

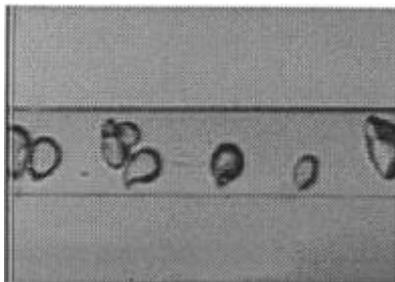
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

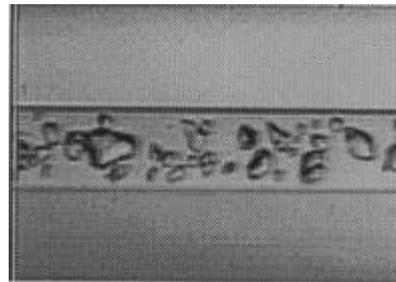
2.1 Tinjauan Pustaka

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.

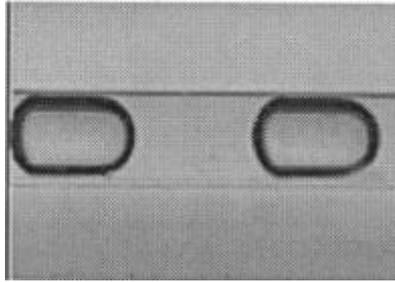
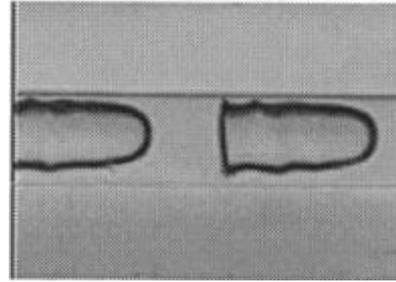
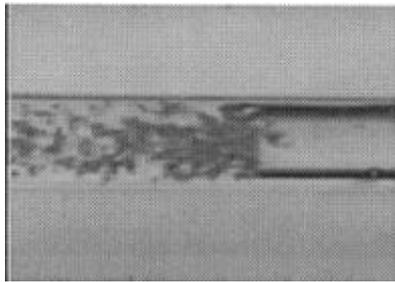
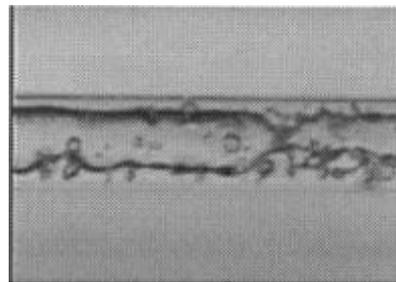
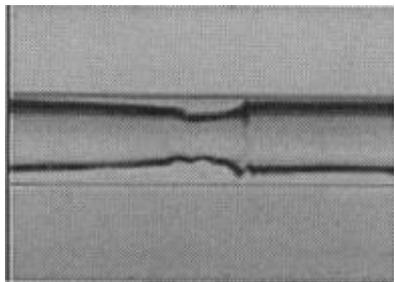
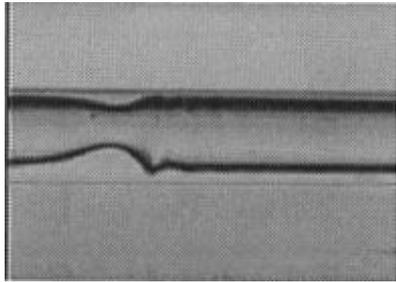
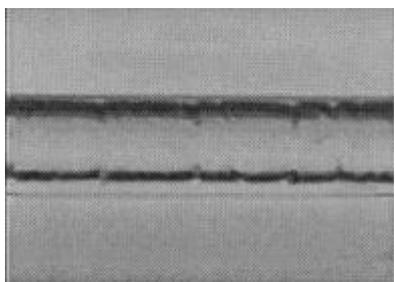
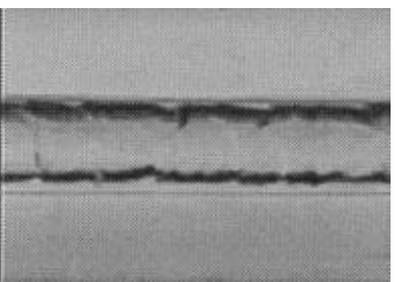
Triplet dkk., (1999) telah melakukan penelitian aliran dua fase pada pipa berukuran mini dengan diameter 1,097 dan 1,45 mm. Fluida kerja yang digunakan adalah udara dan air. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tegangan permukaan lebih dominan dari pada gravitasi. Sehingga, gravitasi tidak mempengaruhi karakteristik dari aliran pipa mini. Untuk mendapatkan berbagai jenis data dilakukan variasi terhadap kecepatan superfisial udara dan kecepatan superfisial cairan. Variasi 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. pola aliran yang terbentuk pada penelitian ini adalah *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular* dan *annular*. Pola aliran ini muncul pada semua jenis pipa yang digunakan yaitu pipa *circular microchannels* berdiameter 1,097 mm dan pipa *semi-triangular microchannels* berdiameter 1,09 mm.



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

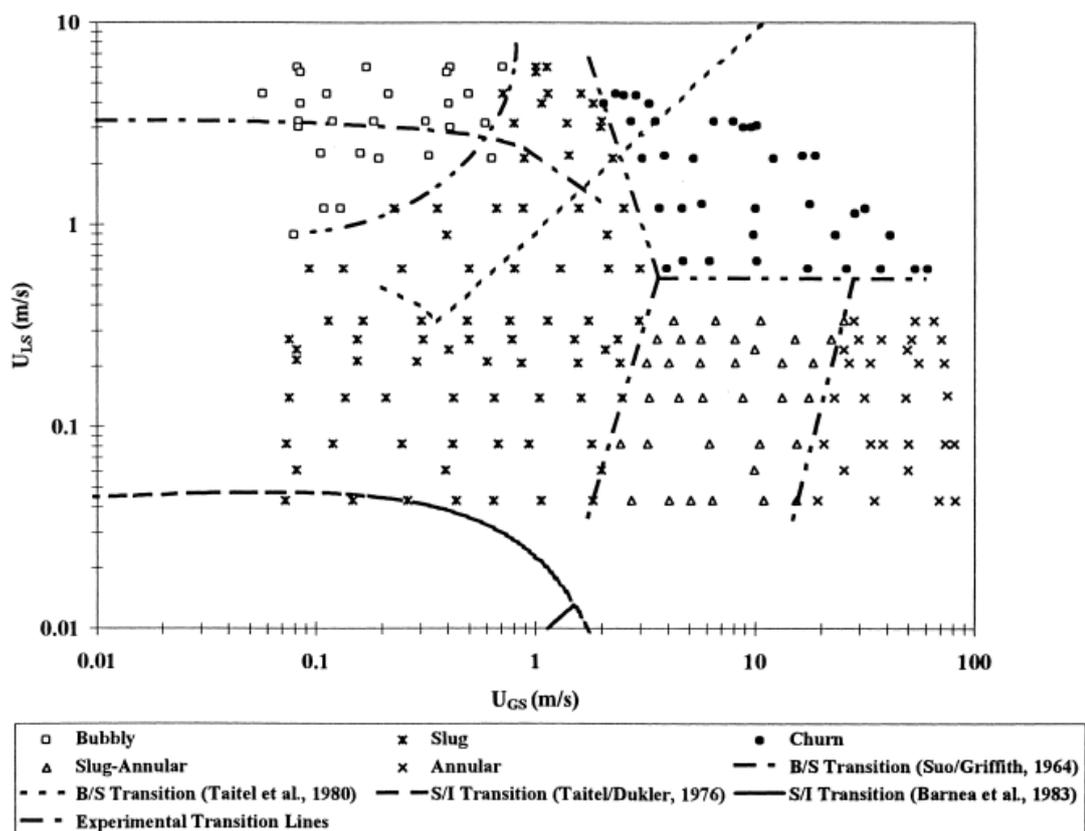


(b) $J_L = 5,997 \text{ m/s}$; $J_G = 0,396 \text{ m/s}$

(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) $J_L = 0,082 \text{ m/s}$; $J_G = 73,30 \text{ m/s}$ (j) $J_L = 0,271 \text{ m/s}$; $J_G = 70,42 \text{ m/s}$

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

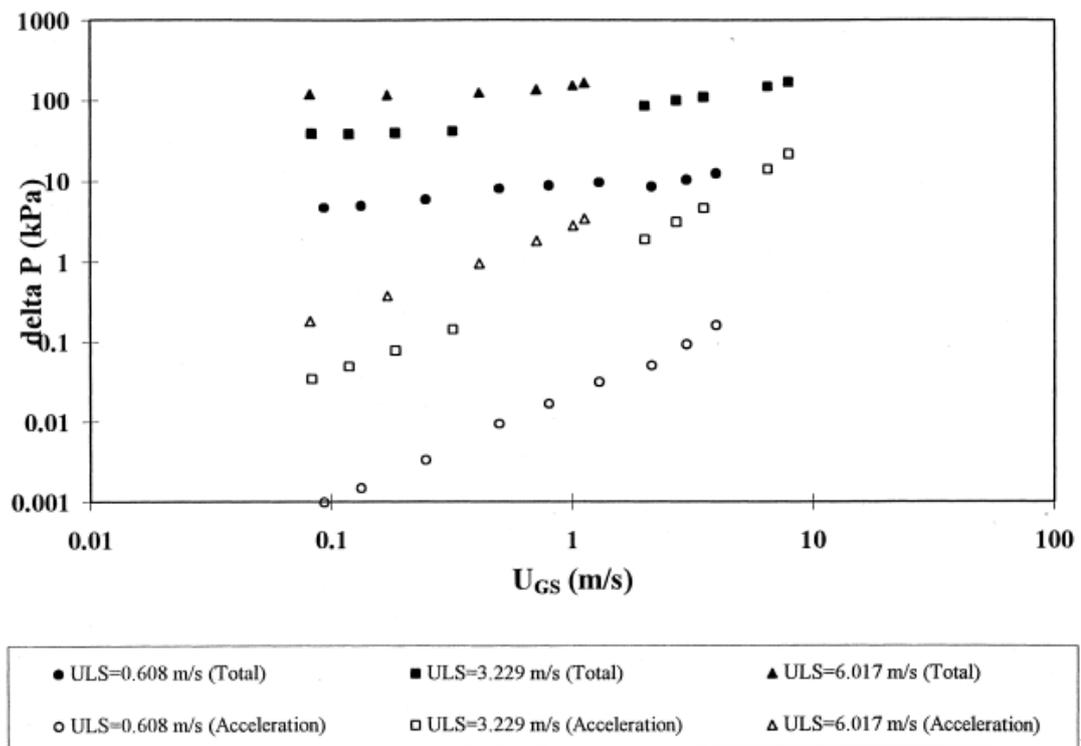
Bubbly muncul diawali dengan terbentuknya gelembung-gelembung kecil tidak sempurna yang diameternya kurang dari diameter saluran pipa. Meningkatnya kecepatan superfisial udara bersamaan dengan nilai fraksi menyebabkan munculnya aliran *slug*. Aliran *slug* berbentuk seperti silinder panjang (*elongated bubbly*). Semakin meningkatnya kecepatan superfisial udara dan kecepatan superfisial cairan aliran *churn* muncul bersamaan dengan hancurnya ekor dari *slug* (*elongated bubbly*). Pola aliran *slug-annular* dan *annular* terjadi ketika fluks volumetrik J_G dan J_L saat 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)

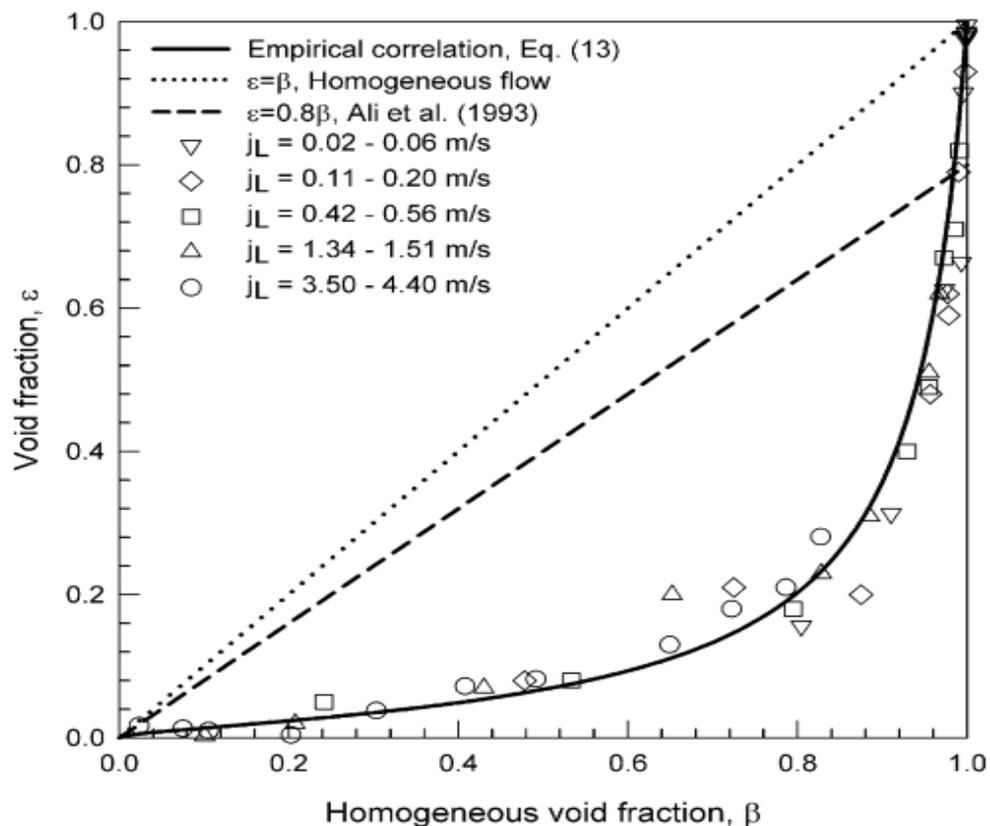
Gambar 2.2 memperlihatkan hasil perbandingan peta pola aliran Triplett dkk., (1999) dengan beberapa peneliti terdahulu yaitu Suo dan Griffith (1964), Fukano dan Kariyasi (1993), Damiandes dan Westwater (1988), Taitel dan Dukler (1976), Barnea dkk., (1983) dan Taitel dkk. (1980).

Eksperimen mengenai penurunan tekanan akibat gesekan pada aliran dua fase pada *microchannels* juga dilakukan oleh Triplett dkk., (1999). Aliran dua fase homogen (*zero slip*) dan model penurunan tekanan homogen menunjukkan prediksi terbaik untuk *microchannels*. Model aliran homogen sama baiknya dengan korelasi empiris yang digunakan untuk slip antar fase dan gesekan dinding. Penelitian ini belum mampu memprediksi fraksi hampa dan penurunan tekanan gesek pada aliran *annular* dengan akurat. Dibutuhkan eksperimen lebih lanjut untuk memahami aliran *annular* pada *microchannels*.



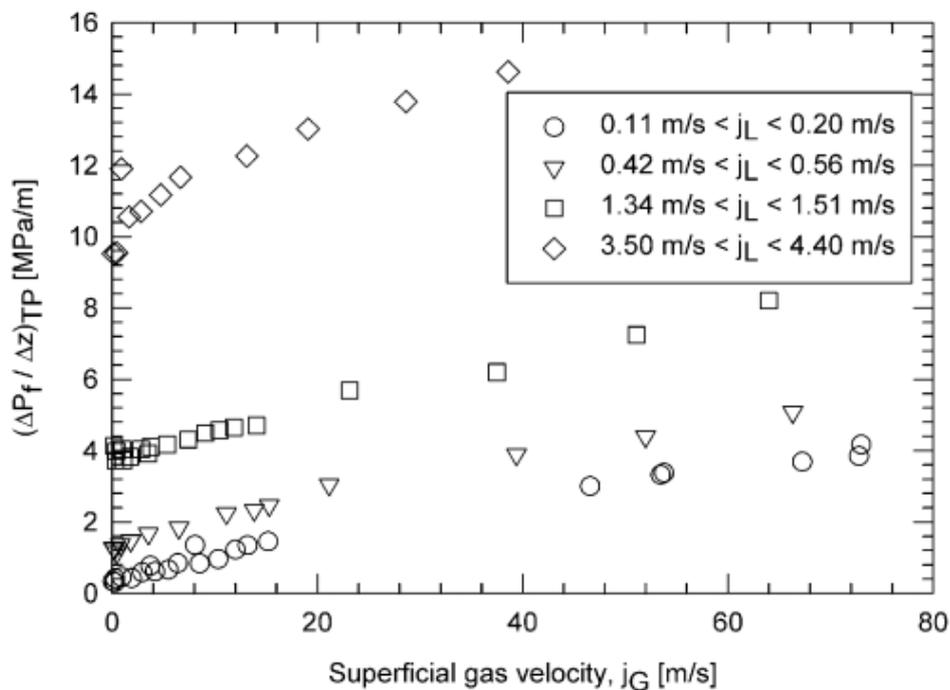
Gambar 2.3 Perbandingan nilai terukur (total) dan nilai perhitungan dengan asumsi aliran homogen (akselerasi) (Triplett dkk., 1999)

Kawahara dkk., (2002) melakukan penelitian aliran satu fase dan dua fase dengan fluida kerja yaitu nitrogen-air yang sudah terionisasi menggunakan saluran *fused* silika berdiameter 100 μm . parameter yang digunakan yaitu kecepatan superfisial udara 0,1–60 m/s dan kecepatan superfisial cairan 0,002–4 m/s. hasil yang berhasil diamati pada penelitian ini pola aliran *liquid alone* (*liquid slug*), aliran inti gas dengan film cairan halus-tipis, aliran inti gas dengan film cairan halus-tebal, aliran inti gas dengan film cairan berbentuk cincin dan aliran inti gas dengan antarmuka yang terdeformasi. Saluran yang sangat kecil menyebabkan nilai bilangan *Reynolds* mengecil dan memperbesar tegangan permukaan yang terjadi sehingga aliran *bubbly* dan *churn* pada penelitian ini tidak dapat diamati.



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

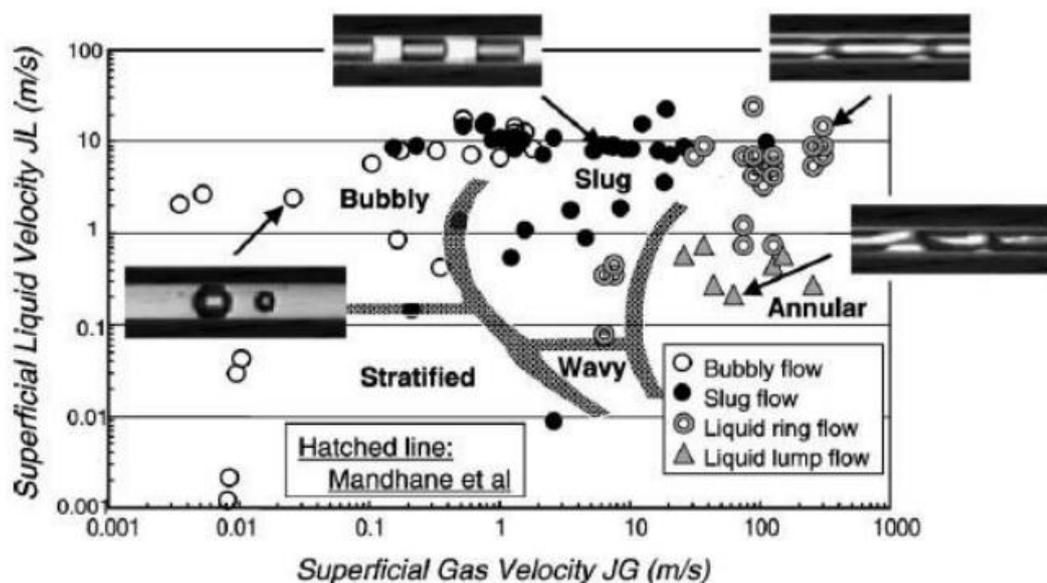
Pada Gambar 2.4 menunjukkan grafik fraksi hampa yang dihasilkan dari penelitian Kawahara dkk., (2002). Penelitian fraksi hampa diukur menggunakan pipa berdiameter 100 μm . Ketika fluida mengalir dengan *flow rate* yang rendah, hasil yang diperoleh didominasi aliran tanpa udara ($\epsilon = 0$) dan aliran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



Gambar 2.5 Data gradien tekanan gesek dua fase (Kawahara dkk., 2002)

Gambar 2.5 menunjukkan hasil data grafik gradien tekanan gesek dua fase (Kawahara dkk., 2002). Penelitian ini 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.

Serizawa dkk., (2002) melakukan penelitian aliran dua fase menggunakan pipa silika dan kuarsa dengan diameter 20, 25, 50 dan 100 μm . 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*.

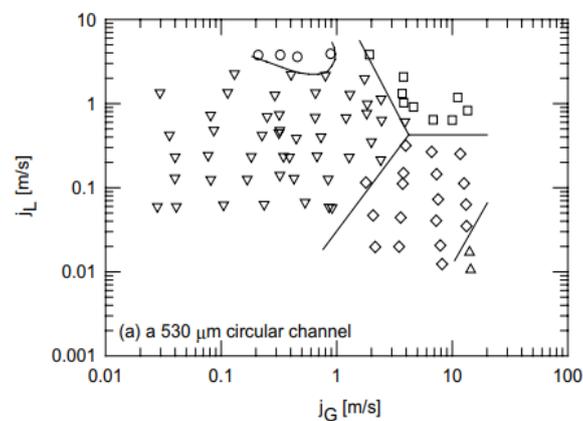


Gambar 2.6 Peta pola aliran (Serizawa dkk., 2002)

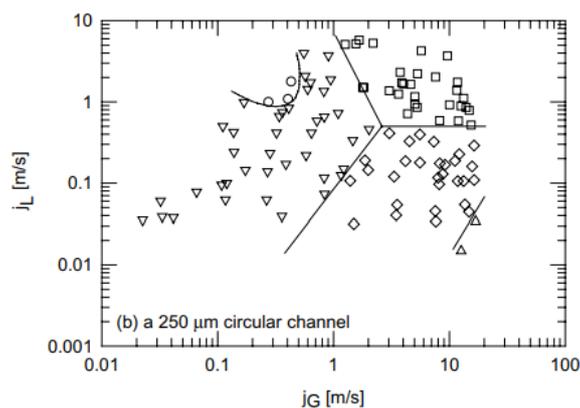
Gambar 2.6 menunjukkan hasil data peta pola aliran dua fase (Serizawa dkk., 2002). Dia berpendapat bahwa gaya gravitasi tidak terlalu mempengaruhi karakteristik dari pola aliran. Namun menurutnya yang memberikan pengaruh besar adalah tegangan permukaan pipa.

Chung dan Kawaji, (2004) melakukan penelitian mengenai karakteristik aliran dua fase adiabatik pada *microchannels*. Penelitiannya menggunakan fluida kerja gas nitrogen dan air karena nitrogen pada saat fase gas tidak larut dalam air. Pipa yang digunakan dalam penelitian ini memiliki diameter dalam 49.5, 100, 250 dan 526 μm yang terbuat dari *fused* silika dengan standar *polyimide coating* dari

Polymicro Technologies. Kecepatan superfisial cairan yang digunakan 0,01 – 5,77 m/s, sedangkan kecepatan superfisial 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 μm dengan diameter 100 dan 50 μm . pola yang termati pada diameter 530 dan 250 μm yaitu *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular* dan *annular*, sedangkan pada pipa berukuran 100 dan 50 μm pola yang berhasil diamati hanya pola aliran *slug*. Gambar 2.7 menunjukkan peta pola aliran yang terbentuk (Chung dan Kawaji, 2004).



(a)



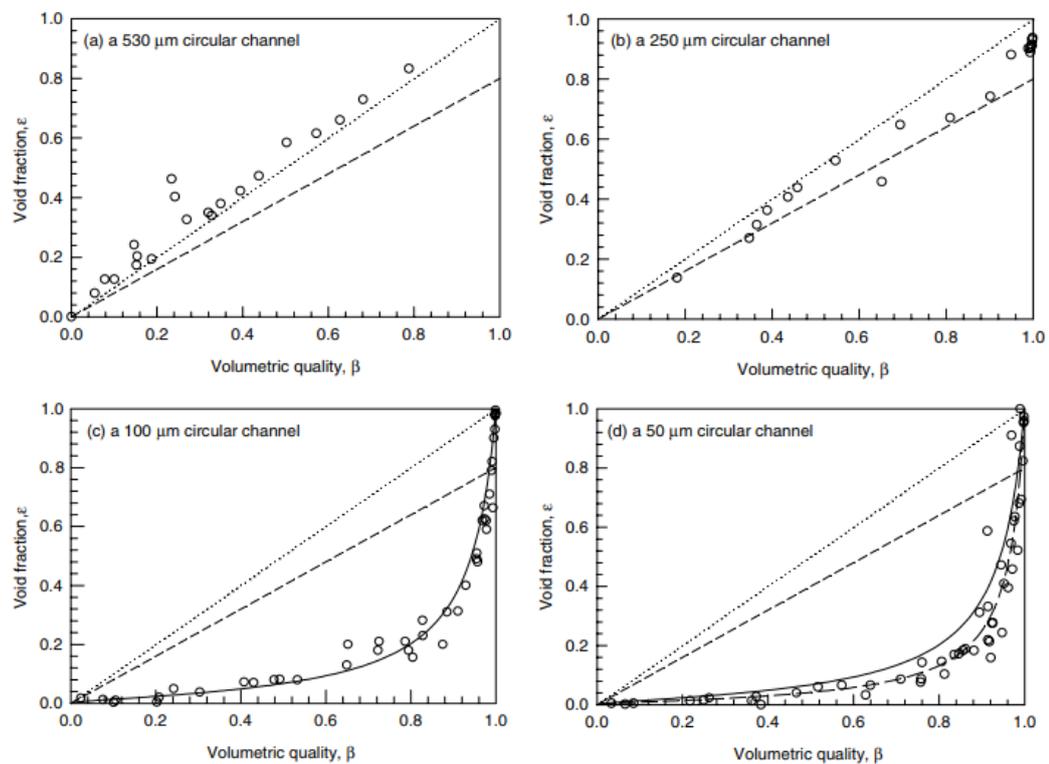
(b)

Gambar 2.7 Peta pola aliran : (a) 530 μm dan (b) 250 μm

(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 μm 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 μm sesuai dengan model aliran homogen, sedangkan pada aliran 250 μm sedikit berbeda dengan aliran homogen. Akan tetapi, data fraksi hampa pada aliran 100 μm dan 50 μm tidak berkorelasi dengan model aliran homogen dan menunjukkan bahwa antara α dan β 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*.

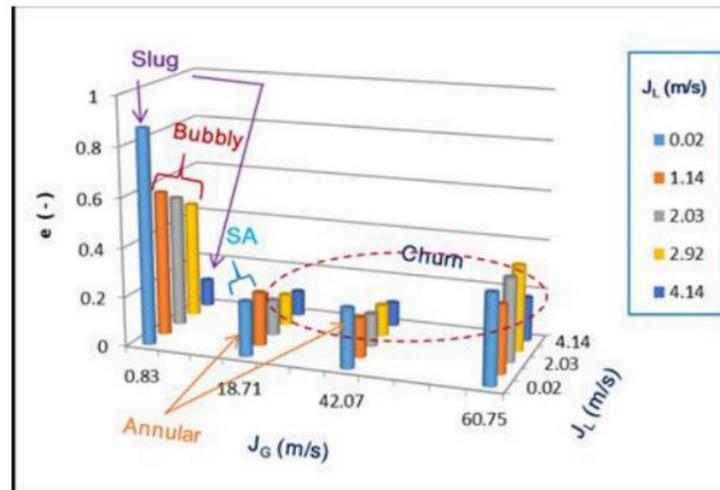
Penelitian aliran dua fase menggunakan pipa berdiameter dalam 100, 180 dan 324 μm telah dilakukan oleh (Sur dan Liu, 2012). Penelitiannya berhasil mendapatkan empat pola aliran yaitu *bubbly*, *slug*, *ring* dan *annular*. Aliran *bubbly* disebut sebagai *dispersed bubble* tunggal dengan diameter lebih kecil dari diameter dalam pipa. Aliran *slug* sama dengan rangkaian *Taylor Bubble* 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*.

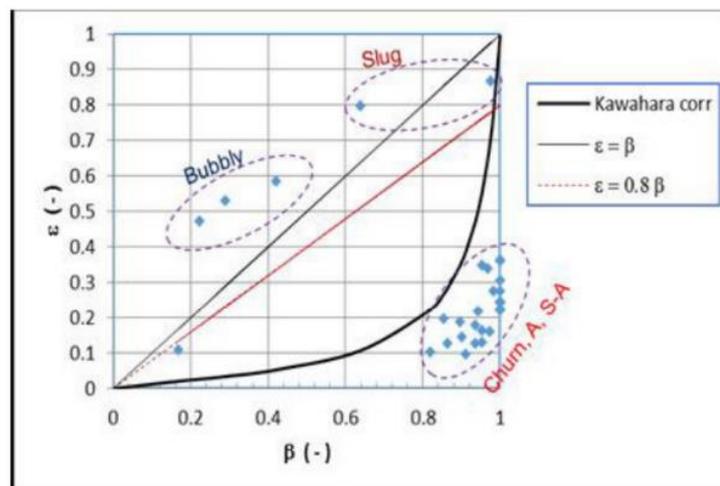
Deendarlianto dkk., (2010) melakukan investigasi pengaruh tegangan permukaan terhadap fenomena penggenangan aliran dua fase berlawanan arus pada pipa yang dimiringkan. Penelitian dilakukan dengan penambahan surfaktan pada udara-air untuk membedakan tegangan permukaan cairan tanpa mengubah sifat fisik cairannya. Penggenangan dilakukan menggunakan seksi uji berupa pipa dengan diameter 16 mm, panjang 1,1 m dan dimiringkan 30-60° dari horizontal. Hasil yang dapat disimpulkan dari penelitian ini bahwa tegangan permukaan sangat berpengaruh pada nilai kecepatan superfisial aliran cairan yang tinggi. Pipa tertutup oleh air atau campuran dua-fase terlihat saat tegangan permukaan tinggi. Penggenangan pada tegangan permukaan yang rendah *droplet* memerankan peran penting dalam mengalirkan cairan.

He dkk., (2011) melakukan penelitian tentang pengaruh tegangan permukaan terhadap distribusi fase dari aliran dua fase udara-cairan melewati sebuah persimpangan T dengan diameter 0,5 mm. Penurunan tegangan permukaan pada penelitian ini menyebabkan berkurangnya cairan yang terambil ketika pola aliran pada saluran masuk adalah *slug*, *slug-annular* dan *annular*. Hasil yang disoroti pada penelitian ini adalah tegangan permukaan yang tinggi menyebabkan cairan menyimpan energi kinetik yang diangkut oleh udara lebih banyak dan menghilangkannya dalam bentuk vorteks. Distribusi fase pada persimpangan T mikro dapat sebagian dikontrol dengan mengatur tegangan permukaan cairan.

Penelitian mengenai fraksi hampa aliran dua fase pernah dilakukan Sudarja dkk., (2015). Pipa yang digunakan dalam penelitian ini berdiameter 1,6 mm dengan menggunakan fluida kerja udara dan akuades. Nilai fraksi hampa didapatkan dengan melakukan *image processing* video yang didapatkan menggunakan kamera Nikon J4 dengan kecepatan 1200 fps. Penelitian ini dilakukan dalam kondisi adiabatik dengan kecepatan superfisial gas 0,83 - 65,4 m/s dan kecepatan superfisial cairan 0,02 - 4,14 m/s.



(a)



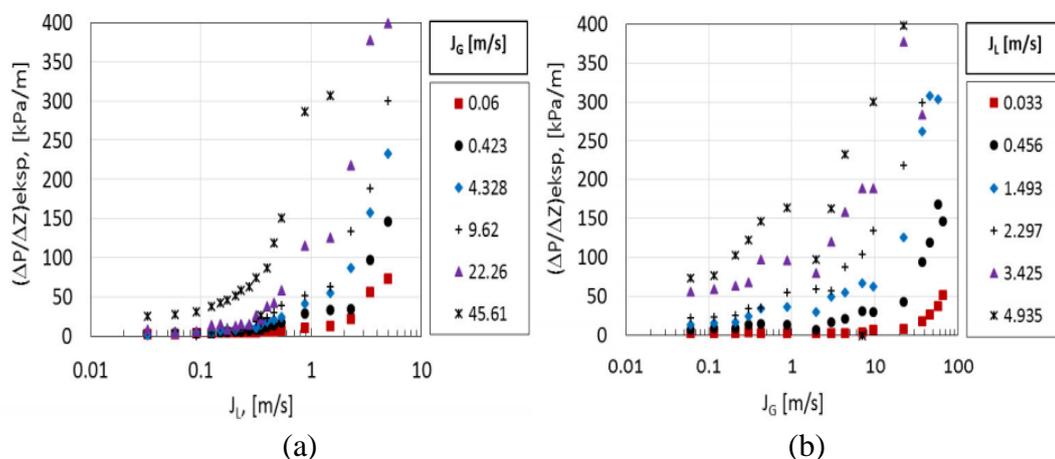
(b)

Gambar 2.9 (a) Pengaruh J_G dan J_L terhadap fraksi hampa, (b) Pengaruh β terhadap ϵ . ($\epsilon = \alpha$) (Sudarja dkk., 2015)

Gambar 2.9 gambar (a) menjelaskan tentang pengaruh kenaikan J_G terhadap nilai fraksi hampa. Akan tetapi, pada J_G yang rendah pengaruhnya tidak terlalu besar karena pada J_G tersebut pola yang terbentuk adalah *bubbly* dan *plug*. Gambar (b) semua harga ϵ lebih tinggi dari pada harga β ketika aliran pola *bubbly* terbentuk, sedangkan aliran *plug* harga ϵ berada di sekitar garis korelasi Ali dkk., (1993) ($\epsilon = 0,8 \beta$) sampai dengan sedikit di atas garis homogen. Aliran *bubbly* dan *plug* tidak terjadi slip atau misalnya ada slip rasionya mendekati 1. Pola aliran

churn, *slug-annular* dan *annular* harga ϵ sangat kecil sehingga hampir di bawah garis korelasi (Kawahara dkk., 2002). Kecepatan superfisial gas jauh lebih besar dari pada kecepatan superfisial cairan karena adanya slip rasio yang sangat besar.

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).

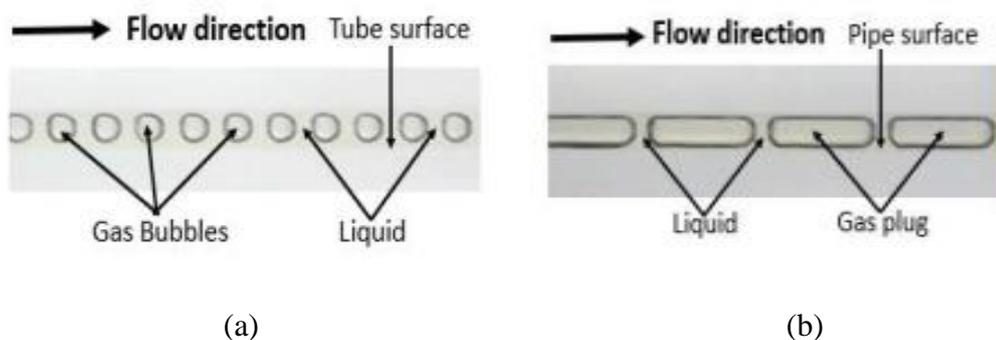


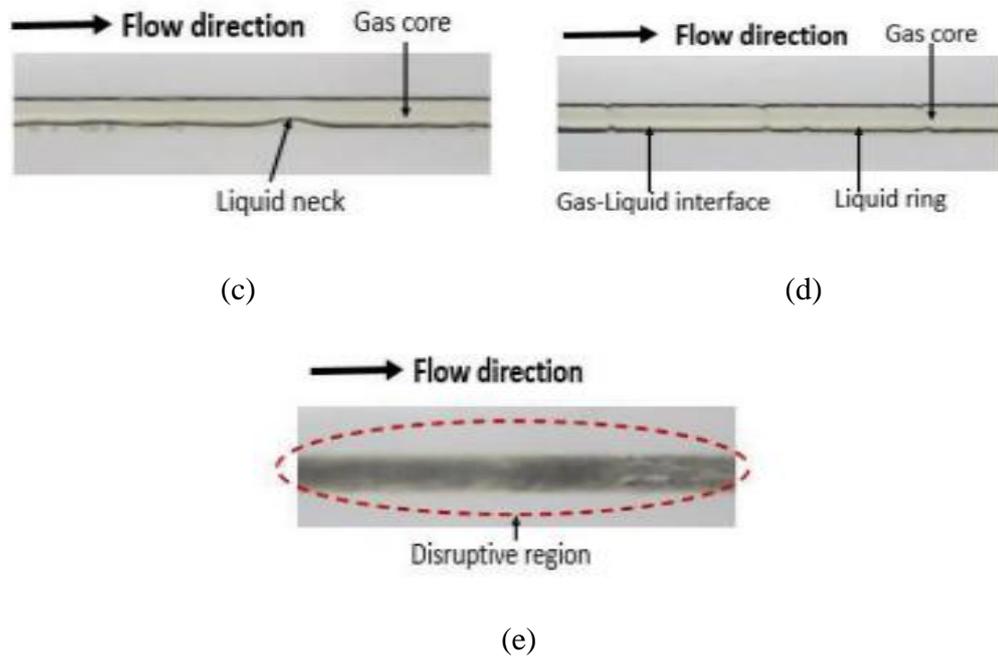
Gambar 2.10 (a) Pengaruh J_L terhadap gradien tekanan pada berbagai J_G , (b) Pengaruh J_G terhadap gradien tekanan pada berbagai J_L (Sudarja dkk., 2016)

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.

Setyawan dkk., (2016) melakukan penelitian aliran dua fase tentang pengaruh sifat fisik fluida terhadap kecepatan dan frekuensi gelombang aliran *annular*. Penelitian dilakukan menggunakan pipa berdiameter dalam 26 dan 16 mm. Variasi viskositas cairan yaitu 1,02 – 6,57 mPa menggunakan fluida kerja udara dan campuran gliserin dan variasi tegangan permukaan yaitu 34,0 – 71,7 mN/m menggunakan udara dan campuran butanol. Rentang kecepatan superfisial yang digunakan yaitu J_L 0,05 – 0,2 m/s dan J_G 12 – 40 m/s. Secara umum penelitiannya menyimpulkan bahwa frekuensi gelombang menurun bersamaan dengan naiknya viskositas cairan dan menurunnya tegangan permukaan. Sementara itu, tegangan permukaan yang semakin menurun menyebabkan kecepatan gelombang pola aliran *annular* semakin meningkat. Efek yang muncul akan semakin signifikan ketika kecepatan superfisial berada pada posisi yang tinggi. Sehingga memungkinkan untuk munculnya korelasi baru yang sesuai dengan penelitiannya.

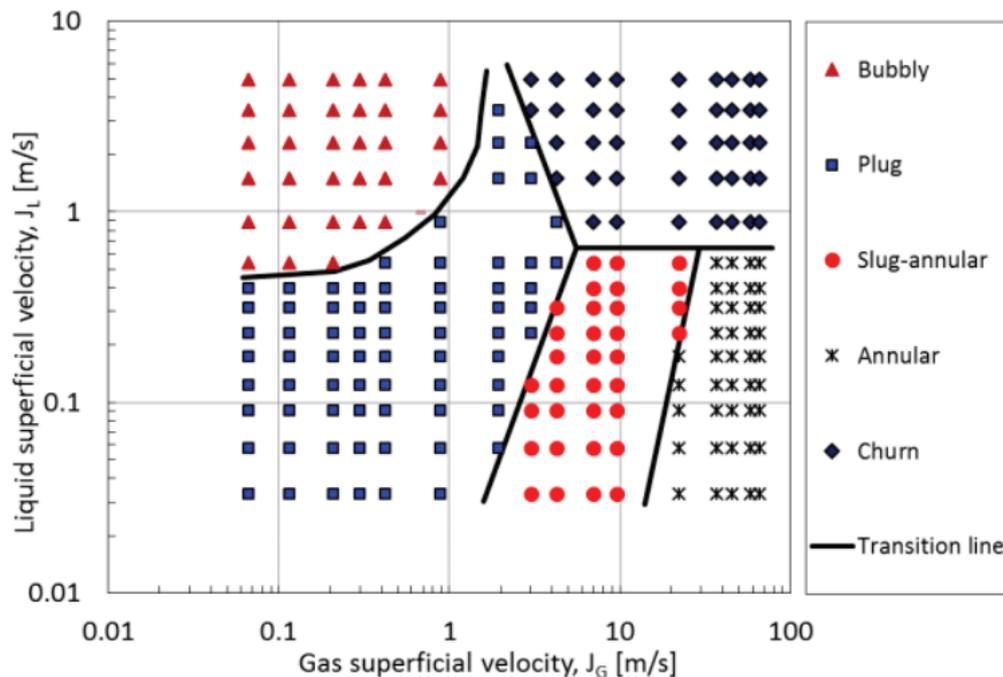
Sudarja dkk., (2018) melakukan penelitian aliran dua fase menggunakan pipa berdiameter 1,6 mm. fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah udara dan campuran akuades-gliserin dengan konsentrasi (0%, 20%, 40% dan 60%). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari viskositas 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 peta 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)

Sukamta dkk., (2019) melakukan penelitian tentang mengenai fraksi hampa aliran dua fase udara dan campuran gliserin dengan viskositas yang berbeda-beda pada saluran kapiler miring 5° terhadap horizontal. Penelitiannya dilakukan menggunakan *digital image processing*. Hasil dari penelitiannya menyebutkan bahwa viskositas cairan sangat berpengaruh terhadap pola aliran *bubbly* dan *plug*. Meningkatnya nilai kecepatan superfisial gas menyebabkan nilai fraksi hampa semakin meningkat, sementara itu meningkatnya nilai superfisial cairan menyebabkan menurunnya nilai fraksi hampa. Panjang pola aliran *bubbly* dan *plug* dipengaruhi oleh nilai aliran homogen (β)

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*. Selain itu, tegangan permukaan sangat berpengaruh terhadap karakteristik aliran dua fase, tetapi penelitian mengenai pengaruh tegangan permukaan terhadap

karakteristik aliran dua fase pada *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 Fase

Fase dapat diartikan sebagai wujud dari suatu zat seperti cair, padat dan gas. Aliran pada sebuah sistem perpipaan dapat dibedakan menjadi dua yaitu *single phase* dan *multi phase*. Aliran *single phase* adalah kondisi ketika aliran yang mengalir hanya terdapat satu fase, sedangkan *multi phase* adalah kondisi ketika beberapa fase mengalir secara bersamaan. Bagian paling sederhana dari aliran *multi phase* 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 Butanol

Butanol adalah alkohol primer yang memiliki lebih dari dua atom karbon dan mudah larut dalam air. Butanol merupakan cairan jernih dan berbau tajam. Butanol dengan 4 struktur karbon mempunyai formula molekul $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ dan digunakan sebagai pelarut, perantara sintesis kimia dan bahan bakar. N-Butanol diproduksi secara industri dengan melakukan reaksi n-butiraldehid dan hidrogen.

Butanol memiliki viskositas 2,95 cP pada 20° dan tegangan permukaan sebesar 24,6 mN/m pada 20°.

2.2.3 Tegangan Permukaan

Tegangan permukaan merupakan 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. Tegangan permukaan dipengaruhi oleh beberapa faktor jenis cairan, massa jenis, suhu, tekanan, kerapatan dan konsentrasi zat terlarut. Semakin besar molekul cairan maka semakin besar juga tegangan permukaannya. Butanol memiliki tegangan permukaan yang lebih kecil dari pada air. Sehingga, memungkinkan untuk melakukan variasi tegangan permukaan untuk mendapatkan data yang diinginkan.

2.2.4 Kecepatan Superfisial

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

1. Kecepatan superfisial gas (J_G)

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

2. Kecepatan superfisial cairan (J_L)

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

Keterangan :

J_G = Kecepatan superfisial gas (m/s)

J_L = Kecepatan superfisial cairan (m/s)

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

Q_L = Laju aliran cairan dalam pipa (m³/s)

A = Luas penampang pipa (m²)

2.2.5 Pola Aliran

Pola aliran (*flow regime*) merupakan hal yang sangat penting untuk menentukan perilaku aliran. Hubungan yang saling terkait antara campuran gas-cairan menentukan penyelesaian model analisa atau korelasi yang dibutuhkan persamaan konversi dua fase (*two-phase convertation equation*). Penelitian mengenai pola aliran dua fase masih sangat luas. Banyak ilmu yang perlu didapatkan untuk menjelaskan perilaku pola alira dua fase dengan pasti. Banyaknya metode yang digunakan menyebabkan sulitnya mengetahui perubahan pola aliran dua fase pada kondisi dan parameter tertentu seperti geometri, orientasi pipa dan proses yang terjadi di dalam pipa.

Pola aliran dua fase pada pipa *minichannels* horizontal pada umumnya memiliki beberapa pola yaitu *bubbly*, *plug*, *slug-annular*, *annular* dan *churn*. Gaya gravitasi tidak berpengaruh pada pola aliran dua fase pada pipa *minichannels*. Namun, tegangan permukaan, viskositas dan gaya inersia sangat berpengaruh terhadap pola aliran yang terbentuk. Aliran *bubbly* disebut sebagai *dispersed bubble* tunggal dengan diameter lebih kecil dari diameter dalam pipa. Aliran *plug* sama dengan rangkaian *Taylor Bubble* yang memanjang dan terpisah oleh gumpalan air. Aliran *annular* adalah aliran gas secara berkelanjutan pada pusat saluran membentuk inti gas yang dikelilingi lapisan air yang stabil. Pola *churn* muncul ketika pecahnya pola aliran *plug* akibat naiknya kecepatan superfisial gas.

Peta pola aliran merupakan grafik persebaran data pola aliran yang berhasil diamati. Pola aliran yang terbentuk akan muncul sesuai dengan parameter yang telah ditentukan yaitu menggunakan kecepatan superfisial gas dan cairan. Namun, beberapa penelitian juga menggunakan metode yang berbeda yaitu dengan menggunakan bilangan *weber* sebagai koordinat yang menunjukkan hubungan tegangan permukaan dan gaya inersia. Perbedaan metode yang digunakan dalam menentukan pola aliran dua fase menyulitkan untuk membuat peta pola aliran yang seragam.

2.2.6 Fraksi Hampa

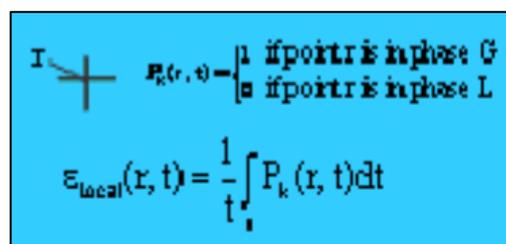
Fraksi hampa merupakan salah satu parameter dari aliran dua fase yang sangat penting. Fraksi hampa merupakan kunci untuk menentukan parameter penting lainnya seperti massa jenis dan viskositas dua fase, menentukan kecepatan relatif rata-rata dan merupakan hal penting dasar dalam prediksi permodelan transisi pola aliran, *heat transfer* dan *pressure drop*. Terdapat empat metode untuk mendefinisikan fraksi hampa, metode tersebut antara lain:

2.2.6.1. Metode *Local*

Metode *local* digunakan ketika mengacu pada sebuah titik atau volume yang sangat kecil saat diukur secara eksperimental. *Local time average* didefinisikan sebagai berikut.

$$\varepsilon_{local}(r, t) = \frac{1}{t} \int_t P_k(r, t) dt \quad (2.3)$$

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 2.14 menunjukkan skema fraksi hampa *local* (thome, 2004).



$$\varepsilon_{local}(r, t) = \frac{1}{t} \int_t P_k(r, t) dt$$

Gambar 2.13 Fraksi hampa *local*

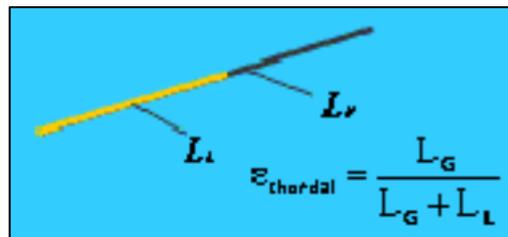
2.2.6.2. Metode *Chordal*

Fraksi hampa *chordal* dihitung dengan menyinari sinar radioaktif sempit melalui saluran aliran dua fase di dalamnya dan melakukan kalibrasi berdasarkan perbedaan penyerapan oleh fase gas dan fase cair. Panjang fraksional dari jalur

yang melewati saluran ditempati oleh fase gas dapat ditentukan dengan menghitung intensitas sinar pada sisi yang berlawanan.

$$\epsilon_{\text{chordal}} = \frac{L_G}{L_G + L_L} \quad (2.4)$$

L_G adalah Panjang fase gas, sedangkan L_L adalah Panjang fase cairan. Gambar 2.15 menunjukkan Skema fraksi hampa *chordal*.



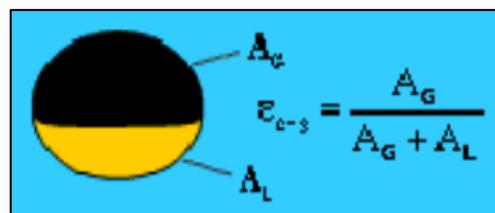
Gambar 2.14 Skema fraksi hampa *chordal*

2.2.6.3 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.

$$\epsilon_{L-G} = \frac{A_G}{A_G + A_L} \quad (2.5)$$

A_G adalah area dari *cross-section* pada saluran yang merupakan luasan gas dan A_L merupakan luasan dari cairan. Gambar 2.16 menunjukkan skema fraksi hampa *cross-section*.



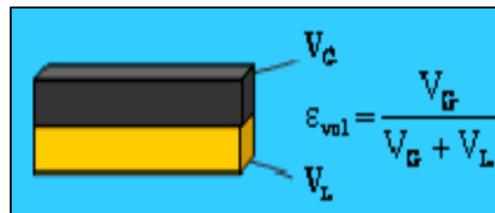
Gambar 2.15 Fraksi hampa *cross-section*

2.2.6.4 Metode Volumetrik

Fraksi hampa volumetrik merupakan metode yang digunakan untuk menentukan fraksi hampa dengan menggunakan sepasang *quick closing valve* sepanjang saluran untuk menangkap fluida dua fase secara cepat. Fraksi hampa volumetrik didefinisikan sebagai berikut.

$$\epsilon_{\text{vol}} = \frac{V_G}{V_G + V_L} \quad (2.6)$$

V_G adalah volume dari saluran yang ditempati oleh fase gas dan V_L merupakan volume fase cair. Gambar 2.17 menunjukkan skema fraksi hampa volumetrik.



Gambar 2.16 Fraksi hampa volumetrik

2.2.7 Fraksi Hampa Homogen

Fraksi hampa *cross sectional* didefinisikan dengan luas penampang (A), maka kecepatan aliran gas dan cairan dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$U_G = \frac{Q_G}{A_\epsilon} = \frac{\dot{m}}{\rho_L} \left(\frac{x}{\epsilon} \right) \quad (2.7)$$

$$U_L = \frac{Q_G}{A_{(1-\epsilon)}} = \frac{\dot{m}}{\rho_L} \left(\frac{1-x}{1-\epsilon} \right) \quad (2.8)$$

Model homogen dasar diasumsikan bahwa gas dan cairan mengalir bersamaan pada kecepatan yang sama. Maka, dapat ditentukan fraksi hampa dari persamaan (2.7) dan (2.8).

$$\epsilon_H = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x} \right) \frac{\rho_G}{\rho_L}} \quad (2.9)$$

2.2.8 Rasio Kecepatan

Rasio kecepatan merupakan definisi dari sebuah aliran memiliki kecepatan rata-rata dari fase gas dan cair yang berbeda. Rasio kecepatan digunakan untuk menyederhanakan gambaran kecepatan rata-rata kedua fase. Rasio kecepatan didefinisikan sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \frac{\rho_G}{\rho_L} S} \quad (2.10)$$

Dengan rasio kecepatan adalah

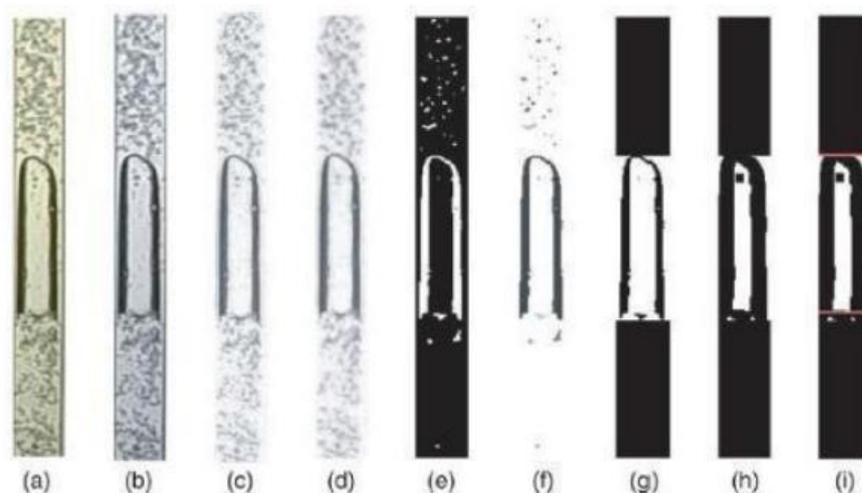
$$S = \frac{U_G}{U_S} \quad (2.11)$$

Persamaan (2.8) menyerupai persamaan (2.7) dengan nilai $S = 1$. Kecepatan fluida akan berbeda ketika orientasi pipa pada posisi vertikal atau horizontal berlawanan arah. Jadi pada kondisi tersebut kecepatan gas lebih cepat dibandingkan dengan kecepatan cairan ($S \geq 1$).

2.2.9 *Digital Image Processing*

Metode *digital image processing* digunakan untuk mendapatkan nilai fraksi hampa dengan mengambil gambar aliran menggunakan kamera berkecepatan tinggi kemudian diolah. Metode ini digunakan untuk mengetahui karakteristik aliran, pola aliran dan topologi aliran (Triplett dkk., 1999).

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 produktivitas yang tinggi di kalangan *engineers* dan *scientists*.



Gambar 2.17 *Digital Image processing* (Mayor dkk., 2007)

Gambar 2.17 adalah langkah-langkah yang digunakan untuk mendapatkan nilai fraksi hampa dengan menggunakan metode *digital image processing*. Berikut adalah istilah-istilah pada *digital image processing*.

2.2.9.1 *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 yaitu x dan y adalah koordinat. Sedangkan, nilai f adalah intensitas atau tingkatan warna pada gambar.

1. Gambar RGB

Gambar RGB adalah *image* yang terdiri dari tiga matriks yang masing-masing mempresentasikan warna merah, hijau dan biru. Gambar 2.19 merupakan gambar RGB yang pada setiap piksel mempunyai nilai tertentu dengan *range* 0-255 sehingga mempunyai kemungkinan 16,777,216 warna.



Gambar 2.18 Contoh gambar RGB aliran *plug* (Sudarja dkk., 2016)

2. Gambar *Greyscale*

Gambar *grayscale* adalah 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.

3. Gambar Biner

Gambar biner adalah gambar yang pada setiap pikselnya hanya mempunyai dua kombinasi warna yaitu hitam dan putih. Seperti namanya, biner merupakan sistem bilangan dasar dari semua sistem berbasis digital yang menggunakan simbol yaitu 0 dan 1. Nilai 0 digunakan untuk menyatakan warna hitam dan 1 digunakan untuk menyatakan warna putih. Setiap piksel pada gambar biner hanya membutuhkan 1 bit sehingga menghemat penyimpanan ruang data. Gambar 2.21 menunjukkan contoh gambar biner.



Gambar 2.19 Contoh gambar biner aliran *plug* (Sudarja dkk., 2016)

2.2.9.2 *Noise*

Noise adalah gangguan pada gambar yang terjadi karena adanya pencahayaan yang kurang sempurna. 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*.

1. *Coherent Noise*

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

2. *Fixed-location Noise*

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

3. *Salt-and-pepper Noise*

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

2.2.9.3 *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.

1. *Mean Filtering*

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

2. *Median Filtering*

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

3. *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.

2.2.9.4 **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*.

1. *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.

2. *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.

3. *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*).

4. *Cross-Corelation*

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.

2.2.10 *Pressure Gradient*

Pressure gradient atau gradien tekanan adalah penurunan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi pada dua titik di dalam pipa per satuan panjang

sepanjang kedua titik tersebut. Tekanan yang terjadi menyebabkan fluida mengalir. Namun, tekanan pada saluran tidak selalu 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 ini adalah persamaan dari penurunan tekanan total ΔP_{total} :

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{statis} + \Delta P_{mom} + \Delta P_{gesek} \quad (2.12)$$

Penurunan tekanan statis untuk fluida dua fase homogen adalah:

$$\Delta P_{statis} = \rho_H \cdot g \cdot H \cdot \sin \theta \quad (2.13)$$

Nilai H adalah ketinggian saluran vertikal, θ adalah sudut saluran terhadap posisi horizontal dan ρ_H adalah massa jenis homogen.

$$\rho_H = \rho_L (1 - \varepsilon_H) + \rho_G \cdot \varepsilon_H \quad (2.14)$$

ρ_L dan ρ_G adalah massa jenis cairan dan gas atau uap, sedangkan ε_H adalah fraksi hampa homogen yang didapatkan dari kualitas x pada persamaan sebagai berikut.

$$\varepsilon_H = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_G \cdot (1-x) \cdot \rho_G}{u_L \cdot \rho_L} \right)} \quad (2.15)$$

Nilai u_G dan u_L adalah rasio kecepatan seperti pada persamaan 2.9.

Momentum gradien tekanan persatuan panjang didapatkan dengan persamaan berikut.

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{mom} = \frac{d(\dot{m}_{total} / \rho_H)}{dz} \quad (2.16)$$

Penurunan tekanan gesekan memiliki beberapa masalah yang dapat dinyatakan sebagai fungsi dari faktor gesekan (f_{tp}) pada aliran yang stabil dengan saluran yang memiliki luas penampang konstan.

$$\Delta P_{gesek} = \frac{2 \cdot f_{tp} \cdot L \cdot \dot{m}^2_{total}}{di \cdot \rho_{tp}} \quad (2.17)$$

Dengan persamaan blasius faktor gesekan dapat dinyatakan dalam bilangan Reynolds yaitu sebagai berikut.

$$f_{tp} = \frac{0,079}{Re^{0,25}} \quad (2.18)$$

Bilangan Reynolds didapatkan dari persamaan berikut.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (2.19)$$

Dimana:

- Re = Bilangan Reynolds
- ρ = Massa jenis (densitas) fluida
- v = Viskositas kinematik fluida
- d = Diameter pipa
- μ = Viskositas absolut fluida dinamis

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.