

DAFTAR ISI	
PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
NASKAH SOAL TUGAS AKHIR	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xx
INTISARI	xxiii
<i>ABSTRACT</i>	xxiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Aliran Dua Fasa Pada <i>Macrochannel</i>	7
2.2 Penelitian Pengaruh Gaya terhadap Diameter Saluran	9
2.3 Penelitian Pola Aliran pada <i>Microchannel</i>	12
2.4 Penelitian Pengaruh Bentuk Penampang <i>Microchannel</i>	15
2.5 Penelitian Pengaruh Ukuran Saluran pada <i>Microchannel</i>	16
2.6 Penelitian Peta Pola Aliran Dua Fasa pada <i>Microchannel</i>	17
2.7 Penelitian Aliran Dua Fasa <i>Non-Newtonian</i> dan Pengaruh Viskositas pada <i>Microchannel</i>	22
2.8 Penelitian <i>Void Fraction</i> pada <i>Microchannel</i>	27
2.9 Penelitian <i>Pressure Drop</i> pada <i>Microchannel</i>	29
BAB III LANDASAN TEORI	33
3.1 Tegangan Permukaan	33
3.2 Viskositas	34

3.3	Fluida <i>Newtonian</i> dan <i>Non-Newtonian</i>	36
3.4	Aliran Dua Fasa	38
3.5	Pola Aliran Dua Fasa pada Saluran Horizontal <i>Microchannel</i>	38
3.5.1	<i>Bubbly Flow</i>	39
3.5.2	<i>Slug Flow</i>	39
3.5.3	<i>Slug-Annular Flow</i>	40
3.5.4	<i>Annular Flow</i>	40
3.5.5	<i>Churn Flow</i>	40
3.5.6	<i>Transition Flow</i>	40
3.6	Parameter Perhitungan Aliran Dua Fasa	42
3.6.1	Fluks Massa	42
3.6.2	Kecepatan Superfisial dan Kecepatan Aktual	43
3.6.3	Diameter Hidraulik	45
3.6.4	<i>Void Fraction</i>	45
3.6.5	Bilangan Reynolds	46
3.6.6	Bilangan Weber	47
3.6.7	Bilangan Bond	48
3.6.8	Bilangan Capillary	48
3.6.9	<i>Pressure Drop</i>	49
3.6.10	Panjang <i>slug</i>	52
3.6.11	Kecepatan <i>gas slug</i>	53
3.6.12	Nilai <i>Error</i>	54
3.7	Metode <i>Image Processing</i>	54
3.7.1	Prosedur <i>Image Processing</i>	55
3.7.2	Jenis <i>Digital Image</i>	57
3.7.3	Tahapan <i>Image Processing</i> pada penelitian aliran dua fasa	60
BAB IV METODE PENELITIAN		62
4.1	Lokasi Penelitian	62
4.2	Bahan Penelitian	62
4.3	Alat Penelitian	62
4.3.1	Skema Aparatus Penelitian	62

4.3.2	Aparatus Penelitian	64
4.4	Prosedur Penelitian	75
4.4.1	Diagram Alir Penelitian	75
4.4.2	Pembuatan fluida kerja cair	75
4.4.3	Kalibrasi Instrumen	76
4.4.4	Pengambilan Data Fluida Kerja Cair	78
4.4.5	Pengolahan Data dan Analisa Hasil Penelitian	79
4.5	Variabel dan Matriks Penelitian	79
4.6	Kerangka Waktu Pelaksanaan	81
BAB V	HASIL DAN PEMBAHASAN	82
5.1	Pengambilan Data pada <i>Microchannel</i>	82
5.2	Pola Aliran Dua Fasa Air- Nitrogen pada <i>Microchannel</i>	83
5.2.1	Pola Aliran <i>Bubbly</i>	84
5.2.2	Pola Aliran <i>Slug</i>	85
5.2.3	Pola Aliran Transisi <i>Unstable Slug</i>	87
5.2.4	Pola Aliran <i>Slug-Annular</i>	88
5.2.5	Pola Aliran <i>Churn</i>	89
5.3	Peta Pola Aliran Dua Fasa Air-Nitrogen pada <i>Microchannel</i>	90
5.4	Pola Aliran Dua Fasa Fluida Cair Xanthan Gum (XG) – Nitrogen pada <i>Microchannel</i>	95
5.5	Peta Pola Aliran Dua Fasa Xanthan Gum (XG) – Nitrogen pada <i>Mirochannel</i>	99
5.6	Proses Pembentukan <i>Slug</i>	105
5.7	<i>Void Fraction</i> pada Aliran Dua Fasa <i>Newtonian</i> dan <i>Non-Newtonian</i> pada <i>Microchannel</i>	110
5.8	<i>Pressure Drop</i> pada <i>Microchannel</i>	112
5.9	Pengembangan Konstanta Korelasi (C)	118
BAB VI	PENUTUP	124
6.1	Kesimpulan	124
6.2	Saran	128
DAFTAR PUSTAKA		130

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Pola aliran yang ditemukan Baker (1954)	7
Gambar 2. 2	Peta Pola Aliran Baker (1954)	8
Gambar 2. 3	Perbandingan peta pola aliran oleh Mandhane <i>et al.</i> (1974). EB, <i>Elongated Bubble Flow</i> ; ST <i>Stratified Flow</i> ; W <i>Wave Flow</i> ; S <i>Slug Flow</i> ; AM <i>Annular Mist Flow</i> ; DB <i>Dispersed Bubble Flow</i> .	9
Gambar 2. 4	Gaya yang terbentuk pada saluran dengan variasi diameter saluran (Kandlikar, 2010)	10
Gambar 2. 5	Pola aliran yang ditemukan oleh Tabatabai & Faghri (2001)	11
Gambar 2. 6	Peta pola aliran yang ditemukan oleh Tabatabai & Faghri (2001)	11
Gambar 2. 7	Kedua jenis <i>bubble</i> pada <i>dispersed bubbly</i> (Feng & Serizawa. 2001)	14
Gambar 2. 8	<i>Slug flow</i> (Feng & Serizawa. 2001)	14
Gambar 2. 9	<i>liquid ring flow</i> dan <i>liquid lump flow</i> (Serizawa et.al 2002)	15
Gambar 2. 10	Perbandingan Diameter Hidraulik terhadap Peta Pola Aliran pada <i>Microchannel</i> (Zhang <i>et al.</i> , 2011)	17
Gambar 2. 11	Perbandingan peta pola aliran Hassan <i>et al.</i> (2005) dengan Damianides (1987).	19
Gambar 2. 12	Perbandingan peta pola aliran Hassan <i>et al.</i> (2005) dengan Ekberg (1997).	19
Gambar 2. 13	Perbandingan peta pola aliran <i>horizontal microchannel</i> pada penelitian-penelitian terdahulu [Damianides, Fukano, Triplett, Kawahara, Pehlivan]	20
Gambar 2. 14	<i>Universal map horizontal microchannels</i> (Hassan <i>et al.</i> 2005)	21
Gambar 2. 15	Perbandingan <i>Universal map horizontal microchannels</i> (Hassan <i>et al.</i> 2005) dengan peta pola aliran Triplett <i>et al.</i> (1999)	21
Gambar 2. 16	Perbandingan <i>Universal map horizontal microchannels</i> (Hassan <i>et al.</i> 2005) dengan peta pola aliran Kawahara <i>et al.</i> (2002)	22

Gambar 2. 17	Skema penelitian <i>microchannel</i> oleh Feng & Zhang (2021)	23
Gambar 2. 18	<i>Slug flow</i> dari (a) air, (b) CMC 0,1%, (c) CMC 0,2%, (d) CMC 0,3% dengan j_G , j_L sama (Feng & Zhang, 2021)	24
Gambar 2. 19	<i>Churn flow</i> dari (a) air, (b) CMC 0,1%, (c) CMC 0,2%, (d) CMC 0,3% dengan j_G , j_L sama (Feng & Zhang, 2021)	24
Gambar 2. 20	Pola aliran (a,c,e,g,i) nitrogen-air dan (b,d,f,h,j) nitrogen-CMC 0,2% (Feng & Zhang, 2021)	24
Gambar 2. 21	Peta pola aliran untuk (a) air, (b) CMC 0.1%, (c) CMC 0.2%, (d) CMC 0.3% (Feng & Zhang, 2021)	25
Gambar 2. 22	Perbandingan Viskositas terhadap Peta Pola Aliran pada <i>Microchannel</i> (Zhang <i>et al.</i> , 2011)	26
Gambar 2. 23	Pembagian pola aliran berdasarkan nilai <i>gas volumetric ratio</i> (β) (Serizawa <i>et al.</i> , 2002)	27
Gambar 2. 24	Representasi perhitungan <i>void fraction</i> (Kawahara <i>et al.</i> 2002)	28
Gambar 2. 25	Perbandingan <i>void fraction</i> (Santos <i>et al.</i> , 2010)	29
Gambar 2. 26	Karakteristik viskositas beberapa cairan <i>non-newtonian</i>	30
Gambar 2. 27	Hubungan <i>pressure drop</i> terhadap J_G pada beberapa cairan (Kawahara <i>et al.</i> 2020)	31
Gambar 2. 28	Perbandingan nilai <i>pressure drop</i> eksperimen dan teoritis dengan model Lockhart-Martinelli dengan perbedaan 4 perbedaan nilai koefisien <i>two-phase friction multiplier correlation</i> (Kawahara <i>et al.</i> 2020)	32
Gambar 3. 1	Fenomena kapilaritas adalah efek dari tegangan permukaan. (a) adhesi; (b) kohesi	34
Gambar 3. 2	(a) Deformasi pada material padat (biru) di antara dua pelat; (b) gaya yang terbentuk pada dinding pelat atas.	35
Gambar 3. 3	Fenomena <i>shearing stress</i> pada fluida.	35
Gambar 3. 4	<i>Shearing stress</i> dibanding dengan <i>rate of shearing strain</i> pada fluida <i>Newtonian</i> pada suhu tertentu	36

Gambar 3. 5	Perbedaan karakteristik <i>shearing stress</i> terhadap <i>rate of shearing strain</i> pada beberapa jenis fluida.	37
Gambar 3. 6	Perbandingan penamaan pola aliran (a) pada <i>minichannel</i> (b) <i>microchannel</i> (Kawaji & Chung, 2004)	42
Gambar 3. 7	Pola Aliran pada <i>microchannel</i> . (a) <i>bubby</i> ; (b) <i>slug</i> ; (c) <i>slug-bubby</i> ; (d) <i>unstable slug flow</i> ; (e) <i>slug-annular</i> ; (f) <i>annular</i> ; (g) <i>wavy-annular</i> ; (h) <i>churn</i> (Zhang <i>et al.</i> , 2011)	41
Gambar 3. 8	Contoh <i>Image Sharpening</i> sebelum (kiri) dan sesudah (kanan)	55
Gambar 3. 9	Contoh <i>removing noise</i> sebelum (kiri) dan sesudah (kanan)	56
Gambar 3. 10	Contoh <i>image deblurring</i> sebelum (kiri) dan sesudah (kanan)	56
Gambar 3. 11	Contoh <i>Finding Edges</i> sebelum (kiri) dan sesudah (kanan)	57
Gambar 3. 12	Contoh <i>binary image</i>	57
Gambar 3. 13	Contoh <i>grayscale image</i>	58
Gambar 3. 14	Contoh <i>True Color Image</i>	59
Gambar 3. 15	Contoh <i>Indexed Color Image</i>	59
Gambar 4. 1	Skema Aparatus Penelitian	63
Gambar 4. 2	Tangki Fluida Kerja Cair	64
Gambar 4. 3	Tabung Nitrogen	65
Gambar 4. 4	Regulator Tabung Nitrogen	66
Gambar 4. 5	<i>Blind Flange</i>	66
Gambar 4. 6	<i>Double Needle Valve</i>	67
Gambar 4. 7	<i>Nitrogen Gas Flowmeter</i>	68
Gambar 4. 8	<i>Microfluidic Chip (T-Junction)</i>	68
Gambar 4. 9	<i>High Speed Camera</i> Phantom Miro S310	69
Gambar 4. 10	Sony A6300 <i>Mirrorless Camera</i>	69
Gambar 4. 11	Lampu LED	70
Gambar 4. 12	Timbangan Sartorius	71
Gambar 4. 13	Gelas Ukur 500 ml	71
Gambar 4. 14	<i>Magnetic Stirrer</i>	72
Gambar 4. 15	<i>Thermocouple</i> tipe T	72
Gambar 4. 16	P55D DPT	73

Gambar 4. 17	Advantech <i>Data Logger</i>	73
Gambar 4. 18	INI cDAQ-9174 <i>data acquisition</i>	74
Gambar 4. 19	pengambilan data oleh komputer	74
Gambar 4. 20	Diagram Alir Penelitian	75
Gambar 5. 1	Pola aliran <i>bubbly</i> pada aliran Air-Nitrogen pada $jL = 1 \text{ m/s}$ dan $jG = 0,26 \text{ m/s}$	85
Gambar 5. 2	Fenomena tarik menarik antar 2 jenis <i>bubble</i> dan bergabung sehingga membentuk <i>bubble</i> yang lebih besar	85
Gambar 5. 3	Pola Aliran <i>Slug</i> pada Air-Nitrogen; (a) $jL = 1 \text{ m/s}$ dan $jG = 1,56 \text{ m/s}$; (b) $jL = 0,5 \text{ m/s}$ dan $jG = 0,26 \text{ m/s}$; dan (c) $jL = 0,1 \text{ m/s}$ dan $jG = 0,26 \text{ m/s}$; (d) $jL = 0,1 \text{ m/s}$ dan $jG = 1,56 \text{ m/s}$;	86
Gambar 5. 4	Pola Aliran <i>Unstable Slug</i> , perubahan <i>slug-annular</i> menjadi <i>slug</i> pada aliran Air-Nitrogen pada $jL = 0,1 \text{ m/s}$ dan $jG = 1,56 \text{ m/s}$.	87
Gambar 5. 5	Pola Aliran <i>Unstable Slug</i> , perubahan <i>Slug</i> menjadi <i>Slug-Annular</i> pada aliran Air-Nitrogen pada $jL = 0,5 \text{ m/s}$ dan $jG = 1,56 \text{ m/s}$.	88
Gambar 5. 6	Pola Aliran <i>Slug-Annular</i> pada aliran Air-Nitrogen pada (a) $jL = 0,1 \text{ m/s}$ dan $jG = 1,56 \text{ m/s}$; (b) $jL = 0,1 \text{ m/s}$ dan $jG = 7,81 \text{ m/s}$.	89
Gambar 5. 7	Pola Aliran <i>Churn</i> pada aliran Air-Nitrogen pada (a) $jL = 0,5 \text{ m/s}$ dan $jG = 7,81 \text{ m/s}$; (b) $jL = 1 \text{ m/s}$ dan $jG = 7,81 \text{ m/s}$.	89
Gambar 5. 8	Peta Pola Aliran Air-Nitrogen pada penelitian ini	91
Gambar 5. 9	Perbandingan peta pola aliran pada penelitian ini dan penelitian Triplett <i>et al.</i> (1999)	91
Gambar 5. 10	Perbandingan pola aliran pada penelitian ini dengan penelitian Hassan <i>et al.</i> (2005)	92
Gambar 5. 11	Perbandingan peta pola aliran penelitian ini dan penelitian Feng & Zhang (2021)	94

Gambar 5. 12	Pola Aliran <i>Slug</i> pada Aliran Nitrogen - XG 0,2 % pada; (a) $jL = 0,05 \text{ m/s}$ dan $jG = 0,26 \text{ m/s}$; (b) $jL = 0,3 \text{ m/s}$ dan $jG = 0,26 \text{ m/s}$ (c) $jL = 0,1 \text{ m/s}$ dan $jG = 1,56 \text{ m/s}$; (d) $jL = 0,5 \text{ m/s}$ dan $jG = 1,56 \text{ m/s}$	96
Gambar 5. 13	Pola Aliran <i>Slug-Bubbly</i> pada Aliran Nitrogen- XG 0,2% pada $jL = 0,8 \text{ m/s}$ dan $jG = 1,56 \text{ m/s}$	97
Gambar 5. 14	Pola Aliran <i>Slug-Annular</i> pada Aliran Nitrogen - XG 0,2 % pada; (a) $jL = 0,05 \text{ m/s}$ dan $jG = 7,81 \text{ m/s}$; (b) $JL = 0,1 \text{ m/s}$ dan $JG = 7,81 \text{ m/s}$	97
Gambar 5. 15	Pola Aliran <i>Churn</i> pada Aliran Nitrogen - XG 0,2 % pada; (a) $jL = 0,5 \text{ m/s}$ dan $jG = 7,81 \text{ m/s}$; (b) $jL = 1 \text{ m/s}$ dan $jG = 7,81 \text{ m/s}$	98
Gambar 5. 16	Perbandingan Pola Aliran <i>Slug</i> pada $JL = 0.1 \text{ m/s}$ dan $JG = 1.56 \text{ m/s}$ pada; (a) Air; (b) XG 0.1%; (c) XG 0.2%	99
Gambar 5. 17	Peta Pola Aliran Nitrogen-XG 0,2% pada penelitian ini	100
Gambar 5. 18	Peta Pola Aliran Nitrogen-XG 0,1% pada penelitian ini	100
Gambar 5. 19	Perbandingan Peta Pola Aliran pada Nitrogen-XG 0,2% dengan Peta Pola Aliran Zhang <i>et al.</i> (2011)	101
Gambar 5. 20	Perbandingan Peta Pola Aliran Nitrogen-XG 0,2% dengan Peta Pola Aliran Feng & Zhang (2021)	103
Gambar 5. 21	Perbandingan Peta Pola Aliran Nitrogen-XG 0,1% dengan Peta Pola Aliran Zhang <i>et al.</i> (2011)	104
Gambar 5. 22	Perbandingan Peta Pola Aliran Nitrogen-XG 0,1% dengan Peta Pola Aliran Feng & Zhang (2021)	104
Gambar 5. 23	<i>Breaking Slug Formation</i> (Santos & Kawaji, 2010)	105
Gambar 5. 24	Proses Pembentukan <i>Slug</i> pada Aliran Air-Nitrogen	106
Gambar 5. 25	Proses Pembentukan <i>Slug</i> pada Aliran XG 0.2%-Nitrogen	106
Gambar 5. 26	Proses Pembentukan <i>Slug</i> pada Aliran XG 0.1%-Nitrogen	106
Gambar 5. 27	Profil kecepatan fluida pada aliran dalam pipa	107
Gambar 5. 28	<i>Effective Viscosity</i> pada masing-masing cairan pada $Q_G = 60 \text{ cm}^3/\text{menit}$ atau $jG = 1,56 \text{ m/s}$	108

Gambar 5. 29	Perbandingan Panjang <i>Gas Slug</i> terhadap jL pada masing-masing cairan pada $Q_G = 60 \text{ cm}^3/\text{menit}$ atau $jG = 1,56 \text{ m/s}$	108
Gambar 5. 30	Perbandingan Panjang <i>Liquid Slug</i> terhadap jL pada masing-masing cairan pada $Q_G = 60 \text{ cm}^3/\text{menit}$ atau $jG = 1,56 \text{ m/s}$	109
Gambar 5. 31	Perbandingan kecepatan <i>Gas Slug</i> terhadap jL pada masing-masing cairan pada $Q_G = 60 \text{ cm}^3/\text{menit}$ atau $jG = 1,56 \text{ m/s}$	110
Gambar 5. 32	Perbandingan <i>Void Fraction</i> (α) terhadap <i>Homogenous Void Fraction Model</i> (β)	111
Gambar 5. 33	Hasil Kalibrasi <i>Differential Pressure Transducer</i> (DPT) dengan larutan XG 0.2% pada; (a) DPT 00; (b) DPT 01; (c) DPT 02	113
Gambar 5. 34	<i>Pressure Drop Gradient</i> pada Aliran Nitrogen-Air pada <i>Microchannel</i>	115
Gambar 5. 35	<i>Pressure Drop Gradient</i> pada Aliran Nitrogen-XG 0,2% pada <i>Microchannel</i>	115
Gambar 5. 36	<i>Pressure Drop Gradient</i> pada Aliran Nitrogen-XG 0,1% pada <i>Microchannel</i>	116
Gambar 5. 37	Perbandingan <i>Pressure Drop Gradient</i> pada masing-masing cairan pada <i>Microchannel</i> pada $Q_G = 60 \text{ cm}^3/\text{menit}$ atau $jG = 1,56 \text{ m/s}$	117
Gambar 5. 38	Perbandingan <i>Pressure Drop Gradient</i> pada masing-masing cairan pada <i>Microchannel</i> pada $Q_G = 300 \text{ cm}^3/\text{menit}$ atau $jG = 7,81 \text{ m/s}$	117
Gambar 5. 39	Perbandingan <i>Pressure Drop Gradient Calculation</i> dengan eksperimen pada; (a) Chisholm & Laird (1958); (b) Mishima & Hibiki (1996); (c) Hwang & Kim (2006); (d) Kawahara (2011); (e) Feng & Zhang (2021).	121

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Variasi Nilai Properti Fluida Mandhane <i>et al.</i> (1974)	8
Tabel 2. 2	Rangkuman penelitian <i>microchannel</i> terdahulu (Hassan <i>et al.</i> 2005)	18
Tabel 4. 1	<i>Properties</i> fluida kerja	62
Tabel 4. 2	Kerangka waktu pelaksanaan penelitian	81
Tabel 5. 1	Persebaran Pola Aliran Air-Nitrogen	84
Tabel 5. 2	Pola Aliran XG 0,2% -Nitrogen pada <i>Microchannel</i>	95
Tabel 5. 3	Pola Aliran XG 0,1%-Nitrogen pada <i>Microchannel</i>	96
Tabel 5. 4	<i>Mean Error</i> dan <i>Root Mean Square Error</i> dengan perbandingan nilai korelasi dalam memprediksi <i>Pressure Drop Gradient</i> Aliran Dua Fasa	122