

INVESTIGASI POLA ALIRAN DUA FASE UDARA-AIR DAN GLISERIN (40%, 50%, 60%, 70%) DALAM PIPA KAPILER DENGAN KEMIRINGAN 15⁰ TERHADAP POSISI HORIZONTAL

Pidhekso Pria Pityantoko^a, Sudarja^b, Sukamta^c

^{a,b,c}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
 Jalan Brawijaya Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, Indonesia, 55183

^apidheksopria.pityantoko@gmail.com, ^bsudarja@umy.ac.id, ^cmsukamta@gmail.com

Abstract

Two-phase flow is part of a multiphase flow comprising two phases (liquid-gas). Technological advances led to the use of two-phase flow in the industry become more important for some applications and engineering such as a boiler, heat exchanger, and piping systems. Two-phase flow applications in the pipeline in the industrialized world, mini used fluids are tailored to the needs and the superficial velocity of flow rate. So research to determine the flow pattern and flow pattern map using a capillary pipe with a variation of the angle of the slope, the value of the viscosity of fluids and superficial air velocity value variations (J_G) and liquid superficial velocity values (J_L) important to be examined.

This research uses the equipment in the form of a glass pipe with inside diameter 1.6 mm are mounted with 15⁰ slopes towards a horizontal position. The materials used in the form of a solution of glycerine and distilled water with a concentration of 40%, 50%, 60%, and 70%. Variation of air superficial velocity range $J_G = 0-66.3$ m/s; superficial fluid velocity ranged $J_L = 0.033 - 4.935$ m/s.

Two phases flow observation method in this study using a Nikon camera J4. The result of the video obtained then analyzed the form of flow pattern based on variations of the value J_G and J_L . After that, the observed flow pattern is mapped with J_G as the x-axis and the y-axis as the J_L . Map the flow pattern formed is then compared with previous research to know the changes that occur and complement the data already exists.

In the results of observations made, obtained five types of flow pattern, i.e. plug, bubbly, slug-annular, annular, churn. Comparison of the flow pattern map with previous researchers demonstrates a shift in the line of the transition.

Keyword: two-phase, viscosity, flow pattern, flow pattern maps.

1. Pendahuluan

Aliran dua fase adalah bagian dari aliran multiphase yang terdiri atas dua fase (gas, dan cair) yang mengalir secara bersamaan. Zhao & Bi (2001) menyatakan aliran dua fase dapat ditemukan dalam berbagai aplikasi dalam dunia industri, seperti pada pendinginan modul-modul *high-density multi-chip* pada *supercomputer*, peralatan *X-ray*, *heat exchanger*, dan peralatan diagnostik lainnya yang berdaya tinggi, penukar kalor fluks tinggi pada sistem kedirgantaraan (aerospace system), sistem pendinginan cryogenic pada satelit, dan sebagainya. Aliran dua fase masih dapat dibedakan menjadi beberapa fase aliran yang terbentuk, yaitu aliran dua fase (cair-padat, cair-gas, dan gas-padat). Disamping dari fasenya, aliran dua fase juga dibedakan berdasarkan arah alirannya (searah ke atas, searah ke bawah, berlawanan arah, mendatar sejajar, atau mendatar berlawanan arah), dan berdasarkan bentuk salurannya (lingkaran, persegi dan segitiga), serta berdasarkan kedudukan salurannya (tegak, mendatar, atau miring).

Penelitian terdahulu mengenai aliran dua fase umumnya lebih banyak ditemukan dengan menggunakan saluran konvensional, sedangkan untuk saluran pipa berukuran mini dan mikro belum banyak literatur yang membahasnya. Fluida kerja yang digunakan masih terbatas dengan udara dan air suling dan penggunaan variasi sudut kemiringan juga masih

sangat kurang. Sehingga penelitian aliran dua fase dalam saluran mini dengan pengaruh sudut kemiringan dan viskositas cairan menjadi lebih diperlukan untuk diterapkan di beberapa aplikasi dan produk rekayasa di berbagai bidang.

Penelitian terdahulu mengenai aliran dua fase menggunakan pipa berukuran mini dan mikro belum banyak literatur yang membahasnya. Ada beberapa penelitian yang pernah dilakukan pada pipa saluran mini dan saluran mikro yaitu Fukano & Kariyasaki (1993), Triplett et al. (1999), Chung & M. Kawaji (2004), Saisorn & Wongwises (2010), dan Sur & Liu (2012). Penelitian tentang aliran dua fase dalam saluran mini menjadi lebih diperlukan karena kemajuan perangkat teknologi, aliran dua fase pada pipa berskala mini yang digunakan untuk beberapa aplikasi dan produk rekayasa di berbagai bidang.

Karakteristik dasar aliran dua fase pada pipa kapiler meliputi: pola aliran (*flow pattern* atau *flow regime*) dan peta pola aliran (*flow pattern map*), fraksi hampa (*void fraction*), dan perubahan tekanan (*pressure gradient* dan *pressure drop*). Hal yang menjadi penting dalam penelitian mengenai aliran dua fase, khususnya di dalam pipa kapiler berukuran mini dan mikro, pola aliran yang terbentuk tidak dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Roziantho, (2018) menyatakan fluida mempunyai sifat yang unik, yaitu tegangan permukaan sangat dominan sehingga hukum Newton untuk fluida tidak berlaku. Hal ini sebagai akibat kecilnya diameter saluran, maka pola aliran yang terbentuk hanya dipengaruhi oleh tegangan permukaan fluida cair, viskositas fluida cair, dan nilai kecepatan superficial gas dan fluida cair.

Fukano & Kariyasaki (1993) melakukan penelitian tentang aliran dua fase isothermal air-udara dalam pipa sirkular dengan diameter dalam 1 mm, 2.4 mm, 4.9 mm, 9 mm. Arah laju aliran di variasikan menjadi tiga arah yaitu arah horizontal, vertikal ke bawah dan vertikal ke atas. Kesimpulan dari penelitian yang dilakukan ini adalah gaya *capillary* pada pipa yang memiliki ukuran diameter dalam kurang dari 5-9 mm menjadi sangat penting, arah aliran fluida tidak banyak berpengaruh terhadap pola aliran yang terbentuk, untuk arah aliran horizontal pola aliran yang muncul menjadi aksis-simetris, dimana ketebalan film air menyelimuti seluruh bagian permukaan pipa secara merata, gelembung-gelembung kecil biasanya tidak muncul pada aliran *plug* dan lapisan film cairan.

Triplett et al. (1999) melakukan penelitian menggunakan udara dan air yang dilakukan pada pipa *circular microchannels* dengan diameter 1,1 mm dan 1,45 mm, dan pada pipa *semi-triangular microchannel* dengan diameter 1,09 dan 1,49 mm. Variasi kecepatan superficial gas (J_G) yang digunakan dimulai dari 0,02 m/s hingga 80 m/s dan kecepatan superficial larutan (J_L) dimulai dari 0,02 m/s hingga 8 m/s. Pola aliran yang teramati selama penelitian adalah *bubbly*, *slug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*. Pola aliran *stratified* tidak ditemukan dalam penelitian ini, hal ini disebabkan oleh pengaruh tegangan permukaan yang besar.

Coleman & Garimella (1999) melakukan penelitian aliran dua fase menggunakan pipa tabung yang terbuat dari kaca *pyrex* (plastik transparan) dengan variasi diameter dalam 1,30 mm, 1,75 mm, 2,60 mm, 5,50 mm. Media kerja fluida yang digunakan yaitu udara dan air. Untuk kecepatan superficial udara berkisar dari 0,1 - 100 m/s dan untuk kecepatan superficial cairan berkisar dari 0.01 - 10.0 m/s. Dari hasil penelitian ini didapat empat pola aliran utama yang teridentifikasi yaitu aliran *stratified*, *intermittent*, *annular* dan *dispersed flow*. Diameter pada pipa dan efek dari tegangan permukaan juga mempengaruhi penekanan pada pola aliran *stratified* dan menambah ukuran pada pola aliran *intermittent*. Sehingga aspek rasio, diameter saluran dan tegangan permukaan menjadi faktor penting dalam menentukan garis transisi pola aliran.

Penelitian aliran dua fase pada pipa mini dengan menggunakan media kerja air-udara dan *refrigerant R-134a* (uap-cairan) telah dilakukan oleh Yang & Shieh (2001). Pipa yang terpasang terhadap posisi horizontal dengan diameter dalam dari 1 mm sampai 3 mm dengan panjang pipa yang bervariasi yaitu 200, 400, dan 600 mm. Pola aliran yang teramati dalam penelitian ini adalah *bubbly*, *slug*, *plug*, *wavy*, *stratified*, dan *dispersed annular*. Selain gaya apung dan fluktuasi turbulensi, tegangan permukaan menjadi parameter penting untuk menentukan pola aliran. Tegangan permukaan yang terjadi pada udara-air

lebih besar daripada *refrigerant-134a*, sehingga membuat transisi aliran *bubbly* lebih cepat terjadi daripada *refrigerant-134a*. Dan menyebabkan pergeseran transisi nilai kecepatan superfisial udara antara *slug* dan *annular* menjadi lebih rendah.

Chung & M. Kawaji (2004) melakukan penelitian tentang pengaruh diameter saluran pada karakteristik aliran dua fase adiabatik di *microchannels*. Dalam penelitiannya fluida yang digunakan berupa gas nitrogen dan air pada saluran dengan diameter 530, 250, 100, dan 50 μm . Kecepatan superfisial fluida cair yang digunakan berkisar 0,01 m/s – 5,77 m/s, sedangkan kecepatan superfisial gas berkisar 0,02 m/s – 72,98 m/s. Metode visualisasi yang digunakan berupa gambar fotografi. Hasil dari visualisasi menunjukkan bahwa perbedaan pola aliran pada pipa diameter 530 dan 250 μm dengan pipa berdiameter 100 dan 50 μm . Pola aliran yang teramati dalam penelitian ini dengan diameter 530 dan 250 μm , yaitu: *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular* dan *annular*. Sedangkan pada pipa berukuran 100 dan 50 μm pola yang teramati hanya pola aliran *slug*.

Penelitian tentang karakteristik aliran dua fase pada *microchannels* terhadap posisi horizontal telah dilakukan oleh Saisorn & Wongwises (2010). Seksi uji terbuat dari silika dengan variasi diameter dalam yaitu 0.53, 0.22, dan 0.15 mm serta variasi panjang pipa berkisar 320, 120 dan 104 mm. Percobaan yang sudah dilakukan menggunakan kecepatan superfisial udara yang nilainya berkisar 0,37 - 42,36 m/s dan kecepatan superfisial air yang nilainya berkisar 0,005-3,04 m/s. Hasil pola aliran yang teramati pada diameter 0,53 mm, terdapat empat pola aliran yang di dapat yaitu aliran *slug*, *throat-annular*, *churn*, dan *annular-rivulet*. Pada diameter 0,22 mm, terdapat tiga pola aliran yang teramati yaitu aliran *throat-annular*, *annular*, *annular-rivulet*. Dan untuk diameter 0,15 mm, empat pola aliran teramati yaitu *liquid-alone*, *throat-annular*, *serpentine-like gas core*, dan *annular*.

Sur & Liu (2012) melakukan penelitian tentang aliran dua fase air-udara pada saluran sirkular dengan diameter dalam 100, 180, dan 324 μm . Dalam penelitiannya terdapat empat pola aliran berbeda yang terbentuk adalah *bubbly*, *slug*, *ring*, dan *annular*. Aliran *bubbly* dikarakteristikan sebagai pola aliran *dispersed bubble* tunggal dengan diameter lebih kecil dari ukuran saluran. Aliran *slug* dikarakteristikan dengan rangkaian dari *Taylor Bubble* yang memanjang, yang terpisah oleh gumpalan air. Aliran *ring* memiliki ciri-ciri aliran gas yang mengalir secara berkelanjutan pada pusat saluran, membentuk inti gas yang dikelilingi lapisan film dengan cincin seperti leher disekelilingnya. Aliran *annular* merupakan aliran gas secara berkelanjutan pada pusat saluran, membentuk inti gas yang dikelilingi lapisan air yang stabil.

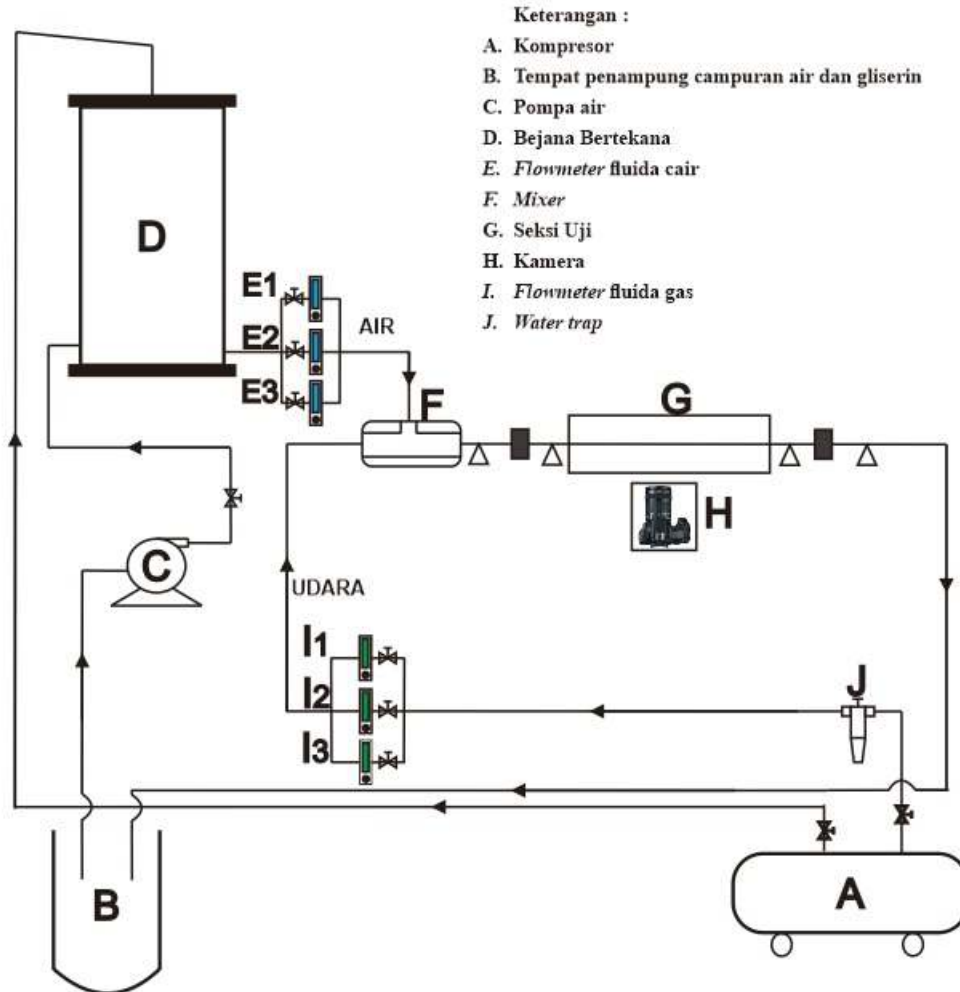
Penelitian karakteristik aliran dua fase dengan metode visual pada pipa mini horizontal untuk menentukan pola aliran telah dilakukan oleh Noverdi (2014). Penelitain ini menggunakan pipa sirkular dari kaca yang berukuran 1,6 mm dengan variasi kecepatan superfisial udara yang berkisar antara 0,13 - 63,42 m/s, sedangkan untuk kecepatan superfisial airnya berkisar antara 0,03 - 2,81 m/s. Pola aliran yang dapat teramati dalam penelitian ini ada lima, yaitu *bubbly* ($J_G = 0,08 - 0,41$ m/s dan $J_L = 0,51 - 3,03$ m/s), *plug* ($J_G = 0,06 - 3,83$ m/s dan $J_L = 0,02 - 3,03$ m/s), *churn* ($J_G = 5,37 - 46,87$ m/s dan $J_L = 0,51 - 3,03$ m/s), *slug-annular* ($J_G = 2,6 - 13,48$ m/s dan $J_L = 0,02 - 0,35$ m/s), dan *annular* ($J_G = 9,52 - 64,42$ m/s dan $J_L = 0,02 - 0,35$ m/s).

Anutup (2016) melakukan penelitian tentang visualisasi pola aliran dan pemetaan pola aliran dua fase dengan variasi campuran fluida kerja udara-*aquades*/gliserin pada saluran mini berukuran 1,6 mm secara horizontal. Dengan memvariasikan nilai viskositas cairan, fluida kerja yang digunakan yaitu udara-campuran air dan gliserin dengan konsentrasi larutan 20%, 40% dan 60%. Penelitian ini juga memvariasikan kecepatan superfisial udara dan kecepatan cair, dengan kisaran nilai $J_G = 0,066 - 66,2$ m/s dan nilai $J_L = 0,033 - 4,193$ m/s sehingga teramati lima pola aliran, yaitu *bubbly*, *slug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*. Pengaruh yang dominan terlihat akibat perubahan viskositas terlihat pada aliran *bubbly* dan *slug* serta pada garis transisi di peta pola aliran.

Pengaruh viskositas cairan pada pola aliran dua fase udara-cairan dalam saluran mini yang terpasang horizontal telah diteliti oleh Sudarja et al. (2018). Seksi uji yang digunakan dalam penelitian ini berupa pipa kaca berdiameter dalam 1,6 mm dengan nilai kecepatan

superfisial udara berkisar 0,025 - 66,3 m/s dan nilai kecepatan superfisial cairan berkisar 0,033 - 4,935 m/s. Untuk mengetahui pengaruh viskositas cairan dalam penelitian ini, digunakan udara dan campuran *aquades*-gliserin dengan presentase 0%, 20%, 40%, 60% yang dinamai dengan indeks berturut-turut sebagai berikut W, G20, G40, G60. Lima pola aliran yang berhasil diamati dari penelitian ini yaitu aliran *bubbly*, *plug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*, sedangkan untuk aliran *stratified* tidak ditemukan.

2. Metode Penelitian



Gambar 1. Skema instalasi penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. yang terdiri dari komponen utama : tempat penampung fluida cair (air dan gliserin), pompa air celup (*submersible*), kompresor udara, bejana bertekanan, seksi uji, *water trap*, *mixer*, dan konektor. Peralatan pendukung yang digunakan dalam penelitian, antara lain: *optical correction box*, kamera, komputer, *video processing system*, dan *acquisition system*. Alat ukur yang digunakan dalam penelitian, antara lain: *flowmeter* air, *flowmeter* udara, *temperature indicator*, *thermocouple*, *pressure indicator*, dan *pressure transducer*. Untuk pengambilan gambar video aliran, digunakan kamera berkecepatan tinggi merk Nikon tipe J4, dengan kecepatan 1200 fps dan resolusi 640x480 pixel. Kondisi penelitian saat pengambilan data adalah adiabatik. Eksperimen dilakukan pada nilai kecepatan superfisial udara (J_G) dengan interval 0,025 – 66,3 m/s, dan nilai kecepatan superfisial cairan (J_L) dengan interval 0,033 – 4,935 m/s.

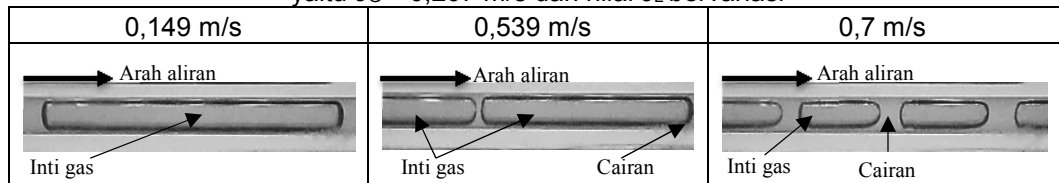
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dari penelitian aliran dua fase pada pipa mini dengan kemiringan 15° terhadap posisi horizontal dengan menggunakan fluida kerja udara-campuran air dan gliserin dengan konsentrasi yang masing-masing campuran mengandung 40%, 50%, 60%, dan 70% gliserin meliputi : pola aliran yang terbentuk, peta pola aliran dari masing-masing campuran serta perbandingan peta pola aliran dengan penelitian terdahulu.

4.1 Pola Aliran Plug

Pola aliran plug terbentuk ketika nilai kecepatan superfisial bermula pada nilai $J_G = 0,025$ m/s dan nilai $J_L = 0,033$ m/s. Pada setiap konsentrasi gliserin 40%, 50%, 60%, dan 70% kemunculan pola aliran plug muncul pada nilai J_G dan J_L yang bervariasi.

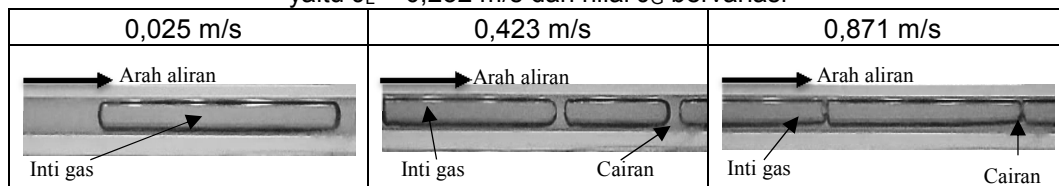
Tabel 4.1 Perbandingan pola aliran *plug* dengan konsentrasi gliserin 40%, nilai J_G tetap yaitu $J_G = 0,207$ m/s dan nilai J_L bervariasi



Ketika nilai kecepatan superfisial cairan (J_L) dinaikkan dengan nilai J_G tetap yaitu 0,207 m/s dan konsentrasi gliserin 40%, pola aliran *plug* yang dihasilkan semakin pendek dan celah pemisah antar aliran *plug* semakin renggang dan menyebabkan intensitas kemunculan *plug* menjadi semakin tinggi seperti terlihat pada Tabel 4.1. Hal ini disebabkan laju udara yang tertekan oleh laju cairan yang mengalami peningkatan, sehingga aliran *plug* yang terbentuk menjadi semakin pendek.

Ketika nilai kecepatan superfisial cairan (J_L) di naikkan mendekati garis kemunculan aliran *bubbly*, pola aliran *plug* semakin pendek dan mengalami gangguan berupa gelombang pada bagian ekor. Gelembung-gelembung kecil juga mulai terlihat di antara celah pemisah ataupun menempel di ekor aliran *plug*. Hal ini disebabkan oleh nilai *kinematic viscosity* yang kecil, sehingga pola aliran tidak mampu mempertahankan bentuknya.

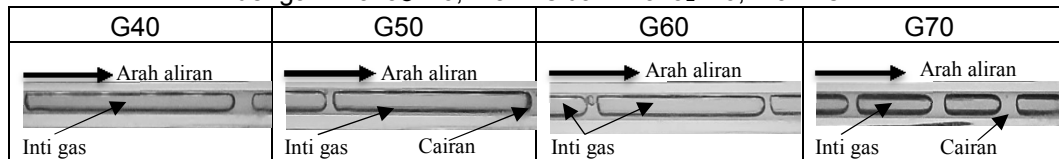
Tabel 4.2 Perbandingan pola aliran *plug* dengan konsentrasi gliserin 40%, nilai J_L tetap yaitu $J_L = 0,232$ m/s dan nilai J_G bervariasi



Pada Tabel 4.2 dengan konsentrasi gliserin 40% dan nilai J_L tetap yaitu 0,232 m/s, menunjukkan kenaikan nilai J_G membuat ukuran aliran *plug* memanjang dan celah antar aliran *plug* semakin rapat. Terlihat gangguan berupa gelombang pada bagian ekor aliran *plug*. Hal ini disebabkan fase cair yang mulai tertekan oleh intensitas laju aliran udara yang meningkat.

Ketika kecepatan superfisial udara dinaikkan mendekati nilai $J_G = 1,941$ m/s, maka aliran yang terbentuk hampir menyerupai aliran *plug* yang akan menyatu dengan aliran *plug* lainnya tanpa ada celah pemisah seperti sumbatan. Dikarenakan laju aliran udara yang lebih dominan terhadap laju aliran air, sehingga laju aliran udara tetap menyatu yang tidak terpecah oleh laju aliran air.

Tabel 4.3 Perbandingan pola aliran *plug* untuk tiap konsentrasi campuran larutan gliserin dengan nilai $J_G = 0,423$ m/s dan nilai $J_L = 0,149$ m/s

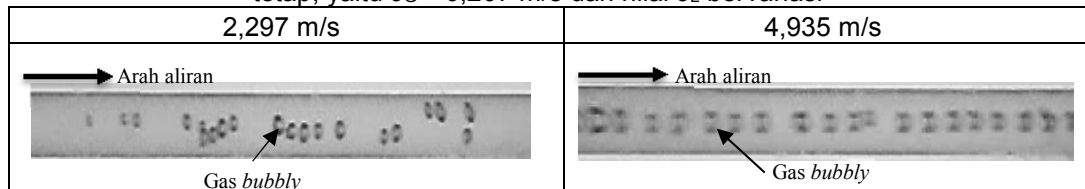


Bentuk pola aliran *plug* yang terjadi relatif sama untuk tiap variasi konsentrasi, dengan nilai J_G dan J_L tertentu. Kenaikan konsentrasi gliserin terhadap nilai J_G dan J_L yang sama, mengakibatkan pola aliran *plug* yang terbentuk semakin pendek dengan intensitas kemunculan tinggi. Seiring dengan bertambahnya nilai konsentrasi gliserin, semakin besar pula nilai viskositas kinematik dari cairan yang di uji. Hal ini menyebabkan laju aliran udara yang melaju tidak mampu mendorong laju aliran cair yang kental dan terlihat aliran *plug* menjadi terpotong-potong. Dapat dilihat pada Tabel 4.3 yang merupakan perbandingan bentuk pola aliran *plug* variasi konsentrasi gliserin 40%, 50%, 60, dan 70% dengan nilai J_G dan J_L yang sama, yaitu $J_G = 0,423$ m/s dan $J_L = 0,539$ m/s.

4.2 Pola Aliran *Bubbly*

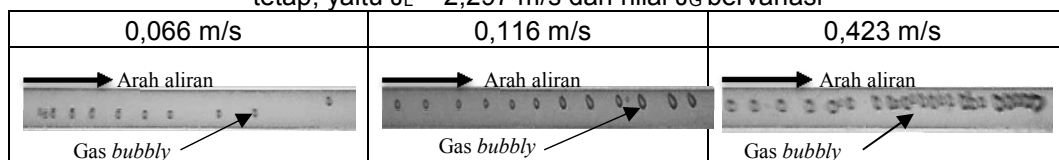
Aliran *bubbly* yang berhasil diamati dalam penelitian ini bermula pada nilai $J_G = 0,025$ m/s dan nilai $J_L = 2,297$ m/s dengan konsentrasi gliserin 70%. Sedangkan pada konsentrasi gliserin 40%, 50%, dan 60% aliran *bubbly* tidak teramati, dikarenakan intensitas laju cairan lebih dominan dibandingkan laju udara dengan bentuk gelembung yang terpotong-potong sangat kecil dengan acak.

Tabel 4.4 Perbandingan pola aliran *bubbly* dengan konsentrasi gliserin 70%, nilai J_G tetap, yaitu $J_G = 0,207$ m/s dan nilai J_L bervariasi



Perbandingan aliran *bubbly* terhadap variasi nilai J_L pada konsentrasi gliserin 70% dengan nilai J_G tetap yaitu 0,207 m/s dapat dilihat pada Tabel 4.4. Kenaikan nilai J_L menyebabkan pola aliran *bubbly* yang semula memiliki bentuk bulat dengan ukuran yang bervariasi, akan melaju lebih cepat dengan *bubbly* yang semakin bulat dengan jarak yang teratur dan ukuran yang seragam.

Tabel 4.5 Perbandingan pola aliran *bubbly* dengan konsentrasi gliserin 70%, nilai J_L tetap, yaitu $J_L = 2,297$ m/s dan nilai J_G bervariasi



Pola aliran *bubbly* yang berhasil di amati pada konsentrasi gliserin 70% dengan nilai J_L yang tetap, yaitu 2,297 m/s terhadap variasi nilai J_G seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.5. Kenaikan nilai J_G mengakibatkan intensitas kemunculan *bubbly* semakin banyak dengan jarak antar aliran yang semakin rapat. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya nilai *specific gravity* dan *kinematic viscosity* sedangkan nilai tegangan permukaan menurun.

4.3 Pola Aliran Slug-Annular

Pola aliran slug annular muncul pertama kali ketika nilai J_G berada setelah garis koordinat kemunculan aliran plug dan sebelum koordinat munculnya aliran annular pada nilai J_L yang sama, dan juga untuk nilai J_L nya berbatasan dengan aliran plug dan churn. Untuk tiap variasi konsentrasi gliserin dan kecepatan superfisial, aliran slug annular yang terbentuk relatif sama. Perbedaan kecil yang terlihat pada aliran ini adalah jumlah gelombang lapisan air yang menyelimuti aliran udara dan kecepatan aliran yang sedang melaju.

Tabel 4.6 Perbandingan pola aliran *slug annular* dengan konsentrasi gliserin 40%, nilai J_G tetap, yaitu $J_G = 3$ m/s dan nilai J_L bervariasi

0,232 m/s	0,539 m/s	0,7 m/s

Pada Tabel 4.3 dapat dilihat perbandingan pola aliran pada konsentrasi gliserin 40% dengan J_G tetap, yaitu 3 m/s dan nilai J_L bervariasi. Perbedaan bentuk pada pola aliran *slug annular* tidak begitu terlihat jelas, akan tetapi kenaikan nilai J_L berbanding lurus dengan upaya gelombang air yang semakin kuat mendorong aliran udara yang terlihat hampir terputus.

Tabel 4.7 Perbandingan pola aliran *slug annular* dengan konsentrasi gliserin 40%, nilai J_L tetap, yaitu $J_L = 0,091$ m/s dan nilai J_G bervariasi

3 m/s	7 m/s	22,6 m/s

Perbandingan kecepatan superfisial udara terlihat pada Tabel 4.7 pada konsentrasi gliserin 40% dengan nilai J_L tetap yaitu 0,091 m/s. Sama halnya seperti pengaruh variasi nilai J_L , perbedaan pola aliran yang ditemukan menggunakan variasi nilai J_L juga tidak ditemukan perbedaan yang spesifik. Akan tetapi terlihat sedikit perbedaan pada jumlah gelombang lapisan air yang lebih banyak, tetapi dengan ukuran yang lebih kecil. Aliran udara yang melaju sangat jauh lebih tinggi daripada laju aliran air akan membentuk aliran yang muncul pada rezim selanjutnya, sehingga terlihat seperti aliran udara yang melaju tanpa gangguan dari gelombang air yang mencoba untuk memutus aliran.

Tabel 4.8 Perbandingan pola aliran *slug annular* untuk tiap campuran larutan gliserin dengan nilai $J_G = 7$ m/s dan $J_L = 0,232$ m/s

G40	G50	G60	G70

Terbentuknya pola aliran *slug annular* bermula ketika nilai J_G lebih tinggi daripada nilai J_L , yaitu $J_G = 3$ m/s dan $J_L = 0,033$ m/s. Pengamatan yang dilakukan mengenai perbandingan nilai konsentrasi gliserin menunjukkan perbedaan yang tidak terlalu signifikan. Namun ada sedikit perbedaan dalam aliran *slug annular*, yaitu lapisan film pada sekeliling aliran udara yang melaju semakin menebal berbanding lurus dengan kenaikan konsentrasi gliserin. Intensitas lapisan film yang mengikuti bentuk gelombang laju aliran air

yang mencoba untuk memutus laju aliran udara semakin berkurang. Perbandingan pola aliran *slug-annular* dengan nilai J_G dan J_L yang sama dengan konsentrasi gliserin yang bervariasi dapat dilihat pada Tabel 4.8.

4.4 Pola Aliran Annular

Pola aliran *annular* muncul pertama kali ketika nilai kecepatan superfisial udara (J_G) konstan pada nilai yang sama untuk tiap variasi konsentrasi gliserin, yaitu $J_G = 50$ m/s, berbanding terbalik dengan nilai kecepatan superfisial air yang rendah (J_L) konstan pada nilai yang sama dengan aliran *slug annular*. Aliran *annular* yang terbentuk untuk tiap variasi konsentrasi gliserin relatif sama, akan tetapi kombinasi variasi kecepatan superfisial menyebabkan aliran yang melaju terkadang masih bercampur dengan pola aliran *slug annular*.

Tabel 4.9 Perbandingan pola aliran *annular* dengan konsentrasi gliserin 40%, nilai J_G tetap, yaitu $J_G = 50$ m/s dan nilai J_L bervariasi

0,149 m/s	0,232 m/s	0,539 m/s
Arah aliran Inti gas Lapisan air	Arah aliran Inti gas Lapisan air	Arah aliran Inti gas Lapisan air

Dengan nilai kecepatan superfisial udara (J_G) = 50 m/s dan nilai kecepatan superfisial air (J_L) = 0,033 m/s adalah awal mula kemunculan pola aliran *annular*. Pengaruh kenaikan kecepatan superfisial cairan (J_L) pada konsentrasi gliserin 40% dengan nilai J_G tetap yaitu 50 m/s terhadap pola aliran yang terbentuk dapat dilihat pada Tabel 4.21. Terlihat ketebalan aliran yang semakin bertambah, serta riak-riak air akan semakin terlihat lebih banyak pada kedua sisi aliran baik yang diatas maupun yang dibawah laju aliran. Dengan meningkatnya nilai J_L juga mengakibatkan riak air yang mengalir di sekeliling aliran udara akan melaju lebih cepat.

Tabel 4.22 Perbandingan pola aliran *annular* dengan konsentrasi gliserin 40%, nilai J_L tetap, yaitu $J_L = 0,091$ m/s dan nilai J_G bervariasi

50 m/s	58,05 m/s	66,3 m/s
Arah aliran Inti gas Lapisan air	Arah aliran Inti gas Lapisan air	Arah aliran Inti gas Lapisan air

Pada kondisi lain, jika kecepatan superfisial udara (J_G) yang dinaikan dengan konsentrasi gliserin 40% dan nilai J_L tetap yaitu 0,091 m/s terlihat riak-riak air pada permukaan aliran akan semakin berkurang dikarenakan aliran air semakin terdorong oleh laju aliran udara yang semakin besar. Hal ini berbanding lurus dengan kenaikan nilai J_G seperti dapat dilihat pada Tabel 4.22.

Pengaruh kenaikan kecepatan superfisial udara terjadi pada semua konsentrasi yang diujikan (50%, 60%, dan 70%). Efek yang ditimbulkan dengan kenaikan nilai J_G juga sama dengan pengujian yang dilakukan dengan konsentrasi 40% ini, yaitu berkurangnya riak air yang timbul di permukaan luar aliran.

Tabel 4.10 Perbandingan pola aliran *annular* untuk tiap campuran larutan gliserin dengan nilai $J_G = 58,05$ m/s dan $J_L = 0,232$ m/s

G40	G50	G60	G70
Arah aliran Lapisan air	Arah aliran Lapisan air	Arah aliran Lapisan air	Arah aliran Lapisan air

Pengaruh viskositas cairan yang dinaikan mengakibatkan riak-riak air akan berkurang intensitasnya dan alirannya bergerak semakin lambat jika di bandingkan dengan viskositas yang lebih rendah. Seperti pada Tabel 4.10 aliran *annular* dengan konsentrasi gliserin 40% terlihat memiliki riak-riak air yang cukup banyak mengalir acak dibagian atas dan bawah laju aliran udara yang sedang melaju. Seiring dengan kenaikan viskositas juga menyebabkan aliran menjadi lebih tenang. Kemunculan pola aliran *annular* dengan variasi konsentrasi gliserin terdapat sedikit perbedaan, yaitu pada konsentrasi gliserin 40% aliran *annular* mulai berubah bentuk pada nilai $J_L = 0,7$ m/s, sedangkan untuk konsentrasi gliserin 50%, 60%, dan 70% aliran berubah bentuk pada nilai $J_L = 2,297$ m/s.

4.5 Pola Aliran Churn

Munculnya pola aliran churn bermula ketika nilai J_G tepat jauh lebih tinggi dari nilai J_L , berbanding terbalik dengan aliran bubbly yang terjadi pada nilai J_L yang lebih tinggi dari nilai J_G . Untuk tiap variasi konsentrasi gliserin, pola aliran churn terjadi pada nilai J_G yang sama dengan nilai J_L yang bervariasi.

Tabel 4.11 Perbandingan pola aliran *churn* dengan konsentrasi gliserin 40%, nilai J_G tetap, yaitu $J_G = 7$ m/s dan nilai J_L bervariasi

0,7 m/s	0,89 m/s	2,297 m/s

Pengamatan pola aliran *churn* terhadap pengaruh variasi nilai J_L terlihat seperti pada Tabel 4.30, dengan konsentrasi gliserin 40% dan nilai J_G tetap, yaitu 7 m/s. Terlihat pengaruh kenaikan nilai J_L mengakibatkan bayangan hitam yang melaju pada pola aliran *churn* menjadi lebih tebal. Hal ini disebabkan debit aliran air yang lebih besar, sehingga aliran air yang melaju cepat dan terdispersi merata di dalam saluran dengan intensitas kemunculan yang tinggi.

Tabel 4.12 Perbandingan pola aliran *churn* dengan konsentrasi gliserin 40%, nilai J_L tetap, yaitu $J_L = 4,935$ m/s dan nilai J_G bervariasi

7 m/s	9,62 m/s	58,05 m/s

Perbandingan pola aliran dengan peningkatan nilai J_G dan nilai J_L tetap, yaitu $J_L = 4,935$ m/s menyebabkan aliran udara menjadi lebih dominan. Hal ini ditandai dengan ciri-ciri aliran yang melaju dengan cepat dan berkurangnya intensitas bayangan hitam yang muncul. Akan tetapi bentuk aliran *churn* menjadi semakin panjang seiring dengan kenaikan nilai J_G seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.31.

Tabel 4.13 Perbandingan pola aliran *churn* untuk tiap campuran larutan gliserin dengan nilai $J_G = 66,3$ m/s dan $J_L = 2,297$ m/s

G40	G50	G60	G70

Kemunculan pola aliran *churn* memiliki perbedaan dalam beberapa variasi konsentrasi gliserin. Pada konsentrasi gliserin 40%, 50%, 60% pola aliran *churn* pertama kali terjadi pada nilai yang sama, yaitu nilai $J_G = 1,941$ m/s dan nilai $J_L = 2,297$ m/s. Namun terdapat sedikit tambahan kemunculan pola aliran dengan nilai J_L yang lebih awal terjadi pada konsentrasi 40%, yaitu saat nilai $J_G = 7$ m/s dan $J_L = 0,7-0,89$ m/s dan seterusnya sebelum mencapai nilai $J_L = 2,297$ m/s. Sedangkan pada konsentrasi gliserin 70% awal mula kemunculan aliran *churn* terjadi pada nilai $J_G = 3$ m/s dan $J_L = 2,297$ m/s.

Pada pola aliran *churn* yang terbentuk, variasi nilai kecepatan superfisial tidak memiliki banyak perbedaan yang signifikan, karena hanya terlihat seperti bayangan hitam dari cairan yang terdistorsi di antara aliran inti gas yang melaju secara berkelanjutan. Dapat dilihat pada Tabel 4.38 merupakan perbandingan pola aliran *churn* dengan variasi konsentrasi gliserin 40%, 50%, 60, dan 70% dengan nilai J_G dan J_L yang sama, yaitu $J_G = 66,3$ m/s dan $J_L = 2,297$ m/s. Dari hasil pengamatan yang didapat terlihat bahwa semakin meningkatnya konsentrasi larutan maka semakin lambat kecepatannya dan berkurang bayangan hitam pada aliran. Tingginya nilai viskositas pada campuran konsentrasi gliserin 70%, mengakibatkan bilangan *Reynolds* yang semakin rendah dan kemudian menyebabkan cairan yang melaju seperti bayangan hitam semakin berkurang.

4.6 Peta Pola Aliran

Pengamatan dan identifikasi yang telah dilakukan terhadap pola aliran yang terbentuk selanjutnya dipetakan dalam peta pola aliran. Penelitian ini mendapatkan jumlah 144 data pola aliran untuk tiap konsentrasi gliserin (40%, 50%, 60%, 70%) dengan variasi nilai J_G : 0 m/s hingga 66,3 m/s dan J_L : 0,033 m/s hingga 4,935 m/s. Untuk memetakan pola aliran yang telah diamati, nilai kecepatan superfisial udara (J_G) diplot sebagai sumbu-x dan kecepatan superfisial air (J_L) diplot sebagai sumbu-y. Nilai minimum sumbu-x yaitu 0,01 dan nilai maksimumnya 100, sedangkan untuk nilai minimum sumbu-y yaitu 0,01 serta nilai maksimumnya 10. Skala logaritmik digunakan dalam proses pemetaan pola aliran ini. Garis transisi dan analisis mengenai garis transisi yang terjadi dapat ditentukan dengan peta pola aliran berikut. Garis transisi digambarkan dalam peta pola aliran untuk menunjukkan pada kondisi manakah aliran berubah dari satu pola aliran tertentu menjadi pola aliran lainnya.

5 Kesimpulan

1. Penelitian pola aliran dua fase pada pipa mini berukuran 1,6 mm yang dipasang dengan kemiringan 15° terhadap posisi horizontal dengan variasi viskositas cairan dan rentang nilai $J_G = 0$ m/s – 66,3 m/s ; $J_L = 0,033$ m/s – 4,935 m/s menghasilkan 5 pola aliran, yaitu : *plug*, *bubbly*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*.
 - a) Pola aliran *plug* terjadi akibat nilai J_G lebih rendah dari nilai J_L , yang teramati pada nilai J_G dan J_L yang rendah. Pada konsentrasi 40%, 50%, 60%, 70% pola aliran *plug* bermula dari nilai $J_G = 0,025$ m/s hingga nilai $J_G = 1,941$ m/s.
 - b) Kenaikan nilai J_L mengakibatkan pola aliran *bubbly* muncul setelah aliran *plug*. Pola aliran *bubbly* hanya teramati pada konsentrasi 70% dengan nilai $J_G = 0,025$ m/s - 1,941 m/s dan nilai $J_L = 2,297$ m/s - 4,935 m/s.
 - c) Ketika nilai J_G dinaikkan menjadi 3 m/s membuat aliran yang semulanya *plug* berubah bentuk menjadi *slug-annular*, hal ini diakibatkan oleh nilai J_G yang jauh lebih tinggi dibandingkan nilai J_L sehingga aliran udara dapat menerobos celah larutan dan melaju secara berkelanjutan dengan gelombang larutan yang berada dibawah aliran udara. Seiring dengan kenaikan nilai J_G pada nilai J_L yang sama, gelombang larutan yang sebelumnya terlihat melaju bersama dibawah aliran udara akan berkurang dan menyebar di sekitar aliran inti udara sehingga muncul pola aliran *annular*. Untuk kemunculan pola aliran *annular* pada tiap variasi konsentrasi 40%, 50%, 60%, dan 70% bermula pada nilai J_G yang sama yaitu $J_G = 50$ m/s – 66,3 m/s.
 - d) Pola aliran *churn* terbentuk ketika nilai J_L berada jauh lebih tinggi daripada nilai J_G yang sama dengan pola aliran *slug-annular* dan *annular*. Aliran yang teramati

menjadi sulit, dikarenakan aliran udara melaju dengan kecepatan tinggi dan membuat larutan terpecah menjadi sangat kecil yang terlihat seperti bayangan hitam.

2. Pengaruh variasi viskositas larutan terhadap bentuk pola aliran terlihat jelas mengalami perubahan pada aliran *plug*. Pada pola aliran *plug*, pengaruh kenaikan nilai viskositas mengakibatkan panjang aliran *plug* yang terbentuk akan semakin pendek dengan jarak antar aliran yang semakin berhimpit. Sedangkan untuk pola aliran *bubbly*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn* yang telah diamati tidak mengalami perubahan bentuk yang signifikan.
3. Hasil perbandingan peta pola aliran penelitian ini dengan hasil penelitian Chung & Kawaji (2004) menunjukkan pergeseran pada transisi *plug-bubbly* yang berada lebih tinggi, sedangkan pada transisi *plug*, *slug-annular* dan *annular* menunjukkan penelitian ini lebih tegak terhadap posisi vertikal dengan sedikit pergeseran untuk tiap variasinya. Hal ini disebabkan penggunaan fluida kerja yang berupa gas nitrogen dan air dengan pipa berdiameter 530 μm . Pada penelitian Sudarja, dkk (2018) menggunakan diameter pipa dan fluida kerja yang sama dengan penelitian ini. Namun pengaruh nilai viskositas cairan pada fluida kerja menyebabkan garis transisi bergeser dengan posisi yang sejajar dengan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Anutup, D. (2016). Studi Visualisasi Pola Aliran Dan Peta Pola Aliran Dua Fase Udara-Aquades/Gliserin Pada Saluran Mini Horizontal Berukuran 1,6 mm.
- Chung, P. M.-Y., & M. Kawaji. (2004). The Effect of Channel Diameter on Adiabatic Two-Phase Flow Characteristics in Microchannels.
- Coleman, J. W., & Garimella, S. (1999). Characterization of Two Phase Flow Patterns in Small Diameter Round and Rectangular Tubes.
- Fukano, T., & Kariyasaki, A. (1993). Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Capillary Tube.
- Noverdi, R. (2014). Studi Visualisasi Pola Aliran Dua Fase Air-Udara pada Pipa Mini Horizontal.
- Roizantho, E. (2018). Investigasi Pola Aliran Dua Fase Udara-Akuades dan Gliserin (40%, 50%, 60%, 70 %) pada Pipa Kapiler dengan Kemiringan 5° Terhadap Posisi Horizontal.
- Saisorn, S., & Wongwises, S. (2010). The Effects of Channel Diameter on Flow Pattern , Void Fraction and Pressure Drop of Two-Phase Air – Water Flow in Circular Micro-Channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*.
- Sudarja, Jayadi, F., Indarto, Deendarlianto, & Widyaparaga, A. (2018). The Effect of Liquid Viscosity on The Gas-Liquid Two-Phase Flow Pattern in Horizontal Mini-Channel .
- Sur, A., & Liu, D. (2012). Adiabatic Air-Water Two-Phase flow in Circular Microchannels.
- 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.
- Yang, C., & Shieh, C. (2001). Flow Pattern of Air - Water and Two-Phase R-134a in Small Circular Tubes.
- Zhao, T. S., & Bi, Q. C. (2001). Co-Current Air-Water Two-Phase Flow Patterns in Vertical Triangular Microchannels.