

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

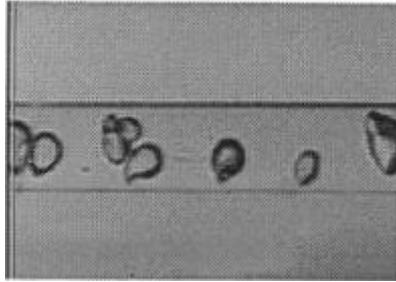
#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian tentang aliran dua fase. Penelitian mengenai karakteristik aliran dua fase pada pipa berukuran mini sudah cukup sering dilakukan. Namun, penelitian tersebut menghasilkan hasil yang berbeda-beda. Perbedaan tersebut terjadi karena tiap penelitian dilakukan dengan menggunakan metode yang berbeda.

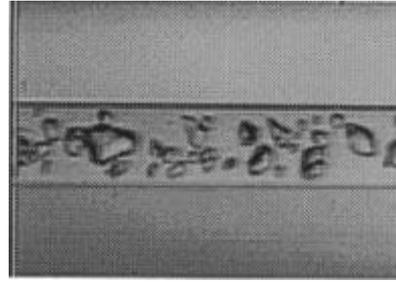
Menurut Fukano dan Kariyasaki (1993) penelitian pada karakteristik aliran dua fasa dalam tabung kapiler menggunakan diameter pipa bagian dalam dari 1 mm, 2,4 mm dan 4,9 mm dengan media air dan udara, untuk arah alirannya di variasikan menjadi tiga yaitu arah horizontal, vertikal ke bawah dan vertikal ke atas. Penelitian ini menginvestigasi dengan memperhatikan pada pola aliran, variasi waktu fraksi hampa dan penurunan tekanan. Semakin kecil diameter dalam pipa, maka penurunan tekanan menjadi semakin besar. Mereka menyatakan bahwa gaya *capillary* pada pipa berukuran kurang dari 5 mm sangat penting, arah aliran fluida yang divariasikan pada saat melakukan penelitian tidak mempengaruhi terbentuknya pola aliran, sedangkan pada arah horizontal pola aliran yang muncul menjadi aksis-simetris yang mana ketebalan film air menyelimuti seluruh bagian permukaan pipa secara merata.

Triplet dkk., (1999) melakukan eksperimen aliran dua fase pada pipa berukuran mini dengan diameter 1,097 dan 1,45 mm dengan Variasi kecepatan superfisial yang digunakan adalah kecepatan superfisial udara dimulai dari 0,02-80 m/s, sedangkan untuk kecepatan superfisial cairan dimulai dari 0,02-8 m/s. Media yang digunakan adalah udara dan air. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tegangan permukaan lebih dominan dari pada gravitasi. Sehingga, gravitasi tidak

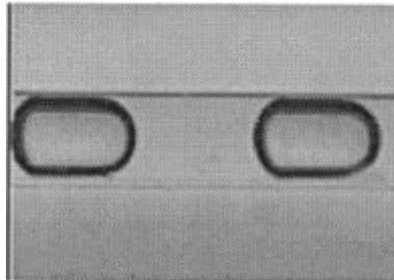
mempengaruhi karakteristik dari aliran pipa mini. Pola aliran yang terbentuk pada penelitian ini adalah *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular* dan *annular*.



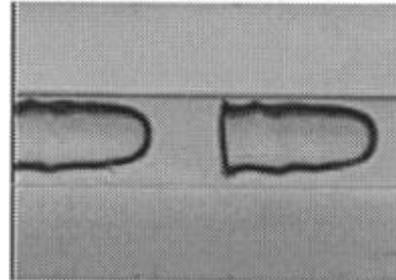
(a)  $J_L = 3,021 \text{ m/s}$  ;  $J_G = 0,083 \text{ m/s}$



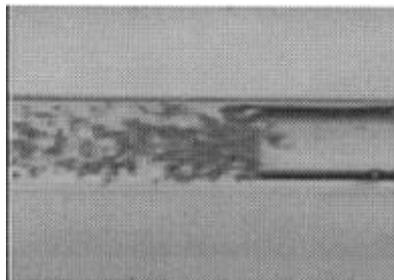
(b)  $J_L = 5,997 \text{ m/s}$  ;  $J_G = 0,396 \text{ m/s}$



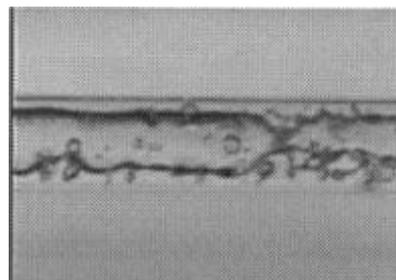
(c)  $J_L = 0,213 \text{ m/s}$  ;  $J_G = 0,154 \text{ m/s}$



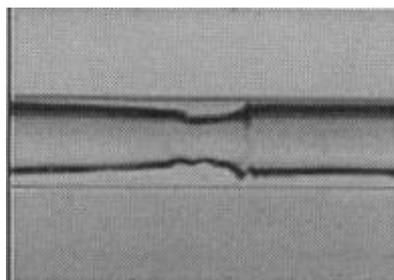
(d)  $J_L = 0,608 \text{ m/s}$  ;  $J_G = 0,498 \text{ m/s}$



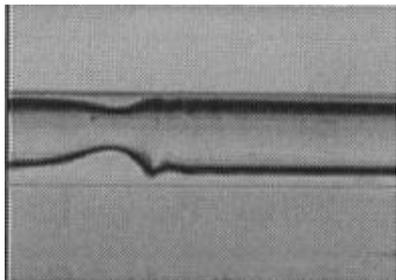
(e)  $J_L = 0,661 \text{ m/s}$  ;  $J_G = 6,183 \text{ m/s}$



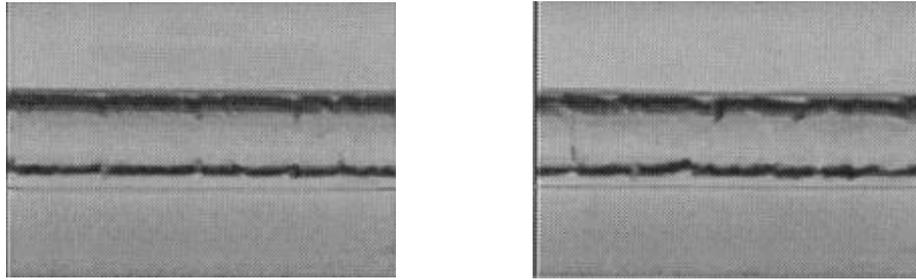
(f)  $J_L = 1,205 \text{ m/s}$  ;  $J_G = 4,631 \text{ m/s}$



(g)  $J_L = 0,043 \text{ m/s}$  ;  $J_G = 4,040 \text{ m/s}$



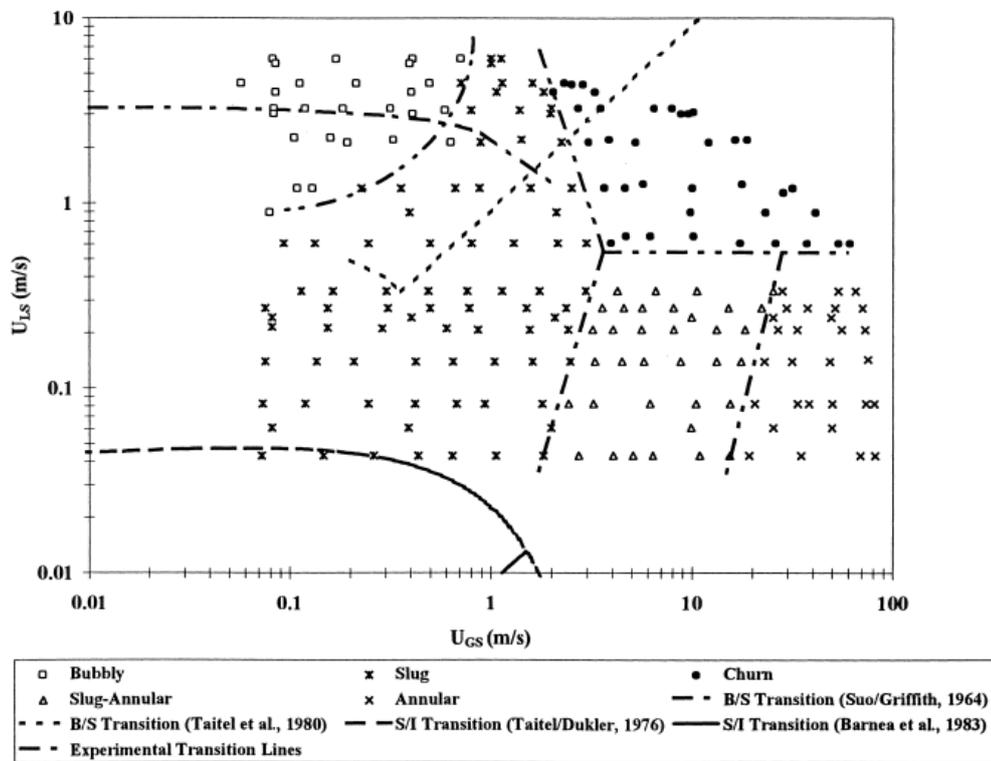
(h)  $J_L = 0,082 \text{ m/s}$  ;  $J_G = 6,163 \text{ m/s}$



(i)  $J_L = 0,082$  m/s ;  $J_G = 73,30$  m/s      (j)  $J_L = 0,271$  m/s ;  $J_G = 70,42$  m/s

**Gambar 2.1** Pola aliran pada *circular microchannels* berdiameter 1,097 mm  
(Triplett dkk., 1999)

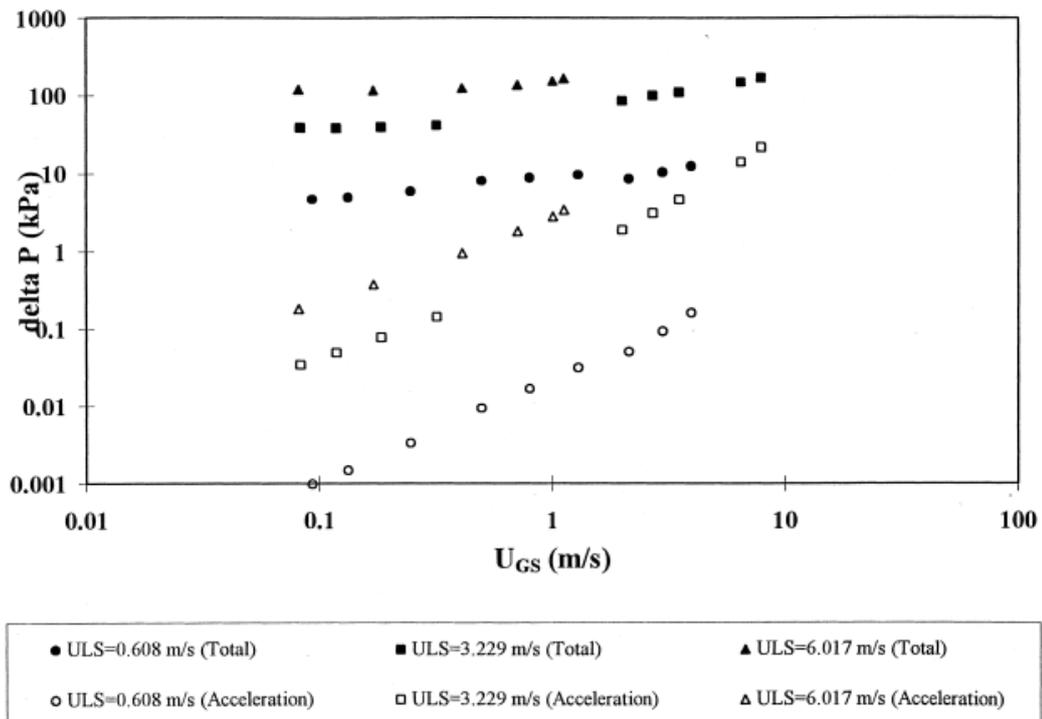
Triplet dkk., (1999) bahwa keluarnya aliran *bubbly* diawali dengan terbentuknya gelembung-gelembung kecil yang tidak sempurna dengan diameter lebih kecil dari diameter *bubbly* yang sempurna. Untuk aliran slug akan muncul ketika kecepatan superfisial udara bersamaan dengan nilai fraksi. Aliran *slug* berbentuk seperti silinder panjang (*elongated bubbly*). Semakin besar kecepatan superfisial udara dan kecepatan superfisial cairan aliran churn muncul bersamaan dengan hancurnya ekor dari *slug* (*elongated bubbly*) dan Pola aliran *slug-annular* dan *annular* akan muncul apabila fluks volumetrik  $J_G$  dan  $J_L$  pada aliran *churn* diturunkan. Berikut adalah pola aliran yang dapat diamati pada penelitian ini seperti pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.2.** Perbandingan peta pola aliran pada *circular microchannels* berdiameter 1,097 mm dengan peta pola aliran peneliti terdahulu. Triplett dkk., (1999)

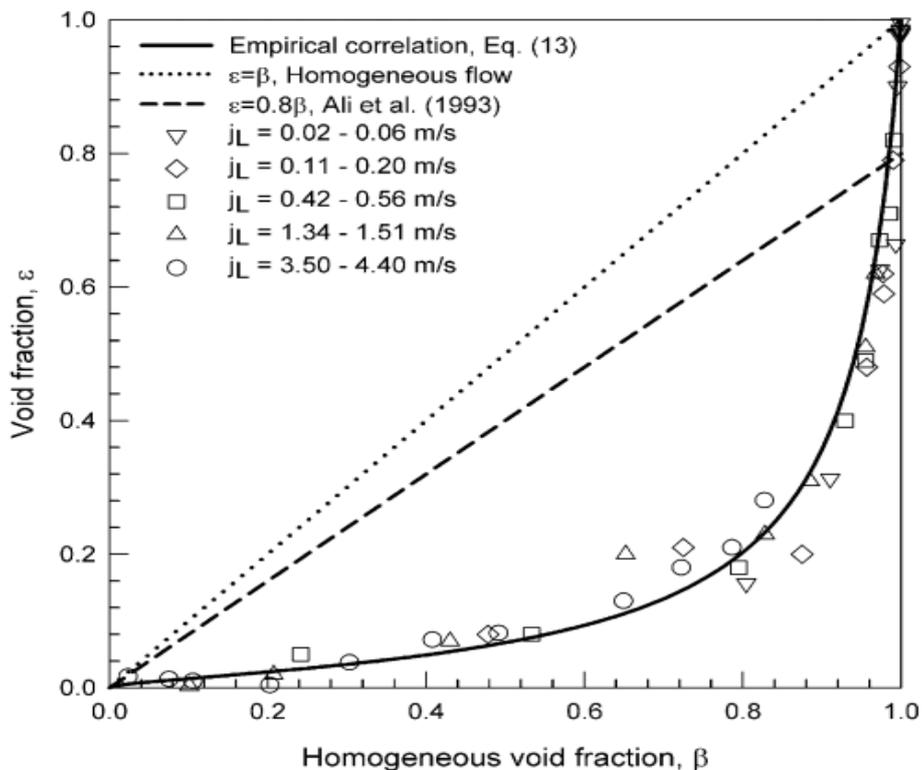
Gambar 2.2 memperlihatkan hasil perbandingan peta pola aliran Triplett dkk., (1999) dengan beberapa peneliti terdahulu yaitu Suo dan Griffith (1964), Fukano dan Kariyasi (1993), Damiandes dan Westwater (1988), Taitel dan Dukler (1976), Barnea dkk., (1983) dan Taitel dkk. (1980).

Triplett dkk., (1999) melakukan penelitian mengenai penurunan tekanan akibat gesekan aliran dua fase pada *microchannels*. Aliran dua fase homogen (*zero slip*) dan model penurunan tekanan homogen menunjukkan prediksi terbaik untuk *microchannels*. Namun penelitian ini belum mampu memprediksi fraksi hampa dan penurunan tekanan gesek pada aliran *annular* dengan akurat. Dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk memahami aliran *annular* pada *microchannels*.



**Gambar 2.3** Perbandingan nilai terukur (total) dan nilai perhitungan dengan asumsi aliran homogen (akselerasi) (Triplet dkk., 1999)

Pada penelitian aliran satu fase dan dua fase dengan fluida kerja yaitu nitrogen-air yang sudah terionisasi menggunakan saluran *fused* silika berdiameter 100  $\mu\text{m}$ . parameter yang digunakan yaitu kecepatan superfisial udara 0,1–60 m/s dan kecepatan superfisial cairan 0,002–4 m/s. Kawahara dkk., (2002) mendapatkan hasil yang dapat diamati pada penelitian ini pola aliran *liquid alone* (*liquid slug*), meningkatnya gradien tekanan gesekan aliran dua fase yang diakibatkan oleh meningkatnya kecepatan gas superfisial ( $J_G$ ) dan kecepatan superfisial liquid ( $J_L$ ). Pada saluran mikro, aliran homogen tidak berhasil menunjukkan data penurunan tekanan dua fase karena perbandingan selip yang didapat sangat besar.

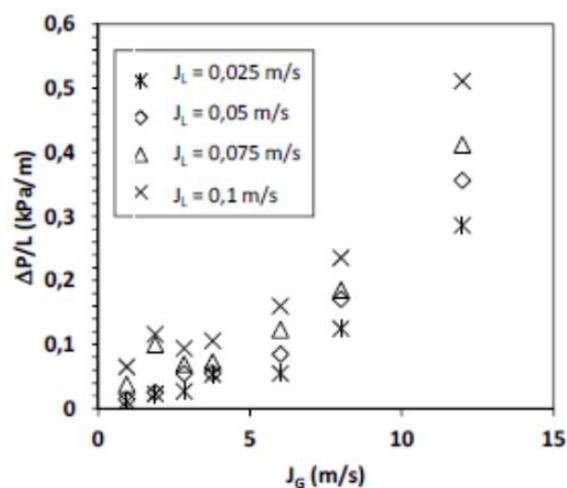


**Gambar 2.4** Hubungan antara pengukuran dengan fraksi hampa homogen  
(Kawahara dkk., 2002)

Gambar 2.4 menunjukkan grafik fraksi hampa yang dihasilkan dari Kawahara dkk, (2002). Mereka melakukan penelitian fraksi hampa yang diukur menggunakan pipa berdiameter 100  $\mu\text{m}$ . Ketika fluida mengalir dengan *flow rate* yang rendah, hasil yang diperoleh didominasi aliran tanpa udara ( $\varepsilon = 0$ ) dan aliran inti gas dengan cairan film halus. Namun, pada saat rata-rata aliran tinggi, terdapat tiga jenis aliran yaitu aliran liquid alone ( $\varepsilon = 0$ ), aliran inti gas dengan film cairan halus-tipis ( $\varepsilon = 1$ ), dan aliran inti gas dengan film cairan halus-tebal ( $0 < \varepsilon < 1$ ).

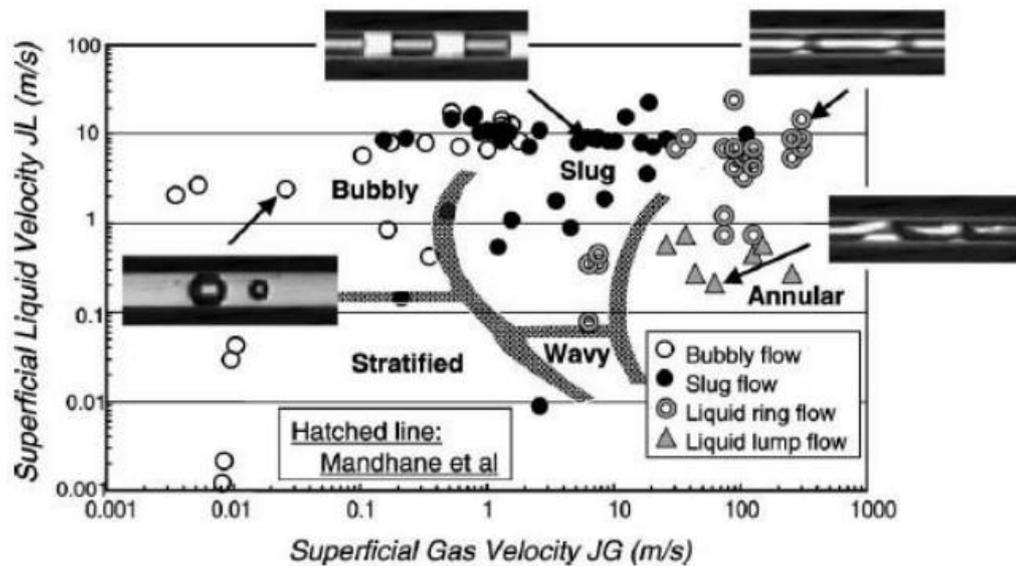
Gunawan dkk., (2015) melakukan eksperimen mengenai tegangan geser antarmuka dan fluktuasi tekanan pada aliran *stratified* air-udara pada pipa horizontal. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dengan visualisasi dan perhitungan beda tekanan pada pipa akrilik dengan diameter dalam 26 mm dan panjang total 9 m. Parameter kecepatan superfisial air adalah 0,025 -

0,1 m/s dan kecepatan superfisial udara 0,94 - 12 m/s. Hasil pada penelitian ini menyimpulkan bahwa semakin besar kecepatan superfisial maka gradien tekanan akan semakin besar juga. Gambar 2.3 menunjukkan pengaruh kecepatan superfisial terhadap nilai gradien tekanan. Ketika kecepatan superfisial gas maupun kecepatan superfisial cairan meningkat maka nilai gradien tekanan akan meningkat juga. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kecepatan superfisial berbanding lurus dengan nilai gradien tekanan.



Gambar 2.3 Grafik gradien tekanan dengan kecepatan superfisial gas  
(Gunawan dkk., 2015)

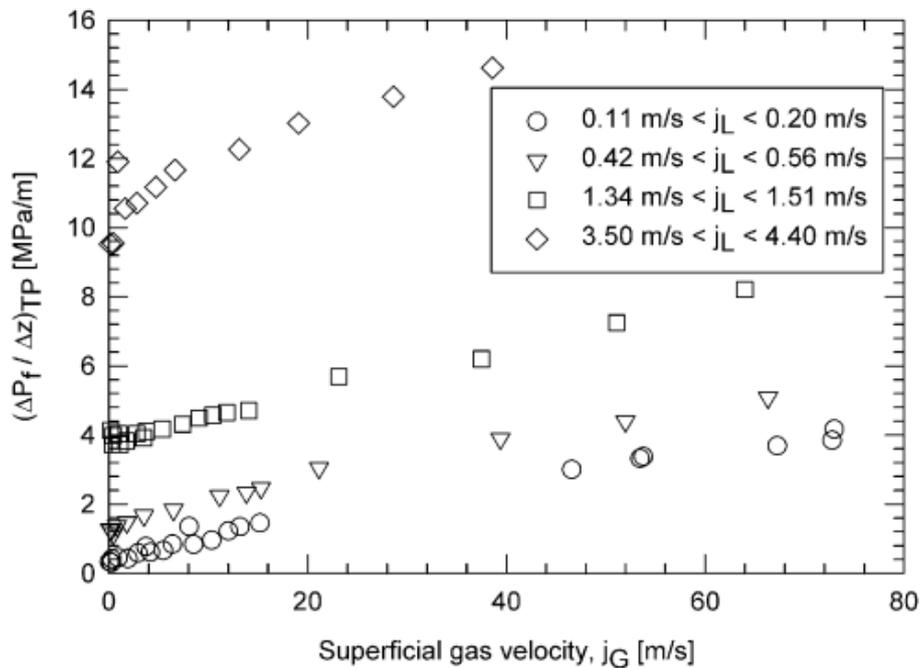
Serizawa dkk., (2002) melakukan penelitian aliran dua fase menggunakan pipa silika dan kuarsa dengan diameter 20, 25, 50 dan 100  $\mu\text{m}$ . Fluida kerja yang digunakan adalah uap air dan udara digunakan sebagai fase gas, sedangkan untuk fase cair digunakan air. Kecepatan superfisial gas adalah 0,0012-295,3 m/s dan kecepatan superfisial cairan adalah 0,003-7,52 m/s. Metode visualisasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah fotografi. Pola aliran yang berhasil diamati pada penelitian ini yaitu dispersed *bubbly*, *gas slug*, *liquid ring*, *liquid pump*, *annular*, *frothy*, *wishphy-annular*, *rivulet*, *liquid droplet bubbly* dan *droplet*.



**Gambar 2.5** Peta pola aliran (Serizawa dkk., 2002)

Dari Gambar 2.5 (Serizawa dkk., 2002) berpendapat bahwa gaya gravitasi tidak terlalu mempengaruhi karakteristik dari pola aliran. Namun menurutnya yang memberikan pengaruh besar adalah tegangan permukaan pipa.

Sukamta dkk., (2019) melakukan penelitian fraksi hampa aliran dua fase udara-air dan gliserin (0-30%) Hasil yang diperoleh bahwa ketika kecepatan gas superfisial tinggi maka, nilai fraksi hampa yang diperoleh akan meningkat, jika semakin tinggi kecepatan cairan superfisial maka nilai fraksi hampa akan mengecil.

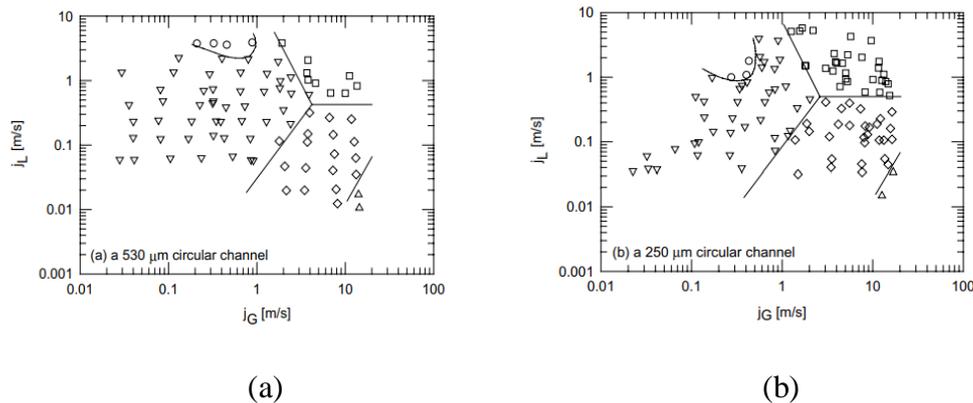


**Gambar 2.6** Data gradien tekanan gesek dua fase (Kawahara dkk., 2002)

Dari Gambar 2.6 menunjukkan hasil data grafik gradien tekanan gesek dua fase. (Kawahara dkk., 2002) melakukan Penelitian ini dengan membandingkan aliran satu fase dan dua fase. Faktor gesekan satu fase dan dua fase diperoleh dari data penurunan tekanan. Pada aliran satu fase terjadi kesesuaian dengan korelasi laminar konvensional. Aliran dua fase berbeda jauh dari aliran homogen, tetapi memiliki korelasi baik dengan model aliran terpisah Lockhart dan Martinelli (1949). Akan tetapi, aliran homogen tidak akan berkorelasi dengan data gradien tekanan aliran dua fase saat ini.

Penelitian yang dilakukan Chung dan Kawaji, (2004) mengenai karakteristik aliran dua fase adiabatik pada *microchannels*. Penelitiannya menggunakan Pipa yang berdiameter dalam 49.5, 100, 250 and 526  $\mu\text{m}$  yang terbuat dari *fused* silika dengan standar *polyimide coating* dari *Polymicro Technologies*. Dengan fluida kerja gas nitrogen dan air karena nitrogen pada saat fase gas tidak larut dalam air. Kecepatan superficial cairan yang digunakan 0,01 – 5,77 m/s, sedangkan kecepatan superficial gas 0,02 – 72,98 m/s. Metode visualisasi digunakan dalam penelitian ini adalah fotografi. Hasil visual

memperlihatkan bahwa ada perbedaan pola aliran pada pipa berdiameter 250 dan 530  $\mu\text{m}$  dengan diameter 100 dan 50  $\mu\text{m}$ . pola yang termati pada 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. Gambar 2.8 menunjukkan peta pola aliran yang terbentuk (Chung dan Kawaji, 2004).

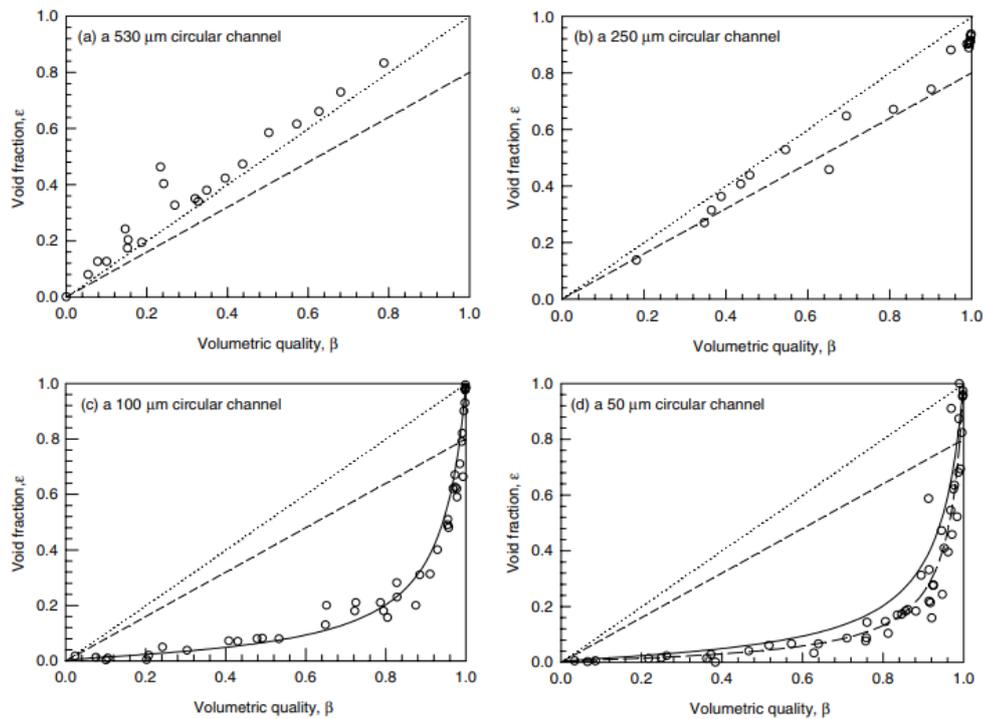


**Gambar 2.7** Peta pola aliran : (a) 530  $\mu\text{m}$  dan (b) 250  $\mu\text{m}$

(Chung dan Kawaji, 2004)

Chung dan Kawaji, (2004) juga melakukan pengukuran tentang fraksi hampa. Metode analisis gambar yang berbeda digunakan untuk membedakan jarak dan rata-rata fraksi hampa dari gambar video antarmuka gas dan cairan. Data fraksi hampa pada aliran 530 dan 250  $\mu\text{m}$  dikurangkan hingga mencapai 300 gambar video setiap kali eksperimen. Fraksi hampa didapatkan dengan mencocokkan batas yang ditempati oleh gas ke bentuk volume simetris dan memperkirakan fraksi dari volume gas.

Gambar 2.8 menjelaskan tentang *time-average* fraksi hampa. Keduanya menunjukkan hubungan antara fraksi hampa dan *volumetric quality*. Fraksi hampa pada aliran 530  $\mu\text{m}$  sesuai dengan model aliran homogen, sedangkan pada aliran 250  $\mu\text{m}$  sedikit berbeda dengan aliran homogen. Akan tetapi, data fraksi hampa pada aliran 100  $\mu\text{m}$  dan 50  $\mu\text{m}$  tidak berkorelasi dengan model aliran homogen dan menunjukkan bahwa antara  $\alpha$  dan  $\beta$  terjadi hubungan tidak linier.



**Gambar 2.8** Hubungan antara fraksi hampa dan *volumetric quality*

(Chung dan Kawaji, 2004)

Wegman, (2005) melakukan penelitian mengenai aliran dua fase dengan fluida kerja cair yaitu air dan parafin, sedangkan fluida kerja gasnya menggunakan udara. Pipa yang digunakan dalam penelitian ini berdiameter 5,6 mm dan 7 mm. Pola aliran yang terbentuk pada pipa 5,6 mm didominasi oleh aliran *intermittent* dan *annular*, sedangkan aliran *stratified* tidak ditemukan sama sekali pada fase air-udara atau fase parafin-udara. Aliran *stratified* terbentuk pada pipa 7 mm dengan kecepatan superfisial air 0,003 m/s dan parafin 0,06 m/s. perbedaan kecepatan superfisial yang terjadi saat membentuk aliran *stratified* karena tegangan permukaan parafin lebih kecil dari tegangan permukaan air.

Pola aliran *stratified* dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Oleh karena itu, pada pipa yang lebih kecil pola aliran *stratified* tidak muncul dan gaya gravitasi juga mempengaruhi massa jenis. Fluida dengan massa jenis yang kecil akan berada di bawah fluida dengan massa jenis yang besar. Perbandingan dari kedua ukuran

pipa pada fase parafin-udara menunjukkan garis transisi yang sama pada pola aliran *intermittent-annular*.

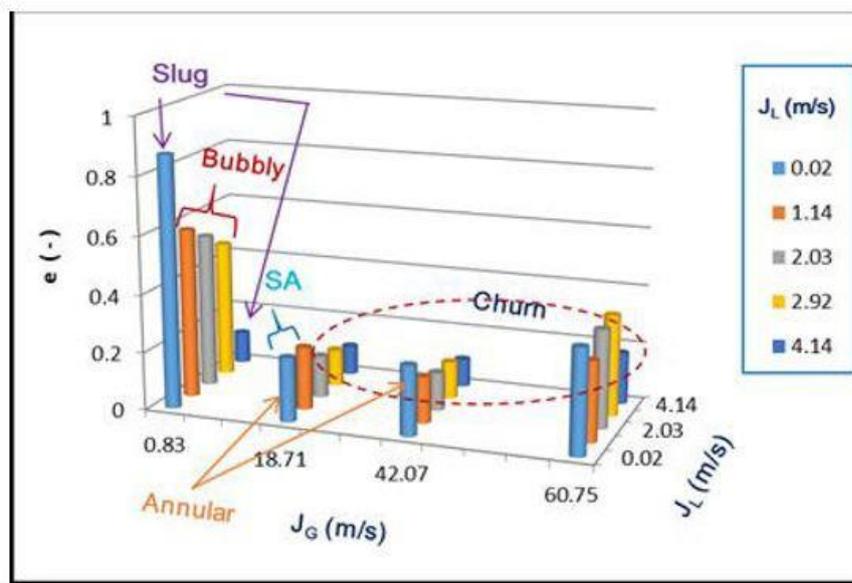
Penelitian aliran dua fase menggunakan pipa berdiameter dalam 100, 180 dan 324  $\mu\text{m}$  telah dilakukan oleh (Sur dan Liu, 2012). Penelitiannya berhasil mendapatkan empat pola aliran yaitu *bubbly*, *slug*, *ring* dan *annular*. Aliran *bubbly* disebut sebagai *dispersed bubbly* tunggal dengan diameter lebih kecil dari diameter dalam pipa. Aliran *slug* sama dengan rangkaian *Taylor Bubbly* yang memanjang dan terpisah oleh gumpalan air. Aliran *ring* dideskripsikan sebagai aliran gas yang mengalir membentuk inti gas yang dikelilingi oleh film seperti cincin. Aliran *annular* adalah aliran gas secara berkelanjutan pada pusat saluran membentuk inti gas yang dikelilingi lapisan air yang stabil.

Pola aliran yang terbentuk pada penelitian ini dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu gaya inersia, tegangan permukaan, viskositas dan gaya gravitasi. Pembentukan pola pada saluran mini dan mikro sangat dipengaruhi oleh tegangan permukaan dan gaya inersia. Tegangan permukaan berpengaruh pada pembentukan pola *bubbly* dan *slug*, sedangkan gaya inersia berpengaruh pada pola aliran *annular*.

Siregar, (2016) melakukan penelitian mengenai pola aliran dua fase udara dan campuran air-butanol pada saluran mini horizontal berdiameter 1,6 mm. Fluida kerja yang digunakan adalah udara untuk fase gas dan air-butanol untuk fase cair dengan konsentrasi (2%, 4% dan 6%). Penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh tegangan permukaan terhadap pola aliran yang terbentuk dan peta pola aliran yang dihasilkan. Parameter kecepatan superfisial yang digunakan untuk gas yaitu 0,066 – 66,2 m/s, sedangkan kecepatan superfisial cairan yaitu 0,033 – 4,193 m/s. Gambar yang diperoleh merupakan hasil visualisasi dari kamera berkecepatan tinggi. Tegangan permukaan memiliki pengaruh terhadap daerah transisi pola aliran yaitu *bubbly-plug*, *plug-slug annular* dan *plug-churn*.

Sudarja dkk., (2015) melakukan penelitian mengenai fraksi hampa denagna seksi uji pipa berdiameter 1,6 mm menggunakan fluida kerja udara dan

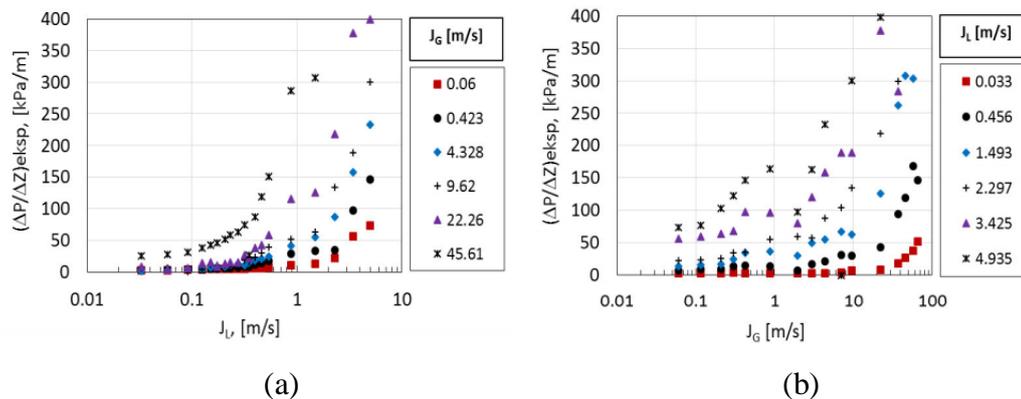
akuades. Penelitian ini dilakukan dengan kondisi adiabatik pada kecepatan superfisial gas 0,83 – 65,4 m/s dan kecepatan. Proses pengambilan data dilakukan dengan cara *image processing* video menggunakan kamera Nikon J4 dengan kecepatan 1200 fps.



**Gambar 2.9.** Pengaruh  $J_G$  dan  $J_L$  terhadap fraksi hampa

Gambar 2.9. menjelaskan pengaruh kenaikan  $J_G$  terhadap nilai fraksi hampa. Namun, pada  $J_G$  rendah pengaruhnya tidak terlalu signifikan pada  $J_G$  tersebut pola yang dihasilkan yaitu *bubbly* dan *plug*.

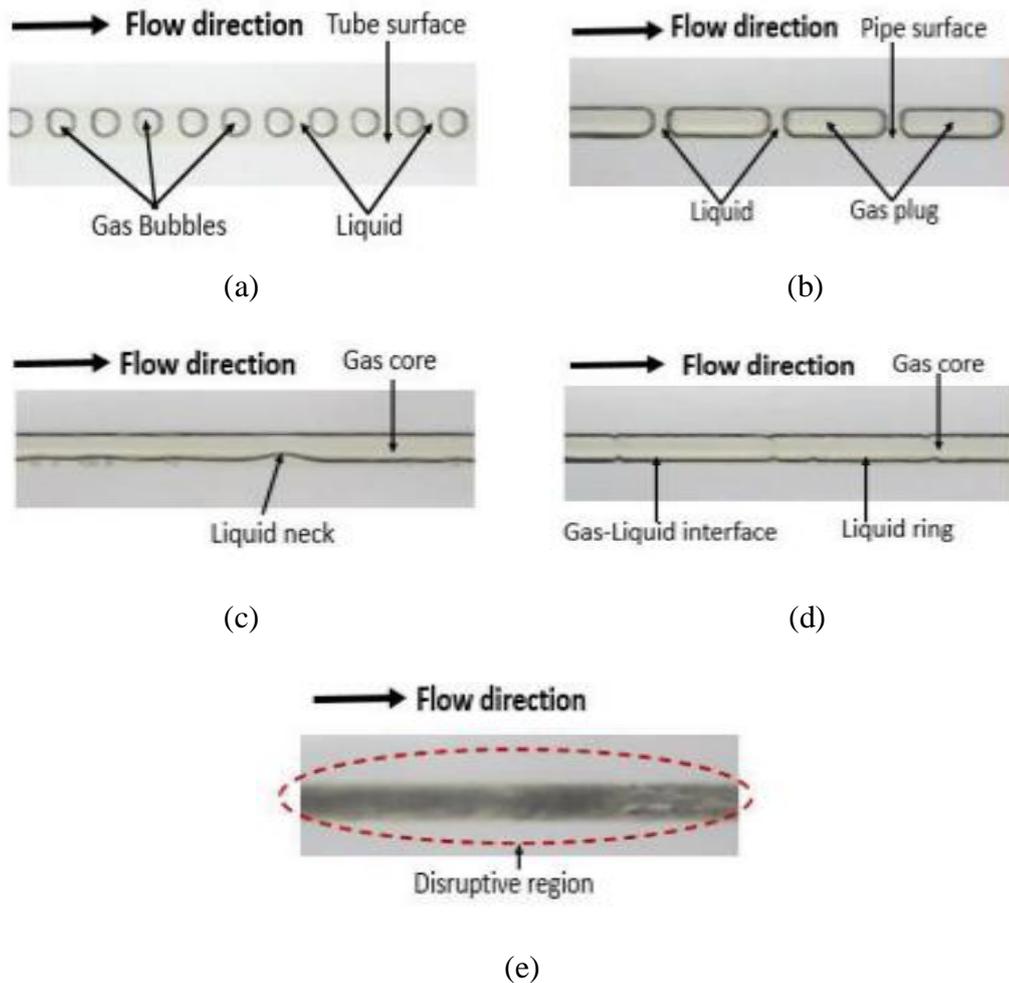
Sudarja dkk., (2016) melakukan penelitian mengenai gradien tekanan aliran dua fase dengan fluida kerja udara dan campuran air-gliserin sebesar 20%. Penelitian ini dilakukan menggunakan pipa berdiameter dalam 1,6 mm. Parameter kecepatan superfisial udara yang digunakan adalah 0,025-66,3 m/s dan kecepatan superfisial campuran 0,033-4,935 m/s. Kecepatan superfisial mempengaruhi nilai gradien tekanan. Semakin besar kecepatan superfisial gas maupun cairan maka semakin besar nilai gradien tekanan. Hal ini sesuai dengan teori dari *total volumetric flux*. Dibandingkan dengan prediksi dengan model homogen, penelitian ini memiliki kesesuaian yang kurang baik. Hal ini terjadi karena pola aliran yang terbentuk bukan aliran homogen. Data prediksi penelitian ini berkorelasi baik dengan penelitian Mishima Hibiki (1996).



**Gambar 2.10** (a) Pengaruh  $J_L$  terhadap gradien tekanan pada berbagai  $J_G$ , (b) Pengaruh  $J_G$  terhadap gradien tekanan pada berbagai  $J_L$  (Sudarja dkk., 2016)

Gambar 2.10 menunjukkan pengaruh kecepatan superfisial terhadap gradien tekanan. Disimpulkan pada penelitian ini kecepatan superfisial gas maupun cairan sangat mempengaruhi nilai gradien tekanan. Dapat dilihat bahwa kenaikan kecepatan superfisial gas maupun cairan berbanding lurus dengan kenaikan nilai gradien tekanan.

Sudarja dkk., (2018) melakukan penelitian aliran dua fase menggunakan pipa berdiameter 1,6 mm. fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah udara dan campuran akuades-gliserin dengan konsentrasi (0%, 20%, 40% dan 60%). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari viskositas dan tegangan permukaan terhadap terbentuknya pola aliran. Pola aliran didapatkan dengan mengatur parameter kecepatan superfisial udara dan cairan. Kecepatan superfisial udara yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,008-64,42 m/s, sedangkan kecepatan superfisial cairannya adalah 0,002-3,09 m/s. Pola aliran diperoleh dengan mengolah gambar video yang ditangkap menggunakan kamera berkecepatan tinggi. Hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.11.

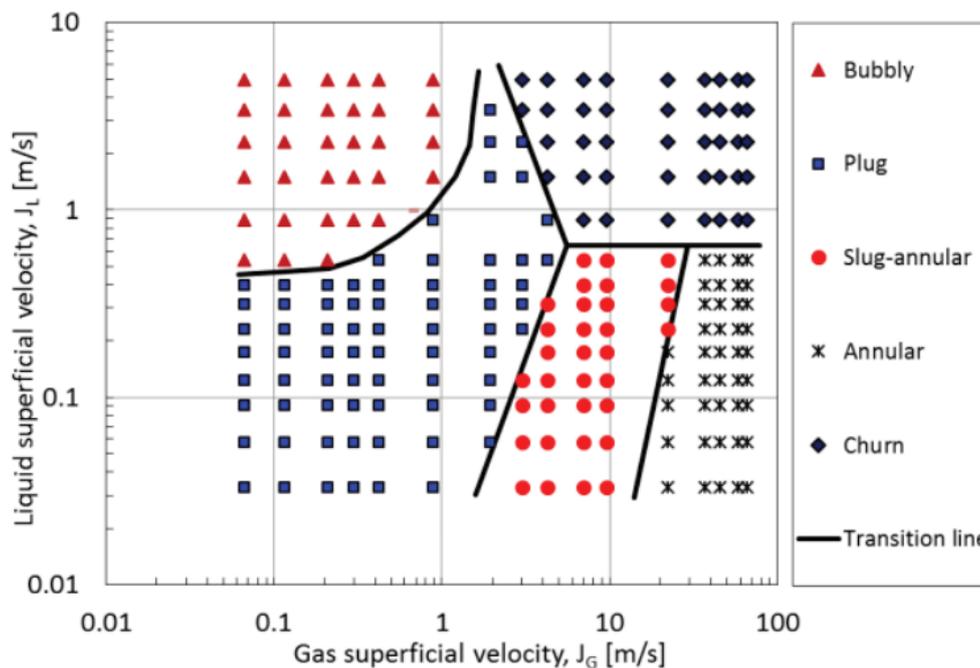


**Gambar 2.11** Pola aliran pada konsentrasi gliserin 60% :

(a) *Bubbly*:  $J_G = 0,116$  m/s ;  $J_L = 0,539$  m/s, (b) *Plug*:  $J_G = 0,116$  m/s ;  $J_L = 0,033$  m/s, (c) *Slug-annular*:  $J_G = 9,62$  m/s ;  $J_L = 0,091$  m/s, (d) *Annular*:  $J_G = 66,2$  m/s ;  $J_L = 0,149$  m/s dan (e) *Churn*:  $J_G = 22,26$  m/s ;  $J_L = 2,297$  m/s.

(Sudarja dkk., 2018)

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan pengamatan visual menggunakan kamera Nikon J4. Hasil pola aliran yang berhasil diamati yaitu *bubbly*, *plug*, *slug-annular*, *annular* dan *churn*. Penelitian ini menunjukkan bahwa viskositas dan tegangan permukaan berpengaruh terhadap transisi pola aliran yang terbentuk. Gambar 2.12 memperlihatkan peta pola aliran yang berhasil diamati.



**Gambar 2.12** Peta pola aliran konsentrasi gliserin 60% (Sudarja dkk., 2018)

Penelitian terdahulu memiliki metode dan variasi yang berbeda-beda. Perbedaan jenis pipa, fluida kerja, orientasi aliran dan parameter kecepatan superfisial menyebabkan banyaknya perbedaan dalam mendefinisikan karakteristik aliran dua fase. Namun, dapat disimpulkan bahwa gravitasi tidak berpengaruh terhadap aliran dua fase pada *minichannels* dan *microchannels*. Tegangan permukaan dan viskositas sangat berpengaruh terhadap karakteristik aliran dua fase, tetapi penelitian mengenai *minichannels* dan *microchannels* masih sedikit. Maka dari itu penelitian aliran dua fase pada *minichannels* dan *microchannels* perlu dilakukan.

## 2.2. Landasan Teori

### 2.2.1. Aliran Dua Fasa

Fase merupakan wujud dari suatu zat seperti cair, padat dan gas. *Phase* di bedakan menjadi dua bagian yaitu aliran *single phase* dan *multiphase*. Aliran *single phase* adalah kondisi dimana aliran yang mengalir hanya terdapat satu fase,

sedangkan *multi phase* adalah kondisi dimana beberapa fase mengalir secara bersamaan. Bagian paling sederhana dari aliran *multi fase* adalah aliran dua fase yaitu ketika suatu aliran hanya terdapat dua fase yang mengalir. Fase yang mengalir pada aliran dua fase dapat berupa cair-padat, gas-padat dan cair-gas.

Aliran dua fase dapat digolongkan dalam beberapa jenis yaitu arah aliran, orientasi saluran dan ukuran saluran. Berdasarkan arah aliran digolongkan menjadi aliran searah dan aliran lawan arah. Berdasarkan orientasi saluran digolongkan menjadi aliran horizontal, vertikal dan kemiringan sudut tertentu. Kandiklar dan Grande, (2002) berdasarkan ukuran salurannya digolongkan menjadi beberapa jenis sesuai dengan ukuran diameternya yaitu *conventional channels* ( $D > 3 \text{ mm}$ ), *minichannels* ( $3 \text{ mm} > D > 200 \mu\text{m}$ ), *microchannels* ( $200 \mu\text{m} > D > 10 \mu\text{m}$ ), *transisional channels* ( $10 \mu\text{m} > D > 0,1 \mu\text{m}$ ) dan *molecular nanochannels* ( $0,1 \mu\text{m} > D$ ).

### 2.2.2. Tegangan Permukaan

Tegangan permukaan adalah gaya antar molekul yang saling berhubungan pada fluida. Gaya tarik yang terjadi pada antar muka cairan dapat diketahui ketika cairan berada pada pipa kapiler atau dalam bentuk tetesan kecil, semakin besar molekul cairan maka semakin besar juga tegangan permukaannya. Jenis cairan, massa jenis, suhu, tekanan, kerapatan dan konsentrasi zat terlarut sangat mempengaruhi tegangan permukaan. Cairan butanol memiliki tegangan permukaan yang lebih kecil dari pada air. Sehingga, memungkinkan untuk melakukan variasi tegangan permukaan untuk mendapatkan data yang diinginkan.

Tegangan permukaan terjadi karena permukaan zat cair cenderung untuk menegang sehingga permukaannya tampak seperti selaput tipis. Hal ini dipengaruhi oleh adanya gaya kohesi antara molekul air. Agar semakin memahami penjelasan ini, perhatikan ilustrasi berikut. Kita tinjau cairan yang berada di dalam sebuah wadah.

Molekul cairan biasanya saling tarik menarik. Di bagian dalam cairan, setiap molekul cairan dikelilingi oleh molekul-molekul lain di setiap sisinya; tetapi di

permukaan cairan, hanya ada molekul-molekul cairan di samping dan di bawah. Di bagian atas tidak ada molekul cairan lainnya. Karena molekul cairan saling tarik menarik satu dengan lainnya, maka terdapat gaya total yang besarnya nol pada molekul yang berada di bagian dalam cairan. Sebaliknya, molekul cairan yang terletak di permukaan ditarik oleh molekul cairan yang berada di samping dan bawahnya. Akibatnya, pada permukaan cairan terdapat gaya total yang berarah ke bawah. Karena adanya gaya total yang arahnya ke bawah, maka cairan yang terletak di permukaan cenderung memperkecil luas permukaannya, dengan menyusut sekuat mungkin.

Hal ini yang menyebabkan lapisan cairan pada permukaan seolah-olah tertutup oleh selaput elastis yang tipis. Fenomena ini kita kenal dengan istilah Tegangan Permukaan.

Ketika klip diletakan secara hati-hati ke atas permukaan air, molekul-molekul air yang terletak di permukaan agak ditekan oleh gaya berat klip tersebut, sehingga molekul-molekul air yang terletak di bawah memberikan gaya pemulih ke atas untuk menopang klip tersebut (ingat kembali elastisitas).

Dalam kenyataannya, bukan hanya klip alias penjepit kertas, tetapi juga bisa benda lain seperti jarum. Apabila kita meletakan jarum secara hati-hati di atas permukaan air, maka jarum akan terapung. Adanya tegangan permukaan cairan juga menjadi alasan mengapa serangga bisa mengapung di atas air.

### 2.2.3. Butanol

Butanol adalah alkohol yang memiliki 4 atom karbon. Wujud fisik dan baunya mirip dengan etanol, yaitu alkohol dengan 2 atom karbon yang sering kita temukan sebagai larutan pensteril, pelarut, atau sebagai campuran bensin. Saat ini, peran utama produk butanol adalah sebagai pelarut cat, resin, dan produk antara untuk polimer (antara lain butiraldehida, asam butirat, butena, butadiena). Butanol, dengan karakteristik yang dimilikinya, dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar mesin nonpremix (mesin bensin). Adapun sifat-sifat butanol sebagai berikut :

Tabel 2.1 Sifat-sifat butanol

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Berat molekul	74,12 kg/kmol
2	Titik didih 1 atm	117,73 °C
3	Titik lebur	-89,30 °C
4	Viskositas	2,95 cp
5	<i>Specific heat</i>	2,3362 cal/g.20°C
6	Temperatur kritis	287,00 °C
7	Tekanan kritis	48,40 atm
8	Densitas	810,00 kg/m <sup>3</sup> , 20 °C

#### 2.2.4. Kecepatan Superfisial

Kecepatan superfisial didefinisikan sebagai rasio dari laju aliran massa volumetrik dengan luas penampang pipa (*cross section area*). Kecepatan superfisial diperoleh dari hitungan hipotesis mengenai kecepatan aliran. Untuk mendapatkan kecepatan superfisial diperlukan variabel sebagai berikut.

1. Kecepatan superfisial gas ( $J_G$ ) (2.1)

$$J_G = \frac{Q_G}{A}$$

2. Kecepatan superfisial cairan ( $J_L$ ) (2.2)

$$J_L = \frac{Q_L}{A}$$

Keterangan :

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

$J_L$  = Kecepatan superficial cairan (m/s)

$Q_G$  = Laju aliran gas dalam pipa (m<sup>3</sup>/s)

$Q_L$  = Laju aliran cairan dalam pipa (m<sup>3</sup>/s)

$A$  = Luas penampang pipa (m<sup>2</sup>)

### 2.2.5. Pola Aliran

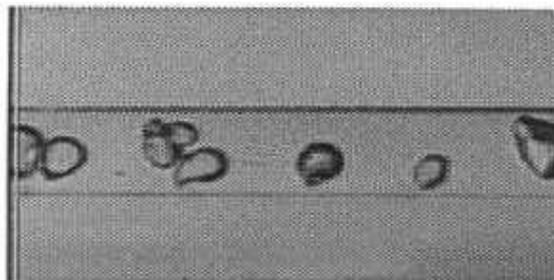
Pola aliran (*flow regime*) merupakan hal yang penting untuk menentukan karakteristik aliran. Dari hubungan yang saling terkait antara campuran gas-cairan menentukan penyelesaian model analisa atau korelasi yang dibutuhkan. Penelitian mengenai pola aliran dua fase masih sangat luas. Banyak ilmu yang perlu didapatkan untuk menjelaskan perilaku pola aliran dua fase dengan pasti.

Kecepatan superfisial gas, cairan dan viskositas sangat mempengaruhi bentuk dari pola aliran. Pola aliran dua fase pada pipa *minichannels* horizontal pada umumnya memiliki beberapa pola yaitu *bubbly*, *plug*, *slug-annular*, *annular* dan *churn*. Namun beberapa penelitian hasilnya berbeda-beda dikarenakan metode yang digunakan juga tidak sama.

Seperti yang dilakukan Triplett dkk. (1999) meneliti tentang pola aliran dua-fasa pada pipa sirkular berdiameter 1,1 mm dan 1,45 mm serta pipa semi-triangular. Fluida yang digunakan adalah udara dan air. Mereka melakukan variasi kecepatan superfisial gas antara 0,02 sampai 80 m/s dan kecepatan superfisial cairan antara 0,02 sampai 8 m/s. Dari pengamatan yang dilakukan didapatkan beberapa pola aliran, antara lain *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular*, dan *annular*. Berikut beberapa jenis pola aliran dua fase pada pipa horizontal.

#### a. *Bubbly Flow*

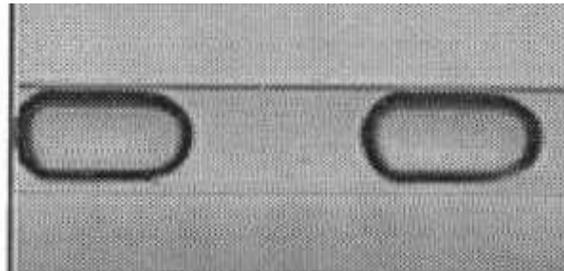
*Bubbly flow* merupakan pola aliran yang berbentuk gelembung yang didominasi oleh cairan. Terbentuk pada saat nilai  $J_G$  sangat kecil dan nilai  $J_L$  lebih besar dibandingkan nilai  $J_G$ .



**Gambar 2.13.** Pola aliran *bubbly* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999)

*b. Plug Flow*

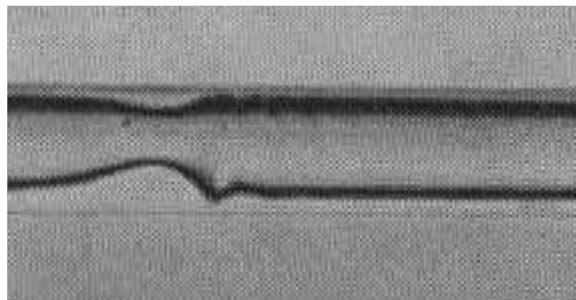
*Plug flow* merupakan pola aliran yang berbentuk seperti peluru, dimana antara cairan terdapat kantong udara yang berasal dari *bubbly* yang diperpanjang akibat meningkatnya intensitas udara dalam aliran.



**Gambar 2.14.** Pola aliran *slug* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999).

*c. Slug Annular*

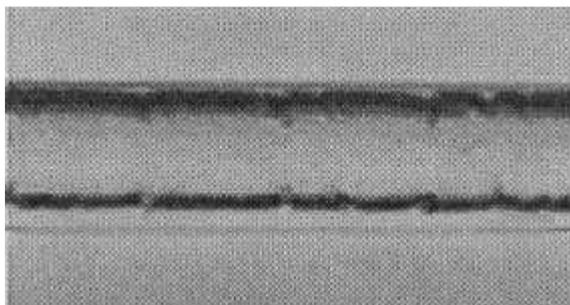
Pola aliran *slug annular* memiliki struktur dimana lapisan film cairan yang memiliki ketebalan lebih besar pada suatu titik dibanding titik lainnya disepanjang aliran tersebut.



**Gambar 2.15.** Pola aliran *slug annular* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999).

*d. Annular Flow*

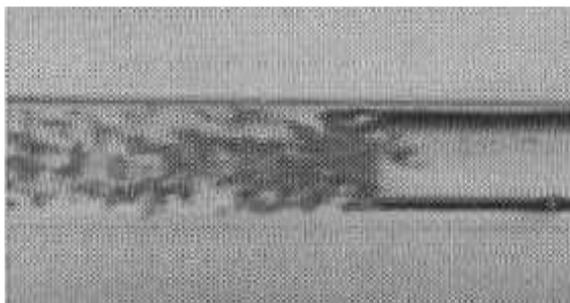
Pola aliran *annular* memiliki struktur dimana fasa air terletak mengelilingi saluran dan fasa udara berada di tengah-tengah fasa air.



**Gambar 2.16.** Pola aliran *annular* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999)

e. *Churn Flow*

Pola aliran *churn* terbentuk saat selisih antara nilai  $J_G$  dan  $J_L$  cukup besar. Aliran *churn* merupakan terusan dari aliran slug tetapi pada ekornya terbentuk aliran yang tidak beraturan.



**Gambar 2.17.** Pola aliran *churn* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999)

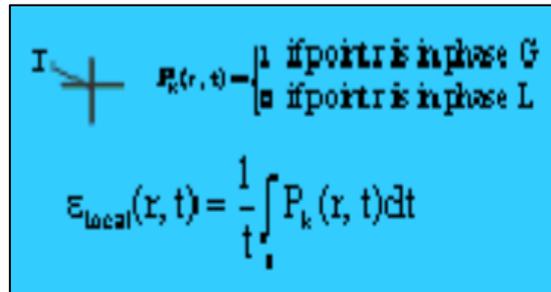
#### 2.2.6. Fraksi Hampa

Fraksi hampa (*Void fraction*) adalah salah satu parameter yang di gunakan untuk menentukan karakteristik dari aliran dua faase. Dengan fraksi hampa kita dapat menentukan parameter lainnya seperti densitas dua fase, viskositas dua fase, kecepatan rata-rata, penurunan tekanan, koefisien perpindahan panas. Terdapat empat metode untuk mendefinisikan fraksi hampa, yaitu :

1. Metode *Local*

Metode *local* digunakan ketika mengacu pada sebuah titik atau volume yang sangat kecil saat diukur secara eksperimental. Local timeaverage didefinisikan sebagai berikut. Dengan  $\varepsilon_{local} = 0$  ketika fase cair dan  $\varepsilon_{local} = 1$  ketika fase uap. Biasanya, pengambilan *local*

*timeaverage* fraksi hampa dihitung menggunakan *miniature probe* yang mewakili waktu penguapan fraksi. Jika  $P_k(r, t)$  mewakili adanya uap *local instantaneous* di beberapa *radius*  $r$  dari tengah saluran pada waktu  $t$ . Jadi,  $P_k(r, t) = 0$  ketika fase cair dan  $P_k(r, t) = 1$  ketika fase uap. Gambar 2.18 menunjukkan skema fraksi hampa *local* (thome, 2004).

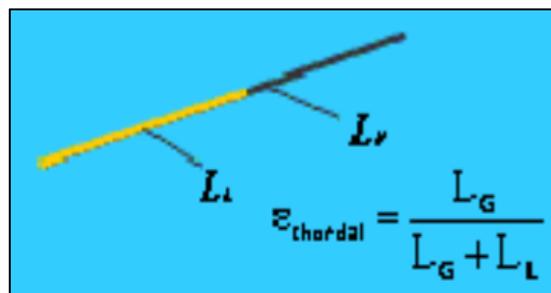


The diagram shows a vertical probe with a cross-section labeled 'I'. To its right, the function  $P_k(r, t)$  is defined as 1 if the point is in phase G and 0 if the point is in phase L. Below this, the equation for local void fraction is given as  $\epsilon_{local}(r, t) = \frac{1}{t} \int_{t_1}^t P_k(r, t) dt$ .

**Gambar 2.18.** Fraksi hampa *local* (thome, 2004)

## 2. Metode Chordal

Metode chordal didasarkan pada perbandingan fase gas di dalam pipa terhadap panjang total pipa yang ditinjau Dengan  $L_G$  adalah Panjang fase gas, sedangkan  $L_L$  adalah Panjang fase cairan. Gambar 2.19 menunjukkan Skema fraksi hampa *chordal*.



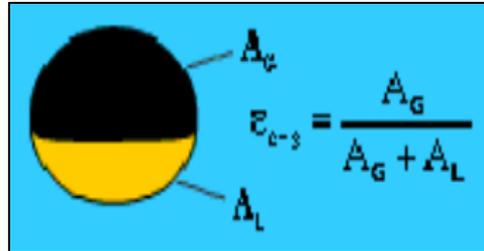
The diagram shows a diagonal probe through a pipe. The length of the gas phase is labeled  $L_G$  and the length of the liquid phase is labeled  $L_L$ . The equation for chordal void fraction is  $\epsilon_{chordal} = \frac{L_G}{L_G + L_L}$ .

**Gambar 2.19.** Skema fraksi hampa *chordal* (Thome, 2004)

## 3. Metode *Cross-Section*

Fraksi hampa *cross-section* merupakan metode membandingkan luas penampang fase terhadap luas penampang pipa untuk mendapatkan nilai fraksi hampa. Fraksi hampa *cross-section* didefinisikan sebagai berikut. Dimana  $A_G$  adalah area dari *cross-section* pada saluran yang

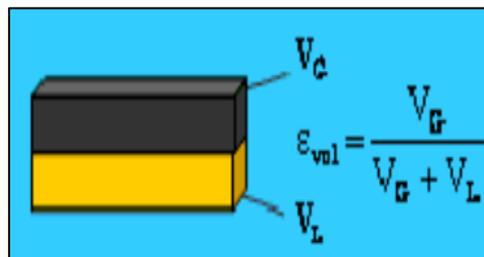
merupakan luasan gas dan  $A_L$  merupakan luasan dari cairan. Gambar 2.20 menunjukkan skema fraksi hampa *cross-section*.



**Gambar 2.20.** Fraksi hampa *cross-section* (Thome, 2004)

#### 4. Metode Volumetrik

Fraksi hampa volumetrik merupakan metode yang digunakan untuk menentukan fraksi hampa dengan menggunakan sepasang quickclosing valve sepanjang saluran untuk menangkap fluida dua fase secara cepat. Fraksi hampa volumetrik didefinisikan sebagai berikut. Dimana  $V_G$  adalah volume dari saluran yang ditempati oleh fase gas dan  $V_L$  merupakan volume fase cair. Gambar 2.21 menunjukkan skema fraksi hampa volumetrik.



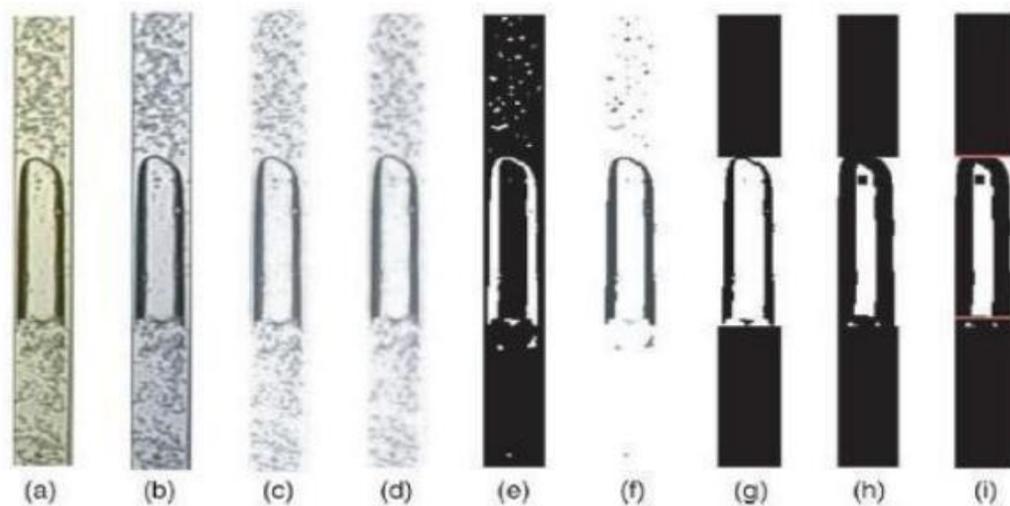
**Gambar 2.21.** Fraksi hampa volumetrik (Thome, 2004)

#### 2.2.7. Digital Image Processing

Metode yang di gunakan oleh (Triplett dkk., 1999). Mereka menggunakan *digital image processing* guna untuk mendapatkan nilai fraksi hampa dengan mengambil gambar aliran menggunakan kamera berkecepatan tinggi kemudian diolah untuk mendapatka karakteristik aliran, pola aliran dan topologi aliran.

Metode ini mampu meneliti tentang karakteristik aliran pada minichannels. Untuk mendapatkan gambar yang baik, lensa makro digunakan untuk memperbesar gambar yang ditangkap dari saluran. Pengolahan gambar

dilakukan dengan menggunakan MATLAB karena MATLAB merupakan software yang cukup mudah dan memiliki produktifitas yang tinggi dikalangan *engineers* dan *scientists*.



**Gambar 2.22.** *Digital Image processing* (Mayor dkk., 2007)

Gambar 2.22 adalah langkah-langkah yang digunakan untuk mendapatkan nilai fraksi hampa dengan menggunakan metode *digital image processing*. Berikut adalah istilah-istilah pada *digital image processing*.

### 1. Image

*Image* atau gambar adalah suatu representasi dari suatu objek. *Image* dibedakan menjadi dua yaitu *analog image* dan *digital image*. *Analog image* merupakan gambar yang divisualisasikan dengan berkelanjutan seperti televisi. Sedangkan, *digital image* merupakan gambar yang dapat diolah menggunakan software untuk berbagai tujuan. *Digital image* merupakan fungsi  $f(x,y)$  dari intensitas cahaya dimana  $x$  dan  $y$  adalah koordinat. Sedangkan, nilai  $f$  adalah intensitas atau tingkatan warna pada gambar.

#### a. Gambar RGB

Gambar RGB adalah image yang terdiri dari tiga matriks yang masing-masing mempresentasikan warna merah, hijau dan biru. Gambar 2.23 merupakan gambar RGB yang pada setiap piksel mempunyai nilai

tertentu dengan range 0-255 sehingga mempunyai kemungkinan 16,777,216 warna.



**Gambar 2.23.** Contoh gambar RGB dengan aliran *plug*

b. Gambar *Greyscale*

Gambar *grayscale* merupakan gabungan beberapa komponen dengan nilai yang sama untuk membentuk gambar RGB. Gambar *greyscale* didominasi oleh warna abu-abu, hitam dan putih dengan rentang 0-255. Nilai abu-abu berada pada rentang 0-255, hitam pada rentang 0 dan putih pada rentang 255. Gambar 2.24 merupakan gambar *greyscale* dari aliran *plug*.



**Gambar 2.24.** Contoh gambar *greyscale* dengan aliran *plug*

c. Gambar Biner

Gambar biner adalah gambar yang pada setiap pikselnya hanya mempunyai dua kombinasi warna yaitu hitam dan putih, yang mana nilai 0 berarti hitam dan nilai 1 yang berarti warna putih. Setiap piksel pada gambar biner hanya membutuhkan 1 bit sehingga menghemat penyimpanan ruang data. Gambar 2.25 menunjukkan contoh gambar biner.



**Gambar 2.25.** Contoh gambar biner dengan aliran *plug*

2. *Noise*

*Noise* adalah gangguan pada gambar yang terjadi karena piksel yang muncul akibat kurangnya cahaya mengganggu kualitas gambar yang mengurangi keakuratan data. Berdasarkan hal tersebut, perlu dilakukan *image processing* untuk mendapatkan gambar yang dibutuhkan. Berikut ini adalah beberapa jenis dari *noise*.

a. *Coherent Noise*

*Noise* ini terjadi akibat gangguan sinyal pada alat yang digunakan untuk mengambil gambar sehingga gambar yang dihasilkan kurang akurat.

b. *Fixed-location Noise*

*Fixed-location noise* merupakan *noise* yang terjadi ditempat yang sama. *Noise* ini dapat dihilangkan dengan mengganti piksel *noise* dengan piksel di sekitarnya yang tidak terdapat *noise*.

c. *Salt-and-pepper Noise*

*Noise* ini juga disebut shout noise, impulse noise atau binary voice. *Noise* ini terjadi karena kesalahan dalam data transmisi dimana terdapat titik-titik kecil pada gambar.

3. *Filtering*

*Filtering* adalah proses untuk menghilangkan *noise* yang dapat mengganggu kualitas gambar agar gambar tersebut dapat diolah dengan baik. Proses *filtering* yang biasa digunakan ada tiga sebagai berikut.

a. *Mean Filtering*

Prinsip dari proses filter ini adalah mengganti setiap piksel dengan rata-rata nilai dari piksel tersebut dan piksel-piksel di sekitarnya.

b. *Median Filtering*

Prinsip dari *median filtering* yaitu mengganti setiap nilai piksel dengan nilai tengah dari piksel tersebut dengan piksel disekitarnya. Piksel tersebut disusun dengan piksel-piksel disekitarnya sehingga dapat diketahui nilai tengahnya. *Median filtering* mampu memberikan detail yang lebih baik.

c. *Gaussian Filtering*

*Gaussian filtering* sering digunakan untuk mempermudah menganalisis gambar seperti menghaluskan gambar dan menghilangkan *noise*. Pada *filtering* ini, nilai setiap piksel diganti dengan rata-rata nilai pembobotan dari nilai piksel tersebut dengan piksel di sekitarnya.

#### 4. Metode Analisis Statistik

Analisis yang menggunakan statistik untuk mengekstrak data mentah dari pembacaan sinyal menjadi informasi sederhana. Metode analisis statistik dapat mengetahui fraksi hampa terhadap  $J_G$  dan  $J_L$  dan nilai rata-ratanya. Jenis perhitungan statistik yang digunakan antara lain *mean value*, *Probability Distribution Function* (PDF), *Power Spectral Density* (PSD) dan *cross-correlation*.

##### a. *Mean Value*

Data fraksi hampa pada kecepatan superfisial gas ( $J_G$ ) dan kecepatan superfisial liquid ( $J_L$ ) yang bervariasi akan diplot menjadi sebuah grafik dan diambil nilai rata-ratanya. Untuk mengetahui pengaruh perubahan  $J_G$  dan  $J_L$  terhadap fraksi hampa, juga akan dilakukan pengambilan sebanyak ( $n$ ) data dalam sekian detik lalu diambil rata-ratanya.

##### b. *Probability Distribution Function* (PDF)

PDF digunakan untuk menentukan sebaran nilai yang keluar diukur. Fungsi ini sering digunakan untuk menggambarkan perilaku suatu distribusi probabilitas teoritis dan nilai fraksi hampa.

##### c. *Power Spectral Density* (PSD)

*Power spectral density* yang menunjukkan kekuatan dari variasi sebagai fungsi dari frekuensi. Perhitungan PSD dilakukan dengan cara menggunakan metode FFT (*Fast fourier transform*).

##### d. *Cross-Correlation*

*Cross-correlation* dapat digunakan untuk menghitung kecepatan *bubbly* dan *plug*. Pengukuran dengan cara membuat dua titik referensi pada jarak tertentu sehingga terdapat jeda waktu saat *bubbly* atau *plug* melewati kedua titik referensi tersebut yang dapat diketahui selang waktunya. Dalam statistik, korelasi antara dua variabel dapat digambarkan sebagai nilai numerik. Kata-kata positif, negatif, kuat,

dan langsung sering digunakan sebagai pengubah sebelum korelasi dalam konteks ini. Statistik korelasi *intraclass* atau *Intraclass Correlation Coefficient* (ICC), adalah statistik deskriptif yang dapat digunakan ketika kuantitatif pengukuran yang dibuat pada unit yang tergabung dalam kelompok. Hal tersebut menggambarkan seberapa kuat unit dalam kelompok yang sama mirip satu sama dengan yang lain.

#### 2.2.8. Gradien Tekanan

penurunan tekanan (*pressure drop*) adalah penurunan tekanan yang terjadi pada dua titik didalam pipa per satuan panjang sepanjang kedua titik tersebut. Aliran fluida terjadi karena adanya tekanan pada saluran pipa. tetapi tekanan pada saluran tidak sama karena adanya penurunan tekanan. *Spesific gravity* dari fluida akan mempengaruhi penurunan tekanan total seperti energi kinetik dan potensial fluida. Selain itu bisa juga diakibatkan adanya gesekan antara fluida dan dinding saluran. Berikut persamaan dari penurunan tekanan total  $\Delta P_{\text{total}}$

Perbedaan tekanan pada sisi *inlet* dan *outlet* seksi uji diukur dengan menggunakan *pressure transducer* yang kemudian disalurkan ke data akuisisi. Data akuisisi mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital yang kemudian akan dibaca oleh komputer. Data yang sudah diperoleh kemudian diolah untuk mendapatkan *pressure drop* dan gradien tekanan.