

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

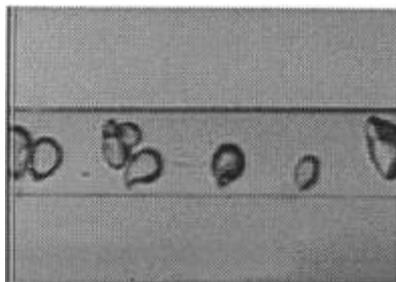
Beberapa peneliti telah melakukan penelitian tentang aliran dua fase. Penelitian mengenai karakteristik aliran dua fase pada pipa berukuran mini sudah cukup sering dilakukan. Namun, penelitian tersebut menghasilkan hasil yang berbeda-beda. Perbedaan tersebut terjadi karena tiap penelitian dilakukan dengan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

Penelitian yang dilakukan oleh Fukano dan Kariyasaki (1993) melakukan riset eksperimental pada karakteristik aliran dua fasa dalam tabung kapiler dengan diameter pipa bagian dalam dari 1 mm, 2,4 mm dan 4,9 mm. 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. 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 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.

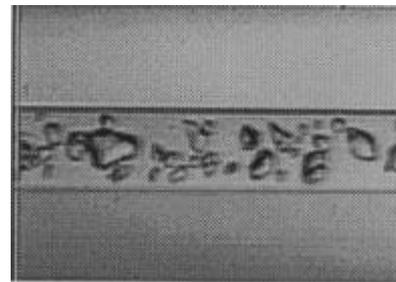
Wongwises dan Saisorn, (2008) penelitian tentang karakteristik aliran udara-air, termasuk pola aliran dua fase, fraksi hampa, dan *pressure drop*. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan saluran melingkar berbahan silika leburan dengan panjang 320 mm dan memiliki diameter dalam 0,53 mm. Pengujian ini 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.

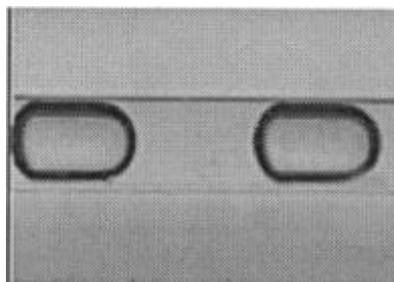
Triplet dkk., (1999) telah melakukan penelitian aliran dua fase pada pipa berukuran mini dengan diameter 1,097 dan 1,45 mm. Fluida kerja yang digunakan adalah udara dan air. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tegangan permukaan lebih dominan dari pada gravitasi. Sehingga, gravitasi tidak mempengaruhi 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.



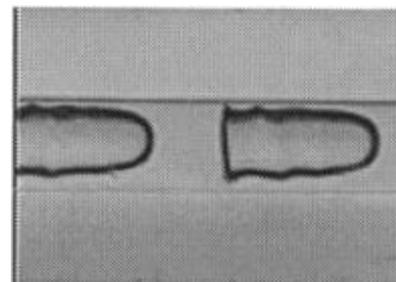
(a) $J_L = 3,021 \text{ m/s}$; $J_G = 0,083 \text{ m/s}$



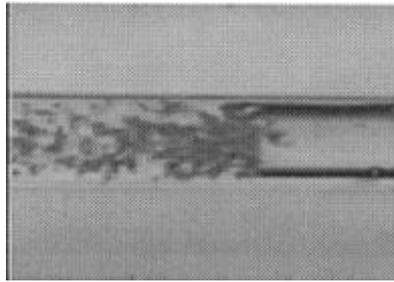
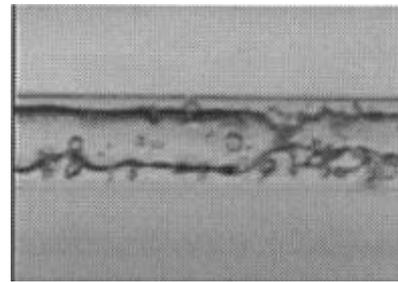
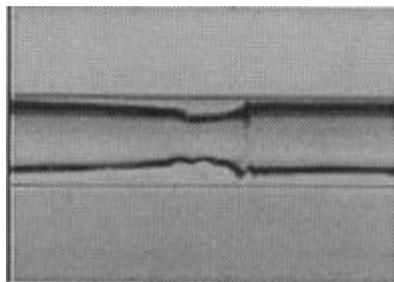
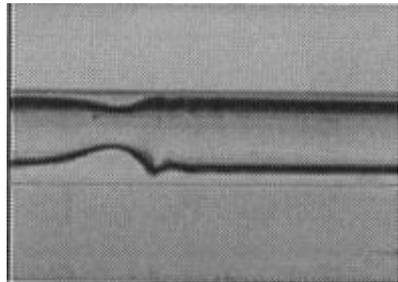
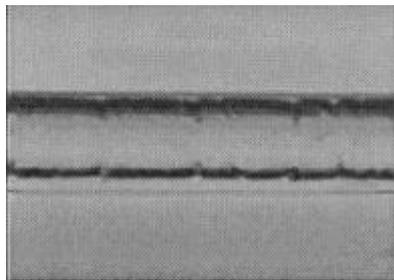
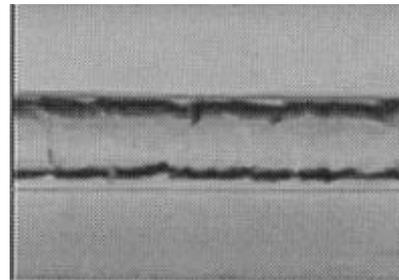
(b) $J_L = 5,997 \text{ m/s}$; $J_G = 0,396 \text{ m/s}$



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

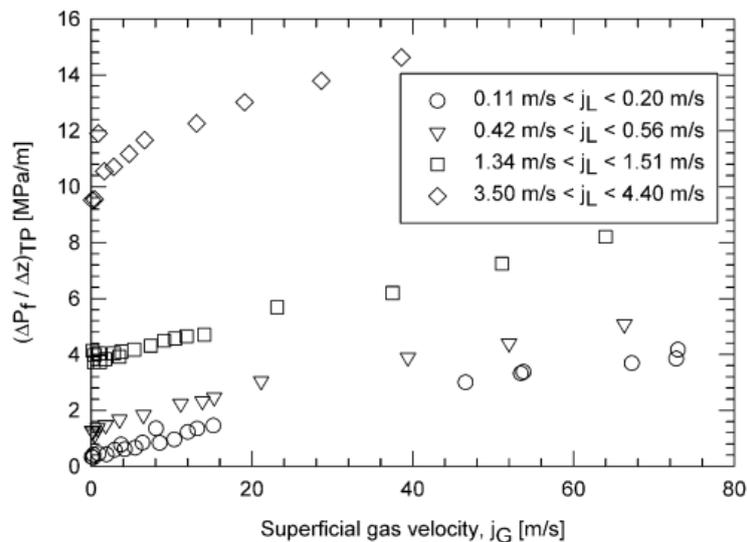
Gambar 2.1 Pola aliran pada *circular microchannels* berdiameter 1,097 mm
(Triplet dkk., 1999)

Triplet dkk., (1999) berpendapat bahwa munculnya aliran *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 *plug*. Aliran *plug* 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.

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*.

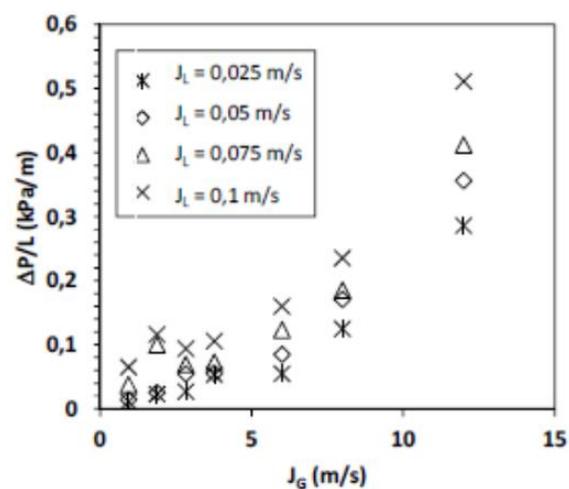
Penelitian tentang penurunan tekanan pada aliran dua fase dengan menggunakan saluran mikro juga dilakukan oleh (Kawahara dkk., 2002). Ukuran diameter pipa yang digunakan sebesar 100 μm . Hasil yang didapat adalah meningkatnya gradien tekanan gesekan aliran dua fase yang diakibatkan oleh meningkatnya kecepatan gas superfisial (J_G) dan kecepatan superfisial cairan (J_L). Pada saluran mikro, aliran homogen tidak berhasil menunjukkan data penurunan tekanan dua fase karena perbandingan selip yang didapat sangat besar, sehingga pola aliran dua fase tidak homogen.



Gambar 2.2 Data gradien tekanan gesek dua fase (Kawahara dkk., 2002)

Gambar 2.2 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.

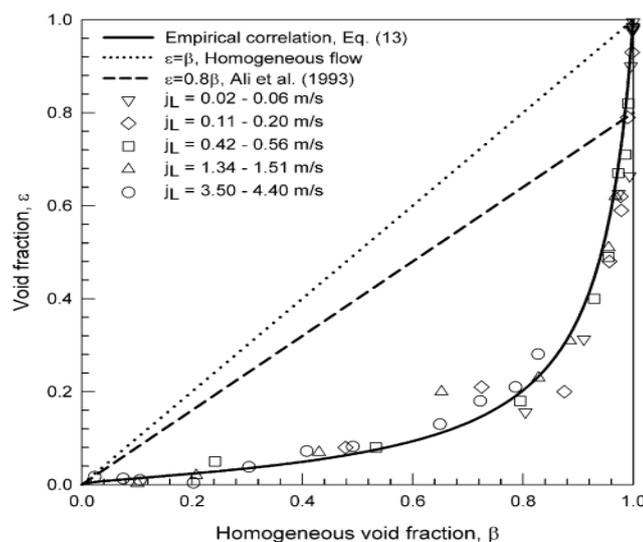
Gunawan dkk., (2015) melakukan eksperimen mengenai tegangan geser antarmuka dan fluktuasi tekanan pada aliran *stratified* air-udara pada pipa horizontal. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dengan visualisasi dan perhitungan beda tekanan pada pipa akrilik dengan diameter dalam 26 mm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

Lee dan Lee, (2001) 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. Rentang kecepatan superfisial air dan udara masing-masing adalah 0,03-2,39 dan 0,05-18,7 m / s. Pada penelitian ini 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.

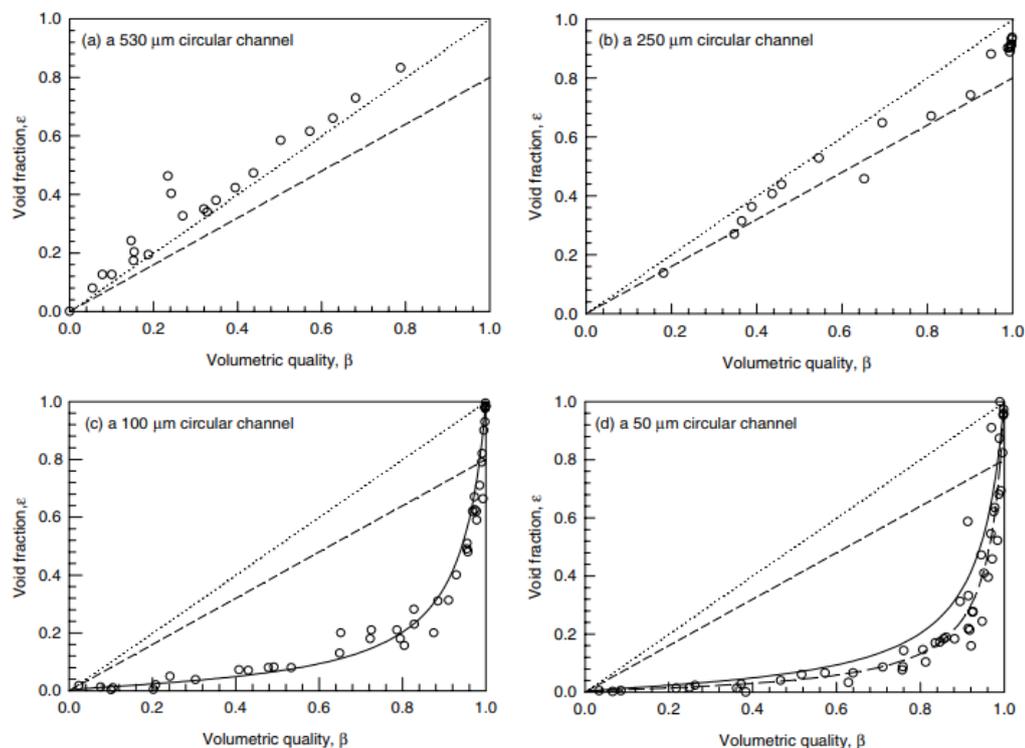
Kawahara dkk, (2002) melakukan pengukuran tentang fraksi hampa pada pipa dengan diameter 100 μm . Pada saat fluida air mengalir dengan flow rate yang rendah, gambar yang terekam didominasi aliran air tanpa ada udara ($\epsilon = 0$), dan inti gas mengalir dengan film cairan halus. Sedangkan pada saat rata-rata aliran tinggi, terdapat tiga jenis aliran yang terekam yaitu aliran air tunggal ($\epsilon = 0$), inti gas yang mengalir dengan film cairan halus ($\epsilon = 1$), dan inti gas yang mengalir dengan film cairan tebal ($0 < \epsilon < 1$). Pada Gambar 2.4 menunjukkan grafik fraksi hampa yang dihasilkan dari penelitian Kawahara dkk, (2002).



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 ($0 < \epsilon < 1$).

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.



Gambar 2.5 Hubungan antara fraksi hampa dan *volumetric quality*
(Chung dan Kawaji, 2004)

Gambar 2.5 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.

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 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*.

Menurut Krishnamurthy dan Peles (2009), pemahaman yang baik tentang tegangan permukaan penting untuk meningkatkan desain beberapa sistem mikro. Data yang dikumpulkan dan dianalisis dalam penelitian adalah pola aliran (peta pola aliran yang dihasilkan), fraksi void, dan penurunan tekanan. Selain itu, panjang dan kecepatan bergelembung / steker dianalisis juga. Faktor penting yang mempengaruhi pola aliran adalah tegangan permukaan, ketersediaan gravitasi, kerapatan, kecepatan aliran, dan geometri diameter / pipa. Salah satu tujuan dari studi pola aliran adalah untuk menentukan nilai koefisien konveksi (h) pada perpindahan panas dan penurunan tekanan (ΔP). Sedangkan studi fraksi void bertujuan untuk mengetahui komposisi fasa gas dan fasa cair yang terjadi pada aliran. Komposisi fase yang terjadi mempengaruhi properti aliran dan nilai properti.

Dengan mengetahui komposisi fasa dari aliran, nilai properti dari aliran dua fase dapat diketahui, dan dengan demikian memudahkan analisis lebih lanjut. Kemudian, perhitungan penurunan tekanan dapat digunakan untuk menentukan karakteristik kurva sistem perpipaan, yang kemudian dapat digunakan untuk menentukan pompa spesifikasi yang akan digunakan untuk mengirimkan fluida melalui jaringan pipa, atau untuk menentukan titik kerja pompa.

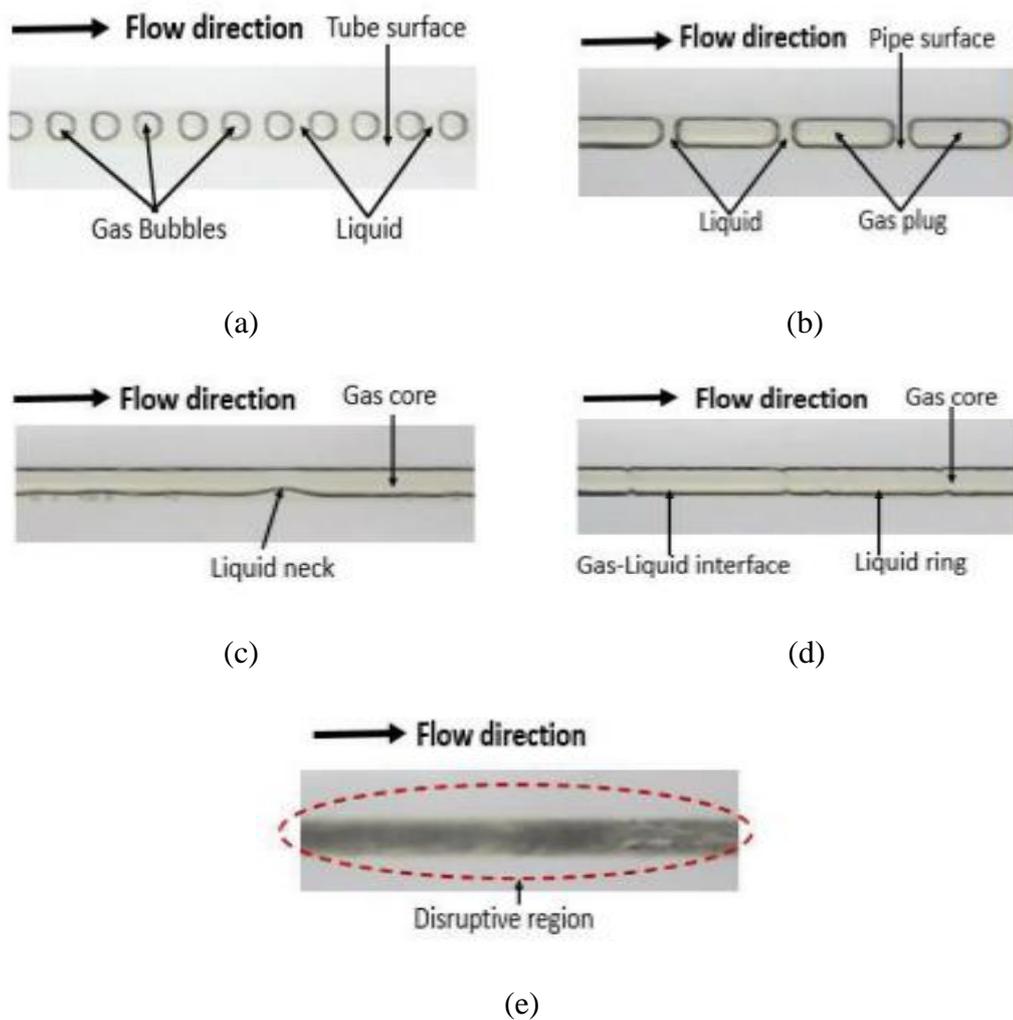
Siregar, (2016) melakukan penelitian mengenai pola aliran dua fase udara dan campuran air-butanol pada saluran mini horizontal berdiameter 1,6 mm. Fluida kerja yang digunakan adalah udara untuk fase gas dan air-butanol untuk fase cair dengan konsentrasi (2%, 4% dan 6%). Penelitian dilakukan untuk mengetahui 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*.

Saisorn dan Wongwises (2008) telah melakukan penelitian pada karakteristik aliran dua fase pola aliran, fraksi hampa dan gradien tekanan dalam sebuah *micro circular channel* yang memiliki diameter 0,53 mm pada posisi horizontal. Penelitian dilakukan pada kecepatan superfisial gas dan cairan dengan rentang masing-masing 0,37-16 m/s dan 0,005-3.04 m/s. Penelitian ini dihitung dari penurunan tekanan total aliran udara-air melalui saluran diameter 0,53 mm. Penurunan tekanan total dituliskan pada persamaan berikut:

$$\Delta P_{\text{exp}} = \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_c$$

Dengan ΔP_f adalah penurunan tekanan akibat gesekan, ΔP_a penurunan tekanan karena percepatan dan ΔP_c merupakan penurunan tekanan karena kontraksi secara tiba-tiba. Dengan kondisi aliran berbeda, penurunan tekanan akibat gesekan mendominasi penurunan tekanan akibat adanya percepatan dan kontraksi secara tiba-tiba.

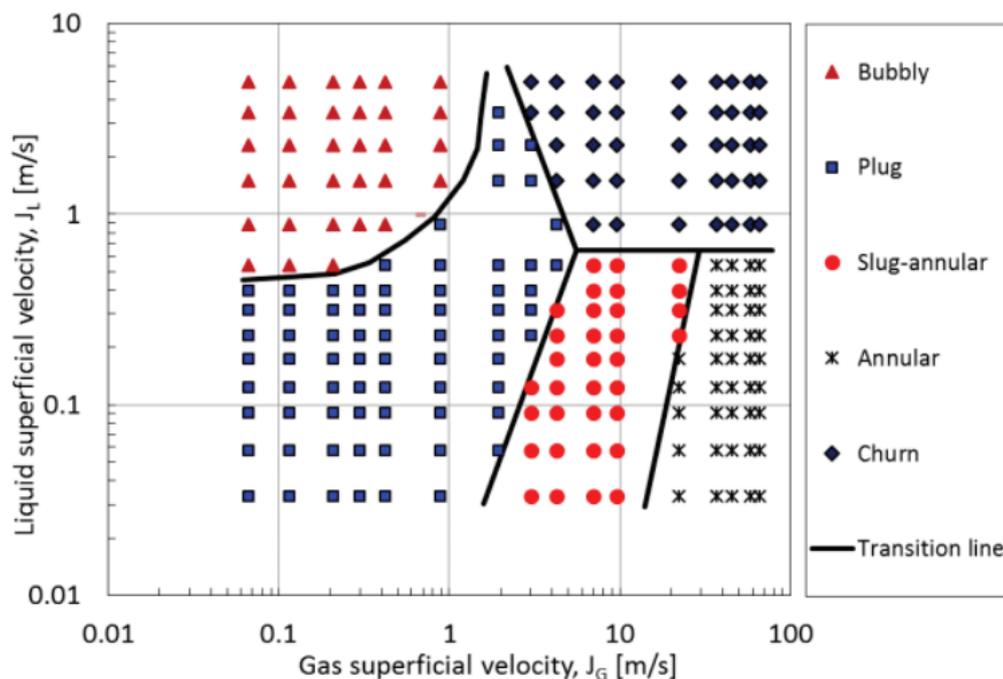
Sudarja dkk., (2018) melakukan penelitian aliran dua fase menggunakan pipa berdiameter 1,6 mm. fluida kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah udara dan campuran akuades-gliserin dengan konsentrasi (0%, 20%, 40% dan 60%). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari viskositas 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 2.6.



Gambar 2.6 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 2.7 memperlihatkan peta pola aliran yang berhasil diamati.



Gambar 2.7 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. Dasar 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 ukuran salurannya 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 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 ³ , 20 °C

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)

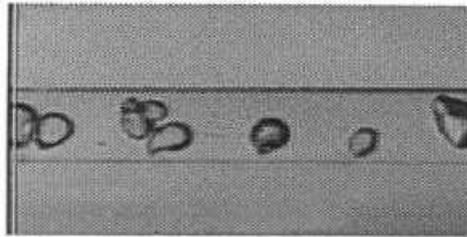
2.3. Pola Aliran

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 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.

Triplett dkk. (1999) melakukan penelitian 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. Triplett dkk 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*

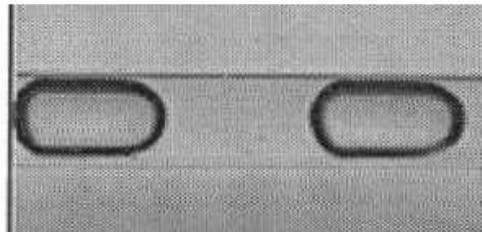
Bubbly flow merupakan pola aliran yang berbentuk gelembung yang didominasi oleh cairan. Terbentuk pada saat nilai J_G sangat kecil dan nilai J_L lebih besar dibandingkan nilai J_G .



Gambar 2.8 Pola aliran *bubbly* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999)

b. *Plug Flow*

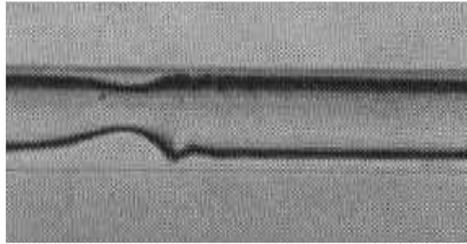
Plug flow merupakan pola aliran yang berbentuk seperti peluru, dimana antara cairan terdapat kantong udara yang berasal dari *bubbly* yang diperpanjang akibat meningkatnya intensitas udara dalam aliran.



Gambar 2.9 Pola aliran *Plug* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999)

c. *Slug annular*

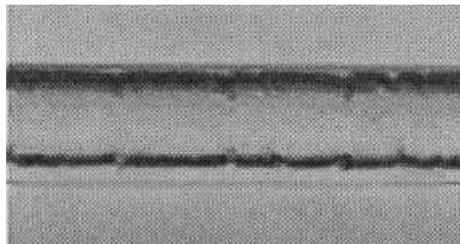
Pola aliran *slug annular* memiliki struktur dimana lapisan film cairan yang memiliki ketebalan lebih besar pada suatu titik dibanding titik lainnya disepanjang aliran tersebut.



Gambar 2.10 Pola aliran *slug annular* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999)

d. Annular Flow

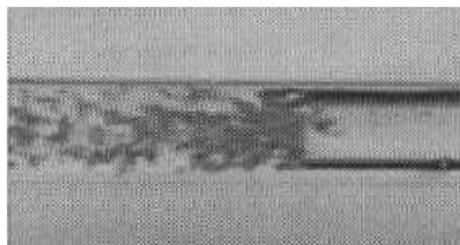
Pola aliran *annular* memiliki struktur dimana fasa air terletak mengelilingi saluran dan fase udara berada di tengah-tengah fase air.



Gambar 2.11 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.



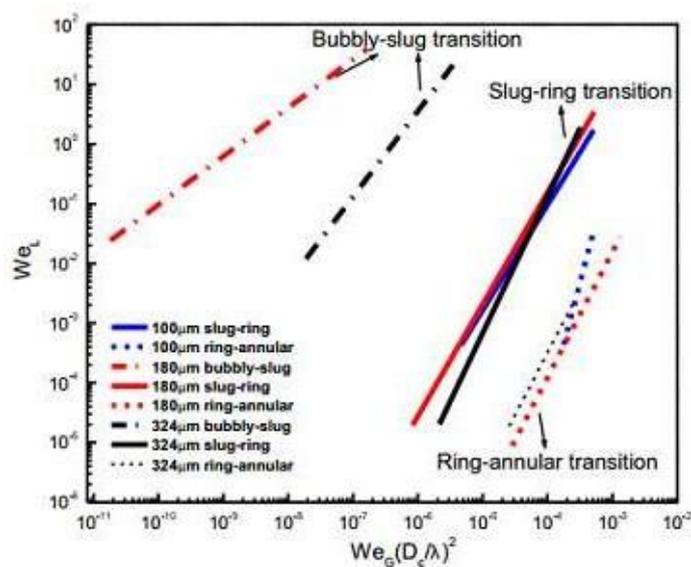
Gambar 2.12 Pola aliran *churn* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999)

2.4. Peta Pola Aliran

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,

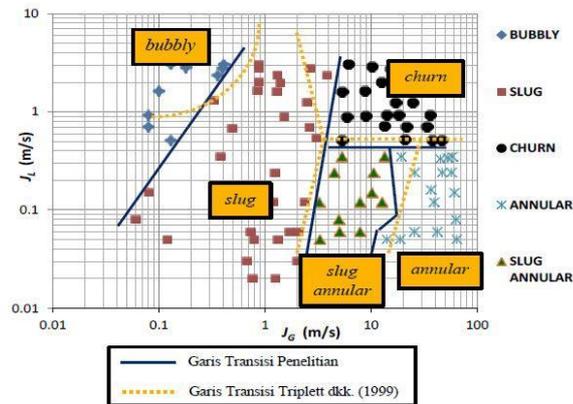
beberapa penelitian juga menggunakan metode yang berbeda yaitu dengan menggunakan bilangan *weber* sebagai koordinat yang menunjukkan hubungan tegangan permukaan dan gaya inersia.

Sur dan Liu (2011) menyatakan bahwa ukuran saluran mempengaruhi pola aliran yang terbentuk dan mempengaruhi daerah transisi pola aliran. Oleh karena itu, mereka menggunakan parameter yang tidak memiliki dimensi sebagai acuan We_G sebagai sumbu x dan We_L sebagai sumbu y untuk menyajikan peta pola aliran sebagai pengaruh dari efek ukuran saluran. Peta pola aliran Sur dan Liu (2011) yang ditunjukkan pada gambar 2.13.



Gambar 2.13. Peta pola aliran dua fase udara-air pada pipa horizontal berdiameter 100, 180 dan 324 μm (Sur dan Liu, 2011)

Sudarja dkk (2014) menggambarkan hasil pola aliran yang didapat dalam bentuk peta pola aliran dua fase pada pipa mini. Peta pola aliran yang digambarkan menggunakan kecepatan superfisial gas dan kecepatan superfisial udara sebagai koordinatnya. Peta pola aliran yang didapat kemudian dibandingkan dengan peta pola aliran yang dilakukan dalam penelitian Triplett dkk (1999).



Gambar 2.14 Peta pola aliran Sudarja dkk (2014) dibandingkan dengan peta pola aliran Triplett dkk (1999)

2.5. 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, 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:

2.5.1. Metode Local

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

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

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 $P_k(\mathbf{r}, t)$ mewakili adanya uap *local instantaneous* di beberapa *radius* r dari tengah saluran pada waktu t . Jadi, $P_k(\mathbf{r}, t) = 0$ ketika fase cair dan $P_k(\mathbf{r}, t) = 1$ ketika fase uap. Gambar 2.15 menunjukkan skema fraksi hampa *local* (thome, 2004).

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

Gambar 2.15 Fraksi hampa *local* (thome, 2004)

2.5.2. 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.

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

Dengan L_G adalah Panjang fase gas, sedangkan L_L adalah Panjang fase cairan. Gambar 2.16 menunjukkan Skema fraksi hampa *chordal*.

$$\epsilon_{chordal} = \frac{L_G}{L_G + L_L}$$

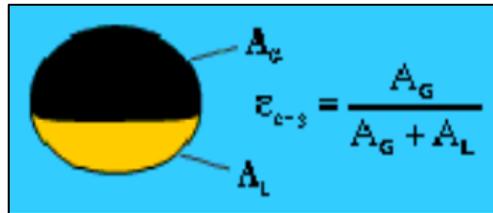
Gambar 2.16 Skema fraksi hampa *chordal* (Thome, 2004)

2.5.3. 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 2.17 menunjukkan skema fraksi hampa *cross-section*.



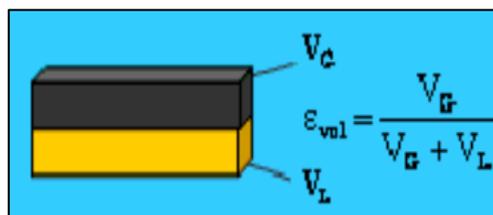
Gambar 2.17 Fraksi hampa *cross-section* (Thome, 2004)

2.5.4. 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.

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

Dimana V_G adalah volume dari saluran yang ditempati oleh fase gas dan V_L merupakan volume fase cair. Gambar 2.18 menunjukkan skema fraksi hampa volumetrik.

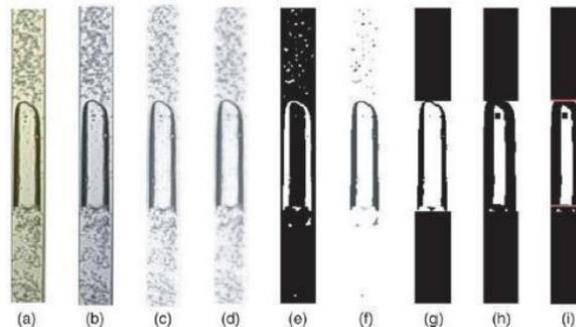


Gambar 2.18 Fraksi hampa volumetrik (Thome, 2004)

2.6. 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 2.19 *Digital Image processing* (Mayor dkk., 2007)

Gambar 2.19 adalah langkah yang digunakan untuk mendapatkan nilai fraksi hampa dengan menggunakan metode *digital image processing*. Berikut adalah istilah-istilah pada *digital image processing*.

2.6.1. *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 2.20 merupakan gambar RGB yang pada setiap piksel mempunyai nilai tertentu dengan range 0-255 sehingga mempunyai kemungkinan 16,777,216 warna.

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.

2.6.2. *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.

2.6.3. *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.

2.6.4. **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 Nilai rata-rata, *Probability Distribution Function* (PDF), *Power Spectral Density* (PSD) dan *cross-correlation*.

1. Nilai rata-rata

Data fraksi hampa pada kecepatan superfisial gas (J_G) dan kecepatan superfisial cairan (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-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.

2.7. **Gradien Tekanan**

Pressure drop adalah penurunan tekanan dari satu titik di dalam sistem ke titik lain yang mempunyai tekanan lebih rendah. Pada aliran dua fase banyak metode yang dipakai sesuai kondisi sistem. *Pressure drop* pada aliran dua fase diistilahkan gradien tekanan yaitu penurunan tekanan yang terjadi di setiap panjang pipa. 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. Ada dua macam metode pendekatan untuk menghitung dan menganalisis *pressure drop* pada aliran dua fase, yaitu :

1. Model aliran homogen (*homogeneous flow model*), Model aliran homogen merupakan permodelan sederhana dalam menentukan pressure drop aliran dua fase. Pada konsep ini aliran diasumsikan sebagai aliran satu fase termasuk persamaannya dengan kondisi sifat fisik fluida, liquid dan gas dibuat rata-rata.
2. Model aliran terpisah (*separated flow model*), Metode ini lebih akurat, karena pada model ini aliran dua fase diasumsikan sebagai aliran yang terpisah yaitu cairan dan gas dimana masing-masing fase memiliki persamaan yang berbeda.

2.8. Pengukuran Perbedaan Tekanan

Penyebab terjadinya perbedaan tekanan di dalam dinding pipa adalah gesekan antar fase cair maupun udara dan juga antara kedua fase terhadap permukaan dinding pipa. Perbedaan tekanan didalam dinding pipa diukur dengan *Pressure Transducer MPX System*. *MPX System* berfungsi untuk mendeteksi beda tekanan atau penurunan tekanan antar sisi masuk dan sisi keluar. Kemudian *Arduino UNO* menghubungkan sensor tekanan *fluida MPX System* ke perangkat komputer agar data bisa diolah dan direkam kedalam perangkat komputer melalui *software* yang sudah terinstal.