

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian aliran dua-fase sangat luas melihat dari klasifikasi yang telah dilakukan peneliti sebelumnya. Mulai dari luas penampang yang digunakan, parameter apa yang ditinjau, dan fluida apa yang dipakai untuk diteliti pada sebuah pipa. Penelitian serta investigasi tentang aliran dua-fase pada *mini-channel* telah dimulai sejak lama dan sampai sekarang masih terus dikembangkan.

Fukano dan Kariyasaki (1993) melakukan riset eksperimental pada karakteristik aliran dua fase dalam tabung kapiler dengan diameter pipa bagian dalam dari 1 mm, 2,4 mm dan 4,9 mm. Perhatian telah difokuskan pada pola aliran, fraksi hampa, dan penurunan tekanan. Tekanan statis dan tekanan *difference* diukur dengan menggunakan *pressure transducer*. Fraksi hampa diukur dengan metode arus konstan. Mereka melihat bahwa arah aliran tidak mempengaruhi pada pola aliran, untuk $D < 4.9$ mm disini D_c didefinisikan sebagai diameter pipa bagian dalam. Dalam pipa dengan diameter dalam lebih kecil, gradien tekanan jauh lebih besar dari yang diperkirakan oleh persamaan chisholm ini.

Mishima dan Hibiki (1996) melaporkan karakteristik aliran dua fase gas-cair dalam tabung berdiameter kecil dengan diameter pipa bagian dalam dari 1 - 4 mm. Mereka mengusulkan parameter chisholm baru dari diameter dalam di mana berlaku untuk kedua pipa kapiler horisontal dan vertikal.

Triplett dkk. (1999) melakukan *study* eksperimental pada pipa kecil saluran melingkar (1,10 mm, 1,45 mm dari diameter bagian), dan saluran semi-segitiga (dengan diameter hidrolis 1,09 mm, 1,49 mm). Penelitian dilakukan dengan kecepatan superfisial gas $0,02 \pm 80$ m/s dan superfisial cairan $0,02 \pm 8$ m/s. pekerjaan ini difokuskan pada pola aliran, fraksi hampa, dan penurunan tekanan. Mereka melaporkan bahwa pola aliran yang didapat yaitu pola aliran *bubbly*, *plug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*. Mereka juga melaporkan bahwa berdasarkan penelitian sebelumnya perbedaan yang sangat signifikan antara saluran ukuran besar dan saluran ukuran kecil dalam hal pola aliran dua fase, dua-fase penurunan

tekanan, serta perpindahan panas dan fluks panas kritis ditemukan. Dari tegangan permukaan dalam saluran ukuran kecil mengurangi secara signifikan kecepatan slip, dan membuat independensi karakteristik aliran terhadap orientasi saluran dalam hal gravitasi.

Serizawa dkk. (2002) melakukan *study* eksperimental dengan menggunakan udara-air dan uap-air sebagai fluida kerja. Dalam penelitian ini menggunakan pipa diameter bagian dalam 20 μm , 25 μm , dan 100 μm . pola aliran yang diamati yaitu pola aliran *slug*, aliran *slug annular*, cincin cair, benjolan cair, *annular*, *annular* berbusa atau tipis, tetesan cairan dan jenis khusus dari aliran. Dalam hal fraksi batal, hasil mereka berada dalam perjanjian baik dengan korelasi Armand. Mereka menyimpulkan bahwa $\alpha = 0,833 \beta$ disini $\alpha \beta$ diukur fraksi kosong dan fraksi hampa homogen masing-masing.

Kawahara dkk. (2002) melakukan *study* eksperimental dengan diameter bagian dalam saluran melingkar 100 mm yang terbuat dari leburan silika. Cairan yang bekerja adalah ionisasi air dan nitrogen. Mereka melaporkan bahwa pola aliran yang diamati adalah *intermitten* dan semi-arus *annular*, sementara pola aliran *bubble* dan *churn* tidak hadir. Dalam hal fraksi hampa semua data mereka jauh di bawah model garis homogen. Mereka menjelaskan bahwa pada tingkat aliran gas yang rendah rasio slip saluran mikro menjadi lebih tinggi daripada saluran dengan diameter hidrolis lebih besar dari 1 mm. Dua data aliran fase *multiplier* berada dalam perjanjian baik dengan model aliran memisahkan Lochart-Martinelli, tapi over-prediksi terhadap model aliran homogen.

Mirip dengan Kawahara dkk. Chung dan Kawaji (2004) juga melakukan insvestigasi karya-karya eksperimental pada aliran dua fase saluran mikro dengan diameter pipa bagian dalam dari 530 μm , 250 μm , 100 μm dan 50 μm . Fluida kerja menggunakan Cairan gas nitrogen dan air. Mereka melaporkan bahwa pola aliran yang teridentifikasi untuk saluran aliran dengan diameter dalam dari 530 μm , 250 μm pola aliran yang diamati adalah *bubbly*, *slug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*. Sementara itu, untuk saluran aliran dengan diameter pipa bagian dalam dari 100 μm , 50 μm , pola aliran yang diamati hanya pola aliran *slug*. Tidak adanya pola aliran lain di diameter saluran yang lebih kecil disebabkan oleh tegangan

permukaan yang lebih tinggi dan efek viskositas pada aliran cairan. Dalam hal ini, gaya inersia memiliki kekuatan untuk mengubah aliran *slug* untuk *churn* tidak aliran *annular* bahkan kedua kecepatan superfisial meningkat.

Liu dan Gao (2007) melakukan *study* eksperimental tentang pengaruh surfaktan pada pola aliran dua fase dengan diameter pipa bagian dalam 1.6 mm. Fluida cairan yang bekerja dalam penelitian mereka menggunakan campuran air dan *sodium dodesil benzoil sulfat* (NaDBS) campuran / natrium udara-air. Mereka melaporkan bahwa pola aliran transisi dalam tabung kecil vertikal untuk udara-NaDBS campuran cenderung terjadi pada kecepatan aliran rendah dibandingkan dengan aliran gas-air. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa surfaktan menurunkan tegangan permukaan cairan kerja cair.

Pengukuran panjang *bubbly* dan membuntuti kecepatan gelembung dilakukan oleh Xia dkk. (2009) menganalisa gerakan kecepatan tinggi dengan menggunakan EKTAPRO 1000. Mereka menyatakan bahwa optik korelasi antara *bubbly* dan panjang *slug* di depan gelembung tersebut berasal dari data percobaan. Mereka kemudian mengusulkan model untuk distribusi panjang *bubble* setiap lokasi yang ditunjuk sepanjang pipa berdasarkan korelasi ini. Hasil diprediksi berada dalam perjanjian dengan data eksperimen.

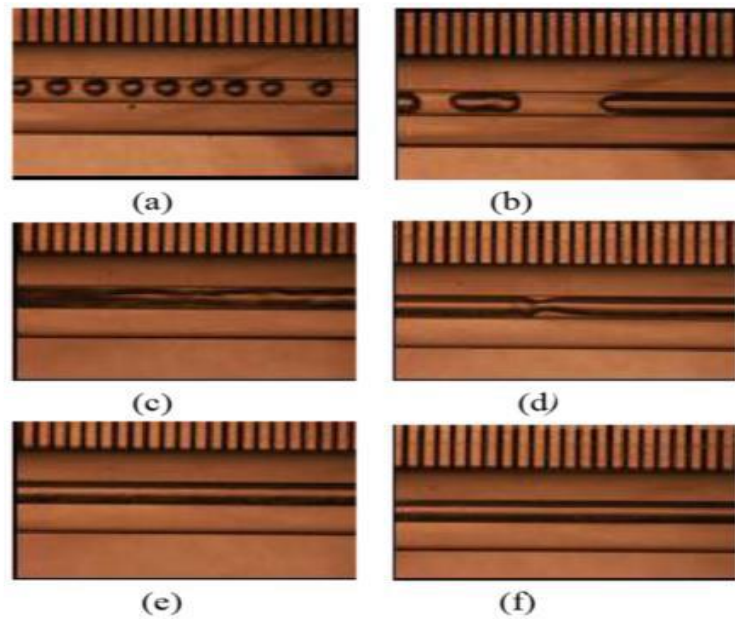
Sur dan Liu (2012) melakukan *study* eksperimental dengan pipa diameter bagian dalam 100 μm , 180 μm dan 324 μm dari leburan silika. Mereka menggunakan udara dan air sebagai fluida kerja. Mereka mengidentifikasi empat bentuk aliran yang khas, yaitu, *bubbly*, *slug*, *ring*, dan aliran *annular*. Mengenai penurunan tekanan gesekan, mereka menyimpulkan bahwa model berbasis pola aliran memberikan hasil yang lebih akurat dalam membandingkan dengan homogen terpisah model aliran dua fase.

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

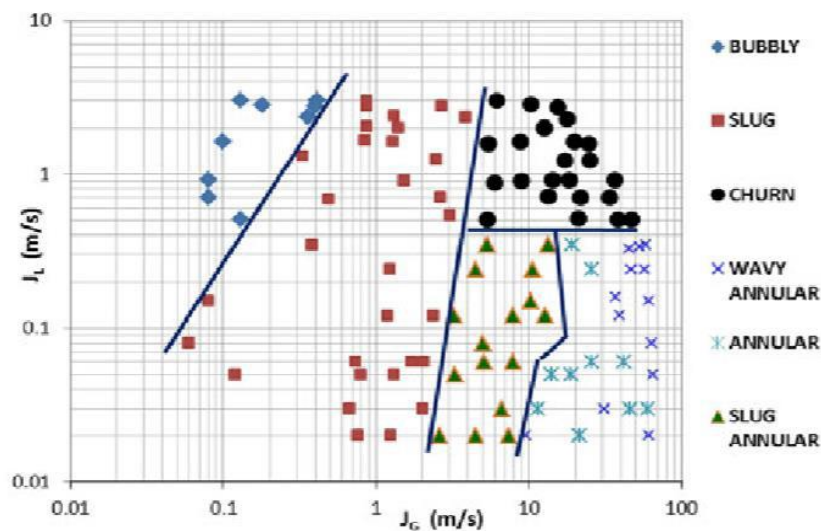
aliran *annular*, gradien tekanan secara bertahap menjadi bebas dari efek sudut kemiringan ke atas, dan hanya tergantung pada sifat aliran dua fase.

Sudarja dkk. (2014) melakukan penelitian tentang pola aliran dua fase gas cair di dalam pipa berukuran mini pada aliran horizontal. Pada penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data primer tentang pola aliran dan peta pola aliran pada pipa berukuran mini. Bahan penelitian berupa fluida gas dan cair. Fluida gas yang digunakan adalah udara dengan kelembaban rendah, yang didapat dari kompresor udara yang dilengkapi dengan *dryer* dan *water trap*, sedangkan untuk fluida cair digunakan air yang dialirkan ke dalam sistem dengan bantuan pompa air dan plenum.

Penelitian ini dilakukan pada suatu instalasi alat yang terdiri dari: tangki air, pompa air, plenum, kompresor udara, *water trap*, seksi uji berupa pipa kaca berdiameter dalam 1,6 mm posisi horisontal, *optical correction box*, dan alat ukur (*pressure transducer*, *thermocouple*, dan *flowmeter*) sebagaimana digambarkan secara skematis pada gambar 1. Disini digunakan 2 buah *flowmeter* cairan dengan kapasitas yang berbeda (0 – 50 mL/mnt dan 0 – 500 mL/mnt), serta 3 buah *flowmeter* gas yang berbeda kapasitas (0 - 0,8 L/mnt, 0 – 3 L/mnt dan 0 – 10 L/mnt). Penelitian dilakukan pada kecepatan superfisial gas = 0,08 – 64,42 m/s, dan kecepatan superfisial cairan = 0,02 - 3,09 m/s. Kondisi penelitian adiabatik. Pengambilan data berupa gambar pola aliran dilakukan secara visual.



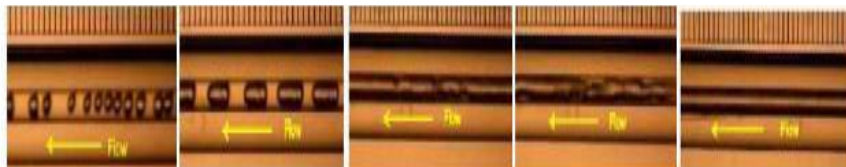
Gambar 2.1. Pola aliran yang terdeteksi (a) *Bubbly* ($J_G = 0,1$ m/s dan $J_L = 1,62$ m/s). (b) *Slug* ($J_G = 2,06$ m/s dan $J_L = 0,06$ m/s). (c) *Churn* ($J_G = 21,03$ m/s dan $J_L = 0,52$ m/s). (d) *Slug-annular* ($J_G = 7,37$ m/s dan $J_L = 0,02$ m/s). (e) *wavy-annular* ($J_G = 57,4$ m/s dan $J_L = 0,24$ m/s). (f) *Annular*. (Sudarja dkk. 2014).



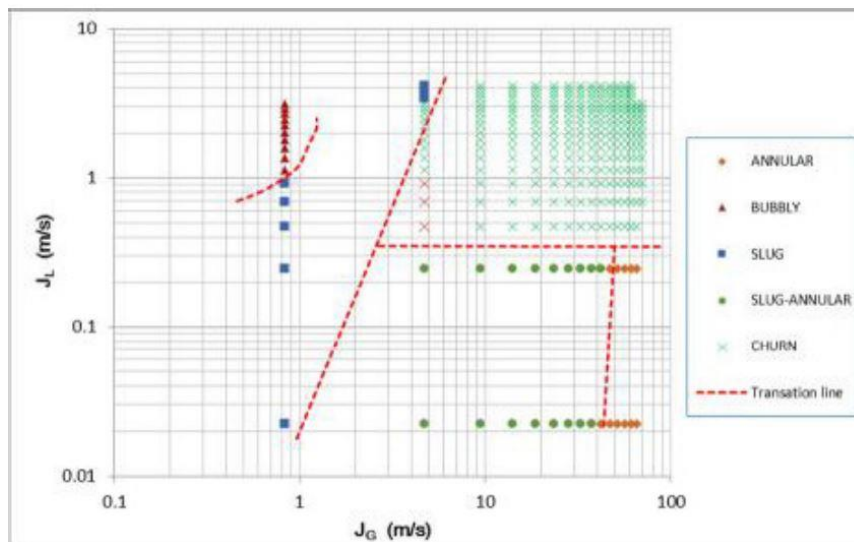
Gambar 2.2. Peta pola aliran dan garis transisi (Sudarja dkk. 2014)

Sudarja dkk. (2015) melakukan penelitian secara eksperimental tentang pola aliran dan fraksi hampa aliran dua fase pada pipa berukuran kecil. Pada penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data primer tentang pola aliran dan fraksi

hampunya. Penelitian ini dilakukan pada seksi uji berupa pipa kaca berdiameter 1,6 mm posisi horizontal, menggunakan fluida gas dan cairan, yaitu udara kering dan aquades, dengan kecepatan superfisial gas = 0,83 – 65,4 qm/s, dan kecepatan superfisial cairan = 0,02 – 4,14 m/s kondisi penelitian adiabatik. Data tentang pola aliran didapatkan secara langsung dari rekaman video menggunakan *high speed camera*, dan data fraksi hampa didapatkan dari *image processing* terhadap video tersebut. Pola aliran yang terdeteksi adalah: *bubbly*, *slug*, *slug annular*, *churn*, dan *annular*. Pada penelitian ini, pola aliran yang terpiasah (*stratified*) tidak muncul sama sekali.



Gambar 2.3. pola aliran yang terdeteksi (a) *Bubbly* ($J_G = 0,8294$ m/s, $J_L = 1,1370$ m/s), (b) *Slug*, ($J_G = 0,8294$ m/s, $J_L = 0,4686$ m/s), (c) *Slug annular* ($J_G = 18, 7177$ m/s, $J_L = 0,0224$ m/s), (d) *Churn*, ($J_G = 9,3775$ m/s, $J_L = 1,1370$ m/s), (e) *Annular*, ($J_G = 42,0697$ m/s, $J_L = 0,0224$ m/s). (Sudarja dkk. 2015)



Gambar 2.4. Peta pola aliran dan garis transisi (Sudarja dkk. 2015)

Baru baru ini Barreto dkk. (2015) juga menganalisa penurunan tekanan dan fraksi hampa dalam aliran dua fase gas-cair pipa melingkar dengan diameter dalam

1,2 mm mereka menyimpulkan juga bahwa penurunan tekanan diprediksi dipengaruhi oleh pola aliran dan bentuk aliran cairan. Selain penelitian disebutkan di atas, ada beberapa peneliti yang memberikan perhatian khusus pada efek tegangan permukaan dengan pola aliran dua fase serta penurunan tekanan, seperti Liu dan Gao dan Xia dan Chai.

Sudarja dkk. (2019) melakukan riset eksperimental pada pola aliran dan gradien tekanan pada pipa berukuran kecil. Penelitian ini dilakukan pada seksi uji dengan diameter pipa kaca 1,6 mm pada posisi horizontal. Cairan yang bekerja adalah udara dan air. dengan kecepatan superfisial cairan berada di kisaran 0,033 - 4,935 m/s dan superfisial gas 0,025 - 66,300 m/s. Pada penelitian ini, pola aliran dan data gradien tekanan diperoleh dengan menganalisis gambar aliran yang ditangkap oleh kamera berkecepatan tinggi, dan dengan menggunakan transduser tekanan masing-masing. Pola aliran yang terdeteksi pada penelitian ini adalah pola aliran *bubbly*, pola aliran *plug*, *slug annular*, *annular*, dan pola aliran *churn*. korelasi eksperimental baru pada panjang gelembung dan panjang colokan diusulkan, sedangkan panjang adalah fungsi dari fraksi kekosongan homogen. kecepatan gas dan cairan superfisial sangat mempengaruhi gradien tekanan, dengan meningkatnya kedua J_G J_L . Selain itu, pola aliran yang diperoleh berada dalam perjanjian yang baik dengan peta pola aliran Triplett dkk. (1999), dan Chung dan Kawaji (2004).

Dari fakta di atas bahwa ukuran saluran dan sifat fluida secara signifikan mempengaruhi pola aliran dan gradien tekanan. Namun ada beberapa perbedaan pada pola aliran yang diperoleh dan perumusan gradien tekanan antara studi mereka meskipun digunakan ukuran saluran dan sifat fluida yang hampir sama. Sebagai contoh, ketika beberapa peta yang tersedia yang dikupas antara satu sama lain perbedaan dari garis transisi masih diamati. Untuk alasan di atas, penyelidikan lebih lanjut pada aliran dua fase gas-cair saluran kecil diperlukan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menginvestigasi data fundamental dasar tentang gas-cair aliran dua fase dalam *mini-channel*. Sebuah data eksperimental yang mengatur tentang pola aliran, fraksi hampa, dan gradien tekanan. Dalam tulisan ini peta pola aliran ditampilkan juga dalam bentuk jumlah

Weber phasic untuk mengungkapkan efek inersia dan tegangan permukaan di saluran kecil. Selain itu efek dari kedua jumlah dan aliran reynolds pola untuk gradien tekanan juga dibahas secara rinci. Aparatur yang digunakan dalam penelitian ini yaitu: kompresor udara, pompa pneumatik, *flowmeter* gas dan *flowmeter liquid*, sensor tekanan, kamera, sistem akuisisi data, dan komputer pribadi. Bagian uji dalam penelitian ini adalah pipa melingkar transparan terbuat dari kaca dengan diameter bagian dalam 1,6 mm. Bagian uji dilengkapi dengan kotak koreksi optik untuk menghindari efek tabung kelengkungan sebagaimana yang dilakukan juga oleh Kawahara dkk.

Dalam studi eksperimental ini, udara dipasok oleh kompresor udara dilengkapi dengan perangkat air dan udara pengering atau regulator untuk memastikan kadar air bebas dari udara terkompresi. *Pressure vessel stainless steel* sebagai pompa pneumatik diberikan untuk memberi makan (bukan memompa untuk menghindari denyut dengan pompa) cairan. Aliran air meter dari Omega dan TOKYO Keiso dengan akurasi 5%, 3%, masing-masing yang digunakan. Untuk mengukur tekanan diferensial antara dua lokasi transduser tekanan diferensial dari MPX dengan akurasi 0,25% dipergunakan. Transduser tekanan diferensial yang terhubung ke T-junction dipasang di hulu dan hilir dari bagian tes. Sementara itu untuk mengukur tekanan statis sensor tekanan statis dari copal elektronik digunakan. Hal itu dipasang pada bagian uji hulu.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Fase

Fase merupakan bagian dari suatu sistem yang seragam secara fisik dan kimiawi. Fase dapat dibedakan menjadi fase padat, fase gas, dan fase cair. Dalam

ilmu mekanika fluida, dipelajari mengenai aliran *single phase* dan *multiphase*. Aliran multifase merupakan kondisi aliran dimana terdapat beberapa fase yang mengalir bersamaan. Aliran dua fase merupakan bentuk yang paling sederhana. Fase yang mengalir dapat berupa gas-cairan, gas-padat, dan cairan-padat. Aliran dua fase banyak dijumpai dalam peralatan mekanik yang melibatkan fluida, seperti *plant* tenaga uap konvensional, evaporator dan kondensor, berbagai industri petrol, industri pemrosesan makanan dan bahan kimia. Aliran dua komponen digunakan untuk menyatakan aliran yang fasenya terdiri dari susunan kimia yang berbeda. Contohnya, aliran uap-air adalah aliran dua fase, sedangkan aliran udara-air adalah aliran dua komponen. Namun dengan menggunakan perhitungan matematis akan didapatkan hasil yang sama baik untuk aliran dua fase maupun aliran dua komponen. Oleh karena itu, dapat disimpulkan penggunaan istilah aliran dua fase ataupun aliran dua komponen tidak menjadi masalah (Graham B. Wallis, 1969).

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

Kandlikar dan Grande (2003) membagi ukuran saluran menjadi lima macam yaitu:

- | | |
|-------------------------|--|
| 1. Saluran konvensional | $D_h > 3 \text{ mm}$ |
| 2. Saluran mini | $3 \text{ mm} > D_h > 200 \text{ }\mu\text{m}$ |
| 3. Saluran mikro | $200 \text{ }\mu\text{m} > D_h > 10 \text{ }\mu\text{m}$ |
| 4. Saluran transisi | $10 \text{ }\mu\text{m} > D_h > 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ |
| 5. Saluran nano | $D_h < 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ |

2.3 Pola Aliran Dua Fase

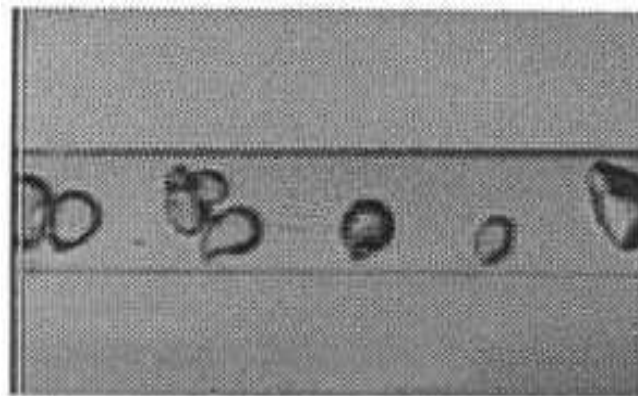
Pola aliran (*flow regime*) dalam aliran dua fase mempunyai arti yang sangat penting, karena hal ini menentukan bagaimana mengetahui perilaku aliran fluida. Perilaku campuran antara cair-gas mengandung banyak hubungan yang saling terkait yang diperlukan dalam penyelesaian model analisa atau korelasi yang digunakan dalam persamaan konversi dua fase (*two-phase conversion equation*).

Pengkajian terhadap pola aliran dua fase masih sangat luas cakupannya. Banyak ilmu yang masih bisa digali untuk menjelaskan fenomena pola aliran dua fase yang beragam (*slug, plug, stratified, dan bubbly*), baik dari sisi geometri, orientasi atau posisi pipa, maupun proses yang terjadi di dalam pipa (*boiling, kondensasi, campuran cair-gas, dan sebagainya*). Untuk mengetahui perubahan pola aliran yang terjadi pada kondisi dan parameter tertentu.

Untuk pola aliran yang terjadi pada pipa mini yaitu :

a. *Bubbly Flow*

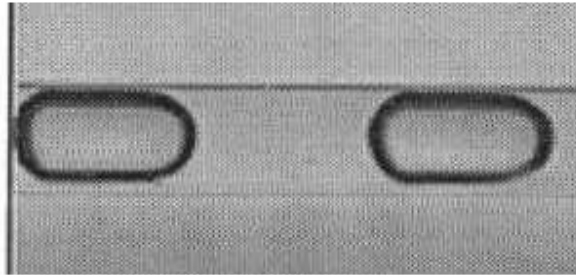
Bubbly flow merupakan pola aliran yang berbentuk gelembung yang didominasi oleh cairan. Terbentuk pada saat nilai J_G sangat kecil dan nilai J_L lebih besar dibandingkan nilai J_G .



Gambar 2.5 Pola aliran *bubbly* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999)

b. *Plug Flow*

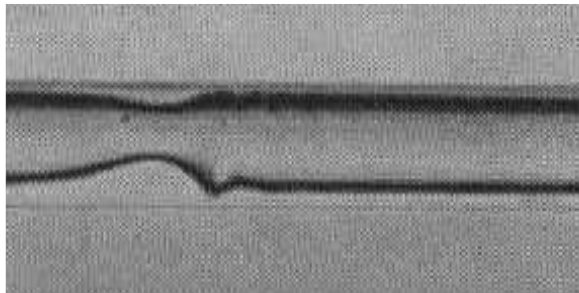
Plug flow merupakan pola aliran yang berbentuk seperti peluru, dimana antara cairan terdapat kantong udara yang berasal dari *bubbly* yang diperpanjang akibat meningkatnya intensitas udara dalam aliran.



Gambar 2.6 Pola aliran *Plug* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999)

c. *Slug Annular*

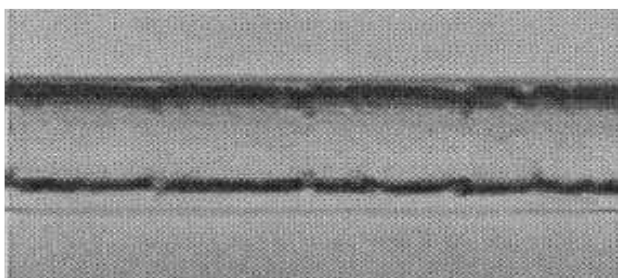
Pola aliran *slug annular* memiliki struktur dimana lapisan film cairan yang memiliki ketebalan lebih besar pada suatu titik dibanding titik lainnya disepanjang aliran tersebut.



Gambar 2.7 Pola aliran *slug annular* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999)

d. *Annular Flow*

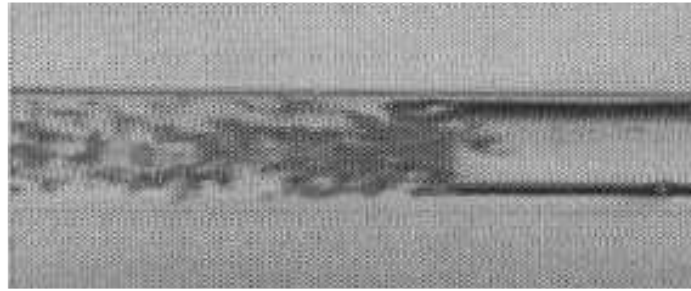
Pola aliran *annular* memiliki struktur dimana fase air terletak mengelilingi saluran dan fase udara berada di tengah-tengah fase air.



Gambar 2.8 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 *plug* tetapi pada ekornya terbentuk aliran yang tidak beraturan.



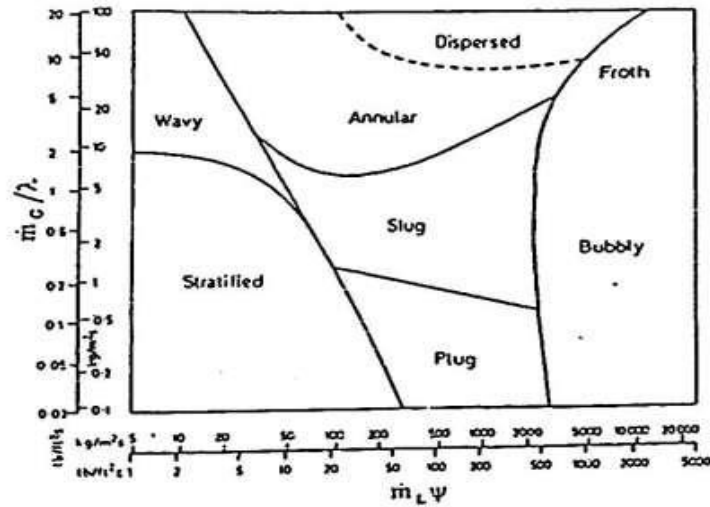
Gambar 2.9 Pola aliran *churn* pada *mini channel* (Triplett dkk., 1999)

2.4 Peta Pola Aliran Dua Fase

Peta pola aliran adalah grafik yang digunakan untuk menunjukkan persebaran data pola aliran pada berbagai parameter yang telah ditentukan oleh laju aliran komponen. Laju aliran yang digunakan bisa fluks volume, fluks massa, dan fluks momentum.

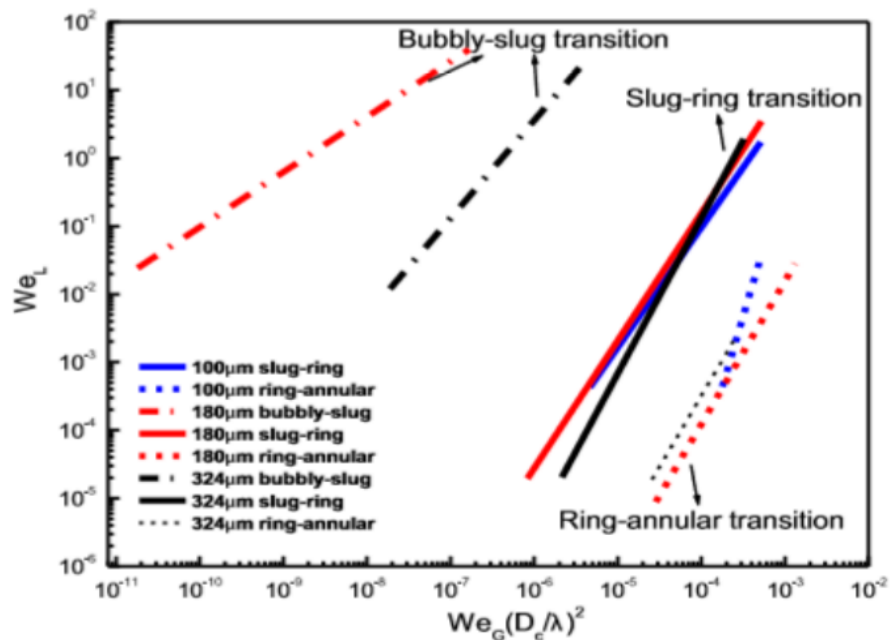
Batas-batas yang terjadi pada beberapa pola aliran dikarenakan rezim aliran menjadi tidak stabil saat *boundary* semakin mendekat dan ketidakstabilan ini terus terjadi sehingga menyebabkan transisi ke pola aliran lain. Transisi pada aliran multifase sangat susah untuk untuk diprediksi karena faktor minor berpengaruh besar terhadap aliran ini, misalnya kekasaran dinding ataupun saluran masuk fluida. Oleh karena itu, batas-batas pola aliran bukanlah garis yang jelas, melainkan didefinisikan sebagai daerah transisi.

Peta pola aliran paling awal untuk aliran horizontal dua fase gas-cairan diajukan oleh Baker (1954). Untuk menggunakan peta tersebut, menggunakan parameter fase gas λ dan parameter fase cair Ψ sebagai koordinat pada peta pola aliran seperti ditunjukkan Gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Peta pola aliran (Baker 1954)

Sur dan Liu (2011) menemukan 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 tambahan We_G sebagai sumbu-x dan We_L sebagai sumbu-y dalam menyajikan peta pola aliran sebagai pengaruh dari efek ukuran saluran. Gambar 2.11 menunjukkan peta pola aliran yang diajukan oleh Sur dan Liu (2011).



Gambar 2.11 Peta pola aliran dua fase udara-air pada pipa horizontal berdiameter 100, 180 dan 324 μm (Sur dan Liu, 2011)

2.5 Parameter Aliran Dua Fase

Untuk menyatakan masing-masing kecepatan fase gas dan fase cairan, lazimnya dijelaskan dengan penggunaan istilah kecepatan superfisial sebagai rasio laju volumetrik aliran gas dan cairan dengan luas permukaan (Hestroni, 1982). Pada analisis aliran dua fase gas-cairan, terdapat tiga jenis kecepatan superfisial, misalnya kecepatan superfisial gas (dilambangkan dengan V_{SG} atau J_G), kecepatan superfisial cairan (dilambangkan dengan V_{SL} atau J_L) dan kecepatan superfisial campuran (dilambangkan dengan V_M atau J_M).

$$J_G = \frac{Q_G}{A} = \frac{Q_m}{A_G} \quad 2.1$$

$$J_L = \frac{Q_L}{A} = \frac{Q_m}{A_L} \quad 2.2$$

$$J_M = J_G + J_L \quad 2.3$$

$$Q_m = Q_G + Q_L \quad 2.4$$

Dimana A adalah luas permukaan saluran dan Q_m adalah laju volumetrik campuran.

Selain menggunakan kecepatan superfisial, kecepatan aliran tiap fase juga bisa didefinisikan dengan kecepatan aktual seperti dirumuskan berikut ini:

$$U_G = \frac{Q_G}{A_G} = \frac{\dot{m}_G}{A_G} \quad 2.5$$

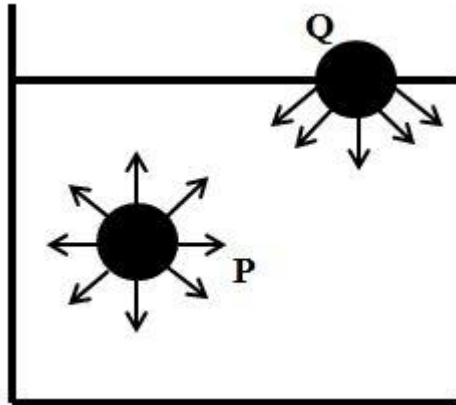
$$U_L = \frac{Q_L}{A_L} = \frac{\dot{m}_L}{A_L} \quad 2.6$$

Dimana \dot{m} merupakan laju aliran massa tiap komponen. U_G dan U_L merupakan kecepatan aktual gas dan cairan. A_G dan A_L merupakan luas penampang fase gas dan cairan.

2.6 Tegangan Permukaan

Dalam kajian fisika, terdapat salah satu topik yang dinamakan tegangan permukaan. Tegangan permukaan adalah suatu kecenderungan permukaan zat cair untuk menegang sehingga permukaannya seperti ditutupi oleh suatu lapisan tipis. Penyebab dari terjadinya tegangan permukaan adalah karena kohesi (gaya tarik menarik molekul sejenis), di bawah zat cair lebih besar daripada kohesi yang terjadi

di permukaan air, sehingga permukaan air akan cenderung mengerut dan membentuk luas permukaan sekecil mungkin. Gambar 2.12 mengilustrasikan bagaimana tegangan permukaan terjadi.



Gambar 2.12 Kohesi pada molekul air.

Molekul P mengalami gaya kohesi dengan molekul-molekul di sekitarnya dari segala arah, sehingga molekul ini berada dalam keseimbangan (resultan gaya nol), sementara molekul Q tidak demikian. Molekul ini hanya mengalami kohesi dari partikel di bawah dan di sampingnya saja, sehingga resultan gaya terjadi ke arah bawah. Gaya-gaya resultan kebawah akan membuat permukaan cairan sekecil kecilnya, akibatnya permukaan cairan menegang seperti selaput yang tegang. Keadaan ini dinamakan tegangan permukaan.

Tegangan permukaan dapat dirumuskan dengan:

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad 2.7$$

Dimana:

σ : tegangan permukaan (N/m)

F : gaya (N)

l : panjang permukaan (N/m)

Pembentukan gelembung yang terjadi dalam aliran dua fase erat kaitannya dengan faktor tegangan permukaan. Untuk mengetahui dominasi tegangan permukaan atau gaya gravitasi digunakanlah *Bond Number* (Bo). *Bond Number* adalah parameter tanpa dimensi yang menyatakan dominasi gaya gravitasi terhadap tegangan permukaan.

$$Bo = \frac{\rho g r}{2\gamma} \quad 2.8$$

Dimana ρ adalah massa jenis fluida, g adalah percepatan gravitasi, r adalah radius pipa dan γ adalah tegangan permukaan.

2.7 Fraksi Hampa

Fraksi hampa merupakan salah satu parameter penting yang digunakan untuk mengetahui kecepatan panjang dan frekuensi dari masing-masing pola aliran. Beberapa parameter yang dapat ditentukan antara lain densitas dua fase, viskositas dua fase, kecepatan rata-rata, penurunan tekanan, koefisien perpindahan panas. Terdapat tiga metode untuk mendefinisikan fraksi hampa, metode tersebut antara lain:

2.7.1 Fraksi Hampa *Chordal*

Fraksi hampa *chordal* didasarkan pada perbandingan fase gas di dalam pipa terhadap panjang total pipa yang ditinjau atau dapat dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$\epsilon_{chordal} = \frac{L_G}{L_G + L_L} \quad 2.9$$

Dengan L_L adalah Panjang fase cairan, sedangkan L_G adalah Panjang fase gas.

Skema fraksi hampa chordal dapat dilihat pada Gambar 2.13.

Metode *Chordal*



Gambar 2.13 Fraksi hampa *chordal* (Thome, 2004)

2.7.2 Fraksi Hampa *Cross-Section*

Metode ini membandingkan luas penampang fase gas terhadap luasan penampang pipa untuk menentukan nilai fraksi hampa yang ditunjukkan pada Gambar 2.14 Perhitungan fraksi hampa dengan metode *cross-section* dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\epsilon_{L-G} = \frac{A_G}{A_G + A_L} \quad 2.10$$

Dimana A_G merupakan luasan gas dan A_L merupakan luasan cairan.



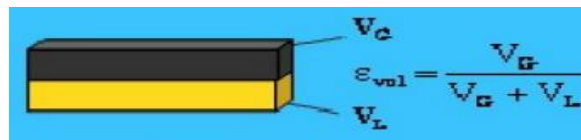
Gambar 2.14 Fraksi hampa *cross-section* (Thome, 2004)

2.7.3 Fraksi Hampa Volumetrik

Pada Gambar 2.15 fraksi hampa volumetrik dapat diukur dengan menggunakan alat *quick-closing valve*. Fraksi hampa didefinisikan sebagai berikut.

$$\epsilon_{vol} = \frac{V_G}{V_G + V_L} \quad 2.11$$

Dimana V_G adalah volume udara dan V_L adalah volume cairan.



Gambar 2.15 Fraksi hampa volumetrik (Thome, 2004)

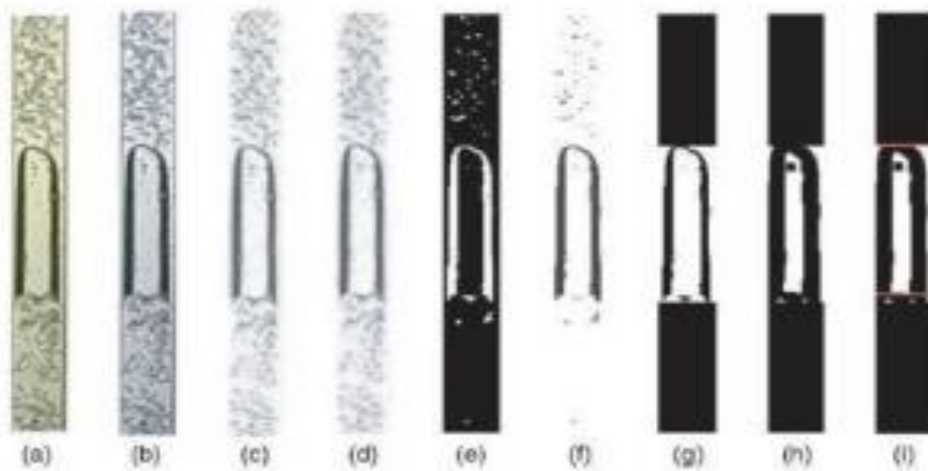
Penelitian ini menggunakan metode *cross-sectional* untuk menentukan nilai fraksi hampa pada aliran.

2.8 Digital Image Processing

Digital *image processing* merupakan salah satu metode untuk mengukur nilai fraksi hampa dengan mengambil image aliran menggunakan kamera kemudian diolah dengan menggunakan software computer. Dalam aliran dua fase teknik ini telah digunakan untuk mengetahui karakteristik aliran, pola aliran dan topologi aliran. Triplet dkk, (1999) menerapkan metode digital *image processing* untuk menentukan fraksi hampa pada pipa sirkular dengan diameter 1,1 dan 1,45 mm. Mayor dkk, (2006) menjelaskan tentang implementasi dari digital *image processing* untuk mempelajari aliran *slug* pada pipa vertikal. Montoya dkk, (2012) menggunakan digital *image processing* untuk mempelajari *interfacial behavior* pada aliran *countercurrent* aliran dua fase gas-cair pada hot leg PWR.

Metode ini juga dapat digunakan pada penelitian tentang *mini-channel*. Untuk menangkap *image* yang baik. Digunakan lensa makro untuk memperbesar image yang ditangkap pada pipa yang berukuran sangat kecil tersebut. Salah satu software pengolah data visual yang sudah banyak dipakai saat ini yaitu dengan

menggunakan software MATLAB. Gambar 2.16 menunjukkan langkah-langkah yang dilakukan dalam mengolah gambar didalam software MATLAB yaitu konversi gambar RGB ke *grayscale image*, pengurangan intensitas latar belakang, pengurangan gangguan lainnya (*image filtering*), penyesuaian gambar, *image thresholding*, dan *binarization* yaitu untuk menghasilkan gambar biner yang dapat secara otomatis dianalisis secara logika digital (1 dan 0), tergantung pada nilai ambang batas.



Gambar 2.16 Langkah-langkah dalam *image processing* (Mayor dkk, 2007)

2.8.1 Image

Widyatama (2015) menjelaskan bahwa *image* adalah suatu representasi dari suatu objek. *Image* dibedakan menjadi dua yaitu analog *image* dan digital *image*. Analog adalah *image* yang berkelanjutan seperti televisi. Digital *image* adalah *image* yang dapat diolah dengan menggunakan software di komputer. Digital *image* merupakan fungsi $f(x,y)$ dari intensitas cahaya dimana x dan y merupakan koordinat nilai dari f pada setiap koordinat (x,y) disebut intensitas atau tingkat warna suatu gambar.

2.8.1.1 Gambar RGB

Gambar RGB merupakan *image* yang terdiri dari tiga buah matriks yang masing-masing memiliki warna merah, biru, dan hijau. Setiap piksel mempunyai

nilai tertentu dengan range 0 - 255 sehingga mempunyai 16.777.216 kemungkinan warna.

2.8.1.2 Gambar Grayscale

Gambar *grayscale* merupakan beberapa gambar RGB yang mempunyai komponen dengan nilai yang sama yang digabungkan menjadi satu. Setiap piksel yang ada pada gambar *grayscale* memiliki warna abu-abu dengan rentang nilai dari 0 sampai 255. Nilai 0 untuk menyatakan warna hitam dan nilai 255 untuk menyatakan warna putih.

2.8.1.3 Gambar Biner

Gambar biner merupakan sebuah gambar dimana setiap pikselnya hanya mempunyai 2 kombinasi warna yaitu hitam dan putih. Nilai 0 untuk menyatakan warna hitam dan nilai 1 untuk menyatakan warna putih. Gambar biner hanya membutuhkan 1 bit untuk setiap pikselnya sehingga tidak membutuhkan memori yang banyak dan sangat efisien untuk penyimpanan data.

2.8.2 Noise

Noise merupakan piksel yang mengganggu kualitas gambar sehingga dapat mengurangi keakuratan data pada gambar tersebut. *Noise* muncul akibat gangguan yang terjadi karena pencahayaan yang kurang sempurna. Oleh karena itu perlu dilakukan *image processing* agar didapat gambar yang diinginkan. Berikut merupakan beberapa jenis *noise* yaitu:

2.8.2.1 Coherent Noise

Noise ini terjadi akibat gangguan sinyal pada alat yang digunakan untuk mengambil gambar sehingga gambar yang dihasilkan akan terdapat *noise* yang mengganggu.

2.8.2.2 Fixed-Location Noise

Noise jenis ini selalu terjadi ditempat yang sama. *Noise* ini dihilangkan dengan cara mengganti piksel yang terdapat *noise* dengan piksel di sekitarnya yang tidak terdapat *noise*.

2.8.2.3 Salt-and-Pepper Noise

Noise ini juga disebut *impulse noise*, *shout noise* atau *binary voice*. *noise* ini terjadi akibat kesalahan dalam data transmisi yang membuat gambar terdapat titik-titik kecil.

2.8.3 Filtering

Filtering adalah proses untuk menghilangkan *noise* yang dapat mengganggu kualitas gambar agar gambar tersebut dapat diolah dengan baik. Filter yang biasa digunakan antara lain:

2.8.3.1 Mean Filtering

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

2.8.3.2 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.

2.8.3.3 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.

2.8.4 Metode Analisis Statistik

Analisis statistik digunakan untuk mengekstrak data mentah dari pembacaan sinyal menjadi informasi sederhana yang didapat. Sebagai contohnya, nilai fraksi hampa terhadap J_G dan J_L tertentu akan didapat informasi rata-rata. Jenis perhitungan statistik yang digunakan antara lain *mean value*, *Probability Distribution Function* (PDF) dan *cross-correlation*.

2.8.4.1 Mean Value

Data fraksi hampa pada kecepatan superfisial gas dan kecepatan superfisial cair 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.

2.8.4.2 Probability Distribution Function (PDF)

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

2.8.4.3 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.

2.9. Pressure Drop

Pressure drop adalah penurunan tekanan dari satu titik di dalam sistem ke titik lain yang mempunyai tekanan lebih rendah. Pada aliran dua fase banyak korelasi atau metode yang dipakai sesuai kondisi sistem. *Pressure drop* pada aliran dua fase diistilahkan sebagai gradien tekanan yaitu penurunan tekanan yang terjadi setiap panjang pipa. 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 *liquid* dan gas dimana masing-masing fase memiliki persamaan yang berbeda.

Pada model campuran homogen, kedua fase diasumsikan tetap bercampur merata dan bergerak dengan kecepatan yang sama di semua titik. Metode yang sederhana untuk menghitung penurunan tekanan dua fase campuran homogen adalah dengan menganalogikan dengan aliran satu fase.

Dengan menggunakan korelasi Blasius untuk factor gesekan $f = 0,079 \text{ Re}^{-0,25}$ dan $\text{Re} = \text{GD}/\mu$. Viskositas untuk campuran dua fase gas dan cairan homogen ditentukan dengan korelasi dari MC Adam dkk. (1942):

$$\mu_{\text{TP}} = \mu_{\text{L}} \quad 2.12$$

Parameter dengan subkrip TP mewakili aliran dua fase.

Disamping korelasi Mc Adam, persamaan (2.12) korelasi lainnya yang diusulkan untuk viskositas dua fase homogen, antara lain:

$$\mu_{\text{TP}} = \mu_{\text{L}} (1 - \beta)(1 + 2.5\beta) + \mu_{\text{G}}\beta \quad (\text{Beattie \& Whalley, 1981}) \quad 2.13$$

$$\mu_{\text{TP}} = \mu_{\text{L}}\mu_{\text{G}} \mu_{\text{G}+x}^{1.4}(\mu_{\text{L}} - \mu_{\text{G}}) \quad (\text{Lin dkk., 1991}) \quad 2.14$$

Dimana $\beta = j_{\text{G}}/j$ adalah kualitas volumetrik (*volumetric quality*) dan j adalah kecepatan fluida campuran. Model campuran homogen berbeda dengan data empiris. Korelasi empiris masih banyak digunakan dengan konsep pengali aliran dua fase. Konsep tersebut pertama kali diusulkan oleh Lockhart & Martinelli (1949) didasarkan pada model aliran terpisah.

2.9.1. Kecepatan Superficial

1. Kecepatan superficial gas (J_G)

$$J_G = Q_G A \quad 2.15$$

2. Kecepatan superficial liquid (J_L)

$$J_L = Q_L A \quad 2.16$$

Dimana:

J_G = Kecepatan superficial gas (m/s)

J_L = Kecepatan superficial liquid (m/s)

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

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

A = Luas penampang pipa (m²)

2.9.2. Viskositas Cairan

Viskositas merupakan ukuran daya hambat aliran fluida yang dapat juga dinyatakan sebagai keengganan fluida untuk mengalir. Hal ini bisa diartikan bahwa semakin besar nilai viskositas maka semakin sulit suatu fluida untuk bergerak, dan begitu pula sebaliknya fluida akan mudah untuk bergerak apabila viskositasnya semakin kecil.

2.9.3 Pengukuran Perbedaan Tekanan

Perbedaan tekanan pada sisi masuk dan keluar seksi uji diukur dengan menggunakan *pressure transducers* (PT). *Pressure Transducer* dihubungkan ke dalam data akuisisi kemudian sinyal ditampilkan dan direkam dalam komputer.