

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

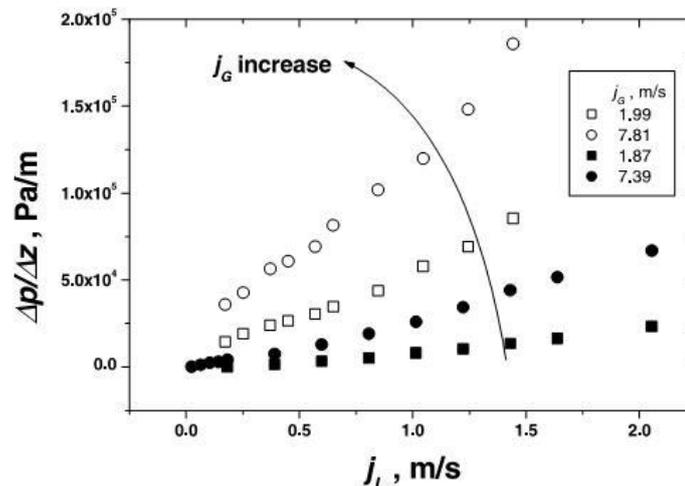
#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Fukano dan Kariyasaki (1993) melakukan penelitian tentang karakteristik aliran dua fase gas-air pada pipa kapiler dengan diameter 1 mm, 2,4 mm dan 4,9 mm. Pada penelitian ini menginvestigasi dengan memperhatikan pada pola aliran, variasi waktu fraksi hampa dan penurunan tekanan. Hal ini mendapatkan hasil bahwa semakin kecil diameter dalam pipa maka semakin mudah pembentukan slug dan penurunan tekanan.

Kecepatan superfisial sangat berpengaruh terhadap gradien tekanan. Dalam hal tersebut pernah dilakukan penelitian tentang penurunan tekanan per satuan panjang. Hewitt dkk. (2000) telah meneliti tentang gradien tekanan dan *holdup* dengan aliran dua fase udara-air dengan muatan cair rendah pada posisi horizontal. Dalam meneliti dengan menggunakan pipa berdiameter 0,079 mm. Kemudian melakukan perbandingan menggunakan prediksi dari “*apparent rough surface*” (ARS) dan model “*double-circle*”. Dalam melakukan perbandingan dari kedua prediksi mendapatkan prediksi gradien tekanan dengan baik pada kecepatan aliran udara-air yang tinggi. Sebaliknya, dengan memprediksi dari kedua prediksi tersebut pada aliran yang rendah mendapatkan hasil gradien tekanan yang kurang baik karena gradien tekanan sangat bergantung pada *holdup*.

Penelitian 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.

*Pressure gradient* di korelasikan dengan kecepatan superfisial cairan dan gas, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.1 bahwa *pressure gradient* naik pada kecepatan superfisial udara dan air ( $j_G$  dan  $j_L$ ), serta menurunnya ukuran celah.



Gambar 2.1 Tipikal variasi gradien tekanan dengan kecepatan superfisial aliran cairan dan gas (diblock: gap = 4 mm, berlubang: gap = 0,4 mm) Lee dan Lee (2001)

Kawaji dkk. (2002) melakukan penelitian tentang penurunan tekanan pada aliran dua fase menggunakan saluran dengan diameter 100 mikrometer. Deionisasi air dan nitrogen yang diinjeksikan pada kecepatan superfisial gas  $J_G = 0,1-0,60$  m/s dan kecepatan superfisial liquid  $J_L = 0,02-4$  m/s mengakibatkan gradien tekanan meningkat. Faktor gesekan satu fase dan dua fase diperoleh dari data penurunan tekanan. Pada aliran satu fase menunjukkan kesesuaian terhadap korelasi laminar konvensional sedangkan pada aliran dua fase lebih diperkirakan pada model aliran homogen akan tetapi memiliki korelasi baik dengan model aliran terpisah Lochart dan Martinelli.

Hassan dkk. (2006) melakukan penelitian tentang studi eksperimental pada aliran dua fase dan penurunan tekanan pada pipa mini. Dalam melakukan penelitian menggunakan model aliran homogen, model Freidel dan model Chisholm dan dilakukan perbandingan dengan hasil penelitian dari Ekberg (1997) pada saluran berukuran 3 mm, 1 mm dan 0,8 mm. Dalam penelitiannya mendapatkan hasil perbandingan pada rezim-peta pola aliran menunjukkan

perbedaan yang umum antara data eksperimen yang dikumpulkan selama percobaan dengan data yang diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya. Setelah dilakukan perbandingan dengan penelitian sebelumnya didapat bahwa garis transisi yang disederhanakan memberikan perkiraan yang baik dari transisi rezim dengan rentan peta yang diperbolehkan.

Saisorn dan Wongwises (2008) meneliti 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 dan 0,005-3,03 m/s. Penelitian tersebut dilakukan dengan tujuan menyelidiki karakteristik aliran dua fase aliran gas-cair penurunan tekanan total melalui saluran mikro melingkar horizontal dengan 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  $\Delta P_f$  adalah penurunan tekanan akibat gesekan,  $\Delta P_a$  penurunan tekanan karena percepatan dan  $\Delta P_c$  merupakan penurunan tekanan karena kontraksi secara tiba-tiba. Selanjutnya dilakukan perbandingan dengan komponen lainnya pada kondisi aliran yang berbeda, mendapatkan hasil penurunan tekanan akibat gesekan mendominasi penurunan tekanan akibat adanya percepatan dan kontraksi secara tiba-tiba. Penurunan tekanan akibat gesekan sebagai fungsi dari kecepatan superfisial gas ( $J_G$ ) dan *liquid* ( $J_L$ ). Hal ini menjelaskan bahwa nilai penurunan tekanan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan superfisial gas maupun *liquid*.

Awaludin dkk. (2014) melakukan penelitian tentang analisis aliran dua fase udara-air pada belokan 45° dengan posisi horizontal ke arah atas dengan diameter pipa 26,64 mm menunjukkan bahwa terjadi perbedaan *pressure drop* eksperimental dan teoritis disebabkan karena perhitungan secara teoritis menggunakan beberapa asumsi tidak memperhitungkan keadaan di lapangan, misalnya sambungan pipa,

belokan pipa dan kerugian aliran lainnya. Penelitian ini mendapatkan hasil bahwa penurunan tekanan aliran dua fase melalui belokan  $45^\circ$  mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya gas volume fraction ( $\beta$ ).

Barreto dkk. (2015) melakukan penelitian dengan fluida adiabatik udara-air pada pipa melingkar arus ke atas dengan diameter 1,2 mm. Pada penelitian ini dengan kecepatan superfisial gas ( $J_G$ ) = 0,1-34,8 m/s dan kecepatan superfisial liquid ( $J_L$ ) = 0,1-3,5 m/s. Korelasi pada tabung kecil dengan udara-air menunjukkan data prediksi penurunan tekanan terbaik pada pola anular dengan kecepatan superfisial gas lebih dari 18,6 m/s.

Penurunan tekanan per satuan panjang disebut gradien tekanan (*pressure gradient*). Hal yang mempengaruhi gradien tekanan adalah viskositas, tetapi secara signifikan hal yang mempengaruhi gradien tekanan adalah kecepatan superfisial gas maupun cairan. Terkait hal ini telah dilakukan studi eksperimental oleh Sudarja dkk. (2016) untuk gradien tekanan pada aliran dua fase udara campuran air dan gliserin 20% dalam pipa berdiameter 1,6 mm posisi horizontal. Kecepatan superfisial gas pada rentang 0,025-66,3 m/s, sedangkan kecepatan superfisial pada cairan 0,033-4,935 m/s, data hasil pengukuran dibandingkan dengan hasil perhitungan prediksi pada model homogen dan model terpisah mendapatkan kesimpulan bahwa kecepatan superfisial gas maupun kecepatan superfisial cairan mempengaruhi besarnya gradien tekanan secara signifikan. Semakin besar kecepatan superfisial gas ataupun cairan, semakin besar gradien tekanan. Sedangkan perbandingan data hasil eksperimen dan prediksi pada model homogen yang menggunakan korelasi empiris viskositas dua fase dari Owens (1961), Dukler dkk. (1964), Beattie dan Whalley (1982) dan Lin dkk. (1991) secara umum kesesuaiannya kurang baik (*over predicted*). Hal ini karena pola aliran yang terbentuk kebanyakan bukan merupakan aliran homogen.

## 2.2. Landasan Teori

Aliran dua fase adalah aliran multifase dari beberapa campuran misalnya air-udara dan gliserin. Pada aliran dua fase memiliki parameter dasar meliputi *flow behavior (interfacial behavior)* yaitu pola aliran (*flow pattern* atau *flow regime*) dan peta pola aliran (*flow pattern map*), fraksi hampa (*void fraction,  $\alpha$* ) dan perubahan tekanan (*pressure gradient* atau *pressure drop*).

### 2.2.1. Viskositas Cairan

Viskositas dalam suatu fluida adalah ukuran resistansi terhadap deformasi bertahap pada tegangan geser atau tegangan tarik. Pada pola kecepatan yang sama, tegangan yang diperlukan sebanding dengan viskositas fluida. Untuk viskositas cairan tergantung bentuk partikel dan daya tarik antara partikel. Dikatakan fluida ideal (cairan *inviscid*) apabila suatu cairan tidak tahan terhadap tegangan geser.

Untuk mengukur viskositas menggunakan jenis viskometer dan rheometers. Rheometer digunakan pada cairan yang tidak dapat didefinisikan oleh nilai tunggal viskositas dan memerlukan banyak parameter yang harus diukur dan diatur daripada kasus pada viskometer. Pada beberapa cairan, viskositasnya konstan terhadap laju geser (*newtonian fluids*). Untuk viskositas cairan yang tidak konstan (*non newtonian fluids*) tidak bisa dijelaskan oleh satu bilangan saja. Hal ini menunjukkan berbagai korelasi yang berbeda antara tegangan geser dan laju geser.

$$\mu = \frac{\pi r^4 P t}{8 V L} \quad (2.1)$$

dimana  $\mu$  adalah viskositas,  $t$  adalah waktu,  $V$  adalah volume cairan yang lewat melalui tabung,  $P$  adalah tekanan hidrostatis cairan dan  $L$  adalah jarak yang ditempuh oleh cairan selama waktu ( $t$ ). Meskipun satuan viskositas ( $\mu$ ) bukan satuan SI resmi tetapi masih digunakan oleh banyak orang, yang mempunyai istilah Poise. Poise memiliki satuan  $1 \text{ g/cm} \cdot \text{s}$  ( $\text{dyne s/cm}^2$ ). Satuan SI  $\text{kg/m} \cdot \text{s}$  (Pa.s).  $1 \text{ Cp} = 10^{-3} \text{ Pa.s}$ .

Untuk viskositas campuran antara gas-cairan yang dicampur secara homogen maka dapat dihitung dengan persamaan :

$$\mu_m = \mu_l + \mu_g (l - H_l) \quad (2.2)$$

Dengan:

$\mu_m$  = viskositas campuran gas-cairan

$\mu_l, \mu_g$  = viskositas gas-cairan

Sebuah cairan dibiarkan mengalir melalui lubang kecil kapiler yang ditandai oleh waktu ukur yang disebut dengan viskosimeter Ostwald dapat menggunakan persamaan seperti diatas. Karena jarak (L) akan tetap sama dalam semua pekerjaan dan karena tekanan (P) tergantung pada densitas ( $\rho$ ) untuk mengatur ulang persamaan diatas untuk mendapatkan

$$\mu = k \cdot \rho \cdot t \quad (2.3)$$

dimana k adalah konstanta yang menggabungkan faktor-faktor konstan. Dalam praktik viskositas dan densitas cairan yang diketahui digunakan untuk mengkalibrasi viskosimeter Ostwald. Kemudian untuk cairan lain:

$$\mu = \frac{\mu_r \cdot \rho \cdot t}{\rho_r \cdot t_r} \quad (2.4)$$

Viskositas kinematik merupakan rasio viskositas dinamik ( $\mu$ ) terhadap densitas ( $\rho$ ) fluida. Hal ini dilambangkan dengan huruf Yunani nu ( $\nu$ ).

### 2.2.2. Gliserin

Gliserin adalah seyawa gliserida yang paling sederhana, dengan hidroksil yang bersifat hidrofilik dan higroskopik. Gliserin bersifat kental dan manis saat dikecap, namun bersifat racun dan merupakan komponen yang menyusun berbagai macam lipid, seperti trigliserida. Senyawa ini larut ddalam alkohol dan air yang merupakan produk dari sponifikasi (proses pembuatan sabun). Gliserin merupakan senyawa cair yang bersifat

kental, tidak berwarna, tidak berbau dan banyak digunakan dalam formulasi farmasi.

Sifat fisik dari gliserin adalah bila dilarutkan dalam air, gliserin akan mengganggu ikatan hidrogen antara molekul-molekul sehingga tidak dapat membentuk struktur kristal yang efektif. Gliserin memiliki sifat anti *freeze*, kecuali suhu diturunkan secara signifikan. Larutan gliserin-air memiliki keuntungan yang memungkinkan viskositas cairan yang divariasikan untuk menjaga tegangan permukaan menjadi konstan.

### 2.2.3. Persamaan Dasar Pada Aliran Dua Fase

Aliran dua fase merupakan bagian dari aliran multifase. Campuran dari beberapa fase seperti gas didalam *liquid* dan sebaliknya disebut dengan aliran multifase. Pada aliran dua fase memiliki beberapa parameter seperti perubahan tekanan. Perubahan tekanan yang terjadi pada aliran dua fase yaitu penurunan tekanan (*pressure drop*) dan gradien tekanan (*pressure gradient*). Penurunan tekanan pada fluida terjadi karena variasi energi kinetik dan potensial aliran dan juga disebabkan karena adanya gesekan pada dinding saluran aliran. Gradien tekanan (*pressure gradient*) terjadi adanya pengaruh dari *specify gravity* pada jenis fluida yang digunakan.

Untuk menganalisis model aliran homogen persamaan dasar menggunakan model aliran kesetimbangan homogen satu dimensi tunak, persamaannya sebagai berikut:

$$\text{a. Kontinuitas: } \dot{m} = \rho_m v A = \text{const} \quad (2.5)$$

$$\text{b. Momentum: } \dot{m} \frac{dv}{dz} = -A \frac{dp}{dz} - P\tau_w - A\rho_m g \cos \theta \quad (2.6)$$

$$\text{c. Energi : } \frac{dq}{dz} - \frac{dw}{dz} = \dot{m} \frac{d}{dz} \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (2.7)$$

Dengan,

$\dot{m}$  adalah total laju aliran massa dari cairan dan gas maka

$$\dot{m} = \dot{m}_G + \dot{m}_L$$

A dan P luas penampang dan perimeter

$\tau_w$  merupakan tegangan geser dinding rata-rata

$\frac{dq}{dz}$  adalah perpindahan kalor per unit panjang dari penampang

z adalah koordinat vertikal

$\theta$  adalah inklinasi dari penampang ke vertikal

#### 2.2.4. Kecepatan Superfisial dan Perubahan Tekanan

Kecepatan superfisial adalah rasio debit gas dan cairan dengan total luas melintang. Pada kecepatan superfisial aliran dua fase gas-cairan memiliki 3 macam yaitu kecepatan superfisial cairan dinyatakan dengan  $V_{SL}$  atau  $J_L$ , kecepatan superfisial gas dinyatakan dengan  $V_{SG}$  atau  $J_G$  dan kecepatan superfisial campuran yang dinyatakan dengan  $V_M$  atau  $J_m$  sebagai penjumlahan kecepatan superfisial gas dan cairan.

$$J_G = \frac{QG}{A} = \frac{\dot{m}G}{A} = \frac{Qm}{A} \quad (2.8)$$

$$J_L = \frac{QL}{A} = \frac{\dot{m}L}{A} = \frac{Qm}{AL} \quad (2.9)$$

$$J_m = J_G + J_L \quad (2.10)$$

Dengan,

A = luas penampang melintang

$Q_m$  = debit aliran campuran (  $Q_G + Q_L$  )

Kecepatan aktual dinyatakan sebagai berikut :

$$u_G = \frac{Q_G}{A_G} = \frac{\dot{m}_G}{A_G} \quad \& \quad u_L = \frac{Q_L}{A_L} = \frac{\dot{m}_L}{A_L} \quad (2.11)$$

Hambatan cairan merupakan rasio dari volume cairan bagian dalam pipa terhadap seluruh volume bagian pipa.

$$H_l = \frac{V_l}{V}$$

Dengan :

$H_l$  = hambatan cairan

$V_l$  = volume bagian pipa yang diduduki oleh cairan

$V$  = seluruh volume bagian pipa

Penurunan tekanan per satuan panjang sepanjang jalur aliran disebut dengan gradien tekanan sedangkan perbedaan tekanan antara dua titik didalam saluran pipa disebut dengan *pressure drop*. Penurunan tekakanan per satuan panjang dipengaruhi oleh kecepatan superfisial untuk berbagai jenis fluida. Selain itu penurunan teknan terjadi akibat adanya gesekan pada dinding saluran.

Untuk persamaan gradien tekanan dua-fase pada rata-rata penampang lintangnya dapat dinyatakan:

$$\left(-\frac{\partial P}{\partial Z}\right) = \left(-\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{ta} + \left(-\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{sa} + \left(-\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_g + \left(-\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{fr} \quad (2.12)$$

Dengan :

$$\left(-\frac{\partial P}{\partial Z}\right) = \text{channel total pressure gradient}$$

$$\left(-\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{sa} = \frac{\partial G}{\partial t} = \text{temporal mixture acceleration}$$

$$\left(-\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{sa} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left( A \frac{G^2}{\rho^l} \right) = \text{spatial mixture acceleration}$$

$$\left(-\frac{\partial P}{\partial z}\right)_g = \rho g \sin \theta \quad = \text{hydraulic pressure gradient}$$

$$\left(-\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{fr} = \tau_w P_f / \quad = \text{frictional pressure gradient}$$

Persamaan penurunan tekanan total :

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{static} + \Delta P_{mom} + \Delta P_{frict} \quad (2.13)$$

Penurunan tekanan statis untuk cairan dua fase homogen adalah :

$$\Delta P_{static} = \rho_H g H \sin \theta \quad (2.14)$$

Dimana H adalah ketinggian vertikal,  $\theta$  adalah sudut terhadap horisontal, dan kepadatan homogen  $\rho_H$

$$\rho_H = \rho_L (1 - \varepsilon_H) + \rho_G \varepsilon_H \quad (2.15)$$

$\rho_L$  dan  $\rho_G$  adalah cair dan gas atau uap, sedangkan  $\varepsilon_H$  adalah fraksi hampa homogen ditentukan dari kualitas  $x$  sebagai berikut.

$$\varepsilon_H = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_G(1-x)\rho_G}{u_L x \rho_L}\right)} \quad (2.16)$$

Dimana  $u_G/u_L$  adalah ratio kecepatan. Momentum gradien tekanan per satuan panjang dari tabung adalah :

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{mom} = \frac{d(\dot{m}_{total}/\rho_H)}{dz} \quad (2.17)$$

Penurunan tekanan disebabkan oleh faktor gesekan, fungsi dari faktor gesekan ( $f_{tp}$ ) untuk aliran yang stabil dalam saluran dengan luas penampang konstan adalah:

$$\Delta P_{frict} = \frac{2f_{tp}L\dot{m}_{total}^2}{d_i\rho_{tp}} \quad (2.18)$$

Faktor gesekan dapat dinyatakan dalam bilangan reynolds pada persamaan blasius yaitu sebagai berikut :

$$f_{tp} = \frac{0,079}{Re^{0,25}} \quad (2.19)$$

dengan bilangan Reynolds yaitu :

$$Re = \frac{\dot{m}_{total} d_i}{\mu_{tp}} \quad (2.20)$$

keterangan :

- Re = Bilangan Reynolds
- $\dot{m}_{total}$  = Total kecepatan massa
- $d_i$  = Diameter Pipa
- $\mu_{tp}$  = kualitas rata-rata viskositas

Untuk kualitas rata-rata viskositas  $\mu_{tp}$  yang digunakan untuk mencari bilangan reynold pada persamaan (2.20) yaitu menggunakan persamaan berikut :

$$\mu_{tp} = x \mu_G + (1 - x) \mu_L \quad (2.21)$$

### 2.2.5. Fase

Fase adalah bagian yang serbasama dari suatu sistem yang dapat dipisahkan secara mekanik. Serbasama dalam hal ini merupakan komposisi kimia dan sifat-sifat fisika. Jadi suatu sistem yang mengandung cairan dan uap masing-masing mempunyai bagian daerah yang serbasama. Dalam fase uap kerapatannya serbasama disemua bagian pada uap tersebut. Dalam fase cair kerapatannya serbasama disemua bagian pada cairan tersebut, tetapi nilai kerapatannya berbeda dengan fase uap.

Sistem yang terdiri dari wujud gas memiliki satu fase pada kesetimbangan disebabkan gas bercampur secara homogen. Pada saat perubahan fase ada energi yang didapat atau dilepaskan, misalnya perubahan fase cair menjadi gas atau sebaliknya, perubahan fase padat menjadi cair atau sebaliknya dan perubahan fase gas menjadi padat atau sebaliknya. Fase cair memiliki jarak antar molekulnya sangat jauh atau besar sedangkan untuk fase gas memiliki jarak dan susunan anatar molekulnya tidak teratur dan selalu bergerak dengan acak.