

DAFTAR ISI

PENGESAHAN	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	ii
NASKAH SOAL TUGAS AKHIR	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR NOTASI.....	1
INTISARI	2
ABSTRACT	4
BAB I.....	5
1.1 Latar Belakang	5
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Batasan Masalah.....	8
1.4 Tujuan Penelitian.....	8
1.5 Manfaat Penelitian.....	9
BAB II	10
2.1 Penelitian tentang Aliran Dua Fase pada Saluran Konvensional	10
2.2 Penelitian tentang Aliran Dua Fase pada <i>Minichannel</i> dan <i>Microchannel</i> ..	11
2.3 Penelitian tentang Aliran Dua Fase pada <i>T-Junction Minichannel</i>	22
BAB III.....	27
3.1 Aliran Dua Fase.....	27
3.2 Pola Aliran Dua Fase.....	28
3.3 Peta Pola Aliran Minichannel.....	29
3.4 Parameter Aliran Dua Fase.....	31
3.5 Mekanisme Pembentukan Slug	32
3.6 Parameter pada Pola Aliran <i>Slug</i>	35

3.6.1	Kecepatan <i>Slug</i>	37
3.6.2	Panjang <i>Slug</i>	38
3.7	Metode Image Processing	39
3.7.1	Pengertian <i>Image Processing</i>	39
3.7.2	Jenis-jenis Digital Image.....	42
3.7.3	Langkah – Langkah <i>Image Processing</i>	44
BAB IV		47
4.1	Lokasi Penelitian	47
4.2	Bahan Penelitian.....	47
4.3	Alat yang Digunakan.....	48
4.3.1	Skema Alat Penelitian	48
4.3.2	Peralatan Penelitian.....	49
4.4	Prosedur Penelitian.....	59
4.4.1	Diagram Alir Penelitian	59
4.4.2	Pengambilan Data	60
4.4.4	Pengolahan Data dan Analisa Hasil Penelitian	61
4.5	Variabel dan Matriks Penelitian	62
BAB V		63
5.1	Pola Aliran pada Minichannel	63
5.2	Peta Pola Aliran pada Minichannel	72
5.3	Frekuensi Kemunculan Slug	81
5.4	Analisis Menggunakan Metode <i>Image Processing</i>	83
BAB VI		96
6.1	Kesimpulan.....	96
6.2	Saran	98
DAFTAR PUSTAKA		100

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Peta pola aliran dua fase horizontal penelitian (Mandhane dkk, 1974) .	11
Gambar 2. 2 Pola aliran pada penelitian (Fukano dan Kariyasaki, 1993).....	13
Gambar 2. 3 Peta pola aliran penelitian (Fukano dan Kariyasaki, 1993)	14
Gambar 2. 4 Pola aliran yang dihasilkan pada penelitian (Triplett dkk, 1999)	15
Gambar 2. 5 Pola aliran yang dihasilkan pada penelitian (Triplett dkk, 1999)	16
Gambar 2. 6 Peta pola aliran yang dihasilkan pada penelitian (Triplett dkk, 1999)...	17
Gambar 2. 7 Peta pola aliran yang dihasilkan pada penelitian (Triplett dkk, 1999)...	18
Gambar 2. 8 Peta pola aliran pada minichannel (Chung & Kawaji, 2004).....	19
Gambar 2. 10 peta pola aliran yang teramati pada penelitian (Sudarja dkk, 2016)	22
Gambar 2. 11 Pembentukan <i>bubble</i> ketika melewati <i>t-junction</i>	23
Gambar 2. 12 Peta pola aliran <i>bubbly</i> dan <i>slug</i>	24
Gambar 2. 13 Profil Kecepatan pada aliran laminar.	25
Gambar 2. 14 Perbandingan vektor dan kontur kecepatan pada aliran laminar.	25
Gambar 2. 15 Profil Kecepatan pada aliran turbulen.	26
Gambar 2. 16 Perbandingan vektor dan kontur kecepatan pada aliran turbulen.	26
Gambar 3. 1 Pola aliran yang terjadi pada penlitian (Sudarja dkk, 2019)..	29
Gambar 3. 2 Perbandingan peta pola aliran (Elazhary dan Soliman)	30
Gambar 3. 3 Pembentukan <i>slug</i> menurut penelitian (Dukler dan Hubbard, 1975).....	33
Gambar 3. 4 Gambar Pembentukan <i>slug</i> penelitian (Santos dan Kawaji, 2009)	35
Gambar 3. 5 Permodelan <i>slug</i> dari penelitian (Dukler dan Hubbard, 1975).....	36
Gambar 3. 6 Definisi L_B dan L_{UC} menurut (Arias dan Cinca, 2016)	37
Gambar 3. 7 Pengolahan <i>Image sharpening</i>	40
Gambar 3. 8 Pengolahan <i>Removing noise</i>	41
Gambar 3. 9 Pengolahan <i>Image deblurring</i>	41
Gambar 3. 10 Pengolahan <i>Finding edge</i>	42
Gambar 3. 11 <i>Binary Image</i>	43

Gambar 3. 12 <i>Greyscale Image</i>	43
Gambar 3. 13 <i>True Colour</i> atau RGB	44
Gambar 4. 1 Skema alat penelitian	48
Gambar 4. 2 Skema seksi uji penelitian	48
Gambar 4. 3 Tangki air	50
Gambar 4. 4 Pompa air.....	51
Gambar 4. 5 <i>Kompresor Reciprocating</i>	51
Gambar 4. 6 <i>Pressure vessel</i>	52
Gambar 4. 7 Seksi uji <i>T-Junction Minichannel</i>	53
Gambar 4. 8 <i>Flowmeter</i> air	54
Gambar 4. 9 <i>Flowmeter</i> udara.....	54
Gambar 4. 10 Regulator Udara	55
Gambar 4. 11 Lampu LED.....	56
Gambar 4. 12 <i>Power supply</i>	56
Gambar 4. 13 <i>Differential pressure transducer</i>	57
Gambar 4. 15 <i>Advantech data acquisition</i>	57
Gambar 4. 16 Komputer atau Laptop.....	58
Gambar 5. 1 Pola aliran <i>bubbly</i> pada penelitian Triplett dkk, (1999).....	65
Gambar 5. 2 <i>Bubbly flow</i> pada seksi uji dengan radius <i>t-junction</i> R096.	66
Gambar 5. 3 Pola aliran <i>slug</i> pada penelitian Triplett dkk, (1999).	66
Gambar 5. 4 Pola aliran <i>plug</i> pada penelitian Sudarja dkk, (2019).	67
Gambar 5. 5 Pola aliran <i>slug</i> pada radius belokan R096.	67
Gambar 5. 6 Pola aliran <i>slug</i> pada radius belokan R080.	68
Gambar 5. 7 Pola aliran <i>slug</i> pada radius belokan R000.	68
Gambar 5. 8 Pola aliran <i>churn</i> dengan $J_G = 36,946$ m/s dan $J_L = 1,493$ m/s.	69
Gambar 5. 9 Pola aliran <i>churn</i> pada penelitian Triplett dkk, (1999).	69
Gambar 5. 10 Pola aliran <i>churn</i> pada penelitian Sudarja dkk, (1999).	70

Gambar 5. 11 Pola aliran <i>wavy annular</i> pada penelitian Triplett dkk, (1999).....	70
Gambar 5. 12 Pola aliran <i>wavy annular</i> dengan $J_L = 7$ m/s dan $J_L = 0,879$ m/s.	71
Gambar 5. 13 Pola aliran <i>slug annular</i> dengan $J_G = 22,6$ m/s dan $J_L = 0,7$ m/s	72
Gambar 5. 14 Pola aliran <i>slug annular</i> pada penelitian Triplett dkk, (1999).	72
Gambar 5. 15 Peta pola aliran pada penelitian ini.	73
Gambar 5. 16 Perbandingan dengan peta pola aliran Mandhane dkk, (1974).	74
Gambar 5. 17 Perbandingan dengan peta pola aliran Fukano dan Kariyasaki (1993).76	
Gambar 5. 18 Perbandingan dengan peta pola aliran Triplett dkk, (1999).	77
Gambar 5. 19 Perbandingan dengan peta pola aliran Sudarja dkk, (2019).....	80
Gambar 5. 20 Frekuensi kemunculan <i>slug</i> $J_G = 0,871$ m/s, $J_L = 0,7$ m/s - 2,297 m/s. 82	
Gambar 5. 21 Panjang <i>slug</i> $J_G = 0,871$ m/s dan $J_L = 0,7$ m/s.....	85
Gambar 5. 22 Perubahan panjang <i>slug</i> pada tiga variasi belokan <i>t-junction</i>	86
Gambar 5. 23 Perubahan panjang <i>slug</i> pada variasi belokan <i>t-junction</i> R000.....	87
Gambar 5. 24 Perubahan panjang <i>slug</i> pada variasi belokan <i>t-junction</i> R080.....	87
Gambar 5. 25 Perubahan panjang <i>slug</i> pada variasi belokan <i>t-junction</i> R096.....	88
Gambar 5. 26 Perubahan kecepatan <i>slug</i> pada tiga variasi belokan <i>t-junction</i>	90
Gambar 5. 27 Perubahan kecepatan <i>slug</i> pada radius belokan <i>t-junction</i> R000	91
Gambar 5. 28 Perubahan kecepatan <i>slug</i> pada radius belokan <i>t-junction</i> R080.	91
Gambar 5. 29 Perubahan kecepatan slug pada radius belokan <i>t-junction</i> R096.	92
Gambar 5. 30 Perbandingan kecepatan <i>slug</i> prediksi $C_S = 0,2$	93
Gambar 5. 31 Perbandingan kecepatan <i>slug</i> prediksi $C_K = 1,21$	94
Gambar 5. 32 Perbandingan kecepatan <i>slug</i> prediksi $U_S = J_G + J_L$	95

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Parameter yang digunakan pada penelitian (Mandhane dkk, 1974)	10
Tabel 2. 2 Tabel pola aliran dan fraksi hampa yang teramati pada saluran 1,6 mm... 21	
Tabel 4. 1 Matriks Pengambilan Data.....	62

DAFTAR NOTASI

Huruf Latin

J	: Kecepatan superfisial fluida (m/s)
D	: Diameter (m)
G	: Fluks massa ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
A	: Luas penampang (m^2)
$\dot{m}$	: Laju aliran massa
U	: Kecepatan aktual (m/s)
Q	: Debit aliran (m^3/s)
We	: <i>Weber number</i>
Re	: <i>Reynolds Number</i>
Ca	: <i>Capillary Number</i>

Huruf Yunani:

μ	: Viskositas Dinamik ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$)
ρ	: Massa jenis fluida (kg/m^3)
σ	: Tegangan Permukaan (N/m)
β	: <i>Homogeneous void fraction</i>
α	: <i>Actual void fraction</i>

Subscripts:

G	: Fluida Gas
L	: Fluida Cairan
B	: <i>Bubble</i>
S	: <i>Slug</i>
H	: Hidraulik

INTISARI

Studi eksperimental dilakukan terhadap pola aliran dan karakteristik pola aliran *slug* yang melewati tiga variasi radius belokan *t-junction* pada saluran mini (*minichannel*) horizontal dengan penampang *rectangular* berukuran 1,25 mm x 2,25 mm. Saluran mini yang digunakan memiliki diameter hidraulik sebesar 1,607 mm. Fluida kerja yang digunakan adalah air dan udara. Kecepatan superfisial udara dan kecepatan superfisial air yang digunakan pada penelitian ini memiliki rentang masing-masing $J_G = 0,871 \text{ m/s} - 22,6 \text{ m/s}$ dan $J_L = 0,7 \text{ m/s} - 4,935 \text{ m/s}$. Variasi radius belokan yang digunakan, yaitu R000, R080, R096. Pada penelitian ini, data pola aliran dan karakteristik *slug* didapatkan dengan menggunakan *high speed camera*. Pola aliran dianalisis secara visual dengan hasil video yang didapatkan dan karakteristik *slug* dianalisis dengan metode *image processing*. Pada tiga variasi radius belokan *t-junction* memiliki pola aliran yang sama yaitu *bubbly*, *slug*, *wavy annular*, *slug annular* dan *churn*. Peta pola aliran yang dihasilkan memiliki keseuaian yang cukup baik terhadap penelitian terdahulu. Frekuensi kemunculan *slug* dan kecepatan *slug* ketika melalui radius belokan R080 mengalami kenaikan kemudian mengalami penurunan ketika melewati radius belokan *t-junction* R096. Hal yang sebaliknya terjadi pada panjang *slug* yang mengalami penurunan besar panjang ketika melewati radius belokan *t-junction* R080 kemudian mengalami kenaikan ketika melewati radius belokan *t-junction* R096. Frekuensi pada tiga variasi radius belokan *t-junction* kemunculan *slug* meningkat seiring meningkatnya kecepatan superfisial air pada kecepatan superfisial udara konstan. Kecepatan *slug* pada tiga variasi radius belokan *t-junction* mengalami peningkatan seiring meningkatnya kecepatan superfisial udara dan kecepatan superfisial air. Panjang *slug* pada tiga variasi radius belokan *t-junction* mengalami penurunan besar panjang seiring meningkatnya kecepatan superfisial air pada kecepatan superfisial udara konstan. Panjang *slug* mengalami peningkatan mengalami peningkatan ketika mengalami kenaikan kecepatan superfisial udara pada kecepatan superfisial air konstan.

Kata Kunci : Aliran dua fase, saluran mini (*minichannel*), pola aliran, karakteristik *slug*, radius belokan *T-junction*.

ABSTRACT

Eksperimental studies on the flow pattern and slug flow characteristics of co-current two-phase flow in three various t-junction corner radius in horizontal minichannel which have 1,25 mm x 2,25 mm rectangular cross section. Minichannel have hydraulic diameter $D_H = 1,607$ mm. The working fluids were air and water. The superficial velocities of air and water were in range of $J_G = 0,871$ m/s - 22,6 m/s dan $J_L = 0,7$ m/s - 4,935 m/s, respectively. The various of t-junction corner radius were R000, R080, and R096. In this work, flow pattern and slug flow characteristics data were obtained by using high speed camera. Flow pattern were analyzed by visualization of the video and the slug flow characteristics were analyzed by image processing methods. Bubbly, slug, wavy annular, slug annular and churn flow were found in three various t-junction corner radius. Flow pattern map in this work have a good suitability with the flow pattern map previous research. Slug frequencies and slug velocities increase when through the corner radius of R080 then decrease when through the corner radius of R096. Slug length decrease when through the corner radius of R080 then increase when through the corner radius of R096. Slug frequencies on three various of t-junction corner radius increase with the increase of superficial velocities of water on constant superficial velocities of air. Slug velocities on three various of t-junction corner radius increase with the increase of superficial velocities of water and superficial velocities of air. Slug length on three various of t-junction corner radius decrease with the increase of superficial velocities of water on constant superficial velocities of air.

Keyword : two phase flow, minichannel, flow pattern, slug characteristics, t-junction corner radius.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fenomena aliran merupakan salah satu fenomena yang kerap dijumpai di kehidupan sehari-hari. Fenomena aliran terjadi ketika adanya fluida bergerak dari satu titik ke titik lainnya. Secara alami, fluida mengalir karena beberapa faktor, salah satunya adalah elevasi yang dapat menyebabkan fluida bergerak dari tempat tinggi ke tempat yang lebih rendah. Namun, dalam aplikasi di kehidupan sehari-hari, aliran dapat mengalir dari tempat rendah ke tempat yang lebih tinggi dengan penambahan gaya eksternal. Fluida sendiri terdiri dari fase cair, gas, dan plasma. Aliran terdiri dari aliran satu fase dan aliran multi fase.

Aliran satu fase menggunakan satu fluida yang memiliki karakteristik yang seragam, sedangkan aliran multifase menggunakan dua atau lebih fase yang memiliki karakteristik berbeda, dimana fase-fasenya saling berinteraksi dan hubungan antar fase saling mempengaruhi. Aliran multifase memiliki peran yang cukup penting ketika aliran satu fase sudah tidak memadai dalam permasalahan keteknikan maupun aliran alam dimana hubungan antara dua fase atau lebih harus dipertimbangkan secara keseluruhan.

Aliran dua fase merupakan bagian dari aliran multifase yang memiliki bentuk paling sederhana. Aliran dua fase dinilai dapat mengganti penggunaan dari aliran satu fase karena pada aplikasinya dapat meningkatkan kinerja dan keandalannya, salah satunya pada pengurangan berat fluida. Aliran dua fase diklasifikasikan berdasarkan keadaan pada bidang alirannya. Pada setiap klasifikasi harus di perlakukan mandiri dari yang lain. Adapun klasifikasi aliran dua fase sebagai berikut:

1. *Liquid-gas flow*

2. *Liquid-solid flow*
3. *Gas-solid flow*
4. *Liquid-plasma flow*
5. *Plasma-solid flow*
6. *Gas-plasma flow*

Pada penelitian ini, *Liquid-gas flow* dipilih untuk menjadi fluida uji. Salah satu contoh dari aliran dua fase yang dapat kita lihat di kehidupan sehari-hari yaitu pada aliran darah di dalam tubuh. Aliran darah di dalam tubuh memiliki dua zat berupa darah dan oksigen dimana keduanya sangat diperlukan di dalam tubuh.

Pada sebuah aliran, terdapat saluran atau pipa dengan berbagai ukuran. Kandiklar dan Grande (2003) mengklasifikasi ukuran saluran menjadi 5 kelas, yaitu *Conventional Channels* ($D_H > 3 \text{ mm}$), *Minichannels* ($3 \text{ mm} \geq D_H > 200 \text{ }\mu\text{m}$), *Microchannels* ($200 \text{ }\mu\text{m} \geq D_H > 10 \text{ }\mu\text{m}$), *Transitional Channels* ($10 \text{ }\mu\text{m} \geq D_H > 0,1 \text{ }\mu\text{m}$), *Molecular Nanochannels* ($0,1 \text{ }\mu\text{m} \geq D_H$). Klasifikasi tersebut dapat digunakan pada aliran satu fase maupun aliran dua fase. Seiring berjalannya waktu, saluran konvensional atau saluran pipa besar mulai tergeser dengan saluran yang memiliki diameter hidraulik lebih kecil yaitu *minichannel* dan *microchannel*. Pesatnya perkembangan zaman, membuat peralatan teknologi menjadi semakin efisien dengan ukuran semakin kecil dan lebih kompak.

Salah satu contoh penerapan *minichannel* pada bidang kesehatan adalah pada sistem organ tubuh yang menyediakan *heat and mass transfer rates* yang tinggi pada otak, liver, paru-paru, dan ginjal. Aplikasi aliran dua fase pada saluran kecil (*minichannel* dan *microchannel*) lainnya adalah pada *Micro Electro Mechanical System* (MEMS). MEMS sendiri merupakan suatu miniatur elemen-elemen mekanis dan elektro mekanis yang dibuat menggunakan teknologi fabrikasi mikro. Pada perangkat komputer dengan *high speed processor* yang memiliki ukuran kecil hingga mikro, aliran dua fase dengan saluran kecil juga digunakan sebagai sistem pendingin

pada *high speed processor* tersebut. Sistem pendingin tersebut diperlukan supaya kinerja *processor* menjadi lebih optimal.

Dalam pengaplikasian aliran dua fase pada saluran kecil, diperlukan mekanisme untuk mengalirkan kedua fase yang berbeda pada saluran yang sama. Salah satu mekanisme pencampurannya adalah dengan *t-junction*. *T-junction* termasuk metode pencampuran yang cukup populer. Elazhary dkk, (2012) melakukan sebuah penelitian mengenai aliran dua fase menggunakan *t-junction* dengan penampang persegi panjang yang memiliki diameter hidraulik kecil (*minichannel*). Penelitian tersebut memberikan hasil kesimpulan berupa panduan perancangan penukar kalor berukuran mini (*mini heat exchanger*). Selain itu, pada penelitian tersebut juga didapatkan bahwa kecepatan superficial fase cair maupun gas memiliki pengaruh terhadap kecenderungan pola aliran yang serupa dengan sambungan *t-junction* ukuran besar (*macro-size junction*).

Pada setiap penggunaan aliran dua fase pada *t-junction*, kecepatan superficial kedua fluida memiliki pengaruh penting dalam terbentuknya pola aliran. Salah satu pola aliran yang cukup sering muncul dalam pengamatan aliran dua fase pada saluran mikro dan mini adalah pola aliran *slug*. Pengaruh radius pada belokan *t-junction* juga memiliki peran penting pada pembentukan *slug*. Dari pemaparan di atas, penelitian ini dilaksanakan untuk mengamati terbentuknya *slug* yang melwati *t-junction minichannel* untuk mengetahui pengaruh radius belokan *t-junction* mengetahui karakteristik dari pola aliran *slug* yang dihasilkan.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini, akan dilakukan pengamatan terhadap pola aliran yang mengalir melalui *t-junction* pada *minichannel* horizontal dengan penampang persegi panjang. Prosedur penelitian ini mengacu pada penelitian terdahulu dengan ukuran dan geometri *t-junction* yang berbeda serta variasi kecepatan superficial fluida yang berbeda. Rumusan masalah pada penelitian ini antara lain:

1. Bagaimanakah pengaruh variasi kecepatan superfisial air dan kecepatan superfisial udara terhadap pola aliran yang terjadi ketika melalui *t-junction* pada *minichannel* horizontal dengan penampang saluran persegi panjang?
2. Bagaimanakah pengaruh radius belokan *t-junction* terhadap peta pola aliran yang dihasilkan ketika kecepatan superfisial divariasikan pada *minichannel* horizontal dengan penampang saluran persegi panjang?
3. Bagaimanakah pengaruh radius belokan *t-junction* terhadap karakteristik pola aliran *slug* (panjang, kecepatan *slug*) dan frekuensi kemunculan *slug* yang teramati pada gambar yang diambil menggunakan metode *image processing*?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyederhanakan masalah pada penelitian, maka asumsi dan batasan dibutuhkan pada penelitian ini. Adapun asumsi pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tidak terjadi perpindahan kalor antara fluida didalam saluran dengan lingkungan atau proses terjadi secara adiabatik.
2. Seksi uji terbuat dari akrilik dan permukaan dalam saluran diasumsikan halus.
3. Sudut orientasi pada sambungan *t-junction* adalah 90° .
4. Udara dan air dipilih sebagai fluida kerja yang digunakan dengan kondisi tekanan atmosfer dan suhu pada saat dilakukan penelitian.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan superfisial air dan kecepatan superfisial udara terhadap pola aliran dua fase dan karakteristik pola aliran *slug* pada *minichannel*.

2. Menganalisis pengaruh radius sambungan *t-junction* terhadap karakteristik pola aliran *slug*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini menghasilkan data yang dapat dimanfaatkan sebagai data pendukung untuk penelitian lebih lanjut mengenai pembentukan *slug* dan karakteristik *slug* yang terjadi pada *minichannel* horizontal dengan sambungan *t-junction*.

BAB II

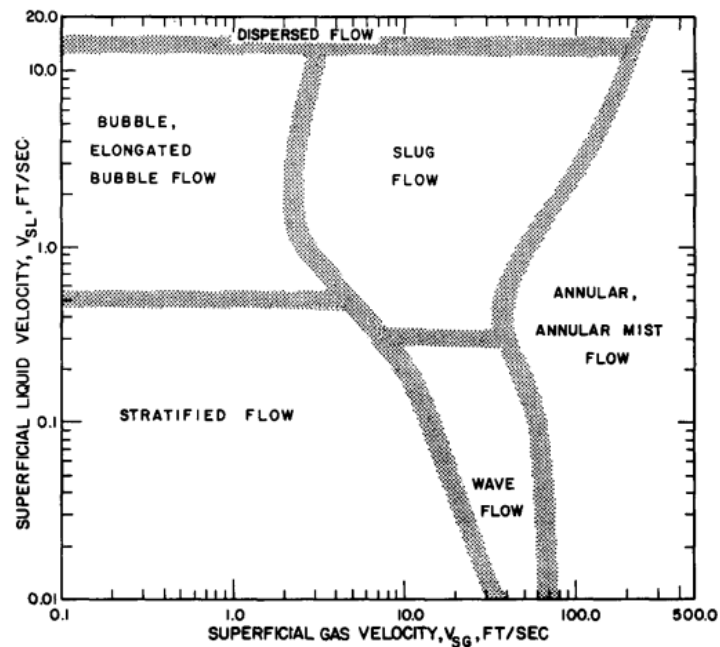
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian tentang Aliran Dua Fase pada Saluran Konvensional

(Mandhane dkk, 1974) melakukan penelitian berupa perumusan peta pola aliran dua fase air-udara pada saluran sirkular horizontal yang dilakukan terhadap data yang dihasilkan pada penelitian terdahulu. Mandhane dkk, (1974) melakukan perumusan peta pola aliran dengan menggunakan rentang diameter sirkular saluran 12,7 mm-165,1 mm. Selain itu, parameter lain yang digunakan pada penelitian Mandhane dkk, (1974) ada pada Tabel . Peta pola aliran yang dihasilkan pada penelitian Mandhane dkk, (1974) dapat dilihat pada Gambar 2.1. Pada penelitian ini didapatkan pola aliran *bubble*, *stratified*, *wave*, *slug*, *annular-mist*, dan *dispersed bubble*.

Tabel 2. 1 Parameter yang digunakan pada penelitian (Mandhane dkk, 1974)

Properties	Rentang Parameter
Diameter dalam pipa (D)	12,7 – 165,1 mm
Massa jenis cairan (ρ_L)	705 – 1009 kg/m ³
Massa jenis gas (ρ_G)	0,8 – 50,5 kg/m ³
Viskositas cairan (μ_L)	3 x 10 ⁻⁴ – 9 x 10 ⁻² Pl
Viskositas gas (μ_G)	10 ⁻⁵ – 2,2 x 10 ⁻⁵ Pl
Tegangan permukaan (σ)	24 – 103 mN/m
Kecepatan superfisial cairan (V_L)	0,09 – 73,1 cm/s
Kecepatan superfisial gas (V_G)	0,04 – 171 m/s



Gambar 2. 1 Peta pola aliran dua fase horizontal pada penelitian (Mandhane dkk, 1974)

2.2 Penelitian tentang Aliran Dua Fase pada *Minichannel* dan *Microchannel*

(Fukano dan Kariyasaki, 1993) melakukan penelitian yang membahas mengenai fenomena karakteristik yang umumnya nampak pada pipa kapiler dengan berbeda diameter dan orientasi. Pada penelitian ini, diameter dalam yang digunakan 1 mm, 2,4 mm, dan 4,9 mm dengan orientasi *vertical upward*, *horizontal* dan *vertical downward*. Pola aliran yang terbentuk dikategorikan sebagai berikut:

- Aliran terpisah sulit terlihat pada pipa kapiler, dimana menunjukkan perbedaan pada pola aliran yang terjadi karena perbedaan arah aliran yang kecil pada pipa kapiler.

- b. Pada pipa horizontal 26 mm terlihat *bubble* udara panjang dari aliran *slug* horizontal dan dapat terlihat air mengalir pada bagian bawah pipa dan udara pada bagian atas pipa. Pola aliran pada pipa horizontal 9 mm memiliki kondisi aliran yang sama dengan pipa horizontal 26 mm. Pola aliran pada pipa horizontal 1 mm dan 2,4 mm merupakan *intermittent* dengan *bubbles* pendek dan asimetris. Hal ini menunjukkan bahwa, ukuran pipa kritis dimana tegangan permukaan melampaui gaya gravitasi adalah pada ukuran antara 5 mm dan 9 mm.
- c. Seiring dengan penurunan ukuran pipa, *circumferential distribution* dari tebal *film* menjadi lebih seragam yang menyebabkan pola aliran asimetris.
- d. Ukuran pipa yang lebih kecil memiliki tebal *film* yang lebih tipis pada *film* yang mengelilingi *bubble* udara besar.
- e. *Bubble* kecil pada *slug* cairan atau *film* cairan hampir tidak teramati pada pipa kapiler.

Pola aliran yang terjadi pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.2 dan peta pola aliran pada pipa horizontal ditunjukkan pada Gambar 2.3. Pada penelitian ini, dilakukan pemetaan terhadap total fluks volumetrik terhadap kecepatan *bubble* yang didapatkan dari persamaan (2.1) Kecepatan *bubble* pada pipa kapiler ditentukan pada persamaan (2.2), dimana konstanta C_s besarnya sekitar 0,2. Kemudian kecepatan *bubble* pada diameter saluran $D = 1$ mm ditentukan dengan persamaan (2.3) dengan nilai $C_K = 1,21$.