

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
NASKAH SOAL	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xx
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xxi
INTISARI	xxiii
<i>ABSTRACT</i>	xxiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.1. Batasan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Penelitian Aliran Dua Fasa pada Saluran Konvensional Berskala Makro ..	8
2.2 Penelitian Aliran Dua Fasa pada <i>Microchannel</i>	12
2.3 Penelitian Aliran Dua Fasa <i>Non-Newtonian</i> pada <i>Microchannel</i>	19

2.4	Penelitian Aliran Dua Fasa pada <i>Microchannel</i> dengan Perubahan Luas Penampang	26
BAB 3 LANDASAN TEORI		31
3.1	Fluida <i>Newtonian</i> dan <i>Non-Newtonian</i>	31
3.1.1	<i>Bingham Plastic</i>	32
3.1.2	<i>Shear Thinning Fluid</i>	33
3.1.3	<i>Shear Thickening Fluid</i>	33
3.2	Pola Aliran Dua Fasa Saluran Horizontal.....	34
3.3	Parameter Perhitungan Aliran Dua Fasa.....	36
3.3.1	Kecepatan Superfisial dan Kecepatan Aktual.....	36
3.3.2	Diameter Hidrolik.....	37
3.3.3	Bilangan <i>Reynolds</i>	37
3.3.4	Bilangan <i>Capillary</i>	38
3.3.5	Bilangan <i>Weber</i>	38
3.3.6	<i>Void Fraction</i> (Fraksi Hampa)	39
3.3.7	Fluks Massa.....	39
3.3.8	Bilangan <i>Bond</i>	40
3.3.9	<i>Pressure Drop</i>	40
3.3.10	<i>Pressure Drop</i> akibat Perubahan Luas Penampang Mendadak	41
3.3.11	Panjang <i>Slug</i>	43
3.4	<i>Image processing</i> dalam Akuisisi Data	44
3.4.1	Prosedur <i>Image Processing</i>	44
3.4.2	Jenis Digital <i>Image</i>	48
3.4.3	Proses <i>Image Processing</i> pada Investigasi Aliran Dua Fasa	50
BAB 4 METODOLOGI PENELITIAN		53

4.1	Lokasi Penelitian	53
4.2	Bahan Penelitian.....	53
4.3	Aparatus Penelitian.....	54
4.3.1	Skema Alat Penelitian	54
4.3.2	Alat Penelitian	55
4.4	Prosedur Penelitian.....	64
4.4.1	Diagram Alir Penelitian	64
4.4.2	Tahapan Persiapan Penelitian	66
4.4.3	Tahapan Pengambilan Data	67
4.4.4	Variabel Penelitian	69
4.4.5	Prosedur Pengolahan Data dan Analisis Hasil Penelitan.....	69
BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN		70
5.1	Desain <i>Microchannel</i> dengan Perubahan Luas Penampang	70
5.2	Distribusi Tekanan dan <i>Pressure Drop</i> pada <i>Microchannel</i> dengan Perubahan Luas Penampang	72
5.2.1	Distribusi Tekanan Aliran Satu Fasa pada <i>Microchannel</i> dengan Perubahan Luas Penampang	73
5.3	<i>Pressure drop</i> Aliran Dua Fasa pada <i>Microchannel</i> dengan Perubahan Luas Penampang.....	75
5.4	Pola Aliran Dua Fasa <i>Square Microchannel</i> dengan Perubahan Luas Penampang	78
5.4.1	Pola Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada <i>Square Microchannel</i> dengan Perubahan Luas Penampang.	79
5.4.2	Pola Aliran Dua Fasa CMC 0,2% - Nitrogen pada <i>Square Microchannel</i> dengan Perubahan Luas Penampang.	86
5.5	Peta Pola Aliran Dua Fasa	91

5.5.1	Peta Pola Aliran Dua Fasa Air – Nitrogen.....	92
5.5.2	Peta Pola Aliran Dua Fasa CMC 0,2% – Nitrogen	94
5.5.3	Perbandingan Peta Pola Aliran Dua Fasa Air – Nitrogen.....	95
5.5.4	Perbandingan Peta Pola Aliran Dua Fasa CMC 0,2% – Nitrogen	98
5.6	Analisis Karakteristik <i>Slug</i> pada Aliran Dua Fasa	100
5.6.1	Panjang <i>Slug</i>	101
5.6.2	Kecepatan <i>Slug</i> pada Aliran Dua Fasa	103
BAB 6 PENUTUP.....		105
6.1	Kesimpulan	105
6.2	Saran	107
DAFTAR PUSTAKA		109

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Rezim Aliran pada Saluran Horizontal (Rouhani & Sohal, 1983)....	8
Gambar 2.2. Peta Rezim Aliran Dua Fasa pada Saluran Horizontal atau <i>Baker's Map</i> (Baker, 1954)	9
Gambar 2.3. Diagram Transisi Pola Aliran dari <i>Stratified Flow</i> ke <i>Intermittent Flow</i> dengan Berbagai Variasi Fluida Dan Diameter Saluran. (Choe and Weisman, 1974).....	10
Gambar 2.4. Peta Pola Aliran Dua Fasa pada Saluran Horizontal (Mandhane dkk. (1974)	11
Gambar 2.5. Peta Pola Aliran Dua Fasa dalam Pipa 1,59 mm (Suo & Griffith, 1964).....	14
Gambar 2.6. Peta Pola Aliran dan Transisi Pola Aliran pada Saluran Semi-Triangular dengan Diameter Hidrolik 1,09 (Triplett, 1999).....	15
Gambar 2.7. Pola Aliran pada <i>Microchannel</i> dengan Geometri <i>Circular</i> (Coleman & Garimella,1999)	16
Gambar 2.8. Pola Transisi Aliran pada <i>Microchannel</i> dengan Geometri <i>Circular</i> (Coleman & Garimella,1999)	17
Gambar 2.9. Peta Pola Aliran Air-Udara dan R-134a Dua Fasa pada Pipa Berukuran 3 mm (Yang & Shieh, 2001)	18
Gambar 2.10. Pola Aliran Dua Fasa pada Saluran <i>Circular</i> 100 μm (Serizawa dkk., 2002).....	19
Gambar 2.11. Peta Pola Aliran dari Fluida Kerja Berbeda pada <i>Square Microchannel</i> (Yang dkk.,2010).....	21
Gambar 2.12. Perbedaan Pola Aliran pada <i>Circular Channel</i> dengan Diameter 302 μm dan 496 μm (Zhang dkk.,2011).....	22
Gambar 2.13. Peta Pola Aliran Dua Fasa Fluida Kerja CMC dengan Berbagai Konsentrasi (Zhang dkk., 2011).....	22
Gambar 2.14. Skema Apparatus Penelitian (Feng & Zhang dkk., 2021).....	23

Gambar 2.15. Perbandingan Visualisasi Pola Aliran Dua Fasa Nitrogen-CMC 0,2% dengan Nitrogen-Air Deionisasi (Feng & Zhang dkk., 2021)	24
Gambar 2.16. Peta Pola Aliran Dua Fasa dengan Fluida Kerja yang Berbeda: (a) Air, (b) CMC 0,1%, (c) CMC 0,2%, (d) CMC 0,3% (Feng & Zhang, 2021).....	25
Gambar 2.17. Diagram Gradien <i>Pressure drop</i> terhadap Kecepatan Superfisial Gas Dengan Pola Aliran yang Berbeda (Feng & Zhang dkk., 2021)....	25
Gambar 2.18. Visualisasi Pola Aliran <i>Intermittent Bubbly Flow</i> pada Fluida Nitrogen-Etanol pada <i>Microchannel</i> dengan $\sigma_A = 0,51$ pada kondisi $J_{Ld} = 0,26$ m/s dan $J_{Gd} = 0.48$ m/s (Kawahara dkk., 2015)	28
Gambar 2.19. Visualisasi <i>Intermittent Bubbly Flow</i> pada Fluida Nitrogen-HFE pada <i>Microchannel</i> dengan $\sigma_A = 0,35$ (Kawahara dkk., 2015)	28
Gambar 2.20. Distribusi Tekanan Aliran Satu Fasa dan Dua Fasa Nitrogen – HFE-7200 pada <i>Microchannel</i> $\sigma_A = 0,51$ dan 0,35 (Kawahara dkk., 2015)	29
Gambar 2.21. <i>Pressure drop</i> Aliran Dua Fasa terhadap Total Fluks Volumetrik pada Bagian <i>Downstream</i> Saluran saat Melewati Perubahan Luas Penampang pada Saluran.....	30
Gambar 3.1. (a) Hubungan <i>Shear Stress</i> terhadap <i>Shear Rate</i> untuk fluida <i>Newtonian</i> dan Fluida <i>Non-Newtonian</i> , (b) Viskositas dari Fluida <i>Newtonian</i> , Fluida <i>Shear Thinning</i> , dan Fluida <i>Shear Thickening</i> terhadap <i>Shear Rate</i>	32
Gambar 3.2. Hubungan Viskositas terhadap <i>Shear Rate</i> pada Fluida <i>Xanthan Gum</i> (<i>Shear Thinning Fluid</i>) dengan berbagai konsentrasi.	33
Gambar 3.3. Diagram Transisi Pola Aliran pada <i>Horizontal flow</i> (Wong & Yau, 1997).....	35
Gambar 3.4. Contoh <i>Image Sharpening</i> (McAndrew, 2015):	45
Gambar 3.5. Contoh <i>Removing Noise</i> (McAndrew, 2015).....	46
Gambar 3.6. Contoh <i>Image Deblurring</i> (McAndrew, 2015): (a) Sebelum Proses <i>Image Deblurring</i> (b) Setelah Proses <i>Image Deblurring</i>	46

Gambar 3.7. Contoh <i>Edges Detection</i> (McAndrew, 2015): (a) Sebelum Proses <i>Edges Detection</i> (b) Sesudah Proses <i>Edges Detection</i>	47
Gambar 3.8. Contoh <i>Blurring</i> (McAndrew, 2015)	47
Gambar 3.9. Contoh <i>Binary Image</i> (McAndrew, 2015).....	48
Gambar 3.10. Contoh <i>Grayscale Image</i> (McAndrew, 2015)	49
Gambar 3.11. Contoh <i>True Color Image</i> (McAndrew, 2015).....	49
Gambar 3.12. Contoh <i>Indexed Color Image</i> (McAndrew, 2015)	50
Gambar 3.13. Diagram Alir Metode <i>Image Processing</i> pada Investigasi <i>Slug</i> Aliran Dua Fasa (Okto et al., 2016).....	51
Gambar 4.1. Skema Aparatus Penelitian	54
Gambar 4.2. Tangki fluida Uji Cair	55
Gambar 4.3. Tangki Fluida Uji Cair.....	56
Gambar 4.4. Regulator Tabung Fluida Gas	57
Gambar 4.5. Filter Cairan	57
Gambar 4.6. Gas <i>Flowmeter</i>	58
Gambar 4.7. <i>Double Needle Valve</i>	58
Gambar 4.8. <i>Microfluidic Chip</i>	59
Gambar 4.9. Gelas Ukur	60
Gambar 4.10. <i>High speed camera</i>	60
Gambar 4.11. <i>Precision Balance</i>	61
Gambar 4.12. <i>Data Logger</i>	61
Gambar 4.13. <i>Power Supply</i>	62
Gambar 4.14. Lampu LED	62
Gambar 4.15. <i>Magnetic Stirrer</i>	63
Gambar 4.16. <i>Differential Pressure Transducer</i>	63
Gambar 4.17. <i>Stopwatch</i>	64
Gambar 4.18. Laptop.....	64
Gambar 4.19. Diagram Alir Penelitian.....	65
Gambar 5.1. Desain 3 Dimensi <i>Microchannel</i> dengan Perubahan luas penampang	71

Gambar 5.2. Distribusi Tekanan Aliran Satu Fasa Air pada <i>Microchannel</i> dengan Perubahan Luas Penampang ($J_L = 1$ m/s).....	74
Gambar 5.3. Distribusi Tekanan Aliran Satu Fasa CMC 0,2% pada <i>Microchannel</i> dengan Perubahan Luas Penampang ($J_L = 1$ m/s).....	74
Gambar 5.4. Hubungan <i>Pressure Drop</i> terhadap peningkatan Nilai J_L pada Bagian <i>Upstream</i> Saluran <i>Microchannel</i>	76
Gambar 5.5. Hubungan <i>Pressure Drop</i> terhadap peningkatan Nilai J_L pada Bagian <i>Downstream</i> Saluran <i>Microchannel</i>	76
Gambar 5.6. Hubungan <i>Pressure Drop</i> terhadap peningkatan Nilai J_L pada Bagian Perubahan Luas Penampang Saluran <i>Microchannel</i>	78
Gambar 5.7. Pola Aliran <i>Slug</i> pada Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada <i>Upstream Microchannel</i> dengan $J_G = 1,56$ m/s; (a) $J_L = 0,05$ m/s (b) $J_L = 0,1$ m/s; (c) $J_L = 0,5$ m/s (d) $J_L = 1$ m/s.....	82
Gambar 5.8. Pola Aliran <i>Slug</i> pada Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada <i>Downstream Microchannel</i> ; (a) $J_L = 0,05$ m/s dan $J_G = 0,26$ m/s; (b) $J_L = 0,1$ m/s dan $J_G = 0,26$ m/s; (c) $J_L = 0,5$ m/s dan $J_G = 1,56$ m/s ; (d) $J_L = 1$ m/s dan $J_G = 1,56$ m/s)	83
Gambar 5.9. Pola Aliran <i>Slug-Annular</i> pada Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada <i>Upstream Microchannel</i> ; (a) $J_L = 0,05$ m/s dan $J_G = 7,81$ m/s; (b) $J_L = 0,1$ m/s dan $J_G = 7,81$ m/s.....	84
Gambar 5.10. Pola Aliran <i>Slug-Annular</i> pada Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada <i>Downstream Microchannel</i> ; (a) $J_L = 0,05$ m/s dan $J_G = 7,81$ m/s; (b) $J_L = 0,1$ m/s dan $J_G = 7,81$ m/s.....	84
Gambar 5.11. Pola Aliran <i>Churn</i> pada Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada <i>Upstream Microchannel</i> ; (a) $J_L = 0,5$ m/s dan $J_G = 7,81$ m/s; (b) $J_L = 1$ m/s dan $J_G = 7,81$ m/s.....	85
Gambar 5.12. Pola Aliran <i>Churn</i> pada Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada <i>Downstream Microchannel</i> ; (a) $J_L = 0,5$ m/s dan $J_G = 7,81$ m/s; (b) $J_L = 1$ m/s dan $J_G = 7,81$ m/s	86

- Gambar 5.13.** Perbandingan Aliran *Slug* pada Fluida Uji dengan kondisi $J_G = 1,56$ m/s dan $J_L = 0,5$ m/s pada: (a) air – Nitrogen dan (b) CMC 0,2% - Nitrogen..... 88
- Gambar 5.14.** Pola Aliran *Slug* pada Aliran Dua Fasa CMC 0,2% - Nitrogen pada *Upstream Microchannel* ($J_G = 1,56$ m/s); (a) $J_L = 0,05$ m/s; (b) $J_L = 0,1$ m/s; (c) $J_L = 0,5$ m/s; (d) $J_L = 1$ m/s 88
- Gambar 5.15.** Pola Aliran *Elongated-Slug* pada Aliran Dua Fasa CMC 0,2% - Nitrogen pada *Downstream Microchannel* ($J_G = 1,56$ m/s); (a) $J_L = 0,05$ m/s; (b) $J_L = 0,1$ m/s; (c) $J_L = 0,5$ m/s; (d) $J_L = 1$ m/s 89
- Gambar 5.16.** Pola Aliran *Slug-Annular* pada Aliran Dua Fasa CMC 0,2% - Nitrogen pada *Upstream Microchannel* ($J_G = 7,81$ m/s); (a) $J_L = 0,05$ m/s; (b) $J_L = 0,1$ m/s 90
- Gambar 5.17.** Pola Aliran *Slug-Annular* pada Aliran Dua Fasa CMC 0,2% - Nitrogen pada *Downstream Microchannel* ($J_G = 7,81$ m/s); (a) $J_L = 0,05$ m/s; (b) $J_L = 0,1$ m/s 90
- Gambar 5.18.** Pola Aliran *Churn* pada Aliran Dua Fasa CMC 0,2% - Nitrogen pada *Upstream Microchannel* ($J_G = 7,81$ m/s); (a) $J_L = 0,5$ m/s; (b) $J_L = 1$ m/s 90
- Gambar 5.19.** Pola Aliran *Churn* pada Aliran Dua Fasa CMC 0,2% - Nitrogen pada *Downstream Microchannel* ($J_G = 7,81$ m/s); (a) $J_L = 0,5$ m/s; (b) $J_L = 1$ m/s 91
- Gambar 5.20.** Peta Pola Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada Bagian *Upstream Microchannel* 92
- Gambar 5.21.** Peta Pola Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada Bagian *Downstream Microchannel* 92
- Gambar 5.22.** Peta Pola Aliran Dua Fasa CMC 0,2%-Nitrogen pada Bagian *Upstream Microchannel* 94
- Gambar 5.23.** Peta Pola Aliran Dua Fasa CMC 0,2%-Nitrogen pada Bagian *Downstream Microchannel* 94
- Gambar 5.24.** Perbandingan Peta Pola Aliran Dua Fasa Air – Nitrogen dengan Penelitian Zhang (2011) Penampang Sirkular $D_H = 0,916$ mm..... 96

Gambar 5.25. Perbandingan Peta Pola Aliran Dua Fasa Air – Nitrogen dengan Penelitian Feng dan Zhang (2021) Penampang Persegi $D_H = 0,3$ mm	97
Gambar 5.26. Perbandingan Peta Pola Aliran Dua Fasa Air – Nitrogen dengan Penelitian Madani (2022) Penampang Persegi $D_H = 0,8$ mm.....	98
Gambar 5.27. Perbandingan Peta Pola Aliran Dua Fasa CMC 0,2% – Nitrogen dengan Penelitian Zhang (2011) Penampang Sirkular $D_H = 0,8$ mm	99
Gambar 5.28. Perbandingan Peta Pola Aliran Dua Fasa CMC 0,2% – Nitrogen dengan Penelitian Feng dan Zhang (2021) Penampang Sirkular $D_H = 0,3$ mm.....	100
Gambar 5.29. Visualisasi Perbandingan Panjang Slug terhadap Kenaikan Nilai J_L pada: (a) air – Nitrogen dan (b) CMC 0,2% - Nitrogen	101
Gambar 5.30. Perbandingan Panjang <i>Slug</i> (L_G) terhadap J_L pada Kondisi $J_G = 1,56$ m/s pada Bagian <i>Upstream</i> dan <i>Downstream Microchannel</i>	102
Gambar 5.31. Perbandingan Kecepatan <i>Slug</i> (u_G) terhadap J_L pada Kondisi $J_G = 1,56$ m/s pada Bagian <i>Upstream</i> dan <i>Downstream Microchannel</i>	104

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Variasi Rentang Nilai Sifat Fluida Kerja (Mandhane dkk.,1974)	11
Tabel 2.2. Penelitian Aliran Dua Fasa Terdahulu (Revellin & Thone, 2006)	12
Tabel 2.3. Properti Fluida pada Penelitian Yang dkk. (2010)	20
Tabel 2.4. Properti Fluida Kerja Cair (Kawahara dkk., 2015)	26
Tabel 2.5. Variasi Fluks Volumetrik Fluida Kerja Cair dan Gas pada Rasio Kontraksi (Kawahara dkk., 2015)	27
Tabel 3.1. Nilai Konstanta Chishom dan Laird	43
Tabel 4.1. Properti Fluida Uji Penelitian.....	53
Tabel 4.2. Variasi J_G dan J_L pada penelitian.....	69
Tabel 5.1. Persebaran Pola Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada Bagian <i>Upstream</i> Saluran	80
Tabel 5.2. Persebaran Pola Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada Bagian <i>Downstream</i> Saluran.....	80
Tabel 5.3. Persebaran Pola Aliran Dua Fasa CMC 0,2%-Nitrogen pada Bagian <i>Upstream</i> Saluran	86
Tabel 5.4. Persebaran Pola Aliran Dua Fasa CMC 0,2%-Nitrogen pada Bagian <i>Downstream</i> Saluran.....	87