

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	ii
NASKAH SOAL TUGAS AKHIR	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xvii
INTISARI	xix
<i>ABSTRACT</i>	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 . Latar Belakang	1
1.2 . Rumusan Masalah	4
1.3 . Batasan Masalah	4
1.4 . Tujuan Penelitian	4
1.5 . Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 . Penelitian Aliran Dua Fasa dalam Saluran Makro Konvensional	6
2.2 . Penelitian Aliran Dua Fasa dalam Saluran Mikro	8
2.3 . Penelitian Aliran Dua Fasa <i>Non-Newtonian</i> pada <i>Microchannel</i>	14
2.4 . Penelitian Aliran Dua Fasa pada <i>Microchannel</i> dengan Perubahan Luas Penampang	21

BAB III	DASAR TEORI	29
3.1	Fluida <i>Newtonian</i> dan <i>non-Newtonian</i>	29
3.2	Aliran Dua Fasa pada Saluran Horizontal	30
3.3	Parameter Perhitungan dalam Aliran Dua Fasa	33
3.3.1	Kecepatan Superfisial dan Kecepatan Aktual	33
3.3.2	Bilangan Reynolds	33
3.3.3	Bilangan Weber	34
3.3.4	Bilangan <i>Capillary</i>	35
3.3.5	Diameter hidrolis	35
3.3.6	Fluks massa	35
3.3.7	Fraksi hampa	36
3.3.8	<i>Pressure Drop</i>	36
3.3.9	<i>Pressure drop</i> akibat perubahan luas penampang mendadak	37
3.3.10	Persamaan panjang <i>slug</i>	38
3.4	<i>Image Processing</i> dalam Akuisisi Data	39
3.4.1	Prosedur <i>Image Processing</i>	39
3.4.2	Akuisisi Gambar dengan Kamera Digital	42
3.4.3	<i>Image Processing</i> dalam Penelitian Aliran Dua Fasa	44
BAB IV	METODE PENELITIAN	47
4.1	Lokasi Penelitian	47
4.2	Bahan Penelitian	47
4.3	Aparatus Penelitian	48
4.3.1	Skema Aparatus Penelitian	48
4.3.2	Alat Penelitian	49
4.4	Prosedur Penelitian	58

4.4.1 . Diagram Alir Penelitian	58
4.4.2 . Tahap Persiapan	59
4.4.3 . Tahap Pengambilan Data	60
4.4.4 . Variabel Penelitian	62
4.4.5 . Pengolahan Data dan Analisis Hasil	62
<b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>63</b>
5.1 . Fenomena Aliran Dua Fasa pada <i>Microchannel</i>	63
5.1.1 . Pola Aliran Dua Fasa pada Fluida Uji Nitrogen-Akuades	63
5.1.2 . Pola Aliran Dua Fasa pada Fluida Uji Nitrogen-CMC 0,4%	68
5.2 . Peta Pola Aliran	71
5.2.1 . Peta Pola Aliran Dua Fasa Nitrogen-Akuades	71
5.2.2 . Peta Pola Aliran Dua Fasa Nitrogen-CMC 0,4%	72
5.2.3 . Perbandingan Peta Pola Aliran	73
5.3 . Analisis Karakteristik <i>Slug</i>	78
5.3.1 . Panjang <i>Slug</i>	79
5.3.2 . Kecepatan <i>Slug</i>	81
5.4 . <i>Pressure Drop</i> pada Aliran	82
<b>BAB VI PENUTUP</b>	<b>86</b>
6.1 . Kesimpulan	86
6.2 . Saran	87
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>88</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b>	Baker's Map yang merepresentasikan peta rezim aliran dua fasa dalam saluran horizontal (Baker, 1954)	6
<b>Gambar 2.2.</b>	Peta perbandingan Beres Map pada peralihan rezim <i>stratified-intermittent</i> untuk beragam fluida dan geometri saluran (Choe & Weisman, 1974)	7
<b>Gambar 2.3.</b>	Peta Pola Aliran Dua Fasa pada Saluran Horizontal (Mandhane dkk., 1974)	8
<b>Gambar 2.4.</b>	Peta pola aliran dua fasa pada heptana-nitrogen dalam pipa 1,59 mm (Suo & Griffith, 1964)	11
<b>Gambar 2.5.</b>	Peta pola aliran air/udara pada <i>microchannel</i> 1,1 mm (Triplett dkk., 1999)	11
<b>Gambar 2.6.</b>	Pola aliran pada penelitian yang diamati pada saluran (Coleman & Garimella, 1999)	12
<b>Gambar 2.7.</b>	Peta pola aliran R-134a dan air-udara pada pipa lingkaran berdiameter 1 mm (Yang & Shieh, 2001)	13
<b>Gambar 2.8.</b>	Pola aliran yang diamati pada <i>channel</i> (Serizawa dkk., 2002)	14
<b>Gambar 2.9.</b>	Diagram skematik aparatus penelitian aliran dua fasa nitrogen/ <i>non-Newtonian</i> (Yang dkk., 2010)	15
<b>Gambar 2.10.</b>	Peta pola aliran dari fluida kerja berbeda yang diuji pada <i>square microchannel</i> (Yang dkk., 2010)	16
<b>Gambar 2.11.</b>	<i>Bubble flow</i> yang terjadi saat rasio kecepatan superfisial gas dengan cair yang tinggi, $j_G/j_L = 2.2-2.9$ pada (a) air, (b) PAM 0,1 wt%, (c) PAM 0.2 wt%, dan (d) PAM 0.4 wt% (Mansour, 2015)	17
<b>Gambar 2.12.</b>	Pola aliran nitrogen-air dan nitrogen-CMC 0,2% (Feng & Zhang, 2021)	18
<b>Gambar 2.13.</b>	Aliran <i>slug</i> pada aliran dua fasa dengan cair: (a) air, (b) CMC 0,1 wt%, (c) CMC 0,2 wt%, dan (d) CMC 0,3 wt% (Feng & Zhang, 2021)	18
<b>Gambar 2.14.</b>	Peta rezim aliran dua fasa untuk variasi fluida kerja: (a) air, (b) CMC 0,1 wt%, (c) CMC 0,2 wt%, (d) CMC 0,3 wt% (Feng & Zhang, 2021)	19
<b>Gambar 2.15.</b>	Grafik gradien <i>pressure drop</i> terhadap kecepatan superfisial gas pada fluida kerja dan rezim aliran yang	20

berbeda: (a) air, (b) CMC 0,1 wt%, (c) CMC 0,2 wt%,  
(d) CMC 0,3 wt% (Feng & Zhang, 2021)

- Gambar 2.16.** *Intermittent bubbly flow* pada fluida nitrogen-etanol pada *microchannel* dengan  $\sigma_A = 0,51$  pada kondisi  $j_{L,d} = 0,26$  m/s dan  $j_{G,d} = 0.48$  m/s (Kawahara dkk., 2015) 22
- Gambar 2.17.** Visualisasi bentuk *bubble* pada aliran dua fasa nitrogen – HFE-7200 di *microchannel*  $\sigma_A = 0,35$  (Kawahara dkk., 2015) 23
- Gambar 2.18.** Visualisasi letak *pressure tap* #3-12 pada *microfluidic chip* (Kawahara dkk., 2015) 23
- Gambar 2.19.** Distribusi tekanan aliran satu fasa HFE-7200 dan dua fasa nitrogen-HFE-7200 pada *microchannel*  $\sigma_A = 0,51$  dan 0,35 (Kawahara dkk., 2015) 24
- Gambar 2.20.** Grafik *pressure drop* akibat *sudden contraction* terhadap total fluks volumetrik pada *microchannel* (Kawahara dkk., 2015) 24
- Gambar 2.21.** Diagram skema saluran uji beserta rincian dimensinya (Toshimitsu dkk., 2021) 25
- Gambar 2.22.** (a) Grafik *sudden contraction pressure drop* terhadap Reynolds number aliran cair satu fasa; (b) Grafik *sudden contraction pressure drop* terhadap fluks volumetrik total aliran dua fasa (Toshimitsu dkk., 2021) 26
- Gambar 2.23.** Pola aliran pada kondisi  $j_{L,d}$  dan  $j_{G,d}$  yang setara pada (a) air, (b) GL 25wt%, (c) XG 0,1wt%, dan (d) PAM 0,11 wt% (Toshimitsu dkk., 2021) 27
- Gambar 2.24.** Distribusi tekanan sepanjang saluran untuk aliran dua fasa pada  $j_{L,d} = 0,86$  m/s dan  $j_{G,d} = 0,87$  m/s. (Toshimitsu dkk., 2021) 28
- Gambar 3.1.** Grafik (a) *shear stress* terhadap *shear rate* dan (b) *viscosity* terhadap *shear rate* untuk fluida *Newtonian* dan *non-Newtonian* (Kitsomboonloha, 2015) 30
- Gambar 3.2.** Grafik penurunan viskositas efektif fluida *non-Newtonian shear thinning* (Yang, 2010) 30
- Gambar 3.3.** Rezim aliran dua fasa gas-cair pada saluran horizontal (Holland & Bragg, 1995) 32

<b>Gambar 3.4.</b>	Kiri: gambar sebelum dilakukan <i>image sharpening</i> ; kanan: gambar setelah melalui proses <i>image sharpening</i> (McAndrew, 2015)	39
<b>Gambar 3.5.</b>	Kiri: gambar sebelum dilakukan <i>noise removal</i> ; kanan: gambar setelah melalui proses <i>noise removal</i> (McAndrew, 2015)	40
<b>Gambar 3.6.</b>	Kiri: gambar sebelum dilakukan <i>deblurring</i> ; kanan: gambar setelah melalui proses <i>deblurring</i> (McAndrew, 2015)	40
<b>Gambar 3.7.</b>	Kiri: gambar sebelum dilakukan <i>edge detection</i> ; kanan: gambar setelah melalui proses <i>edge finding</i> (McAndrew, 2015)	41
<b>Gambar 3.8.</b>	Kiri: gambar sebelum dilakukan <i>blurring</i> ; kanan: gambar kerbau setelah melalui proses <i>blurring</i> (McAndrew, 2015)	41
<b>Gambar 3.9.</b>	Skema pengambilan gambar dengan sensor citra CCD (McAndrew, 2015)	42
<b>Gambar 3.10.</b>	Contoh <i>binary image</i> (McAndrew, 2015)	43
<b>Gambar 3.11.</b>	Contoh <i>grayscale image</i> (McAndrew, 2015)	43
<b>Gambar 3.12.</b>	Contoh <i>true color image</i> (McAndrew, 2015)	44
<b>Gambar 3.13.</b>	Contoh <i>indexed image</i> (McAndrew, 2015)	44
<b>Gambar 3.14.</b>	Algoritma <i>image processing</i> pada penelitian aliran dua fasa (Okto dkk., 2016)	45
<b>Gambar 4.1.</b>	Skema aparatus penelitian	48
<b>Gambar 4.2.</b>	<i>Wiring</i> komponen elektronik aparatus penelitian	48
<b>Gambar 4.3.</b>	Tangki fluida uji cair	49
<b>Gambar 4.4.</b>	Tabung nitrogen	50
<b>Gambar 4.5.</b>	Regulator tabung nitrogen	50
<b>Gambar 4.6.</b>	Penyaring cairan	51
<b>Gambar 4.7.</b>	<i>Double needle valve</i>	51

<b>Gambar 4.8.</b>	<i>Gas flowmeter</i>	52
<b>Gambar 4.9.</b>	<i>Microfluidic chip</i>	52
<b>Gambar 4.10.</b>	<i>High speed camera</i>	53
<b>Gambar 4.11.</b>	Gelas ukur	53
<b>Gambar 4.12.</b>	<i>Precision balance</i>	54
<b>Gambar 4.13.</b>	<i>Differential Pressure Transducer</i>	54
<b>Gambar 4.14.</b>	<i>Data logger</i>	55
<b>Gambar 4.15.</b>	<i>Laptop</i>	55
<b>Gambar 4.16.</b>	<i>Power supply</i>	56
<b>Gambar 4.17.</b>	Lampu LED	56
<b>Gambar 4.18.</b>	<i>Magnetic stirrer</i>	57
<b>Gambar 4.19.</b>	<i>Stopwatch</i>	57
<b>Gambar 4.20.</b>	Diagram alir penelitian	58
<b>Gambar 5.1.</b>	Pola aliran <i>slug</i> pada aliran nitrogen-akuades pada bagian <i>upstream microchannel</i> pada $j_G = 1,56$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,05 m/s; (b) 0,1 m/s; (c) 0,5 m/s; dan (d) 1 m/s	65
<b>Gambar 5.2.</b>	Pola aliran <i>slug</i> pada aliran nitrogen-akuades pada bagian <i>downstream microchannel</i> pada $j_G = 1,56$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,05 m/s; (b) 0,1 m/s; (c) 0,5 m/s; dan (d) 1 m/s	65
<b>Gambar 5.3.</b>	Pola aliran <i>churn</i> pada aliran nitrogen-akuades pada bagian <i>upstream microchannel</i> pada $j_G = 7,81$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,5 m/s dan (b) 1 m/s	66
<b>Gambar 5.4.</b>	Pola aliran <i>churn</i> pada aliran nitrogen-akuades pada bagian <i>downstream microchannel</i> pada $j_G = 7,81$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,5 m/s dan (b) 1 m/s	67
<b>Gambar 5.5.</b>	Pola aliran <i>slug-annular</i> pada aliran nitrogen-akuades pada bagian <i>downstream microchannel</i> pada $j_G = 7,81$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,05 m/s dan (b) 0,1 m/s	67

<b>Gambar 5.6.</b>	Pola aliran <i>slug-annular</i> pada aliran nitrogen-akuades pada bagian <i>upstream microchannel</i> pada $j_G = 7,81$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,05 m/s dan (b) 0,1 m/s	67
<b>Gambar 5.7.</b>	Pola aliran <i>slug</i> pada aliran nitrogen-CMC 0,4% pada bagian <i>downstream microchannel</i> pada $j_G = 1,56$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,05 m/s; (b) 0,1 m/s; (c) 0,5 m/s; dan (d) 1 m/s	69
<b>Gambar 5.8.</b>	Pola aliran <i>slug</i> pada aliran nitrogen-CMC 0,4% pada bagian <i>upstream microchannel</i> pada $j_G = 1,56$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,05 m/s; (b) 0,1 m/s; (c) 0,5 m/s; dan (d) 1 m/s	69
<b>Gambar 5.9.</b>	Pola aliran <i>slug-annular</i> pada aliran nitrogen-CMC 0,4% pada bagian <i>upstream microchannel</i> pada $j_G = 7,81$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,05 m/s dan (b) 0,1 m/s	70
<b>Gambar 5.10.</b>	Pola aliran <i>slug-annular</i> pada aliran nitrogen-CMC 0,4% pada bagian <i>downstream microchannel</i> pada $j_G = 7,81$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,05 m/s dan (b) 0,1 m/s	70
<b>Gambar 5.11.</b>	Pola aliran <i>churn</i> pada aliran nitrogen-CMC 0,4% pada bagian <i>upstream microchannel</i> pada $j_G = 7,81$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,5 m/s dan (b) 1 m/s	70
<b>Gambar 5.12.</b>	Pola aliran <i>churn</i> pada aliran nitrogen-CMC 0,4% pada bagian <i>downstream microchannel</i> pada $j_G = 7,81$ m/s dengan variasi $j_L$ , (a) 0,5 m/s dan (b) 1 m/s	70
<b>Gambar 5.13.</b>	Peta pola aliran dua fasa nitrogen-akuades pada bagian <i>upstream microchannel</i>	71
<b>Gambar 5.14.</b>	Peta pola aliran dua fasa nitrogen-akuades pada bagian <i>downstream microchannel</i>	71
<b>Gambar 5.15.</b>	Peta pola aliran dua fasa nitrogen-CMC 0,4% pada bagian <i>upstream microchannel</i>	72
<b>Gambar 5.16.</b>	Peta pola aliran dua fasa nitrogen-CMC 0,4% pada bagian <i>downstream microchannel</i>	72
<b>Gambar 5.17.</b>	Perbandingan aliran <i>slug</i> pada fluida uji dengan kondisi $j_G = 1,56$ m/s dan $j_L = 0,5$ m/s pada: (a) akuades dan (b) CMC 0,4%	73
<b>Gambar 5.18.</b>	Perbandingan peta pola aliran dua fasa nitrogen-akuades dengan Penelitian Chung dan Kawaji (2004) Penampang Sirkular $D_h = 0,25$ mm	74



<b>Gambar 5.19.</b>	Perbandingan peta pola aliran dua fasa nitrogen-akuades dengan penelitian Zhang (2011) Penampang Sirkular $D_h = 0,916$ mm	75
<b>Gambar 5.20.</b>	Perbandingan peta pola aliran dua fasa nitrogen-akuades dengan penelitian Madani (2022) Penampang Sirkular $D_h = 0,8$ mm	76
<b>Gambar 5.21.</b>	Perbandingan peta pola aliran dua fasa nitrogen-akuades dengan penelitian Zhang (2011) Penampang Sirkular $D_h = 0,496$ mm	77
<b>Gambar 5.22.</b>	Perbandingan peta pola aliran dua fasa nitrogen-CMC 0,4% dengan penelitian Yang (2010) Penampang Sirkular $D_h = 2,5$ mm	78
<b>Gambar 5.23.</b>	Perbandingan $L_G$ terhadap $j_L$ pada kondisi $j_G = 1,56$ m/s pada bagian <i>upstream</i> dan <i>downstream microchannel</i>	79
<b>Gambar 5.24.</b>	Visualisasi pengaruh peningkatan $j_L$ terhadap panjang <i>slug</i> saat $j_G$ 1,56 m/s pada fluida uji: (a) akuades dan (b) CMC 0,4%	80
<b>Gambar 5.25.</b>	Visualisasi perbandingan panjang <i>slug</i> pada fluida uji: (a) akuades dan (b) CMC 0,4%	80
<b>Gambar 5.26.</b>	Grafik $u_G$ terhadap $j_L$ fluida uji CMC 0,4% dan akuades pada kondisi $j_G = 1,56$ m/s	81
<b>Gambar 5.27.</b>	Grafik distribusi tekanan pada aliran satu fasa akuades pada <i>microchannel</i> dengan perubahan luas penampang pada kondisi $j_L = 1$ m/s	83
<b>Gambar 5.28.</b>	Grafik <i>pressure drop</i> terhadap peningkatan $j_L$ yang terjadi pada bagian <i>upstream microchannel</i>	84
<b>Gambar 5.39.</b>	Grafik <i>pressure drop</i> terhadap peningkatan $j_L$ yang terjadi pada bagian <i>downstream microchannel</i>	84
<b>Gambar 5.30.</b>	Grafik <i>pressure drop</i> terhadap peningkatan $j_L$ yang terjadi pada bagian perubahan luas penampang <i>microchannel</i>	85

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b>	Variasi sifat fisik fluida dan aliran (Mandhane dkk., 1974)	7
<b>Tabel 2.2.</b>	Rangkuman Penelitian Pola Aliran Dua Fasa pada Saluran Mikro (Revellin & Thome, 2006)	9
<b>Tabel 2.3.</b>	Properti cairan uji (Mansour dkk., 2015)	16
<b>Tabel 2.4.</b>	Properti fluida kerja pada penelitian (Feng & Zhang, 2021)	17
<b>Tabel 2.5.</b>	Properti cairan kerja (Kawahara dkk., 2015)	21
<b>Tabel 2.6.</b>	Variasi fluks volumetrik fasa cair dan gas pada kedua <i>channel</i> (Kawahara dkk., 2015)	22
<b>Tabel 2.7.</b>	Sifat fisik cairan kerja (Toshimitsu dkk., 2021)	25
<b>Tabel 2.8.</b>	Variasi kecepatan superfisial aliran dua fasa (Toshimitsu dkk., 2021)	26
<b>Tabel 3.1.</b>	Nilai Konstanta Chisholm dan Laird	38
<b>Tabel 4.1.</b>	Properti fluida uji penelitian	47
<b>Tabel 4.2.</b>	Matriks variasi $j_G$ dan $j_L$ dalam pengambilan data	62
<b>Tabel 5.1.</b>	Persebaran pola aliran dua fasa nitrogen-akuades pada bagian <i>upstream microchannel</i>	64
<b>Tabel 5.2.</b>	Persebaran pola aliran dua fasa nitrogen-akuades pada bagian <i>downstream microchannel</i>	64
<b>Tabel 5.3.</b>	Persebaran pola aliran dua fasa nitrogen-CMC 0,4% pada bagian <i>upstream microchannel</i>	68
<b>Tabel 5.4.</b>	Persebaran pola aliran dua fasa nitrogen-CMC 0,4% pada bagian <i>downstream microchannel</i>	68

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

### Huruf Latin

$A$	: luas penampang ( $\text{m}^2$ )
$a$	: panjang sisi saluran (m)
$CMC$	: <i>Carboxymethyl cellulose</i>
$D$	: diameter (m)
$DPT$	: <i>Differential Pressure Transducer</i>
$F$	: <i>sample rate (frame/second)</i>
$f$	: nomor <i>frame</i>
$G$	: fluks massa ( $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ )
$j$	: kecepatan superfisial fluida (m/s)
$K$	: <i>consistency coefficient</i> ( $\text{Pa s}^n$ )
$\dot{m}$	: laju aliran massa ( $\text{kg/s}$ )
$n$	: <i>flow index</i>
$P$	: tekanan (Pa atau $\text{N}/\text{m}^2$ )
$U$	: kecepatan aktual fluida (m/s)
$V$	: tegangan (V)
$w$	: lebar saluran (m)
$X$	: Parameter Lockhart-Martinelli
$x$	: kualitas massa
$Y$	: koordinat sumbu y (piksel)
$Q$	: debit aliran ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Ca$	: <i>Capillary Number</i>
$Re$	: <i>Reynolds Number</i>
$We$	: <i>Weber Number</i>

### Huruf Yunani

$\alpha$	: fraksi hampa
$\Delta$	: delta (selisih)
$\mu$	: viskositas dinamis (kg/ms)
$\rho$	: massa jenis (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	: tegangan permukaan (N/m)
$\tau$	: tegangan geser (N/m)
$\dot{\gamma}$	: <i>shear rate</i> (m/s)
$\lambda$	: faktor pengali gesekan aliran satu fasa
$\emptyset$	: faktor pengali gesekan aliran dua fasa

### Subscripts

C	: <i>contraction</i>
D	: <i>downstream</i>
G	: fluida gas
H	: hidrolik
L	: fluida cair
S	: <i>slug</i>
U	: <i>upstream</i>
0	: <i>zero shear stress</i>
$\infty$	: <i>infinite shear stress</i>