

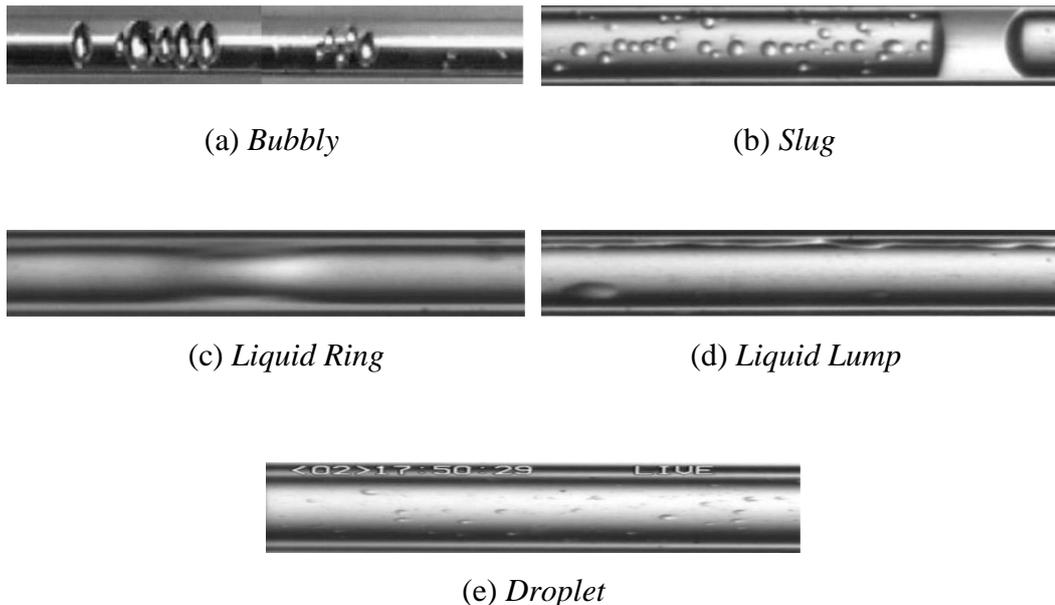
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sudah cukup banyak penelitian yang dilakukan mengenai karakteristik aliran dua fase pada pipa berukuran mini, tetapi hasil yang diperoleh dari masing-masing penelitian tersebut berbeda-beda. Perbedaan itu terjadi karena setiap penelitian dilakukan menggunakan metode yang berbeda antara satu peneliti dengan yang lainnya.

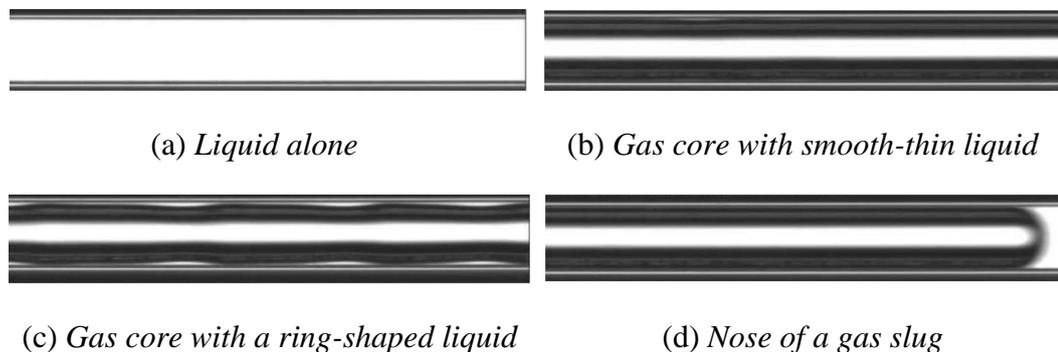
Penelitian yang dilakukan oleh Serizawa dkk., (2002) tentang aliran dua fase menggunakan media berupa pipa silika dan kuarsa arah horizontal dengan empat variasi diameter yaitu 20, 25, 50, dan 100 μm . Pada penelitian tersebut variasi kecepatan superfisial gas (J_G) yang digunakan yaitu antara 0,0012-295,3 m/s dan kecepatan superfisial cairan (J_L) berkisar 0,003-7,52 m/s. Fase gas yang digunakan berupa udara dan uap air sedangkan untuk fase cair menggunakan air. Hasil dari visualisasi penelitian ini memiliki jenis pola aliran yang beragam diantaranya yaitu: *dispersed bubbly*, *gas slug*, *liquid ring*, *liquid lump*, *annular*, *frothy*, *wishphy-annular*, *rivulet* dan *droplet*.



Gambar 2.1 Pola aliran (Serizawa dkk., 2002)

Jenis pola aliran yang terbentuk tersebut dapat dijelaskan karakteristik serta dapat divisualisasikan dengan baik menggunakan fotografi. Serizawa dkk., (2002) juga berpendapat bahwa terbentuknya pola aliran sangat di pengaruhi oleh tegangan permukaan.

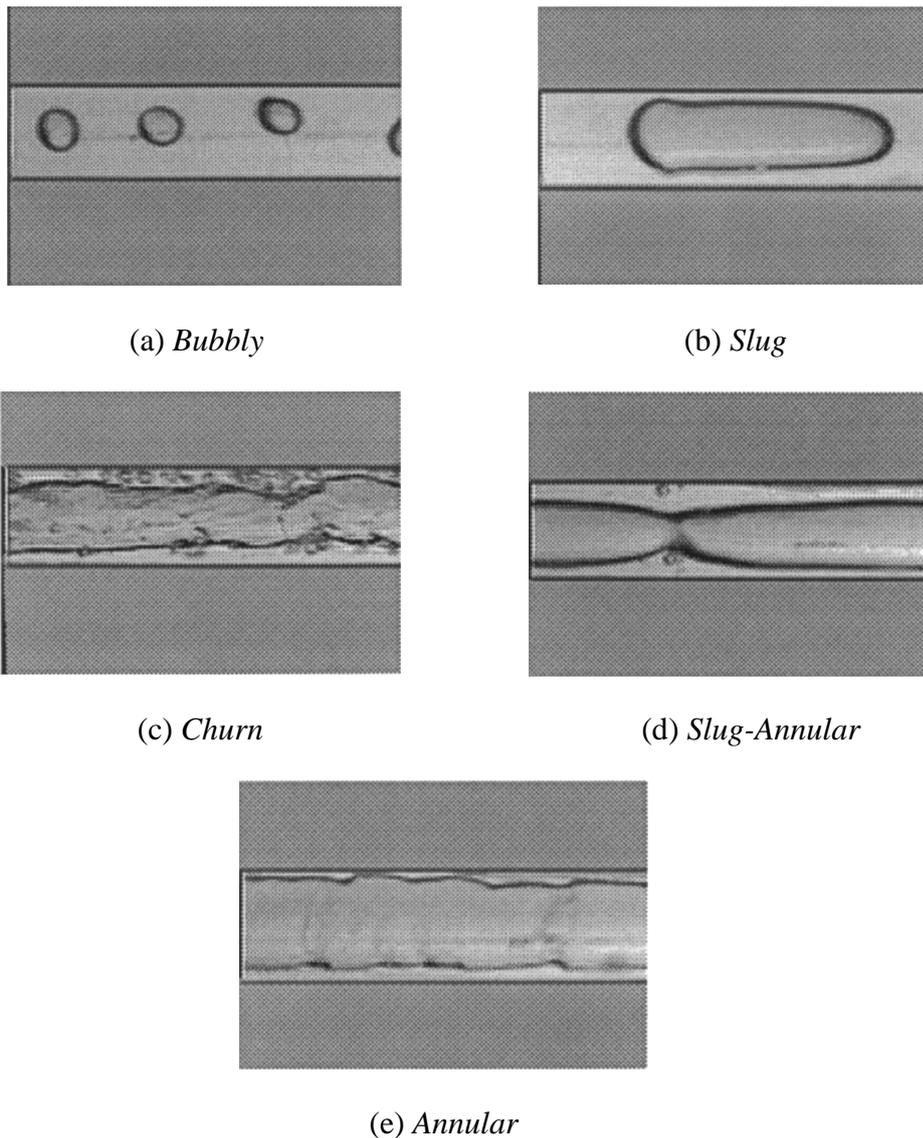
Kawahara dkk., (2002) melakukan investigasi eksperimental pada karakteristik aliran dua fase nitrogen-air yang terionisasi menggunakan pipa sirkular berdiameter 100 μm yang terbuat dari *fused silica* dengan kecepatan superfisial gas 0,1-60 m/s dan kecepatan superfisial air 0,02-4 m/s. Pada penelitian ini Kawahara dkk., (2002) menggunakan dua metode yaitu metode visualisasi dan metode probabilitas. Hal tersebut dikarenakan dalam suatu kondisi aliran yang telah ditetapkan, beberapa pola aliran muncul secara bergantian pada *flowrate* air rendah. Pola aliran utama yang terbentuk yaitu: aliran *gas core with smooth-thin liquid film*, *liquid alone (liquid slug)*, aliran *gas core with smooth-thick liquid film*, aliran *gas core with a ring-shaped liquid film*, dan aliran *nose of a gas slug*.



Gambar 2.2 Pola aliran (Kawahara dkk., 2002)

Penelitian yang dilakukan Triplett dkk., (1999) mengenai aliran dua fase pada pipa berukuran mini menggunakan pipa melingkar dengan diameter 1,09 dan 1,45 mm. Fluida kerja yang digunakan pada penelitian ini berupa air dan udara. Untuk mendapatkan data yang beragam dilakukan variasi terhadap kecepatan superfisial gas dan kecepatan superfisial cairan. Variasi pada kecepatan superfisial gas dimulai dari 0,02-80 m/s, sedangkan untuk kecepatan superfisial cairan dimulai dari 0,02-8 m/s. Pola aliran yang terlihat jelas yaitu: *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular* dan *annular*. Pola aliran ini muncul pada semua jenis pipa yang digunakan

yaitu pipa *circular microchannels* berdiameter 1,09 mm dan pipa *semi-triangular microchannels* berdiameter 1,09 mm. Hasil dari penelitian ini, mereka menyimpulkan bahwa pengaruh tegangan permukaan terhadap pola aliran yang terbentuk lebih dominan dari pada gravitasi. Sehingga, gravitasi tidak mempengaruhi karakteristik dari aliran pipa mini.



Gambar 2.3 Pola aliran (Triplett dkk., 1999)

Penelitian ini memiliki bentuk *Bubbly* yang berada di tengah saluran pipa yang berbentuk menyerupai lingkaran dengan ukuran diameter yang hampir merata. Ketika kecepatan superfisial gas meningkat menyebabkan munculnya aliran *slug*.

Aliran *slug* berbentuk seperti silinder panjang (*elongated bubbly*). Semakin meningkatnya kecepatan superfisial gas 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.

Sur dan Liu, (2012) melakukan studi eksperimental menggunakan pipa dengan diameter bagian dalam 100, 180 dan 324 μm dari leburan silika. Fluida kerja yang digunakan berupa udara dan air. Pada penelitian ini terdapat empat pola aliran utama yaitu: *bubbly*, *slug*, *ring*, dan *annular*. Pola aliran tersebut diambil menggunakan teknik fotografi berkecepatan tinggi. Peta pola aliran yang digunakan pada penelitian ini berupa angka *webber* yang dimodifikasi sebagai koordinat batas transisi aliran. Mengenai penurunan tekanan, mereka menyimpulkan bahwa model berbasis pola aliran memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan dengan model homogen dan terpisah dalam aliran dua fase.

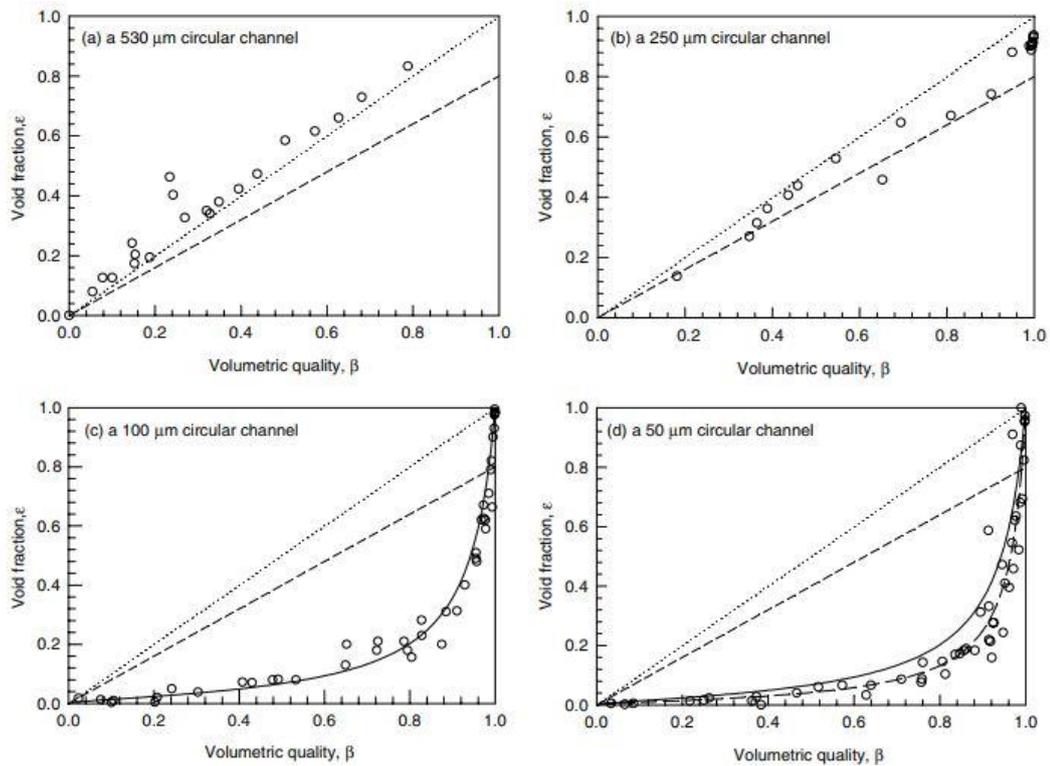
Wegmann, (2005) melakukan penelitian mengenai aliran dua fase menggunakan media dengan fase cair yaitu, air dan paraffin sedangkan untuk fase gas menggunakan udara. Penelitian ini menggunakan dua variasi ukuran diameter pipa yaitu 5,6 mm dan 7 mm, dengan dua jenis variasi diameter ini, pola aliran yang terbentuk memiliki perbedaan. Pada pipa dengan diameter 5,6 mm secara garis besar pola yang terlihat adalah aliran *intermittent* dan *annular* sedangkan aliran *stratified* di diameter 5,6 mm sama sekali tidak ada baik di fase air-udara maupun di fase paraffin-udara. Terbentuknya aliran *stratified* pada pipa berdiameter 7 mm, pada saat kecepatan superfisial air 0,003 m/s dan paraffin 0,06 m/s. Hal ini disebabkan tegangan permukaan air lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan permukaan paraffin.

Fukano dan Kariyasaki, (1993) melakukan penelitian mengenai riset eksperimental karakteristik aliran dua fase pada tabung kapiler dengan diameter pipa bagian dalam 1, 2,4 dan 4,9 mm. Penelitian ini berfokus pada pola aliran, variasi waktu fraksi hampa dan penurunan tekanan. Pada penelitian yang telah dilakukan tersebut mereka berpendapat bahwa diameter pipa berpengaruh terhadap

penurunan tekanan. Semakin kecil diameter dalam pipa, maka penurunan tekanan menjadi semakin besar. Media yang digunakan dalam penelitian ini adalah air dan udara, untuk arah alirannya di variasikan menjadi tiga arah yaitu arah horizontal, vertikal ke bawah dan vertikal ke atas. Kesimpulan dari penelitian yang dilakukan ini adalah gaya *capillary* pada pipa berukuran kurang dari 5 mm-9 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 dimana ketebalan film air menyelimuti seluruh bagian permukaan pipa secara merata.

Saisorn dan Wongwises, (2008) melakukan penelitian tentang karakteristik aliran udara-air, termasuk pola aliran dua fase, fraksi hampa, dan *pressure drop*. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan saluran melingkar berbahan silika leburan dengan panjang 320 mm dan memiliki diameter dalam 0,53 mm. Pengujian ini dilakukan dengan kecepatan superfisial gas dan cairan berkisar 0,37-16 m/s dan 0,005-3,03 m/s. Penelitian tersebut dilakukan dengan tujuan menyelidiki karakteristik aliran dua fase aliran gas-cair melalui saluran mikro melingkar horizontal dengan diameter 0,53 mm. Data yang terkait dengan penurunan tekanan gesekan dua fase menunjukkan ketergantungan fluks massa serta pola aliran pada pengganda gesekan.

Chung dan Kawaji, (2004) melakukan pengukuran tentang fraksi hampa rata-rata waktu pada saluran sirkular berdiameter 50, 100, 250, dan 530 μm serta 96 μm saluran persegi menggunakan analisis gambar. Model aliran homogen mempunyai kesesuaian yang baik dengan data untuk $D = 530 \mu\text{m}$. Data untuk $D = 250 \mu\text{m}$ sedikit berbeda dari model aliran homogen, tetapi bersesuaian secara baik dengan korelasi yang diusulkan lebih dulu oleh Ali dkk, (1993) untuk aliran dua fase dalam saluran persegi sempit dengan $D_h \sim 1 \text{ mm}$: $\alpha = 0,8 \beta$ dengan $\beta = J_G / J_L$ adalah kualitas volumetrik. Data dari Chung dan Kawaji, (2004) untuk saluran persegi 96 μm dan 50 serta 100 μm menunjukkan kecenderungan berbeda sekali dari korelasi-korelasi tersebut, akan tetapi menunjukkan hubungan yang tidak linier antara α dan β sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.4

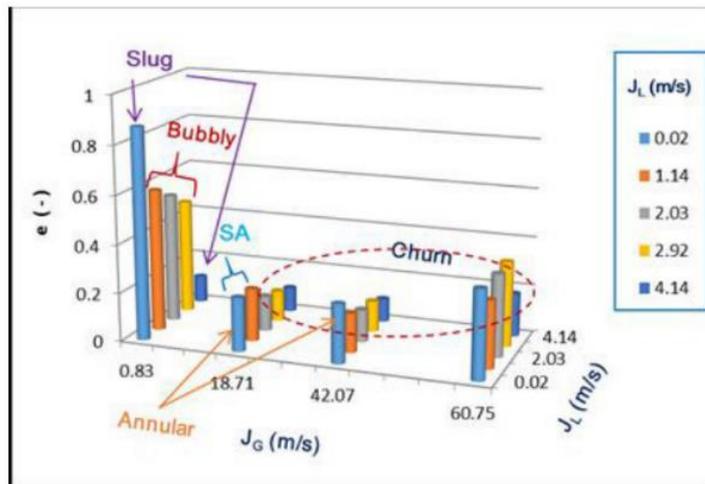


Gambar 2.4 Hubungan antara fraksi hampa dan *volumetric quality*
(Chung dan Kawaji, 2004)

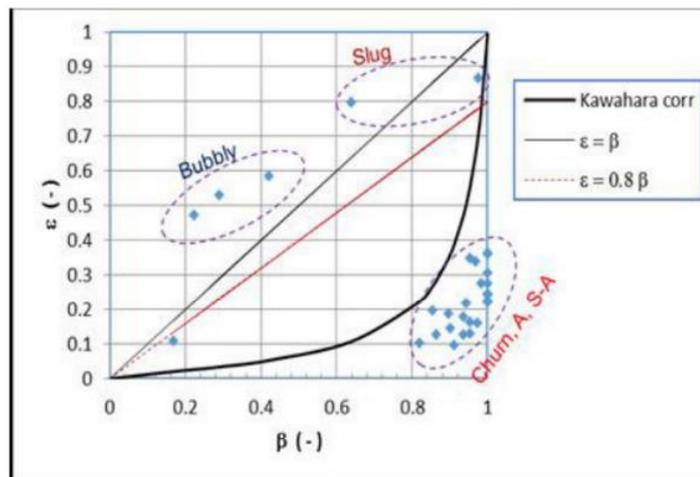
Sadatomi dkk. (2010) melakukan penelitian aliran dua fase gas-cairan pada pipa horizontal berdiameter 3,5 dan 9 mm menggunakan empat macam cairan, yaitu: tap water, larutan *poly-oxy-ethylene lauryl*, larutan *nonionic-polymer-fluorinate* FC4430, dan *purehydrofluoroether* 7200, semetara fluida gasnya adalah udara pada kondisi atmosfer. Mereka melaporkan : properti cairan sangat berpengaruh terhadap transisi pola aliran, terutama transisi aliran *bubbly* ke aliran *slug*; properti cairan tidak berpengaruh banyak pada *frictional pressure drop*, tetapi berpengaruh signifikan pada *interfacial frection force* dan fraksi hampa, terutama pada aliran *bubbly* dan *slug* untuk $J_L=2$ m/s.

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 superficial gas 0,83 - 65,4 m/s dan kecepatan superficial cairan 0,02 - 4,14 m/s.



(a)



(b)

Gambar 2.5 (a) Pengaruh J_G dan J_L terhadap fraksi hampa, (b) Pengaruh β terhadap ϵ . ($\epsilon = \alpha$) (Sudarja dkk., 2015)

Gambar 2.5 (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 disekitar garis korelasi Ali dkk., (1993) ($\epsilon =$

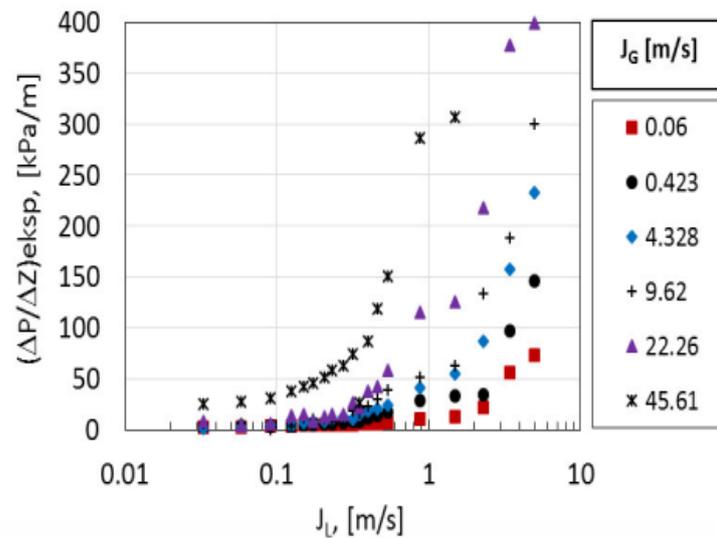
0,8 β) sampai dengan sedikit diatas garis homogen. Aliran *bubbly* dan *plug* tidak terjadi slip atau misalnya ada slip ratio nya mendekati 1. Pola aliran *churn*, *slug-annular* dan *annular* harga ϵ sangat kecil sehingga hampir dibawah garis korelasi (Kawahara dkk., 2002). Kecepatan superfisial gas jauh lebih besar dari pada kecepatan superfisial cairan karena adanya slip ratio yang sangat besar.

Xia dan Chai (2012) menggunakan udara-air dan udara-100 ppm natrium dodesil larutan sulfat sebagai fluida kerja dalam penyelidikan mereka tentang pengaruh surfaktan pada dua fase rezim aliran dan tekanan penurunan pipa miring ke atas. Dari penelitian tersebut, mereka menyimpulkan bahwa gradien tekanan berkurang secara signifikan ketika surfaktan ditambahkan dalam cairan untuk *annular* dan aliran *slug*. Selain itu, mereka juga menemukan bahwa khususnya di aliran *annular*, gradien tekanan secara bertahap menjadi bebas dari efek sudut kemiringan ke atas, dan hanya tergantung pada sifat aliran dua fase.

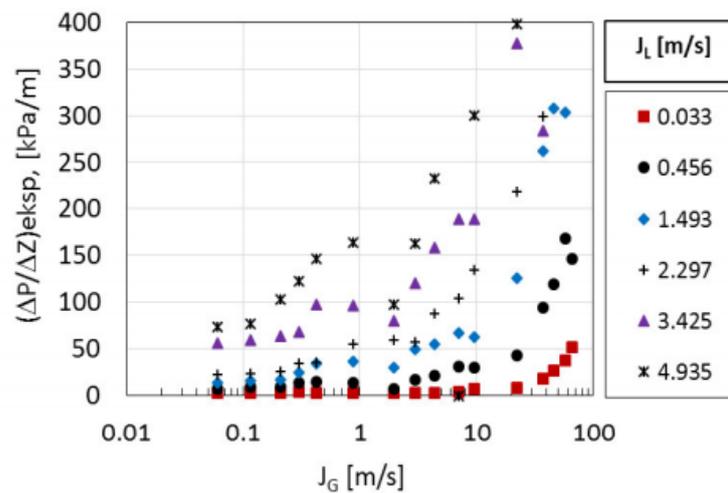
Lee dan Lee, (2001) pada penelitian yang telah dilakukan mengusulkan korelasi baru untuk *pressure drop* dua fase melalui saluran persegi panjang posisi horizontal dengan celah kecil berdasarkan 305 titik data. Jarak antara sisi atas dan bawah setiap saluran berkisar antara 0,4 hingga 4 mm sementara lebar saluran menjadi 20 mm. Air dan udara digunakan sebagai cairan uji. Pada penelitian ini kecepatan superfisial air dan udara masing-masing divariasikan dengan nilai 0,03-2,39 dan 0,05-18,7 m/s. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa gradien tekanan dengan kecepatan superfisial air dan udara untuk ukuran celah masing-masing 0,4 dan 4 mm, gradien tekanan meningkat dengan meningkatnya kecepatan superfisial udara dan air, kemudian gradien tekanan juga meningkat seiring dengan penurunan ukuran celah.

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).



(a)



(b)

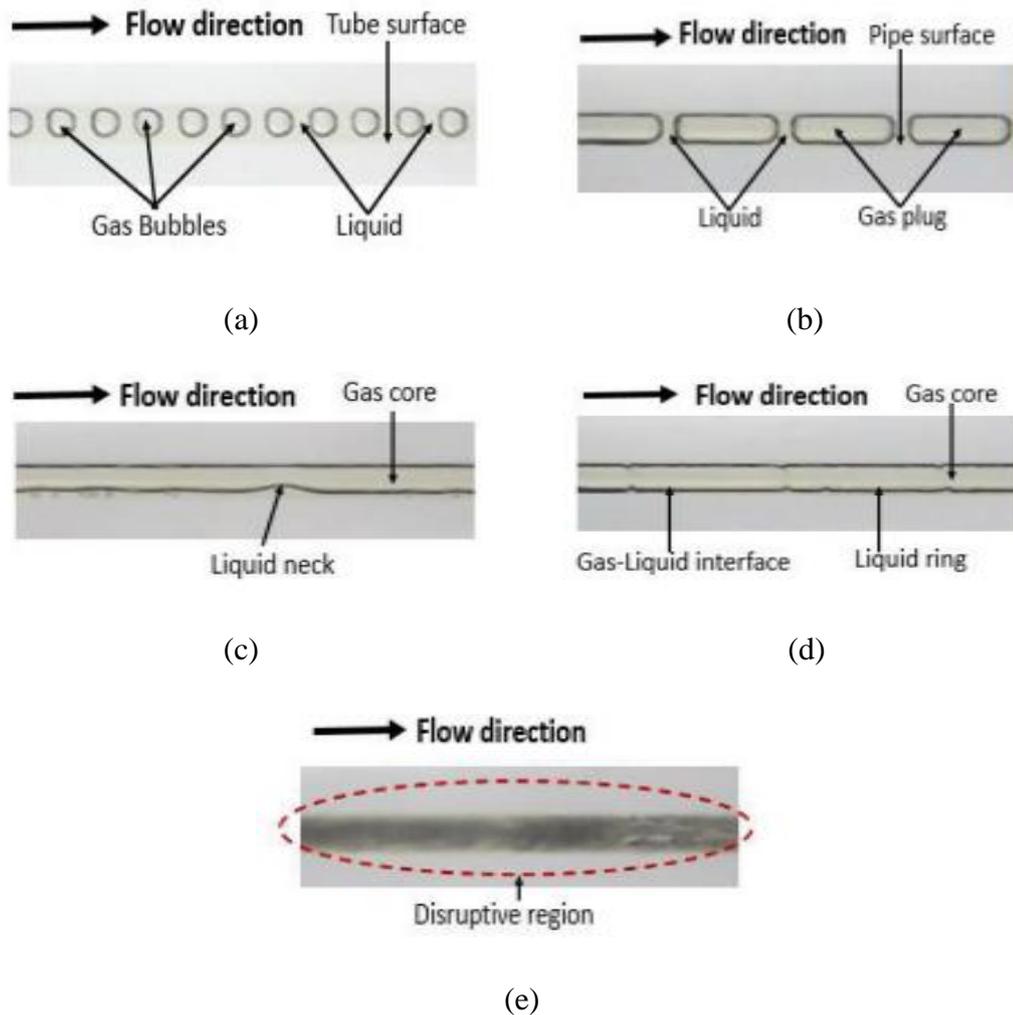
Gambar 2.6 (a) Pengaruh J_L terhadap gradien tekanan dan berbagai J_G , (b) Pengaruh J_G terhadap gradien tekanan pada berbagai J_L (Sudarja dkk., 2016)

Gambar 2.6 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.

Penelitian tentang studi eksperimental pada aliran dua fase dan penurunan tekanan dalam saluran berukuran mini dilakukan oleh (Hassan dkk., 2006). Penelitian dilakukan dengan pengolahan hasil pengukuran penurunan tekanan menggunakan model aliran homogen. Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil peneliti sebelumnya untuk saluran berukuran 3 mm, 1 mm, dan 0,8 mm. Hasil dari penelitian tersebut yaitu perbandingan rezim-peta aliran menunjukkan perbedaan yang umum antara data eksperimen yang dikumpulkan selama percobaan dengan data yang diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya. Setelah dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, didapatkan bahwa garis transisi yang disederhanakan memberikan perkiraan yang baik dari transisi rezim dengan rentan peta yang diperbolehkan.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Ismail dkk. (2015) yang meneliti tentang investigasi penurunan gradien tekanan dua fase minyak-air dalam pipa horizontal. Penelitian tersebut dilakukan untuk aliran dua fase minyak- air dalam loop aliran ID 5,08 cm horizontal. Pada penelitian tersebut terjadi penurunan tekanan dan penumpukan cairan pada laju aliran yang berbeda dari aliran dua fase minyak-air. Penurunan tekanan tertinggi yang diperoleh adalah 11,58 kPa pada debit maksimum yaitu 16,21 cm³/s dan fraksi minyak 0,9. Penurunan tekanan terendah 1,31 kPa pada debit terendah yaitu 2,30 cm³/s dan fraksi air 0,9.

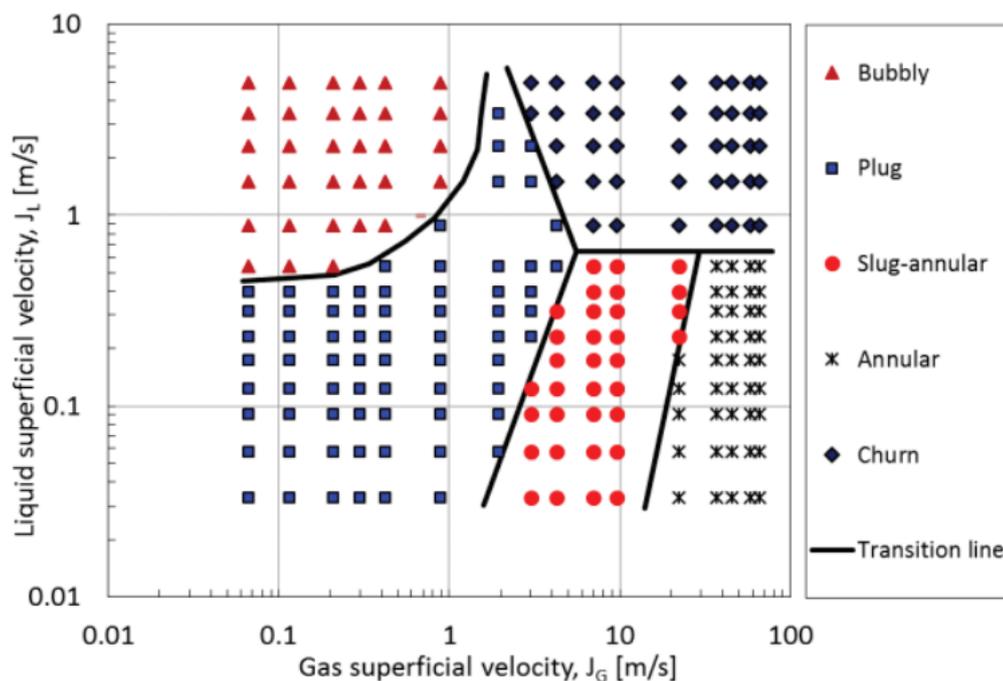
Sudarja dkk. (2018) melakukan penelitian aliran dua fase menggunakan pipa berdiameter 1,6 mm. fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah udara dan campuran akuades-gliserin dengan konsentrasi (0%, 20%, 40% dan 60%). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari viskositas dan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



Gambar 2.7 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)

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 2.7.

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 2.8 memperlihatkan peta pola aliran yang berhasil diamati.



Gambar 2.8 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 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 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 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 ukurannya digolongkan menjadi beberapa jenis sesuai dengan ukuran diameternya yaitu *conventional channels* ($D > 3 \text{ mm}$), *minichannels* ($3 \text{ mm} > D > 200 \text{ }\mu\text{m}$), *microchannels* ($200 \text{ }\mu\text{m} > D > 10 \text{ }\mu\text{m}$), *transisional channels* ($10 \text{ }\mu\text{m} > D > 0,1 \text{ }\mu\text{m}$) dan *molecular nanochannels* ($0,1 \text{ }\mu\text{m} > D$)

2.2.2 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.

2.2.3 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 C_4H_9OH dan digunakan sebagai pelarut, perantara sintesis kimia dan bahan bakar. N-Butanol diproduksi secara industri dengan mereaksikan *n-butiraldehid* dan hidrogen. Butanol memiliki viskositas 2,95 cP pada 20° dan tegangan permukaan sebesar 24,6 mN/m pada 20° .

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 superficial gas (m/s)

J_L = Kecepatan superficial cairan (m/s)

Q_G = Laju aliran gas dalam pipa (m^3/s)

Q_L = Laju aliran cairan dalam pipa (m^3/s)

A = Luas penampang pipa (m^2)

2.3 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 aliran 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.

2.4 Fraksi Hampa

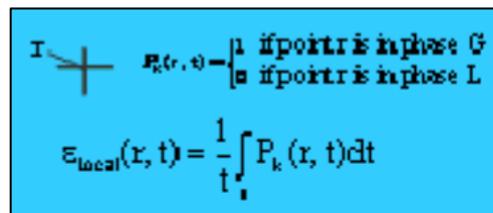
Fraksi hampa merupakan salah satu parameter dari aliran dua fase yang sangat penting. Fraksi hampa merupakan kunci untuk menentukan parameter penting lainnya seperti massa jenis dan viskositas dua fase, menentukan kecepatan relatif rata-rata dan merupakan hal penting dasar dalam prediksi permodelan transisi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

2.4.1 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 2.9 menunjukkan skema fraksi hampa *local* (Thome, 2004).



$\varepsilon_{local}(r, t) = \frac{1}{t} \int_0^t P_k(r, t) dt$

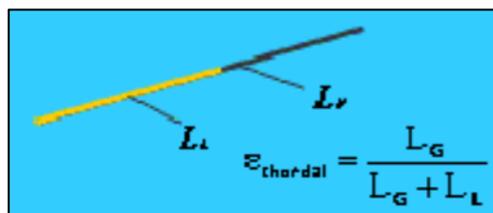
Gambar 2.9 Fraksi hampa *local*

2.4.2 Metode *Chordal*

Fraksi hampa *chordal* dihitung dengan menyinari sinar radioaktif sempit melalui saluran aliran dua fase didalamnya 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.

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

Dengan L_G adalah Panjang fase gas, sedangkan L_L adalah Panjang fase cairan. Gambar 2.10 menunjukkan Skema fraksi hampa *chordal*.

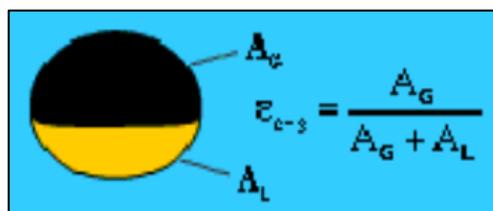
Gambar 2.10 Skema fraksi hampa *chordal*

2.4.3 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.

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

Dimana A_G adalah area dari *cross-section* pada saluran yang merupakan luasan gas dan A_L merupakan luasan dari cairan. Gambar 2.11 menunjukkan skema fraksi hampa *cross-section*.

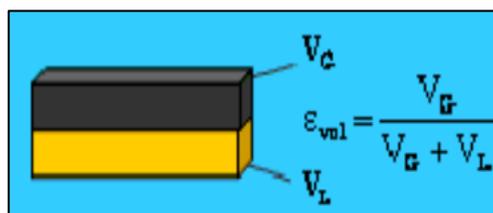
Gambar 2.11 Fraksi hampa *cross-section*

2.4.4 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.

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

Dimana V_G adalah volume dari saluran yang ditempati oleh fase gas dan V_L merupakan volume fase cair. Gambar 2.12 menunjukkan skema fraksi hampa volumetrik.

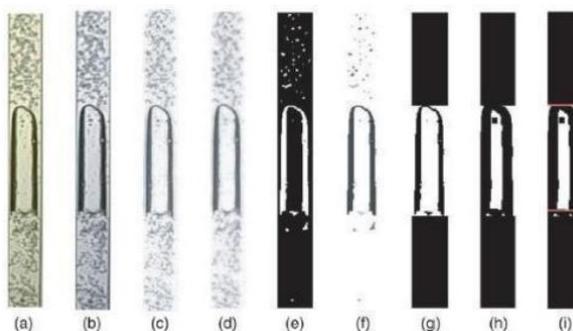


Gambar 2.12 Fraksi hampa volumetrik

2.5 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 produktifitas yang tinggi dikalangan *engineers* dan *scientists*.



Gambar 2.13 Digital Image processing (Mayor dkk., 2007)

Gambar 2.13 adalah langkah-langkah yang digunakan untuk mendapatkan nilai fraksi hampa dengan menggunakan metode *digital image processing*. Berikut adalah istilah-istilah pada *digital image processing*.

2.5.1 *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.

1. Gambar RGB

Gambar RGB adalah image yang terdiri dari tiga matriks yang masing-masing mempresentasikan warna merah, hijau dan biru. Gambar 2.14 merupakan gambar RGB yang pada setiap piksel mempunyai nilai tertentu dengan range 0-255 sehingga mempunyai kemungkinan 16,777,216 warna.



Gambar 2.14 Contoh gambar RGB dengan aliran *plug*

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. Gambar 2.15 merupakan gambar *greyscale* dari aliran *plug*.



Gambar 2.15 Contoh gambar *greyscale* dengan aliran *plug*

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 2.16 menunjukkan contoh gambar biner.



Gambar 2.16 Contoh gambar biner dengan aliran *plug*

2.5.2 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 ditempat 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 dimana terdapat titik-titik kecil pada gambar.

2.5.3 *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 disekitarnya. 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.

2.5.4 **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.

2.6 *Pressure Gradient*

Pressure gradient atau gradien tekanan adalah penurunan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi pada dua titik didalam 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. *Specific 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. 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.