

PRESSURE DROP DAN POLA ALIRAN DUA FASE (AIR-UDARA) MELEWATI PIPA GROOVE VERTIKAL

Supa Kusuma Aji

Mahasiswa S2
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
supa.kusuma@gmail.com

Denny Widhiyanuriawan

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
denny_w@ub.ac.id

Lilis Yulianti

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
liliis_y@ub

This research was conducted to observe the effect of adding grooves in the two-phase flow of water-air in the same direction through a vertical pipe to changes in pressure and fluid flow patterns. Test section in the form of pipes with grooves made of acrylic material with a length of 100 cm and an internal diameter of 2.54 cm. The geometric shape of the acrylic pipe is modified by giving a groove in the direction of the pipe along the test section. Grooves used amounted to 4 and 16 and pipes without grooves used as a comparison. Tests are carried out by flowing water and air that has been mixed through the inlet side upward. The ratio of air velocity to water velocity (V_G / V_L) is 0.24-1.13. The method used in this study is experimental. Retrieval of pressure drops data is done by using a differential pressure transmitter. Visual observations are also made using a DSLR camera equipped with a flash and video observations using a smartphone with slow-motion mode. The results showed changes in flow patterns and pressure drop values. Slugs in pipes with grooves disappear faster and pressure drops are lower than pipes without grooves.

Keywords: Groove, Two-Phase Flow, Vertical Pipe, Pressure Drop, Flow Pattern

1. PENDAHULUAN

Aliran fluida di dalam saluran perpipaan tidak saja terbatas berupa aliran satu fase, tetapi bisa juga merupakan aliran multifase. Aliran multifase adalah aliran yang fasenya terdiri dari fase padat, cair, dan gas yang melalui saluran secara bersamaan. Aliran dua fase merupakan bagian dari aliran multifase yang terdiri dari dua fase berbeda. 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. Dalam kehidupan sehari-hari aliran dua fase dapat ditemukan pada proses evaporasi dan kondensasi pada sistem tenaga uap, *chemical reactor*, dan aplikasi *fluidized bed* [1,2]. Pada fluida yang mengalir melalui sebuah saluran yang memiliki panjang tertentu terjadi kerugian energi berupa penurunan tekanan (*pressure drop*) yang disebabkan oleh *major losses* akibat dari gesekan sepanjang dinding pipa maupun *minor losses* akibat perubahan bentuk dari saluran berupa belokan, katup, maupun sambungan pipa dan juga tergantung berdasarkan koefisien gesek pipa tersebut. Hal tersebut terjadi tidak hanya pada aliran fluida satu fase saja. Pada kenyataannya juga sering terjadi pada aliran fluida multifase[2].

Aliran fluida dua fase telah banyak diteliti terkait bagaimana pola aliran, mekanisme serta ketidakstabilan fluida dua fase itu sendiri [3]. Pola aliran pada pipa polos dengan posisi vertikal juga sudah diteliti. Pada saluran vertikal pola aliran yang terbentuk secara umum dibagi menjadi *bubbly flow*, *slug flow*, *churn flow*, *annular flow*[4,5]. Salah satu aliran yang menarik di teliti adalah aliran slug karena memiliki karakteristik yang unik. Aliran *slug* sering muncul pada berbagai aplikasi industri seperti pada alat penukar kalor, sistem transportasi minyak, sistem distilasi dan lain sebagainya. Pola aliran *slug* merupakan pola aliran berbentuk kantung udara yang tercipta karena kecepatan udara bergerak dengan tinggi dibandingkan dengan kecepatan air. Kantung udara tersebut akan terbawa secara bersamaan oleh aliran air. Akan tetapi keberadaan aliran *slug* ternyata sangat dihindari pada kenyataannya karena memberikan dampak negatif pada sistem.

Dampak negatif pola aliran slug memberikan tekanan yang fluktuatif dan bersifat mendadak. Perubahan tekanan yang mendadak ini dapat menyebabkan pipa pecah. Dampak lainnya adalah bentuk kantung udara yang berisi banyak udara akan berakibat pada pipa yang lebih cepat mengalami korosi. Pada

pipa dengan posisi horizontal kantung udara akan berada di bagian atas saluran karena pengaruh massa jenis. Sedangkan pada pipa dengan posisi vertikal kantung udara akan berusaha untuk selalu untuk memenuhi ruang pada saluran karena efek dari gaya gravitasi. Hal ini akan memicu untuk mempermudah sifat korosi pada seluruh permukaan pipa. Tekanan yang fluktuatif pada *slug* juga berpengaruh terhadap nilai *pressure drop*. Nilai *pressure drop* akan berkurang ketika kantung udara dominan berada titik pengukuran. Sedangkan ketika pada titik pengukuran di dominasi oleh fluida cair, maka secara mendadak nilai *pressure drop* akan menjadi tinggi. Hal ini yang menyebabkan fluktuasi yang berlebihan pada pola aliran *slug*.

Keberadaan aliran *slug* perlu dicegah, selain itu nilai dari *pressure drop* juga harus dapat direduksi. Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengetahui sifat serta mekanisme aliran *slug* dan pengaruhnya terhadap *pressure drop*. Salah satu cara yang bisa digunakan adalah dengan memodifikasi bentuk geometri saluran. Cara ini merupakan metode pasif untuk mengontrol terbentuknya *vortex*[6]. Bentuk-bentuk geometri yang berasal dari alam mampu menjadi contoh dan memberikan inspirasi dalam mencari desain saluran yang lebih baik. Bentuk geometri saluran dengan penambahan *groove* adalah salah satunya. Bentuk *groove* ini mengadopsi dari bentuk permukaan kulit hiu (*riblet structure*). Dengan desain permukaan kulit tersebut, hiu dapat bergerak di dalam air dengan sedikit tenaga yang digunakan. Penelitian terhadap permukaan kulit hiu sendiri telah dilakukan dan menunjukkan bahwa bentuk permukaan kulit hiu ternyata mampu mengurangi gesekan pada saat bergerak di dalam air [7].

Pada aliran satu fase pengaruh *groove* terhadap aliran laminar dan turbulen pada pengurangan *drag* juga berhasil diidentifikasi baik itu secara numerik dan visualisasi[8,9]. Dalam kaitan dengan kondisi aliran fluida yang secara aplikatif adalah turbulen, solusi penambahan *groove* mempengaruhi kondisi lapisan batas serta daerah *viscous* dekat dinding pipa. Perilaku ini sangat menentukan *pressure drop* dan *viscous drag* yang terjadi selama fluida mengalir. Penelitian dengan membandingkan pipa tanpa *groove* dengan pipa dengan *groove* juga berhasil didapatkan. Pada posisi turbulen aliran di sepanjang *groove* berhasil mengurangi kecepatan dari *friction* dan bilangan *Reynolds* dimana hal ini mengindikasikan terjadi pengurangan *drag*[10,11]. Aliran dua fase vertikal pada pipa bergelombang juga sudah diidentifikasi dibandingkan dengan pipa tanpa alur. Hasil yang diperoleh menunjukkan perilaku yang berbeda pada kondisi pola aliran yang sama[12].

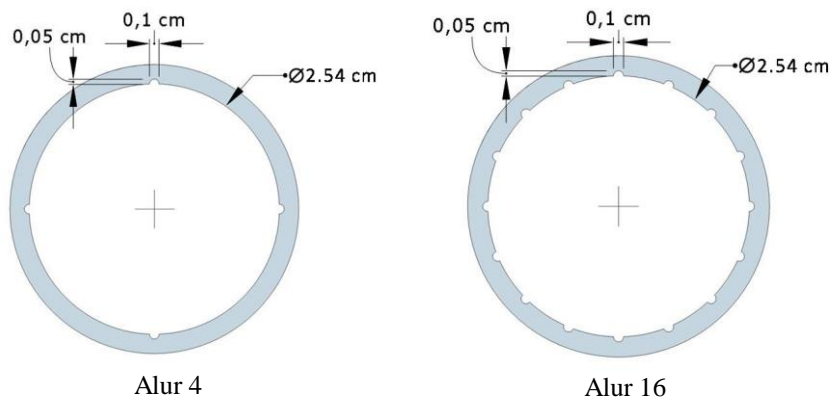
Perilaku pola aliran dengan bentuk *groove* searah sepanjang pipa dengan variasi jumlah *groove* menunjukkan pengaruh terhadap *friction factor*. Hasil penelitian pada aliran satu fase horizontal menunjukkan bahwa pada pipa dengan *groove* berjumlah 2, 8 dan 32 aliran fluida mengalami pengurangan gesekan karena ukuran vortisitas yang terbentuk lebih besar dari lebar alur sehingga pola aliran cenderung lurus dengan gradien kecepatan yang kecil. Sedangkan pada pipa dengan *groove* 4 dan 16 vortis yang terbentuk berukuran lebih kecil dari lebar alur sehingga meningkatkan faktor gesekan yang menyebabkan pergerakan *vortex* cenderung melingkar dengan gradien kecepatan tinggi. Dengan demikian, memilih jumlah alur yang tepat akan mampu mengurangi kerugian karena kehilangan energi[13,14]. Secara umum, aliran dengan alur (*groove*) mampu menghasilkan pola aliran yang berbeda dan *drag reduction* yang lebih baik dibandingkan dengan pipa tanpa alur[15].

Berdasarkan penelitian yang digunakan, bentuk *groove* dapat diaplikasikan secara komersial sebagai cara untuk mengurangi *drag*. Penelitian yang dilakukan sebelumnya baik secara numerik maupun eksperimen adalah tentang bentuk-bentuk alur maupun struktur aliran saat melewati alur pada *flat plate*, aliran eksternal serta pada pipa beralur. Namun dari penelitian yang sudah dilakukan, masih sedikit referensi bagaimana kemungkinan yang terjadi apabila pipa beralur digunakan pada aliran fluida dua fase. Pola aliran akan menjadi lebih rumit karena fluida yang mengalir lebih dari satu fase secara bersamaan. Penelitian yang dilakukan adalah pengamatan yang terjadi pada pipa beralur dengan variasi jumlah *groove* menggunakan fluida dua fase berupa air dan udara serta menjelaskan fenomena yang terjadi. Bentuk geometri pipa dimodifikasi dengan diberi *groove* searah sepanjang pipa penelitian. Dari penelitian tersebut nantinya juga dapat diperoleh pengaruh jumlah *groove* terhadap kemungkinan yang terjadi pada *pressure drop*. Dan diharapkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini akan menjadi acuan bagi pengembangan penelitian selanjutnya.

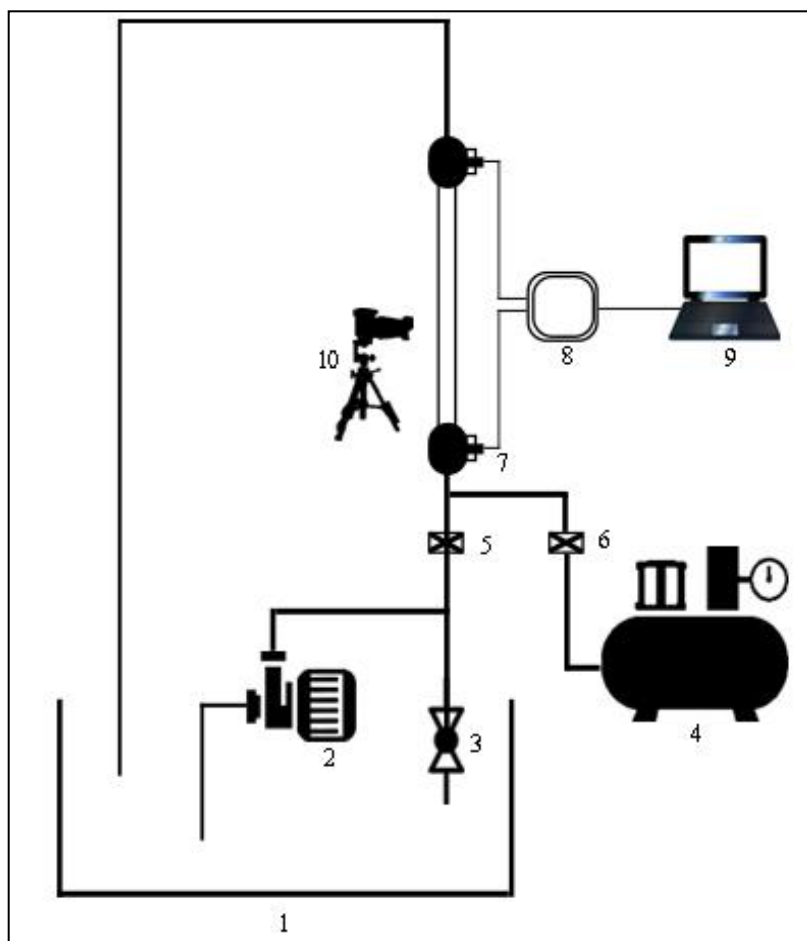
2. METODE DAN BAHAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik pola aliran dan *pressure drop*. Fluida yang digunakan berupa air dan udara yang dialirkan searah vertikal melewati seksi uji. Seksi uji merupakan pipa terbuat dari bahan akrilik berdiameter dalam 2,54 cm yang sudah dimodifikasi dengan penambahan alur (*groove*) di dalamnya. Penambahan profil alur pada pipa berbentuk setengah lingkaran dengan jarak masing-masing alur ditentukan berdasarkan sudut

lingkaran dibagi dengan jumlah alur. Panjang *groove* ditentukan sepanjang pipa akrilik yang digunakan, yaitu sepanjang 100 cm dan jumlah alur pada pipa sebanyak 4 dan 16. Pipa akrilik tanpa alur digunakan sebagai pembandingan terhadap hasil pengukuran pada pipa dengan alur. Penelitian yang dilakukan adalah pengukuran terhadap perubahan *pressure drop* dan pengamatan pola aliran secara visual. Profil pipa dengan alur dan instalasi penelitian yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.



Gambar 1: Desain Geometri Pipa dengan Alur



- Keterangan :
1. Tandon air
 2. Pompa air
 3. Valve
 4. Kompresor
 5. *Flowmeter Digital*
 6. Rotameter
 7. *Pressure Sensor*
 8. *Arduino Data Logger*
 9. Laptop
 10. Kamera DSLR

Gambar 2: Skema Instalasi Penelitian

Pengujian dilakukan pada instalasi penelitian seperti ditunjukkan pada gambar 2. Setelah pipa dengan *groove* tersedia, selanjutnya pipa dipasangkan ke dalam instalasi penelitian dengan posisi vertikal. Pada kedua ujung pipa uji (pipa *groove*) dipasang *pressure sensor* yang terhubung langsung dengan *arduino data logger*. Di depan pipa uji diletakkan kamera DSLR dan *smartphone* untuk perakaman secara visual. Pengujian dilakukan bergantian terhadap masing-masing pipa dimana kecepatan superficial dari udara dan air

juga divariasikan. Kecepatan superficial udara dari 0.049-0.082 m/s. Sedangkan kecepatan superficial air divariasikan dari 0.066-0.23 m/s. Untuk menghitung besarnya kecepatan superficial udara dan air dapat diketahui berdasarkan persamaan 1 dan 2.

$$j_G = \frac{Q_G}{A} \quad (1)$$

$$j_L = \frac{Q_L}{A} \quad (2)$$

keterangan:

j_G = kecepatan superficial gas (m/s)

Q_G = debit fluida gas (lpm)

j_L = kecepatan superficial cairan (m/s)

Q_L = debit fluida cair (lpm)

A = luas permukaan (m²)

Untuk menghitung bilangan Reynold campuran maka dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$Re_m = \frac{\rho_m V_m D}{\mu_h} \quad (3)$$

keterangan:

ρ_m = densitas campuran (kg/m³)

V_m = kecepatan aktual campuran (m/s)

D = diameter pipa (m)

μ_h = viskositas homogen (Pa/s)

a_G adalah fraksi gas dalam saluran, sedangkan a_L adalah fraksi cairan di dalam saluran.

$$a_G = 1 - a_L \quad (4)$$

Dari persamaan kualitas gas dan kualitas liquid maka nilai densitas campuran dapat diketahui dari persamaan berikut:

$$r_h = a_G r_G + a_L r_L \quad (5)$$

Nilai dari viskositas campuran dapat diketahui melalui persamaan berikut:

$$\frac{1}{m_h} = \frac{x}{m_G} + \frac{1-x}{m_L} \quad (6)$$

Nilai dari kecepatan aktual masing-masing fase dapat diketahui melalui persamaan berikut:

$$V_G = \frac{j_G}{a_G} \quad (7)$$

$$V_L = \frac{j_L}{a_L} \quad (8)$$

Tabel 1: Propertis Fluida pada Temperatur Rata-rata 30°C

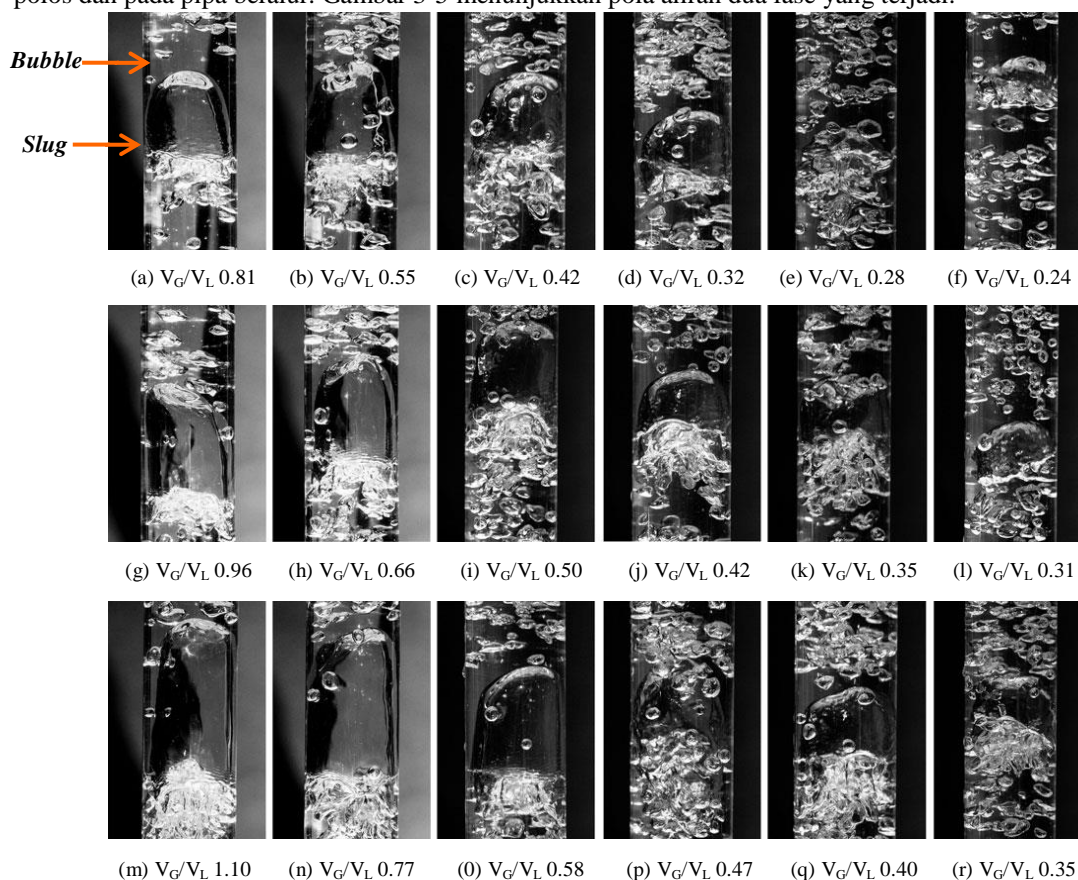
FLUIDA	DENSITAS (kg/m ³)	VISKOSITAS (Pa/s)
Air	997	10 ⁻³
Udara	1.2	1.81x10 ⁻⁵

Setelah semua masing-masing variasi sudah dikondisikan, aliran fluida dibiarkan bersirkulasi untuk didapatkan kondisi aliran yang stabil pada kondisi dua fase. Setelah aliran stabil, dilakukan pengambilan data terhadap tekanan pada sisi *inlet* dan *outlet* fluida. Pengambilan data tekanan yang dilakukan dengan *arduino data logger*, selanjutnya diolah untuk didapatkan nilai selisih antara tekanan pada sisi *inlet* dengan *outlet*. Nilai selisih tekanan tersebut akan dibandingkan dengan nilai selisih yang didapatkan dari hasil pengujian pada pipa tanpa *groove*. Pengambilan data berupa foto menggunakan kamera Nikon D90 dan tambahan *flash* dengan spesifikasi *High Speed Synchro*. Data foto diolah menggunakan *software Adobe Photoshop* untuk dilakukan pengamatan terhadap pola aliran. Selain pengambilan data berupa foto, juga dilakukan perekaman visual menggunakan *smartphone* dengan mode *slowmotion*. Hasil perekaman video ini bertujuan mengetahui bentuk aliran, proses terbentuknya aliran, serta pengaruh dari kecepatan fluida cair dan gas

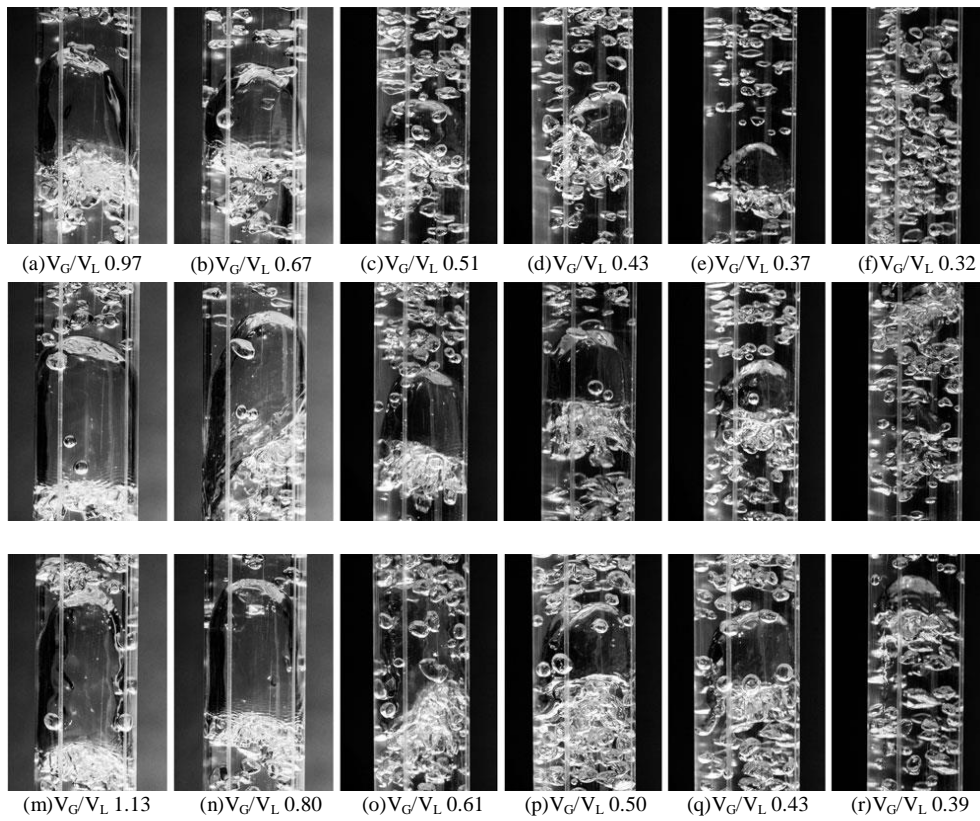
3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Visualisasi Pola Aliran

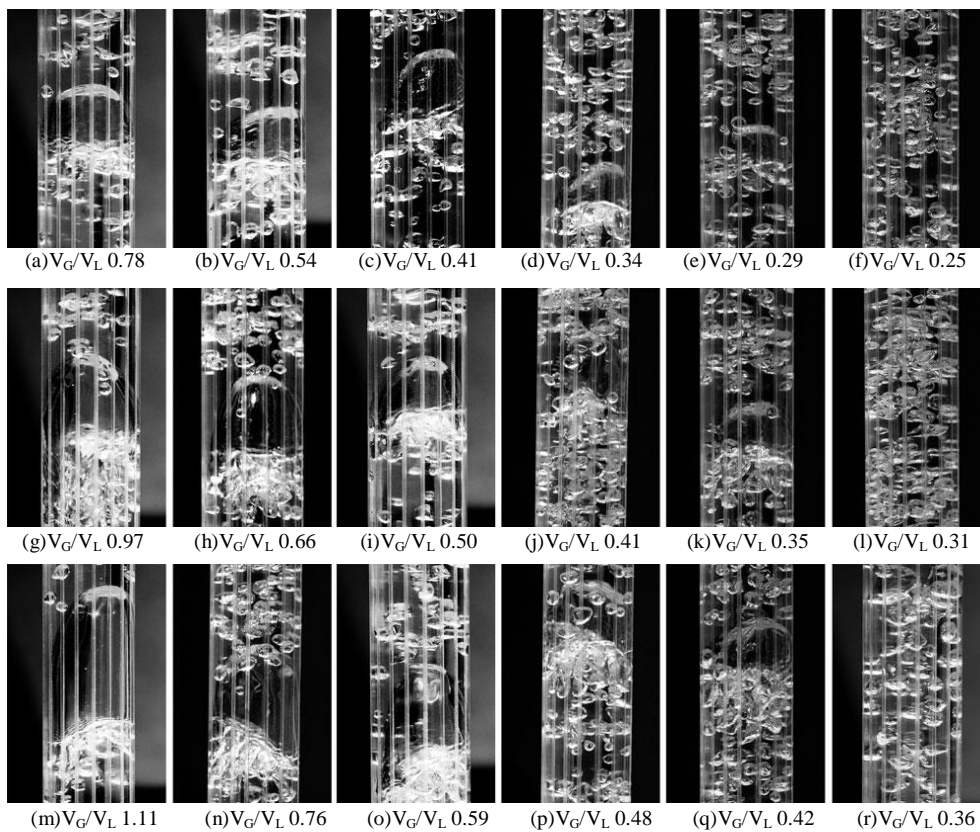
Studi visualisasi dilakukan untuk mengamati proses pembentukan dan perkembangan pola aliran pada pipa polos dan pada pipa beralur. Gambar 3-5 menunjukkan pola aliran dua fase yang terjadi.



Gambar 3. Visualisasi pembentukan aliran *slug* dan *bubble* pada pipa polos.



Gambar 4. Visualisasi pembentukan aliran *slug* dan *bubble* pada pipa beralur 4.



Gambar 5. Visualisasi pembentukan aliran *slug* dan *bubble* pada pipa beralur 16.

Pada Gambar 3-5 aliran terbentuk pada kondisi kecepatan superfisial udara (j_G) 0.049 m/s, 0.066 m/s, dan 0.082 m/s sedangkan kecepatan superfisial air (j_L) sebesar 0.66 m/s sampai dengan 0.23 m/s. Pada kondisi tersebut pola aliran yang terbentuk adalah pola aliran *slug* dan *bubble*. Pola aliran yang terjadi sangat bergantung dari kecepatan superfisial udara dan kecepatan superfisial gas [1,2,4,5]. Aliran *slug* adalah berupa aliran kantung udara yang memiliki diameter hampir memenuhi diameter pipa. Penambahan kecepatan superfisial udara pada kondisi kecepatan superfisial air yang rendah dan konstan akan menyebabkan terbentuknya pola aliran *slug* dengan ukuran yang semakin memanjang. Pada kecepatan superfisial udara konstan dengan penambahan kecepatan superfisial air maka pola aliran yang terbentuk berupa *slug* yang mengalami transisi menuju bentuk *bubble*. Sedangkan pada saat kecepatan superfisial air tinggi dengan penambahan kecepatan superfisial udara pola aliran yang terjadi adalah pola aliran yang didominasi *bubble* dengan sesekali diinterupsi kemunculan aliran *slug*.

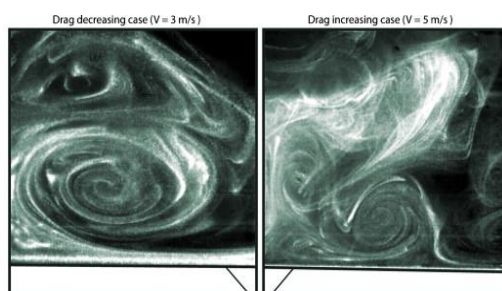
Gambar 3 menunjukkan pola aliran yang terjadi adalah pola aliran *slug* dan *bubble* pada pipa polos. Semakin meningkatnya kecepatan superfisial udara maka ukuran aliran *slug* akan semakin memanjang. Peningkatan kecepatan superfisial udara berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan aktual udara. Ukuran dan bentuk pola aliran sebanding dengan kenaikan rasio kecepatan aktual udara terhadap kecepatan aktual air (V_G/V_L). Pada rasio kecepatan aktual tinggi terjadi penambahan proporsi udara sehingga kondisi tersebut menyebabkan volume air di dalam saluran akan semakin berkurang.

Gambar 4 menunjukkan pola aliran pada pipa dengan jumlah alur 4. Pola aliran yang terjadi serupa dengan pola aliran pada pipa polos sesuai dengan Gambar 3. Pada pipa beralur 4 ukuran aliran *slug* semakin mengalami pengecilan pada kondisi kecepatan superfisial air dan kecepatan superfisial udara yang sama. Pada Gambar 4f pola aliran yang terjadi adalah pola aliran *bubble*. Sedangkan pada Gambar 3f pola aliran masih memunculkan bentuk *slug*. Pada kondisi tersebut ketika kecepatan superfisial dinaikkan maka aliran yang terbentuk akan menjadi aliran *bubble* yang sesekali terjadi aliran *slug*.

Gambar 5 menunjukkan pola aliran yang terjadi pada pipa dengan jumlah alur 16. Pola aliran yang terjadi serupa dengan pola aliran pada pipa polos dan pipa beralur 4. Pada pipa beralur 16 ukuran aliran *slug* mengalami pengecilan dibandingkan pada pipa beralur 4.

Fenomena terjadi pada pipa dengan alur 4 (Gambar 4f) dan 16 (Gambar 5f) ketika kecepatan superfisial air sebesar 0.23 m/s dengan kecepatan superfisial udara sebesar 0.049 m/s. Berbeda dengan pipa polos yang masih muncul aliran *slug* seperti pada Gambar 3f, pada pipa beralur 4 dan 16 aliran yang terjadi berupa *bubble*. Ketika kecepatan superfisial udara meningkat menjadi 0.066 m/s pola aliran pada pipa beralur 4 memunculkan *slug* dengan ukuran yang relatif kecil (Gambar 4l) dibandingkan pada pipa polos (Gambar 3l). Pada kondisi yang sama pola aliran pada pipa 16 tetap berupa aliran *bubble* (5l). Pada kecepatan superfisial udara sebesar 0.082 m/s pola aliran pada pipa beralur 4 akan mengalami peningkatan ukuran *slug* (Gambar 4r) tetapi masih memiliki ukuran yang relatif kecil bila dibandingkan dengan pipa polos (Gambar 3r). Sedangkan pada pipa beralur 16 pola aliran tetap pada bentuk *bubble* dengan terjadi sedikit peningkatan ukuran *bubble* (Gambar 5r).

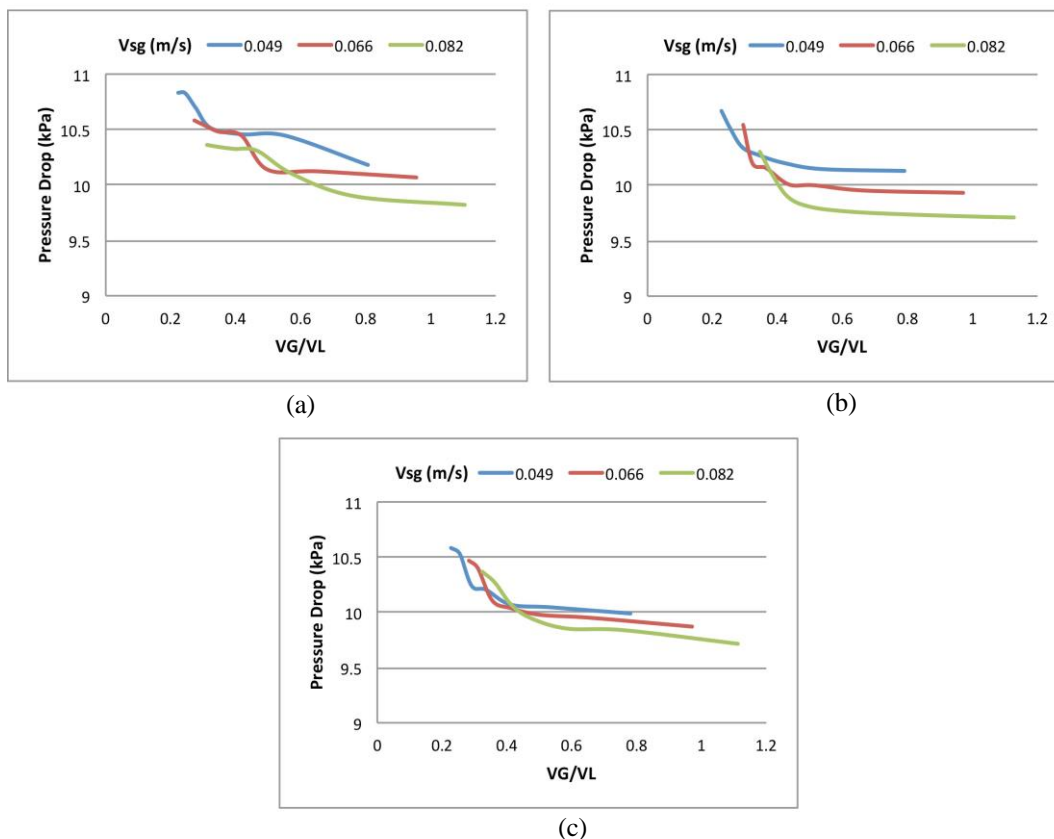
Terjadinya perbedaan pola aliran ini disebabkan karena penambahan alur di dalam pipa. Di dalam saluran polos, terjadi tegangan geser pada lapisan dinding pipa. Permukaan pipa yang polos akan menimbulkan gerakan radial ketika fluida mengalir di sekitar dinding pipa. Gerakan radial akan menimbulkan terbentuknya lapisan *vortex* di sekitar dinding pipa seperti terlihat pada gambar (6).



Gambar 6. Ilustrasi *vortex* pada pipa beralur

Terbentuknya lapisan *vortex* akan meningkatkan tegangan geser antara fluida dengan lapisan dinding pipa. Peningkatan tegangan geser tersebut menyebabkan terjadinya fluktuasi kecepatan[15,16]. Gradien kecepatan fluida lebih tinggi antara bagian tengah dengan bagian yang bersinggungan langsung dengan dinding pipa. Fluktuasi kecepatan ini berpengaruh terhadap pola aliran dan perbandingan kecepatan aktual fluida. Perbandingan kecepatan aktual udara terhadap air akan berdampak pada perubahan *pressure drop* pada masing-masing pipa[1].

Pada gambar 7 terlihat rata-rata *pressure drop* pipa tanpa alur (Gambar 7a) memiliki nilai yang paling tinggi dibandingkan pada pipa beralur. Pada pipa beralur 4 (Gambar 7b) dan beralur 16 (Gambar 7c) nilai *pressure drop* lebih rendah dibandingkan pada pipa polos, dan secara keseluruhan pipa beralur 16 memiliki *pressure drop* yang paling rendah dibandingkan pipa lainnya.



Gambar 7. Perbandingan *pressure drop* terhadap rasio V_G/V_L pada (a) pipa polos, (b) pipa beralur 4, (c) pipa beralur 16

Gambar 6a juga menunjukkan nilai rasio V_G/V_L pada pipa polos lebih kecil daripada pipa beralur. Pada Gambar 6b dan 6c rasio V_G/V_L pada pipa beralur cenderung lebih tinggi dibandingkan pada pipa polos. Rasio V_G/V_L memiliki nilai yang berbanding terbalik terhadap *pressure drop*. Semakin tinggi nilai V_G/V_L maka nilai *pressure drop* akan semakin berkurang[1].

Alur pada pipa berperan menjaga pergerakan fluida untuk tetap mengalir dengan kondisi yang lebih terarah[6,7]. Keberadaan alur mampu mengurangi total tegangan geser sepanjang permukaan[16]. Dengan demikian, fluktuasi kecepatan pada permukaan dinding pipa dapat dikurangi. Fluktuasi kecepatan yang berkurang berarti hambatan pada aliran fluida dapat diminimalisir sehingga kecepatan aliran pada pipa beralur tidak tereduksi secara signifikan oleh tegangan geser. Hal ini akan berdampak pada pola aliran yang cenderung mereduksi bentuk *slug* serta berdampak pada pengurangan nilai *pressure drop*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini dapat disimpulkan:

1. Pola aliran yang terbentuk pada pipa polos dan pada pipa dengan alur adalah aliran *slug* dan *bubble*.
2. Semakin tinggi nilai kecepatan superfisial air, semakin berkurang frekuensi kemunculan *slug* dan akan semakin kecil ukurannya.
3. Semakin tinggi kecepatan superfisial udara terhadap kecepatan superfisial air, bentuk *slug* akan semakin memanjang dengan frekuensi yang bertambah sering.
4. Pipa dengan alur mampu mereduksi terjadinya aliran *slug* sehingga mampu mengurangi terjadinya fluktuasi tekanan dan mengurangi *pressure drop*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] AWALUDDIN., SLAMET WAHYUDI, AGUNG SUGENG WIDODO, “Analisis Aliran Fluida Dua Fase (Udara-Air) melalui Belokan 45°”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 5, n. 3, pp.217-224, 2014.
- [2] HASLINDA KUSUMANINGSIH, WIDYA WIJAYANTI, DENNY WIDHIYANURIYAWAN, MUHAMMAD FAUZI, “Analisis Pressure Drop Dan Pola Aliran Dua Fase (Air-Udara) Pada Pipa Horizontal Melalui Orifice”, *Flywheel: Jurnal Teknik Mesin Untirta*, v. IV, n. 2, pp. 14-21, Oktober 2018.
- [3] LEONARDO CARLOS RUSPINI, CHRISTIAN PABLO MARCEL & ALEJANDRO CLAUSSE., “Two phase flow instabilities : A review”, *International journal of heat and mass transfer*, v. 71, pp. 521-548, 2014.
- [4] VIKRANT SIDDHARUDH CHALGERI & JI HWAN JEONG., “Flow pattern vertically upward and downward air-water two-phase flow in a narrow rectangular channel”, *International Journal Of Heat And Mass Transfer* v. 128, pp. 934-953, 2018.
- [5] KIM, TAE HYO., ET AL., “Visual observation of flow patterns in downward air-water two-phase flows in a vertical narrow rectangular channel”, *Annals of Nuclear Energy*, v. 114., pp. 384-394., 2018.
- [6] LAW, Y.Z., JAIMAN, R.K., “Passive control of vortex-induced vibration by spanwise grooves”, *Journal of Fluids and Structures*, v. 83, pp.1-26, 2018.
- [7] SAMUEL MARTIN & BHARAT BHUSHAN, “Fluid flow analysis of continuous and segmented riblets structure”, *RSC adv.*, v. 6, pp.10962-10978, 2016.
- [8] YANBEI WANG, *Effects of grooves on drag in laminar channel flow*, Degree M.Sc.,The University of Western Ontario, 2018.
- [9] NICOLETA, OCTAVIA TANASE., IULIA-RODICA DAMIAN., DIANA BROBOANA., CORNELIU BALAN., “The influence of grooved surface and liquid properties on vortices formation in vicinity of immersed cylinders”, *ScienceDirect Journal Energy Procedia*, v. 85, pp.521-529, 2016.
- [10] GUANGYAO CUI, ET AL., “Effect of drag reducing riblet surface on coherent structure in turbulent boundary layer”, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019.
- [11] CETIN CANPOLAT., BESIR SAHIN., “Influence of single rectangular groove on the flow past a circular cylinder”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 64, pp.79-88, 2017.
- [12] A.C. VAN ECKVELD., E. GOTFREDSEN., J. WESTERWEEL., C. POELMA., “Annular two-phase flow in vertical smooth and corrugated pipes” , *International Journal of Multiphase Flow*, v. 109, pp. 150-163, 2018.
- [13] GU, YUNQING., LIU, TAO., MU, JIEGANG., SHI, ZHENGZAN., AND ZHOU, PEIJIAN., “Analysis of drag reduction methods and mechanisms of turbulent”, *Applied Bionics and Biomechanics*, Article ID 6858720, v. 2017, September 2017.
- [14] SUNU PW, “The characteristics of increased pressure drop in pipes with grooved”, *Advanced Studies in Theoretical Physics*, v. 9, n. 2, pp. 57-61, 2015.
- [15] SUNU PW, WARDANA I.N.G., SONIEF A.A., HAMIDI N., “Flow behavior and Friction Factor in internally grooved pipe wall” , , *Advanced Studies in Theoretical Physics*, v. 8, n. 14, pp. 643-647, 2014.
- [16] SUNU,PW., *Drag pada aliran fluida dalam pipa dengan rectangular groove*, Disertasi Dr., Brawijaya Univesity, Malang, Indonesia, 2014.