

**STUDI EKSPERIMENTAL *PRESSURE DROP* ALIRAN  
GELEMBUNG (AIR – UDARA) PADA PIPA BERULIR  
DALAM DENGAN KEMIRINGAN SUDUT  $0^{\circ}$  -  $50^{\circ}$**



**AHMAD AGNI**

**5315092562**

Skripsi ini Ditulis untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan dalam Mendapatkan  
Gelar Sarjana Pendidikan

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN TEKNIK MESIN**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA**

**2014**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**

Judul : **STUDI EKSPERIMENTAL *PRESSURE DROP* ALIRAN  
GELEMBUNG (AIR – UDARA) PADA PIPA BERULIR  
DALAM DENGAN KEMIRINGAN SUDUT 0<sup>0</sup> - 50<sup>0</sup>.**

Nama : **Ahmad Agni**

No. Reg : **5315092562**

**DOSEN PEMBIMBING**

| Nama / Jabatan   | Tanda Tangan | Tanggal |
|--|--------------|---------|
| <b>Dosen Pembimbing I</b><br>H. Wardoyo, ST., MT.<br>NIP. 197908182008011008     | .....        | .....   |
| <b>Dosen Pembimbing II</b><br>Ragil Sukarno, ST., MT.<br>NIP. 197911022012121001 | .....        | .....   |

**DEWAN PENGUJI**

|  |       |       |
|--|-------|-------|
| <b>Ketua</b><br>Drs. Sugeng Priyanto, M.Sc.<br>NIP. 196309152001121001 | ..... | ..... |
| <b>Sekretaris</b><br>Drs. Syaripuddin, M.Pd<br>NIP. 196703211999031001 | ..... | ..... |
| <b>Dosen Ahli</b><br>Imam Basori, ST., MT<br>NIP. 197906072008121003   | ..... | ..... |

**MENGETAHUI**

Ketua Jurusan Teknik Mesin  
FT – UNJ

Dr. Eng. Agung Premono, MT  
NIP. 197706012006121002

Tanggal Ujian : 23 Juli 2014

Tanggal Lulus : 23 Juli 2014

## ABSTRAK

**Ahmad Agni, *Studi Eksperimental Pressure Drop Aliran Gelembung (Air – Udara) Pada Pipa Berulir Dalam Dengan Kemiringan Sudut 0<sup>0</sup> - 50<sup>0</sup>*.**

Skripsi, Jakarta : Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Juli 2014.

Penelitian ini bertujuan untuk mencari pengaruh perubahan debit udara, debit air dan kemiringan pipa berulir dalam spesimen uji terhadap *pressure drop* pada aliran dua fasa ( air – udara) pada pola aliran gelembung dan untuk mengetahui distribusi gerakan gelembung pada pipa berulir dalam.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen laboratorium, yaitu untuk menentukan debit air, debit udara, kemiringan pipa, perbedaan tekanan dan distribusi gerakan gelembung dalam bentuk foto. Hasil penelitian laboratorium kemudian dilakukan perhitungan dan analisis untuk mengetahui *pressure drop*, hasil analisis *pressure drop* dari penelitian laboratorium selanjutnya dibandingkan dengan *pressure drop* berdasarkan analisis korelasi metode *homogeneous* .

Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi debit air, debit udara dan kemiringan pipa, distribusi gerakan gelembungnya semakin mengikuti bentuk ulir dalam pipa. Selain itu perubahan debit air ,debit udara dan kemiringan pipa berpengaruh terhadap *pressure drop*, di tunjukan pada *pressure drop* statis pada sudut 50<sup>0</sup>, 6 LPM dan 20 cc/menit sebesar 14963.8 N/m<sup>2</sup>.

Kata kunci: *aliran dua fasa, penurunan tekanan, gerakan aliran gelembung.*

## ABSTRACT

**Ahmad Agni, *Experimental Study of Bubble Flow Pressure Drop (Water - Air) In Threaded Pipe In With The slope angle of 0<sup>0</sup> - 50<sup>0</sup>*** Thesis, Jakarta: Faculty of Engineering, State University of Jakarta, July 2014.

This study aimed to explore the effect of changes in the volume of air, water discharge and slope threaded pipe in the test specimen to the pressure drop in two-phase flow in the flow pattern of bubbles and bubble flow to look for movement on the threaded pipe, where the two-phase flow in this study on the use of water and air mixing.

The method used in this study was a laboratory experimental method, which determines the value of the calculation, the types of materials used and make the pressure drop test equipment using U Tube. Then do the testing.

The results showed higher water flow follows the movement of the bubble flow screw in the pipe where the water discharge and 4 LPM and 6 LPM. In addition, changes and variations in air discharge pipe slope will result in varying forms bubbles flow. In addition, the slope of the pipe also affects the pressure drop, show a decrease in static pressure at an angle of 50<sup>0</sup>, 6 LPM and 20 cc / min of 14963.8 N/m<sup>2</sup> and a decrease in pressure caused friction in the pipe threaded in the greater, where greatest friction is at an angle of 50<sup>0</sup>, 6 LPM and 60 cc / min at 194.299 N/m<sup>2</sup>.

Keywords: two-phase flow, pressure drop, flow movement of bubbles.

## **HALAMAN PERNYATAAN**

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis skripsi saya ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik sarjana, baik di Universitas Negeri Jakarta maupun di perguruan tinggi lain
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri dengan arahan dosen pembimbing
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya tulis ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di Universitas Negeri Jakarta.

Jakarta, Juli 2014

Ahmad Agni

No. Reg 5315092562

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT berkat rahmat serta hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Maksud dari penulisan skripsi ini adalah untuk memenuhi persyaratan kelulusan mencapai gelar sarjana pendidikan (S.Pd) Program Studi Pendidikan Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta.

Dalam penyusunan skripsi ini penulis banyak menemui kesulitan-kesulitan, akan tetapi berkat hidayah-Nya serta bantuan dan dukungan dari berbagai pihak maka kesulitan tersebut dapat teratasi. Maka dengan kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan ridho-Nya kepada penulis hingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktunya.
2. Ayahanda, Ibunda, dan Segenap Keluarga tersayang, yang selalu memberi dukungan baik secara moral maupun material.
3. Bapak H. Wardoyo, S.T, M.T, selaku Dosen Pembimbing I.
4. Bapak Ragil Sukarno, S.T, M.T, selaku Dosen Pembimbing II.
5. Bapak Prof. Dr. Basuki Wibawa, M.M selaku Pembimbing Akademik.
6. Bapak Ahmad Kholil, S.T, M.T, selaku Ketua Program Studi Pendidikan Teknik Mesin.
7. Bapak Dr. Eng. Agung Premono, M.T, selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin.
8. Ibu Prof. Dr. Zulfiati, M.Pd, selaku Koordinator Skripsi Teknik Mesin.
9. Seluruh Dosen, Karyawan, dan Keluarga Besar Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta.
10. Team penelitian Aliran Dua Fasa ( Faisal, Arif dan Oryza).
11. Rekan–rekan SDN Kereo 3 keluarga kedua saya, sosok-sosok penuh motivasi sukses selalu buat kita amin.

12. Dessy Nirmala Wati, SKM, selaku pacar, teman, penasehat, motivator, yang tidak hentinya menemani perjuangan dalam mencapai cita cita penulis.
13. Teman-teman angkatan 2009 serta seluruh pihak yang telah memberikan bantuan yang berguna bagi kelancaran penyusunan proposal skripsi ini.

Penulis menyadari atas keterbatasan yang dimiliki dalam menyelesaikan skripsi ini, sehingga masih ditemui kekurangan dan ketidaksempurnaan, Maka dari itu kritik dan saran dari pembaca sangat penulis harapkan. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak. Amin.

Penulis

Ahmad Agni

## DAFTAR ISI

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| <b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....  | ii   |
| <b>ABSTRAK</b> .....             | iii  |
| <b>ABSTRACT</b> .....            | iv   |
| <b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....  | v    |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....      | vi   |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....          | viii |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....       | x    |
| <b>DAFTAR GRAFIK</b> .....       | xi   |
| <br>                             |      |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....   | 1    |
| 1.1 Latar Belakang .....         | 1    |
| 1.2 Identifikasi Masalah.....    | 5    |
| 1.3 Batasan Masalah .....        | 5    |
| 1.4 Perumusan Masalah .....      | 6    |
| 1.5 Tujuan Penelitian .....      | 6    |
| 1.6 Kegunaan Penelitian .....    | 6    |
| <br>                             |      |
| <b>BAB II KAJIAN TEORI</b> ..... | 7    |
| 2.1.Fasa .....                   | 7    |
| 2.2.Aliran Dua Fasa .....        | 7    |
| 2.3.Pola Aliran .....            | 9    |
| 2.4.Peta Pola Aliran .....       | 11   |
| 2.5.Fraksi Hampa .....           | 12   |
| 2.6.Pengaruh Diameter Pipa ..... | 12   |
| 2.7.Penurunan Tekanan .....      | 12   |
| 2.8.Pengaruh Sifat Fluida.....   | 15   |
| 2.10. Kerangka Berfikir .....    | 16   |
| 2.11. Hipotesis .....            | 16   |



|   |           |
|---|-----------|
| <b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>  | <b>18</b> |
| 3.1.Tempat dan Waktu Penelitian.....  | 18        |
| 3.2.Metode Penelitian .....   | 19        |
| 3.3.Bahan Yang Digunakan .....  | 20        |
| 3.4.Alat Yang Digunakan .....   | 20        |
| 3.5.Jalannya Penelitian.....  | 21        |
| 3.6.Variable .....  | 23        |
| 3.7. Analisis Data .....  |           |
| 23  |           |
| <br>  |           |
| <b>BAB IV HASIL PENELITIAN .....</b>  | <b>24</b> |
| 4.1.Perubahan Bentuk dan Gerakan Aliran Gelembung Antar Spesimen Uji<br>Dengan Kondisi Sudut, Debit Air dan Volume Udara Yang Tetap.....  | 24        |
| 4.2.Pengaruh Penambahan Volume Udara Terhadap Bentuk dan Gerakan<br>Aliran Gelembung Dengan Kondisi Debit Air dan Posisi Sudut Tetap....  | 26        |
| 4.3.Pengaruh Penambahan Debit Air Terhadap Bentuk Gelembung Dengan<br>Kondisi Volume Udara Dan Posisi Sudut Seksi Uji Yang Tetap .....    | 29        |
| 4.4.Pengaruh perubahan sudut spesimen uji terhadap bentuk gelembung<br>dengan kondisi volume udara dan debit air dalam kondisi tetap..... | 32        |
| 4.5.Penurunan Tekanan.....  | 33        |
| <br>  |           |
| <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>   | <b>44</b> |
| 5.1.Kesimpulan .....  | 44        |
| 5.2.Saran .....   | 45        |
| <br>  |           |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>   | <b>46</b> |
| <b>LAMPIRAN</b>   |           |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| Gambar 2.1 Pola Aliran Pada Pipa Vertikal Ke Atas .....   | 9  |
| Gambar 2.2 Pola Aliran Pada Pipa Horisontal.....  | 10 |
| Gambar 4.1 Perubahan bentuk gelembung antar spesimen uji pada kondisi posisi sudut spesimen uji 0°, debit air 2 LPM dan debit udara 20 cc/menit yang tetap.....   | 25 |
| Gambar 4.2 Pengaruh penambahan debit udara 20 cc/menit, 40 cc/menit dan 60 cc/menit terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit air 2 LPM dan posisi sudut segmen pada 0° .....                              | 26 |
| Gambar 4.3 Pengaruh penambahan debit udara 20,40,60 (cc/menit) terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit air 4 LPM dan posisi sudut segmen pada 20° .....  | 27 |
| Gambar 4.4 Pengaruh penambahan debit udara 20 cc/menit, 40 cc/menit dan 60 cc/menit terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit air 6 LPM dan posisi sudut segmen pada 40° .....                             | 28 |
| Gambar 4.5 Pengaruh penambahan debit air dengan perubahan 2 LPM, 4 LPM dan 6 LPM terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit udara 20 cc/menit dan posisi sudut segmen uji tetap pada 10°.....               | 29 |
| Gambar 4.6 Pengaruh penambahan debit air dengan perubahan 2 LPM, 4 LPM dan 60 LPM terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit udara 40 cm <sup>3</sup> /menit dan posisi sudut segme uji tetap pada 30°..... | 30 |
| Gambar 4.7 Pengaruh penambahan debit air dengan perubahan 2 LPM, 4 LPM dan 60 LPM terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit udara 60 cc/menit dan posisi sudut segmen uji tetap pada 50° .....             | 31 |
| Gambar 4.8 Pengaruh perubahan sudut terhadap bentuk dan sebaran gelembung pada saat debit air dan debit udara tetap .....   | 32 |

## DAFTAR GRAFIK

|   |    |
|---|----|
| Grafik 4.1 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap $\Delta P$ Pada Sudut $0^\circ$ .....  | 34 |
| Grafik 4.2 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap $\Delta P$ Pada Sudut $10^\circ$ ..... | 35 |
| Grafik 4.3 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap $\Delta P$ Pada Sudut $20^\circ$ ..... | 36 |
| Grafik 4.4 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap $\Delta P$ Pada Sudut $30^\circ$ ..... | 37 |
| Grafik 4.5 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap $\Delta P$ Pada Sudut $40^\circ$ ..... | 38 |
| Grafik 4.6 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap $\Delta P$ Pada Sudut $50^\circ$ ..... | 39 |
| Grafik 4.7 Pengaruh Kemiringan Sudut Terhadap $\Delta P$ .....                          | 40 |
| Grafik 4.8 Pengaruh Kemiringan Sudut Terhadap $\Delta P$ .....                          | 41 |
| Grafik 4.9 Pengaruh Kemiringan Sudut Terhadap $\Delta P$ .....                          | 43 |

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam dunia industri banyak dijumpai peralatan yang menggunakan pola aliran, terutama pada industri proses. Contohnya pada komponen mesin konversi energi, seperti kondensor, evaporator, pipa minyak dan gas bumi, pengeboran dan lain lain. Selain digunakan pada industri pola aliran juga digunakan pada konstruksi bangunan khususnya bangunan yang bertingkat.

Keberhasilan suatu industri sangat ditentukan oleh keberhasilan merancang komponen pendukungnya sehingga untuk industri yang menggunakan pola aliran sangatlah perlu untuk mengetahui terlebih dahulu fenomena dan parameter dari pola aliran sebelum merancang sebuah alat.

Di kehidupan sehari hari selain aliran satu fasa, kita juga temukan aliran *multiphase* dimana salah satunya adalah aliran dua fasa. Pada aliran satu fasa, penurunan tekanan (*pressure drop*) dipengaruhi oleh *Reynolds number* yang merupakan fungsi dari viskositas, berat jenis fluida dan diameter pipa. Sedangkan aliran dua fasa mempunyai fenomena yang sangat kompleks dibanding pada aliran satu fasa diantaranya adalah interaksi antar fasa, pengaruh deformasi permukaan, pergerakan antar fluida, pengaruh ketidakseimbangan fasa, perubahan pola aliran dan perubahan penurunan tekanan (*pressure drop*).

Pola aliran berhubungan erat dengan penurunan tekanan (*pressure drop*). Kesalahan prediksi perhitungan kemiringan pipa dapat menyebabkan tidak

maksimalnya proses penurunan tekanan dan terbentuknya dinamika fluida yang tidak diharapkan. Dinamika fluida yang terbentuk karena kesalahan perhitungan kemiringan pipa dapat menyebabkan beban impact pada bagian-bagian pipa tertentu. Proses ini hampir sama dengan *water hammer*.

Beban impact secara acak ini akan menghasilkan getaran. Akibat pembebanan impact secara acak yang berlangsung secara terus menerus bisa menyebabkan kerusakan pada pipa terutama pada daerah diskontinyu seperti pada sambungan, percabangan dan belokan. Oleh karena itu sangat penting untuk memprediksi distribusi aliran dua fasa untuk memaksimalkan proses penurunan tekanan dan pembentukan dinamika fluida.

Gede W dan Triyogi Y (2010) meneliti tentang studi eksperimental dan numerik aliran dua fasa (air dan udara) melewati *elbow*  $30^{\circ}$  dari pipa vertikal menuju pipa dengan kemiringan sudut  $60^{\circ}$ . Dimana menggunakan bahan pipa transparan (*acrylic*) diameter (D) 0,036 m, panjang pipa vertikal 2 m, *elbow*  $30^{\circ}$  R/D 0,7 dan pipa miring 1 m. Fluida kerja yang digunakan adalah air dan udara. Pada eksperimen kecepatan *superficial liquid* yang digunakan adalah 0,3 m/s – 1,1 m/s dan volumetrik rasionya ( $\beta$ ) adalah 0,03 – 0,25. Pengukuran *pressure drop* menggunakan manometer U pada pipa vertikal, *inlet elbow*, *outlet elbow* dan pada pipa miring  $60^{\circ}$ . Sedangkan *global void fraction* ( $\alpha$ ) dilakukan dengan metode *pressure gradient* dan visualisasi aliran menggunakan kamera digital. Pada penelitian secara numerik menggunakan program Fluent 6. dan Matlab 7 untuk membandingkan *flow pattern* dan distribusi *void fraction* dengan hasil eksperimen. Hasil penelitian didapatkan bahwa untuk *pressure drop* pada pipa vertikal terjadi penurunan dengan bertambahnya kualitas volumetrik gas. Hal ini

juga terjadi pada *elbow* dan pada pipa miring  $60^\circ$ , namun nilainya lebih kecil dibanding dengan yang terjadi pada pipa vertikal. Kecepatan *superficial liquid* (Usl) mempengaruhi pola aliran setelah melewati *elbow*  $30^\circ$  dimana pada hasil visualisasi terlihat adanya perubahan dari *bubble* menjadi *bubble cluster*, *plug bubble*, *slug bubble*.

Damawidjaya biksono (2006) meneliti tentang karakteristik dan visual aliran dua fasa pada pipa spiral. Dimana menggunakan pipa akrilik spiral dengan diameter luar 52 mm, tebal pipa 7 mm, diameter dalam 27 mm sepanjang 1120 mm yang digunakan sebagai pipa pengujian, menggunakan *piezometrik* yang digunakan untuk mengukur beda tekanan pada dua titik yang berbeda pada pipa pengujian, alat ini terbuat dari papan berskala dan selang akuarium. Hasil dari penelitian koefisien gesek pada aliran dua-fasa lebih besar dibandingkan data satu fase (air), aliran transisi lebih cepat terjadi pada aliran dua-fasa, yaitu pada bilangan *Reynolds*(Re) antara (1.600-1.700), Efek penambahan variasi kecepatan udara (Ug), menyebabkan kenaikan nilai koefisien gesek dan Hasil visualisasi aliran dua-fasa dengan *digital camera* menunjukkan tempat kedudukan rata-rata butiran udara dipengaruhi oleh bilangan *Reynolds*(Re). Untuk nilai (Re) tinggi, yang diikuti kenaikan nilai jarak jari-jari (r), maka letak butiran udara mendekati dinding pipa spiral ( $Re > 7 \cdot 10^4$ ).

Priyo H. A (2010) meneliti tentang pengaruh penggunaan pipa vertikal terhadap kareteristik penurunan tekanan (*pressure drop*) pada aliran dua fasa gas-cairan. Penelitian yang digunakan menggunakan pipa transparan dengan diameter dalam 36 mm pada pipa vertikal serta air sebagai fluida kerja cairan dan udara

sebagai fluida kerja gas. Variasi yang dilakukan adalah kecepatan *superficial* cairan antara dari 0,3 m/s – 0,11 m/s dan  $\beta$  adalah 0,05 – 0,2.

Pengukuran pipa vertikal diukur dengan menggunakan manometer U. Dari hasil penelitian dapat diperoleh kesimpulan bahwa *pressure drop* aliran satu fasa pada pipa vertikal akan semakin meningkat dengan semakin besar bilangan *Reynolds superficial* cairan (Resl). Sedangkan *pressure drop* pada aliran dua fasa lebih rendah dibanding aliran satu fasa. Untuk aliran dua fasa dengan peningkatan bilangan *Reynolds superficial* gas (Resg) atau semakin tinggi kualitas volumetrik gas ( $\beta$ ) maka *pressure drop* di bidang uji vertikal menurun pada setiap bilangan *Reynolds superficial* cairan (ReSL).

Berbagai upaya untuk memprediksi dinamika fluida dan koefisien penurunan tekanan pada aliran dua fasa dengan berbagai bentuk pola aliran gelembung telah banyak dilakukan secara analitis maupun eksperimental, namun pada aliran gelembung dua fasa dengan kedudukan pipa miring dengan variasi perubahan sudut belum begitu banyak literatur yang membahas. Selain itu, pipa yang digunakan ialah pipa yang polos, kemudian pengetahuan tentang penurunan tekanan dan dinamika fluida juga sangat berguna dalam mata pelajaran konversi energi pada Sekolah Menengah Kejuruan Jurusan Teknik Mesin.

Oleh karena itu, peneliti tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul “Studi Eksperimental *Pressure Drop* Aliran Gelembung (Air – Udara) Pada Pipa Berulir Dalam Dengan Kemiringan Sudut  $0^0 - 50^0$ ”.

## 1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, dapat teridentifikasi beberapa masalah, diantaranya :

1. Bagaimana pengaruh kemiringan pipa berulir dalam terhadap *pressure drop*?
2. Bagaimana pengaruh perubahan volume udara dan debit air terhadap *pressure drop*?
3. Bagaimana gerakan aliran gelembung pada kemiringan pipa ulir dalam dengan variasi sudut?

## 1.3 Batasan Masalah

Karena luasnya cakupan materi dan keterbatasan dari segi waktu, kesempatan dan kemampuan peneliti, maka peneliti merasa perlu membatasi penelitian ini. Sehingga penelitian ini hanya membahas tentang :

1. Pengaruh kemiringan pipa berulir dalam terhadap *pressure drop*.
2. Pengaruh perubahan volume udara dan debit air terhadap *pressure drop*.
3. Gerakan aliran gelembung pada kemiringan pipa ulir dalam dengan variasi sudut.



#### **1.4 Rumusan masalah**

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah di atas, maka perumusan masalahnya adalah “Studi Eksperimental *Pressure Drop* Aliran Gelembung (Air – Udara) Pada Pipa Berulir Dalam Dengan Kemiringan Sudut  $0^0$  -  $50^0$ ”.

#### **1.5 Tujuan Penelitian**

1. Mengetahui pengaruh kemiringan pipa berulir dalam terhadap *pressure drop* pola aliran gelembung.
2. Mengetahui pengaruh debit udara dan debit air terhadap *pressure drop*.
3. Mengetahui gerakan aliran gelembung pada pipa berulir dalam.

#### **1.6 Kegunaan Hasil Penelitian**

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi sumbangan pemikiran bagi ilmu pengetahuan serta dapat memberi informasi seluas-luasnya kepada masyarakat tentang *pressure drop* dan dinamika fluida pada pipa ulir dalam dengan variasi sudut kemiringan. Serta diharapkan bermanfaat dan dapat dijadikan referensi, petunjuk teknis dan desain dalam perancangan komponen-komponen sistem konversi energi khususnya *heat exchanger*, misalnya evaporator, kondensor dan menara pendingin (*cooling tower*).

## **BAB II**

### **KAJIAN TEORI**

#### **2.1 Fasa**

Fasa adalah salah satu kondisi atau bentuk zat, dapat berupa gas, cair dan padat. Aliran multi fasa merupakan gabungan aliran dari berbagai macam fasa. Aliran dua fasa merupakan aliran yang paling sederhana dari aliran *multi* fasa. Istilah dua komponen sering digunakan untuk menggambarkan aliran dimana fasa-fasa tersebut tidak terdiri dari zat kimia yang sama. Misalnya aliran uap air, merupakan aliran dua fasa sementara aliran air-udara adalah dua komponen.

Wallis (1969), aliran dua komponen, contohnya cair-cair terdiri dari satu fasa tetapi sering disebut aliran dua fasa dimana fasa tersebut disamakan dengan komponen. Maka dalam definisi ini, antara dua fasa dan dua komponen pada dasarnya adalah sama.

#### **2.2 Aliran Dua Fasa**

Aliran dua fasa merupakan bagian dari aliran multi fasa. Dilihat dari wujud fasanya dapat dibedakan menjadi 3 bagian, yaitu aliran gas-cair, aliran cair-padat dan aliran padat-gas. Berdasarkan arah alirannya dapat dibedakan menjadi 2 bagian yaitu aliran searah dan aliran berlawanan arah. Dan dilihat dari kedudukan saluran yang dipergunakan dapat dibedakan menjadi 3 bagian yaitu aliran horizontal, aliran vertikal dan aliran miring.<sup>45</sup>

Metode yang digunakan untuk menganalisa aliran dua fasa merupakan pengembangan dari metode penelitian satu fasa yang sudah ada. Caranya selalu dengan menurunkan persamaan dasar yang berhubungan dengan konservasi massa, momentum dan energi. Dalam mencari persamaan-persamaan tersebut biasanya dilakukan pendekatan-pendekatan penyederhanaan. Beberapa pendekatan yang dapat dilakukan adalah sebagai berikut:

a. Metode Aliran *Homogeneous*

Pendekatan dengan metode ini merupakan yang paling sederhana. Pada pendekatan ini aliran diasumsikan sebagai aliran satu fasa saja dengan properti yang didapat dari gabungan dan besaran kontribusi masing-masing fasa. Salah satu asumsi untuk metode *homogeneous* ini adalah kecepatan aliran antara fasa cair dan fasa gas dianggap sama.

b. Metode Aliran *Separated* atau terpisah

Pendekatan dengan metode ini, masing-masing fasa diasumsikan secara terpisah dan memiliki properti sendiri-sendiri. Karakteristik masing-masing fasa harus tersedia. Terutama luas masing-masing fasa dan interaksi gesekan antar fasa maupun gesekan antar fluida dengan dinding kanal. Kecepatan aliran kedua fasa dianggap konstan tetapi tidak sama.

c. Metode Aliran *Flow Pattern*

Pendekatan ini lebih rumit. Aliran dua fasa di susun dalam 1 dari 3 atau 4 bentuk geometri yang pasti. Geometri ini didasarkan pada berbagai konfigurasi atau pola aliran yang ditemukan ketika fasa gas dan cair mengalir bersama dalam kanal.

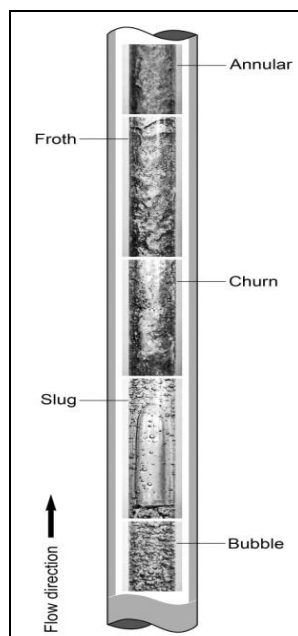
### 2.3 Pola Aliran

Pola aliran adalah konfigurasi geometrik yang terbentuk oleh sebuah aliran. Parameter fisik yang penting dalam menentukan pola aliran adalah tegangan permukaan, yang menjaga dinding saluran tetap basah dan cenderung untuk membuat tetes-tetes air dan gelembung gas kecil, gravitasi, yang cenderung mendorong air pada dasar saluran.

Pada aliran dua fasa (cair-gas) dapat terbentuk berbagai pola aliran. Terbentuknya pola aliran ini tergantung pada besar sudut kemiringan pipa. Pola aliran yang terbentuk pada pipa vertikal tentu berbeda dengan pola aliran yang terbentuk pada pipa horisontal.

#### A. Pipa Vertikal

Jika perpindahan kalor secara perlahan-lahan naik dari nol pada pipa vertikal dengan arah aliran searah ke atas, pola aliran gelembung yang diperoleh adalah :

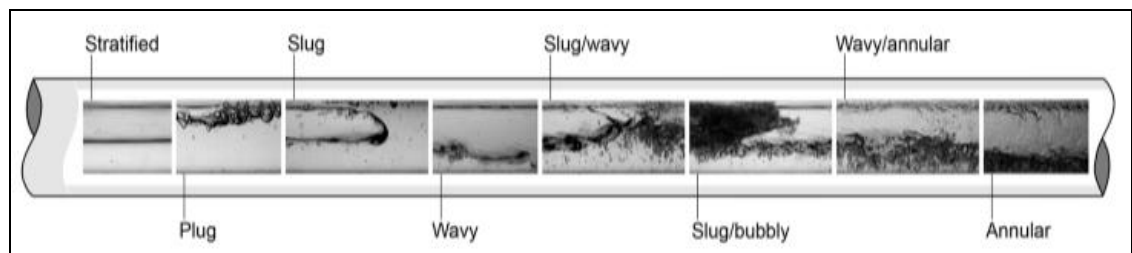


Gambar 2.1 Pola Aliran Pada Pipa Vertikal Ke Atas  
( Sumber: Ghajar, Godbole, dan Clement, 2011)

1. Aliran gelembung (*bubble*), dimana gelembung uap diperkirakan mempunyai ukuran yang seragam (*uniform*).
2. Aliran kantung gas atau sumbat likuid (*plug/slug*), dimana gas mengalir membentuk gelembung besar (kadang-kadang gelembung gas kecil terdistribusi di cairan).
3. Aliran acak (*churn*), dimana terjadi gerakan oksilasi sehingga cairan menjadi tidak stabil.
4. Aliran buih (*froth*), dimana konsentrasi tetesan dalam gas bertambah dan akhirnya bergabung membentuk gumpalan.
5. Aliran cincin (*annular*), dimana sebagian fasa *liquid* berlaku sebagai *film* di dinding pipa dan sebagian lagi berupa tetesan yang terdistribusi dalam gas yang mengalir pada bagian tengah pipa.

#### B. Pipa Horisontal

Jika perpindahan kalor naik secara perlahan-lahan dari nol pada pipa horisontal, maka pola aliran yang diperoleh adalah:



Gambar 2.2 Pola Aliran Pada Pipa Horisontal  
( Sumber: Ghajar, Godbole, dan Clement, 2011)

1. Aliran strata licin (*stratified*), dimana permukaan bidang sentuh cair-gas sangat halus. Tetapi pola aliran seperti ini biasanya tidak terjadi, batas fasa selalu bergelombang.

2. Aliran kantung gas (*plug*), dimana gelembung gas kecil bergabung membentuk kantung gas.
3. Aliran sumbat likuid (*slug*), dimana amplitudo gelombang sangat besar hingga menyentuh bagian atas pipa.
4. Aliran gelombang (*wavy*), dimana amplitudo gelombang meningkat karena kenaikan kecepatan gas.
5. Aliran gelembung (*bubble*), dimana gelembung gas cenderung mengalir pada bagian atas pipa.
6. Aliran cincin (*annular*), sama dengan pipa vertikal hanya *liquid film* lebih tebal di dasar pipa dari pada di bagian atas.

#### **2.4 Peta Pola Aliran**

Kumpulan data penurunan tekanan pada penelitian ini untuk membedakan pola aliran yang dihasilkan dengan memvariasikan laju aliran gas pada laju aliran cairan yang konstan. Peta pola aliran dalam hal fasa kecepatan *superficial* yang diperoleh dalam penelitian ini untuk aliran vertikal kebawah. Untuk nilai kecepatan *superficial* yang rendah dan sedang hingga tinggi kecepatan gas *superficial* jatuh dengan pola aliran selaput (*film*) dan berbentuk gelang (*annular*) diteliti pada kecepatan cairan menengah hingga tinggi meningkat pada kecepatan gas *superficial* bergeser dari pola gelembung ke siput (*slug*) ke buih dan terakhir dari buih ke bentuk gelang (*annular*). Hal ini dibuktikan dari peta pola aliran ini dan gambar pola aliran yang untuk rezim aliran bentuk gelang (*annular*) sebagai hasil dari laju gas tinggi dan aliran cairan, kedua fasa gas dan cair berkontribusi secara signifikan terhadap penurunan tekanan akibat gesekan. Sedangkan pada

kasus penurunan tekanan akibat gesekan pada aliran gelembung pada dasarnya karena aliran cairan (laju cairan tinggi dan aliran gas rendah). Berbagai jenis penurunan tekanan akibat gesekan dengan laju aliran cairan yang bervariasi dan laju aliran gas berhubungan dengan pola aliran individual akan dibahas pada sesi selanjutnya.

## **2.5 Fraksi Hampa**

Menurut Raldi A K dan Sasanti P (1994) fraksi hampa dapat didefinisikan sebagai fraksi dari volume saluran yang ditempati oleh fasa gas, dan fraksi dari luas penampang saluran yang ditempati oleh fasa gas.

## **2.6 Pengaruh Diameter Pipa**

Efek yang signifikan dari diameter pipa diteliti terhadap besarnya penurunan tekanan dua fasa akibat gesekan. Atas keterbatasan data yang tertera di literatur, efek ini dianalisis hanya untuk pola aliran *bubbly* dan *annular* untuk tiga diameter pipa yang berbeda. Hal ini diobservasi bahwa penurunan tekanan akibat gesekan meningkat seiring dengan penurunan diameter pipa. Namun, besarnya penurunan tekanan akibat gesekan meningkat dengan meningkatnya laju aliran gas yang diukur pada laju aliran zat cair pada saat keadaan konstan menghasilkan aliran *annular* yang lebih tinggi dibandingkan aliran gelembung

## **2.7 Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*)**

Penurunan tekanan merupakan perubahan tekanan yang terjadi karena aliran dua fasa melalui suatu sistem adalah parameter yang terpenting dalam perancangan,

baik untuk sistem adiabatik maupun sistem dengan perubahan fasa seperti ketel dan kondensor.

Beberapa faktor yang mengakibatkan penurunan tekanan:

- 1) Kecepatan aliran.
- 2) Kekasaran permukaan.
- 3) Panjang pipa .
- 4) Diameter pipa .
- 5) Hambatan aliran akibat gesekan pada dinding pipa.
- 6) Perubahan kecepatan fluida.
- 7) Beda ketinggian.

Tidak ada korelasi umum untuk penurunan dua fasa yang akurat karena persamaan yang ada masing-masing mewakili kondisi suatu sifat fisik tertentu, walaupun demikian untuk mendapatkan nilai penurunan tekanan dilakukan pendekatan seperti aliran di anggap homogen dan terpisah.

Dalam penelitian ini aliran dua fasa dianggap homogen dengan kecepatan masing-masing fasa sama dan tercampur secara baik.

Dari penurunan rumus dengan Metode Aliran *Homogeneous* maka di dapatkan persamaan penurunan tekanan aliran dua fasa:

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{static}} + \Delta P_{\text{mom}} + \Delta P_{\text{frict}}$$

Dimana :

$\Delta P_{\text{total}}$  = Penurunan Tekanan Total

$\Delta P_{\text{static}}$  = Penurunan Akibat Statik

$\Delta P_{\text{mom}}$  = Penurunan Akibat Momentum

$\Delta P_{\text{frict}}$  = Penurunan Akibat Gesekan



Penurunan tekanan static dalam aliran dua fasa Homogeneous adalah:

$$\Delta P_{\text{static}} = \rho_H g H \sin \theta$$

Dengan:

$$\rho_H = \text{berat jenis (kg/m}^3\text{)}$$

$$g = \text{percepatan gravitasi (m/s}^2\text{)}$$

$$H = \text{panjang pipa (m)}$$

$$\sin \theta = \text{sudut}$$

$$\rho_H = \rho_L (1 - \epsilon_H) + \rho_G \epsilon_H$$

Dengan:

$$\rho_L = \text{berat jenis air (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_G = \text{berat jenis udara (kg/m}^3\text{)}$$

$$\epsilon_H = \frac{1}{1 + \left( \frac{u_G}{u_L} \frac{(1-x)\rho_G}{x\rho_L} \right)}$$

Dengan :

$$\frac{u_G}{u_L} = 1$$

$$\rho_L = \text{berat jenis air (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_G = \text{berat jenis udara (kg/m}^3\text{)}$$

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L}$$

x = kualitas udara dalam aliran

$$\dot{m}_G \text{ atau } \dot{m}_L = \rho \cdot Q$$

$$\rho = \text{Massa jenis (kg/m}^3\text{)}$$

Q = Debit aliran air atau udara (m<sup>3</sup>/s)

$$\Delta P_{\text{mom}} = d(\dot{m}_{\text{total}} / \rho H)$$

Dengan :

d = diameter pipa (m)

$$\dot{m}_{\text{total}}^2 = \dot{m}_G + \dot{m}_L$$

$$\Delta P_{\text{frict}} = \frac{2 f_{\text{tp}} L \dot{m}_{\text{total}}^2}{d \rho_{\text{tp}}}$$

$$f_{\text{tp}} = \frac{0.079}{Re^{0.25}}$$

$$Re = \frac{\dot{m}_{\text{total}} d}{\mu_{\text{tp}}}$$

$$\mu_{\text{tp}} = x \mu_G + (1 - x) \mu_L$$

dimana :

$\mu_G$  = viskositas dinamik udara (kg/m s)

$\mu_L$  = viskositas dinamik air (kg/m s)

## 2.8 Pengaruh Sifat Fluida

Pengaruh sifat fluida pada penurunan tekanan akibat gesekan, utamanya dikarenakan viskositas fluida yang menggunakan efek gesekan pada dinding pipa dan pada permukaan gas cair. Penurunan tekanan dua fasa akibat gesekan meningkat secara signifikan dengan peningkatan konsentrasi *gliserin*. peningkatan

viskositas fluida. Variabel memungkinkan lainnya yang dapat mempengaruhi penurunan tekanan akibat gesekan adalah density/berat jenis fluida dan ketegangan permukaan secara berurutan. Aliran gelembung pada aliran vertikal kebawah dipengaruhi oleh interaksi antara daya apung, gravitasi, dan upaya inersia. Pada pola aliran ini, karenan pengaruh daya apung yang dominan gelembung mencoba mencapai arah atas, melawan arah aliran utama. Jadi hal ini diantisipasi bahwa untuk aliran gelembung kedua masa jenis fluida dan viskositas yang dinamis mempengaruhi penurunan tekanan akibat gesekan. Tetapi, sebagai perlintasan pola aliran ke rezim aliran *annular*, pengaruh massa jenis tidak ditampakkan dan viskositas fluida yang dinamis berkontribusi semata-mata pada penurunan tekanan akibat gesekan.

## **2.9 Kerangka Berfikir**

Dari teori yang telah dipaparkan, maka kerangka berpikir untuk skripsi penelitian ini adalah “Jika kemiringan pipa berulir dalam dibuat lebih bervariasi (  $0^{\circ}$ -  $50^{\circ}$  dengan perubahan sudut  $10^{\circ}$ ) dan gerakan aliran gelembung mengikuti ulir dalam pada pipa, maka akan menghasilkan penurunan tekanan dua fasa yang dapat diaplikasikan untuk pola aliran gelembung dengan sudut kemiringan pipa  $0^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$ , serta dapat memaksimalkan kinerja boiler dan menghindari terjadinya kerak pada dasar pipa”.

## **2.10 Hipotesis**

Hipotesis pada penelitian ini adalah dengan kemiringan pipa berulir dalam dibuat lebih bervariasi (  $0^{\circ}$ - $50^{\circ}$  dengan perubahan sudut  $10^{\circ}$ ) dan dan gerakan

aliran gelembung mengikuti ulir dalam pada pipa yang sesuai maka akan menghasilkan suatu penurunan tekanan dua fasa yang dapat diaplikasikan untuk pola aliran gelembung dengan sudut kemiringan pipa  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ .

**BAB III**  
**METODE PENELITIAN**

**3.1 Tempat dan Waktu Penelitian**

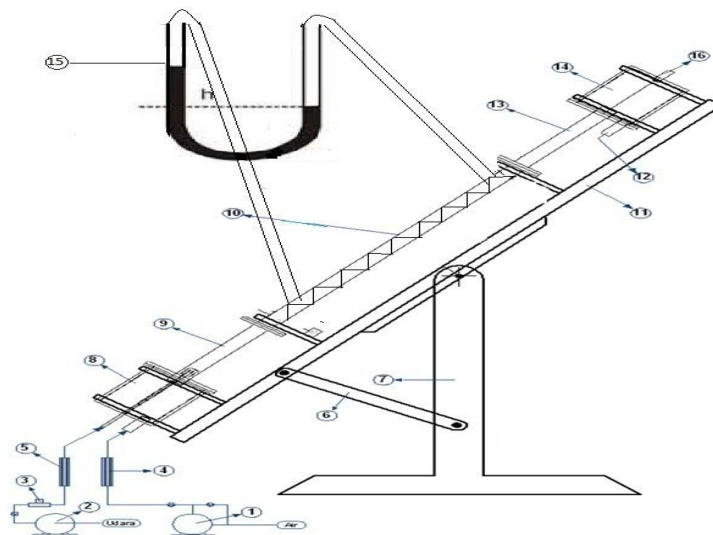
Penelitian ini dilakukan di laboratorium otomotif ( konversi energi ) Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta. Adapun waktu penelitian ini dimulai dari bulan April hingga Juli 2014.

| No         | Kegiatan  | Bulan |     |      |      |
|------------|---|-------|-----|------|------|
|            |   | April | Mei | Juni | Juli |
| <b>I</b>   | <b>Tahapan Persiapan</b>  |       |     |      |      |
| 1          | Mempersiapkan Bahan Penelitian  |       |     |      |      |
| 2          | Membuat Instalasi Penelitian  |       |     |      |      |
| 3          | Pengujian Instalasi Penelitian  |       |     |      |      |
| <b>II</b>  | <b>Tahapan Pelaksanaan Penelitian</b>   |       |     |      |      |
|            | di Eksperimental <i>Pressure Drop</i> Aliran Gelembung (Air – Udara) Pada Pipa Berulir Dalam Dengan Kemiringan Sudut $0^0 - 50^0$ |       |     |      |      |
| <b>III</b> | <b>Tahapan Pengolahan Hasil Penelitian</b>  |       |     |      |      |
|            | Pengolahan Data Hasil Penelitian  |       |     |      |      |
| <b>IV</b>  | <b>Tahapan Penyusunan Laporan Akhir Hasil Penelitian</b>  |       |     |      |      |
|            | Penyusunan Laporan Akhir  |       |     |      |      |

### 3.2 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium. Peneliti merancang desain seksi pipa uji yang kemudian dibuat dalam bentuk nyata yang akan digunakan sebagai media penelitian.

#### Skema Seksi Uji



Keterangan:

- |                           |                             |                          |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1. Pompa air              | 7. Tiang penyangga          | 13. Pipa transparan atas |
| 2. Kompresor              | 8. <i>Mixer</i> (udara-air) | 14. Separator            |
| 3. Regulator udara        | 9. Pipa transparan bawah    | 15. <i>U Tube</i>        |
| 4. <i>Flowmeter</i> air   | 10. Pegas                   | 16. Saluran keluar udara |
| 5. <i>Flowmeter</i> udara | 11. Rangka penguji          |                          |
| 6. Siku penyangga         | 12. Saluran keluar air      |                          |

### 3.3 Bahan Yang Digunakan

Bahan yang digunakan meliputi air ( H<sub>2</sub>O ) yang diambil dari kran yang berada di laboratorium jurusan otomotif dan udara dari kompresor.

### 3.4 Alat Yang Digunakan

Peralatan yang digunakan terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain:

1. Kompresor, yang memiliki spesifikasi sebagai berikut :

PUMA

Tekanan air maksimum = 8 bar

Debit maksimum = 80 Lpm

Berat = 18 kg

Motor Listrik = 0,5 KW / 0,75 PS

V / Hz / PH = 220 / 50 / 1

2. Pompa air yang digunakan untuk memompa air memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Shimizu model No. PS-128 BIT

Max capacity = 30 liter/ menit

Total Head = 333 Mtr

Output = 125 Watts

V / Hz / PH = 220 / 50 / 1

3. Pengukur tekanan udara ( *air flow meter* ) tipe DWYER dengan jenis bola glass untuk mengukur debit udara yang mengalir ke dalam seksi uji.

4. Pengukur tekanan air ( *water flow meter* ) merk untuk mengukur debit air yang mengalir dalam seksi uji.
5. *SMC air regulator* tipe AR 210 untuk mengatur debit udara.
6. Tabung *mixer* terbuat dari resin cor , untuk mencampur air dan udara sehingga diperoleh aliran gelembung.
7. Tabung separator yang terbuat dari resin cor , untuk memisahkan air dan udara keluar dari seksi uji.
8. Pipa akrilik / transparan berdiameter 14 mm untuk mendeteksi pola aliran yang terjadi.
9. *U Tube* berdiameter 5 mm yang di isi dengan air sebagai pembaca tekanan.
10. Pegas

### **3.5 Jalannya Penelitian**

Peneliti membuat skema seksi uji yang merupakan rancangan alat yang akan digunakan untuk penelitian. Udara dan air pada penelitian ini dapat tercampur hingga menjadi berbagai pola aliran sepenuhnya dihasilkan oleh pembangkit gelembung *airator aquarium* yang dipasang pada *mixer*, diharapkan udara yang tercampur dengan air dapat menyebar merata dalam aliran.

Skema ini dirancang selama penelitian untuk meneliti aliran dua fasa penurunan tekanan dalam kemiringan yang berbeda. Dalam penelitian ini, kedudukan pipa yang naik turun dari  $0^0$ -  $50^0$  dengan perubahan sudut  $10^0$ . Pipa yang digunakan dari bahan akrilik transparan dengan penampang lingkaran, dengan total panjang 2000 mm dan diameter internal 14 mm. Di dalam pipa tersebut di masukan pegas yang berfungsi untuk melihat jalannya gelembung.



Bagian pipa yang diuji dibagi menjadi lima segmen yang tersambung satu sama lainnya:

1. Titik masuk dengan panjang 10 cm digunakan untuk stabilisasi aliran setelah ruang pencampuran
2. Titik pengukur satu dengan panjang 66,6 cm digunakan untuk pengukuran *pressure drop* di pasang sebuah ujung pipa *U Tube* sebagai pembaca tekanan.
3. Titik pengukur dua dengan panjang 66,6 cm untuk melihat pola aliran yang terbentuk.
4. Titik pengukur tiga dengan panjang 66,6 cm digunakan untuk pengukuran *pressure drop* di pasang sebuah *U tube* sebagai pembaca tekanan.
5. Titik keluar dengan panjang 10 cm digunakan untuk pembuangan air dan udara.

Untuk memeriksa bahwa peralatan bekerja dengan benar, terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan peralatan dengan percobaan aliran satu fasa dengan menggunakan air untuk memeriksa kebocoran peralatan. Air tersebut dialirkan menggunakan pompa air melalui lubang *inlet* hingga keluar di lubang *outlet*. Jika tidak terjadi kebocoran maka, penelitian dapat dilanjutkan.

Bila telah tercapai kondisi yang stabil secara keseluruhan, yang ditandai dengan pembacaan tekanan oleh *U tube* yang konstan setelah ditunggu sekitar 3 menit. Selanjutnya mulai dilakukan pengambilan gambar pada setiap spesimen uji dan pencatatan data-data penurunan tekanan pada setiap perubahan sudut, debit

air dan volume udara dengan menggunakan data tekanan yang terbaca pada *U Tube*.

### **3.6 Variabel**

Variabel yang diukur dalam penelitian ini antara lain :

1. Debit air diukur meggunakan *flowmeter* air.
2. Debit udara diukur menggunakan *flowmeter* udara
3. Penurunan tekanan pada masing-masing titik penurunan (dari  $0^0$ -  $50^0$  dengan perubahan sudut  $10^0$ ) menggunakan *U Tube*.
4. Gerakan aliran gelembung yang terbentuk pada masing-masing perpindahan sudut, tekanan air dan tekanan udara

### **3.7 Analisis Data**

Pola aliran yang terbentuk pada setiap perubahan sudut, debit udara dan debit air di perhatikan pola alirannya. Selanjutnya dibandingkan dengan data tekanan yang di tunjukkan oleh *U Tube* sehingga dapat ditentukan jenis alirannya dan penurunan tekanan yang terjadi pada setiap kondisi kenaikan sudut, perubahan volume udara dan debit air dengan Metode Aliran *Homogeneous*

## **BAB IV**

### **HASIL PENELITIAN**

Penelitian eksperimental *pressure drop* pada aliran dua fasa (air-udara) dengan pola aliran gelembung pada sudut  $0^0$ -  $50^0$  dengan perubahan sudut  $10^0$  pada pipa berulir dalam yang dimiringkan menghasilkan beberapa analisa sebagai berikut:

1. Perubahan bentuk dan gerakan aliran gelembung antar spesimen uji.
2. Pengaruh penambahan debit udara terhadap bentuk dan gerakan aliran gelembung.
3. Perubahan penambahan debit air terhadap bentuk dan gerakan aliran gelembung.
4. Pengaruh perubahan sudut terhadap bentuk dan gerakan aliran gelembung.
5. *Pressure drop*.

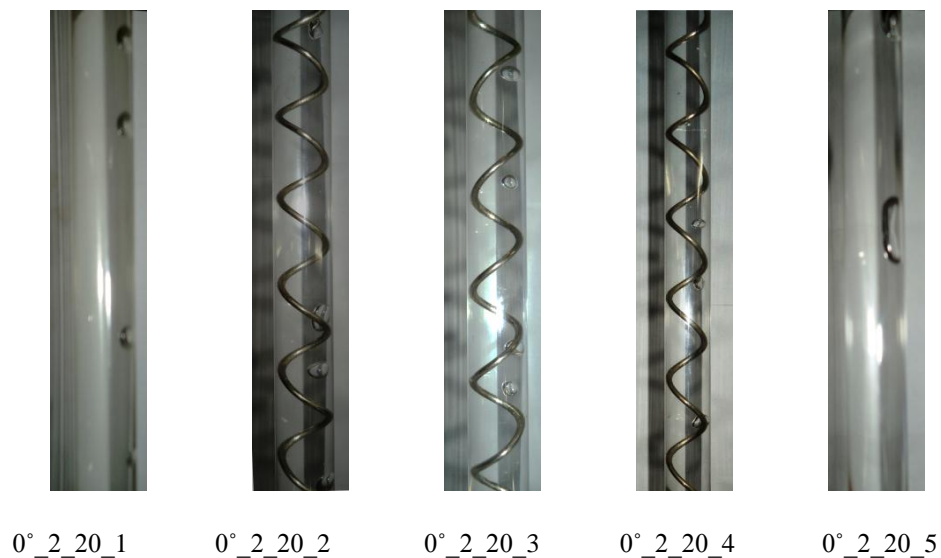
#### **4.1. Perubahan Bentuk dan Gerakan Aliran Gelembung Antar Spesimen Uji Dengan Kondisi Sudut, Debit Air dan Debit Udara Yang Tetap.**

Bentuk gelembung pada kondisi posisi sudut kemiringan pipa ulir dalam tetap, debit air dan debit udara tetap, terjadi perubahan bentuk yang cukup signifikan mulai dari bagian *input* (masukan) hingga bagian *output* (keluaran). Pada bagian *input*, kondisi gelembung cenderung kecil dengan jumlah yang cukup banyak dan pola aliran gelembung beriringan berada diatas pipa. Pada bagian

spesimen uji 1,2 dan 3, gelembung mengalami perubahan, yaitu bertambah besar jumlahnya berkurang menjadi semakin sedikit dan pada kondisi ini gelembung bergerak naik turun dikarenakan terkena ulir dalam pada pipi uji.

Pada bagian *output*, gelembung semakin lebih membesar. Terjadi tabrakan yang menyebabkan bersatunya gelembung yang satu dengan yang lain. Hal tersebut terjadi karena pipa dalam kondisi horisontal sehingga terjadi gesekan antara aliran debit air dengan dinding pipa yang membuat debit air melambat sementara itu debit udara tetap. Perlambatan aliran air ini menyebabkan bentuk gelembung dari bagian *input* hingga bagian *output* mengalami perubahan ukuran dan perubahan kuantitas.

Pada sudut  $0^\circ$  dengan debit udara 20 cc/menit dan debit air 2 liter/menit.



Gambar 4.1 Perubahan bentuk gelembung antar spesimen uji pada kondisi posisi sudut spesimen uji  $0^\circ$ , debit air 2 LPM dan debit udara 20 cc/menit yang tetap.

## 4.2. Pengaruh Penambahan Debit Udara Terhadap Bentuk dan Gerakan Aliran Gelembung Dengan Kondisi Debit Air dan Posisi Sudut Tetap.

4.2.1 Pada sudut  $0^\circ$  dan debit air 2 LPM dengan perubahan debit udara 20 cc/menit, 40 cc/menit dan 60 cc/menit



$0^\circ\_2\_20\_2$



$0^\circ\_2\_40\_2$



$0^\circ\_2\_60\_2$

Gambar 4.2 . Pengaruh penambahan debit udara 20 cc/menit, 40 cc/menit dan 60 cc/menit terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit air 2 LPM dan posisi sudut segmen pada  $0^\circ$ .

Pada sudut  $0^\circ$  dan penambahan debit udara yang bertahap terjadi perubahan bentuk gelembung yang cenderung sedikit membesar. Selain itu, semakin besar penambahan debit udara, jumlah gelembung juga semakin banyak. Hal tersebut dapat terjadi karena dengan bertambahnya debit udara maka kecepatan gelembung mengalir di dalam pipa spesimen uji juga semakin cepat.

Sehingga gelembung akan bertabrakan antara satu dengan yang lain yang membuat gelembung menyatu. Pada pertambahan debit udara yang lebih tinggi lagi terjadi tabrakan -antar gelembung yang lebih sering dan menyatu sehingga membuat gelembung cenderung bertambah besar dan bertambah banyak. Pada

Kondisi ini gerakan aliran gelembung naik turun dikarenakan terkena ulir dalam pada pipa uji.

4.2.2 Pada sudut  $20^\circ$  dan debit air 4 LPM dengan perubahan debit udara 20 cc/menit, 40 cc/menit dan 60 cc/menit.



20°\_4\_20\_2



20°\_4\_40\_2

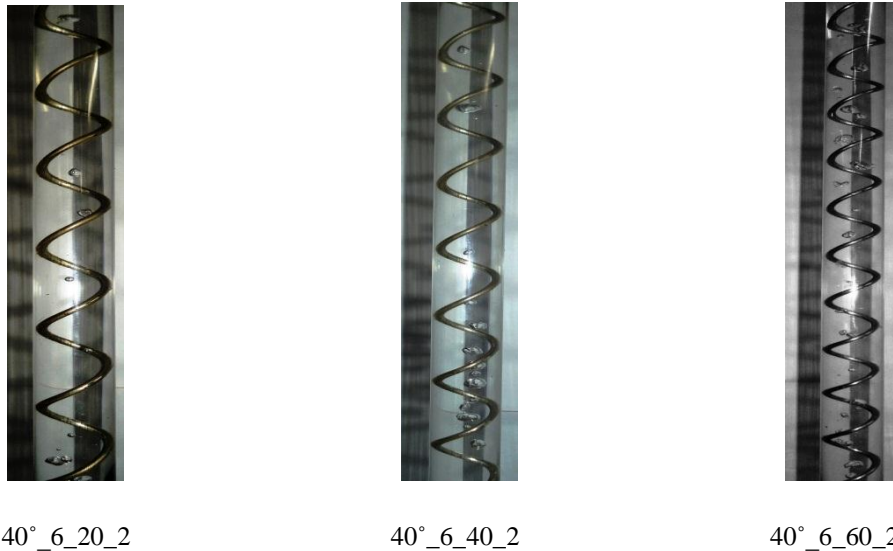


20°\_4\_60\_2

Gambar 4.3. Pengaruh penambahan debit udara 20,40,60 (cc/menit) terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit air 4 LPM dan posisi sudut segmen pada  $20^\circ$ .

Pada posisi spesimen uji berada pada sudut  $20^\circ$  di atas bentuk gelembung semakin banyak seiring dengan penambahan debit udara hal ini disebabkan oleh kecepatan aliran debit udara yang mengalir pada spesimen uji cenderung lebih tinggi dibandingkan kecepatan debit air sehingga terjadi tabrakan antar gelembung, menyatu dan membesar. Sementara itu gerakan aliran gelembung pada debit air mengikuti ulir pada pipa uji.

4.2.3 Pada sudut  $40^\circ$  dan debit air 6 LPM dengan perubahan debit udara 20 cc/menit, 40 cc/menit dan 60 cc/menit.

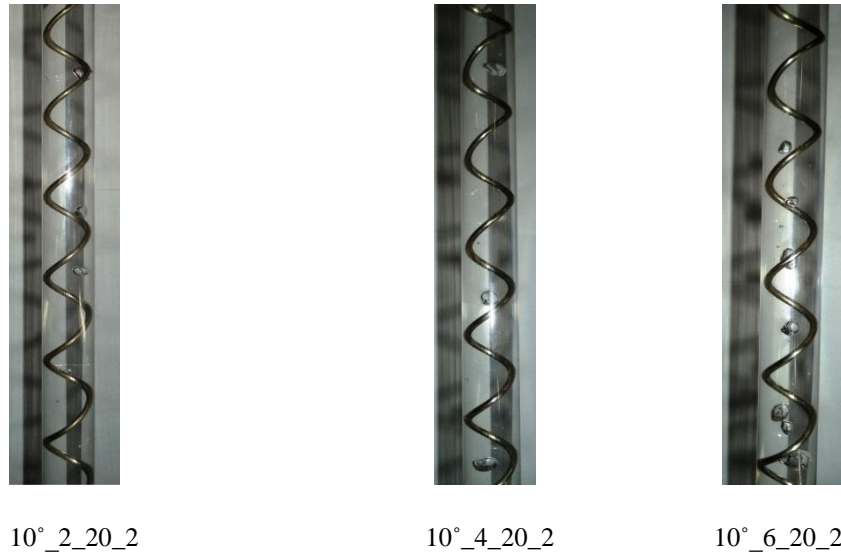


Gambar 4.4. Pengaruh penambahan debit udara 20 cc/menit, 40 cc/menit dan 60 cc/menit terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit air 6 LPM dan posisi sudut segmen pada  $40^\circ$ .

Pada posisi spesimen uji berada pada sudut  $40^\circ$  di atas menunjukkan bentuk gelembung semakin membesar seiring dengan penambahan debit udara hal ini di sebabkan oleh kecepatan aliran debit udara di dalam spesimen uji yang lebih tinggi dibandingkan kecepatan debit air. Pada penambahan debit udara berikutnya gelembung yang terbentuk semakin membesar sehingga terjadi tabrakan antar gelembung dan menyatu. Sementara itu gerakan aliran gelembung pada debit air mengikuti ulir pada pipa uji.

### 4.3 Pengaruh Penambahan Debit Air Terhadap Bentuk Gelembung Dengan Kondisi Debit Udara Dan Posisi Sudut Seksi Uji Yang Tetap.

4.3.1 Pada sudut  $10^\circ$  dan debit udara  $20 \text{ cm}^3/\text{menit}$  dengan perubahan debit air 2 LPM, 4 LPM dan 6 LPM.



Gambar 4.5. Pengaruh penambahan debit air dengan perubahan 2 LPM, 4 LPM dan 6 LPM terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit udara  $20 \text{ cc}/\text{menit}$  dan posisi sudut segmen uji tetap pada  $10^\circ$ .

Pada gambar 4.5 di atas menunjukkan penambahan debit air membuat bentuk gelembung cenderung mengecil. Hal tersebut terjadi dikarenakan kecepatan debit air yang lebih cepat dibandingkan udara, sehingga ruang hampa di dalam pipa semakin terisi air. Pada kondisi ini, gerakan aliran gelembung pada debit air 2 LPM gelembung hanya naik turun dikarenakan terkena ulir dalam pada pipa uji, sedangkan pada debit air 4 LPM dan 6 LPM gerakan aliran gelembung mengikuti ulir dalam pipa uji dikarenakan debit air bertambah .



4.3.2 Pada saat sudut  $30^\circ$  dan debit udara  $40 \text{ cm}^3/\text{menit}$  dengan perubahan debit air 2 LPM, 4 LPM dan 6 LPM.



30°\_2\_40\_2



30°\_4\_40\_2

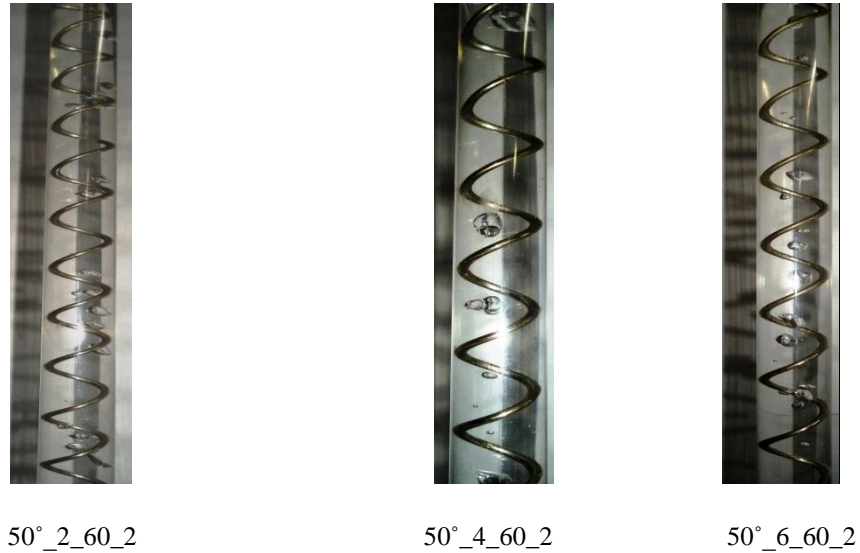


30°\_6\_40\_2

Gambar 4.6. Pengaruh penambahan debit air dengan perubahan 2 LPM, 4 LPM dan 6 LPM terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit udara  $40 \text{ cc}/\text{menit}$  dan posisi sudut segmen uji tetap pada  $30^\circ$ .

Dalam kondisi penambahan debit air ini bentuk gelembung yang terbentuk semakin mengecil pada masing masing penambahan debit air. Hal ini di sebabkan oleh kecepatan debit air yang lebih tinggi dibandingkan debit udara di dalam spesimen uji sehingga gelembung terbawa oleh debit air dan tabrakan antar gelembung. Pada kondisi ini, gerakan aliran gelembung pada debit air 2 LPM gelembung hanya naik turun dikarenakan terkena ulir dalam pada pipa uji, sedangkan pada debit air 4 LPM dan 6 LPM gerakan aliran gelembung mengikuti ulir dalam pipa uji dikarenakan debit air bertambah.

4.3.3 Pada saat sudut  $50^\circ$  dan debit udara  $60 \text{ cm}^3/\text{menit}$  dengan perubahan debit air 2 LPM, 4 LPM dan 6 LPM.

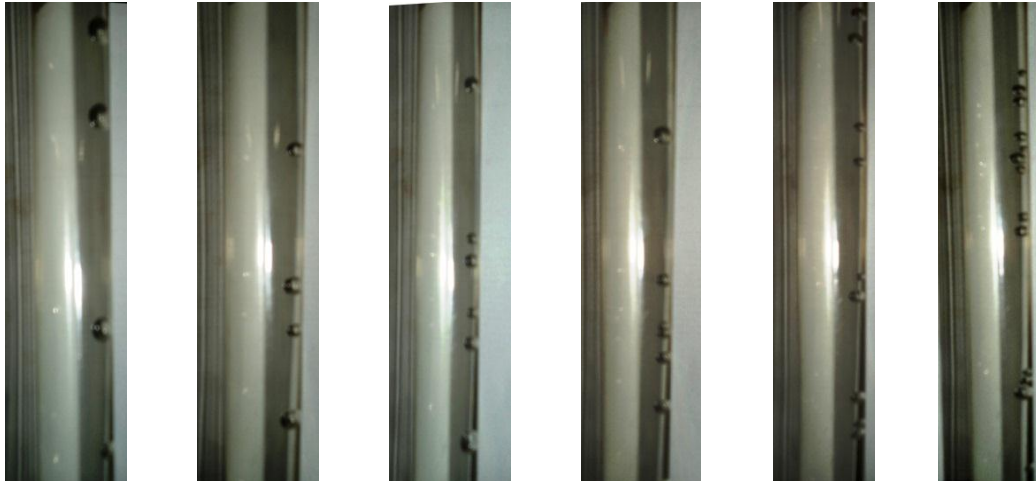


Gambar 4.7 Pengaruh penambahan debit air dengan perubahan 2 LPM, 4 LPM dan 6 LPM terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit udara  $60 \text{ cc}/\text{menit}$  dan posisi sudut segmen uji tetap pada  $50^\circ$ .

Dalam kondisi penambahan debit air ini bentuk gelembung yang terbentuk semakin mengecil dan cenderung signifikan perubahannya. Hal ini disebabkan oleh kecepatan debit air yang lebih tinggi dari pada aliran debit udara didalam spesimen uji. Pada kondisi ini, gerakan aliran gelembung pada debit air 2 LPM gelembung hanya naik turun dikarenakan terkena ulir dalam pada pipa uji, sedangkan pada debit air 4 LPM dan 6 LPM gerakan aliran gelembung mengikuti ulir dalam pipa uji dikarenakan debit air bertambah.

#### 4.4 Pengaruh perubahan sudut spesimen uji terhadap bentuk gelembung dengan kondisi debit udara dan debit air dalam kondisi tetap.

4.4.1. Pada tekanan air 20 cc/menit dan udara 2 LPM pada seksi uji 1



0°\_2\_20\_1    10°\_2\_20\_1    20°\_2\_20\_1    30°\_2\_20\_1    40°\_2\_20\_1    50°\_2\_20\_1

Gambar 4.8 Pengaruh perubahan sudut terhadap bentuk dan sebaran gelembung pada saat debit air dan debit udara tetap.

Pada kondisi tekanan debit air 20 cc/menit dan udara 2 LPM, dimana posisi sudut spesimen uji pipa bervariasi, perubahan bentuk gelembung terbagi menjadi 3 bagian besar, yaitu sudut 0°-10°, 20°- 40° dan 50°.

a. Sudut 0°-10°

Gelembung pada sudut kemiringan pipa 0° cenderung memiliki bentuk yang besar dengan kuantitas yang sedikit. Hal ini disebabkan oleh perbandingan debit udara dan debit air yang cenderung sedikit sehingga mengakibatkan gelembung yang terbentuk cenderung besar.

b. Sudut 20° hingga sudut 40°

Pada sudut 20° hingga sudut 40°, perubahan bentuk gelembung cenderung tidak mengalami perubahan yang cukup signifikan atau bisa dikatakan hampir sama. Hal ini disebabkan karena pada sudut 20° hingga sudut 40° *pressure drop* yang terjadi hampir sama sehingga gelembung yang terbentuk hampir sama antara sudut yang satu dengan yang lain. Bentuk gelembung pada sudut-sudut tersebut berbentuk kecil dengan jumlah yang banyak.

c. Sudut 50°

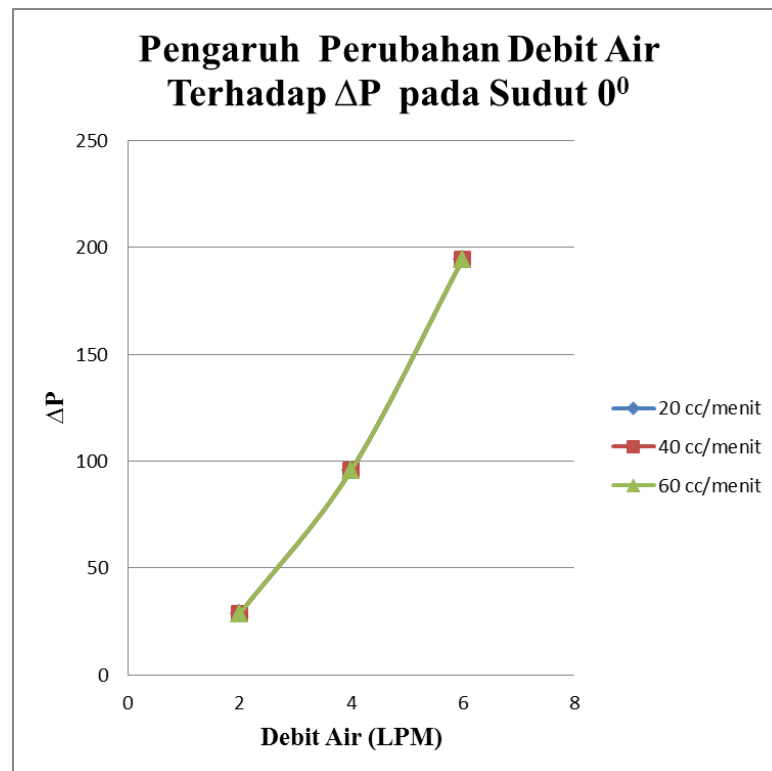
Bentuk gelembung pada kondisi ini mulai mengecil namun jumlahnya bertambah banyak dibandingkan dengan gelembung yang berada pada posisi 0°-40°. Posisi gelembung masih berada di permukaan.

#### **4.5. *Pressure Drop***

4.5.1 Pengaruh perubahan debit Air dan debit Udara terhadap perubahan tekanan.

Pengaruh perubahan debit Air terhadap perubahan tekanan didalam spesimen uji seiring dengan penambahan debit udara pada masing-masing derajat kenaikan sudut spesimen uji terbagi menjadi sebagai berikut:

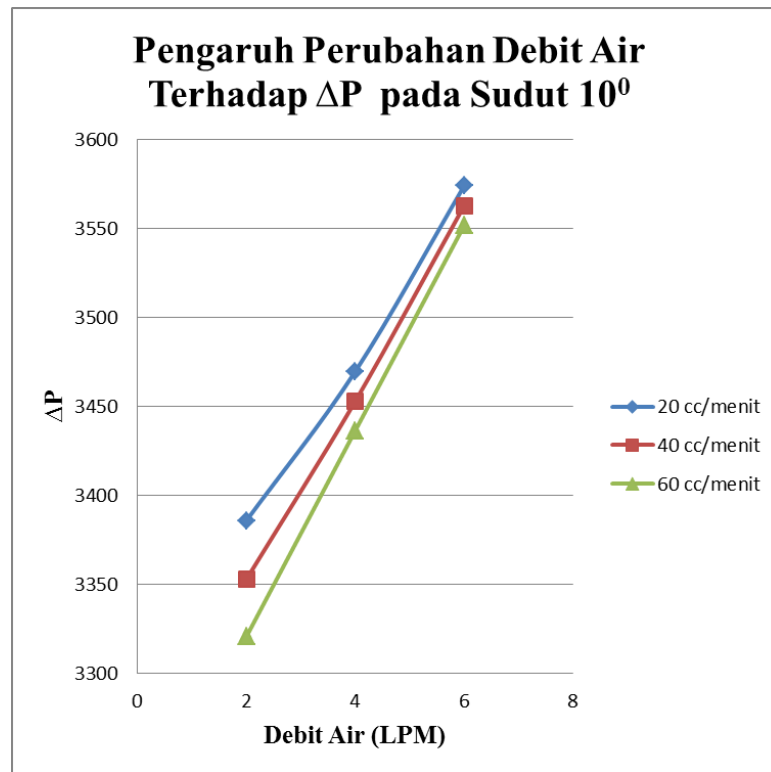
### 1. Sudut 0°



Grafik 4.1 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap  $\Delta P$  Pada Sudut 0°

Dari grafik di atas, terjadi kenaikan *pressure drop*, hal ini disebabkan debit air dan debit udara meningkat sehingga gesekan pada dinding pipa berulir dalam pun meningkat ini menyebabkan *pressure drop* meningkat.

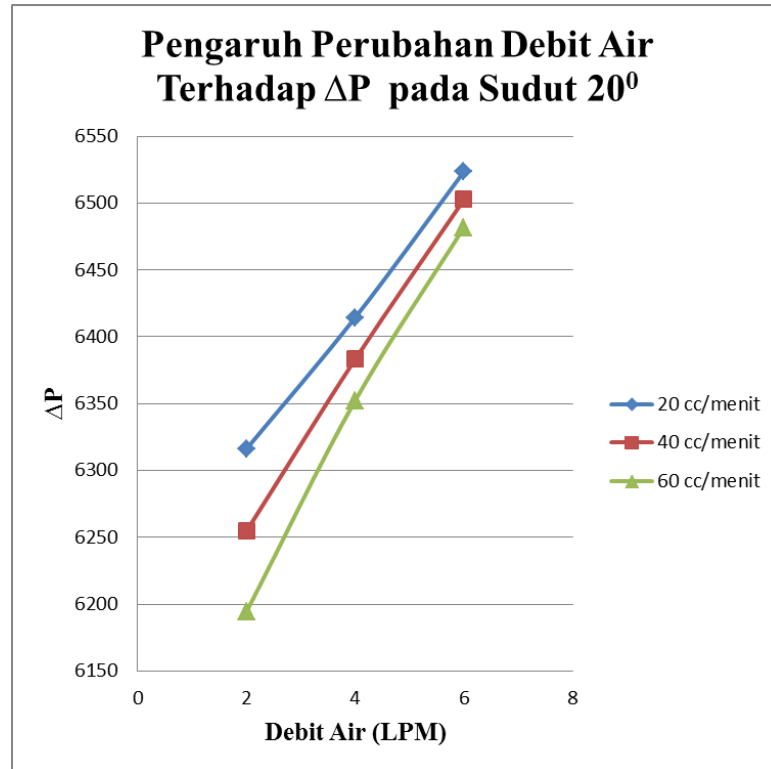
## 2. Sudut 10°



Grafik 4.2 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap  $\Delta P$  Pada Sudut 10°

Dari grafik di atas, terjadi kenaikan *pressure drop*, hal ini disebabkan debit air dan debit udara meningkat sehingga gesekan pada dinding pipa berulir dalam pun meningkat ini menyebabkan *pressure drop* meningkat.

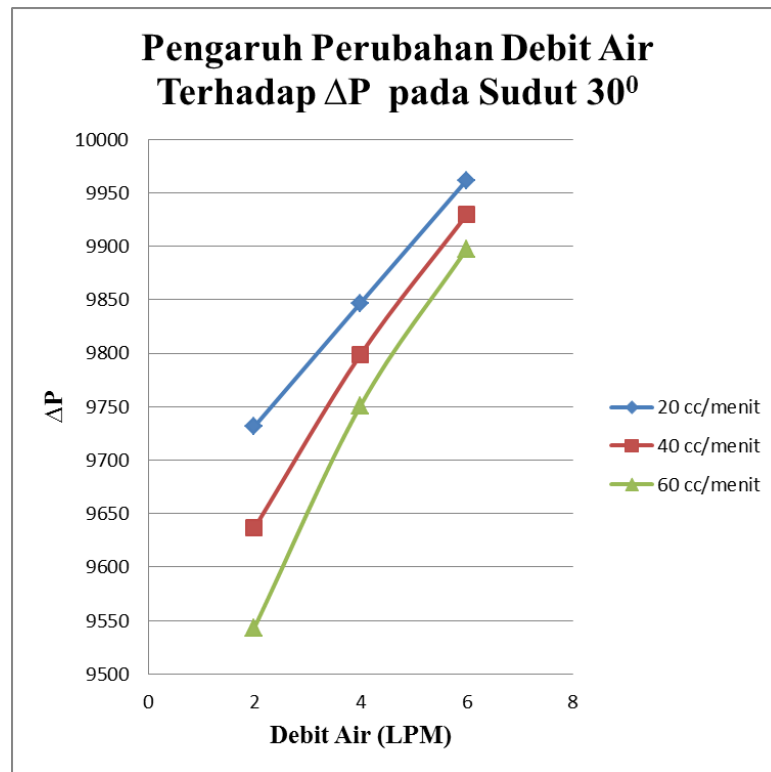
### 3. Sudut 20°



Grafik 4.3 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap  $\Delta P$  Pada Sudut 20°

Dari grafik di atas, terjadi kenaikan *pressure drop*, hal ini disebabkan debit air dan debit udara meningkat sehingga gesekan pada dinding pipa berulir dalam pun meningkat ini menyebabkan *pressure drop* meningkat.

#### 4. Sudut 30°

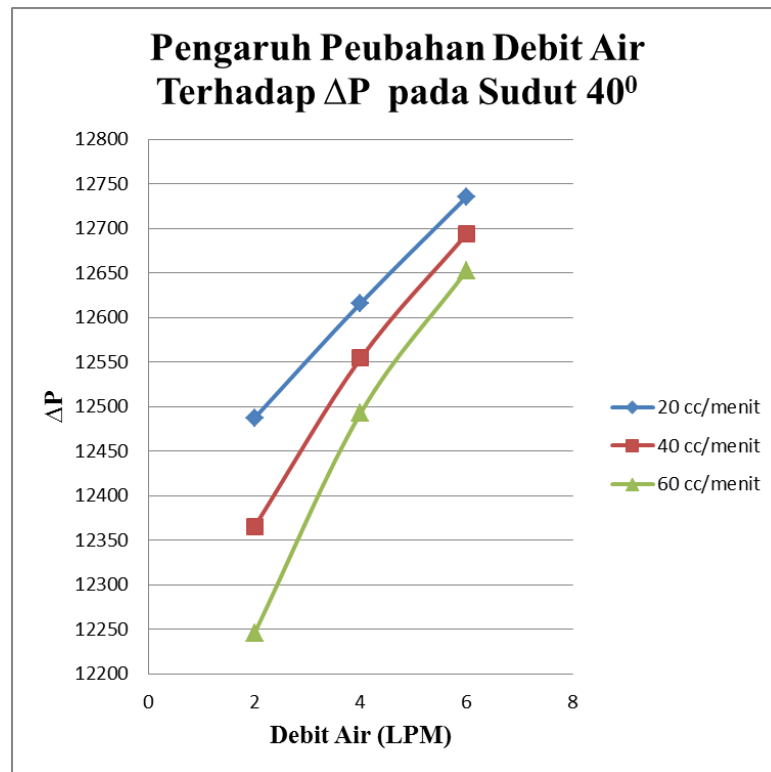


Grafik 4.4 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap  $\Delta P$  Pada Sudut 30°

Dari grafik di atas, terjadi kenaikan *pressure drop*, hal ini disebabkan debit air dan debit udara meningkat sehingga gesekan pada dinding pipa berulir dalam pun meningkat ini menyebabkan *pressure drop* meningkat.



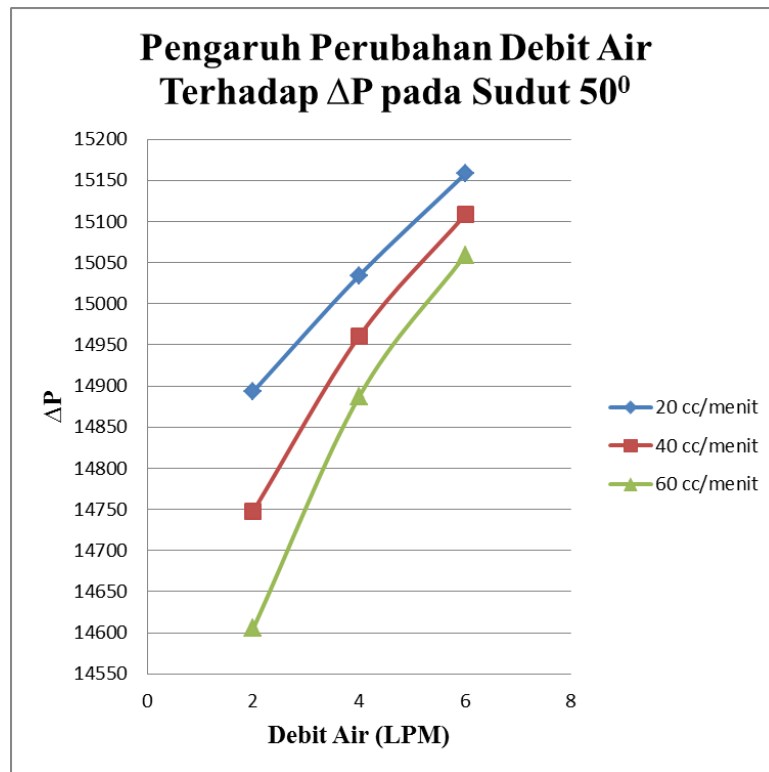
## 5. Sudut 40°



Grafik 4.5 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap  $\Delta P$  Pada Sudut 40°

Dari grafik di atas, terjadi kenaikan *pressure drop*, hal ini disebabkan debit air dan debit udara meningkat sehingga gesekan pada dinding pipa berulir dalam pun meningkat ini menyebabkan *pressure drop* meningkat.

6. Sudut 50°



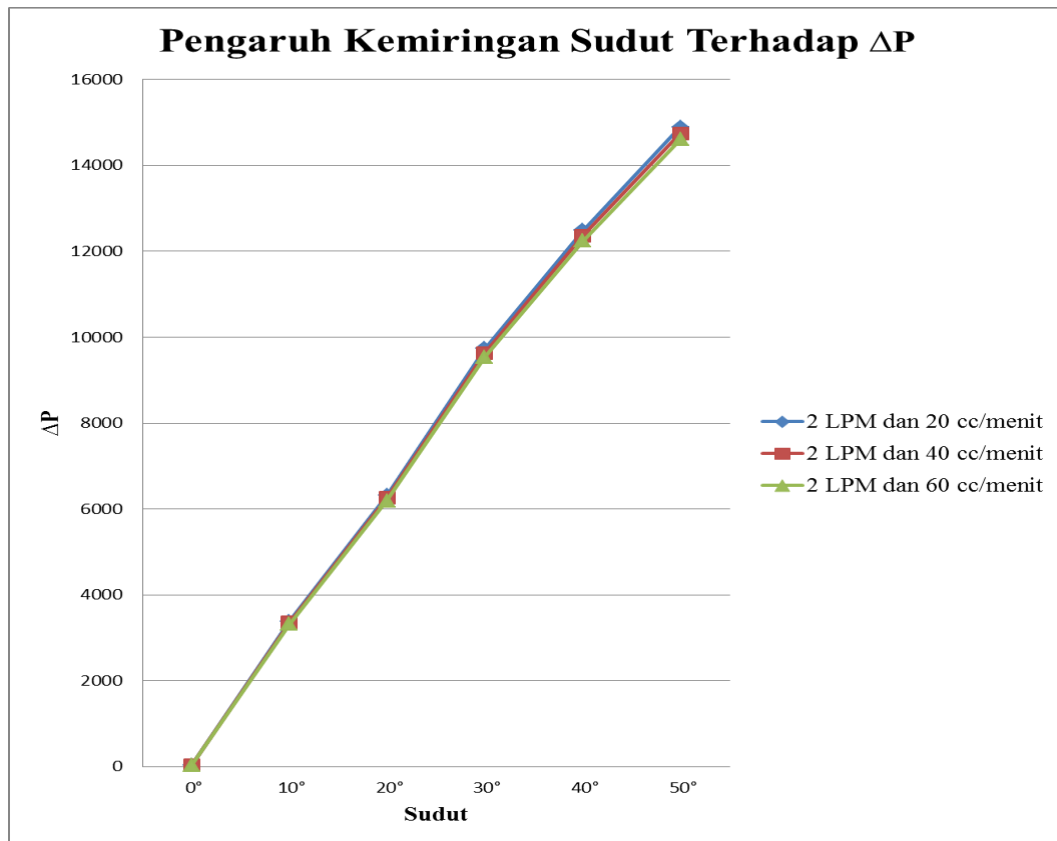
Grafik 4.6 Pengaruh Perubahan Debit Air Terhadap  $\Delta P$  Pada Sudut 50°

Dari grafik di atas, terjadi kenaikan *pressure drop*, hal ini di sebabkan debit air dan debit udara meningkat sehingga gesekan pada dinding pipa berulir dalam pun meningkat ini menyebabkan *pressure drop* meningkat.

4.5.2 Pengaruh Kemiringan Sudut Terhadap *Pressure Drop*  $\Delta P$  Dengan Debit Air Dan Debit Udara Yang Tetap.

1. Pada kondisi debit air 2 LPM dan debit udara 20,40,dan 60 cc/menit.

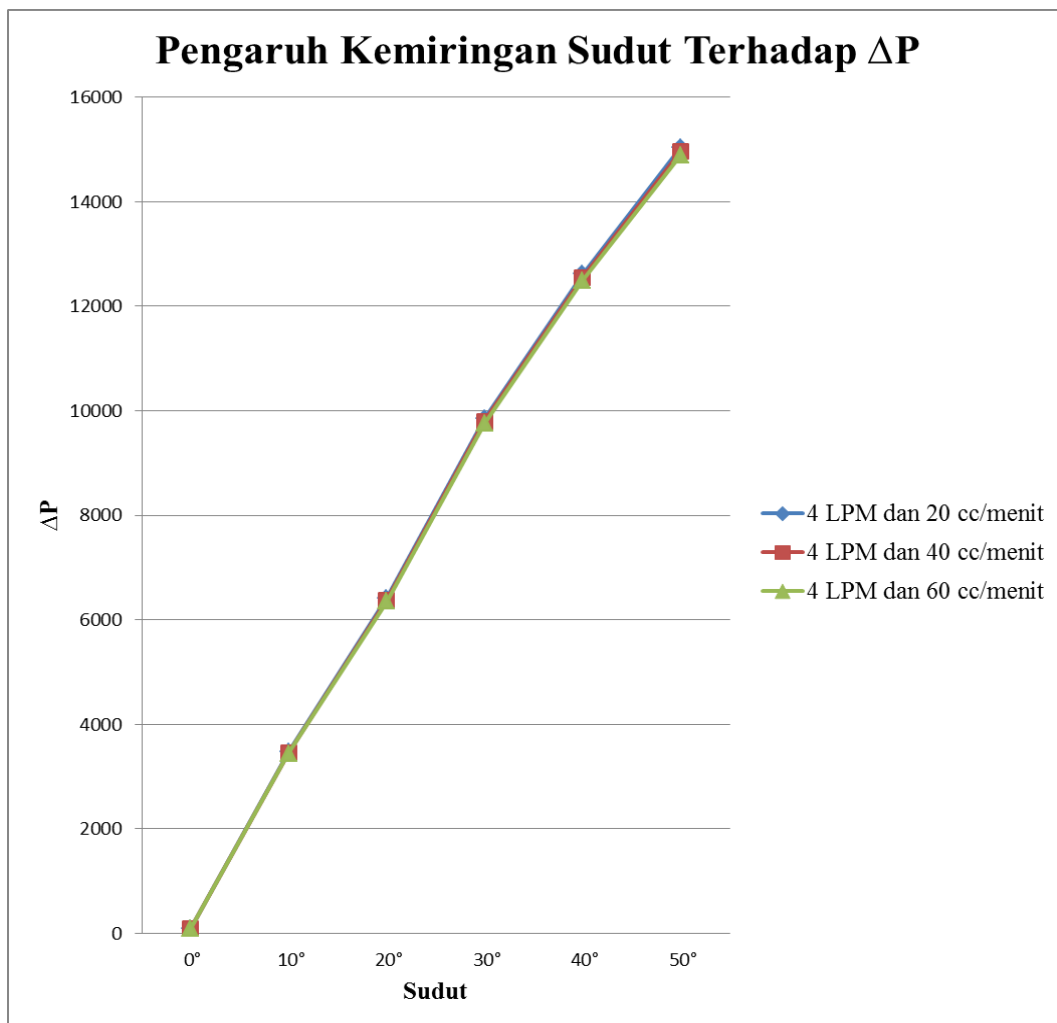
Pada grafik di bawah ini menunjukkan kenaikan *pressure drop* yang terjadi didalam spesimen uji pada kondisi spesimen uji 0°- 50° data tekanan yang terbaca pada *U tube* mengalami kenaikan di keseluruhan perubahan spesimen uji dan kenaikan *pressure drop* diakibatkan faktor gesekan.



Grafik 4.7 Pengaruh Kemiringan Sudut Terhadap  $\Delta P$ .

2. Pada kondisi debit air 4 LPM dan debit udara 20,40,dan 60 cc/menit.

Pada grafik di bawah ini menunjukkan kenaikan *pressure drop* yang terjadi didalam spesimen uji pada kondisi spesimen uji 0°- 50° data tekanan yang terbaca pada *U tube* mengalami kenaikan di keseluruhan perubahan spesimen uji dan kenaikan *pressure drop* diakibatkan faktor gesekan.

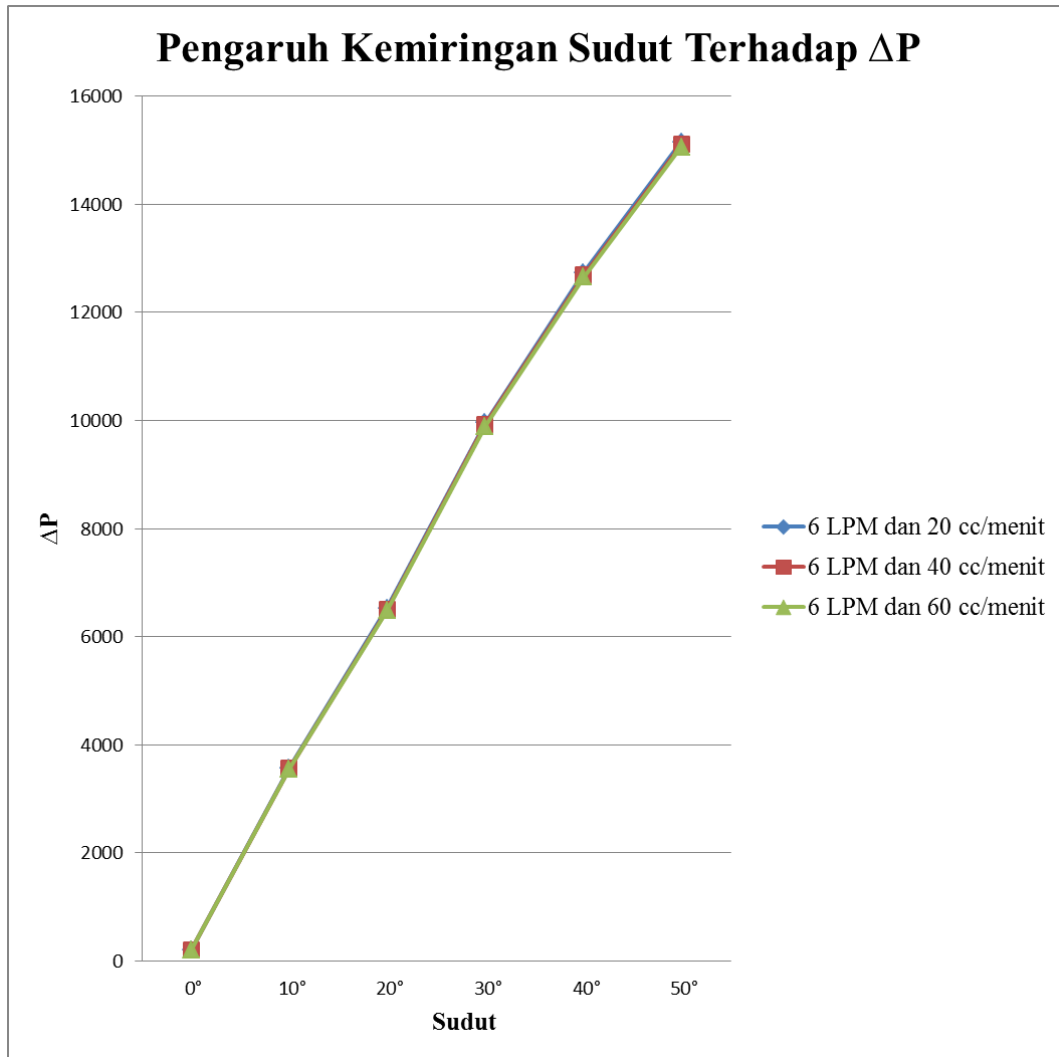


Grafik 4.8 Pengaruh Kemiringan Sudut Terhadap  $\Delta P$ .

3. Pada kondisi debit air 6 LPM dan debit udara 20,40, dan 60 cc/menit.

Pada grafik di bawah ini menunjukkan kenaikan *pressure drop* yang terjadi didalam spesimen uji pada kondisi spesimen uji 0°- 50° data tekanan yang terbaca pada *U tube* mengalami kenaikan di keseluruhan perubahan spesimen uji dan kenaikan *pressure drop* diakibatkan faktor gesekan.

Hal ini di sebabkan tekanan debit udara yang ada di dalam spesimen uji lebih besar dari tekanan debit air yang ada di dalam spesimen uji sehingga tabrakan antar gelembung dan mengakibatkan ukuran gelembung membesar sehingga aliran debit air terhalang oleh gelembung udara yang terbentuk di dalam spesimen uji dan mengalami *pressure drop*.



Grafik 4.9 Pengaruh Kemiringan Sudut Terhadap  $\Delta P$ .

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan.

Dari hasil penelitian eksperimen, analisa perhitungan dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.:

1. *Pressure drop* aliran gelembung (air dan udara) pada pipa berulir dalam menggunakan metode *Homogeneous* diakibatkan oleh kemiringan pipa, ini di tunjukan pada *pressure drop* statis ( $\Delta P_{\text{statis}}$ ) pada sudut  $50^0$ , 6 LPM dan 20 cc/menit sebesar  $14963.8 \text{ N/m}^2$ .
2. Pada kondisi perubahan debit air terhadap debit udara dan posisi spesimen uji yang tetap gelembung yang terbentuk didalam spesimen uji semakin banyak dan kecil, hal ini di sebabkan oleh perbandingan debit air yang lebih besar dari debit udara di dalam spesimen uji menyebabkan gelembung yang terbentuk terbawa oleh debit air sehingga pembesaran gelembung yang di sebabkan oleh tabrakan antar gelembung sukar terjadi. Gerakan aliran gelembung pada debit air 2 LPM hanya naik dan turun yang di sebabkan oleh ulir dalam pipa sedangkan debit air 4 LPM dan 6 LPM gerakan aliran gelembung mengikuti alur pada ulir dalam pipa di sebabkan seiringnya pertambahan debit air.
3. Seiring perubahan debit air dan debit udara *pressure drop* pun semakin tinggi di sebabkan gesekan pada pipa berulir dalam semakin besar ( $\Delta P_{\text{frict}}$ ) dimana gesekan paling besar berada pada sudut  $50^0$ , 6 LPM dan 60 cc/menit sebesar  $194.299 \text{ N/ m}^2$ .

## 5.2 Saran

Dari hasil penelitian ini penulis memiliki saran untuk mereka yang melakukan penelitian lebih lanjut terhadap studi eksperimental kemiringan pipa berulir dalam terhadap *pressure drop* dua fasa pola aliran gelembung. Adapun saran tersebut:

1. Perlu adanya pengembangan penelitian dengan variasi sudut yang lebih beragam seperti pada sudut  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$  dengan perubahan sudut  $10^{\circ}$  dan variasi debit air dan debit udara akan menghasilkan dinamika fluida yang bervariasi agar gelembung yang terbentuk semakin berkarakter.
2. Perlu adanya pengembangan penelitian yang lebih lanjut pada pola aliran yang lain seperti pola aliran cincin, kantung, acak dan kantung uap.
3. Pada penelitian ini, pembacaan *pressure drop* merupakan komponen yang paling vital. Oleh karena itu dibutuhkan alat ukur yang lebih akurat.
4. Perlu adanya pengembangan penelitian dengan jenis zat cair dan gas yang berbeda seperti air dan *refrigeran* sehingga penerapan hasil penelitian dapat lebih luas dan berkembang.



## DAFTAR PUSTAKA

- Adiwibowo, Priyo Heru, 2010, “Eksperimental Karakteristik *Pressure Drop* pada Aliran Dua Fase Gas-Cairan Melewati Pipa Vertikal”, *Dinamika Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Vol.1, pp.65-70
- Burmeister, L. C., 1983, *Convective heat transfer*, Jhon Wiley & Sons. Inc, USA.
- Celata, G. P., Chiaradia, A., Cumo, M., D’annibale, F., 1999, Heat transfer enhancement by air injection in upward heated mixed-convection flow of water, *MF*, 33, 1033-1052.
- Clement C. Tang, A. J. Ghajar, 2007, “Validation of a General Heat Transfer Correlation For Non-Boiling Two Phase Flow With Different Flow Patterns and Pipe Inclination Angles”, 2007 ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference, Canada.
- Collier., John, G., 1972., *Convective Boiling and Condensation.*, Edisi kedua, Mc. Graw-Hill Book International Company., New York.
- Ghajar, A. J., Malhotra, K., Kim, J. Y., dan Trimble, S. A., 2004, “Heat Transfer Measurements and Correlations For Air Water Two-Phase Slug Flow In Horizontal Pipe”, 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, USA.
- Ghajar, A. J., Malhotra, K., Kim, J. Y., dan Trimble, S. A., 2004, “Systematic Heat Transfer Measurements For Air-Water Two-Phase Flow In Horizontal and Slightly Upward Inclined Pipe”, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Brazilian Congress of Termal Sciences and Engineering – ENCIT 2004*, Brazil.
- Koestoer Raldi Artono, 2002, *Aliran dua fasa dan fluks kalor kritis*, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Koestoer, R.A, Proborini, S, 1994, *Perpindahan Kalor Untuk Mahasiswa Teknik*, Salemba Teknik, Jakarta
- Koestoer, R.A, Proborini, S, 1994, *Aliran Dua Fasa Dan Fluks Kalor Kritis*, Salemba Teknik, Jakarta.

Widayana, Gede dan Triyogi Yuwono, 2010,” Studi Eksperimental Dan Numerik Aliran Dua Fase ( Air - Udara ) Melewati Elbow 30° Dari Pipa Vertikal Menuju Pipa Dengan Sudut Kemiringan 60°”

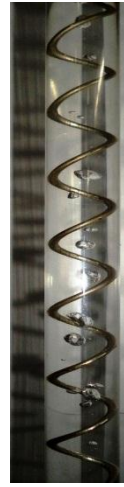
Lampiran - 1 :Keterangan Gambar



0°\_2\_20\_1



0°\_4\_60\_2



0°\_6\_60\_2

0°\_2\_20\_1

Keterangan :

0° (angka pertama) : Menunjukkan posisi derajat spesimen uji

2 (angka kedua) : Menunjukkan besar debit air (LPM)

20 (angka ke tiga) : Menunjukkan besar volume udara (cm<sup>3</sup>/menit)

1 (angka keempat) : Menunjukkan spesimen uji

Lampiran - 2 : Sebaran Pola Aliran Gelembung Pada sudut 0°

Pada debit air 2 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



0°\_2\_20\_1

0°\_2\_20\_2

0°\_2\_20\_3

0°\_2\_20\_4

0°\_2\_20\_5

Pada debit air 2 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



0°\_2\_40\_1

0°\_2\_40\_2

0°\_2\_40\_3

0°\_2\_40\_4

0°\_2\_40\_5

Pada debit air 2 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



0°\_2\_60\_1



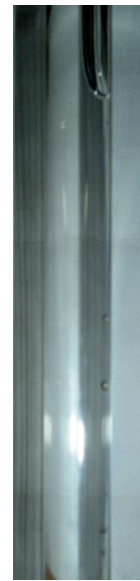
0°\_2\_40\_2



0°\_2\_60\_3



0°\_2\_60\_4



0°\_2\_60\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



0°\_4\_20\_1



0°\_4\_20\_2



0°\_4\_20\_3



0°\_4\_20\_4



0°\_4\_20\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



0°\_4\_40\_1



0°\_4\_40\_2



0°\_4\_40\_3



0°\_4\_40\_4



0°\_4\_40\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



0°\_4\_60\_1



0°\_4\_60\_2



0°\_4\_60\_3



0°\_4\_60\_4



0°\_4\_60\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



0°\_6\_20\_1



0°\_6\_20\_2



0°\_6\_20\_3



0°\_6\_20\_4



0°\_6\_20\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



0°\_6\_40\_1



0°\_6\_40\_2



0°\_6\_40\_3



0°\_6\_40\_4



0°\_6\_40\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/menit



0°\_6\_60\_1



0°\_6\_60\_2



0°\_6\_60\_3



0°\_6\_60\_4



0°\_6\_60\_5



Lampiran - 3: Sebaran Pola Aliran Gelembung Pada sudut 10°

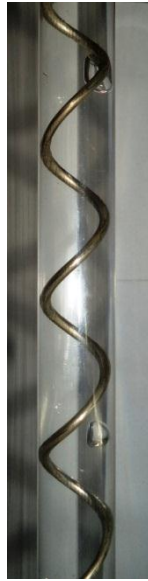
Pada debit air 2 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



10°\_2\_20\_1



10°\_2\_20\_2



10°\_2\_20\_3



10°\_2\_20\_4



10°\_2\_20\_5

Pada debit air 2 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



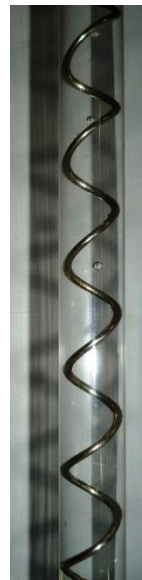
10°\_2\_40\_1



10°\_2\_40\_2



10°\_2\_40\_3



10°\_2\_40\_4



10°\_2\_40\_5

Pada debit air 2 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



10°\_2\_60\_1



10°\_2\_40\_2



10°\_2\_60\_3



10°\_2\_60\_4



10°\_2\_60\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



10°\_4\_20\_1



10°\_4\_20\_2



10°\_4\_20\_3



10°\_4\_20\_4



10°\_4\_20\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



10°\_4\_40\_1



10°\_4\_40\_2



10°\_4\_40\_3



10°\_4\_40\_4



10°\_4\_40\_5

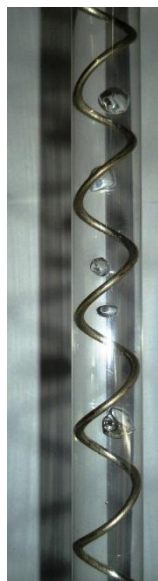
Pada debit air 4 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



10°\_4\_60\_1



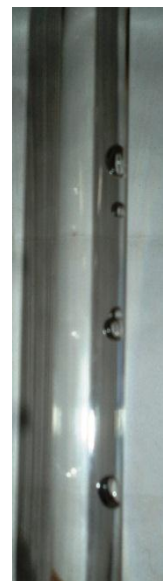
10°\_4\_60\_2



10°\_4\_60\_3



10°\_4\_60\_4



10°\_4\_60\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



10°\_6\_20\_1



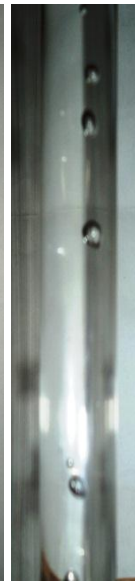
10°\_6\_20\_2



10°\_6\_20\_3



10°\_6\_20\_4



10°\_6\_20\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



10°\_6\_40\_1



10°\_6\_40\_2



10°\_6\_40\_3



10°\_6\_40\_4



10°\_6\_40\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/menit



10°\_6\_60\_1



10°\_6\_60\_2



10°\_6\_60\_3



10°\_6\_60\_4



10°\_6\_60\_5

Lampiran - 4: Sebaran Pola Aliran Gelembung Pada sudut 20°

Pada debit air 2 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



20°\_2\_20\_1



20°\_2\_20\_2



20°\_2\_20\_3



20°\_2\_20\_4



20°\_2\_20\_5

Pada debit air 2 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



20°\_2\_40\_1



20°\_2\_40\_2



20°\_2\_40\_3



20°\_2\_40\_4



20°\_2\_40\_5

Pada debit air 2 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



20°\_2\_60\_1



20°\_2\_40\_2



20°\_2\_60\_3



20°\_2\_60\_4



20°\_2\_60\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



20°\_4\_20\_1



20°\_4\_20\_2



20°\_4\_20\_3



20°\_4\_20\_4



20°\_4\_20\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



20°\_4\_40\_1



20°\_4\_40\_2



20°\_4\_40\_3



20°\_4\_40\_4



20°\_4\_40\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



20°\_4\_60\_1



20°\_4\_60\_2



20°\_4\_60\_3



20°\_4\_60\_4



20°\_4\_60\_5



Pada debit air 6 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



20°\_6\_20\_1



20°\_6\_20\_2



20°\_6\_20\_3



20°\_6\_20\_4



20°\_6\_20\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



20°\_6\_40\_1



20°\_6\_40\_2



20°\_6\_40\_3



20°\_6\_40\_4



20°\_6\_40\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/menit



20°\_6\_60\_1



20°\_6\_60\_2



20°\_6\_60\_3



20°\_6\_60\_4



20°\_6\_60\_5

Lampiran - 5: Sebaran Pola Aliran Gelembung Pada sudut 30°

Pada debit air 2 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



30°\_2\_20\_1



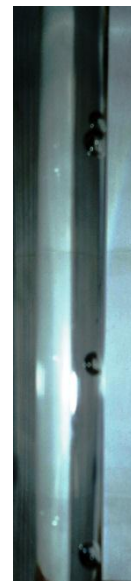
30°\_2\_20\_2



30°\_2\_20\_3



30°\_2\_20\_4



30°\_2\_20\_5

Pada debit air 2 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



30°\_2\_40\_1



30°\_2\_40\_2



30°\_2\_40\_3



30°\_2\_40\_4



30°\_2\_40\_5

Pada debit air 2 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



30°\_2\_60\_1



30°\_2\_40\_2



30°\_2\_60\_3



30°\_2\_60\_4



30°\_2\_60\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



30°\_4\_20\_1



30°\_4\_20\_2



30°\_4\_20\_3



30°\_4\_20\_4



30°\_4\_20\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



30°\_4\_40\_1



30°\_4\_40\_2



30°\_4\_40\_3



30°\_4\_40\_4



30°\_4\_40\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



30°\_4\_60\_1



30°\_4\_60\_2



30°\_4\_60\_3



30°\_4\_60\_4



30°\_4\_60\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



30°\_6\_20\_1



30°\_6\_20\_2



30°\_6\_20\_3



30°\_6\_20\_4



30°\_6\_20\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



30°\_6\_40\_1



30°\_6\_40\_2



30°\_6\_40\_3



30°\_6\_40\_4



30°\_6\_40\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/menit



30°\_6\_60\_1



30°\_6\_60\_2



30°\_6\_60\_3



30°\_6\_60\_4



30°\_6\_60\_5

Lampiran - 6: Sebaran Pola Aliran Gelembung Pada sudut 40°

Pada debit air 2 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



40°\_2\_20\_1



40°\_2\_20\_2



40°\_2\_20\_3



40°\_2\_20\_4

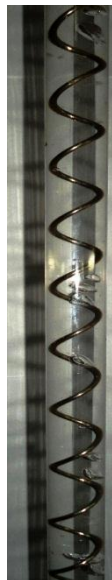


40°\_2\_20\_5

Pada debit air 2 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



40°\_2\_40\_1



40°\_2\_40\_2



40°\_2\_40\_3



40°\_2\_40\_4



40°\_2\_40\_5



Pada debit air 2 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



40°\_2\_60\_1



40°\_2\_40\_2



40°\_2\_60\_3

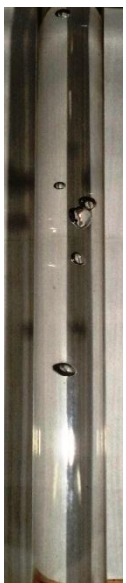


40°\_2\_60\_4



40°\_2\_60\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



40°\_4\_20\_1



40°\_4\_20\_2



40°\_4\_20\_3



40°\_4\_20\_4



40°\_4\_20\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



40°\_4\_40\_1



40°\_4\_40\_2



40°\_4\_40\_3



40°\_4\_40\_4



40°\_4\_40\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



40°\_4\_60\_1



40°\_4\_60\_2



40°\_4\_60\_3



40°\_4\_60\_4



40°\_4\_60\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



40°\_6\_20\_1



40°\_6\_20\_2



40°\_6\_20\_3



40°\_6\_20\_4



40°\_6\_20\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



40°\_6\_40\_1



40°\_6\_40\_2



40°\_6\_40\_3



40°\_6\_40\_4



40°\_6\_40\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/menit



40°\_6\_60\_1



40°\_6\_60\_2



40°\_6\_60\_3



40°\_6\_60\_4



40°\_6\_60\_5

Lampiran - 7: Sebaran Pola Aliran Gelembung Pada sudut 50°

Pada debit air 2 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



50°\_2\_20\_1



50°\_2\_20\_2



50°\_2\_20\_3



50°\_2\_20\_4



50°\_2\_20\_5

Pada debit air 2 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



50°\_2\_40\_1



50°\_2\_40\_2



50°\_2\_40\_3



50°\_2\_40\_4



50°\_2\_40\_5

Pada debit air 2 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



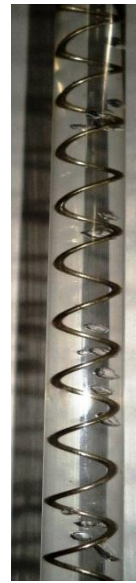
50°\_2\_60\_1



50°\_2\_40\_2



50°\_2\_60\_3



50°\_2\_60\_4



50°\_2\_60\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



50°\_4\_20\_1



50°\_4\_20\_2



50°\_4\_20\_3



50°\_4\_20\_4



50°\_4\_20\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



50°\_4\_40\_1



50°\_4\_40\_2



50°\_4\_40\_3



50°\_4\_40\_4



50°\_4\_40\_5

Pada debit air 4 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/ menit



50°\_4\_60\_1



50°\_4\_60\_2



50°\_4\_60\_3



50°\_4\_60\_4



50°\_4\_60\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 20 cm<sup>3</sup>/ menit



50°\_6\_20\_1



50°\_6\_20\_2



50°\_6\_20\_3



50°\_6\_20\_4



50°\_6\_20\_5

Pada debit air 6 LPM dan debit air 40 cm<sup>3</sup>/ menit



50°\_6\_40\_1



50°\_6\_40\_2



50°\_6\_40\_3



50°\_6\_40\_4



50°\_6\_40\_5



Pada debit air 6 LPM dan debit air 60 cm<sup>3</sup>/menit



50°\_6\_60\_1



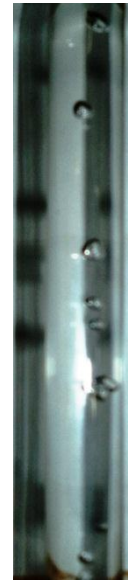
50°\_6\_60\_2



50°\_6\_60\_3



50°\_6\_60\_4



50°\_6\_60\_5

Lampiran – 8: Perhitungan *Pressure Drop*

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{static}} + \Delta P_{\text{mom}} + \Delta P_{\text{frict}}$$

Penurunan tekanan static dalam aliran dua fasa Homogeneous adalah:

$$\Delta P_{\text{static}} = \rho H g H \sin \theta$$

Dengan:

$\rho H$  = berat jenis ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

$H$  = panjang pipa (m)

$\sin \theta$  = sudut

$$\rho H = \rho_L (1 - \epsilon_H) + \rho_G \epsilon_H$$

Dengan:

$\rho_L$  = berat jenis air ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_G$  = berat jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )

$$\epsilon_H = \frac{1}{1 + \left( \frac{u_G}{u_L} \frac{(1-x)\rho_G}{x\rho_L} \right)}$$

Dengan :

$$\frac{u_G}{u_L} = 1$$

$\rho_L$  = berat jenis air ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_G$  = berat jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L}$$

$x$  = kualitas udara dalam aliran

$$\dot{m}_G \text{ atau } \dot{m}_L = \rho \cdot Q$$

$\rho$  = Massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )

$Q$  = Debit aliran air atau udara ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$$\Delta P_{\text{mom}} = d(\dot{m}_{\text{total}} / \rho H)$$

Dengan :

$d$  = diameter pipa (m)

$$\dot{m}_{\text{total}}^2 = \dot{m}_G + \dot{m}_L$$

$$\Delta P_{\text{frict}} = \frac{2 f_{\text{tp}} L \dot{m}_{\text{total}}^2}{d \rho_{\text{tp}}}$$

$$f_{\text{tp}} = \frac{0.079}{\text{Re}^{0.25}}$$

$$\text{Re} = \frac{\dot{m}_{\text{total}} d}{\mu_{\text{tp}}}$$

$$\mu_{\text{tp}} = x \mu_G + (1 - x) \mu_L$$

dimana :

$\mu_G$  = viskositas dinamik udara ( $\text{kg/m s}$ )

$\mu_L$  = viskositas dinamik air ( $\text{kg/m s}$ )

Jika debit air  $0,00000033 \text{ m}^3/\text{s}$ , debit udaranya  $0,000033 \text{ m}^3/\text{s}$ , kemiringan sudutnya  $0^\circ$ , berat jenis air  $1000 \text{ kg/m}^3$ , berat jenis udara  $1,2 \text{ kg/m}^3$ , viskositas dinamik air  $0,000765 \text{ kg/m s}$ , viskositas dinamik udara  $0,00000189 \text{ kg/m s}$ , panjang pipa  $2 \text{ m}$  dan diameter  $0,014 \text{ m}$ .

$$\dot{m}_L = \rho_L Q_L = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,00000033 \text{ m}^3/\text{s} = 0,033 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_G = \rho_G Q_G = 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,000033 \text{ m}^3/\text{s} = 0,0000004 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{\text{total}}^2 = \dot{m}_G + \dot{m}_L = 0,0000004 \text{ kg/s} + 0,033 \text{ kg/s} = 0,0330004 \text{ kg/s}$$

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} = \frac{0,033}{0,033 + 0,0000004} = 0,000012$$

$$\epsilon_H = \frac{1}{1 + \left( \frac{u_G(1-x)\rho_G}{u_L x \rho_L} \right)} = \frac{1}{1 + \left( (1) \frac{(1-0,000012)1000}{0,000012 \cdot 1,2} \right)} = 0,0099$$

$$\rho_H = \rho_L (1 - \epsilon_H) + \rho_G \epsilon_H = 1000 (1 - 0,0099) + 1,2 \cdot 0,0099 = 990,11 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta P_{\text{static}} = \rho_H g H \sin \theta = 990,11 \cdot 9,8 \cdot 2 \cdot \sin 0^\circ = 0 \text{ N/m}^2$$

$$\mu_{tp} = x \mu_G + (1 - x) \mu_L = 0,000012 \cdot 0,00000189 + (1 - 0,000012) 0,000765 = 0,00076 \text{ kg/m s}$$

$$Re = \frac{\dot{m}_{\text{total}} d}{\mu_{tp}} = \frac{0,0330004 \cdot 0,014}{0,00076} = 0,61004$$

$$f_{tp} = \frac{0,079}{Re^{0,25}} = \frac{0,079}{0,61004^{0,25}} = 0,08939$$

$$\Delta P_{\text{frict}} = \frac{2 f_{tp} L \dot{m}_{\text{total}}^2}{d \rho_{tp}} = \frac{2 \cdot 0,08939 \cdot 2 \cdot 0,0330004^2}{0,014 \cdot 1001,2} = 28,4125 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta P_{\text{mom}} = d(\dot{m}_{\text{total}} / \rho_H) = 0,014 (0,0220004 / 990,11) = 0,00000047 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{static}} + \Delta P_{\text{mom}} + \Delta P_{\text{frict}}$$

$$= 0 \text{ N/m}^2 + 0,00000047 \text{ N/m}^2 + 28,4125 \text{ N/m}^2 = 28,41250047 \text{ N/m}^2$$

Untuk data selanjutnya disajikan pada bentuk tabel dibawah ini:

Lampiran 8 : Perhitungan *Pressure Drop*

| Sudut | Debit Air<br>(LPM) | Debit Udara<br>(cc/menit) | Debit Air (v)<br>(m <sup>3</sup> /s) | Debit Udara (v)<br>(m <sup>3</sup> /s) | m air     | m gas     | x        | ε <sub>H</sub> | ρH      | Δp <sub>static</sub> | μ <sub>tp</sub> | Re      | ftp     | ΔP <sub>frict</sub> | ΔP <sub>mom</sub> | ΔP <sub>total</sub> |
|-------|--------------------|---------------------------|--------------------------------------|--|-----------|-----------|----------|----------------|---------|----------------------|-----------------|---------|---------|---------------------|-------------------|---------------------|
| 0°    | 2                  | 20                        | 0.000033                             | 0.000000333                            | 0.03333   | 0.0000004 | 0.000012 | 0.0099         | 990.111 | 0                    | 0.00076         | 0.61004 | 0.08939 | 28.4125             | 0.00000047        | 28.4125             |
|       | 2                  | 40                        | 0.000033                             | 0.000000667                            | 0.03333   | 0.0000008 | 0.000024 | 0.01961        | 980.416 | 0                    | 0.00076         | 0.61005 | 0.08939 | 28.413              | 0.00000048        | 28.413              |
|       | 2                  | 60                        | 0.000033                             | 0.000001000                            | 0.03333   | 0.0000012 | 0.000036 | 0.02913        | 970.909 | 0                    | 0.00076         | 0.61007 | 0.08939 | 28.4135             | 0.00000048        | 28.4135             |
|       | 4                  | 20                        | 0.000067                             | 0.000000333                            | 0.06667   | 0.0000004 | 0.000006 | 0.00498        | 995.031 | 0                    | 0.00076         | 1.22006 | 0.07517 | 95.5669             | 0.00000094        | 95.5669             |
|       | 4                  | 40                        | 0.000067                             | 0.000000667                            | 0.06667   | 0.0000008 | 0.000012 | 0.0099         | 990.111 | 0                    | 0.00076         | 1.22007 | 0.07517 | 95.5677             | 0.00000094        | 95.5677             |
|       | 4                  | 60                        | 0.000067                             | 0.000001000                            | 0.06667   | 0.0000012 | 0.000018 | 0.01478        | 985.239 | 0                    | 0.00076         | 1.22009 | 0.07517 | 95.5686             | 0.00000095        | 95.5686             |
|       | 6                  | 20                        | 0.000100                             | 0.000000333                            | 0.1       | 0.0000004 | 0.000004 | 0.00332        | 996.682 | 0                    | 0.00076         | 1.83008 | 0.06792 | 194.297             | 0.00000140        | 194.297             |
|       | 6                  | 40                        | 0.000100                             | 0.000000667                            | 0.1       | 0.0000008 | 0.000008 | 0.00662        | 993.385 | 0                    | 0.00076         | 1.83009 | 0.06792 | 194.298             | 0.00000141        | 194.298             |
| 10°   | 2                  | 20                        | 0.000033                             | 0.000000333                            | 0.03333   | 0.0000004 | 0.000012 | 0.0099         | 990.111 | 3357.27              | 0.00076         | 0.61004 | 0.08939 | 28.4125             | 0.00000047        | 3385.68             |
|       | 2                  | 40                        | 0.000033                             | 0.000000667                            | 0.03333   | 0.0000008 | 0.000024 | 0.01961        | 980.416 | 3324.39              | 0.00076         | 0.61005 | 0.08939 | 28.413              | 0.00000048        | 3352.81             |
|       | 2                  | 60                        | 0.000033                             | 0.000001000                            | 0.03333   | 0.0000012 | 0.000036 | 0.02913        | 970.909 | 3292.16              | 0.00076         | 0.61007 | 0.08939 | 28.4135             | 0.00000048        | 3320.57             |
|       | 4                  | 20                        | 0.000067                             | 0.000000333                            | 0.06667   | 0.0000004 | 0.000006 | 0.00498        | 995.031 | 3373.95              | 0.00076         | 1.22006 | 0.07517 | 95.5669             | 0.00000094        | 3469.52             |
|       | 4                  | 40                        | 0.000067                             | 0.000000667                            | 0.06667   | 0.0000008 | 0.000012 | 0.0099         | 990.111 | 3357.27              | 0.00076         | 1.22007 | 0.07517 | 95.5677             | 0.00000094        | 3452.84             |
|       | 4                  | 60                        | 0.000067                             | 0.000001000                            | 0.06667   | 0.0000012 | 0.000018 | 0.01478        | 985.239 | 3340.75              | 0.00076         | 1.22009 | 0.07517 | 95.5686             | 0.00000095        | 3436.32             |
|       | 6                  | 20                        | 0.000100                             | 0.000000333                            | 0.1       | 0.0000004 | 0.000004 | 0.00332        | 996.682 | 3379.55              | 0.00076         | 1.83008 | 0.06792 | 194.297             | 0.00000140        | 3573.85             |
|       | 6                  | 40                        | 0.000100                             | 0.000000667                            | 0.1       | 0.0000008 | 0.000008 | 0.00662        | 993.385 | 3368.37              | 0.00076         | 1.83009 | 0.06792 | 194.298             | 0.00000141        | 3562.67             |
| 20°   | 2                  | 20                        | 0.000033                             | 0.000000333                            | 0.03333   | 0.0000004 | 0.000012 | 0.0099         | 990.111 | 6287.6               | 0.00076         | 0.61004 | 0.08939 | 28.4125             | 0.00000047        | 6316.01             |
|       | 2                  | 40                        | 0.000033                             | 0.000000667                            | 0.03333   | 0.0000008 | 0.000024 | 0.01961        | 980.416 | 6226.03              | 0.00076         | 0.61005 | 0.08939 | 28.413              | 0.00000048        | 6254.44             |
|       | 2                  | 60                        | 0.000033                             | 0.000001000                            | 0.03333   | 0.0000012 | 0.000036 | 0.02913        | 970.909 | 6165.66              | 0.00076         | 0.61007 | 0.08939 | 28.4135             | 0.00000048        | 6194.07             |
|       | 4                  | 20                        | 0.000067                             | 0.000000333                            | 0.06667   | 0.0000004 | 0.000006 | 0.00498        | 995.031 | 6318.84              | 0.00076         | 1.22006 | 0.07517 | 95.5669             | 0.00000094        | 6414.41             |
|       | 4                  | 40                        | 0.000067                             | 0.000000667                            | 0.06667   | 0.0000008 | 0.000012 | 0.0099         | 990.111 | 6287.6               | 0.00076         | 1.22007 | 0.07517 | 95.5677             | 0.00000094        | 6383.17             |
|       | 4                  | 60                        | 0.000067                             | 0.000001000                            | 0.06667   | 0.0000012 | 0.000018 | 0.01478        | 985.239 | 6256.66              | 0.00076         | 1.22009 | 0.07517 | 95.5686             | 0.00000095        | 6352.23             |
|       | 6                  | 20                        | 0.000100                             | 0.000000333                            | 0.1       | 0.0000004 | 0.000004 | 0.00332        | 996.682 | 6329.33              | 0.00076         | 1.83008 | 0.06792 | 194.297             | 0.00000140        | 6523.62             |
|       | 6                  | 40                        | 0.000100                             | 0.000000667                            | 0.1       | 0.0000008 | 0.000008 | 0.00662        | 993.385 | 6308.39              | 0.00076         | 1.83009 | 0.06792 | 194.298             | 0.00000141        | 6502.69             |
| 6     | 60                 | 0.000100                  | 0.000001000                          | 0.1                                    | 0.0000012 | 0.000012  | 0.0099   | 990.111        | 6287.6  | 0.00076              | 1.83011         | 0.06792 | 194.299 | 0.00000141          | 6481.9            |                     |

|     |   |    |          |             |         |           |          |         |         |         |         |         |         |         |            |         |
|-----|---|----|----------|-------------|---------|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|---------|
| 30° | 2 | 20 | 0.000033 | 0.000000333 | 0.03333 | 0.0000004 | 0.000012 | 0.0099  | 990.111 | 9703.09 | 0.00076 | 0.61004 | 0.08939 | 28.4125 | 0.00000047 | 9731.5  |
|     | 2 | 40 | 0.000033 | 0.000000667 | 0.03333 | 0.0000008 | 0.000024 | 0.01961 | 980.416 | 9608.07 | 0.00076 | 0.61005 | 0.08939 | 28.413  | 0.00000048 | 9636.49 |
|     | 2 | 60 | 0.000033 | 0.000001000 | 0.03333 | 0.0000012 | 0.000036 | 0.02913 | 970.909 | 9514.91 | 0.00076 | 0.61007 | 0.08939 | 28.4135 | 0.00000048 | 9543.32 |
|     | 4 | 20 | 0.000067 | 0.000000333 | 0.06667 | 0.0000004 | 0.000006 | 0.00498 | 995.031 | 9751.3  | 0.00076 | 1.22006 | 0.07517 | 95.5669 | 0.00000094 | 9846.87 |
|     | 4 | 40 | 0.000067 | 0.000000667 | 0.06667 | 0.0000008 | 0.000012 | 0.0099  | 990.111 | 9703.09 | 0.00076 | 1.22007 | 0.07517 | 95.5677 | 0.00000094 | 9798.65 |
|     | 4 | 60 | 0.000067 | 0.000001000 | 0.06667 | 0.0000012 | 0.000018 | 0.01478 | 985.239 | 9655.35 | 0.00076 | 1.22009 | 0.07517 | 95.5686 | 0.00000095 | 9750.91 |
|     | 6 | 20 | 0.000100 | 0.000000333 | 0.1     | 0.0000004 | 0.000004 | 0.00332 | 996.682 | 9767.48 | 0.00076 | 1.83008 | 0.06792 | 194.297 | 0.00000140 | 9961.78 |
|     | 6 | 40 | 0.000100 | 0.000000667 | 0.1     | 0.0000008 | 0.000008 | 0.00662 | 993.385 | 9735.18 | 0.00076 | 1.83009 | 0.06792 | 194.298 | 0.00000141 | 9929.48 |
|     | 6 | 60 | 0.000100 | 0.000001000 | 0.1     | 0.0000012 | 0.000012 | 0.0099  | 990.111 | 9703.09 | 0.00076 | 1.83011 | 0.06792 | 194.299 | 0.00000141 | 9897.39 |
| 40° | 2 | 20 | 0.000033 | 0.000000333 | 0.03333 | 0.0000004 | 0.000012 | 0.0099  | 990.111 | 12458.8 | 0.00076 | 0.61004 | 0.08939 | 28.4125 | 0.00000047 | 12487.2 |
|     | 2 | 40 | 0.000033 | 0.000000667 | 0.03333 | 0.0000008 | 0.000024 | 0.01961 | 980.416 | 12336.8 | 0.00076 | 0.61005 | 0.08939 | 28.413  | 0.00000048 | 12365.2 |
|     | 2 | 60 | 0.000033 | 0.000001000 | 0.03333 | 0.0000012 | 0.000036 | 0.02913 | 970.909 | 12217.1 | 0.00076 | 0.61007 | 0.08939 | 28.4135 | 0.00000048 | 12245.6 |
|     | 4 | 20 | 0.000067 | 0.000000333 | 0.06667 | 0.0000004 | 0.000006 | 0.00498 | 995.031 | 12520.7 | 0.00076 | 1.22006 | 0.07517 | 95.5669 | 0.00000094 | 12616.2 |
|     | 4 | 40 | 0.000067 | 0.000000667 | 0.06667 | 0.0000008 | 0.000012 | 0.0099  | 990.111 | 12458.8 | 0.00076 | 1.22007 | 0.07517 | 95.5677 | 0.00000094 | 12554.3 |
|     | 4 | 60 | 0.000067 | 0.000001000 | 0.06667 | 0.0000012 | 0.000018 | 0.01478 | 985.239 | 12397.5 | 0.00076 | 1.22009 | 0.07517 | 95.5686 | 0.00000095 | 12493   |
|     | 6 | 20 | 0.000100 | 0.000000333 | 0.1     | 0.0000004 | 0.000004 | 0.00332 | 996.682 | 12541.4 | 0.00076 | 1.83008 | 0.06792 | 194.297 | 0.00000140 | 12735.7 |
|     | 6 | 40 | 0.000100 | 0.000000667 | 0.1     | 0.0000008 | 0.000008 | 0.00662 | 993.385 | 12500   | 0.00076 | 1.83009 | 0.06792 | 194.298 | 0.00000141 | 12694.3 |
|     | 6 | 60 | 0.000100 | 0.000001000 | 0.1     | 0.0000012 | 0.000012 | 0.0099  | 990.111 | 12458.8 | 0.00076 | 1.83011 | 0.06792 | 194.299 | 0.00000141 | 12653.1 |
| 50° | 2 | 20 | 0.000033 | 0.000000333 | 0.03333 | 0.0000004 | 0.000012 | 0.0099  | 990.111 | 14865.1 | 0.00076 | 0.61004 | 0.08939 | 28.4125 | 0.00000047 | 14893.5 |
|     | 2 | 40 | 0.000033 | 0.000000667 | 0.03333 | 0.0000008 | 0.000024 | 0.01961 | 980.416 | 14719.6 | 0.00076 | 0.61005 | 0.08939 | 28.413  | 0.00000048 | 14748   |
|     | 2 | 60 | 0.000033 | 0.000001000 | 0.03333 | 0.0000012 | 0.000036 | 0.02913 | 970.909 | 14576.8 | 0.00076 | 0.61007 | 0.08939 | 28.4135 | 0.00000048 | 14605.2 |
|     | 4 | 20 | 0.000067 | 0.000000333 | 0.06667 | 0.0000004 | 0.000006 | 0.00498 | 995.031 | 14939   | 0.00076 | 1.22006 | 0.07517 | 95.5669 | 0.00000094 | 15034.6 |
|     | 4 | 40 | 0.000067 | 0.000000667 | 0.06667 | 0.0000008 | 0.000012 | 0.0099  | 990.111 | 14865.1 | 0.00076 | 1.22007 | 0.07517 | 95.5677 | 0.00000094 | 14960.7 |
|     | 4 | 60 | 0.000067 | 0.000001000 | 0.06667 | 0.0000012 | 0.000018 | 0.01478 | 985.239 | 14792   | 0.00076 | 1.22009 | 0.07517 | 95.5686 | 0.00000095 | 14887.6 |
|     | 6 | 20 | 0.000100 | 0.000000333 | 0.1     | 0.0000004 | 0.000004 | 0.00332 | 996.682 | 14963.8 | 0.00076 | 1.83008 | 0.06792 | 194.297 | 0.00000140 | 15158.1 |
|     | 6 | 40 | 0.000100 | 0.000000667 | 0.1     | 0.0000008 | 0.000008 | 0.00662 | 993.385 | 14914.3 | 0.00076 | 1.83009 | 0.06792 | 194.298 | 0.00000141 | 15108.6 |
|     | 6 | 60 | 0.000100 | 0.000001000 | 0.1     | 0.0000012 | 0.000012 | 0.0099  | 990.111 | 14865.1 | 0.00076 | 1.83011 | 0.06792 | 194.299 | 0.00000141 | 15059.4 |