

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

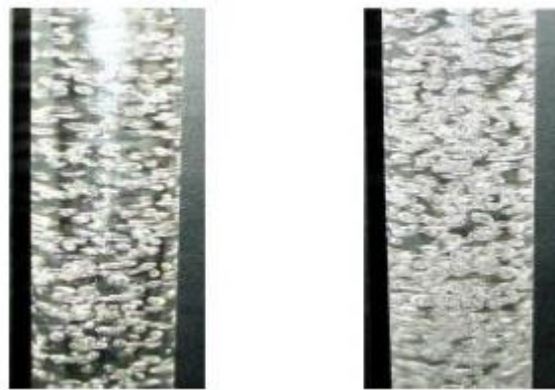
2.1. Tinjauan pustaka

Beberapa peneliti yang telah melakukan investigasi tentang pola aliran dan yang berhubungan dengan pipa horizontal. Investigasi dari beberapa peneliti tersebut menghasilkan beberapa macam perbedaan. Ini terjadi karena perbedaan metode dan alat yang digunakan antara satu peneliti dengan yang lainnya. Triplett dkk. (1999) melakukan penelitian tentang aliran dua fasa air-udara pada saluran mikro sirkular diameter 1,097 mm dan 1,45 mm dan saluran mikro semi-triangular dengan hydraulic diameter 1.097 mm dan 1,49 dengan variasi J_L berkisar 0,02-80 m/s dan J_G 0,02-8 m/s, pola aliran yang teramati pada penelitian adalah *annular*, *bubbly*, *churn*, *slug*, dan *slug annular*. Tidak ditemukannya aliran *stratified* pada aliran dua fasa saluran mikro menunjukkan bahwa pengaruh tegangan permukaan yang begitu besar, pola aliran yang terdapat pada saluran sirkulasi dan saluran semi triangular menunjukkan pola yang hampir sama.

Kawahara dkk, (2002) melakukan penelitian aliran dua fasa nitrogen-air yang terionisasi menggunakan sirkulasi berdiameter 100 μm yang terbuat dari *fused silica* dengan kecepatan superfisial gas 0,1-60 m/s dan kecepatan superfisial air 0,02-4 m/s, metode yang digunakan selain dengan visualisasi Kawahara dkk (2002) menggunakan metode probabilitas. Hal ini dikarenakan dalam suatu kondisi aliran yang telah ditetapkan, beberapa pola aliran muncul secara bergantian pada *flow rate* air rendah. Dari penelitian ini teridentifikasi lima pola aliran utama yaitu aliran *gas core with smooth-thin liquid film*, *liquid alone (liquid slug)*, aliran *gas core with smooth-thick liquid film*, aliran *gas core with a ring-shaped liquid film*, dan aliran *gas core with deformed interface*.

Menurut Martubi dkk, (2002) melakukan penelitian mengenai pola aliran dan gradien tekanan pada aliran gas-cair berlawanan arah vertical dengan cairan viskositas tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkati informasi tentang macam pola aliran dan gradien tekanan pada aliran dua fasa (gas-cair). Metode yang dilakukan pada penelitian ini dengan seksi uji terbuat dari *plexyglass* berpenampang lingkaran dengan diameter dalam 24 mm, fluida cairnya berupa larutan *Carbonat methyl catalyst* (CMC) yang mempunyai viskositas 144,03 cst. (169 kali viskositas air) fluida gas berupa udara dari kompressor dengan tekanan $\pm 1 \text{ kg/Cm}^3$ dan temperature 25-30°C. Pengambilan data eksperimen dilakukan dengan dua cara, yaitu pada debit cairan konstan udara berubah, dan debit udara konstan cairan berubah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola aliran yang terjadi meliputi aliran kantung udara, aliran acak, aliran cincin, kabut tetes, sampai terjadi *flooding*. Gradien tekanan di bawah injector cairan pada setiap debit cairan naik secara perlahan-lahan dengan bertambah kecepatan udara, namun sampai kecepatan udara tertentu kenaikan itu mengalami fluktuasi yang tidak mentu. Gradien tekanan di atas injector cairan untuk setiap debit cairan sesudah *flooding* cenderung naik dengan bertambahnya kecepatan udara.

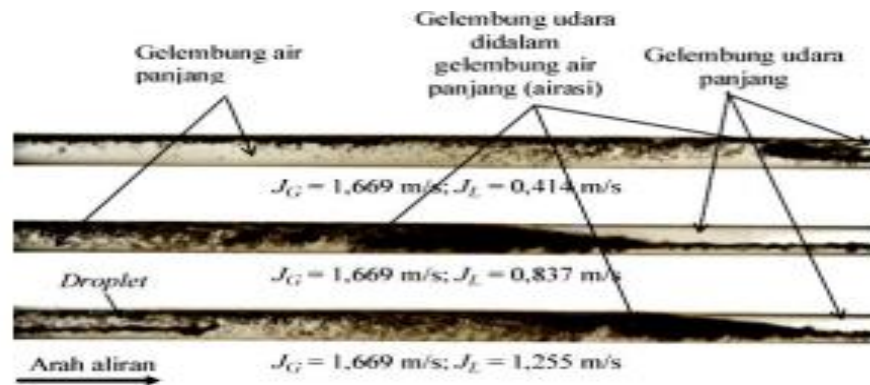
Adiwibowo dkk, (2010) melakukan penelitian tentang saluran pipa vertical yang akan sering dipakai untuk penghubung pipa. Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan pipa vertikal terhadap karakteristik *flow pattern* pada aliran dua fasa gas-cairan. Penelitian yang dilakukan secara eksperimental menggunakan pipa transparan dengan diameter dalam 36 mm pada pipa vertikal serta air sebagai fluida kerja cairan dan udara sebagai fluida kerja gas. Variasi yang dilakukan adalah kecepatan superficial cairan antara dari 0,3-0,5 m/s dan Δp adalah 0,05-0,2 m/s. Visualisasi *flow pattern* pada pipa vertikal menggunakan kamera digital. Dari hasil penelitian dapat diperoleh kesimpulan bahwa aliran dua fasa gas cairan yang melewati pipa vertikal terjadi perubahan karakteristik *flow pattern* yang dipengaruhi oleh kecepatan superficial cairan dan kualitas volumetric gas. Pada setiap kecepatan superficial cairan untuk kualitas volumetric gas menengah (medium) terjadi *homogeneous bubbly flow* dan *dense bubbly flow* untuk kisaran kualitas volumetric gas yang tinggi.



Gambar 2.1: Visualisasi dari *bubble flow* pada pipa uji vertikal dengan ketinggian 0,35 m di (USL=0,3 m/s) (Adiwibowo, 2010)

Santoso dkk, (2010) mengkaji pola aliran *plug* dan *slug* aliran dua fasa air-udara beserta parameter-parameternya (kecepatan *unit cell*, panjang *unit cell*, frekuensi slug, dan kecepatan gelembung). Pengukuran parameter-parameter dalam aliran *plug* dan *slug* dilakukan dengan menggunakan *high speed video camera*. Penelitian dilakukan dengan kecepatan superfisial air 0,14 m/s – 1,95m/s dan kecepatan superfisial udara 0,52 m/s - 3,65 m/s. penelitian dilakukan pada pipa horizontal dengan diameter dalam 24 mm. Pola aliran yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah pola aliran kantung (*plug*) sumbat liquid (*slug*) dan transisinya.

Santoso dkk, (2012) menelitian mengenai fluktuasi beda tekanan dari pola aliran slug air-udara pada aliran dua fasa searah pipa horizontal dengan panjang 10 m dan diameter dalam 24 mm. Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan cara air dialirkan dari tanki oleh pompa dan mengalir melalui *flowmeter* kedalam campuran udara-air. Udara disuplai dari kompresor dan mengalir melalui *flowmeter* udara ke pencampur udara-air. Kemudian udara-air yang tercampur mengalir melalui seksi uji dan pemisah udara-air, dimana udara dipisahkan ke atmosfer dan air mengalirke dalam tangki yang untuk disirkulasikan tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi karakteristik dari fluktuasi beda tekanan pola aliran slug menggunakan analisis statistik. Kemudian data pola aliran *slug* yang didapat dibandingkan dengan pola aliran Mandhane dkk, (1974) dan setelah dibandingkan bahwa data pola aliran slug yang didapat sesuai dengan hasil penelitian Mandhane dkk, (1974).



Gambar 2.2 :Tipe pola aliran slug hasil observasi peneliti (Santoso dkk, 2012)

Penelitian yang dilakukan oleh Badarudin, dkk (2014) observasi pola aliran dua fasa air udara berlawanan arah pada pipa kompleks yang dimana bertujuan mengidentifikasi secara visual pola aliran dua fasa air udara berlawanan arah dalam pipa kompleks. Adapun hasil penelitian menunjukkan bahwa pola aliran yang teridentifikasi pada aliran dua fasa air udara berlawanan arah pada pipa kompleks ini meliputi pola aliran *stratified flow*, *wavy flow*, dan *slug flow*.



Gambar 2.3 :*Stratified flow* pada pipa horizontal ($J_L=0.012$ m/s, $J_G=0.66$ m/s) (Badarudin dkk, 2014)



Gambar 2.4 :*Slug flow* pada pipa horizontal ($J_L=0.012$ m/s, $J_G=2,64$ m/s) (Badarudin dkk, 2014)

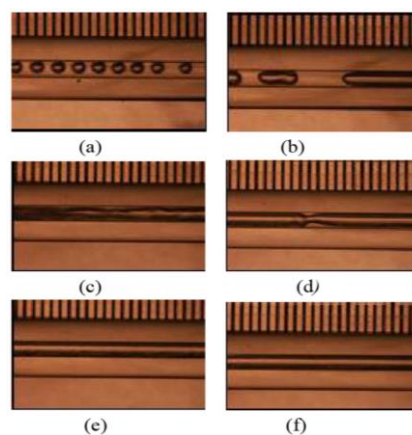


Gambar 2.5 :*Wavy flow* pada pipa horizontal ($J_L=0.012$ m/s, $J_G=2,31$ m/s) (Badarudin dkk, 2014)

Sudarja dkk, (2014) menelitian tentang pola aliran dua fasa gas cairan 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.

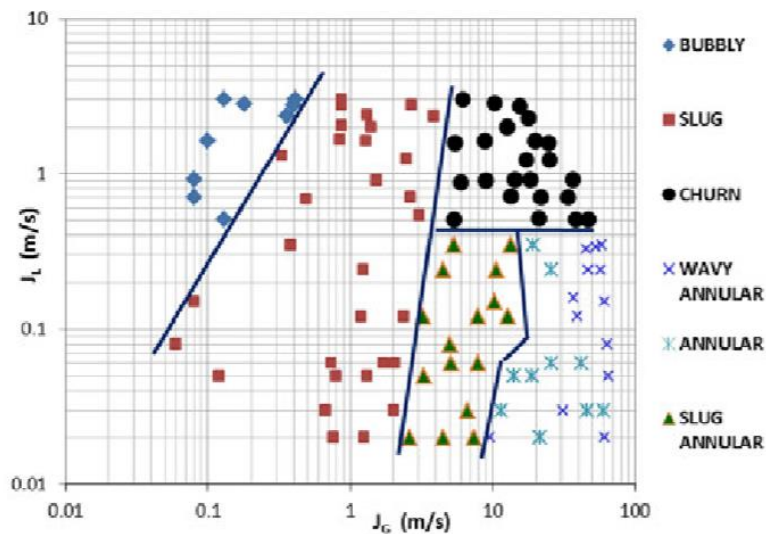
Penelitian ini dilakukan pada suatu instalasi alat yang terdiri dari: tangki air, pompa air, planum, kompresor udara, water trap, seksi uji berupa pipa kaca berdiameter dalam 1,6 mm posisi horisontal, optical correction box, dan alat ukur (*pressure transducer*, *thermocouple*, dan *flowmeter*) sebagaimana 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 – 3L/mnt dan 0 – 10 L/mnt).

Penelitian dilakukan pada kecepatan superfisial gas (J_G)= 0,08 – 64,42 m/s, dan kecepatan superfisial cairan (J_L) = 0,02 - 3.09 m/s. Kondisi penelitian adiabatik pengambilan data (berupa gambar) pola aliran dilakukan secara visual.



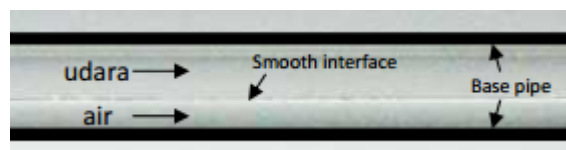
Gambar 2.6. Pola aliran yang terdeteksi (a) *Bubbly* ($J_G=0,1$ m/s dan $J_L=1,62$ m/s); (b) *Slug* ($J_G=2,06$ m/s dan $J_L=0,06$ m/s); (c) *Churn* ($J_G=21,03$ m/s dan $J_L=0,52$ m/s); (d) *Slug-annular* ($J_G=7,37$ m/s dan $J_L=0,02$ m/s); (e) *Wavy-annular* ($J_G=57,4$ m/s dan $J_L=0,24$ m/s); (f) *Annular* ($J_G=14,12$ m/s dan $J_L=0,05$ m/s)

(Sudarja dkk, 2014)



Gambar 2.7 Peta pola aliran dan garis transisi (Sudarja, dkk 2014)

Wibowo dkk, (2015) melakukan penelitian tentang penentuan sub-sub pola aliran *stratified* air-udara pada pipa horizontal menggunakan pengukuran tekanan, Parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah kaji eksperimental visualisasi dan pengukuran fluktuasi beda tekanan. Adapun hasil penelitian pola aliran *stratified* seraca detail subdaerah-subdaerah berdasarkan struktur antar muka, peneliti membagi aliran *stratified* menjadi dua yaitu *stratified smooth* dan *stratified wavy*, dimana *stratified wavy* dapat dibagi menjadi sub-sub daerah yaitu *two dimensional wave*, *roll wave* dan *atomization*.

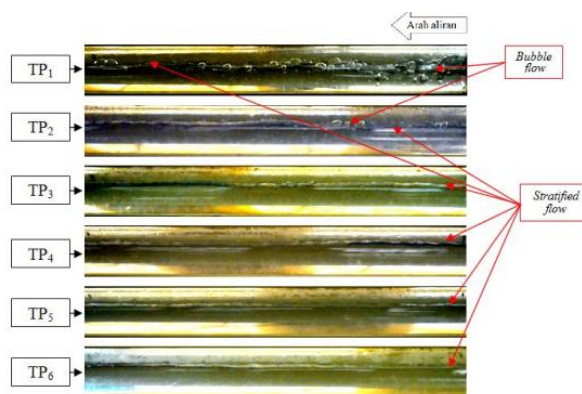


Gambar 2.8 : Contoh visualisasi dan sinyal beda tekanan aliran *stratified smooth* ($J_L=0,025$ m/s dan $J_G =1,88$ m/s) (Wibowo dkk, 2015)

Korawan, A. (2015) menelitian mengenai pola aliran air udara pada pipa horizontal dengan variasi kecepatan air. Metode yang dilakukan pada penelitian ini dengan test module terbuat dari pipa *acrylic* dengan diameter dalam 36 mm dan panjang 2000 mm. air digunakan sebagai fluida cair dan udara sebagai fluida gas. Air dialirkan oleh pompa dari tangka menuju *flowmeter* dan selanjutnya menuju

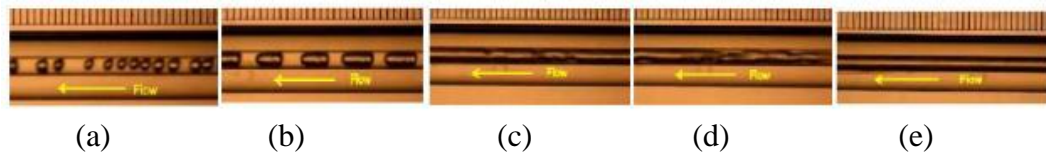
injector. Udara disuplai dari kompresor dan mengalir melalui rotameter menuju injector. Air udara yang tercampur didalam injector mengalir melalui test module, selanjutnya menuju separator, dimana udara dipisahkan ke atmosfer dan air mengalir ke dalam tangki untuk disirkulasikan.

Dari hasil visualisasi pola aliran pada $U_{sl} = 0,4$ m/s pola aliran yang teramati adalah *bubbly* pada TP₁, dan sebagian pada TP₂. *Bubbly* yang terjadi segera naik menuju permukaan diakibatkan oleh perbedaan berat jenis udara yang lebih rendah dari berat jenis air. *Bubbly* tersebut selanjutnya pecah dan terciptalah aliran *stratified*.



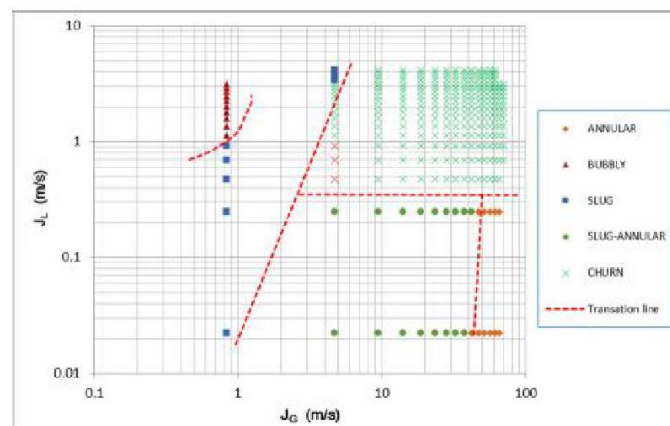
Gambar 2.9 : Visualisasi pola aliran pada kecepatan U_{sl} 0,4 m/s
(korawan, A. 2015)

Sudarja dkk, (2015) melakukan penelitian secara eksperimental tentang pola aliran dan fraksi hampa aliran dua fasa 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 (J_G)=0,83 – 65,4 m/s, dan kecepatan *superfisial* cairan (J_L)=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 terpisahkan (*stratified*) tidak muncul sama sekali.



(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.

Gambar 2.10 : pola aliran yang terdeteksi (Sudarja dkk, 2015)



Gambar 2.11 Peta pola aliran dan garis transisi (Sudarja dkk, (2015)

Anutup, D. (2016) melakukan penelitian tentang studi visualisasi pola aliran dan peta aliran dua fasa udara aquades gliserin pada saluran mini horizontal berukuran 1,6 mm. Tujuan dari penelitian untuk mengaetahui karakteristik aliran dua fasa dengan cara mengamati pola aliran dan peta pola aliran yang terbentuk pada saluran mini dan pengaruhperubahan nilai viskositas dan tegangan permukaan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah sirkulasi horizontal berukuran 1,6 mm dengan campuran air dan gliserin- udara dengan variasi larutan 20%, 40%, dan 60%. Dari penelitian ini dapat kita disimpulkan bahwa memvariasikan nilai kecepatan superfisial gas J_G dan kecepatan superfisial air J_L pada variasi $J_G = 0,066-66,2$ m/s dan $J_L = 0,033-4,193$ m/s didapatkan lima pola utama, yaitu *annular*, *bubbly*, *churn*, *slug*, dan *slug annular*.

Studi pola aliran dua fase udara-campuran air dan butanol pada saluran mini horisontal telah dilakukan. Metode eksperimental digunakan untuk mengetahui pengaruh tegangan permukaan terhadap karakteristik aliran dua fase, meliputi pola

aliran yang terbentuk dan peta pola aliran yang dihasilkan. Eksperimen dilakukan pada pipa kapiler horisontal dengan diameter 1,6 mm. Fluida kerja gas yang digunakan merupakan udara, dan campuran air-butanol dengan konsentrasi (2%, 4%, dan 6%). Kecepatan superfisial gas 0,066-66,2 m/s, dan nilai kecepatan superfisial fluida 0,033-4,193 m/s. Visualisasi menggunakan kamera video berkecepatan tinggi. Dari penelitian ini diperoleh hasil berupa pola aliran yang dapat diamati meliputi pola aliran *bubbly*, *plug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*. Tegangan permukaan berefek pada daerah transisi pola aliran *bubbly-plug*, *plug-slug annular*, dan *plug-churn*. (Dian, 2016)

Dari uraian tinjauan pustaka diatas penelitian yang dilakukan masih banyak menggunakan pipa horizontal dan pipa vertikal. Dan kebanyakan masih menggunakan fluida jenis udara-air, maka dari itu penelitian kali ini dilakukan dengan variasi sudut pada pipa kapiler dengan kemiringan 5° dan fluida jenis udara-air dan campuran gliserin (0-30%).

2.2 Dasar teori

2.2.1 Fasa

Fasa adalah salah satu keadaan zat yang terdapat berupa gas, cair maupun padat atau sistem yang dilengkapi oleh batas dan mempunyai kesamaan jenis kimia dan struktur fisiknya. Perubahan fasa harus terdapat energi yang di dapat atau dilepaskan, perubahan fasa itu berupa padat menjadi cair begitupun sebaliknya, cair menjadi gas begitupun sebaliknya, dan gas menjadi padat begitupun sebaliknya. Karakter dari fasa padat (solid) memiliki jarak antara molekul yang sangat besar, posisi molekul tetap dan bersusun beraturan, dan pada temperatur titik leburnya ikatan molekul meleleh dan posisi molekul tidak tetap. Karakter fasa cair memiliki jarak antar molekul sangat jauh/besar dibandingkan dengan jarak antar molekul pada fasa gas cair dan susunan molekul tidak teratur dan selalu bergerak bebas secara acak (*random*)

2.2.2 Pola aliran dua fasa

Pada aliran gas/uap dengan laju aliran yang kecil gas/uap cenderung untuk membentuk gelembung kecil (*bubbly*) dan besar di dalam aliran minyak dan air. Pola aliran dengan kriteria ini sebut dengan *bubbly* Dengan bertambahnya laju aliran gas, gelembung gelembung kecil akan bersatu membentuk gelembung besar yang akan membuat rongga di dalam pipa aliran. Gelembung besar ini disebut juga dengan "*Taylor Bubbles*". Dengan bertambahnya laju aliran gas/uap dalam fluida gelembung besar akan pecah, pola aliran disebut *churn*. Pola aliran terakhir kita sebut dengan *annular*, pola aliran ini akan terjadi dengan bertambahnya laju aliran dari gas/uap dalam fluida sehingga terdapat gelembung kecil pada bagian tengah fluida dalam bentuk cair pada dinding pipa. Dengan bertambahnya laju aliran gas/uap, jumlah fluida yang berbentuk cair pada dinding pipa akan semakin berkurang.

Aliran kantung (*plug*) dua fasa yang sangat intermiten dan diawali dengan ketidak stabilan, pola aliran ini ditandai dengan memanjangnya gelembung gas/uap berbentuk peluru. Gelembung gelembung panjang menempati sebagian dari luas penampang pipa, memaksa cairan mengalir sekitar mereka dalam arah yang berlawanan. Pada bagian belakang gelembung menciptakan aliran terpisah,

tergantung pada aliran parameter dan fisik sifat cair, dalam situasi ini cairan mengalir ke atas dengan kecepatan rata-rata sama dengan kecepatan gelembung.

Aliran dua fasa merupakan kasus aliran yang paling sederhana dari sekian banyak aliran fasa. Aliran ini menggambarkan fasa yang terdiri dari substansi yang berbeda pada setiap alirannya. Aliran fasa yang berbeda ini banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari maupun pada proses-proses industri. Secara umum pola aliran dua fasa gas-udara pada pipa horizontal yang ditunjukkan seperti Gambar 2.20 dibawah ini:

1. Pipa horizontal

a. Aliran Gelembung

Pada pola aliran ini terdapat banyak penyebaran gelembung gas dalam zat cair yang menyeluruh. Gelembung mengalir pada bagian atas tabung.

b. Aliran *Plug*

Karakteristik pada aliran ini adalah gelembung gas yang berbentuk peluru.

c. Aliran *Stratified* (aliran terpisah/licin)

Dalam aliran ini terjadi pemisahan fasa karena pengaruh perbedaan massa jenis dan gravitasi, dimana fasa gas mengalir pada bagian atas tabung dan fase cair mengalir pada dasar tabung.

d. Aliran *Wavy* (aliran gelombang)

Jika kecepatan gas pada pola aliran stratified meningkat, gelombang terbentuk pada interface. Selanjutnya amplitudo gelombang lambat laun membesar diiringi meningkatnya kecepatan gas.

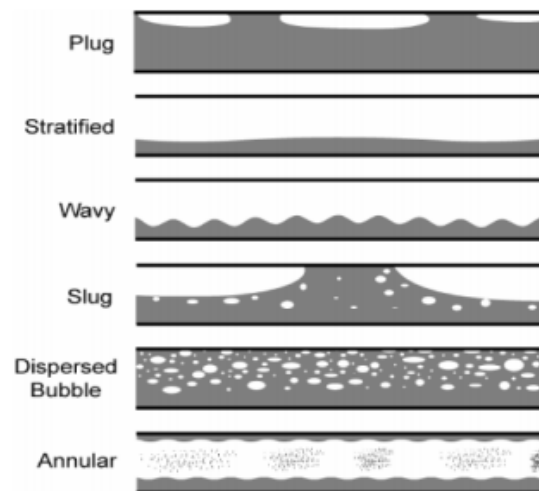
e. Aliran *Slug* (aliran sumbat)

Jika aliran gas meningkat dalam aliran gelombang, gelombang cairan akhirnya menyentuh bagian atas permukaan dari tabung, Gelombang kemudian diangkut oleh gas yang berkecepatan tinggi sepanjang tabung dalam bentuk kantung yang berbusa.

f. Aliran *annular* (aliran cincin)

Dalam aliran ini cairan terdistribusi diantara lapisan cairan yang mengalir di sekitar dinding pipa dimana bitiran air (droplet) mengalir bersama fluida gas.

Pada pipa horizontal, tebal lapisan cairan pada dasar tabung lebih pada bagian atas tabung karena adanya pengaruh gravitasi.

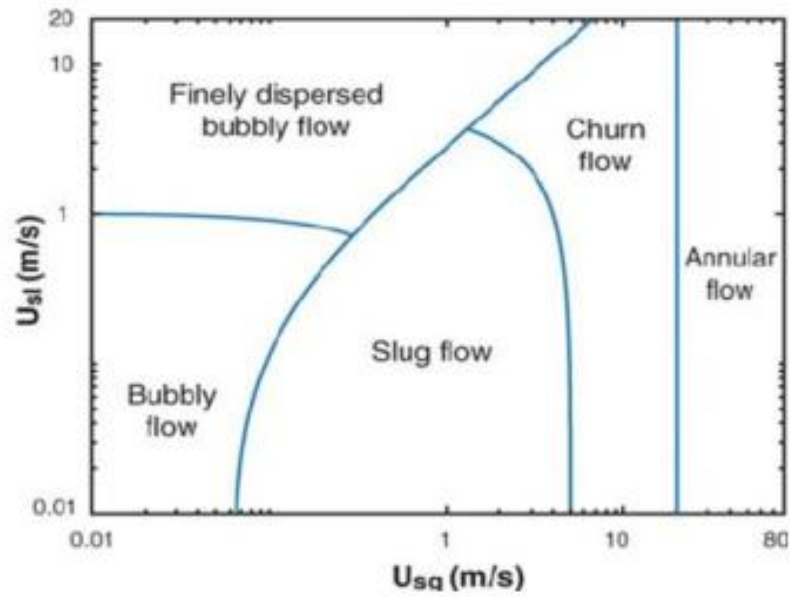


Gambar 2.12 :Pola aliran pada pipa horisontal (J.Braz.Soc.Mech.Sci, 2005)

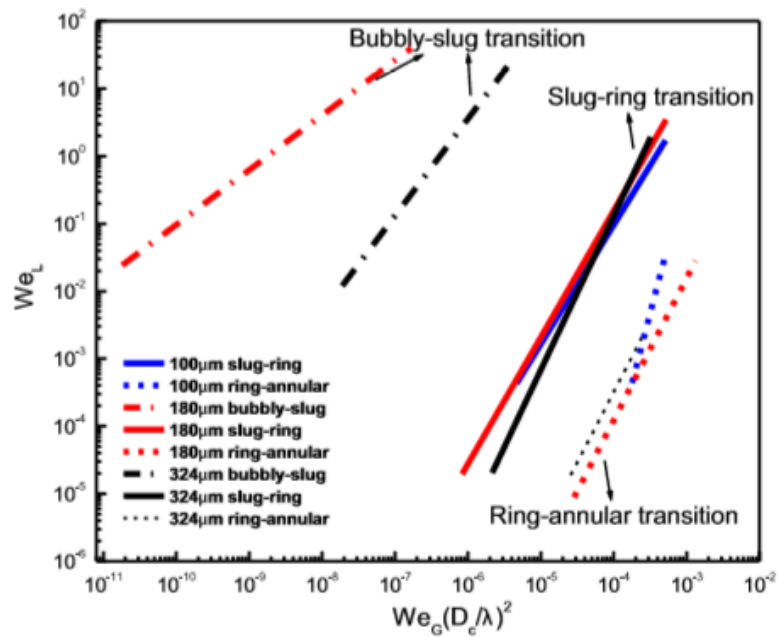
2.2.3 Peta pola aliran

Peta pola aliran merupakan grafik persebaran data pola aliran dari suatu percobaan dengan berbagai parameter yang ditentukan dengan kecepatan superfisial fluida gas, kecepatan superfisial air, dan laju alirannya. Jenis laju aliran yang digunakan berupa flux momentum, flux volume, flux massa, dan lain sebagainya tergantung dari peneliti.

Peta pola aliran bisa disajikan menggunakan kordinat yang bervariasi. Tripllet dkk, (1998), Kawahara dkk. (2002). Beberapa peneliti yang menggunakan koordinat kecepatan superfisial dianggap mewakili kondisi pada aliran yang terjadi di dalam saluran. Sur dan Liu, (2011). Parameter tak berdimensi digunakan karena ditemukan bahwa ukuran saluran mempengaruhi pola aliran dan daerah transisi yang terbentuk, Sur dan Liu (2011) menambahkan parameter (We_L) sebagai sumbu-y dan $(We_G(D_c/\lambda)^2)$ sebagai sumbu-x dalam penyajian peta pola aliran sebagai pengaruh efek ukuran saluran.



Gambar 2.13 :Peta pola aliran (Triplet dkk, 1980)



Gambar 2.14 Peta pola aliran (Sur dan Liu, 2011)

2.2.4 Konsep aliran multifasa

1. Variabel dasar aliran

Superficial velocity (kecepatan dangkal) *superficial velocity* cairan atau gas digambarkan sebagai rasio dari laju *volumetric flow* cairan atau gas terhadap area penampang melintang pipa total.

$$U_{sl} = \frac{Ql}{A_f} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$U_{sg} = \frac{Qg}{A_g} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

U_{sl} = kecepatan superficial cairan

U_{sg} = kecepatan superficial gas

Ql, Qg = laju aliran volumetrik cairan dan gas, secara berurutan

A_f, A_g = daerah penampang melintang aliran pipa

Kecepatan campuran kecepatan campuran suatu cairan digambarkan sebagai jumlah dari superficial gas dengan kecepatan cairan.

$$U_m = U_{sl} + U_{sg} = \frac{Ql + Qg}{A} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

U_m = Kecepatan campuran cairan

Hambatan cairan. Hambatan cairan digambarkan sebagai rasio dari volume cairan bagian dalam pipa terhadap seluruh volume bagian pipa.

$$H_l = \frac{V_l}{V} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

H_l = hambatan cairan

V_l = volume bagian pipa yang diduduki oleh cairan

V = seluruh volume bagian pipa

Massa jenis campuran. Massa jenis gas dan cairan secara homogen bercampur yang ditunjukkan sebagai berikut :

$$\rho_m = \rho_l \cdot H_l + \rho_g (1 - H_l) \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan :

ρ_m = massa jenis campuran gas-zat cair

ρ_l, ρ_g = massa jenis zat cair dan gas

Viskositas campuran. Jika gas dan zat cair bercampur secara homogen, viskositas dari campuran tersebut dapat dihitung seperti berikut :

$$\mu_m = \mu_l + \mu_g(1-H_l) \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

μ_m = viskositas campuran gas-zat cair

μ_l, μ_g = viskositas zat cair dan gas

2.2.5 Aliran Homogen

Aliran multifasa mengandung setidaknya dua atau lebih jenis fluida, seperti cair dan padat, gas dan padat, cair dan gas, dan dua cairan lainnya yang berbeda. Aliran satu fasa hanya mengandung satu jenis fluida, misalnya cairan atau gas tanpa partikel lain. Aliran air, minyak, gas alam, udara dan lain-lain merupakan contoh aliran satu fasa. Sedangkan air dengan partikel sedimentasi adalah aliran satu fasa. Sebuah aliran dikatakan *incompressible* (tak mampu mampat) jika pada suatu sistem aliran memiliki massa jenis yang tetap. Sebuah aliran dikatakan homogen jika densitasnya konstan sepanjang aliran. Sebuah aliran *incompressible* satu fasa merupakan aliran homogen, sedangkan aliran mampu mampat (*compressible*) merupakan aliran non homogen.

2.2.6 Aliran Terpisah

Aliran terpisah adalah aliran gas atau cairan yang mengalir melewati tubuh memisahkan dari permukaan tubuh dan membentuk daerah pusaran. Kasus yang khas dari aliran terpisah terjadi pada *generatrices* lengkung seperti bagian sayap atau bola. Kondisi yang diperlukan untuk munculnya aliran terpisah di sini adalah keberadaan lapisan batas kental di permukaan tubuh dan peningkatan tekanan dalam arah aliran. Dalam ketebalan batas lapisan kecepatan aliran menurun dari nilai 0 kecepatan dari luar aliran pada batas terluar dari lapisan untuk $v = 0$, tetapi tekanan tetap sama seperti pada streaming luar eksternal, di mana kecepatan partikel hampir 0, energi kinetic

partikel tidak cukup untuk mengatasi meningkatnya tekanan. Akibatnya kecepatan ini menjadi sama dengan 0 dan kemudian berbalik arahnya. Timbulnya aliran terbalik menyebabkan penebalan besar dari lapisan batas dan pemisah aliran dari pinding sebagai contoh, *aerodinamis* dari bola terbang pada kecepatan *subsonic* terutama ditentukan oleh aliran terpisah pada permukaan belahan belakang.