

BAB II

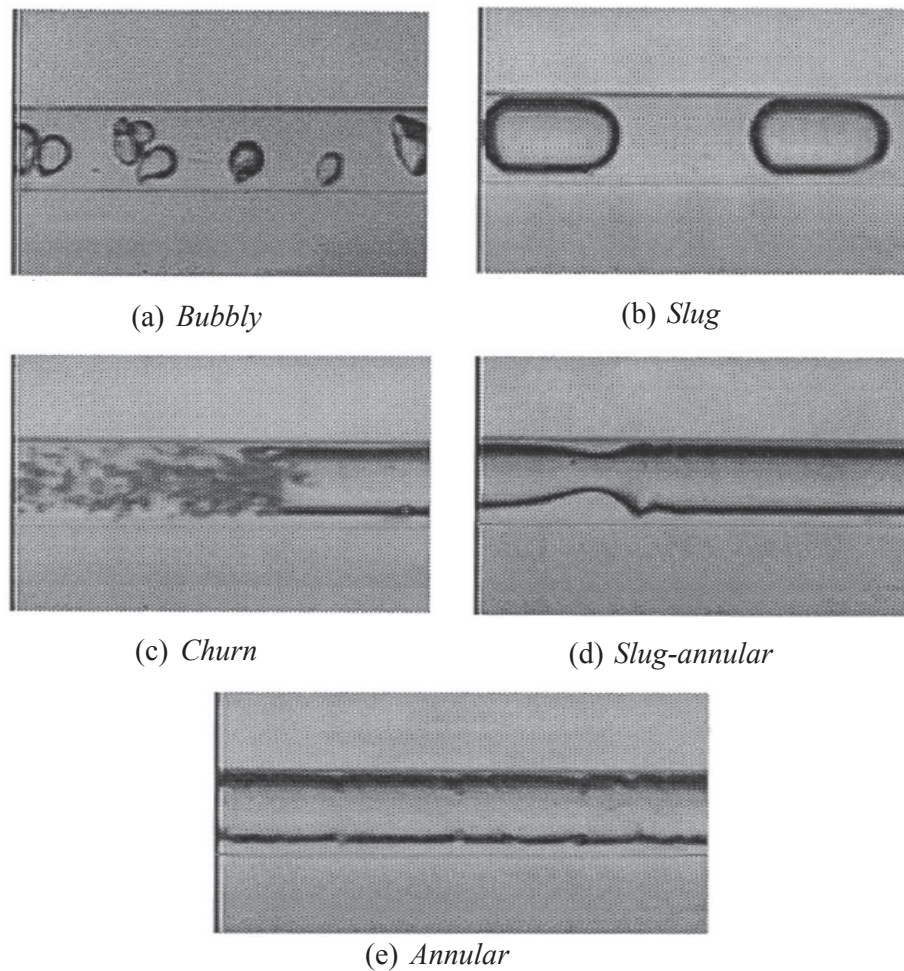
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

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, dan 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.

Penelitian yang dilakukan oleh Triplett et al. (1999) mengenai aliran dua fase pada pipa sirkular mini dengan ukuran diameter 1,1 mm dan 1,45 mm, menggunakan air dan udara sebagai media fluida kerja. Variasi kecepatan superfisial udara (J_G) yang digunakan nilainya berkisar 0,02 m/s hingga 80 m/s dan untuk kecepatan superfisial cairan (J_L) berkisar dari nilai 0,02 m/s hingga 8 m/s. Pola aliran yang berhasil diamati pada penelitian ini adalah *bubbly*, *slug*, *slug-annular*, *annular*, *churn*.

Hasilnya menunjukkan bahwa gravitasi yang muncul tidak mempengaruhi karakteristik aliran pada pipa berukuran mini, dikarenakan tegangan yang dihasilkan oleh permukaan lebih dominan. Sehingga pola aliran *stratified* tidak ditemukan dalam penelitian ini. Berikut kelima pola aliran yang berhasil diamati pada penelitian ini seperti pada Gambar 2.1.

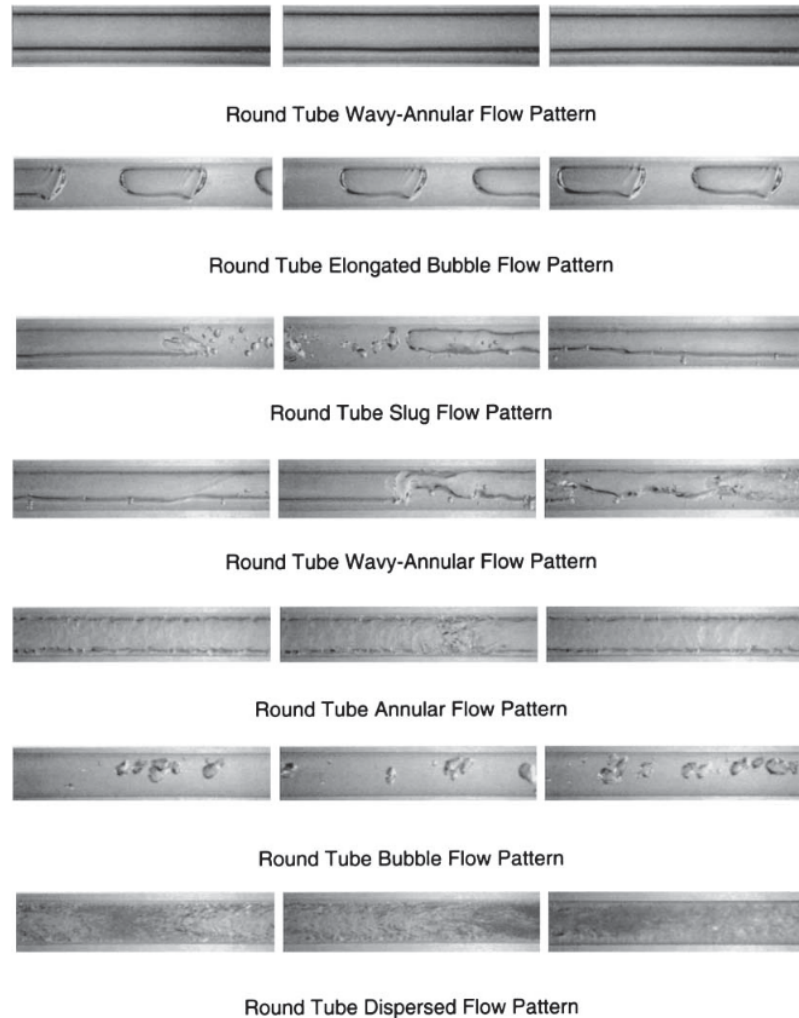


Gambar 2.1 Pola aliran pada pipa mini berdiameter 1,45 mm

Triplett et al. (1999)

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 superfisial udara berkisar dari 0,1-100 m/s dan untuk kecepatan superfisial cairan berkisar dari 0.01-10.0 m/s. Dari hasil visualisasi penelitian ini didapat empat pola aliran utama yang teridentifikasi yaitu aliran *stratified*, *intermittent*, *annular* dan *dispersed flow*.

Dari pola aliran utama yang telah teridentifikasi masih terbagi menjadi beberapa pola aliran lainnya. Pola aliran *stratified* terbagi menjadi pola aliran *stratified* dan *wavy*. Pola aliran *intermittent* terbagi menjadi pola aliran *elongated bubble* dan *slug*. Dan pola aliran *dispersed* terbagi menjadi pola aliran *bubble* dan *dispersed*. Contoh dari pola aliran teramati pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pola aliran dalam pipa sirkular berdiameter 5 mm pada frame yang berturut-turut $t = 0.0$ s, $t = 0.033$ s, dan $t = 0.066$ s
Coleman & Garimella (1999)

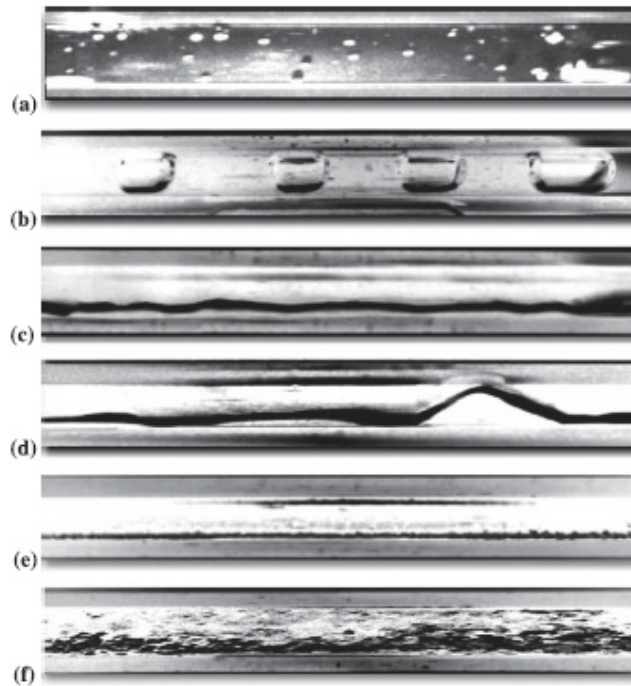
Kesimpulan dari penelitian yang dilakukan ini adalah transisi pola aliran terjadi saat kombinasi kecepatan superfisial udara dan kecepatan superfisial air divariasikan pada nilai tertentu. Diameter pada pipa dan efek dari tegangan

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 1 mm, 2 mm dan 3 mm dan panjang pipa yang berturut-turut yaitu 200 mm, 400 mm, dan 600 mm. Dengan pasangan kecepatan superfisial yang bervariasi, pada pipa berdiameter 1 mm nilai kecepatan superfisial udara (U_{GS}) berkisar 0,21 – 75 m/s dan nilai kecepatan superfisial cair (U_{LS}) berkisar 0,014 - 1,34 m/s. Pada pipa berukuran 2 mm dan 3 mm menggunakan nilai kecepatan superfisial cair yang sama yaitu berkisar 0,066 – 2,1 m/s, sedangkan untuk nilai kecepatan superfisial udara (U_{GS}) pada diameter 2 mm berkisar 0,15 – 86.0 m/s dan pada diameter 3 mm nilainya 0,016 – 91,5 m/s. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan pola aliran yang sesuai untuk aliran *refrigerant R-134a* pada pipa mini. Pola aliran yang teramati dalam penelitian ini adalah *bubbly*, *slug*, *plug*, *wavy*, *stratified*, dan *dispersed annular*. Visualisasi pola aliran yang teramati dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Batas transisi dari masing-masing pola aliran pada aliran udara-air tidak dapat dibedakan dengan jelas, khususnya transisi antara pola aliran *slug* dan *annular*. Pola aliran dapat berubah dari slug ke annular dengan sedikit meningkatkan kualitas uap dan sehingga kecepatan uap, berbeda dengan transisi untuk aliran *refrigeran R-134a* sangat tajam dan jelas.

Dari hasil penelitian yang dilakukan dalam tabung kecil ini, 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.



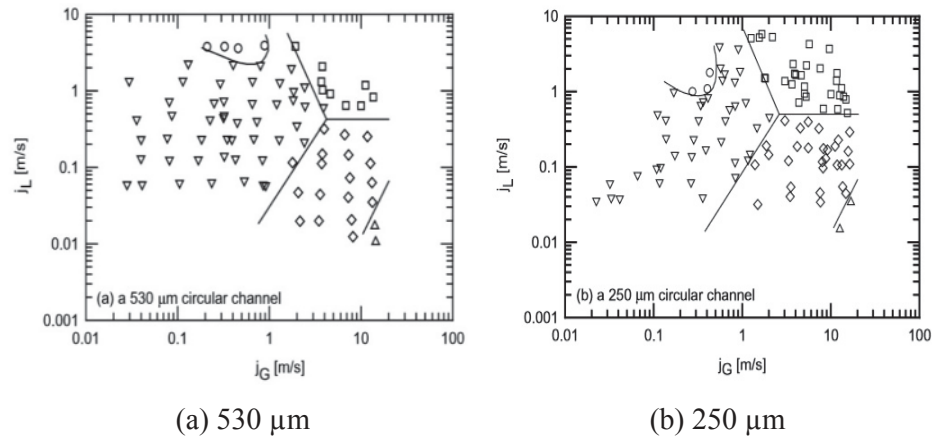
Gambar 2.3 Hasil fotografi pola aliran air-udara pada pipa berukuran 3 mm;
 (a) *bubble flow*, (b) *plug flow*, (c) *wavy flow*, (d) *slug flow*,
 (e) *annular flow*, (f) *dispersed flow*

Yang & Shieh (2001)

Pengaruh diameter pada karakteristik aliran dua fase adiabatik untuk mengidentifikasi fenomena pada saluran *microchannels* dari *minichannels* telah diteliti oleh Chung & M. Kawaji (2004). Dalam penelitiannya, pipa yang terpasang horizontal dengan diameter 530, 250, 100, dan 50 μm dan fluida kerja yang digunakan berupa gas nitrogen dan air. Kecepatan superfisial fluida cair yang digunakan berkisar 0,01 m/s – 5,77 m/s, sedangkan kecepatan superfisial udara berkisar 0,02 m/s – 72,98 m/s.

Dalam penelitian ini dilakukan visualisasi dengan fotografi terhadap pola aliran yang terbentuk. Dari hasil visual yang diperoleh dari penelitian ini, variasi diameter dalam dengan ukuran 530 dan 250 μm memiliki karakteristik berbeda dengan pipa yang berukuran 100 dan 50 μm . Pada pipa berdiameter dalam 530 μm dan 250 μm , karakteristik pola aliran yang teramati yaitu *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-*

annular dan *annular*. Sedangkan pada pipa berukuran diameter dalam 100 dan 50 μm pola yang teramati hanya pola aliran *slug*.

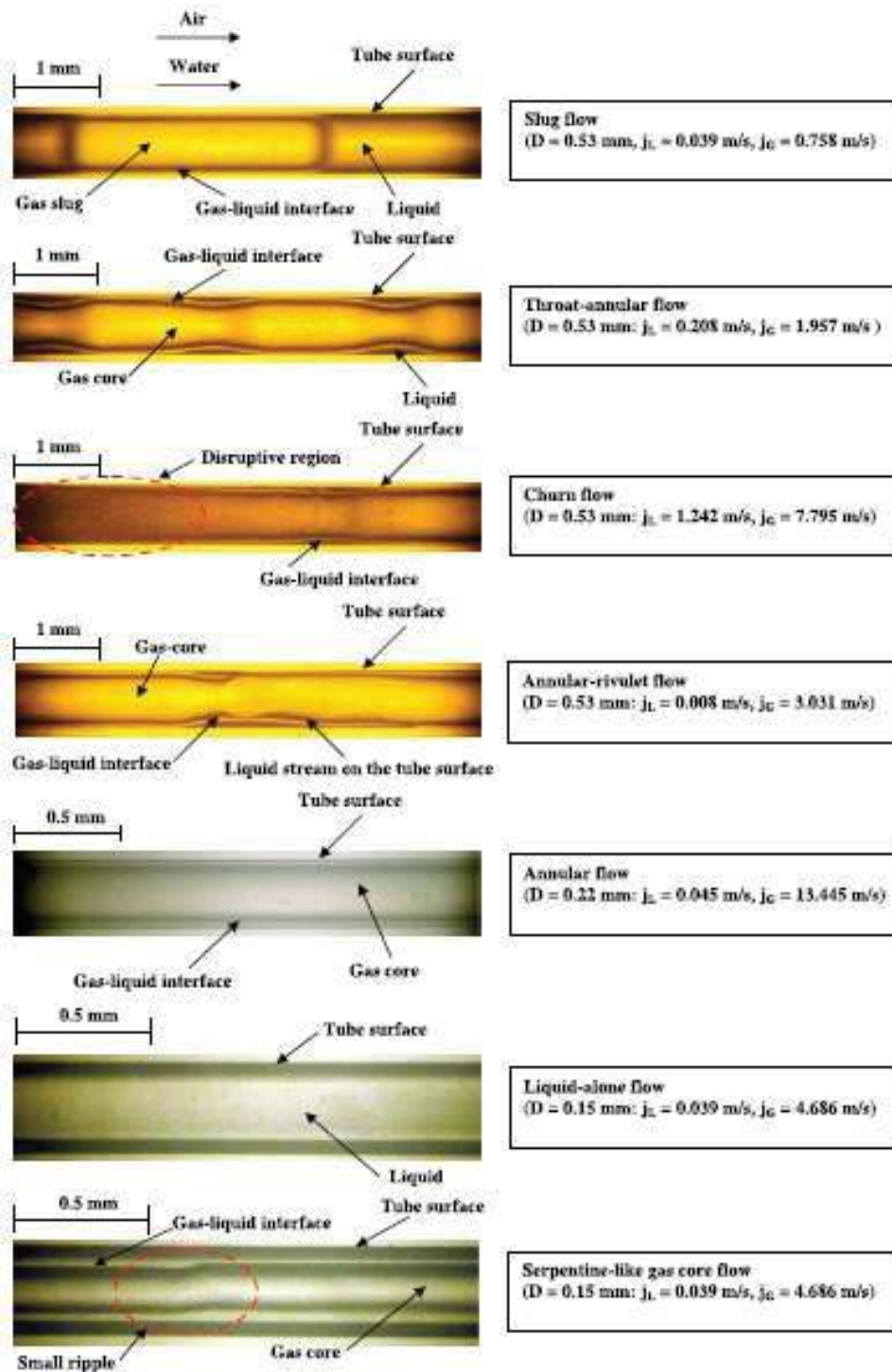


Gambar 2.4 Peta pola aliran Chung & M. Kawaji (2004)

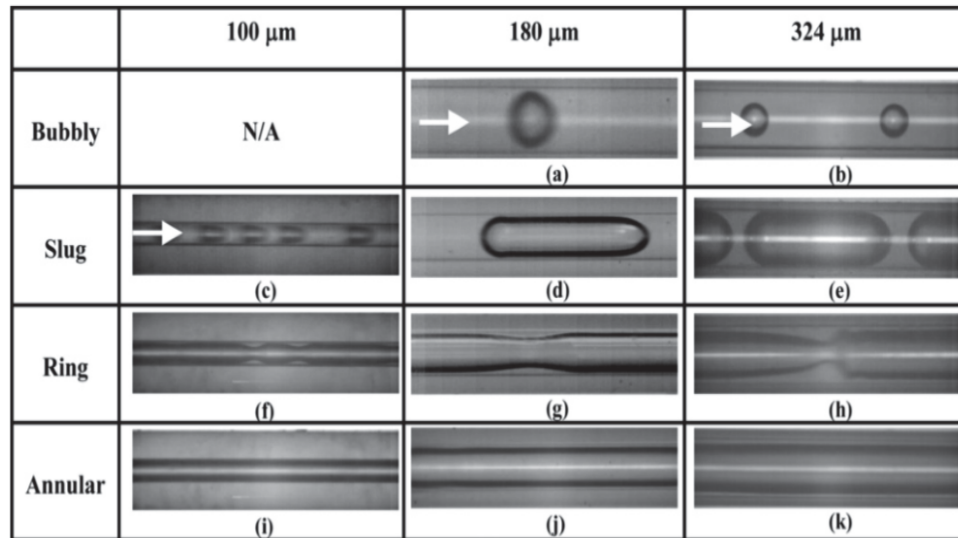
Hal ini dapat disimpulkan bahwa variasi ukuran diameter dan viskositas cairan menyebabkan kekuatan tegangan permukaan yang berbeda pada tiap variasinya, sehingga memberikan pengaruh pada karakteristik aliran dua fase. Peta pola aliran yang terbentuk dalam penelitian Chung & M. Kawaji (2004) dapat dilihat pada Gambar 2.4.

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 untuk tiap variasi diameter *channel* akan berbeda beda seperti yang teramati pada Gambar 2.5. Pada diameter 0.53 mm, 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 termati yaitu *liquid-alone*, *throat-annular*, *serpentine-like gas core*, dan *annular*.



Gambar 2.5 Visual pola aliran teramati dengan fotografi
Saisorn & Wongwises (2010)

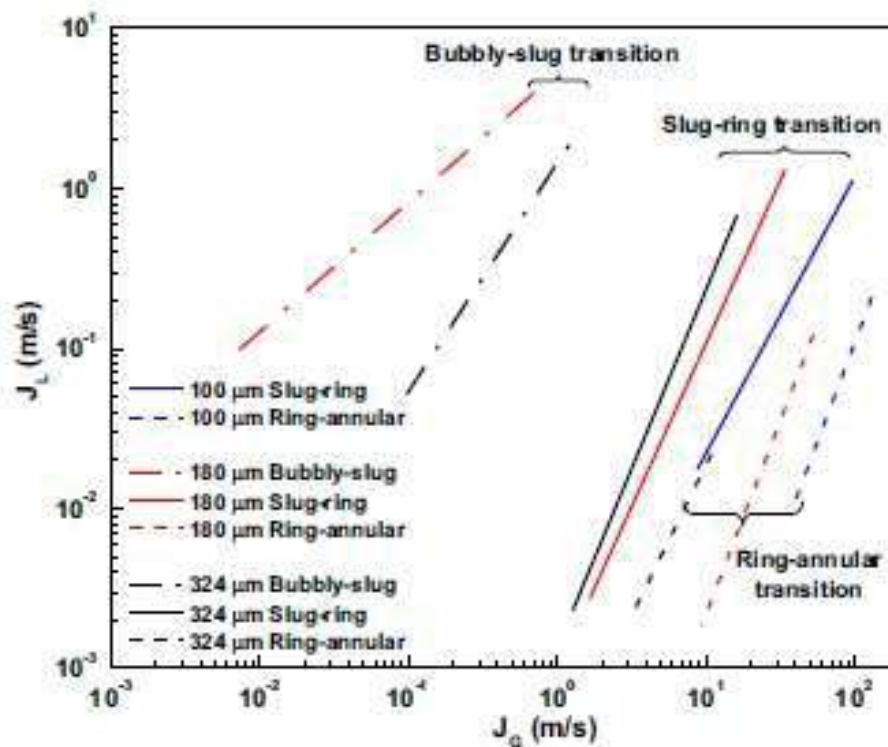


Gambar 2.6 Pola aliran pada pipa mikro

Sur & Liu (2012)

Sur & Liu (2012) melakukan penelitian tentang aliran dua fase menggunakan media air-udara pada saluran sirkular yang terpasang secara horizontal dengan diameter dalam 100, 180, dan 324 μm . Empat aliran teridentifikasi dalam penelitian ini, yaitu aliran *bubbly*, *slug*, *liquid-ring*, dan *annular*, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. 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 udara yang melaju di tengah saluran dan dikelilingi lapisan film dengan cincin seperti leher disekitar aliran. Aliran *annular* merupakan aliran udara secara berkelanjutan pada pusat saluran, membentuk inti gas yang dikelilingi lapisan air yang lebih stabil dan halus, biasanya terjadi pada saat kecepatan superfisial udara melaju dengan kecepatan tinggi.

Untuk memeriksa pengaruh dari ukuran *microchannel* pada batas transisi pola aliran dua fase, batas-batas transisi ditampilkan dalam Gambar 2.7 untuk semua tiga ukuran *microchannels*. Garis transisi untuk *channel* yang sama diidentifikasi oleh warna, dan garis transisi untuk transisi pola aliran yang sama dapat dibedakan oleh jenis garis.

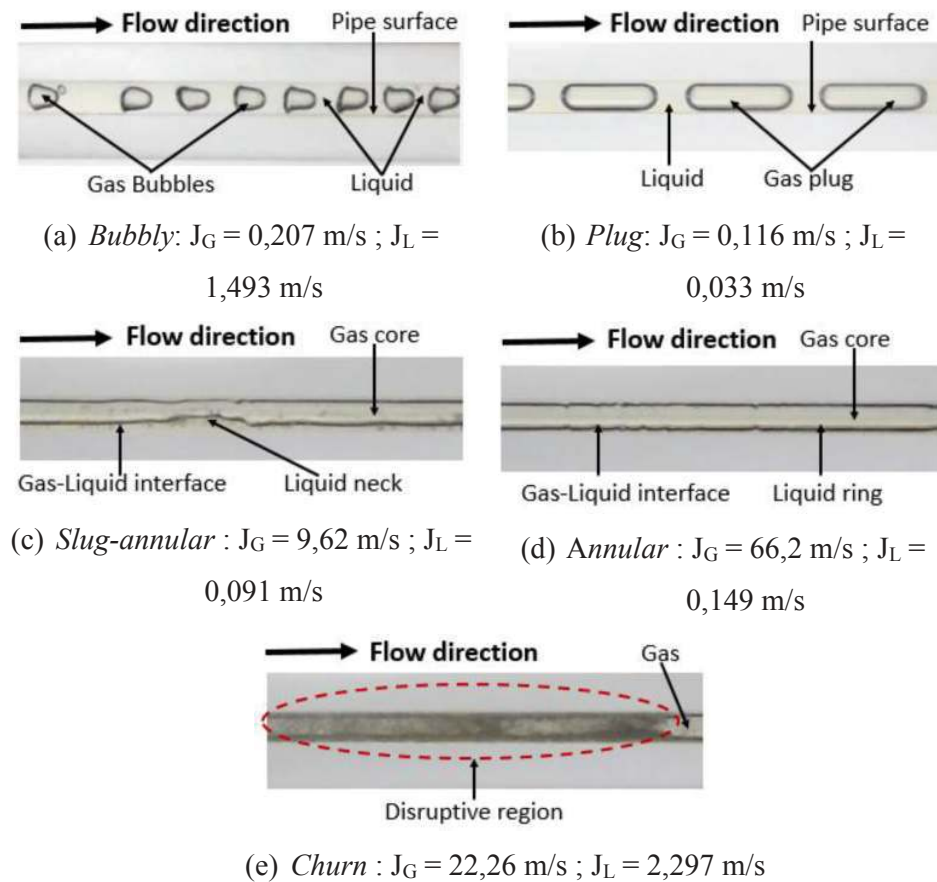


Gambar 2.7 Pengaruh ukuran pipa terhadap garis transisi pada peta pola aliran
Sur & Liu (2012)

Penelitian karakteristik aliran dua fase dengan metode visual pada pipa mini horizontal untuk menentukan pola aliran telah dilakukan oleh Noverdi (2014). Penelitian ini bertujuan mengkaji lebih lanjut mengenai karakteristik dasar aliran dua fase udara-air yang meliputi pola aliran (*flow pattern* atau *flow regime*) dan peta pola aliran (*flow pattern map*). Pada penelitian ini pipa yang digunakan adalah 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), *slug* ($J_G = 0,06 - 3,83$ 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. Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui karakteristik aliran dua fase dari pola aliran dan peta aliran yang terbentuk dan pengaruhnya terhadap perubahan nilai viskositas dan tegangan permukaan. Untuk meningkatkan nilai viskositas, fluida kerja 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 $J_G = J_G = 0,066 - 66,2$ 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. Data pola aliran yang diperoleh dengan menganalisis gambar video yang ditangkap menggunakan kamera berkecepatan tinggi. Lima pola aliran yang berhasil diperoleh dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.8, yaitu terdapat aliran *bubbly*, *plug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*, sedangkan untuk aliran *stratified* tidak ditemukan.



Gambar 2.8 Pola aliran yang terbentuk pada konsentrasi 40% gliserin:
Sudarja et al. (2018)

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Fase

Fase adalah suatu bagian zat yang dapat berwujud cair (*liquid*), padat (*solid*), dan udara (*gas*) atau sistem yang ditentukan oleh batas dan mempunyai jenis dan struktur fisik yang sama. Perubahan jenis fase biasanya dikarenakan adanya energi yang masuk atau yang dilepaskan, perubahan jenis fase biasanya dari fase cair berubah ke fase padat atau menjadi fase gas atau sebaliknya. Fase terdapat dalam beberapa bagian dalam aliran, yaitu aliran satu fase (*single phase*) dan multi fase (*multiphase*).

2.2.2. Aliran Dua Fase

Aliran dua fase merupakan bentuk yang paling sederhana dari aliran multi fase yang sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari maupun pada proses-proses industri. Aliran dua fase yaitu aliran yang terdiri dari dua fase yang berbeda yang dialirkan secara bersamaan di suatu tempat atau pipa, sehingga aliran fase yang mengalir dalam aliran dua fase dapat berupa cair-padat, cair-gas, dan gas-padat.

Aliran dua fase di dapat digolongkan menjadi beberapa jenis, yaitu orientasi aliran, arah aliran, dan ukuran saluran. Berdasarkan orientasinya, aliran dua fase digolongkan menjadi aliran dengan posisi vertikal, horizontal, atau dengan kemiringan sudut tertentu. Berdasarkan arah alirannya dapat terbagi menjadi aliran searah ke atas, searah ke bawah, berlawanan arah, mendatar sejajar, atau mendatar berlawanan arah. Jika berdasarkan ukuran salurannya, ukuran terbagi menjadi ukuran normal, mini, dan mikro. Berikut penggolongan ukuran saluran menurut Kandlikar & Grande (2002):

1. <i>Conventional channels</i>	$D > 3 \text{ mm}$
2. <i>Minichannels</i>	$3 \text{ mm} > D > 200 \text{ }\mu\text{m}$
3. <i>Microchannels</i>	$200 \text{ }\mu\text{m} > D > 10 \text{ }\mu\text{m}$
4. <i>Transisional channels</i>	$10 \text{ }\mu\text{m} > D > 0,1 \text{ }\mu\text{m}$
5. <i>Molecular nanochannels</i>	$0,1 \text{ }\mu\text{m} > D$

2.2.3. Viskositas

Viskositas atau kekentalan adalah sifat cairan atau ukuran kekentalan suatu fluida yang menunjukkan hubungan erat dengan hambatan fluida dalam suatu aliran fluida yang mengalir. Semakin tinggi nilai viskositas, akan semakin besar pula gesekan antar lapisan fluida yang menyebabkan kecepatan laju aliran fluida akan semakin lambat. Sebaliknya jika nilai viskositas rendah, gesekan antar lapisan internal fluida menjadi kecil, maka kecepatan aliran fluida cair akan lebih cepat mengalir.

2.2.4. Gliserin

Gliserin adalah senyawa gliserida yang paling sederhana. Senyawa ini larut dalam air dan alkohol dan merupakan produk sampingan dari proses pembuatan sabun. Gliserin merupakan cairan kental yang tidak berwarna dan tidak berbau sehingga cocok untuk dipadukan dengan air. Larutan gliserin-air tersebut memiliki keuntungan yang memungkinkan viskositas cairan dapat divariasikan dan dapat menjaga tegangan permukaan hampir konstan, Fakhriadi (2018).

2.2.5. Bilangan Reynolds (Re)

Bilangan Reynolds adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskositas, yang ditulis pada persamaan 2.1 dibawah ini :

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (2.1)$$

Dimana

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

v = kecepatan rata-rata (m/s)

L = dimensi linier karakteristik (diameter) (m)

μ = viskositas dinamik (N.s/m^2)

ν = viskositas kinematic (m/s)

Pada aliran satu fase, bilangan Reynolds digunakan untuk mengetahui apakah aliran laminar atau turbulen. Selain itu juga dapat digunakan untuk mendapatkan keserupaan dinamik pada analisis dimensional.

2.2.5. Kecepatan Superfisial (*Superficial Velocity*)

Dalam analisis aliran dua fase cairan-gas, terdapat tiga macam kecepatan superfisial, yaitu kecepatan superfisial gas (dilambangkan J_G), kecepatan superfisial cairan (dilambangkan J_L), dan kecepatan superfisial total (dilambangkan J_T). Kecepatan superfisial merupakan perbandingan antara debit aliran (Q) dengan luas penampang (A).

1. Kecepatan *superficial gas* (J_G)

$$J_G = \frac{Q_G}{A} \quad (2.2)$$

2. Kecepatan *superficial liquid* (J_L)

$$J_L = \frac{Q_L}{A} \quad (2.3)$$

Nilai kecepatan superfisial total merupakan penjumlahan antara kecepatan superfisial gas dan kecepatan superfisial cairan, ditulis pada persamaan 2.4 dibawah ini :

$$J_T = J_G + J_L \quad (2.4)$$

Dimana:

J_G = Kecepatan *superficial gas* (m/s)

J_L = Kecepatan *superficial liquid* (m/s)

J_T = Kecepatan *superficial* total (m/s)

Q_G = Laju aliran gas dalam pipa (m³/s)

Q_L = Laju aliran *liquid* dalam pipa (m³/s)

A = Luas penampang pipa (m²)

2.2.6. Metode Visualisasi

Pengamatan pola aliran pada kondisi tertentu serta perubahan yang terjadi dalam penelitian ini merupakan tujuan dari metode visualisasi. Metode visualisasi ini dapat dilakukan secara manual ataupun dengan alat bantu berupa kamera video berkecepatan tinggi. Metode visualiasi secara manual telah dilakukan pada awal perkembangan aliran dua fase, dikarenakan keterbatasan teknologi visual yang ada, pengamatan atau visualiasi menggunakan indra penglihatan dengan mata telanjang. Sedangkan metode visualiasi dengan alat bantu berupa kamera video berkecepatan tinggi lebih banyak digunakan pada zaman modern ini, karena kemajuan teknologi sudah berkembang sehingga hasil yang didapat lebih maksimal.

Seiring berkembangnya penelitian tentang aliran dua fase pada zaman kemajuan teknologi ini, maka metode visualisasi dengan alat bantu kamera menjadikan penelitian aliran dua fase pada pipa berukuran kecil (*mini & micro*) menjadi lebih mudah dan dapat teramati dengan jelas. Penelitian pada saluran berukuran 0,15 mm telah dilakukan oleh Saisorn & Wongwises (2008), dengan penambahan alat berupa *stereozoom microscope* yang dipasang pada kamera

berkecepatan tinggi untuk mendapatkan pola aliran. Parameter yang digunakan untuk menangkap gambar dengan kamera berkecepatan tinggi yaitu *shutter speed* (durasi cahaya masuk ke dalam kamera) dan *frame rate* (jumlah gambar yang diambil per detik).

Pengamatan yang dilakukan dengan kamera berkecepatan tinggi menjadi lebih mudah, dikarenakan terdapat mode *slow motion* (gerak lambat) untuk menganalisa aliran yang bergerak dengan cepat dan dapat menunjukkan perubahan aliran pada selang waktu dan parameter kecepatan tertentu. Faktor pencahayaan pada seksi uji menjadi faktor penting dalam proses pengambilan data, sehingga diperlukan sistem pencahayaan yang tepat agar mendapatkan hasil visualisasi dengan kualitas gambar yang baik.

2.2.7. Pola Aliran Dua Fase dalam Pipa

Pola aliran (*flow regime*) merupakan konfigurasi geometrik dari kombinasi aliran dua wujud fase. Pola aliran dalam aliran dua fase menjadi hal penting, karena karakteristik perilaku suatu aliran fluida dapat ditentukan dengan pola aliran. Perilaku campuran dua fase antara cair-gas saling berkaitan satu sama lain yang diperlukan untuk penyelesaian model analisa atau korelasi yang digunakan dalam persamaan konservasi dua fase, Pramono (2018).

Penelitian tentang pola aliran dalam aliran dua fase, lingkup pembahasannya masih sangat luas. Banyak ilmu yang masih dapat dikaji untuk menjelaskan fenomena pola aliran dua fase yang beragam dan bervariasi, adapun proses yang terjadi di dalam pipa, posisi pipa, atau dari sisi geometrinya. Hal itu dilakukan untuk mengetahui perubahan karakteristik pola aliran yang terjadi pada kondisi dan parameter tertentu.

Ada beberapa parameter tertentu di dalam aliran dua fase yang dapat mempengaruhi terbentuknya pola aliran, yaitu sifat fluida (massa jenis, viskositas, dan tegangan permukaan), fluks volum aliran (kecepatan superfisial udara dan kecepatan superfisial cairan), gaya inersia, gaya gravitasi, dan diameter pada pipa. Pola aliran dua fase cair-gas juga dipengaruhi oleh orientasi saluran pipa.

Berikut ini merupakan gambaran umum dari Rouhani & Sohal (1983) mengenai pola aliran dua fase yang terbagi menjadi dua jenis orientasi pipa, yaitu saluran pipa vertikal dan saluran pipa horizontal :

1. Pipa Vertikal

Bentuk pola aliran pada pipa vertikal dapat dilihat pada Gambar 2.9 dan jenis pola aliran yang teramati adalah sebagai berikut :

a. Aliran gelembung (*bubbly flow*)

Pola aliran dimana fase udara yang mengalir dalam bentuk gelembung-gelembung kecil sedangkan fase cair mengalir secara kontinu. Pola ini terbentuk ketika udara ataupun uap yang relatif kecil melaju bersamaan dengan laju aliran cairan yang sedang.

b. Aliran kantung (*Taylor slug flow*)

Pola aliran tipe ini memiliki fase udara berbentuk gelembung yang memanjang seperti peluru atau kantung yang diikuti gelembung-gelembung kecil pada ekor alirannya. Peningkatan laju aliran udara yang lebih besar daripada laju aliran air akan menyebabkan munculnya aliran *plug*, atau yang sering disebut oleh beberapa peneliti disebut *Taylor slug flow*.

c. Aliran kantung (*slug flow*)

Pada pola aliran ini, fase udara yang terbentuk seperti peluru atau kantung lebih panjang dari aliran *Taylor slug flow* dan aliran gelembung-gelembung kecil pada ekor mulai hilang. Aliran kantung ini menempati hampir seluruh penampang saluran pipa atau mendekati diameter dalam saluran, dengan panjang melebihi diameter dalam saluran pipa. Adapun jarak celah antar aliran pun juga semakin menyempit.

d. Aliran acak (*churn turbulent flow*)

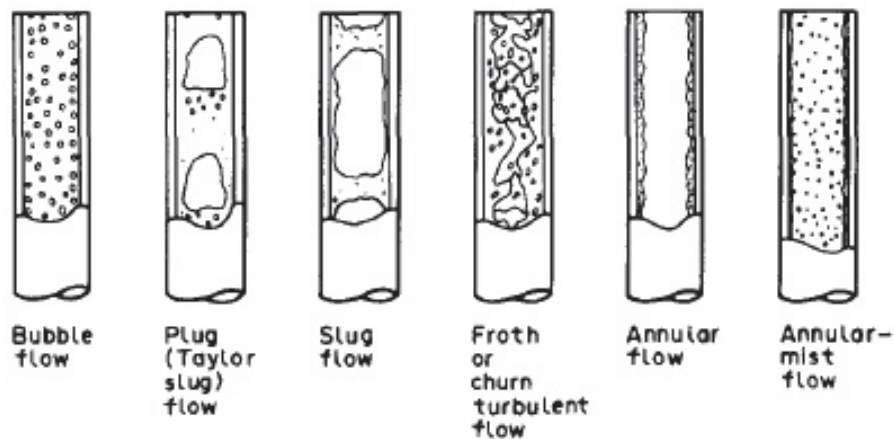
Peningkatan laju aliran udara dan laju aliran cairan yang tinggi, mengakibatkan bentuk aliran dua fasenya menjadi tidak stabil dan berbuih, atau sering disebut aliran secara acak atau sering disebut *churn turbulent flow*.

e. Aliran cincin (*annular flow*)

Pada pola aliran ini fase cair cenderung berada di samping atau daerah yang bersentuhan dengan saluran pipa, sedangkan fase udaranya lebih mendominasi yang cenderung berada di tengah aliran. Hal ini terjadi karena laju aliran udara yang relatif tinggi dengan aliran cairan rendah menghasilkan pola aliran *annular* di mana aliran ini terjadi secara kontinu.

f. Aliran cincin berkabut (*annular-mist flow*)

Pada pola aliran ini fase cairan terlihat tertahan atau menyangkut didalam fase udara yang dominan terjadi secara kontinu. Sehingga menyebabkan aliran seperti kabut yang berada dalam aliran yang sedang melaju, atau disebut *annular-mist flow*.



Gambar 2.9 Pola aliran pada pipa vertikal Rouhani & Sohal (1983)

2. Pipa Horizontal

Bentuk pola aliran pada pipa horizontal dapat dilihat pada Gambar 2.10 dan jenis pola aliran yang teramati adalah sebagai berikut :

a. Aliran *stratified* halus (*stratified smooth flow*)

Pada aliran ini terjadi pemisahan fase yang dipengaruhi oleh perbedaan massa jenis dan gravitasi, sehingga aliran yang mengalir secara terpisah dan kontinu. Dengan permukaan air yang tenang, fase cair mengalir pada bagian dasar saluran dalam pipa dan fase udara mengalir pada bagian sebaliknya

atau di atas saluran dalam pipa. Pola aliran ini biasanya terjadi pada kondisi laju aliran udara dan cairan yang relatif rendah.

b. Aliran *stratified* berombak (*stratified wavy flow*)

Pola aliran yang terbentuk berupa gelombang pada permukaan cairan yang bergerak searah dengan aliran udara. Ketika laju aliran udara meningkat, amplitude gelombang yang terbentuk juga akan membesar pada *interface* batas antar fase. Pola ini disebut oleh banyak peneliti sebagai aliran bergelombang bertingkat.

c. Aliran *plug* (*plug flow*)

Pola aliran ini dikarakteristikan sebagai gelembung gas (*bubble*) yang memanjang menyerupai kantung atau peluru dimana alirannya terputus dalam aliran cairan utama. Diameter *bubble* tersebut kurang dari ukuran saluran dan terdapat sedikit *bubble* di celah jarak antar aliran pada sisi atas saluran dalam pipa. Pola ini terjadi ketika laju aliran lebih tinggi daripada laju aliran udara yang relatif rendah, aliran ini disebut aliran sumbat atau kantung (aliran *plug*).

d. Aliran *slug* (*slug flow*)

Jika laju aliran udara dan cairan meningkat bersama sama, apa yang disebut rezim aliran *plug* akan berkembang. Fase udara akan membesar dan menyentuh bagian atas dari permukaan saluran dalam pipa yang membentuk kantung atau peluru yang sedikit berbuih. Aliran fase udara yang dibatasi oleh fase cair akan terbawa oleh aliran udara dengan kecepatan tinggi, sehingga aliran akan terbentuk gelombang-gelombang kecil pada bagian ekor (*tail*). Perbedaan utama antara aliran *slug* dan aliran *plug* adalah dalam sifat massa fase cair *intermittent* yang lebih jelas dipisahkan oleh gelembung udara yang lebih besar.

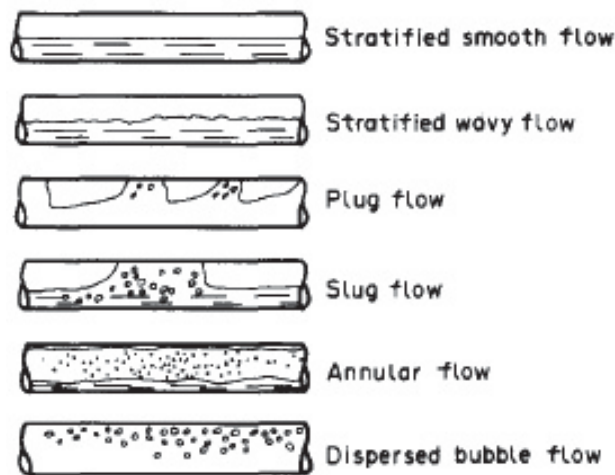
e. Aliran cincin (*annular flow*)

Pola aliran ini adalah penyimpangan dari sifat *intermittent* aliran *plug* dan rezim aliran *slug*, dimana fase fluida udara yang mengalir dalam inti aliran *annular* yang mengalir secara kontinu ini terdapat fase cair berupa butiran air (*droplet*) dan fase cair lainnya terdistribusi mengalir seperti lapisan tebal

ataupun berupa gelembung kecil di sekitar dinding saluran dalam pipa. Pada posisi saluran pipa horizontal, pengaruh gaya gravitasi menyebabkan tebal lapisan cairan pada dasar tabung lebih tebal dibandingkan pada bagian atas tabung.

f. Aliran gelembung terpisah (*dispersed bubble flow*)

Pola aliran yang terjadi dalam saluran pipa horizontal ini ditemukan penyebaran fase zat cair yang menyeluruh dan mengalir secara kontinu, dimana gelembung-gelembung gas terdispersi mengalir pada bagian atas saluran dalam tabung. Hal ini disebabkan oleh gaya gravitasi masih sangat dominan dalam saluran. Aliran ini terjadi pada nilai laju aliran cairan yang relatif lebih besar dibandingkan dengan laju aliran udara.

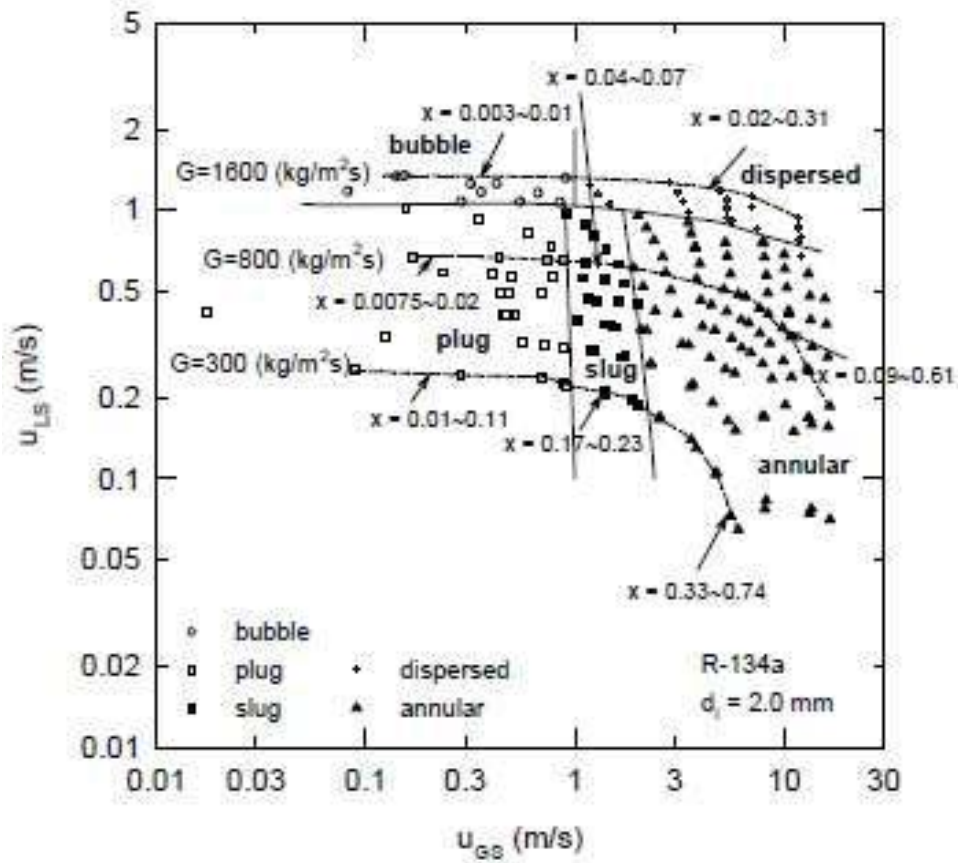


Gambar 2.10 Pola aliran pada pipa horizontal Rouhani & Sohal (1983)

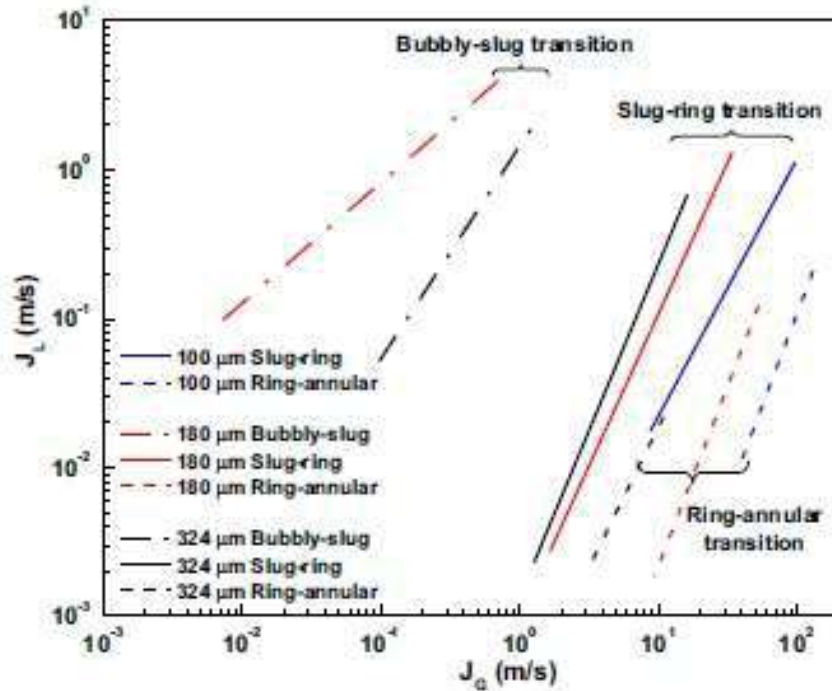
2.2.8. Peta Pola Aliran

Peta pola aliran adalah grafik persebaran data pola aliran yang ditunjukkan dalam percobaan dengan parameter yang telah ditentukan dengan kecepatan superfisial fluida udara, kecepatan superfisial fluida cair, ukuran saluran pipa dan laju alirannya. Jenis laju aliran yang digunakan berupa fluks volume, flux massa, flux momentum, dan lain sebagainya tergantung pada pemilihan parameter oleh peneliti. Perbedaan parameter yang digunakan oleh setiap peneliti mempengaruhi

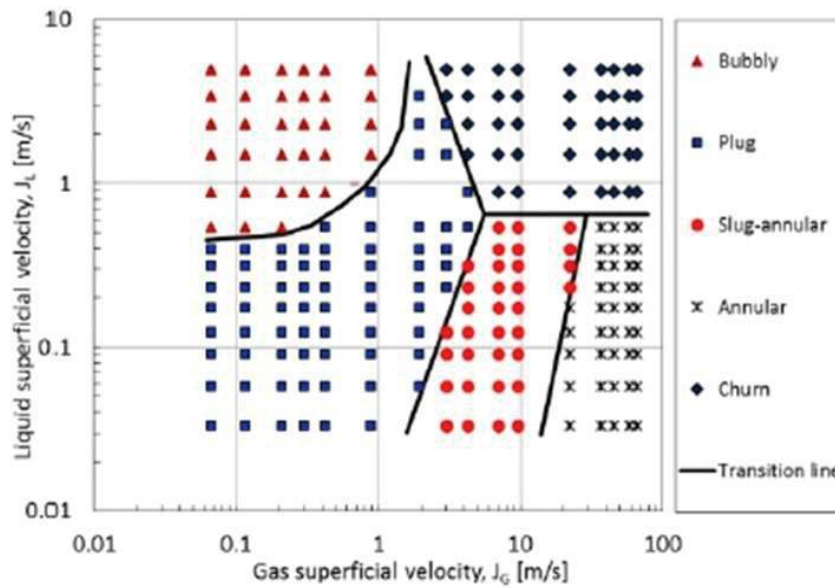
hasil peta pola aliran, sehingga peta pola aliran menjadi tidak seragam. Berikut beberapa gambar peta pola aliran dengan variasi parameter yang telah ditentukan:



Gambar 2.11 Peta pola aliran dengan parameter kecepatan superficial Yang & Shieh (2001)



Gambar 2.12 Peta pola aliran dengan parameter tak berdimensi
Sur & Liu (2012)



Gambar 2.13 Peta pola aliran dengan parameter kecepatan superfisial
Sudarja et al. (2018)