

**INVESTIGASI FRAKSI HAMPA DUA FASE UDARA
AKUADES DAN GLISERIN (0 - 30)% PADA PIPA KAPILER
DENGAN KEMIRINGAN 5⁰ TERHADAP POSISI HORIZONTAL**

TUGAS AKHIR

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar
Sarjana Teknik



UMY
UNIVERSITAS
MUHAMMADIYAH
YOGYAKARTA

Unggul & Islami

Disusun oleh:

Aldi Rahadian Ilham

20140130210

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA
2018**

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan kekuatan dan kemampuan serta atas segala limpahan rahmat, taufik dan hidayah-Nya sehingga penyusun dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Investigasi Fraksi Hampa Aliran Dua Fase Udara-Akuades dan Gliserin (0-30)% pada Pipa Kapiler dengan Kemiringan 5° Terhadap Posisi Horizontal”** yang merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan program Stara-1 Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Tugas akhir ini mengungkap secara detail tentang fraksi hampa aliran dua fase udara-akuades dan gliserin (0-30)% pada pipa kapiler dengan kemiringan 5° terhadap posisi horizontal dengan hasil pola aliran yang didapatkan fraksi hampanya adalah pola aliran *bubbly*, *plug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*. Selain itu juga dibahas tentang kecepatan pola *bubbly* dan *plug*, frekuensi pola *bubbly* dan *plug*, panjang pola *bubbly* dan *plug*, kemudian menjadi dasar dalam perhitungan penurunan tekanan (*preassure gradient*). Penelitian mengenai fraksi hampa (*void fraction*) yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik nilai fraksi hampa pada pola aliran *bubbly*, *plug*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn* pada aliran dua fase dengan kemiringan 5° pada pipa kapiler horizontal sehingga memudahkan dalam melakukan analisa lebih lanjut.

Yogyakarta, \ 5 Desember 2018

Penyusun



Aldi Rahadian Ilham

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa tugas akhir ini adalah asli hasil karya saya dan di dalamnya tidak terdapat karya (tulisan) yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain sebelumnya. Selain itu, karya tulis ilmiah ini juga tidak berisi pendapat atau hasil penelitian yang sudah dipublikasikan oleh orang lain selain referensi yang ditulis dengan menyebutkan sumbernya di dalam naskah dan daftar pustaka.

Yogyakarta, 15 Desember 2018



Aldi Rahadian Ilham

UCAPAN TERIMAKASIH

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penyusun telah di bantu oleh banyak pihak, dan sebagai ungkapan terima kasih, penyusun memberikan penghargaan kepada:

1. Bapak Berli Paripurna Kamiel, S.T.,M.M. M.Eng.Sc, Ph.D, selaku Ketua Prodi S1 Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
2. Bapak Dr. Ir. Sukamta M.T., IPM., selaku dosen pembimbing tugas akhir atas bimbingan, bantuan dan saran-saran yang telah diberikan kepada penyusun dalam menyelesaikan tugas akhir.
3. Bapak Dr.,Ir. Sudarja M.T., selaku dosen pembimbing tugas akhir atas bimbingan, bantuan dan saran-saran yang telah diberikan kepada penyusun dalam menyelesaikan tugas akhir.
4. Mas Arif Widiatama S.T., M.Eng. selaku mentor yang telah membantu dalam proses pengolahan data.

Penyusun menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan sebagai bahan masukan untuk perbaikan. Semoga hasil penelitian ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan dengan baik dalam bidang ilmu pengetahuan, teknik dan para pembaca.

DAFTAR ISI

| | |
|--|--------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| LEMBAR PENGESAHAN | ii |
| HALAMAN PERNYATAAN | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| UCAPAN TERIMAKASIH | v |
| DAFTAR ISI | vi |
| DAFTAR GAMBAR | viii |
| DAFTAR TABEL | xiv |
| DAFTAR LAMPIRAN | xv |
| DAFTAR NOTASI | xvi |
| INTISARI | xvii |
| ABSTRACT | xviii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Batasan Masalah | 3 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI | 4 |
| 2.1 Tinjauan Pustaka | 4 |
| 2.2 Dasar Teori Fraksi Hampa | 9 |
| 2.2.1 Metode <i>Chordal</i> | 9 |
| 2.2.2 Fraksi Hampa <i>Cross-Section</i> | 10 |
| 2.2.3 Fraksi Hampa Volumetrik | 10 |
| 2.2.4 Fraksi Hampa Homogen | 11 |
| 2.2.5 Rasio Kecepatan | 12 |
| 2.3 <i>Digital Image Processing</i> | 12 |
| 2.3.1 <i>Image</i> | 13 |
| 2.3.2 Metode Analisis Statistik | 14 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3.3 Pola Aliran Fluida pada Pipa Horizontal | 15 |
| BAB III DASAR TEORI | 17 |
| 3.1 Bahan Penelitian | 17 |
| 3.2 Alat Penelitian | 18 |
| 3.2.1 Aliran Fluida Cair | 20 |
| 3.2.2 Aliran Fluida Gas | 22 |
| 3.2.3 Peralatan Uji | 23 |
| 3.2.4 Peralatan Pengambilan Gambar | 25 |
| 3.3 Kalibrasi Alat Ukur | 26 |
| 3.4 Diagram Alir Penelitian | 26 |
| 3.5 Jalannya Penelitian | 28 |
| 3.6 Prosedur Pengambilan Data | 28 |
| 3.7 Pengolahan Data dan Analisa Hasil | 30 |
| 3.7.1 Data Visual untuk Fraksi Hampa | 30 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 33 |
| 4.1 Fraksi Hampa (<i>Void Fraction</i>) | 33 |
| 4.1.1 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran <i>Bubble</i> | 33 |
| 4.1.2 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran <i>Plug</i> | 40 |
| 4.1.3 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran <i>Slug-Annular</i> | 46 |
| 4.1.4 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran <i>Annular</i> | 53 |
| 4.1.5 Fraksi Hampa untuk Pola Aliran <i>Churn</i> | 59 |
| 4.2 Kecepatan dan <i>Cross-Correlation</i> Aliran <i>Bubble</i> dan <i>Plug</i> | 65 |
| 4.2.1 <i>Cross-Correlation</i> Aliran <i>Bubble</i> dan <i>Plug</i> | 65 |
| 4.2.2 Kecepatan <i>Bubble</i> dan <i>Plug</i> | 66 |
| 4.3 Panjang <i>Bubble</i> dan <i>Plug</i> | 67 |
| 4.4 Frekuensi <i>Bubble</i> dan <i>Plug</i> | 68 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 69 |
| 5.1 Kesimpulan | 69 |
| 5.2 Saran | 70 |
| DAFTAR PUSTAKA | 71 |
| LAMPIRAN | 73 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1. Pengukuran fraksi hampa (Ali dkk, 1993) | 4 |
| Gambar 2.2. Kecepatan <i>bubbly</i> (Fukano dkk, 1993) | 5 |
| Gambar 2.3. Hubungan antara fraksi hampa terukur dengan fraksi hampa homogen (Kawahara dkk, 2002)..... | 5 |
| Gambar 2.4. Hubungan antara fraksi hampa dan kualitas volumetrik dari eksperimen (Chung dan Kawaji, 2004) | 6 |
| Gambar 2.5. Fraksi hampa vs kecepatan superficial udara penambahan kecepatan air (U_L) pada pipa spiral (Biksono, 2006)..... | 7 |
| Gambar 2.6.(a) Pengaruh J_G dan J_L terhadap fraksi hampa, (b) Pengaruh β terhadap ε ($\varepsilon = \alpha$) (Sudarja dkk, 2015) | 8 |
| Gambar 2.7. Fraksi hampa <i>chordal</i> (Thome, 2004) | 9 |
| Gambar 2.8. Fraksi hampa <i>cross-section</i> (Thome, 2004) | 10 |
| Gambar 2.9. Fraksi hampa volumetrik (Thome, 2004)..... | 10 |
| Gambar 2.10. Langkah-langkah dalam <i>image processing</i> (Mayor dkk, 2007)..... | 12 |
| Gambar 2.11. Contoh gambar RGB dengan aliran <i>plug</i> | 13 |
| Gambar 2.12. Contoh Gambar <i>Grayscale</i> dengan aliran <i>plug</i> | 13 |
| Gambar 2.13. Contoh gambar <i>biner</i> dengan aliran <i>plug</i> | 14 |
| Gambar 3.1. Skema instalasi penelitian (Sudarja dkk, 2018) | 19 |
| Gambar 3.2. <i>Water Pump</i> | 20 |
| Gambar 3.3 Penampungan akuades dan gliserin | 20 |
| Gambar 3.4. Tangki bertekanan | 21 |
| Gambar 3.5 <i>Flowmeter</i> Air (a) kapasitas 0 – 50 mL/menit, (b) kapasitas 100 – 500 mL/menit, dan (c) kapasitas 0,1 – 1 GPM | 21 |
| Gambar 3.6. Kompresor | 22 |
| Gambar 3.7. <i>Flowmeter</i> Udara (a) kapasitas 0-100 cc/menit (b) kapasitas 100-1000 cc/menit (c) kapasitas 1-10 liter/menit..... | 23 |
| Gambar 3.8. <i>Mixer</i> | 23 |
| Gambar 3.9. Pipa kaca | 24 |
| Gambar 3.10. <i>Test section</i> | 24 |

| | |
|--|----|
| Gambar 3.11. <i>Flens acrylic</i> | 24 |
| Gambar 3.12. Lampu Penerangan | 25 |
| Gambar 3.13. Kamera Nikon J4..... | 26 |
| Gambar 3.14. Diagram alir penelitian | 27 |
| Gambar 3.15. Diagram alir <i>image processing</i> | 28 |
| Gambar 4.1. Pola Aliran <i>bubbly</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s | 33 |
| Gambar 4.2. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s, dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s | 34 |
| Gambar 4.3. PDF aliran <i>bubbly</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s, dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s | 34 |
| Gambar 4.4. Gambar 4.4. Pola Aliran <i>Bubbly</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s | 35 |
| Gambar 4.5. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s, dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s | 36 |
| Gambar 4.6. Gambar 4.6. PDF aliran <i>bubbly</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s, dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s | 36 |
| Gambar 4.7. Gambar 4.7. Pola Aliran <i>Bubbly</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s | 37 |
| Gambar 4.8. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s, dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s | 37 |
| Gambar 4.9. PDF aliran <i>bubbly</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s, dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s | 38 |
| Gambar 4.10. Pola Aliran <i>Bubbly</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s..... | 39 |
| Gambar 4.11. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s, dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s | 39 |
| Gambar 4.12. PDF aliran <i>bubbly</i> pada pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s, dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s | 39 |
| Gambar 4.13. Pola aliran <i>plug</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 0,116$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s | 40 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.14. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 0,166$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s..... | 41 |
| Gambar 4.15. PDF aliran <i>plug</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) J_G $= 0,116$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s..... | 41 |
| Gambar 4.16. Pola aliran <i>plug</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G =$ $0,116$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s | 42 |
| Gambar 4.17. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 0,166$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s..... | 42 |
| Gambar 4.18. PDF aliran <i>plug</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) J_G $= 0,116$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s..... | 43 |
| Gambar 4.19. Pola aliran <i>plug</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G =$ $0,116$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s | 43 |
| Gambar 4.20. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 0,166$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s..... | 44 |
| Gambar 4.21. PDF aliran <i>plug</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) J_G $= 0,116$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s..... | 44 |
| Gambar 4.22 Pola aliran <i>plug</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G =$ $0,116$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s | 45 |
| Gambar 4.23. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 0,166$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s..... | 45 |
| Gambar 4.24. PDF aliran <i>plug</i> gliserin 30% pada (a) $J_G = 0,116$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 0,116$ m/s, $J_L 0,232$ m/s..... | 46 |
| Gambar 4.25. Pola Aliran <i>slug-annular</i> pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 47 |
| Gambar 4.26. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 47 |
| Gambar 4.27. PDF aliran <i>slug-annular</i> gliserin 0% pada (a) $J_G = 0,116$ m/s, $J_L =$ $0,033$ m/s dan (b) $J_G = 0,116$ m/s, $J_L 0,232$ m/s..... | 48 |
| Gambar 4.28. Pola Aliran <i>slug-annular</i> pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 48 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.29. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 49 |
| Gambar 4.30. PDF aliran <i>slug-annular</i> pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 49 |
| Gambar 4.31. Pola Aliran <i>slug-annular</i> pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 50 |
| Gambar 4.32. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 50 |
| Gambar 4.33. PDF aliran <i>slug-annular</i> pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 51 |
| Gambar 4.34. Pola Aliran <i>slug-annular</i> pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 51 |
| Gambar 4.35. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 52 |
| Gambar 4.36. PDF aliran <i>slug-annular</i> pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 52 |
| Gambar 4.37. Pola Aliran <i>annular</i> pada (a) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s | 53 |
| Gambar 4.38. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 53 |
| Gambar 4.39. PDF aliran <i>annular</i> pada (a) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s | 54 |
| Gambar 4.40. Pola Aliran <i>annular</i> pada (a) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s | 54 |
| Gambar 4.41. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s..... | 55 |
| Gambar 4.42. PDF aliran <i>annular</i> pada (a) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s, dan (b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s | 55 |
| Gambar 4.43. Pola Aliran <i>annular</i> pada (a) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s | 56 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.44. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 0,033 \text{ m/s}$, dan (b) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 0,232 \text{ m/s}$ | 56 |
| Gambar 4.45. PDF aliran <i>annular</i> pada (a) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 0,033 \text{ m/s}$, dan (b) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 0,033 \text{ m/s}$ | 57 |
| Gambar 4.46. Pola Aliran <i>annular</i> pada (a) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 0,033 \text{ m/s}$ dan (b) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 0,232 \text{ m/s}$ | 57 |
| Gambar 4.47. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 0,033 \text{ m/s}$, dan (b) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 0,232 \text{ m/s}$ | 58 |
| Gambar 4.48. PDF aliran <i>annular</i> pada (a) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 0,033 \text{ m/s}$, dan (b) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 0,033 \text{ m/s}$ | 58 |
| Gambar 4.49. Pola Aliran <i>churn</i> pada (a) $J_G = 9,62 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ dan (b) J_G $= 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ | 59 |
| Gambar 4.50. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 9,62 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$, dan (b) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ | 59 |
| Gambar 4.51. PDF aliran <i>churn</i> pada (a) $J_G = 9,62 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$, dan (b) J_G $= 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ | 60 |
| Gambar 4.52. Pola Aliran <i>churn</i> pada (a) $J_G = 9,62 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ dan (b) J_G $= 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ | 60 |
| Gambar 4.53. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 9,62 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$, dan (b) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ | 61 |
| Gambar 4.54. PDF aliran <i>churn</i> pada (a) $J_G = 9,62 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$, dan (b) J_G $= 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ | 61 |
| Gambar 4.55. Pola Aliran <i>churn</i> pada (a) $J_G = 9,62 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ dan (b) J_G $= 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ | 62 |
| Gambar 4.56. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 9,62 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$, dan (b) $J_G = 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ | 62 |
| Gambar 4.57. PDF aliran <i>churn</i> pada (a) $J_G = 9,62 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$, dan (b) J_G $= 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ | 63 |
| Gambar 4.58. Pola Aliran <i>churn</i> pada (a) $J_G = 9,62 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ dan (b) J_G $= 66,3 \text{ m/s}$, $J_L = 2,297 \text{ m/s}$ | 63 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.59. <i>Time-Average</i> fraksi hampa pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s, dan (b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s..... | 64 |
| Gambar 4.60. PDF aliran <i>churn</i> pada (a) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s, dan (b) J_G $= 66,3$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s..... | 64 |
| Gambar 4.61. <i>Cross-correlation bubbly</i> pada (a) $J_G = 0,025$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s, dan (b) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 0,879$ m/s..... | 65 |
| Gambar 4.62. <i>Cross-correlation plug</i> | 66 |
| Gambar 4.63. Kecepatan <i>bubbly</i> dan <i>plug</i> | 67 |
| Gambar 4.64. Panjang <i>bubbly</i> dan <i>plug</i> | 68 |
| Gambar 4.65. Frekuensi <i>bubbly</i> dan <i>plug</i> | 68 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 3.1 Sifat Fisik Cairan | 17 |
| Tabel 3.2 Konversi Gambar RGB ke Biner | 31 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|--|----|
| Lampiran 1. Data pola aliran, time average fraksi hampa, dan PDF fraksi hampa pola aliran <i>bubbly</i> $J_G = 0,025$ m/s gliserin 10% | 73 |
| Lampiran 2. Data pola aliran, time average fraksi hampa, dan PDF fraksi hampa pola aliran <i>bubbly</i> $J_G = 0,066$ m/s gliserin 10% | 73 |
| Lampiran 3. Data pola aliran, time average fraksi hampa, dan PDF fraksi hampa pola aliran <i>plug</i> $J_L = 0,033$ m/s gliserin 10% | 73 |
| Lampiran 4. Data pola aliran, time average fraksi hampa, dan PDF fraksi hampa pola aliran <i>plug</i> $J_L = 0,232$ m/s gliserin 10% | 74 |
| Lampiran 5. Data pola aliran, time average fraksi hampa, dan PDF fraksi hampa pola aliran <i>plug</i> $J_L = 0,033$ m/s gliserin 10% | 74 |
| Lampiran 6. Data pola aliran, time average fraksi hampa, dan PDF fraksi hampa pola aliran <i>plug</i> $J_L = 0,232$ m/s gliserin 10% | 74 |
| Lampiran 7. Matriks Perhitungan Kecepatan <i>bubbly</i> dan <i>Plug</i> | 75 |
| Lampiran 8. Matriks Perhitungan Panjang <i>bubbly</i> dan <i>Plug</i> | 75 |
| Lampiran 9. Matriks Perhitungan Frekuensi <i>bubbly</i> dan <i>Plug</i> | 75 |
| Lampiran 10. Hasil Pengujian Tegangan Permukaan | 76 |
| Lampiran 11. Tabel Kecepatan <i>bubbly</i> dan <i>Plug</i> | 76 |
| Lampiran 12. Hasil Kalibrasi <i>Flowmeter</i> Air 1 | 77 |
| Lampiran 13. Hasil Kalibrasi <i>Flowmeter</i> Air 2 | 77 |
| Lampiran 14. Hasil Kalibrasi <i>Flowmeter</i> Air 3 | 77 |

DAFTAR NOTASI

| | | | |
|-------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------|
| A | = Luas penampang (m^2) | α | = Fraksi hampa penelitian |
| A_G | = Luasan gas (m^2) | β | = Fraksi Hampa homogen |
| A_L | = Luasan cairan (m^2) | ε | = Fraksi hampa |
| C_s | = Kecepatan konstanta | ρ | = Massa jenis (kg/m^3) |
| D | = Diameter pipa (μm) | ρ_G | = Densitas udara (kg/m^3) |
| D_H | = Diameter pipa (mm) | ρ_L | = Densitas air (kg/m^3) |
| J_G | = Kecepatan superfisial udara (m/s) | μ | = Viskositas dinamik (kg/m.s) |
| J_L | = Kecepatan superfisial air (m/s) | Δt | = Jeda waktu (s) |
| L_G | = Panjang garis dilewati udara (m) | | |
| L_L | = Panjang garis dilewati air (m) | | |
| L_s | = Jarak aksial (m) | | |
| S | = Rasio kecepatan | | |
| t | = waktu (s) | | |
| U_G | = Kecepatan udara (m/s) | | |
| U_L | = Kecepatan air (m/s) | | |
| U_s | = Kecepatan <i>bubbly</i> (m/s) | | |
| ν | = Viskositas kinematik (m^2/s) | | |
| x | = Kualitas gas | | |