenis fluida dan diameter pipa. Namun pada aliran multifase tidak hanya dipengaruhi oleh *Reynold number* saja tetapi juga dipengaruhi oleh fase-fase yang bercampur didalamnya.

Kecepatan *superfisial* gas/air dan viskositas cairan selain berpengaruh terhadap penelitian gradien tekanan juga berpengaruh pada penelitian dua fase pola aliran, seperti penelitian yang telah dilakukan oleh Sukamta dkk. (2019) yang menggunakan kaca mini berdiameter 1,6 mm dan panjang 130 mm dengan kemiringan 30°. Fluida yang digunakan adalah udara-air+gliserin dengan konsentrasi 40%, 50%, 60% dan 70%. Kecepatan *superfisial* cair JL = 0,033 – 4,935 m/s dan kecepatan *superfisial* JG = 0,025 = 66,3 m/s. Kamera berkecepatan tinggi digunakan untuk memvisualkan pola aliran. Hasilnya dapat disimpulkan bahwa *superfisial* gas/air dan viskositas cairan berpengaruh secara signifikan untuk membentuk pola aliran.

Penelitian dua fase gradien tekanan arus-gas-cair dalam saluran mini pernah dilakukan Sudarja dkk. (2019), bagian ujinya adalah saluran melingkar transparan dengan diameter 1,6 mm. Cairan yang bekerja adalah udara dan air dengan kecepatan *superfisial* gas dan cair, masing-masing di kisaran 0,025-66,300 m/s dan 0,033-4,935

m/s. Gradien tekanan diperoleh dengan menggunakan transduser tekanan masing-masing. Akibatnya ditemukan bahwa kecepatan gas dan cairan *superfisial* mempengaruhi proposional dengan gradien tekanan, sedangkan itu meningkat dengan meningkatnya JG dan JL.

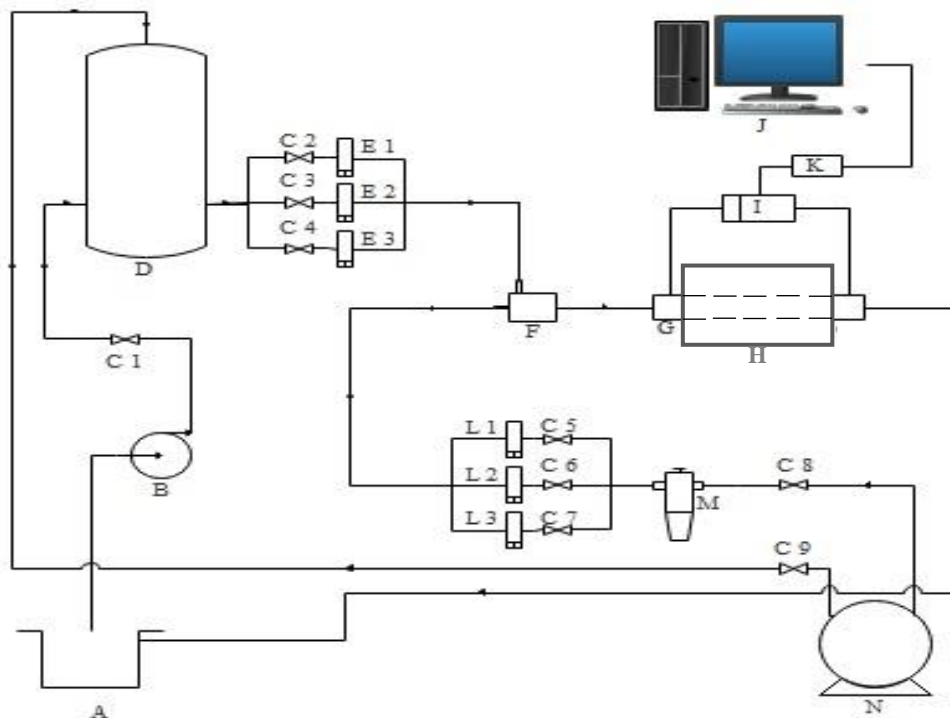
Sebelumnya juga pernah dilakukan penelitian oleh Sudarja dkk. (2014) melakukan suatu investigasi penelitian pada pola aliran dua fase gas cairan dengan berukuran pipa mini horizontal. Beberapa saluran seperti saluran mini, kapiler, mikro dan nano memiliki karakteristik yang berbeda antara aliran dua fase dengan pipa kecil dan pipa saluran konvensional. Perubahan zat cair-gas (fase) dan proses sistem air-gas yang mengalir (hidrodinamik) aliran dua fase tidak berlaku untuk saluran pipa kecil terhadap literatur-literatur yang berhubungan dengan terjadinya *pressure drop* serta perpindahan kalor. Maka dari itu dibutuhkan pengkajian dan investigasi pada pola aliran dua fase cairan dan gas dengan pipa mini. Dengan dilakukannya percobaan pengujian terhadap pola aliran dan peta aliran pada pipa mini bertujuan agar didapatkan data primer dari pola dan peta aliran. Diameter dari seksi uji sebesar 1,6 (mm) berbentuk pipa kaca kapiler dengan posisi horizontal bercampuran antara gas dan cairan dengan udara kering dan air memiliki kecepatan *superfisial* gas (JG) = 0,08-64,42 (m/s) dan kecepatan *superfisial liquid* (JL) = 0,02-3,09 (m/s). Hasil yang didapat dari penelitian terhadap pola aliran yaitu berupa *slug*, *slug anular*, *anular*, *wavy anular*, *churn* dan *bubbly* mengindikasikan hasil tersebut paling mendekati kemiripan terhadap penelitian peta yang dilakukan oleh Triplett dkk. (1999a).

Kemudian penelitian investigasi berlanjut dilakukan oleh Sudarja dkk. (2016) untuk gradien tekan pada aliran dua fase udara campuran air dan gleserin 20% dalam pipa berdiameter 1,6 mm posisi horizontal. Kecepatan *superfisial* gas dan rentang 0,025-66,3 (m/s), sedangkan kecepatan *superfisial* pada cairan 0,033-4,935 (m/s), data hasil pengukuran dibandingkan dengan hasil perhitungan prediksi pada model homogen dan model terpisah mendapatkan kesimpulan bahwa kecepatan *superfisial* gas maupun kecepatan *superfisial* cairan mempengaruhi besarnya gradien tekanan secara signifikan. Semakin besar kecepatan *superfisial* gas ataupun cairan, semakin besar gradien tekanan. Semakin tinggi nilai JG yang digunakan maka akan didapatkan peningkatan nilai dari gradien tekanan dan semakin tinggi nilai JL yang digunakan maka akan didapat pula kenaikan nilai dari gradien tekanan.

2. Metode Penelitian

Penelitian kali ini bahan yang digunakan berupa fluida gas dan cair. Fluida cairnya menggunakan air (aquades atau *destiled water*) dan dicampurkan dengan gliserin dengan presentase 40%, 50%, 60% dan 70% dengan campuran cair sebanyak 15 liter. Fluida gas yang digunakan merupakan udara dengan kelembaban yang rendah, yang didapatkan dari kompresor.

Instalasi peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa komponen utama: tangki air, pompa air, kompresor udara, bejana bertekanan, *mixer, test section, konektor dan separator*. Peralatan yang mendukung dalam penelitian ini antara lain: *amplifier, komputer, optical correction box, acquisition system, dan video processing system*. Alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: *Mpx, data akuisisi, temperature indicator, pressure indicator, flowmeter udara, flowmeter air. dan thermocople*



Gambar 2.1. Skema alat penelitian

Keterangan :

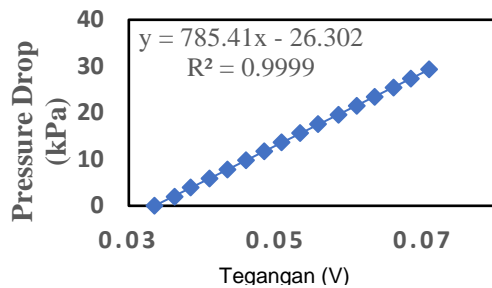
- | | |
|----------------------|--------------------------------|
| A = Tangki Air | H = <i>Correctionbox</i> |
| B = Pompa Air | I = <i>Pressure Transducer</i> |
| C = Valve | J = Komputer |
| D = Bejana Tekan | K = Data akuisisi |
| E = Flowmeter Liquid | L = <i>Flowmeter gas</i> |
| F = Mixer | M = <i>Watertrap</i> |
| G = Seksi Uji | N = Kompresor |

3. Hasil dan Pembahasan

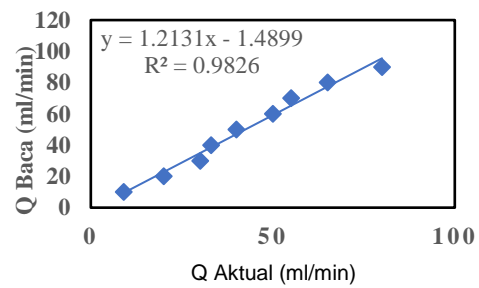
3.1 Kalibrasi

Peralatan yang perlu dikalibrasi adalah *flowmeter* dan *pressure sensor* MPX. Pada pengkalibrasian *flowmeter liquid* dilakukan secara bertahap, ketiganya menggunakan cairan yang dialirkan dengan kurun waktu selama 1 menit pada kondisi *steady* dan cairan mengalir sesuai JL yang diatur oleh *flowmeter*. Kemudian cairan yang keluar dari selang dimasukkan kedalam gelas ukur untuk menentukan volume atau kapasitas cairan yang didapat selama 1 menit. Sedangkan untuk mengkalibrasi *pressure sensor* MPX langkah pertama dengan menggunakan alat manometer kolom air (vertikal) dengan tinggi 0 sampai 3 meter pada *static condition*. Kemudian melakukan perubahan hasil tekanan fluida dengan metode konveksi grafik dikomputer. Langkah tersebut dilakukan berulang ulang hingga ketinggian 3 meter posisi vertikal. Setelah didapat dari semua data yang diperoleh maka dapat dibuat grafik dengan persamaan kalibrasi supaya saat pengolahan *pressure gradient* dapat digunakan dari kalibrasi yang telah dilakukan.

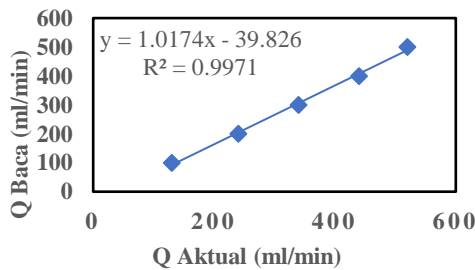
3.1.1 Persamaan Kalibrasi *pressure sensor* MPX dan *flowmeter*



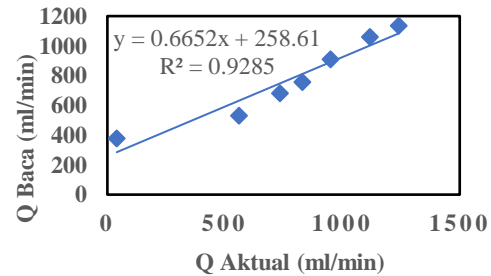
Gambar 3.1 Grafik Kalibrasi MPX



Gambar 3.2 Grafik Kalibrasi *Flowmeter* (0 - 0,1 LPM)



Gambar 3.3 Grafik Kalibrasi *Flowmeter* 0 – 3,785 LPM)

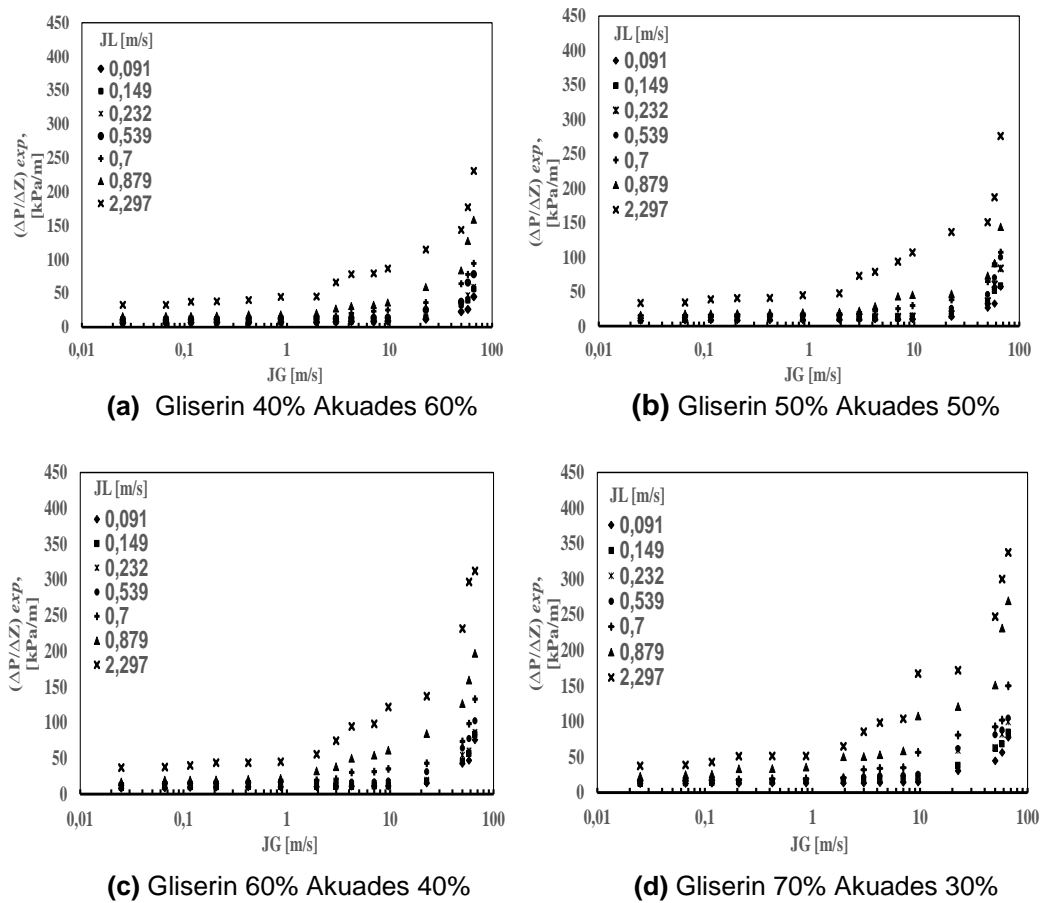


Gambar 3.4 Grafik Kalibrasi *Flowmeter* (0 – 0,5 LPM)

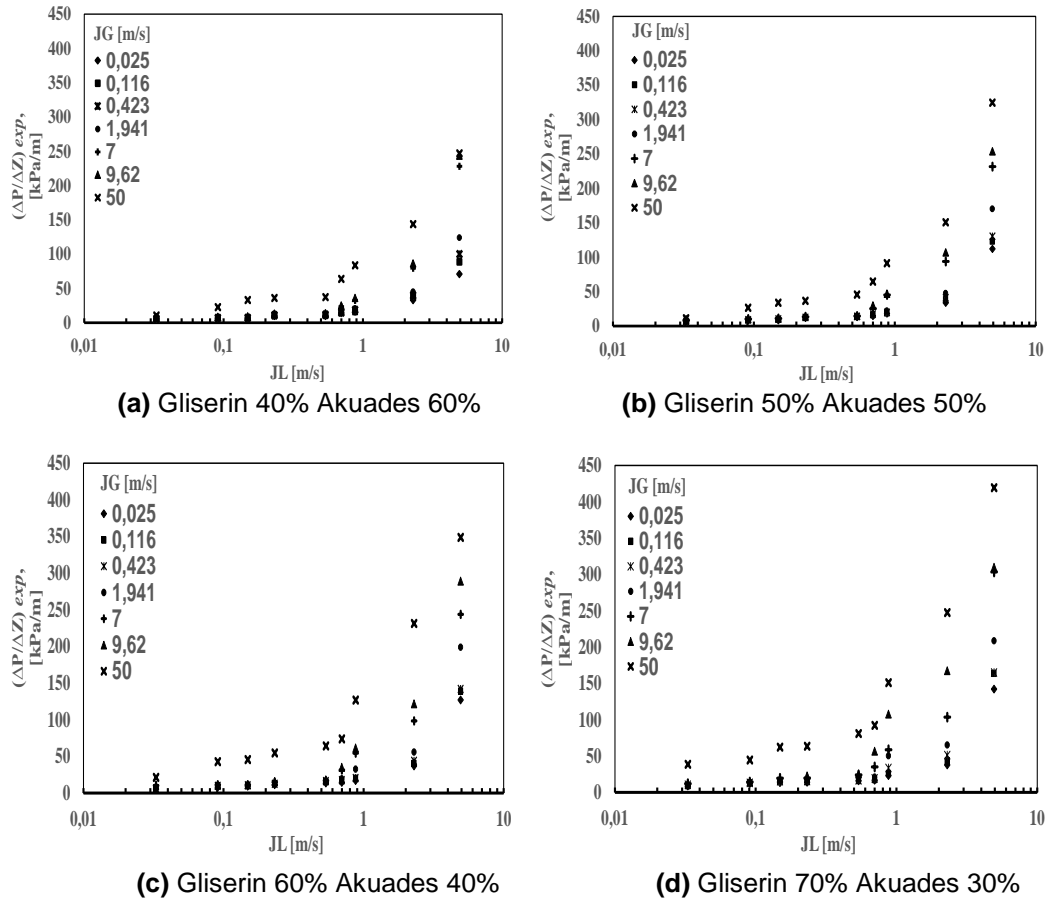
3.2 Gradien Tekanan

Penelitian gradien tekanan ini dilakukan pada pipa mini yang berukuran 1,6 mm dan diaplikasikan dengan derajat kemiringan sebesar 45^o dengan campuran cairan gliserin dan akuades yang mana masing-masing campuran mengandung 40%, 50%, 60%, 70% gliserin. Tahap selanjutnya, mengalirkan fluida dengan mengatur kecepatan superfisial gas (J_G) dan kecepatan superfisial *liquid* (J_L) dan pada *flowmeter* gas dan cair. Melakukan pengamatan dengan komputer yang sudah terhubung dengan akuisisi data dan *pressure transducer*. Data didapatkan dari alat MPX dengan mengambil sebanyak 3000 data/menit

3.2.1 Pengaruh Kecepatan Superfisial Terhadap Gradien Tekanan Pada Aliran Dua Fase Udara-Campuran Air dan Gliserin (GL) 40%, 50%, 60% dan 70%

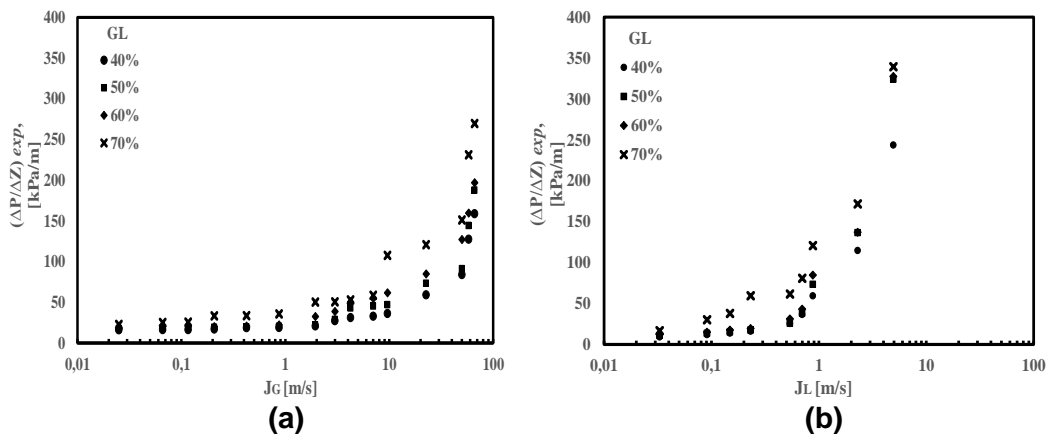


Gambar 3.5 Pengaruh J_L [0,091; 0,149; 0,232; 0,539; 0,7; 0,879, dan 2,297 (m/s)] terhadap gradien tekanan dengan variasi J_G [0 - 66,3 (m/s)] pada (a) GL 40%, (b) GL 50%, (c) GL 60%, (d) GL 70



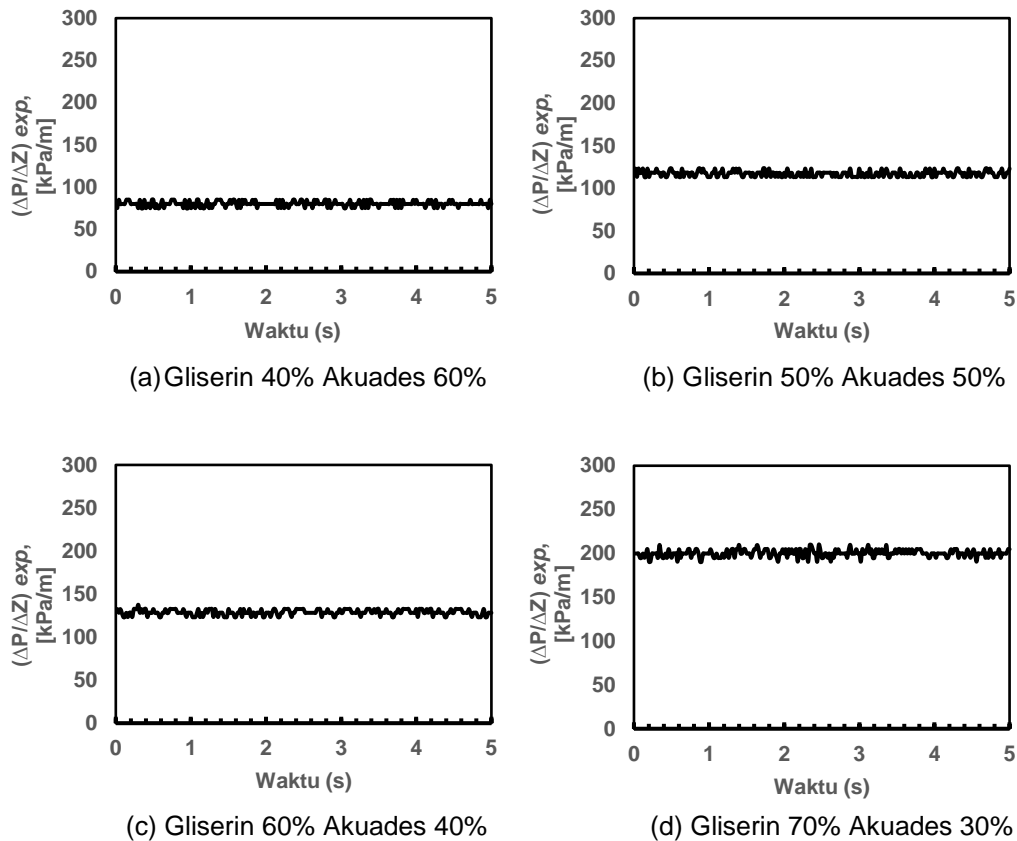
Gambar 3.6 Pengaruh JG [0,025; 0,116; 0,423; 1,941; 7; 9,62 dan 50 (m/s)] terhadap gradien tekanan dengan variasi JL [0,033 - 4,935 (m/s)] pada (a) GL 40%, (b) GL 50%, (c) GL 60%, (d) GL 70

3.2.2 Pengaruh Viskositas Cairan Terhadap Gradien Tekanan



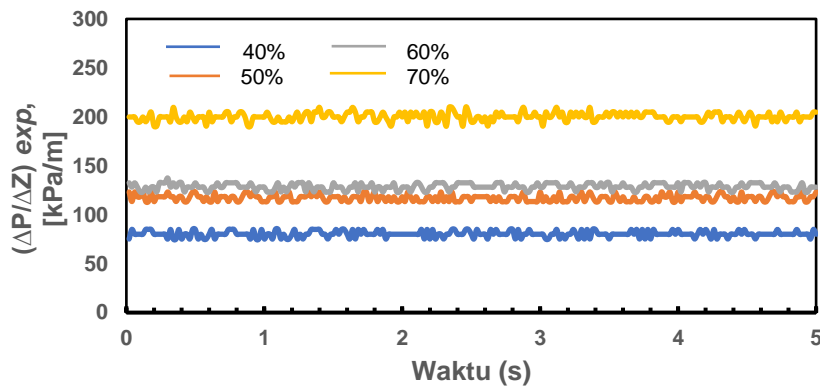
Gambar 3.7 Pengaruh viskositas fluida terhadap gradien tekanan pada (a) $J_L = 0,879$ m/s dan J_G bervariasi pada konsentrasi (40-70%), (b) $J_G = 22,6$ m/s dan J_L bervariasi pada konsentrasi (40-70%)

3.2.3 Grafik Time Series Gradien Tekanan



Gambar 3.8 Grafik *Time Series* Gradien Tekanan pada (a) $J_G = 0,066$ m/s dan $J_L = 4,935$ m/s, (b) $J_G = 0,066$ m/s dan $J_L = 4,935$ m/s, (c) $J_G = 0,066$ m/s dan $J_L = 4,935$ m/s, (d) $J_G = 0,066$ m/s dan $J_L = 4,935$ m/s

3.2.4 Grafik Perbandingan *Time Series* Gradien Tekanan



Gambar 3.9 Perbandingan *time series* gradien tekanan pada viskositas (40-70%)

4 Kesimpulan

Nilai *superfisial* gas (JG) dan kecepatan *superfisial liquid* (JL) sangat berpengaruh terhadap kecepatan gradien tekanan. Semakin besar nilai JG maupun JL yang digunakan, maka hasil gradien tekanan menunjukkan nilai yang besar. Peningkatan gradien tekanan pada pengujian yang telah dilakukan dari tujuh JL (0,091; 0,149; 0,232; 0,539; 0,7; 0,879 dan 2,297 [m/s]) dengan variasi JG (0 sampai 66,3 [m/s]) mengalami peningkatan. Demikian juga dengan pengaruh dari JG dengan rentang (0,025; 0,116; 0,423; 1,941; 7; 9,62 dan 50 [m/s]) dengan memvariasikan JL (0,033 sampai 4,935 [m/s]).

Gradien tekanan pada JG = 0,066 (m/s) dan JL = 4,935 (m/s) dengan viskositas 40% menghasilkan gradien tekanan rata-rata 80,366 (kPa/m), 50% menghasilkan gradien tekanan rata-rata 117,202 (kPa/m), 60% menghasilkan gradien tekanan rata-rata 128,708 (kPa/m), dan 70% menghasilkan gradien tekanan rata-rata 200,086 (kPa/m). Dengan demikian pengujian yang dilakukan menunjukkan, semakin besar viskositas fluida maka gradien tekanan yang dihasilkan juga semakin besar. Sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan dengan variasi viskositas cairan yang meningkat menyebabkan cairan akan lebih tertahan atau tersumbat untuk bergerak, sehingga hasil menunjukkan nilai gradien tekanan juga meningkat.

Daftar Pustaka

Journal:

- [1] Abubakar, A., Al-Wahaibi, Y., Al-Wahaibi, T., Al-Hashmi, A., Al-Ajmi, A., & Eshrati, M. (2015). Effect of low interfacial tension on flow patterns, pressure gradients and holdups of medium-viscosity oil/water flow in horizontal pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.02.017>
- [2] Awaluddin, A., Wahyudi, S., & Widodo, A. S. (2014). Analisis Aliran Fluida Dua Fase (Udara-Air) Melalui Belokan 45o. *Rekayasa Mesin*, 5(3), pp.217-224.
- [3] Barreto, E. X., Oliveira, J. L. G., & Passos, J. C. (2015). Frictional pressure drop and void fraction analysis in air-water two-phase flow in a microchannel. *International Journal of Multiphase Flow*, 72, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.01.008>
- [4] Dutkowski, K. (2009). Two-phase pressure drop of air-water in minichannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(21–22), 5185–5192. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.04.018>
- [5] Noverdi, R., & Gutama, A. (n.d.). *Investigasi Pola Aliran Dua-Fase Gas-Cairan Di Dalam Pipa Berukuran Mini Pada Aliran Horisontal*. (2).
- [6] Pehlivan, K., Hassan, I., & Vaillancourt, M. (2006). Experimental study on two-phase flow and pressure drop in millimeter-size channels. *Applied Thermal Engineering*, 26(14–15), 1506–1514. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.12.010>
- [7] Saisorn, S., & Wongwises, S. (2008). Flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air-water flow in a horizontal circular micro-channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(3), 748–760. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2007.09.005>
- [8] Sudarja, Jayadi, F., Indarto, & Deendarlianto. (2016). Karakteristik Gradien Tekanan Pada Aliran Dua-Fase Udara-Campuran Air dan 20 % Gliserin Dalam Pipa Horizontal Berukuran Mini. *Proceeding National Symposium on Thermofluids*, VIII(November).
- [9] Sudarja, Haq, A., Deendarlianto, Indarto, & Widyaparaga, A. (2019). Experimental study on the flow pattern and pressure gradient of air-water two-phase flow in a horizontal circular mini-channel. *Journal of Hydrodynamics*, 31(1), 102–116. <https://doi.org/10.1007/s42241-018-0126-2>
- [10] Sukamta, S., & Sudarja, S. (2019). Korelasi Signifikan antara Kecepatan Superfisial dan Viskositas Cairan Menggunakan Pola Aliran Dua Fase pada Pipa Mini dengan Kemiringan 30 Derajat. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 8(1), 33–39. <https://doi.org/10.24127/trb.v8i1.917>
- [11] Triplett, K. A., Ghiaasiaan, S. M., Abdel-Khalik, S. I., & Sadowski, D. L. (1999). Gas-liquid two-phase flow in microchannels part I: Two-phase flow patterns. *International Journal of Multiphase Flow*, 25(3), 377–394. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(98\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(98)00054-8)