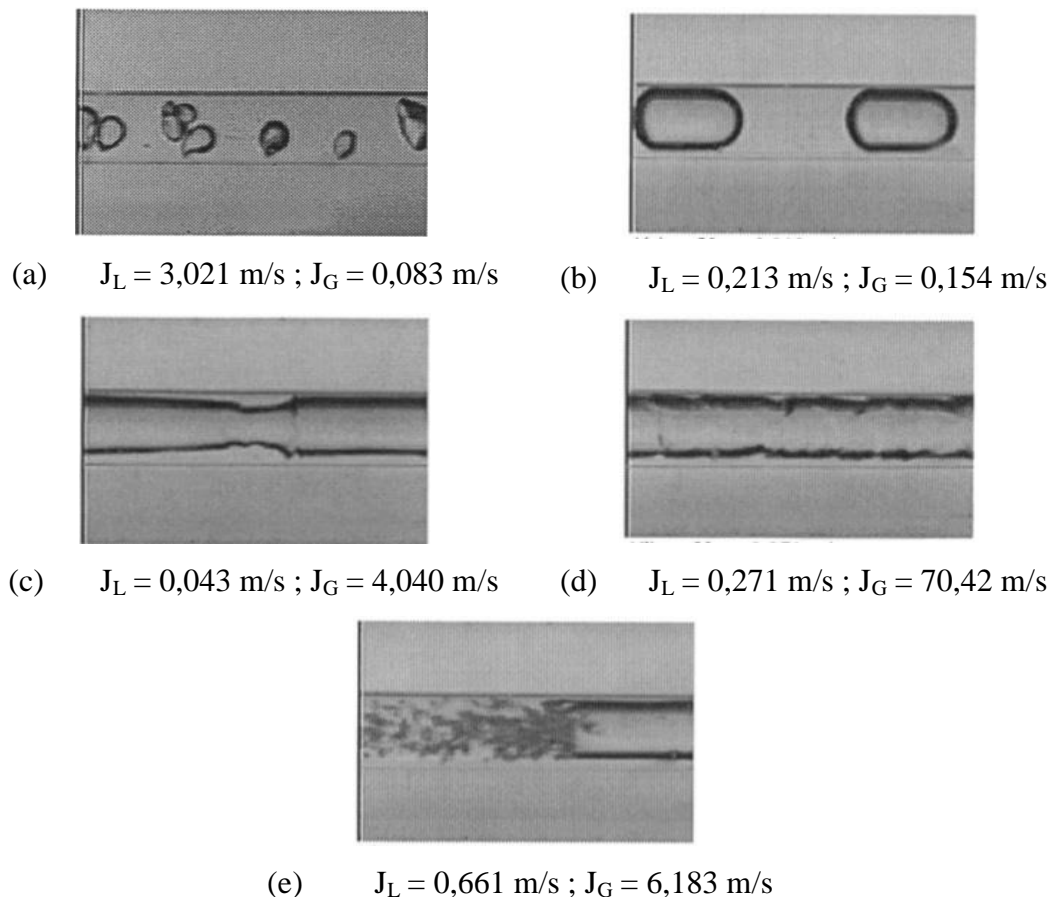


## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Kajian Pustaka

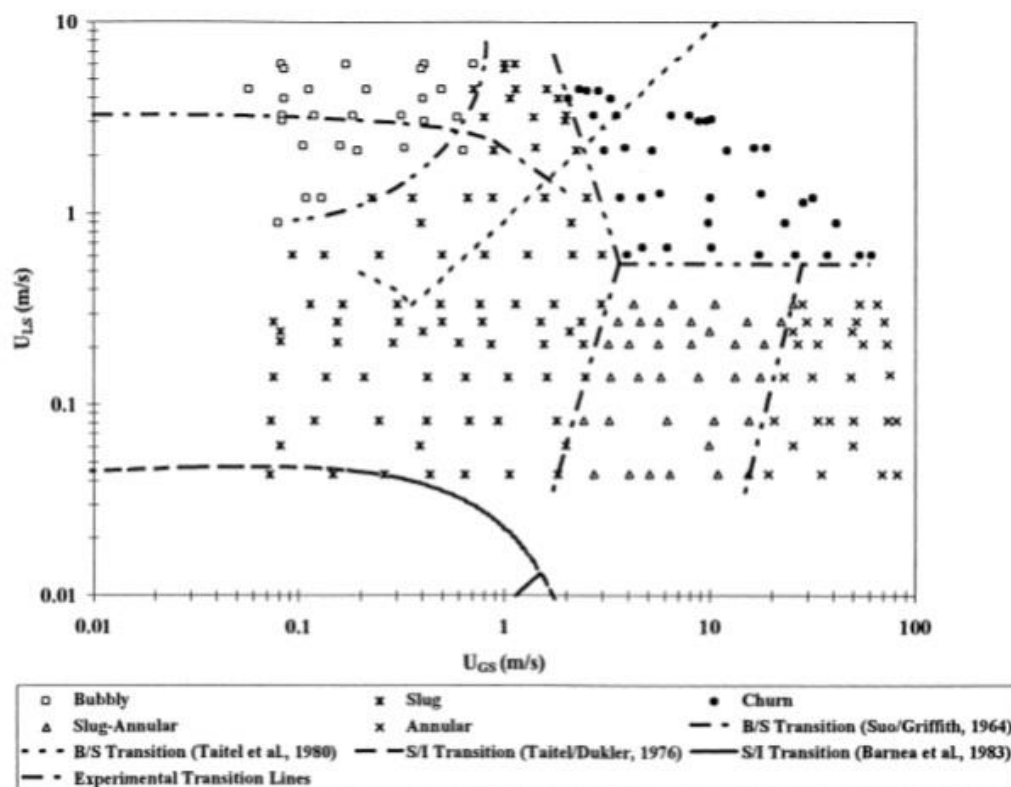
Penelitian aliran dua fase pada saluran pipa berukuran mini dan mikro telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu, namun literature yang tersedia masih terbatas dibandingkan dengan penelitian saluran pipa berukuran besar. (Triplett, Ghiaasiaan, Abdel-Khalik, & Sadowski, 1999) melakukan penelitian 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.



**Gambar 2.1** Pola aliran pada saluran sirkular berdiameter 1,097 mm  
(Triplett, Ghiaasiaan, Abdel-Khalik, & Sadowski, 1999)

Variasi kecepatan superfisial gas ( $J_G$ ) yang digunakan dimulai dari 0,02 m/s hingga 80 m/s dan kecepatan superfisial 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. Visualisasi kelima pola aliran dapat dilihat pada gambar 2.1.

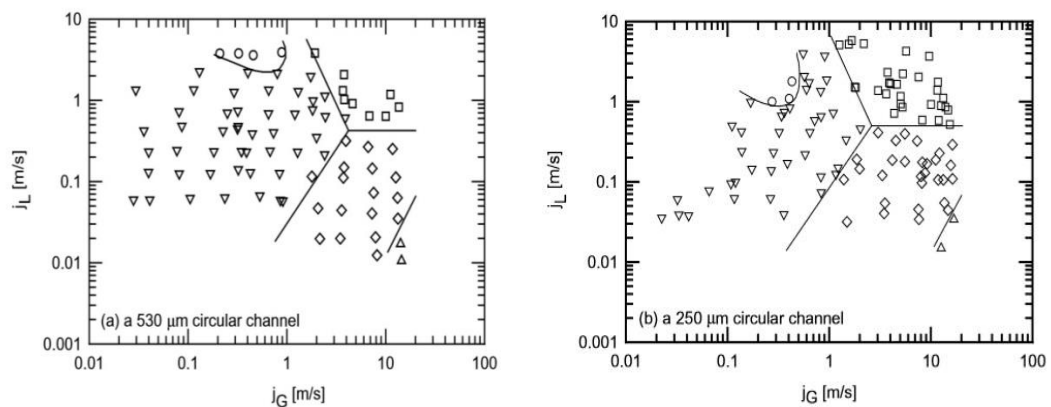
Gambar 2.2 memperlihatkan perbandingan peta pola aliran (Triplett, Ghiaasiaan, Abdel-Khalik, & Sadowski, 1999) dengan beberapa peta pola aliran peneliti terdahulu yaitu Suo dan Griffith (1964), Fukano dan Kariyasi (1993), Damiandes dan Westwater (1988), Taitel dan Dukler (1976), Barnea dkk. (1983), dan Taitel dkk. (1980) dalam Triplett dkk. (1999).



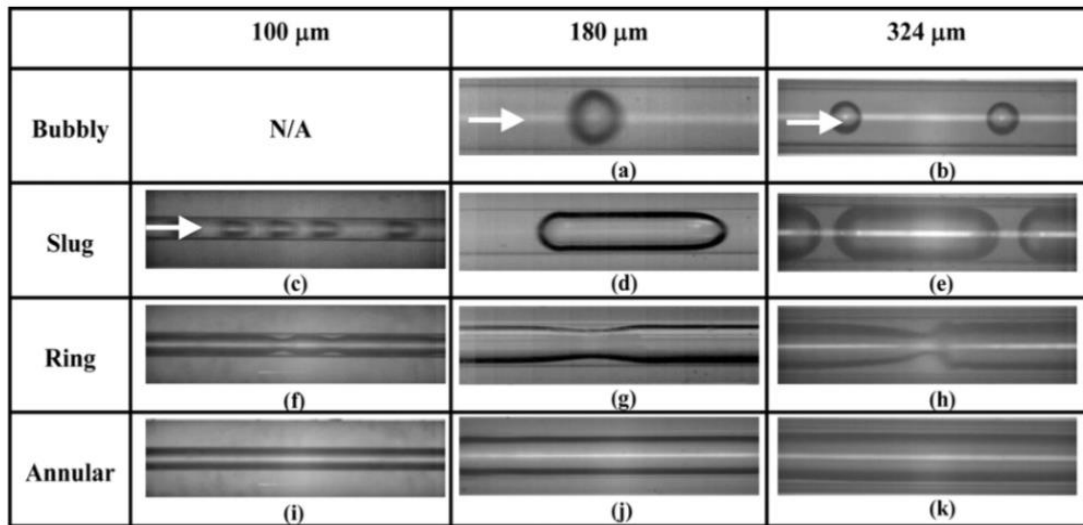
**Gambar 2.2** Perbandingan peta pola aliran pada saluran sirkular 1,097 mm dengan peta pola aliran peneliti terdahulu (Triplett, Ghiaasiaan, Abdel-Khalik, & Sadowski, 1999)

Pengaruh diameter saluran pada karakteristik aliran dua fase adiabatik di *microchannels* telah diteliti oleh (Chung & Kawaji, 2004). Dalam penelitiannya

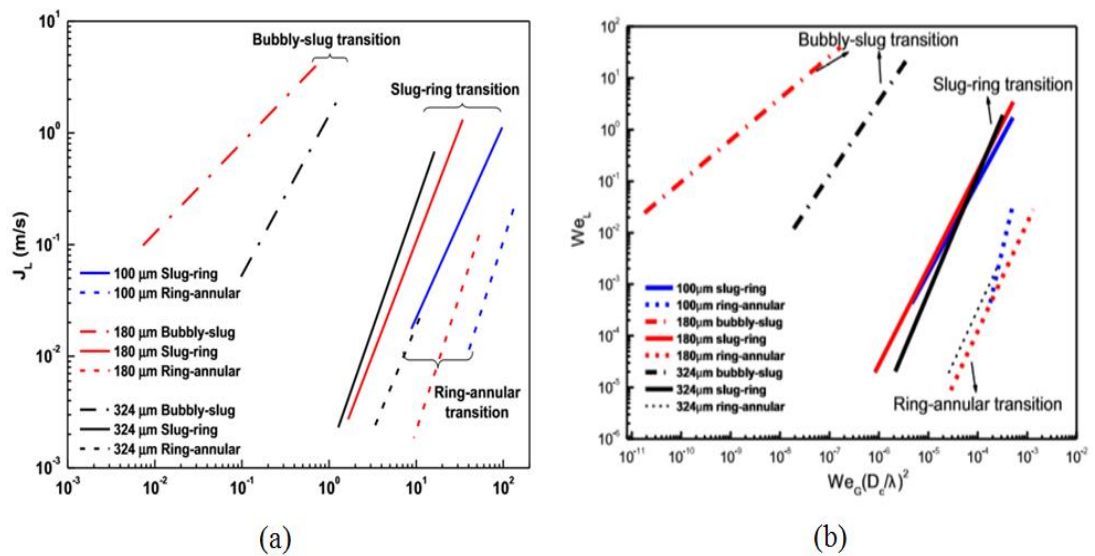
fluida yang digunakan berupa gas nitrogen dan air pada saluran dengan diameter 530, 250, 100, dan 50  $\mu\text{m}$ . Kecepatan superfisial fluida cair yang digunakan berkisar 0,01 m/s – 5,77 m/s, sedangkan kecepatan superfisial gas berkisar 0,02 m/s – 72,98 m/s. Metode visualisasi yang digunakan berupa gambar fotografi. Hasil dari visualisasi menunjukkan bahwa perbedaan pola aliran pada pipa diameter 530 dan 250  $\mu\text{m}$  dengan pipa berdiameter 100 dan 50  $\mu\text{m}$ . Pola aliran yang teramati dalam penelitian ini dengan diameter 530 dan 250  $\mu\text{m}$ , yaitu: *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular* dan *annular*. Sedangkan pada pipa berukuran 100 dan 50  $\mu\text{m}$  pola yang teramati hanya pola aliran *slug*. Peta pola aliran yang terbentuk dalam penelitian (Chung & Kawaji, 2004) dapat dilihat pada gambar 2.3.

(a) 530  $\mu\text{m}$ (b) 250  $\mu\text{m}$ **Gambar 2.3** Peta pola aliran (Chung & Kawaji, 2004)

Penelitian aliran dua fase air-udara pada saluran sirkular dengan diameter dalam 100, 180, dan 324  $\mu\text{m}$  telah dilakukan oleh (Sur & Liu, 2012). 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. Gambar 2.4 menunjukkan visual pola aliran yang didapat.



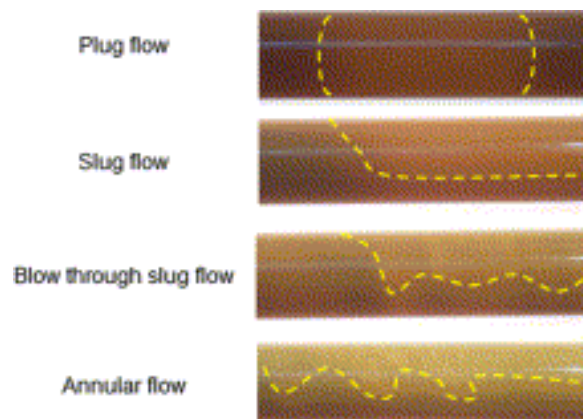
**Gambar 2.4** Pola aliran (Sur & Liu, 2012)



**Gambar 2.5** Peta pola aliran (a) parameter kecepatan superfisial gas dan air, (b) parameter tak berdimensi (Sur & Liu, 2012)

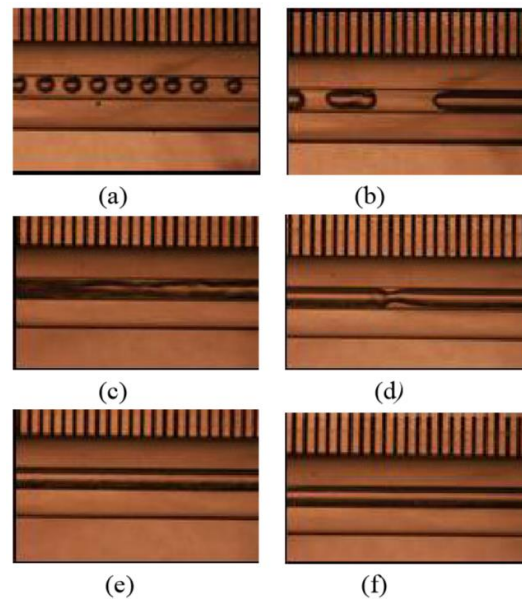
Hasil dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pola aliran yang terbentuk merupakan perbandingan dari gaya inersia, tegangan permukaan, gaya gravitasi, dan viskositas kinematik dalam saluran. Tegangan permukaan dan gaya inersia merupakan gaya yang paling mempengaruhi dalam pembentukan pola aliran di saluran mini dan mikro. Pengaruh tegangan permukaan terlihat pada pola aliran *bubbly* dan *slug*, sementara pengaruh gaya inersia terlihat pada pola aliran *annular*. Dalam penelitiannya (Sur & Liu, 2012) menampilkan peta pola aliran menggunakan

koordinat kecepatan superfisial gas pada sumbu-x dan kecepatan superfisial air pada sumbu-y, dapat dilihat pada gambar 2.5. Parameter tak berdimensi digunakan dalam penelitian ini untuk menambahkan pengaruh ukuran saluran pada pembentukan pola aliran demi terciptanya peta pola aliran yang bersifat universal.



**Gambar 2.6** Pola aliran (Zhao, Yeung, Zorgani, Archibong, & Lao, 2013)

Zhao dkk. (2013) melakukan penelitian tentang efek viskositas tinggi dengan karakteristik aliran dua fase minyak dan udara pada pipa horizontal. Penelitian ini dilakukan pada seksi uji dengan diameter dalam 26 mm dan panjang 5,5 m. Nilai viskositas cairan antara 1000 – 7500 cP, kecepatan superfisial minyak 0,06 – 0,5 m/s, dan kecepatan superfisial gas 0,3 – 12,0 m/s. Metode yang digunakan dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi pola aliran yaitu menggunakan *Electrical Capacitance Tomography* (ETC) yang berfungsi membaca *liquid hold-up* dan metode visualisasi. Dengan membandingkan karakteristik sinyal *time-traced* ETC dengan visualisasi dari rekaman video maka di dapatkan pola aliran *plug*, *slug*, *blow through slug flow*, dan *annular*. Pada aliran *plug* sinyal yang dihasilkan ETC menunjukkan grafik dengan puncak yang curam. Dalam hal ini menunjukkan bubble yang berukuran besar mengalir dengan cepat. Seiring dengan peningkatan kecepatan superfisial gas, aliran *slug* tercipta dengan karakteristik sinyal ETC yang hampir mirip dengan aliran *plug*, namun jarak antara puncak semakin menjauh. Jika kecepatan superfisial ditingkatkan lagi, akan terbentuk aliran *blow through slug flow* dengan karakteristik sinyal beberapa puncak, sisanya cenderung stabil. Sedangkan pada kecepatan superfisial gas yang tinggi aliran *annular* tercipta dengan karakteristik sinyal yang cenderung stabil dengan satu puncak pendek.

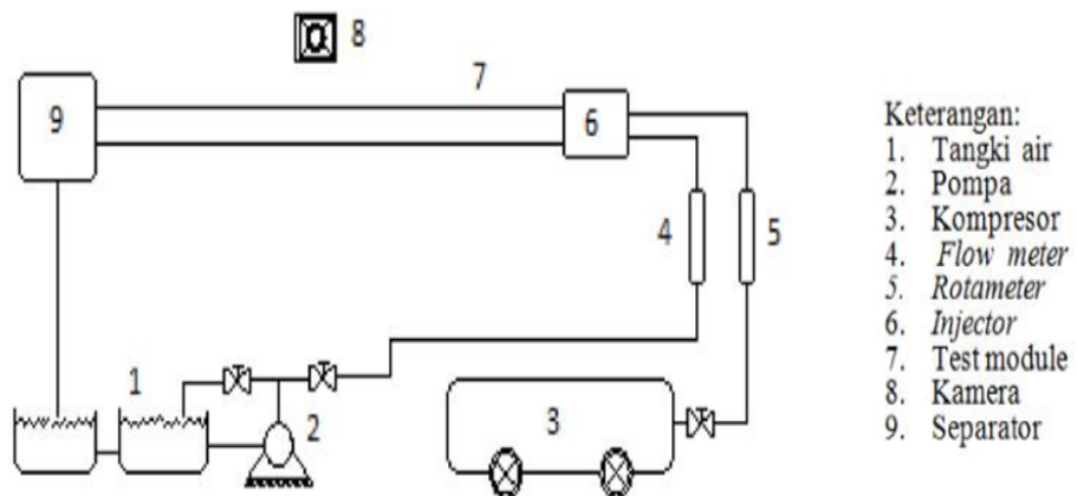


**Gambar 2.7** Pola aliran yang terdeteksi (a) *Bubbly* ( $J_G = 0,1$  m/s dan  $J_L = 1,62$  m/s); (b) *Slug* ( $J_G = 2,06$  m/s dan  $J_L = 0,06$  m/s); (c) *Churn* ( $J_G = 21,03$  m/s dan  $J_L = 0,52$  m/s); (d) *Slug-annular* ( $J_G = 7,37$  m/s dan  $J_L = 0,02$  m/s); (e) *Wavy-annular* ( $J_G = 57,4$  m/s dan  $J_L = 0,24$  m/s); (f) *Annular* ( $J_G = 14,12$  m/s dan  $J_L = 0,05$  m/s) (Sudarja, Indarto, Deendarlianto, Noverdi, & Gautama, 2014)

Studi visualisasi pola aliran dua fase air-udara pada pipa mini horizontal telah diteliti 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 berukuran 1,6 mm dengan kecepatan superfisial gas berkisar antara 0,13 - 63,42 m/s, sementara kecepatan superfisial air berkisar antara 0,03 - 2,81 m/s. Penelitian ini menggunakan visualisasi kamera video canon EOS 500D. Dalam penelitian ini didapatkan lima pola aliran yang terbentuk, 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).

(Korawan, 2015) melakukan penelitian tentang pola aliran dua fase (air dan udara) pada pipa horizontal dengan variasi kecepatan superfisial air ( $U_{SL}$ ): 0,4 m/s, 0,55 m/s, 0,7 m/s, 0,85 m/s, dan 1,0 m/s. Penelitian dilakukan menggunakan *test*

*module* yang terbuat dari pipa *acrylic* dengan diameter dalam 36 mm dan panjang 2000 mm. Fluida cair yang digunakan berupa air dan fluida gas berupa udara. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu air dialirkan oleh pompa dari tangki menuju *flowmeter*, selanjutnya menuju *injector*. Udara disuplai dari kompresor dan mengalir melalui *rota-meter* menuju *injector*. Air-udara yang tercampur dalam *injector* mengalir melalui *test module*, selanjutnya menuju *separator*, dimana udara dipisahkan ke atmosfer dan air mengalir ke dalam tangki untuk disirkulasi lagi. Visualisasi untuk mendapatkan gambar pola aliran digunakan kamera digital. Hasil dari penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa pola aliran yang teramati adalah *bubble flow*, *slug flow*, dan *stratified flow*. Semakin besar nilai  $U_{SL}$  mengakibatkan semakin panjang *bubble region* yang terjadi dan semakin besar nilai  $U_{SL}$  mengakibatkan terjadinya pergeseran perubahan pola aliran, dimana pada  $U_{SL}$  rendah terjadi perubahan *bubble flow* menjadi *stratified* dan pada  $U_{SL}$  tinggi terjadi perubahan dari *bubble flow* menjadi *slug flow*.



**Gambar 2.8** Diagram peralatan penelitian

(Korawan, 2015)

Penentuan sub-sub pola aliran stratified air-udara pada pipa horizontal menggunakan pengukuran tekanan telah diteliti oleh (Wibowo, Hudaya, Kabib, Deendarlianto, & Widyaparaga, 2015). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengklasifikasi sub-sub pola aliran *stratified* air-udara pada pipa horizontal berdasarkan hasil pengukuran sinyal keluaran sensor tekanan. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan kajian eksperimental, visualisasi, dan

pengukuran fluktuasi beda tekanan. Alat yang digunakan dalam penelitian ini berupa pipa *acrylic transparan* dengan diameter dalam 26 mm dan panjang 10 m, kamera berkecepatan tinggi digunakan untuk mendapatkan visualisasi sub-sub pola aliran *stratified*. Dalam penelitian ini menggunakan seksi uji dengan posisi tap 180D dan 210D untuk mengukur fluktuasi beda tekanan. Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pola aliran *stratified* yang berhasil diamati secara visual dibagi menjadi sub-sub daerah yang meliputi *stratified smooth* ( $J_L = 0,025$  m/s &  $J_G = 1,88$  m/s), *two dimensional wave* ( $J_L = 0,025$  m/s &  $J_G = 3,77$  m/s), *roll wave* ( $J_L = 0,05$  m/s &  $J_G = 3,77$  m/s), dan *atomization* ( $J_L = 0,075$  m/s &  $J_G = 3,77$  m/s).

(Anutup, 2016) melakukan penelitian tentang studi visualisasi pola aliran dan peta aliran dua fase udara-*aquades*/gliserin pada saluran mini horizontal berukuran 1,6 mm. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui karakteristik aliran dua fase dengan mengamati pola aliran dan peta pola aliran yang terbentuk pada saluran mini dan pengaruhnya akibat perubahan nilai viskositas dan tegangan permukaan. Visualisasi yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan kamera video nikon J4. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini berupa saluran sirkular horizontal berukuran 1,6 mm dengan fluida kerja udara-campuran air dan gliserin dengan konsentrasi larutan 20%, 40%, dan 60%. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dengan memvariasikan nilai kecepatan superficial gas dan kecepatan superficial air pada kisaran  $J_G = 0,066 - 66,2$  m/s dan  $J_L = 0,033 - 4,193$  m/s didapatkan lima pola aliran, yaitu: *bubbly*, *slug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*. Pengaruh perubahan viskositas terlihat pada pola aliran *bubbly* dan *slug* serta pada garis transisi peta pola aliran.

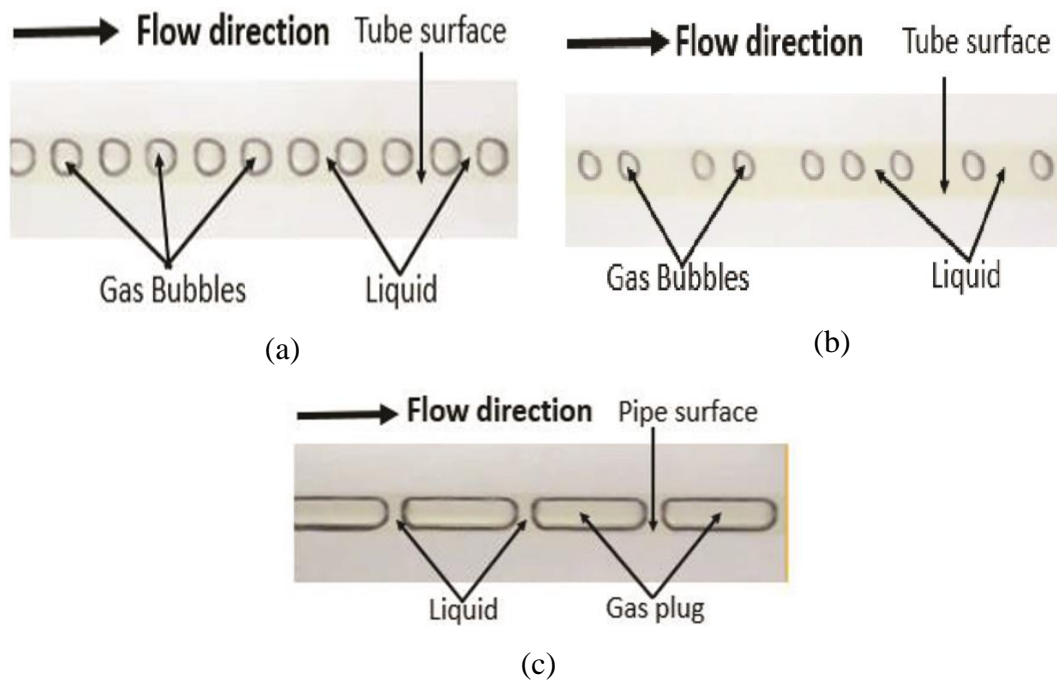
Studi pola aliran dua fase udara-campuran air dan butanol pada saluran mini horizontal telah dilakukan. Metode eksperimental digunakan untuk mengetahui pengaruh tegangan permukaan terhadap karakteristik aliran dua fase, meliputi pola aliran yang terbentuk dan peta pola aliran yang dihasilkan. Eksperimen dilakukan pada pipa kapiler horizontal dengan diameter 1,6 mm. Fluida kerja gas yang digunakan merupakan udara, dan campuran air-butanol dengan konsentrasi (2%, 4%, dan 6%). Kecepatan superficial gas 0,066 - 66,2 m/s, dan nilai kecepatan superficial fluida 0,033 - 4,193 m/s. Visualisasi menggunakan kamera video berkecepatan tinggi. Dari penelitian ini diperoleh hasil berupa pola aliran yang dapat diamati



meliputi pola aliran *bubbly*, *plug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*. Tegangan permukaan berefek pada daerah transisi pola aliran *bubbly-plug*, *plug-slug annular*, dan *plug-churn*. (Siregar, 2016)

(Purwono, 2017) telah melakukan penelitian tentang karakteristik aliran *stratified* searah air udara pada pipa horizontal dengan pipa *acrylic* transparan berdiameter 26 mm dan panjang 9 m. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan visual menggunakan kamera video berkecepatan tinggi, pengukuran *liquid hold-up* dan pengukuran perbedaan tekanan. Pengukuran *liquid hold-up* dilakukan dengan sensor *Constant Electric Current Method* (CECM), analisis data berupa *Probability Distribution Function* (PDF) yang berfungsi untuk mengetahui karakteristik distribusi *liquid hold-up*, dan *Power Spectral Density* (PSD) yang berfungsi untuk menggambarkan sinyal dalam membaca frekuensi gelombang. Pengukuran beda tekanan pada seksi uji diukur dengan menggunakan *validyne pressure transducer* dengan posisi *pressure tap* berjarak 170D hingga 295D dari mixer, dan pengambilan data dilakukan pada 500 Hz. Penelitian ini dilakukan pada tekanan atmosfer dan kondisi adiabatik dengan variable kecepatan superfisial air 0,02 m/s – 0,1 m/s dan kecepatan superfisial udara 3,83 m/s – 16 m/s. Hasil dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pola aliran yang berhasil diamati meliputi pola aliran *stratified smooth*, *stratified wavy 2D*, *stratified wavy 3D*, *stratified wavy roll*, *stratified wavy pseudo-slug*, transisi *annular*, dan *annular*.

Penelitian tentang efek viskositas cairan pada pola aliran dua fase gas-cair pada saluran mini horizontal telah dilakukan oleh (Sudarja, Jayadi, Indarto, Deendarlianto, & Widyaparaga, 2018). Seksi uji yang digunakan dalam penelitian ini berupa pipa kaca berdiameter dalam 1,6 mm dengan kecepatan superfisial gas (0,025 – 66,3 m/s) dan kecepatan superfisial cairan (0,033 – 4,935 m/s). Cairan yang digunakan adalah udara dan campuran akuades – gliserin dengan presentase (0%, 20%, 40%, dan 60%), dengan indeks (W, G20, G40, dan G60). Data pola aliran yang diperoleh dengan menganalisis gambar video, ditangkap menggunakan kamera berkecepatan tinggi. Hasil dari penelitian dapat dilihat pada gambar 2.9 pola aliran yang diperoleh (*bubbly*, *plug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*), sedangkan aliran *stratified* tidak ditemukan.



**Gambar 2.9** Pola aliran yang terbentuk pada konsentrasi 60% gliserin:

(a) *Bubbly*:  $J_G = 0,116$  m/s ;  $J_L = 0,539$  m/s, (b) *Bubbly*:  $J_G = 0,423$  m/s ;  $J_L = 2,297$  m/s, dan (c) *Plug* :  $J_G = 0,116$  m/s ;  $J_L = 0,033$  m/s.

(Sudarja, Jayadi, Indarto, Deendarlianto, & Widyaparaga, 2018)

## 2.2 Dasar Teori Aliran Dua Fase

Fase adalah wujud dari suatu zat yang dapat berupa cair, padat, dan gas. Berdasarkan fasenya aliran dibedakan menjadi *single phase* dan *multi phase*. Aliran *single phase* merupakan kondisi aliran dimana terdapat hanya satu fase yang mengalir sedangkan aliran *multi phase* merupakan kondisi aliran dimana terdapat beberapa fase yang mengalir bersamaan. Aliran dua fase adalah bentuk yang paling sederhana dari aliran *multi phase*. Fase yang mengalir dalam aliran dua fase dapat berupa cair-padat, cair-gas, dan gas-padat.

Istilah dari aliran dua komponen digunakan untuk menggambarkan aliran, dimana fase dalam aliran tersebut tidak terdiri dari substansi kimia yang sama (Wallis, 1969). Sebagai contoh, aliran uap-air merupakan aliran dua fase, sedangkan aliran udara-air merupakan aliran dua komponen. Namun, dikarenakan dalam perhitungan matematika didapatkan hasil yang sama antara aliran dua fase ataupun

aliran dua komponen. Maka dapat disimpulkan bahwa penggunaan istilah aliran dua fase maupun aliran dua komponen tidak menjadi masalah.

Aliran dua fase dapat digolongkan dalam beberapa jenis, yaitu berdasarkan arah aliran, orientasi saluran, dan ukuran saluran. Berdasarkan arah alirannya, digolongkan menjadi aliran *co-current* dan *counter current*. Berdasarkan orientasinya, aliran dua fase digolongkan menjadi aliran vertikal, horizontal, dan kemiringan sudut tertentu. Berdasarkan ukuran salurannya, digolongkan menjadi aliran dua fase dengan ukuran normal, mini, dan mikro.

Ukuran aliran dua fase dibagi menjadi beberapa macam berdasarkan nilai ukurannya (Kandiklar & Grande, 2002) yaitu :

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| 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> | $0,1 \text{ }\mu\text{m} > D$                          |

### 2.2.1 Pola Aliran Dua Fase Saluran Horizontal Berukuran Mini

Pola aliran atau rezim aliran merupakan konfigurasi geometrik dari kombinasi aliran dua buah fase. Beberapa metode yang dapat digunakan dalam pengamatan pola aliran salah satunya metode visualisasi menggunakan kamera video berkecepatan tinggi. Adapun metode analisis spectral dari tekanan yang berfluktuasi pada fraksi volume yang dapat digunakan untuk beberapa keadaan jika pengamatan visual sulit didapatkan (Zuber, Jones, & Owen, 1975)

Pola aliran yang terbentuk dapat dipengaruhi oleh gaya inersia, gaya gravitasi, sifat fluida (massa jenis, viskositas, dan tegangan permukaan), flux volume aliran (kecepatan superfisial air dan kecepatan superfisial gas), dan diameter pipa. Pola aliran dua fase cair – gas pada pipa horizontal memiliki kemiripan dengan pola aliran dua fase pada pipa vertikal namun pada pipa vertikal lebih dipengaruhi oleh gaya gravitasi sehingga cairan cenderung berada di bawah dan gas cenderung mengalir diatas cairan.

Berikut ini merupakan gambaran umum pola aliran yang terbentuk pada saluran konvensional horizontal yang ditunjukkan seperti Gambar 2.10 dibawah ini:

#### a. *Bubbly Flow*

*Bubbly flow* terbentuk ketika gas terdispersi ke dalam cairan, kemudian ditandai dengan terbentuknya gelembung-gelembung dalam cairan yang disebabkan oleh fluida gas yang tidak mampu menahan gaya geser pada kontak kedua fase. Dalam saluran horizontal, dapat dilihat bahwa gelembung lebih dominan berada dibagian atas saluran. Hal ini dikarenakan gaya gravitasi masih sangat dominan dalam saluran.

b. *Stratified Flow*

Pola *stratified flow* dapat dikarakteristikan sebagai pola aliran udara-air yang mengalir terpisah tetapi berkelanjutan dengan permukaan air yang tenang dan terjadi pada kondisi kecepatan aliran gas-air yang rendah.

c. *Stratified Wavy Flow*

Pada *stratified wavy flow* pola yang terbentuk berupa gelombang pada permukaan cairan yang bergerak searah dengan aliran gas. Hal ini dikarenakan terjadinya peningkatan kecepatan gas.

d. *Plug Flow*

*Plug flow* dikarakteristikan sebagai aliran yang memiliki *liquid plug* yang di pisahkan oleh *bubble* gas yang memanjang dan menyerupai peluru. Diameter *bubble* tersebut kurang dari ukuran saluran. *Plug flow* bisa disebut juga sebagai aliran *elongated bubble*.

e. *Slug Flow*

Pola aliran *slug* dapat terjadi ketika laju aliran gas yang semakin tinggi. Hal itu mengakibatkan bentuk gelombang semakin besar dan ketika gelombang mencapai bagian atas pipa maka akan terbentuk kantung. Kantung fase gas yang dibatasi oleh fase cair akan terbawa oleh aliran gas dengan kecepatan tinggi, sehingga akan terbentuk gelembung-gelembung kecil pada bagian ekor (*tail*).

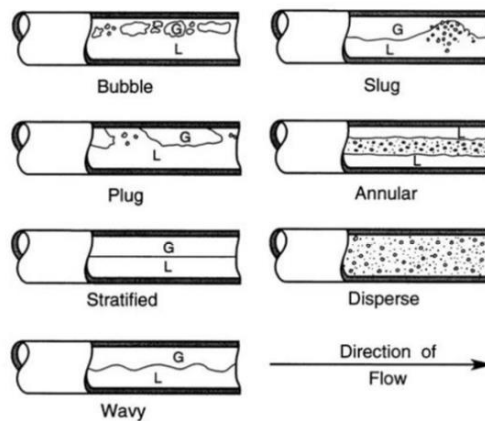
f. *Annular Flow*

Pola *annular flow* dapat disebut juga aliran cincin. Aliran ini terjadi pada kecepatan gas yang tinggi dimana aliran gas akan mengalir kontinyu pada bagian tengah saluran sedangkan aliran air berada disekitar dinding saluran dengan sedikit *bubble* dan riak. Karena pengaruh gravitasi maka

ketebalan lapisan cairan yang ada di bawah lebih tebal dibandingkan dengan lapisan yang ada di atas.

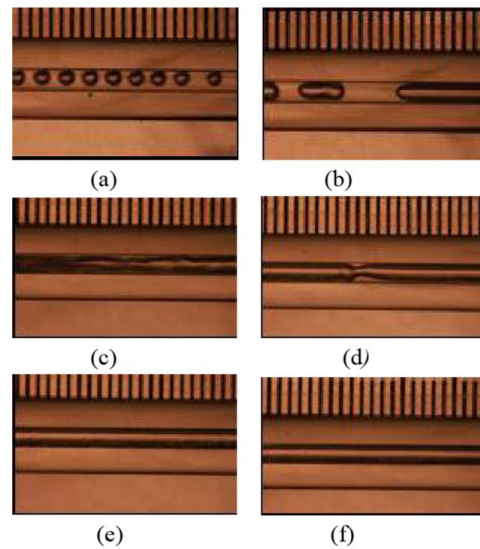
g. *Dispersed Flow*

Gambar 2.10 menunjukkan *Dispersed flow* terbentuk pada saat *bubble-bubble* berukuran kecil yang tersebar di hampir seluruh pipa terutama pada bagian atas karena efek dari gaya apung *bubble* itu sendiri.



**Gambar 2.10** Bentuk pola aliran air-udara pada pipa horizontal dengan diameter 5,1 cm (Weisman, 1983)

Pengaruh gaya gravitasi sangat kecil pada pembentukan pola aliran dua fase pipa mini dan mikro, sehingga dapat diabaikan. Faktor yang lebih dominan pada pola aliran pipa mini dan mikro yaitu gaya tegangan permukaan dan gaya inersia. Pola aliran terpisah (*stratified flow*) tidak di temukan pada aliran dua fase pipa mini. Hal ini disebabkan oleh, gaya gravitasi (yang menyebabkan terpisahnya dua fluida beda berat jenis) lebih kecil dari pada gaya yang disebabkan oleh tegangan permukaan pada saluran kecil (Sudarja, Indarto, Deendarlianto, Noverdi, & Gautama, 2014).



**Gambar 2.11** Pola aliran pada pipa mini diameter 1,6 mm

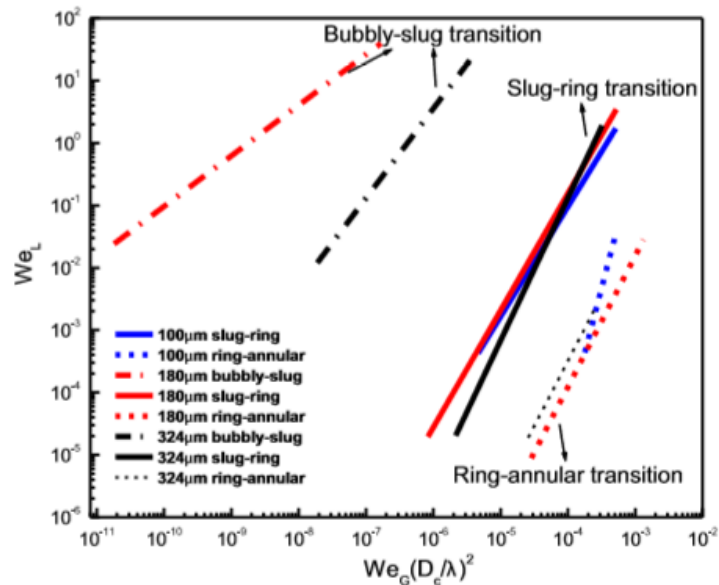
(a)*Bubbly*, (b)*Slug*, (c)*Churn*, (d)*Slug-annular*, (e)*Wavy-annular*, (f)*Annular*

(Sudarja, Indarto, Deendarlianto, Noverdi, & Gautama, 2014)

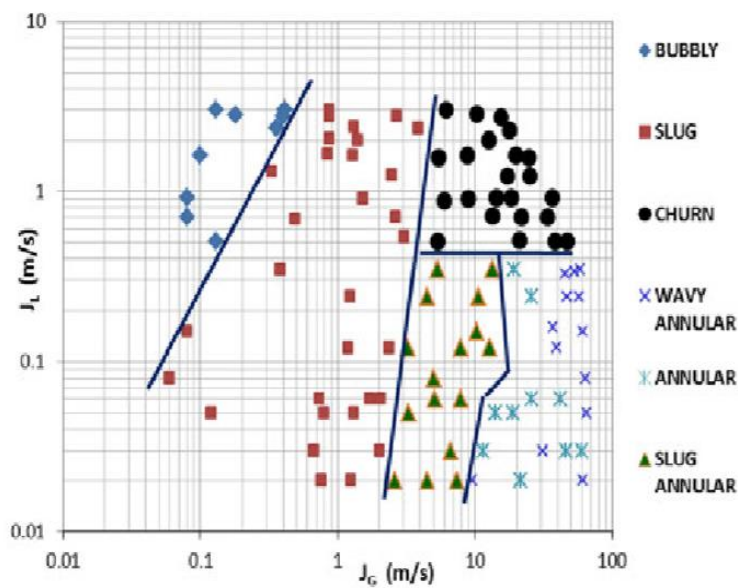
### 2.2.2 Peta Pola Aliran

Peta pola aliran merupakan grafik yang digunakan dalam menunjukkan persebaran data pola aliran pada berbagai parameter yang telah ditentukan dengan kecepatan superfisial fluida cair, kecepatan superfisial fluida gas, dan laju aliran. Jenis laju aliran yang digunakan dapat berupa flux massa, flux momentum, flux volume, dan lain sebagainya tergantung pada peneliti.

Gambar 2.12 menunjukkan peta pola aliran yang disajikan menggunakan koordinat yang bervariasi. Parameter tak berdimensi digunakan karena telah ditemukan bahwa ukuran saluran mempengaruhi pola aliran dan daerah transisi yang terbentuk (Sur & Liu, 2012). Atas dasar tersebut, (Sur & Liu, 2012) menggunakan tambahan parameter yaitu  $(We_G(D_c/\lambda)^2)$  sebagai sumbu-x dan  $(We_L)$  sebagai sumbu-y dalam penyajian peta pola aliran sebagai pengaruh efek ukuran saluran.



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



**Gambar 2.13** Peta pola aliran dengan parameter kecepatan superfisial  
(Sudarja, Indarto, Deendarlianto, Noverdi, & Gautama, 2014)

Sudarja, dkk (2014), Diko Anutup (2016), dan Dian (2016) merupakan beberapa peneliti yang menggunakan parameter kecepatan superfisial gas dan air dalam penyajiannya yang di tampilkan pada gambar 2.13. Hal ini dikarenakan

kecepatan superfisial dianggap mewakili kondisi sesungguhnya pada aliran yang terjadi dalam saluran.

### 2.2.3 Parameter Aliran Dua Fase

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

Perbandingan flux volumetrik ditulis pada persamaan 2.1 dan 2.2 di bawah ini :

$$J_G = \frac{Q_G}{A} \quad (2.1)$$

$$J_L = \frac{Q_L}{A} \quad (2.2)$$

Nilai kecepatan superfisial total merupakan penjumlahan antara kecepatan superfisial gas dan kecepatan superfisial cairan, ditulis pada persamaan 2.3 dibawah ini :

$$J_T = J_G + J_L \quad (2.3)$$

### 2.2.4 Parameter Sifat Fluida

Viskositas merupakan ketahanan fluida terhadap perubahan dinamis pada pergerakan fluida. Hal ini dapat mempengaruhi terbentuknya pola aliran pada aliran dua fase, khususnya aliran dua fase pada saluran berukuran mini dan mikro. Temperature dan tekanan suatu zat dapat mempengaruhi viskositas fluida. Tegangan permukaan merupakan gaya regangan pada permukaan zat cair yang terjadi sejajar pada permukaan, disebabkan oleh gaya tarik antar molekul zat cair.

### 2.2.5 Metode Visualisasi

Pengamatan pola aliran yang terjadi pada suatu kondisi tertentu serta perubahan yang terjadi merupakan tujuan dari metode visualisasi. Metode ini dapat dilakukan secara manual ataupun dengan alat bantu seperti kamera video berkecepatan tinggi. Metode visualisasi secara manual yaitu menggunakan mata telanjang. Metode ini sering digunakan pada awal perkembangan aliran dua fase akibat keterbatasan teknologi yang ada. Sedangkan metode visualisasi menggunakan



kamera video berkecepatan tinggi lebih banyak digunakan saat ini karena kemajuan teknologi sudah berkembang dan hasil yang di dapat lebih maksimal.

Seiring berkembangnya penelitian tentang aliran dua fase maka metode visualisasi semakin berkembang salah satunya penambahan alat berupa mikroskop yang di integrasikan dengan kamera video berkecepatan tinggi untuk meneliti aliran dua fase pada pipa berukuran mikro. Penelitian pada saluran berukuran 0,15 mm telah dilakukan oleh (Saisorn & Wongwises, 2008). Dalam penelitiannya dilakukan penambahan alat berupa *stereozoom microscope* yang di pasang 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 di ambil per detik). Faktor pencahayaan pada seksi uji dapat mempengaruhi kualitas gambar yang diambil.

Pengamatan dengan video akan lebih memudahkan, karena dapat menggunakan mode *slow motion* untuk menganalisa aliran yang bergerak dengan cepat dan dapat menunjukkan perubahan aliran pada selang waktu tertentu. Untuk mendapatkan hasil gambar dengan kualitas baik maka diperlukan system pencahayaan yang tepat.