



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK ALIRAN AIR DAN
CAMPURAN AIR DAN UDARA PADA PIPA
BERPENAMPANG SEGI EMPAT**

SKRIPSI

RACHMAD HIDAYAT

0706198770

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

DESEMBER 2009



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK ALIRAN AIR DAN
CAMPURAN AIR DAN UDARA PADA PIPA
BERPENAMPANG SEGI EMPAT**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

RACHMAD HIDAYAT

0706198770

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

DESEMBER 2009

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tugas akhir dengan judul :

KARAKTERISTIK ALIRAN AIR DAN CAMPURAN AIR DAN UDARA PADA PIPA BERPENAMPANG SEGI EMPAT

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tugas akhir yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Nama : Rachmad Hidayat

NPM : 0706198770

Tanda Tangan :

Tanggal : 31 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Rachmad Hidayat
NPM : 0706198770
Program studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Karakteristik Aliran Air dan Campuran Air dan Udara pada Pipa Berpenampang Segi Empat

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Warjito, M.Eng. ()
Penguji : Prof. Dr. Ir. Yanuar, M.Eng, M.Sc. ()
Penguji : Dr. Ir. Ahmad Indra S. ()
Penguji : Ardiyansyah ST, M.Eng. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Januari 2010

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Penulisan Tugas Akhir ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan Tugas Akhir ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) ibunda Sutisna Nurdin dan ayahanda (alm) Drs. Hamsir, kedua ananda Rasyad Faris Alfatih dan Rafa Fahim Alkindi, istri tercinta Rafita Sari, serta mamanda Dr. Buchari Nurdin yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan material;
- (2) Dr. Ir. Warjito, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (3) sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 31 Desember 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rachmad Hidayat

NPM : 0706198770

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : .Teknik

Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**KARAKTERISTIK ALIRAN AIR DAN CAMPURAN AIR DAN UDARA
PADA PIPA BERPENAMPANG SEGI EMPAT**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 31 Desember 2009

Yang menyatakan

(Rachmad Hidayat)

ABSTRAK

Nama : Rachmad Hidayat

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Karakteristik Aliran Air dan Campuran Air dan Udara pada Pipa Berpenampang Segi Empat

Fluida yang mengalir sangat penting bagi manusia. Untuk mengalirkan fluida dibutuhkan power. Semakin besar debit aliran dan semakin jauh jarak tempuh, semakin besar pula power yang dibutuhkan. Hal ini berhubungan dengan *pressure drop*. Mengurangi *pressure drop* sangat penting untuk mengurangi power yang dibutuhkan sehingga penghematan energi dapat dilakukan. Dalam hal ini, faktor gesekan adalah salah satu parameter penting. Penambahan *bubble* banyak digunakan untuk mengurangi gesekan antara fluida dengan dinding sekelilingnya.

Percobaan yang dilakukan adalah uji karakteristik aliran air dan air + udara (*bubble*) dalam pipa berpenampang empat persegi panjang. *Test section* berukuran penampang 100 mm x 25 mm dengan panjang 3200 mm. Pengukuran *pressure drop* dilakukan dengan 3 variasi debit air tanpa udara dan dengan 3 variasi debit udara. Variasi debit air yang digunakan adalah 35 liter per menit, 32,5 liter per menit, dan 30 liter per menit. Sementara variasi debit udara adalah dengan rasio 1/175, 2/175, dan 3/175 terhadap debit air. Faktor gesekan dihitung dari nilai *pressure drop* yang diperoleh.

Dari percobaan yang dilakukan dapat ditunjukkan *pressure drop* naik dengan semakin besarnya debit air dan penambahan *bubble* menurunkan *pressure drop* yang terjadi.

Kata Kunci :

Pressure drop, faktor gesekan, *bubble*, debit aliran.

ABSTRACT

Name : Rachmad Hidayat

Study program: Mechanical Engineering

Title : The Characteristic of Water Flow and Water - Air Mixtures Pass
Through Square Duct Profile.

The flowing fluid is very important for human. To make fluid flowing need power. More flow rate & length of the pipe make more power. It is connected to pressure drop. Reducing pressure drop is very important to decrease power meanwhile energy economising can be reached. In this case, friction factor is one of the important parameters. Adding bubble is been used for recent years on drag reduction.

The purpose of the experiment is to find out characteristic of flow of water and water-air mixtures pass through square duct profile. The dimension of the test section is 100 mm width, 25 mm height and 3200 mm length. Measuring of pressure drop has been done with three values of water flow rate without air and with three values of air flow rate. The three values of water flow rate are 35, 32.5, and 30 liters per minute. While the values of flow rate of air are in ratio 1/175, 2/175, dan 3/175 to water flow rate. Friction factor is calculated from the values of pressure drop.

From the experimentation, it can be proved that the pressure drop increases by rising of water flow rate and adding bubble decrease the pressure drop.

Keywords :

pressure drop, friction factor, bubble, flow rate.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK.....	v i
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 TUJUAN PENULISAN.....	2
1.3 PEMBATASAN MASALAH.....	2
1.4 METODE PENELITIAN.....	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN.....	3
BAB II LANDASAN TEORI.....	4
2.1 BILANGAN REYNOLDS.....	4
2.2 LAJU ALIRAN	5
2.3 DAERAH MASUK DAN ALIRAN BERKEMBANG PENUH.....	5
2.4 PENURUNAN TEKANAN DAN FAKTOR GESEKAN.....	6
2.5 ALIRAN FLUIDA MELALUI <i>DUCT</i>	7
2.6 TEORI ALIRAN CAMPURAN AIR DAN UDARA	8
2.7 MANOMETER.....	13

BAB III <i>EXPERIMENTAL SETUP</i>	14
3.1 <i>TEST SECTION</i>	14
3.2 SPESIFIKASI ALAT	16
3.2.1 Rangka	16
3.2.2 Bak air.....	16
3.2.3 Sistem pemipaan.....	17
3.2.4 Pompa air.....	18
3.2.5 <i>Flowmeter</i> untuk air	18
3.2.6 <i>Flowmeter</i> untuk udara.....	19
3.2.7 Manometer	20
3.2.8 Peralatan pengambilan gambar visualisasi.....	21
3.2.9 Peralatan pengukur kerataan horizontal	22
3.3 CARA PENGAMBILAN DATA.....	22
3.3.1 Cara pengambilan data karakteristik aliran.....	22
3.3.1.1 Mencari panjang aliran daerah masuk.....	24
3.3.2 Cara pengambilan gambar visualisasi aliran.....	25
BAB IV DATA DAN PENGOLAHAN DATA.....	27
4.1 DATA.....	27
4.2 PENGOLAHAN DATA.....	29
4.2.1 Grafik	29
4.2.2 Koreksi nilai tekanan dan debit udara terhadap tekanan atmosfer ...	32
4.2.3 Mencari nilai f (faktor gesekan).....	34
4.3 GAMBAR VISUALISASI ALIRAN	38
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	46
5.1 KESIMPULAN.....	46
5.2 SARAN.....	46
DAFTAR ACUAN.....	47
LAMPIRAN.....	48

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Eksperimen untuk mengilustrasikan jenis aliran	4
Gambar 2.2 Aliran massa setiap waktu adalah konstan	5
Gambar 2.3 Daerah masuk dan aliran berkembang penuh	5
Gambar 2.4 Diameter hidrolis	7
Gambar 2.5 Beberapa bentuk saluran <i>duct</i> tidak bundar	8
Gambar 2.6 Detail pola aliran air+udara dengan ID 1,026"	9
Gambar 2.7 <i>2D convex section</i>	9
Gambar 2.8 <i>2D convergent – divergent nozzle</i>	10
Gambar 2.9 <i>Transfer wire</i>	10
Gambar 2.10 Perbandingan gelembung udara	10
(a) $Q_{air} 2 \text{ m/s}$, $Q_{udara} 230 \text{ ml/s}$	
(b) $Q_{air} 6 \text{ m/s}$, $Q_{udara} 230 \text{ ml/s}$	
Gambar 2.11 Visualisasi aliran menggunakan teknik gelembung hidrogen	11
Gambar 2.12 <i>Rotary microbubble generator</i>	11
Gambar 2.13 Manometer U	13
Gambar 2.14 Manometer miring	13
Gambar 3.1 <i>Test section</i>	14
Gambar 3.2 <i>Inlet section</i>	15
Gambar 3.3 Penyempitan aliran	15
Gambar 3.4 Alat uji	16
Gambar 3.5 Sistem Pemipaan	17
Gambar 3.6 Pompa Air	18
Gambar 3.7 <i>Flowmeter</i> untuk air	19
Gambar 3.8 <i>Flowmeter</i> untuk udara	20
Gambar 3.9 <i>Manometer</i>	21
Gambar 3.10 <i>Waterpass</i>	22
Gambar 3.11 <i>Flow diagram</i>	23
Gambar 3.12 Teknik pengambilan gambar visualisasi	26
Gambar 4.1. Grafik perbedaan tekanan di titik 4-19 <i>versus</i> debit air	29

Gambar 4.2. Grafik perbedaan tekanan di titik 4-11 <i>versus</i> debit air	29
Gambar 4.3. Grafik perbedaan tekanan di titik 11-19 <i>versus</i> debit air	30
Gambar 4.4. Grafik perbedaan tekanan di titik 4-19 <i>versus</i> debit udara	30
Gambar 4.5. Grafik perbedaan tekanan di titik 4-11 <i>versus</i> debit udara	31
Gambar 4.6. Grafik perbedaan tekanan di titik 11-19 <i>versus</i> debit udara	31
Gambar 4.7. Diagram Moody dengan nilai f dari hasil percobaan	37
Gambar 4.8. Visualisasi pada titik 27-28, $Q_{air}=35$ lpm	39
Gambar 4.9. Visualisasi pada titik 27-28, $Q_{air}=32,5$ lpm	39
Gambar 4.10. Visualisasi pada titik 27-28, $Q_{air}=30$ lpm	40
Gambar 4.11. Visualisasi pada titik 18-19, $Q_{air}=35$ lpm	40
Gambar 4.12. Visualisasi pada titik 18-19, $Q_{air}=32,5$ lpm	41
Gambar 4.13. Visualisasi pada titik 18-19, $Q_{air}=30$ lpm	41
Gambar 4.14. Visualisasi pada titik 10-11, $Q_{air}=35$ lpm	42
Gambar 4.15. Visualisasi pada titik 10-11, $Q_{air}=32,5$ lpm	42
Gambar 4.16. Visualisasi pada titik 10-11, $Q_{air}=30$ lpm	43
Gambar 4.17. Visualisasi pada titik 4-5, $Q_{air}=35$ lpm	43
Gambar 4.18. Visualisasi pada titik 4-5, $Q_{air}=32,5$ lpm	44
Gambar 4.19. Visualisasi pada titik 4-5, $Q_{air}=30$ lpm	44

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Kekasaran ekivalen untuk pipa baru	7
Tabel 4.1 Pengukuran Δp pada titik 4-19	27
Tabel 4.2 Pengukuran Δp pada titik 4-11	28
Tabel 4.3 Pengukuran Δp pada titik 11-19	28
Tabel 4.4 Koreksi nilai tekanan dan debit udara	33
Tabel 4.5 Tabel nilai f untuk $L_{4-19} = 1,7 \text{ m}$	34
Tabel 4.6 Tabel nilai f untuk $L_{4-11} = 0,8 \text{ m}$	35
Tabel 4.7 Tabel nilai f untuk $L_{11-19} = 0,9 \text{ m}$	35
Tabel 4.8 Tabel nilai f_{avg}	36

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Pengukuran Δp pada titik 4-19 untuk $Q_{air}=35$ lpm	48
Lampiran 2 Pengukuran Δp pada titik 4-19 untuk $Q_{air}=32,5$ lpm	49
Lampiran 3 Pengukuran Δp pada titik 4-19 untuk $Q_{air}=30$ lpm	50
Lampiran 4 Pengukuran Δp pada titik 4-11 untuk $Q_{air}=35$ lpm	51
Lampiran 5 Pengukuran Δp pada titik 4-11 untuk $Q_{air}=32,5$ lpm	52
Lampiran 6 Pengukuran Δp pada titik 4-11 untuk $Q_{air}=30$ lpm	53
Lampiran 7 Pengukuran Δp pada titik 11-19 untuk $Q_{air}=35$ lpm	54
Lampiran 8 Pengukuran Δp pada titik 11-19 untuk $Q_{air}=32,5$ lpm	55
Lampiran 9 Pengukuran Δp pada titik 11-19 untuk $Q_{air}=30$ lpm	56
Lampiran 10 <i>Physical Properties of Water SI Units</i>	57
Lampiran 11 Properti Fisika dari Udara pada Tekanan Atmosfer Standar (SI Units)	58

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Dimensi
A	Luas penampang	m^2
D	Diameter	m
D_h	Diameter hidrolik	m
E_G	Volume <i>fraction</i> dari <i>bubble</i>	-
H	Beda ketinggian pada manometer	mm
P	Keliling pipa	m
Q	Debit	m^3/s
Re	Bilangan Reynolds	-
Re_{BTP}	Bilangan Reynolds Bertuzzi, Tek, dan Poetmann	-
Re_{SG}	Bilangan Reynolds untuk <i>superficial gas</i>	-
Re_{SL}	Bilangan Reynolds untuk <i>superficial liquid</i>	-
V	Laju aliran	m/s
V_M	Laju aliran campuran air dan udara	m/s
V_{SG}	Laju aliran <i>superficial gas</i>	m/s
V_{SL}	Laju aliran <i>superficial liquid</i>	m/s
f	Faktor gesekan	-
f_{avg}	Faktor gesekan rata-rata	-
g	Percepatan gravitasi	m/s^2
k	Rasio massa udara dan air	-
l_e	Panjang daerah aliran masuk	m
p	Tekanan	N/m^2
Δp	Beda tekanan	N/m^2
v	Volume	m^3
ρ	Massa jenis	kg/m^3
ρ_G	Massa jenis udara	kg/m^3
ρ_L	Massa jenis air	kg/m^3

ρ_M	Massa jenis campuran air dan udara	kg/m^3
ε	Kekasaran ekivalen	mm
μ	Viskositas dinamik	Ns/m^2
μ_L	Viskositas dinamik air	Ns/m^2
μ_G	Viskositas dinamik udara	Ns/m^2
μ_M	Viskositas dinamik campuran air dan udara	Ns/m^2



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Mekanika fluida adalah cabang ilmu yang mengaplikasikan mekanika teknik pada sifat-sifat cairan dan gas dalam kondisi diam maupun bergerak. Fluida didefinisikan sebagai zat yang mengalami deformasi secara kontiniu (mengalir) ketika diberi tekanan sekecil apapun [1]. Fluida yang mengalir sangat penting bagi manusia. Aliran darah di dalam tubuh, aliran air di sungai dan laut, aliran udara di sekeliling kita adalah bagian dari ilmu mekanika fluida.

Untuk mengalirkan fluida dibutuhkan power. Semakin besar debit aliran yang diinginkan maka semakin besar pula power yang dibutuhkan. Semakin jauh jarak tempuh juga menyebabkan power yang dibutuhkan semakin besar. Hal ini berhubungan dengan penurunan tekanan. Penurunan tekanan berbanding lurus dengan jarak tempuh dan besarnya debit aliran.

Penurunan tekanan terjadi akibat tegangan geser antara fluida dengan wadah yang dilaluinya. Fluida yang mengalir di dalam pipa pasti akan mengalami penurunan tekanan. Semulus apapun pipa yang digunakan untuk mengalirkan fluida, sangat sulit untuk menghindari terjadinya penurunan tekanan. Namun demikian, mengurangi penurunan tekanan (*pressure drop*) sangat penting untuk mengurangi power yang dibutuhkan. Dengan berkurangnya power maka penghematan energi dapat dilakukan.

Salah satu upaya untuk mengurangi penurunan tekanan adalah dengan mengurangi gesekan yang terjadi antara fluida dengan wadahnya. Faktor gesekan ini menjadi salah satu bagian penting dalam ilmu mekanika fluida.

Banyak cara dilakukan untuk mengurangi gesekan pada aliran fluida. Salah satunya adalah dengan penambahan gelembung udara (bubble). Pada skripsi ini penulis bermaksud melakukan uji karakteristik aliran dengan menggunakan fluida air dan campuran air dan udara (gelembung) pada pipa berpenampang segi empat.

1.2 TUJUAN PENULISAN

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah :

1. Mengetahui karakteristik aliran air dan campuran air dan udara melalui *duct* berpenampang segi empat, meliputi jatuh tekanan dan faktor gesekan.
2. Menampilkan visualisasi aliran campuran air dan udara pada pipa berpenampang segi empat.

1.3 PEMBATASAN MASALAH

Mengingat luasnya ruang lingkup dalam penelitian ini maka pembahasan akan dibatasi sebagai berikut :

1. *Test section* berpenampang segi empat (persegi panjang). Perhitungan konstruksi dan proses produksi tidak dibahas pada skripsi ini.
2. Pengukuran penurunan tekanan dengan 3 variasi debit air dan 3 variasi debit udara.

1.4 METODE PENELITIAN

1. Studi literatur

Literatur - literatur yang digunakan sebagai acuan dalam tugas akhir ini adalah buku, jurnal, artikel, dan internet.

2. Perancangan alat uji penelitian

Langkah pertama adalah melakukan perancangan awal dengan menghitung panjang aliran daerah masuk untuk acuan panjang *test section* yang akan dibuat.

3. Proses fabrikasi dan instalasi

Setelah perancangan, langkah selanjutnya adalah pembuatan dan perakitan alat uji menjadi satu kesatuan.

4. Proses *trial* dan modifikasi

Setelah alat uji penelitian terpasang, uji coba dilakukan secara terus menerus dan melakukan beberapa modifikasi untuk mendapatkan alat pengujian yang maksimal.

5. Proses pengambilan dan pengolahan data

Setelah alat uji siap, data penurunan tekanan dan gambar visualisasi aliran dapat diambil. Pengolahan data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan representasi hasil penelitian.

6. Penyusunan laporan

Pada tahap ini, seluruh data percobaan beserta literatur pendukung dirangkum dan diformulasikan dalam bentuk tulisan sebagai laporan hasil penelitian.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Adapun sistematika penulisan yang dibuat pada skripsi ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang dan tujuan penulisan, pembatasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Pada bab ini disampaikan teori-teori yang berhubungan dengan percobaan dan menjadi dasar dalam perhitungan.

BAB III *EXPERIMENTAL SETUP*

Bab ini membahas mengenai persiapan-persiapan yang dilakukan sebelum percobaan dapat dilakukan.

BAB IV DATA DAN PENGOLAHAN DATA

Bab ini membahas tentang data yang diperoleh serta pengolahannya. Selain itu juga ditampilkan gambar visualisasi aliran.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

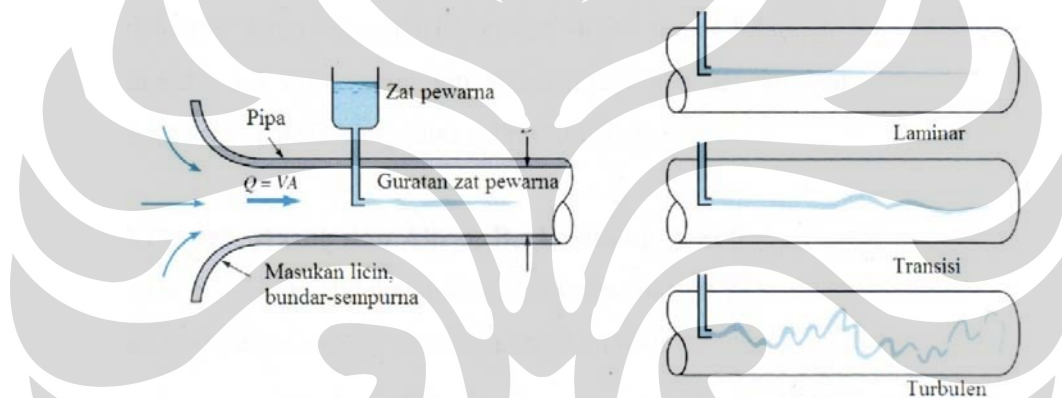
Pada bab ini ditampilkan kesimpulan dan saran yang didapat setelah melakukan percobaan.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. BILANGAN REYNOLDS

Aliran di dalam pipa dapat dibedakan menjadi aliran laminar dan turbulen, dan di antara keduanya disebut aliran transisi. Parameter yang dapat menentukan suatu aliran itu laminar atau turbulen adalah bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds merupakan bilangan tak berdimensi yang menyatakan perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskos di dalam fluida.



Gambar 2.1 Eksperimen untuk mengilustrasikan jenis aliran [3]

Bilangan Reynolds direpresentasikan dengan persamaan berikut [3] :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.1)$$

dimana ρ adalah massa jenis fluida, V adalah kecepatan aliran fluida, D adalah diameter pipa, dan μ adalah viskositas dinamik fluida.

Aliran disebut laminar jika bilangan Reynoldnya kurang dari 2100, disebut turbulen jika bilangan Reynoldnya lebih dari 4000, dan diantara keduanya disebut transisi [3].

2.2. LAJU ALIRAN

Laju aliran diperoleh dari persamaan kontinuitas, yang menyatakan bahwa massa dalam suatu sistem adalah tetap terhadap waktu. Hal ini dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut [2] :

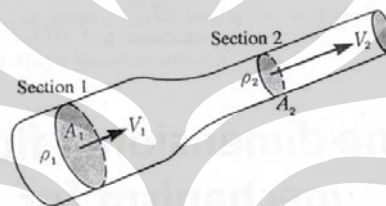
$$\rho AV = \text{constant} \quad (2.2)$$

Jika fluida *incompressible* maka massa jenisnya konstan sehingga persamaannya menjadi laju aliran volumetrik (Q) [2] :

$$Q = AV = \text{constant} \quad (2.3)$$

Kecepatan aliran dirumuskan menjadi

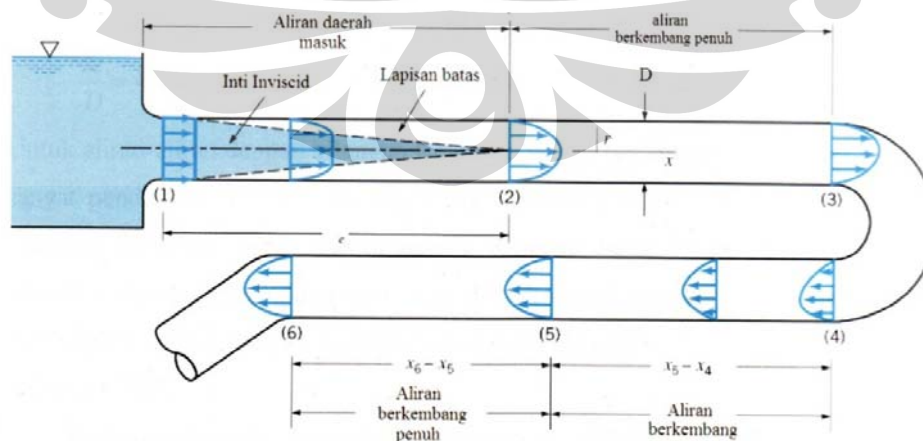
$$V = Q/A \quad (2.4)$$



Gambar 2.2 Aliran massa setiap satuan waktu adalah konstan [2]

2.3. DAERAH MASUK DAN ALIRAN BERKEMBANG PENUH

Daerah aliran di dekat lokasi fluida memasuki pipa disebut sebagai daerah masuk. Pada daerah ini profil kecepatan yang terjadi tidak seragam karena efek dari viskositas fluida. Setelah melewati daerah masuk, profil kecepatan fluida tidak berubah lagi sepanjang pipa. Aliran pada daerah ini disebut sebagai aliran berkembang penuh.



Gambar 2.3 Daerah masuk dan aliran berkembang penuh [3]

Panjang daerah masuk tak berdimensi l_e/D merupakan fungsi dari bilangan Reynolds. Panjang daerah masuk dihitung dengan persamaan sebagai berikut [3]:

$$\text{untuk aliran laminar} \quad \frac{l_e}{D} = 0,06 Re \quad (2.5)$$

$$\text{untuk aliran turbulen} \quad \frac{l_e}{D} = 4,4 (Re)^{1/6} \quad (2.6)$$

2.4. PENURUNAN TEKANAN DAN FAKTOR GESEKAN

Suatu analisis dimensional dari aliran pipa memberikan dasar yang paling mudah untuk membahas aliran pipa turbulen berkembang penuh. Penurunan tekanan dan kerugian head dalam sebuah pipa tergantung pada tegangan geser dinding antara fluida dan permukaan pipa. Perbedaan mendasar antara aliran laminar dan turbulen adalah bahwa tegangan geser untuk aliran turbulen adalah fungsi dari densiti. Untuk aliran laminar, tegangan geser tidak tergantung pada kerapatan sehingga hanya viskositas yang menjadi sifat fluida yang penting.

Penurunan tekanan Δp pada pipa horizontal dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut [3]:

$$\Delta p = f \frac{l}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.7)$$

Dimana f didefinisikan sebagai faktor gesekan, sebuah besaran tak berdimensi [3]:

$$f = \Delta p(D/l)/(\rho V^2/2) \quad (2.8)$$

Faktor gesekan ini sering juga disebut sebagai faktor gesekan Darcy [H.P.G. Darcy (1803-1858)].

Untuk aliran berkembang penuh laminar, nilai f secara sederhana dinyatakan sebagai $f=64/Re$, tidak tergantung ε/D . Untuk aliran turbulen, ketergantungan fungsional dari faktor gesekan terhadap bilangan Reynolds dan kekasaran relatif, agak rumit sehingga belum dapat diperoleh melalui analisis teoritis. Hasil-hasil diperoleh dari banyak eksperimen dan disajikan biasanya dalam bentuk rumus pencocokan kurva atau bentuk-bentuk grafik yang ekuivalen.

Nilai – nilai kekasaran yang khas untuk berbagai permukaan pipa diberikan pada tabel 2.1.

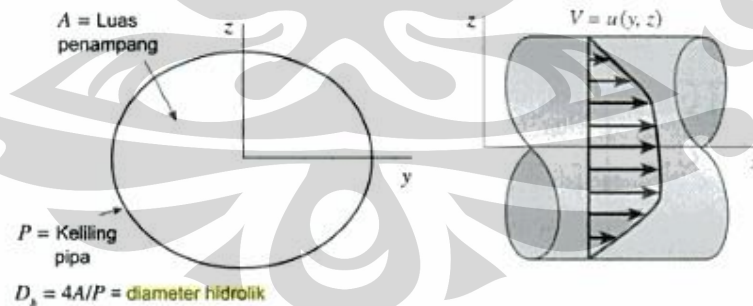
Tabel 2.1 Kekasaran ekuivalen untuk pipa baru [3]

Pipa	Kekasaran Ekuivalen, ϵ	
	Feet	Milimeter
Paku baja	0,003-0,03	0,9-9,0
Beton	0,001-0,01	0,3-3,0
Kayu diamlas	0,0006 – 0,003	0,18-0,9
Besi tuang	0,00085	0,26
Besi galvaniser	0,0005	0,15
Besi komersial atau besi tempa	0,00015	0,045
Pipa saluran	0,000005	0,0015
Plastik, gelas	0,0 (halus)	0,0 (halus)

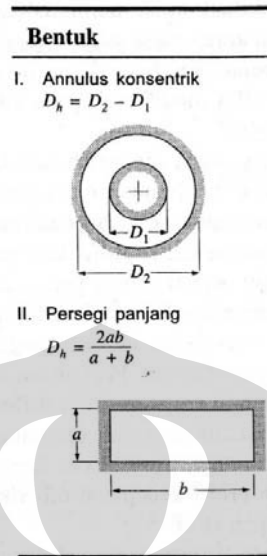
2.5. ALIRAN FLUIDA MELALUI *DUCT*

Salah satu parameter yang penting dalam aliran fluida di dalam pipa adalah diameter pipa. Untuk pipa yang bundar diameter pipa dapat diketahui dengan mengukur langsung, namun tidak semua pipa berbentuk bundar. Untuk pipa/*duct* yang tidak bundar diameter yang digunakan adalah diameter hidrolik.

Diameter hidrolik didefinisikan sebagai empat kali rasio dari luas penampang aliran dibagi keliling terbasahi.



Gambar 2.4 Diameter hodrolik [3]



Gambar 2.5 Beberapa bentuk saluran *duct* tidak bundar [3]

Diameter hidrolis direpresentasikan dengan persamaan berikut [4] :

$$D_h = 4A/P \quad (2.13)$$

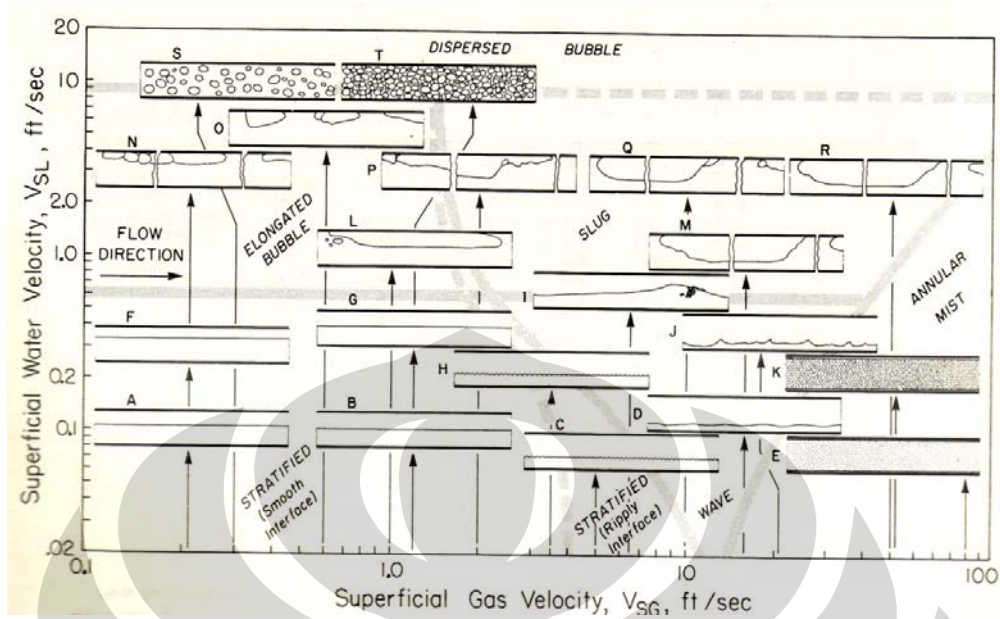
dimana A adalah luas penampang aliran dan P adalah keliling terbasahi. Untuk penampang segiempat yang panjang sisi-sisinya adalah a dan b, rumus diameter hidrolis menjadi [4]:

$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (2.14)$$

2.6. TEORI ALIRAN CAMPURAN AIR DAN UDARA

Gelembung udara terutama yang berukuran kecil (*microbubble*) telah banyak digunakan pada *drag reduction*. Metoda gelembung udara ini digunakan pada *evaporator*, reaktor kimia, *heat exchanger*, *boiler*, kondensor, dan peralatan-peralatan proses dan pengkondisian udara lainnya [5].

Aplikasi lain dari *microbubble* adalah pada analisa lumpur untuk menangkap zat organik yang mengapung. Selain itu *microbubble* juga digunakan pada analisa penyakit kangker dengan menginjeksikannya ke dalam aliran darah[10]. Pola dari aliran campuran air dan udara diilustrasikan pada gambar berikut :



Approximate Only

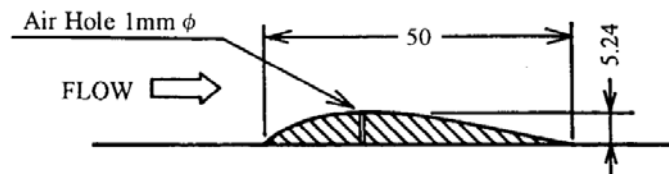
Sketch Identification	Flow Pattern	Continuous Phase	Superficial Velocity Water, V_{SL} , ft/sec	Superficial Velocity Air, V_{SG} , ft/sec	Volume Fraction Air, ϵ_0	Holdup Ratio H	Slip Velocity S , ft/sec	Diameter of Bubbles or Droplets, d_p , in.	Number of Bubbles or Droplets, n_b	Average Height to Interface, H_{av} , in.	Average Film Thickness, δ_{av} , in.	Length of Liquid Slug, L_s , in.	Length of Taylor Bubble, L_t , in.
A	stratified	both	0.1	0.21	0.375	3.5	0.40	—	—	0.61	—	—	—
B	stratified	both	0.1	1.2	0.465	13.8	2.39	—	—	0.54	—	—	—
C	stratified	both	0.1	5.0	0.725	19.0	6.53	—	—	0.32	—	—	—
D	wave	both	0.1	15.9	0.90	18.0	16.7	—	—	0.16	—	—	—
E	annular mist	water	0.1	90	0.96	34.0	90.6	0.01+	60000	—	0.007	—	—
F	stratified	both	0.3	0.21	0.25	2.1	0.44	—	—	0.72	—	—	—
G	stratified	both	0.3	1.2	0.42	5.6	2.4	—	—	0.57	—	—	—
H	stratified	both	0.3	3.5	0.66	6.0	4.4	—	—	0.37	—	—	—
I	wave	both	0.4	6.5	0.75	5.5	7.1	—	—	0.28	—	—	—
J	wave	both	0.3	21	0.86	11.4	22.3	—	—	0.20	—	—	—
K	annular mist	air	0.3	52.2	0.92	16.0	53.4	0.02	40000	—	0.016	—	—
L	elongated bubble	water	1.1	1.0	0.34	1.8	1.32	—	—	0.61	—	4-5	5
M	slug	water	1.1	15.9	0.74	5.0	17.1	—	—	0.20	—	3-5	25-39
N	elongated bubble	water	3.02	0.21	0.061	1.07	0.22	—	—	0.75	—	8-9	—
O	elongated bubble	water	5.0	0.6	0.098	1.1	0.55	—	6	0.75	—	1	—
P	slug	water	3.02	2.0	0.32	1.4	1.78	—	—	0.64	—	3	7-8
Q	slug	water	3.02	10	0.60	2.2	9.1	—	—	0.30	—	3-5	14-23
R	slug	water	3.02	50	0.79	4.4	48.9	—	—	0.20	—	3-5	40-65
S	bubble	water	10	0.3	0.029	1.0	0	0.2	70	—	—	—	—
T	bubbic	water	10	1.2	0.11	1.0	0	0.2	300	—	—	—	—

* Per foot of 1-inch pipe.

Gambar 2.6 Detail pola aliran air+udara pada pipa dengan ID 1,026"[5]

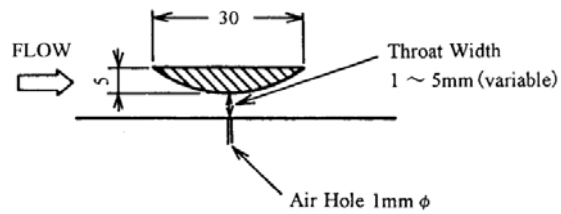
Ada beberapa cara yang dilakukan untuk menghasilkan gelembung udara, diantaranya adalah sebagai berikut :

- 2D Convex section



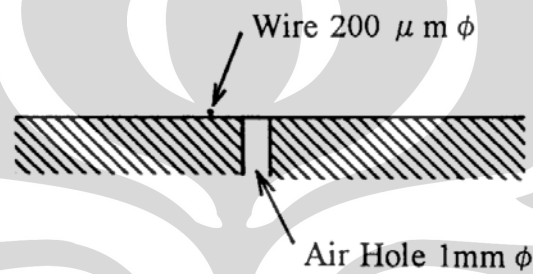
Gambar 2.7 2D Convex section [6]

- *2D convergent - divergent nozzle*



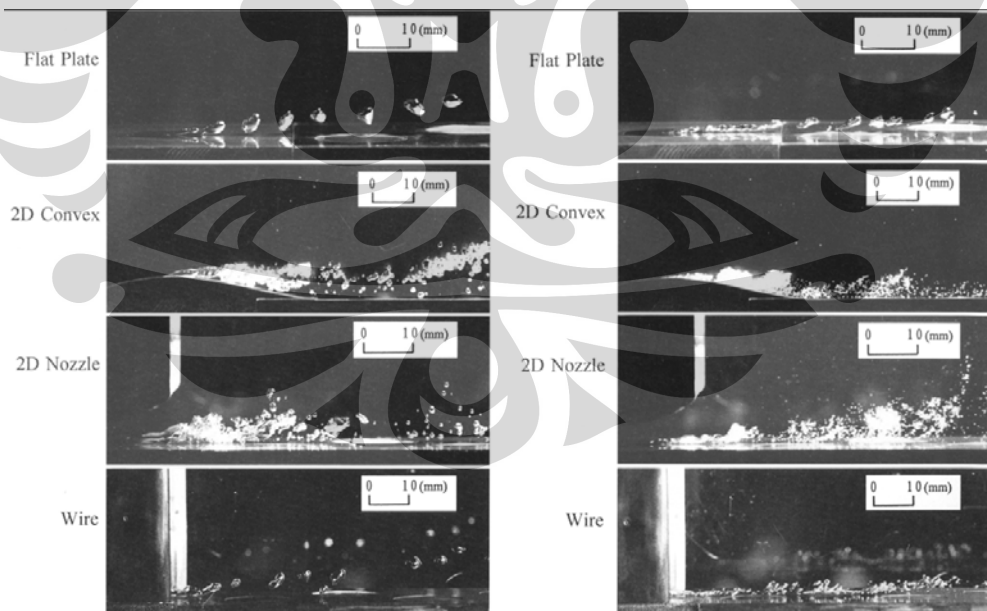
Gambar 2.8 *2D convergent - divergent nozzle* [6]

- *Transfer wire*



Gambar 2.9 *Transfer wire* [6]

Metode ini telah diuji dan mendapat hasil visualisasi sebagai berikut :



Gambar 2.10 Perbandingan gelembung udara

(a) Qair 2 m/s, Qudara 230 ml/s (b) Qair 6 m/s, Qudara 230 ml/s [6]

Selain dengan cara tersebut dikenal juga istilah *bubble generator*. *Bubble generator* adalah alat untuk menghasilkan *microbubble*. Beberapa *bubble generator* adalah sebagai berikut :

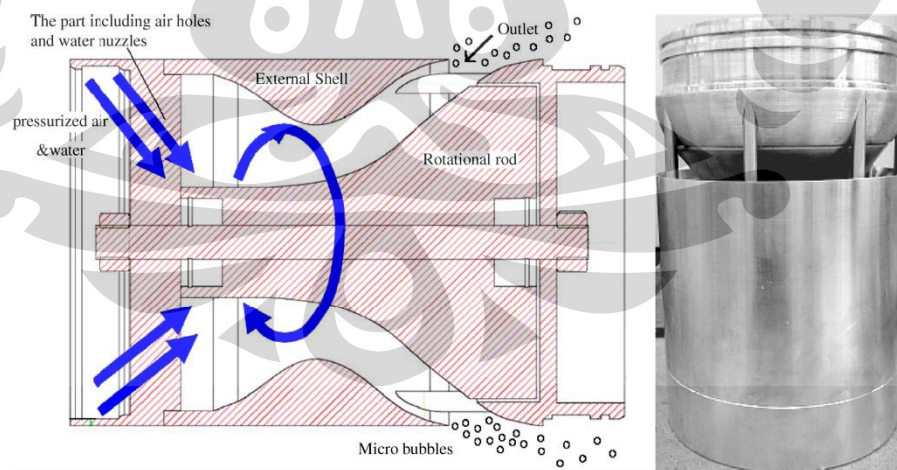
- Teknik gelembung hidrogen atau disebut juga *electrolytic microbubble generator*. Teknik gelembung hidrogen ini menggunakan proses elektrolisis air yang merupakan reaksi kimia yang mengubah energi listrik menjadi energi kimia.



Gambar 2.11 Visualisasi aliran menggunakan teknik gelembung hydrogen [7]

- *Rotary microbubble generator*.

Model generator ini diilustrasikan pada gambar sebagai berikut :



Gambar 2.12 *Rotary microbubble generator*[8]

Pada aliran campuran air dan udara ini, persamaan – persamaan yang digunakan juga harus menggabungkan sifat – sifat fisik dari campuran kedua zat tersebut. Persamaan – persamaan yang digunakan antara lain :

1. Persamaan laju aliran [5] :

$$V_M = V_{SG} + V_{SL} \quad (2.15)$$

dimana :

V_M = laju aliran campuran air dan udara

V_{SG} = laju aliran *superficial gas* = Q_{udara} / luas penampang *duct*

V_{SL} = laju aliran *superficial liquid* = Q_{air} / luas penampang *duct*

2. Persamaan untuk *density* dan viskositas gabungan dari Dukler [5] :

$$\rho_M = (1 - E_G)\rho_L + E_G\rho_G \quad (2.16)$$

$$\mu_M = (1 - E_G)\mu_L + E_G\mu_G \quad (2.17)$$

dimana :

ρ_M = *density* campuran air dan udara

ρ_L = *density* air

ρ_G = *density* udara

μ_M = viskositas campuran air dan udara

μ_L = viskositas air

μ_G = viskositas udara

$$E_G = \frac{0,83V_{SG}}{V_M} \quad (2.18)$$

3. Persamaan untuk bilangan Reynolds menggunakan rumusan Bertuzzi, Tek, dan Poetmann yaitu [5] :

$$Re_{BTP} = (Re_{SG})^{k/(1+k)} (Re_{SL})^{1/e^{0,1k}} \quad (2.19)$$

dimana :

$$Re_{SG} = \frac{DV_{SG}\rho_G}{\mu_G} \quad (2.20)$$

$$Re_{SL} = \frac{DV_{SL}\rho_L}{\mu_L} \quad (2.21)$$

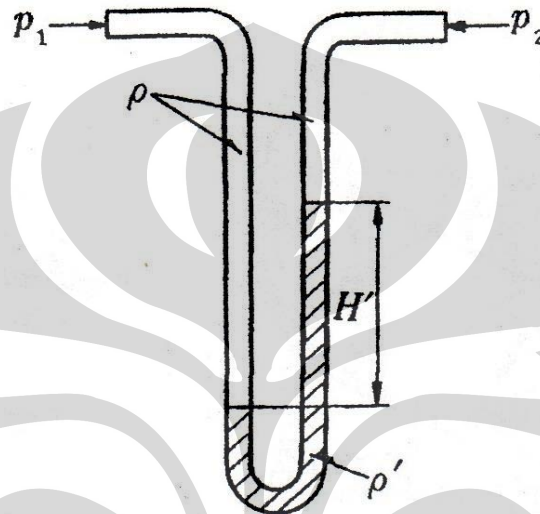
$$k = \frac{V_{SG}\rho_G}{V_{SL}\rho_L} \quad (2.22)$$

4. Persamaan untuk perbedaan tekanan [5] :

$$\Delta p = f \frac{l}{D} \frac{\rho_M V_M^2}{2} \quad (2.23)$$

2.7. MANOMETER

Manometer adalah salah satu alat yang digunakan untuk mengukur perbedaan tekanan. Cara kerjanya adalah dengan mengukur beda ketinggian dari cairan di dalam wadah berbentuk U atau sejenisnya.

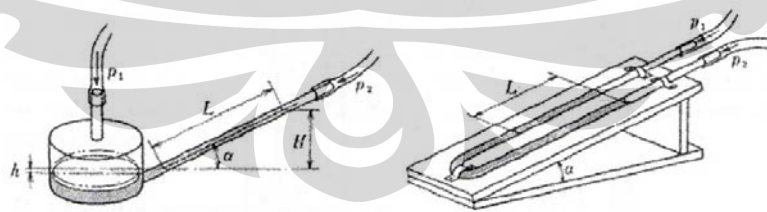


Gambar 2.13 Manometer U [2]

Perbedaan tekanan dihitung dengan persamaan [2] :

$$p_1 - p_2 = \rho g H \quad (2.24)$$

Manometer dapat juga dipasang miring untuk memudahkan pembacaan jika perbedaan ketinggian kecil.



Gambar 2.14 Manometer miring [2]

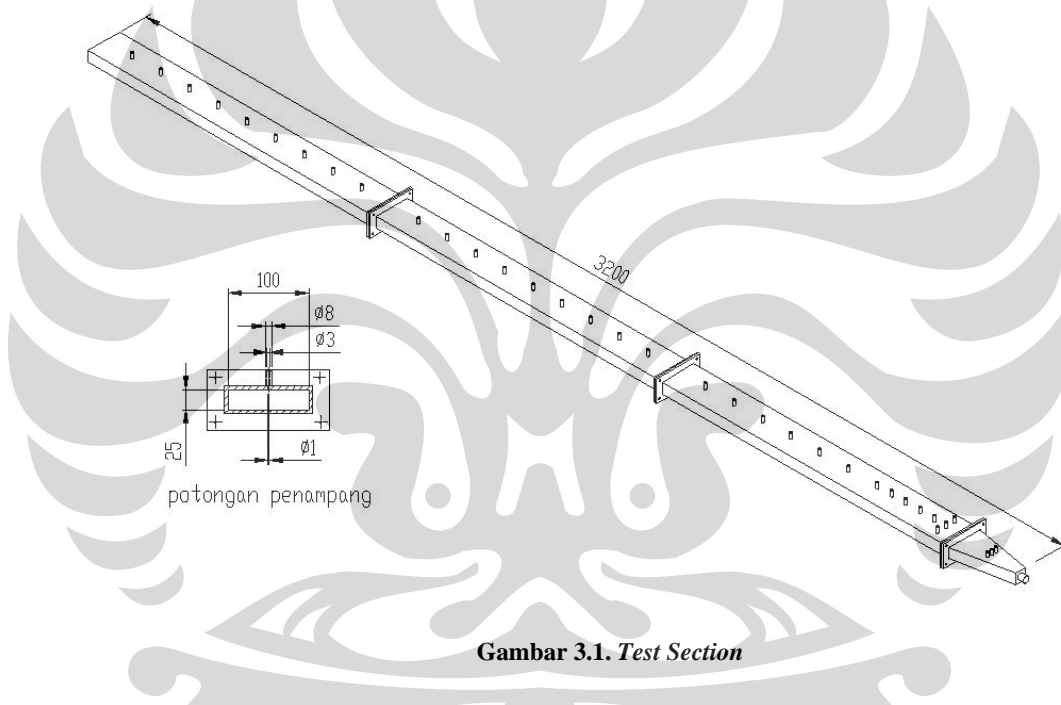
Pada manometer jenis ini H didefinisikan sebagai $L \sin \alpha$.

BAB III

EXPERIMENTAL SETUP

3.1 TEST SECTION

Test section dalam penelitian ini adalah berupa *duct* berpenampang empat persegi panjang berukuran 100 mm x 25 mm dengan panjang 3200 mm. *Test section* dibuat dari bahan *acrylic* untuk memudahkan visualisasi aliran yang terjadi.



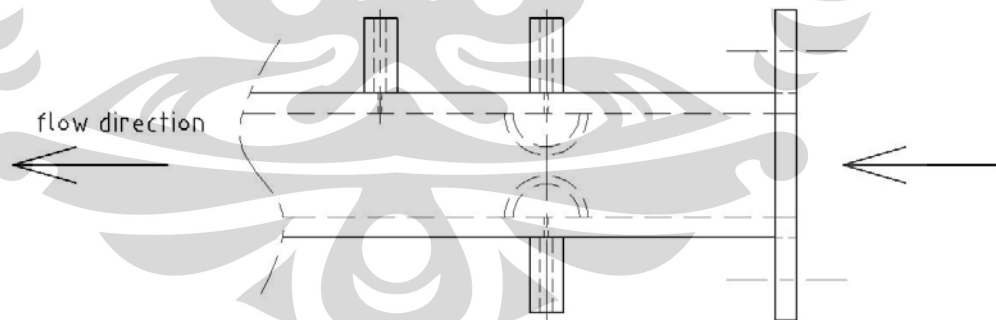
Gambar 3.1. *Test Section*

Sepanjang *test section*, terdapat 29 *pressure tap* untuk mengukur tekanan. Di bagian inlet, terdapat 3 buah nosel dengan diameter 1 mm untuk menginjeksikan udara ke dalam aliran.



Gambar 3.2. Inlet Section

Di bagian inlet dipasang restriksi berbentuk setengah lingkaran sehingga luas penampang aliran menyempit. Pemasangan restriksi ini bertujuan untuk menghasilkan turbulensi sehingga gelembung akan pecah.



Gambar 3.3. Penyempitan aliran

Test section dengan *flowmeter*, pompa, katup-katup serta bak air yang dirangkai dengan pipa akan membentuk *water loop*.

3.2 SPESIFIKASI ALAT

Semua bagian dari alat uji dirakit sedemikian rupa seperti gambar 3.4.



Gambar 3.4. Alat uji

Bagian-bagian utama dari alat uji adalah sebagai berikut :

- Rangka
- Bak air
- Sistem perpipaan
- Pompa air
- *Flowmeter* untuk air
- *Flowmeter* untuk udara
- Manometer
- Peralatan pengambilan gambar visualisasi
- Peralatan pengukur kerataan horizontal.

3.2.1. Rangka

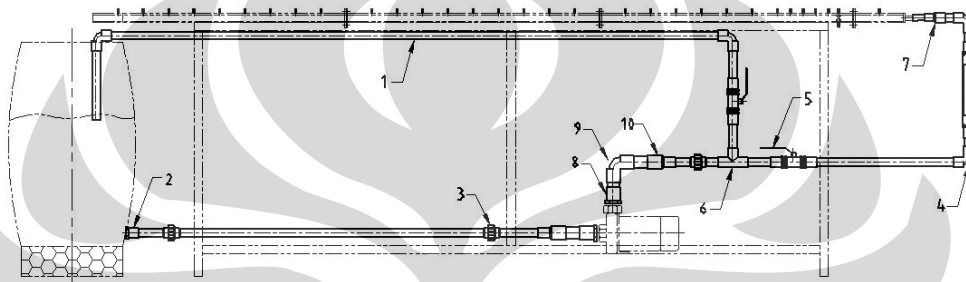
Rangka yang digunakan adalah besi siku berlubang dengan ukuran 33x33 mm dengan tebal 2 mm. Penggunaan rangka ini adalah untuk kemudahan perakitan. Ukuran rangka adalah: panjang 2500 mm, lebar 500 mm dan tinggi 1000 mm.

3.2.2. Bak air

Bak air yang digunakan adalah bak air plastik dengan kapasitas lebih dari 100 liter. Dimensi bak air ini adalah diameter 500 mm dengan tinggi 800 mm.

3.2.3. Sistem pemipaan

Sistem pemipaan diatur untuk sirkulasi air dari rangkaian alat uji.



Gambar 3.5. Sistem pemipaan

Bagian –bagian dari pemipaan adalah sebagai berikut :

1. Pipa utama menggunakan pipa PVC 1”.
2. *Sock* ulir PVC 1” sebanyak 7 buah untuk sambungan ke bak air, katup dan *flowmeter*.
3. *Water* mur PVC 1” sebanyak 3 buah untuk memudahkan penyambungan pipa.
4. *Elbow* PVC 1” 90° sebanyak 4 buah.
5. Katup kuningan 1” sebanyak 2 buah.
6. Sambungan T PVC 1” sebanyak 1 buah.
7. *Reducer* PVC 1”-3/4” sebanyak 1 buah untuk sambungan ke *test section*.
8. *Sock* ulir PVC 1 1/4” sebanyak 2 buah untuk sambungan ke pompa air.
9. *Elbow* PVC 1 1/4” 90° sebanyak 1 buah.
10. *Reducer* PVC 1 1/4”-1” sebanyak 1 buah.

3.2.4. Pompa air

Pompa air yang digunakan mempunyai spesifikasi sebagai berikut :

- Merk : Voss
- Model : Aqua 401A
- Kapasitas maksimum : 300 liter/menit
- *Total head* : 20,5 meter
- *Connection size* : 1¼"
- *Output* : 400 watt
- *Input* : 220V/50HZ/1PH
- RPM : 2850



Gambar 3.6. Pompa Air

3.2.5. Flowmeter untuk air

Untuk mengukur debit air digunakan *flowmeter* dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Merk : WF (WATERFLO).
- Kemampuan ukur : 5 liter/menit – 35 liter/menit.
- Ketelitian : 2,5 liter/menit.



Gambar 3.7. Flowmeter untuk air

3.2.6. Flowmeter untuk udara

Untuk mengukur debit udara digunakan *flowmeter* dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Merk : Key Instrument's
- Model : MR300 Series Flowmeter
- *Model Code* : 3A13
- *Range* : 0,1 – 1,2 liter/menit
- Ketelitian : 0,05 liter/menit



Gambar 3.8. *Flowmeter* untuk udara

3.2.7. Manometer

Untuk mengukur perbedaan tekanan digunakan manometer dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Merk : Dwyer
- Tipe : Series 250-AF Inclined Manometer Air
Filter Gages
- *Model Number* : 209 - AF
- *Range* : -0,2 – 3 inci air (49,64 – 746,7 Pa)
- Ketelitian : 0,02 inci air



Gambar 3.9. Manometer

3.2.8. Peralatan pengambilan gambar visualisasi

Peralatan yang diperlukan untuk pengambilan gambar visualisasi adalah sebagai berikut :

- Kamera
- Lampu
- Kertas karton hitam dan kertas kalkir
- Penggaris plastik.

Kamera digunakan untuk mengambil gambar visualisasi dari aliran pada setiap parameter pengujian yang dilakukan, Kamera yang digunakan mempunyai spesifikasi sebagai berikut :

- Merk : Olympus
- Model no. : μ 1040
- Pixel : 10 MP

Lampu digunakan untuk membantu pencahayaan selama proses pengambilan gambar dengan kamera. Lampu yang digunakan adalah lampu neon 11 watt.

Penggunaan kertas karton dan kalkir bertujuan untuk membantu mendapatkan visualisasi yang baik dari gelembung udara di dalam air. Kertas karton hitam dipasang menutupi sekeliling daerah yang akan diambil gambar kecuali bagian bawah untuk masuknya cahaya lampu dan sepotong bagian atas untuk area pengambilan gambar. Kertas kalkir dipasang di bagian bawah untuk menghalangi cahaya lampu langsung sehingga mencegah hasil silau pada gambar yang diambil.

Penggaris plastik diletakkan di atas area pengambilan gambar sehingga ukuran gelembung nantinya dapat diskalakan.

3.2.9. Peralatan pengukur kerataan horizontal

Untuk mengukur kerataan dari *test section* digunakan slang air, benang dan *waterpass*. *Waterpass* yang digunakan adalah merk Stanley dengan panjang 24”.



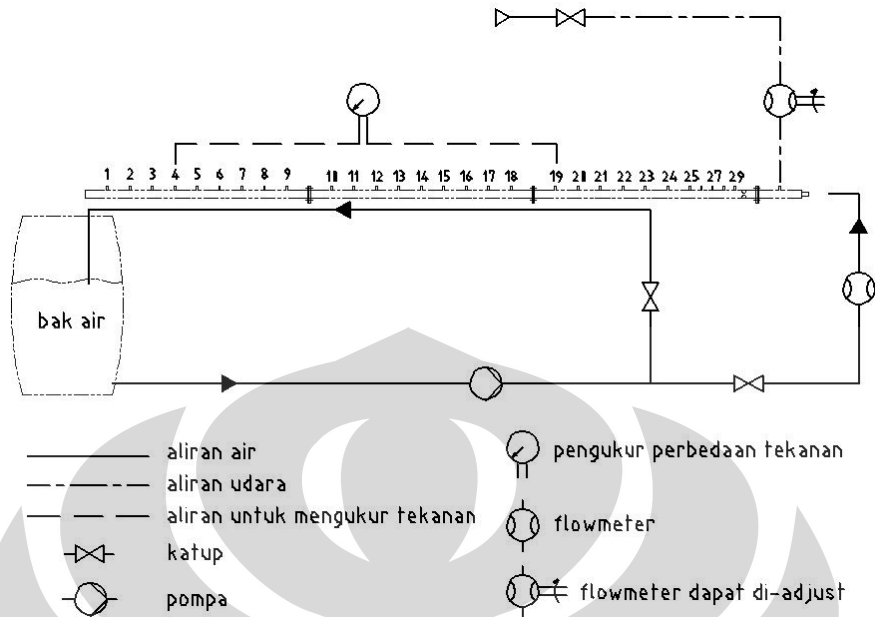
Gambar 3.10. *Waterpass*

3.3 CARA PENGAMBILAN DATA

3.3.1. Cara pengambilan data karakteristik aliran

Pengambilan data untuk mengetahui karakteristik aliran air dan air+udara dilakukan dengan mengatur debit air dan udara yang dialirkan ke *test section*. Sebelum pompa dinyalakan, pastikan katup sirkulasi langsung ke bak air terbuka penuh. Setelah pompa dinyalakan, buka katup air yang menuju *test section*. Besarnya pembukaan katup tergantung berapa debit air yang diinginkan dengan melihat *flowmeter*.

Perbedaan tekanan air di dalam *test section* diukur dengan manometer seperti diilustrasikan pada gambar 3.11.



Gambar 3.11. Flow diagram

Udara diinjeksikan ke dalam *test section* dengan cara membuka katup udara. Besarnya debit udara yang masuk diatur dengan *adjuster* pada *flowmeter* udara.

Untuk pengambilan data, debit air dan debit udara divariasikan sebagai berikut :

- Debit air 35 liter per menit dengan variasi debit udara :
 - 0 liter per menit (tanpa udara)
 - 0,2 liter per menit
 - 0,4 liter per menit
 - 0,6 liter per menit
- Debit air 32,5 liter per menit dengan variasi debit udara :
 - 0 liter per menit (tanpa udara)
 - $(0,2/35) \times 32,5 = 0,186$ liter per menit*
 - $(0,4/35) \times 32,5 = 0,371$ liter per menit*
 - $(0,6/35) \times 32,5 = 0,557$ liter per menit*
- Debit air 30 liter per menit dengan variasi debit udara :
 - 0 liter per menit (tanpa udara)
 - $(0,2/35) \times 30 = 0,171$ liter per menit*

- $(0,4/35) \times 30 = 0,343$ liter per menit*
- $(0,6/35) \times 30 = 0,514$ liter per menit*

*Penambahan debit udara dengan perbandingan yang sama untuk setiap perubahan debit air

Data yang diambil adalah perbedaan tekanan pada setiap variasi debit air dan udara. Posisi pengambilan data adalah jarak terjauh dimana aliran fluida sudah berkembang penuh pada posisi inlet sampai outlet. Selain itu juga diukur tekanan udara yang masuk ke *test section*.

3.3.1.1. Mencari panjang aliran daerah masuk

Untuk mencari posisi dimana fluida sudah berkembang penuh perlu dihitung panjang aliran daerah masuk dengan tahapan sebagai berikut :

- Hitung diameter hidrolik dari *test section* (berbentuk persegi panjang) dengan persamaan 2.14 :

$$D_h = \frac{2ab}{a+b} \quad (2.14)$$

Dengan $a = 100$ mm dan $b = 25$ mm maka diperoleh $D_h = 40$ mm = 0,04 m

- Tentukan apakah aliran laminar atau turbulen dengan menghitung nilai bilangan Reynolds yaitu dengan persamaan 2.1 :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.1)$$

Diketahui nilai properti fisik dari air pada $T=20^\circ$ (lampiran 10) adalah :

$$\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,002(10)^{-3}$$

Nilai V diperoleh dengan persamaan 2.4 :

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.4)$$

Nilai A (luas penampang) adalah :

$$100 \times 25 = 2500 \text{ mm}^2 = 2,5(10)^{-3} \text{ m}^2$$

Untuk 3 variasi debit air maka diperoleh hasil sebagai berikut :

$$Q = 35 \text{ lpm} \rightarrow V = 0,233 \text{ m/s} \rightarrow Re = 9298$$

$$Q = 32,5 \text{ lpm} \rightarrow V = 0,217 \text{ m/s} \rightarrow Re = 8634$$

$$Q = 30 \text{ lpm} \rightarrow V = 0,2 \text{ m/s} \rightarrow Re = 7970$$

Karena nilai bilangan Reynolds lebih besar dari 4000 maka aliran yang terjadi adalah turbulen.

- Hitung panjang aliran daerah masuk (l_e) dengan persamaan 2.6 :

$$\frac{l_e}{D} = 4,4 (Re)^{1/6} \quad (2.6)$$

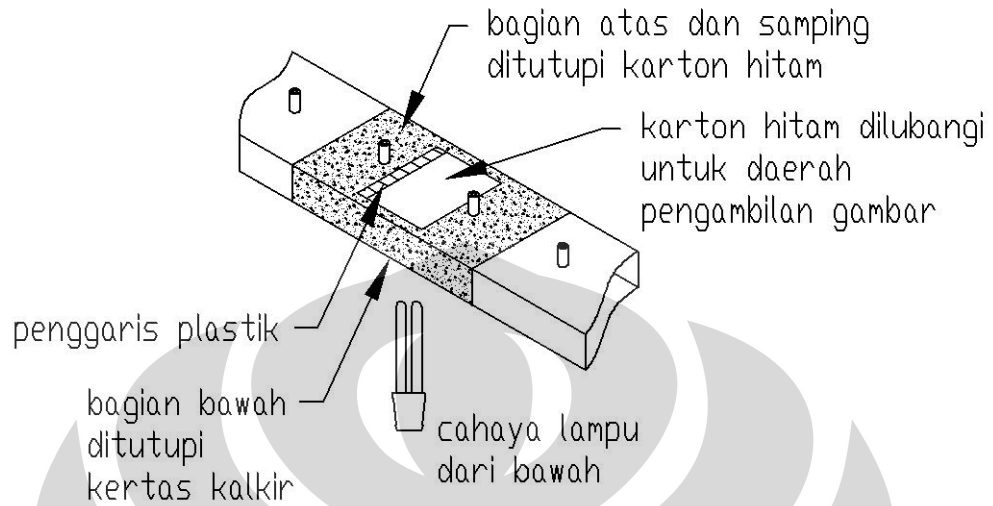
Dengan $D = D_h$, ambil nilai Re terbesar yaitu 9298 maka diperoleh $l_e = 0.807 \text{ m}$.

Setelah panjang aliran daerah masuk dihitung maka dipilih posisi pengukuran pada titik 4 dan 19 (lihat gambar 3.11), jarak dari gangguan penyempitan aliran 840 mm. Di samping itu juga dilakukan pengukuran perbedaan tekanan pada posisi 4 dan 11, serta 11 dan 19 sebagai pembanding terhadap hasil pengukuran pertama.

3.3.2. Cara pengambilan gambar visualisasi aliran

Seperti halnya pengambilan data sebelumnya, pengambilan gambar visualisasi juga dengan berbagai variasi debit air dan udara. Adapun posisi pengambilan gambar dipilih dekat titik pengukuran tekanan yaitu antara titik 4 dan 5, antara titik 10 dan 11, antara titik 18 dan 19, dan pada aliran daerah masuk yaitu antara titik 27 dan 28.

Teknik pengambilan gambar diilustrasikan seperti gambar 3.12.



Gambar 3.12. Teknik pengambilan gambar visualisasi

Kamera diposisikan pada ketinggian sekitar 100 mm dari bagian atas daerah pengambilan gambar. Setelah diperoleh fokus yang cukup, pemotretan dilakukan.

BAB IV

DATA DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 DATA

Setelah alat uji dirakit dan siap, maka percobaan dan pengambilan data dapat dilakukan. Data diambil dengan beberapa variasi parameter-parameter seperti yang dijelaskan sebelumnya. Pengambilan data dilakukan sebanyak 30 kali untuk setiap variasi. Data ditampilkan dalam bentuk tabel (lampiran 1-9). Dari masing – masing 30 data tersebut diambil nilai rata – rata yang ditampilkan sebagai berikut :

Tabel 4.1. Pengukuran Δp pada titik 4-19

Q air		Q udara	P udara	ΔP air (avg)	
(lpm)	(m ³ /s)	(lpm)	(inci air)	(inci air)	(N/m ²)
35	0.000583	0	0	0.151333	37.66687
35	0.000583	0.2	0.16	0.144	35.8416
35	0.000583	0.4	0.5	0.136667	34.01633
35	0.000583	0.6	1	0.129333	32.19107
32.5	0.000542	0	0	0.136667	34.01633
32.5	0.000542	0.185714	0.14	0.129333	32.19107
32.5	0.000542	0.371429	0.42	0.122667	30.53173
32.5	0.000542	0.557143	0.82	0.115333	28.70647
30	0.0005	0	0	0.122667	30.53173
30	0.0005	0.171429	0.12	0.115333	28.70647
30	0.0005	0.342857	0.4	0.108	26.8812
30	0.0005	0.514286	0.78	0.100667	25.05593

Tabel 4.2. Pengukuran Δp pada titik 4-11

Q air		Q udara	P udara	ΔP air (avg)	
(lpm)	(m ³ /s)	(lpm)	(inci air)	(inci air)	(N/m ²)
35	0.000583	0	0	0.072	17.9208
35	0.000583	0.2	0.16	0.068	16.9252
35	0.000583	0.4	0.5	0.064	15.9296
35	0.000583	0.6	1	0.061333	15.26587
32.5	0.000542	0	0	0.064667	16.09553
32.5	0.000542	0.185714	0.14	0.061333	15.26587
32.5	0.000542	0.371429	0.42	0.057333	14.27027
32.5	0.000542	0.557143	0.82	0.054667	13.60653
30	0.0005	0	0	0.057333	14.27027
30	0.0005	0.171429	0.12	0.054	13.4406
30	0.0005	0.342857	0.4	0.051333	12.77687
30	0.0005	0.514286	0.78	0.048	11.9472

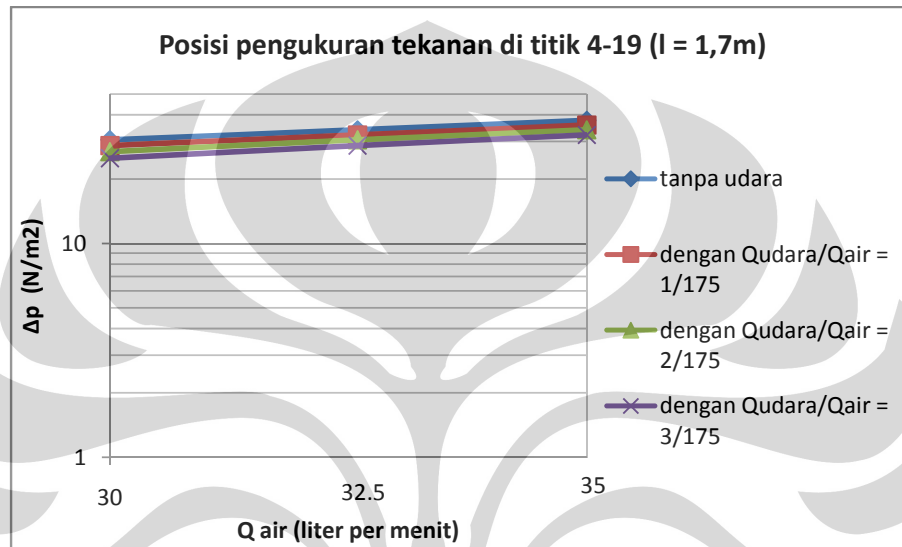
Tabel 4.3. Pengukuran Δp pada titik 11-19

Q air		Q udara	P udara	ΔP air (avg)	
(lpm)	(m ³ /s)	(lpm)	(inci air)	(inci air)	(N/m ²)
35	0.000583	0	0	0.08	19.912
35	0.000583	0.2	0.16	0.076667	19.08233
35	0.000583	0.4	0.5	0.072	17.9208
35	0.000583	0.6	1	0.068667	17.09113
32.5	0.000542	0	0	0.073333	18.25267
32.5	0.000542	0.185714	0.14	0.069333	17.25707
32.5	0.000542	0.371429	0.42	0.065333	16.26147
32.5	0.000542	0.557143	0.82	0.061333	15.26587
30	0.0005	0	0	0.064667	16.09553
30	0.0005	0.171429	0.12	0.060667	15.09993
30	0.0005	0.342857	0.4	0.057333	14.27027
30	0.0005	0.514286	0.78	0.053333	13.27467

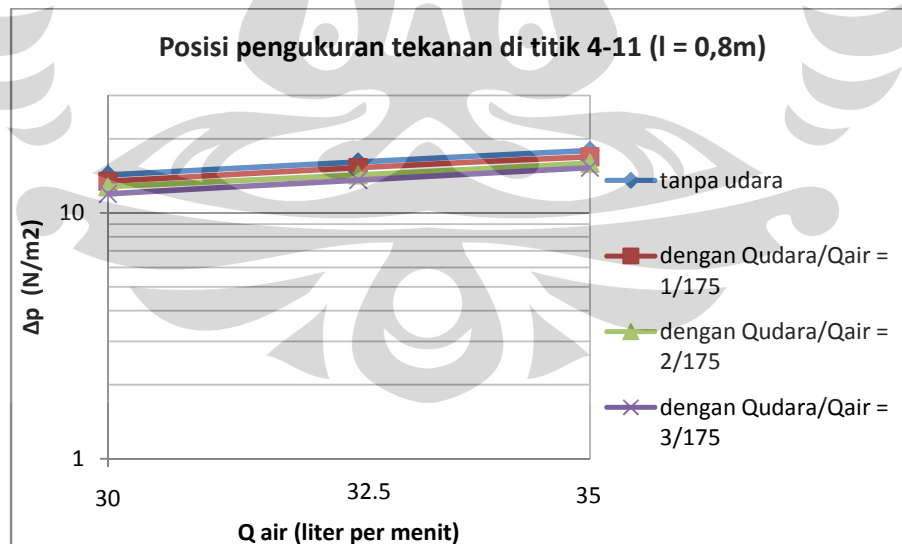
4.2 PENGOLAHAN DATA

4.2.1 Grafik

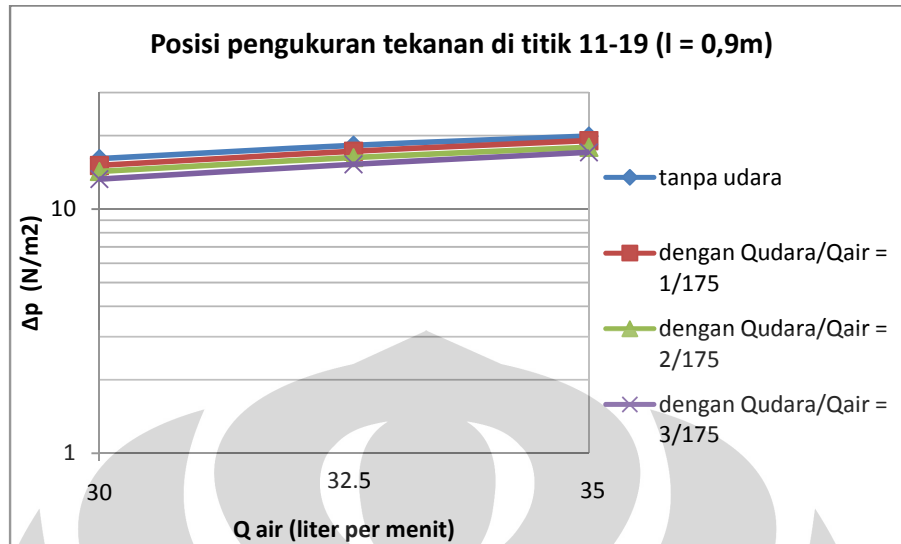
Dari data yang diperoleh, dibuat grafik perbedaan tekanan *versus* debit air serta grafik perbedaan tekanan *versus* debit udara.



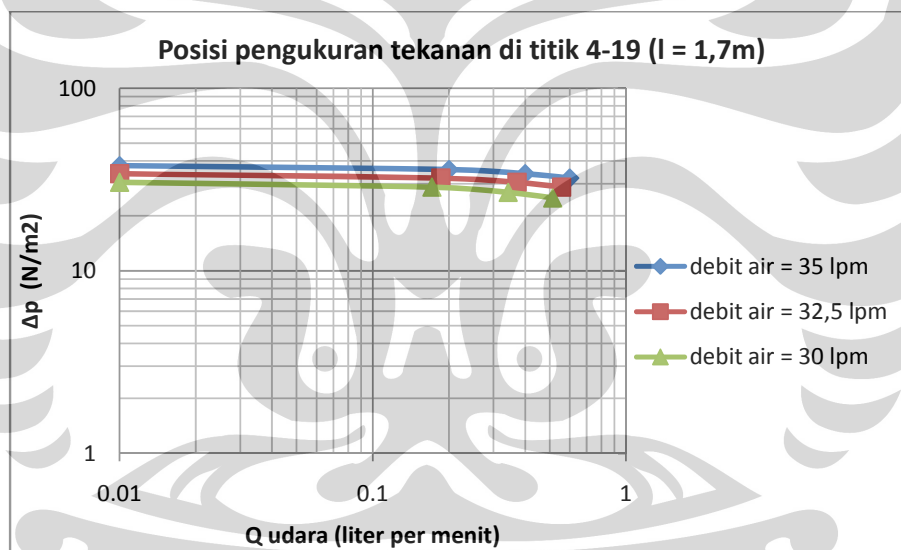
Gambar 4.1. Grafik perbedaan tekanan di titik 4-19 *versus* debit air



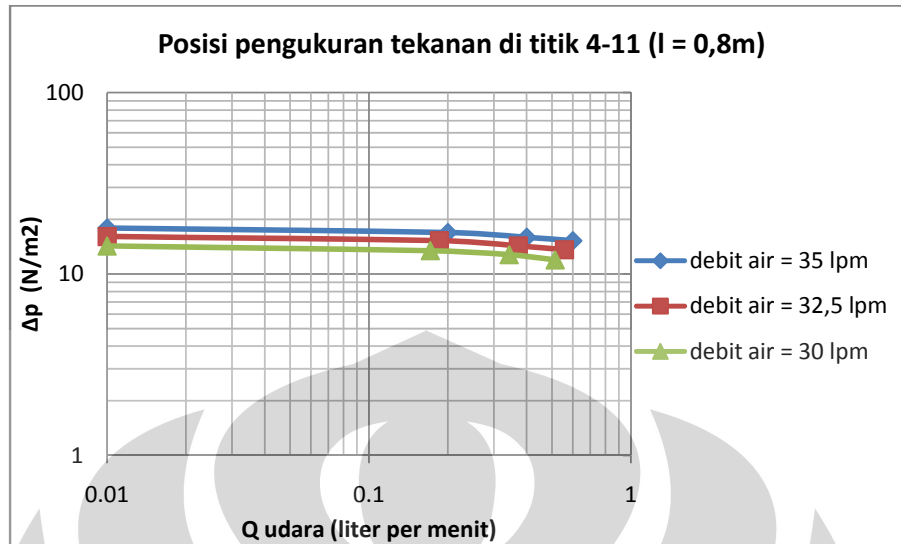
Gambar 4.2. Grafik perbedaan tekanan di titik 4-11 *versus* debit air



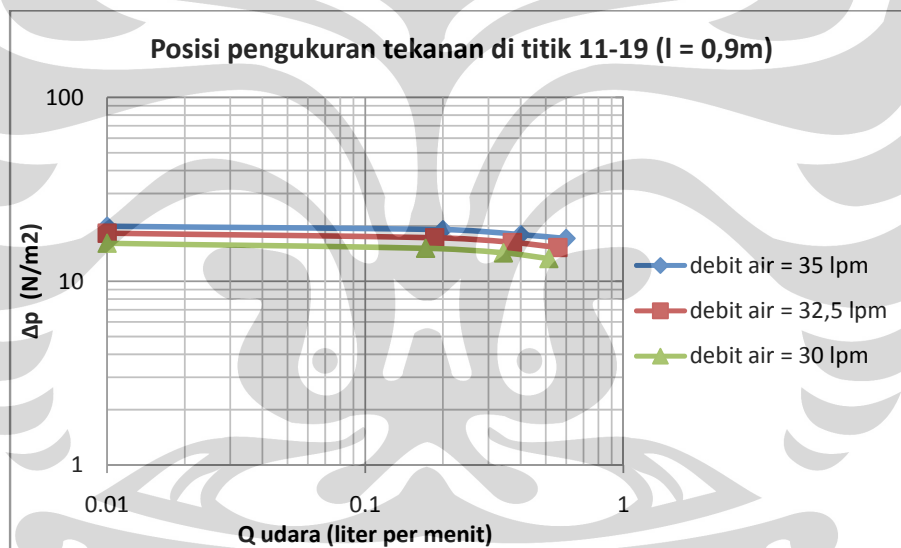
Gambar 4.3. Grafik perbedaan tekanan di titik 11-19 *versus* debit air



Gambar 4.4. Grafik perbedaan tekanan di titik 4-19 *versus* debit udara



Gambar 4.5. Grafik perbedaan tekanan di titik 4-11 *versus* debit udara



Gambar 4.6. Grafik perbedaan tekanan di titik 11-19 *versus* debit udara

Dari grafik perbedaan tekanan *versus* debit air dapat dilihat bahwa perbedaan tekanan naik seiring naiknya debit air dan penambahan gelembung udara secara bertahap menurunkan perbedaan tekanan yang terjadi.

Pada persamaan no. 2.7 dan 2.4 yaitu :

$$\Delta p = f \frac{l}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.7)$$

$$V = Q/A \quad (2.4)$$

dilakukan substitusi sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \Delta p &= f \frac{l}{D} \frac{\rho(Q/A)^2}{2} \\ \Delta p &= \left(f \frac{l}{D} \frac{\rho}{2A^2} \right) Q^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Dari persamaan 4.1 di atas dapat dilihat bahwa Δp berbanding lurus dengan Q^2 . Pada grafik $\Delta p - Q$ dengan skala logaritmik dapat dilihat grafik linier antara keduanya.

Dari grafik perbedaan tekanan *versus* debit udara juga dapat dilihat penurunan tekanan terjadi seiring bertambahnya debit udara yang masuk.

4.2.2 Koreksi nilai tekanan dan debit udara terhadap tekanan atmosfer

Pengukuran laju aliran udara pada percobaan tidak pada kondisi STP. Pada percobaan ini udara yang mengalir mempunyai tekanan di atas tekanan atmosfer. Untuk mendapatkan laju aliran udara pada kondisi STP, hasil pengukuran harus dikoreksi terhadap nilai tekanan.

Untuk menghitung nilai tekanan digunakan persamaan no. 2.24 :

$$p_1 - p_2 = \rho g H \quad (2.24)$$

dimana $\rho g H$ sudah diketahui sebagai nilai tekanan yang terukur, p_1 adalah tekanan udara yang sebenarnya, dan p_2 adalah tekanan atmosfer. Maka nilai p_1 diperoleh dari :

$$p_1 = p_{atm} + \rho g H \quad (4.2)$$

Nilai debit udara juga dikoreksi dengan persamaan sebagai berikut [9] :

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad (4.3)$$

dimana v adalah volume udara dan dapat diganti dengan Q (debit udara) sehingga diperoleh :

$$p_1 Q_1 = p_2 Q_2 \quad (4.4)$$

dimana

p_1 = tekanan udara yang sudah dikoreksi

Q_1 = debit udara yang terukur

p_2 = tekanan atmosfer

Q_2 = debit udara pada tekanan atmosfer

Dengan persamaan 4.2 dan 4.4 dapat dihitung tekanan udara sebenarnya dan debit udara pada tekanan atmosfer yang ditampilkan dalam tabel 4.4.

Tabel 4.4. Koreksi nilai tekanan dan debit udara

P atm = 101325 (N/m ²)				
Q terukur (lpm)	P terukur		P sebenarnya (N/m ²)	Q pada tekanan 1 atm (lpm)
	(inci air)	(N/m ²)		
0	0	0	101325	0
0.2	0.16	39.85312	101364.8531	0.200078664
0.4	0.5	124.541	101449.541	0.40049165
0.6	1	249.082	101574.082	0.601474949
0	0	0	101325	0
0.185714	0.14	34.87148	101359.8715	0.1857782
0.371429	0.42	104.61444	101429.6144	0.371812058
0.557143	0.82	204.24724	101529.2472	0.558265925
0	0	0	101325	0
0.171429	0.12	29.88984	101354.8898	0.171479141
0.342857	0.4	99.6328	101424.6328	0.343194274
0.514286	0.78	194.28396	101519.284	0.515271823

4.2.3 Mencari nilai f (faktor gesekan)

Dari data perbedaan tekanan yang diperoleh, dapat dihitung faktor gesekan dari *test section*. Pada bab sebelumnya telah diketahui beberapa data dan perhitungan sebagai berikut :

$$D_h = 0,04 \text{ m}$$

$$\rho_{air} = 998,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{air} = 1,002(10)^{-3} \text{ Ns/m}^2$$

$$\rho_{udara} = 1,204 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{udara} = 1,82(10)^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

$$l_{4-19} = 1,7 \text{ m}$$

$$l_{4-11} = 0,8 \text{ m}$$

$$l_{11-19} = 0,9 \text{ m}$$

Untuk aliran air tanpa udara, nilai f dapat dicari dengan menggunakan persamaan no. 2.8 yaitu :

$$f = \Delta p(D/l)/(\rho V^2/2) \quad (2.8)$$

Untuk aliran campuran air dan udara, nilai f dicari dengan persamaan yang sama namun $\rho = \rho_M$ dan $V = V_M$ dari persamaan 2.15, 2.16, 2.17, dan 2.18.

Untuk setiap nilai Δp yang diperoleh dapat dihitung nilai f dengan memasukkan semua data yang diketahui ke dalam rumus di atas. Dengan cara tersebut kita dapat membuat tabel dari nilai f .

Tabel 4.5. Tabel nilai f untuk $l_{4-19} = 1,7 \text{ m}$

Q_{air} (lpm)	V_{sa} (m/s)	Q_{udara} (lpm)	V_{sg} (m/s)	V_M (m/s)	E_G	ρ_M	μ_M	ΔP_{avg} (N/m ²)	f
						(kg/m ³)	(Ns/m ²)		
35	0.233333	0	0	0.233333	0	998.2	0.001002	37.66687	0.032616
35	0.233333	0.200079	0.001334	0.234667	0.004718	993.4964	0.000997	35.8416	0.030829
35	0.233333	0.400491	0.00267	0.236003	0.00939	988.8383	0.000993	34.01633	0.029065
35	0.233333	0.601474	0.00401	0.237343	0.014023	984.2196	0.000988	32.19107	0.027323
32.5	0.216667	0	0	0.216667	0	998.2	0.001002	34.01633	0.034161
32.5	0.216667	0.185778	0.001239	0.217905	0.004718	993.4966	0.000997	32.19107	0.032113
32.5	0.216667	0.371812	0.002479	0.219145	0.009388	988.8401	0.000993	30.53173	0.030255
32.5	0.216667	0.558265	0.003722	0.220388	0.014016	984.2256	0.000988	28.70647	0.028258
30	0.2	0	0	0.2	0	998.2	0.001002	30.53173	0.035984
30	0.2	0.171479	0.001143	0.201143	0.004717	993.4969	0.000997	28.70647	0.033608
30	0.2	0.343194	0.002288	0.202288	0.009388	988.8406	0.000993	26.8812	0.031262
30	0.2	0.515271	0.003435	0.203435	0.014015	984.227	0.000988	25.05593	0.028947

Tabel 4.6. Tabel nilai f untuk $l_{4-11} = 0,8 m$

Q_{air} (lpm)	V_{sl} (m/s)	Q_{udara} (lpm)	V_{SG} (m/s)	V_M (m/s)	E_G	ρ_M (kg/m ³)	μ_M (Ns/m ²)	ΔP_{avg} (N/m ²)	f
35	0.233333	0	0	0.233333	0	998.2	0.001002	17.9208	0.032975
35	0.233333	0.200079	0.001334	0.234667	0.004718	993.4964	0.000997	16.9252	0.030936
35	0.233333	0.400491	0.00267	0.236003	0.00939	988.8383	0.000993	15.9296	0.028923
35	0.233333	0.601474	0.00401	0.237343	0.014023	984.2196	0.000988	15.26587	0.027534
32.5	0.216667	0	0	0.216667	0	998.2	0.001002	16.09553	0.034348
32.5	0.216667	0.185778	0.001239	0.217905	0.004718	993.4966	0.000997	15.26587	0.032361
32.5	0.216667	0.371812	0.002479	0.219145	0.009388	988.8401	0.000993	14.27027	0.03005
32.5	0.216667	0.558265	0.003722	0.220388	0.014016	984.2256	0.000988	13.60653	0.028463
30	0.2	0	0	0.2	0	998.2	0.001002	14.27027	0.03574
30	0.2	0.171479	0.001143	0.201143	0.004717	993.4969	0.000997	13.4406	0.033438
30	0.2	0.343194	0.002288	0.202288	0.009388	988.8406	0.000993	12.77687	0.031576
30	0.2	0.515271	0.003435	0.203435	0.014015	984.227	0.000988	11.9472	0.02933

Tabel 4.7. Tabel nilai f untuk $l_{11-19} = 0,9 m$

Q_{air} (lpm)	V_{sl} (m/s)	Q_{udara} (lpm)	V_{SG} (m/s)	V_M (m/s)	E_G	ρ_M (kg/m ³)	μ_M (Ns/m ²)	ΔP_{avg} (N/m ²)	f
35	0.233333	0	0	0.233333	0	998.2	0.001002	19.912	0.032568
35	0.233333	0.200079	0.001334	0.234667	0.004718	993.4964	0.000997	19.08233	0.031003
35	0.233333	0.400491	0.00267	0.236003	0.00939	988.8383	0.000993	17.9208	0.028923
35	0.233333	0.601474	0.00401	0.237343	0.014023	984.2196	0.000988	17.09113	0.027401
32.5	0.216667	0	0	0.216667	0	998.2	0.001002	18.25267	0.034624
32.5	0.216667	0.185778	0.001239	0.217905	0.004718	993.4966	0.000997	17.25707	0.032517
32.5	0.216667	0.371812	0.002479	0.219145	0.009388	988.8401	0.000993	16.26147	0.030438
32.5	0.216667	0.558265	0.003722	0.220388	0.014016	984.2256	0.000988	15.26587	0.028386
30	0.2	0	0	0.2	0	998.2	0.001002	16.09553	0.035832
30	0.2	0.171479	0.001143	0.201143	0.004717	993.4969	0.000997	15.09993	0.033392
30	0.2	0.343194	0.002288	0.202288	0.009388	988.8406	0.000993	14.27027	0.031348
30	0.2	0.515271	0.003435	0.203435	0.014015	984.227	0.000988	13.27467	0.028968

Dari tabel nilai f di atas dapat dilihat bahwa pada setiap kondisi rasio debit udara /debit air sama nilai f relatif sama pada jarak pengukuran Δp yang berbeda yaitu pada posisi 4-19, 4-11, maupun 11-19.

Untuk setiap variasi nilai debit air dan udara dapat dihitung nilai faktor gesekan rata-rata (f_{avg}) yaitu :

$$f_{avg} = (f_{4-19} + f_{4-11} + f_{11-19})/3 \quad (4.5)$$

Untuk nilai bilangan Reynolds campuran air dan udara dicari dengan persamaan no. 2.19 sebagai berikut :

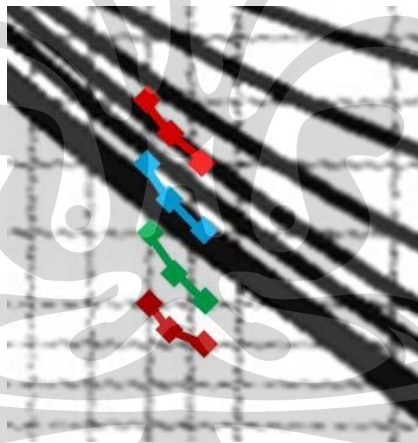
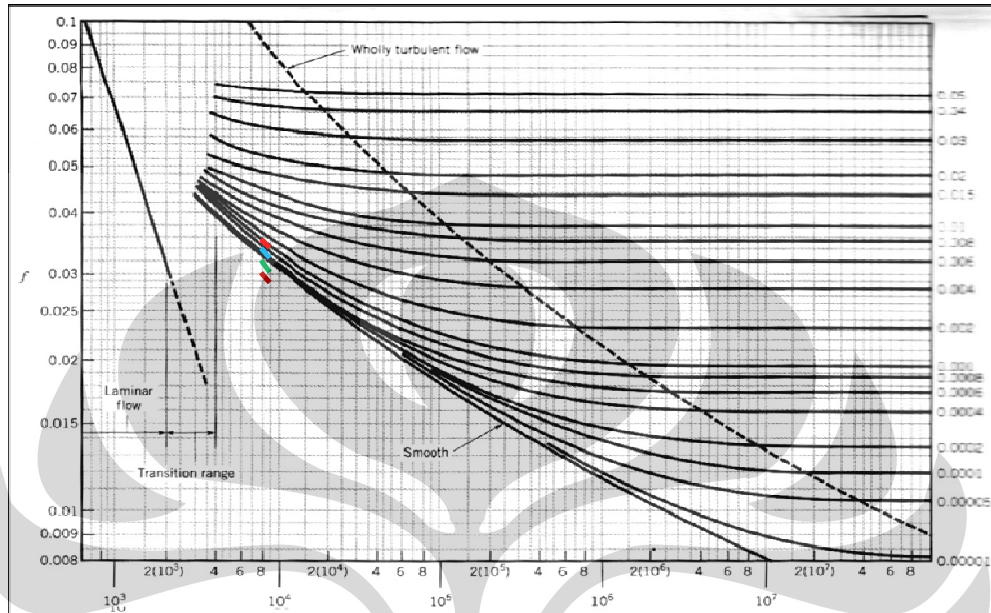
$$Re_{BTP} = (Re_{SG})^{k/(1+k)} (Re_{SL})^{1/e^{0,1k}} \quad (2.19)$$

Nilai – nilai tersebut ditampilkan dalam bentuk tabel sebagai berikut :

Tabel 4.8. Tabel nilai f_{avg}

Q air (lpm)	Q udara (lpm)	Re_{SL}	Re_{SG}	k	Re_{BTP}	f (4-19)	f (4-11)	f (11-19)	f avg
35	0	9297.937	0	0	9297.937	0.032616	0.032975	0.032568	0.03272
35	0.200079	9297.937	3.529592	6.9E-06	9297.96	0.030829	0.030936	0.031003	0.030923
35	0.400491	9297.937	7.065077	1.38E-05	9298.071	0.029065	0.028923	0.028923	0.02897
35	0.601474	9297.937	10.61062	2.07E-05	9298.217	0.027323	0.027534	0.027401	0.02742
32.5	0	8633.799	0	0	8633.799	0.034161	0.034348	0.034624	0.034377
32.5	0.185778	8633.799	3.277317	6.89E-06	8633.816	0.032113	0.032361	0.032517	0.03233
32.5	0.371812	8633.799	6.559141	1.38E-05	8633.915	0.030255	0.03005	0.030438	0.030248
32.5	0.558265	8633.799	9.848369	2.07E-05	8634.046	0.028258	0.028463	0.028386	0.028369
30	0	7969.661	0	0	7969.661	0.035984	0.03574	0.035832	0.035852
30	0.171479	7969.661	3.025067	6.89E-06	7969.672	0.033608	0.033438	0.033392	0.033479
30	0.343194	7969.661	6.054295	1.38E-05	7969.76	0.031262	0.031576	0.031348	0.031396
30	0.515271	7969.661	9.089911	2.07E-05	7969.877	0.028947	0.02933	0.028968	0.029082

Dari tabel di atas dapat dilihat faktor gesekan menjadi berkurang dengan bertambahnya debit udara yang masuk. Nilai faktor gesekan ini di plot ke dalam diagram Moody sebagai berikut :



- tanpa udara
- dengan $Q_{udara}/Q_{air} = 1/175$
- dengan $Q_{udara}/Q_{air} = 2/175$
- dengan $Q_{udara}/Q_{air} = 3/175$

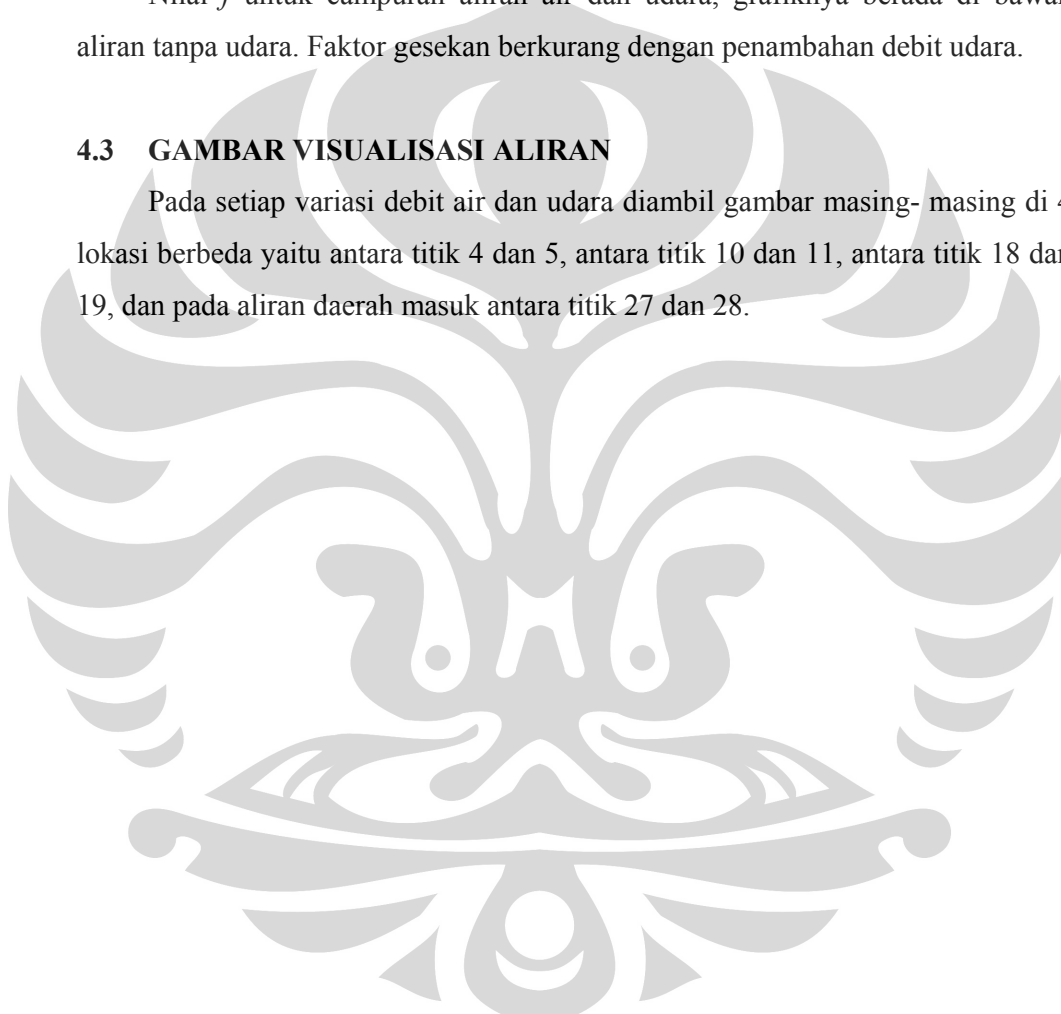
Gambar 4.7. Diagram Moody dengan nilai f dari hasil percobaan

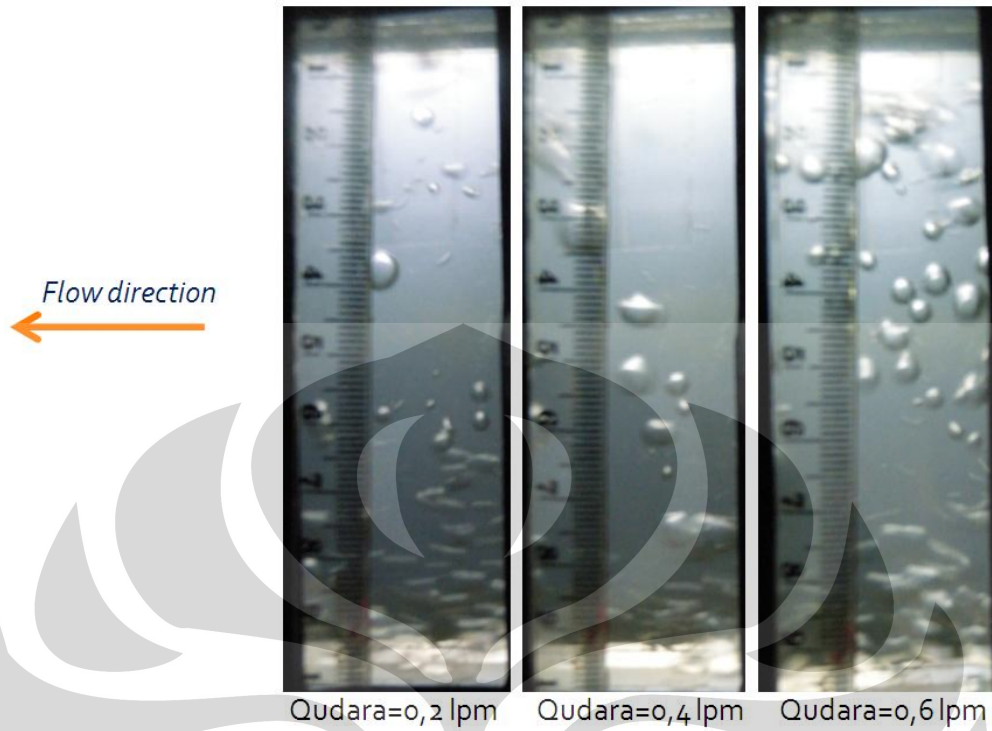
Dari hasil plot nilai f ke diagram Moody dapat dilihat nilai f untuk aliran air tanpa udara berada di atas grafik *Smooth Wall Turbulance* atau pada daerah *Partially Rough Wall Turbulance*. Walaupun acrylic termasuk plastik yang licin namun tetap mempunyai nilai faktor gesekan. Hal lainnya yang menambah faktor gesekan ini adalah bentuk penampang *test section* yang tidak bundar tapi persegi panjang.

Nilai f untuk campuran aliran air dan udara, grafiknya berada di bawah aliran tanpa udara. Faktor gesekan berkurang dengan penambahan debit udara.

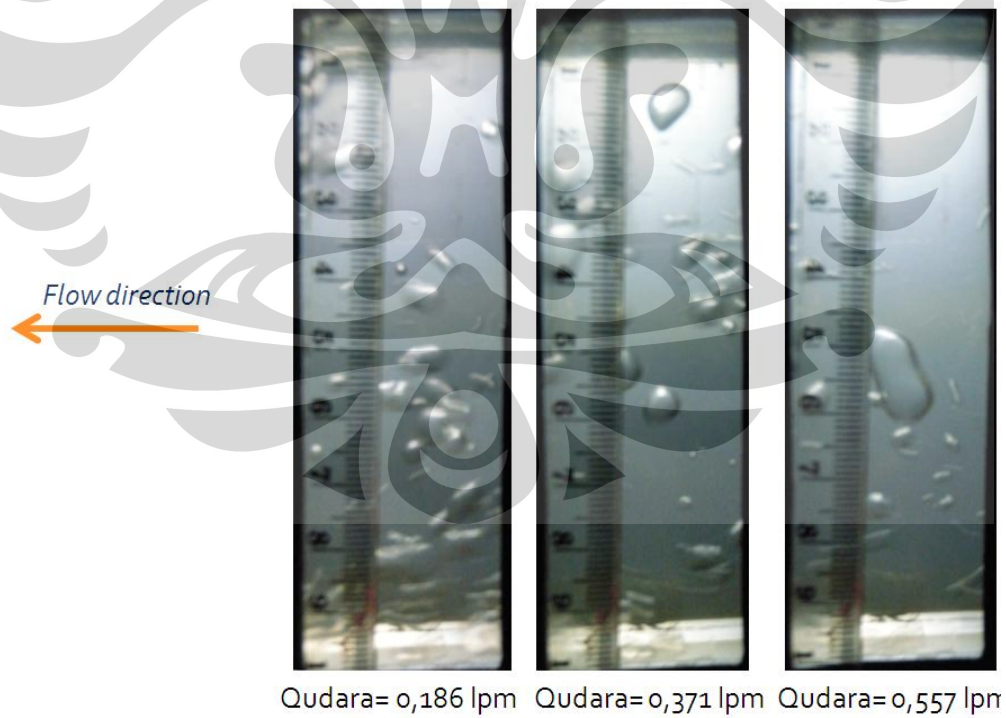
4.3 GAMBAR VISUALISASI ALIRAN

Pada setiap variasi debit air dan udara diambil gambar masing- masing di 4 lokasi berbeda yaitu antara titik 4 dan 5, antara titik 10 dan 11, antara titik 18 dan 19, dan pada aliran daerah masuk antara titik 27 dan 28.

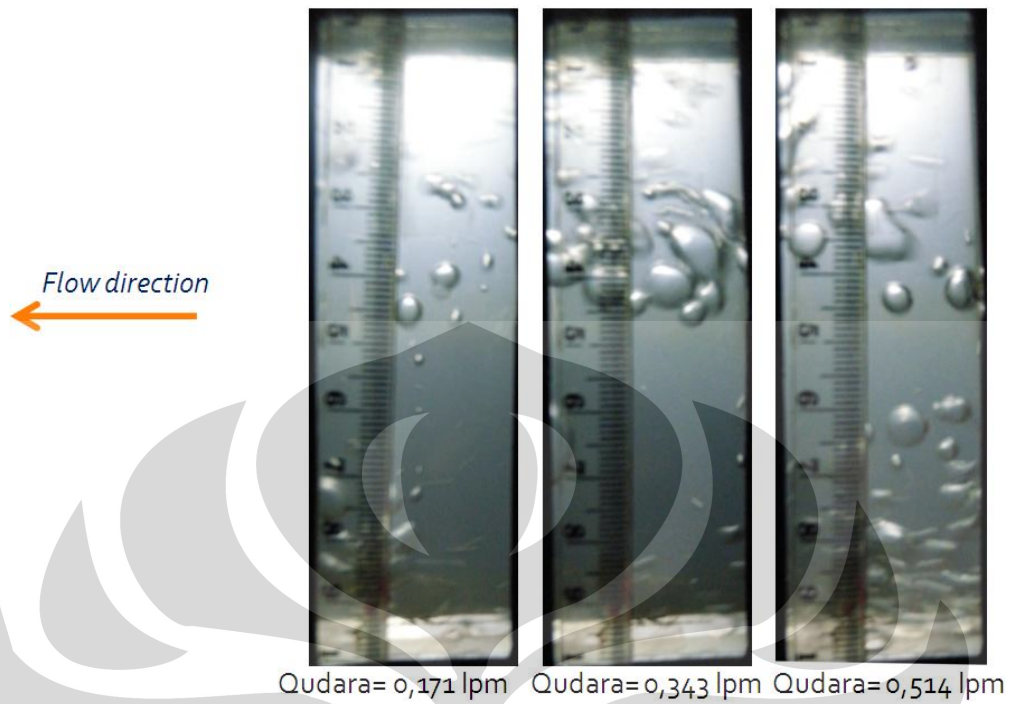




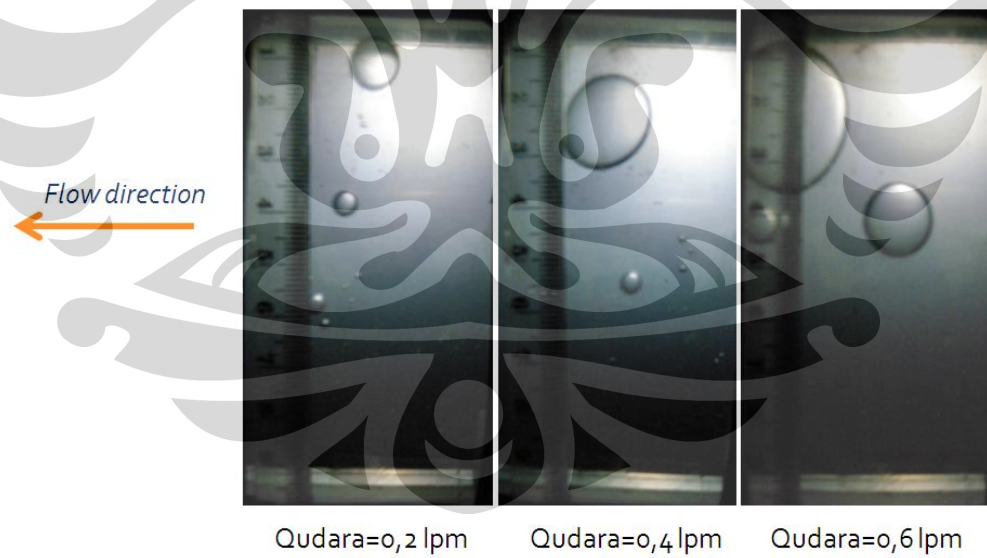
Gambar 4.8. Visualisasi pada titik 27-28, $Q_{air}=35$ lpm



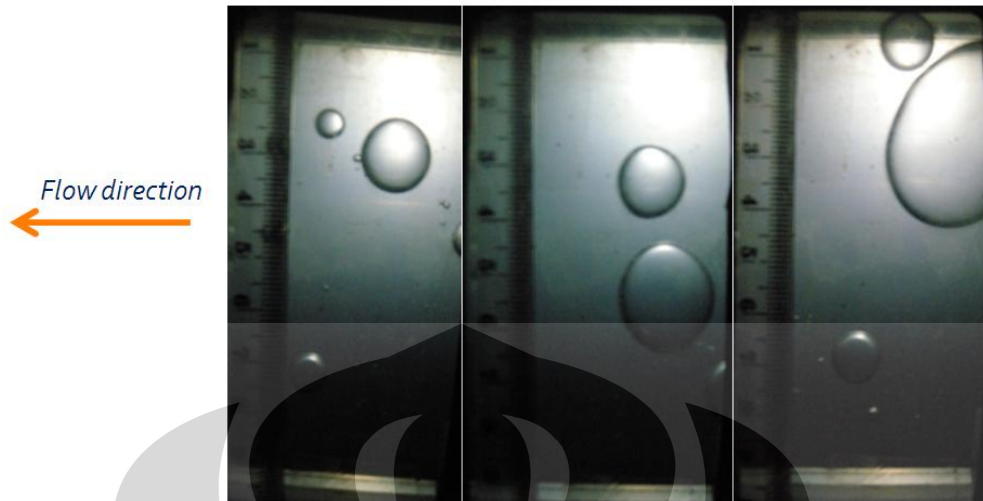
Gambar 4.9. Visualisasi pada titik 27-28, $Q_{air}=32,5$ lpm



Gambar 4.10. Visualisasi pada titik 27-28, $Q_{air}=30$ lpm

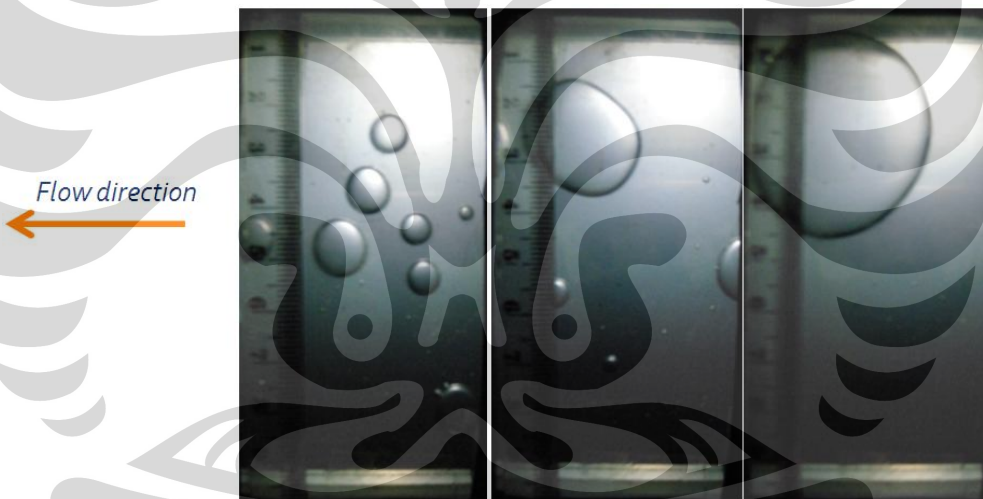


Gambar 4.11. Visualisasi pada titik 18-19, $Q_{air}=35$ lpm



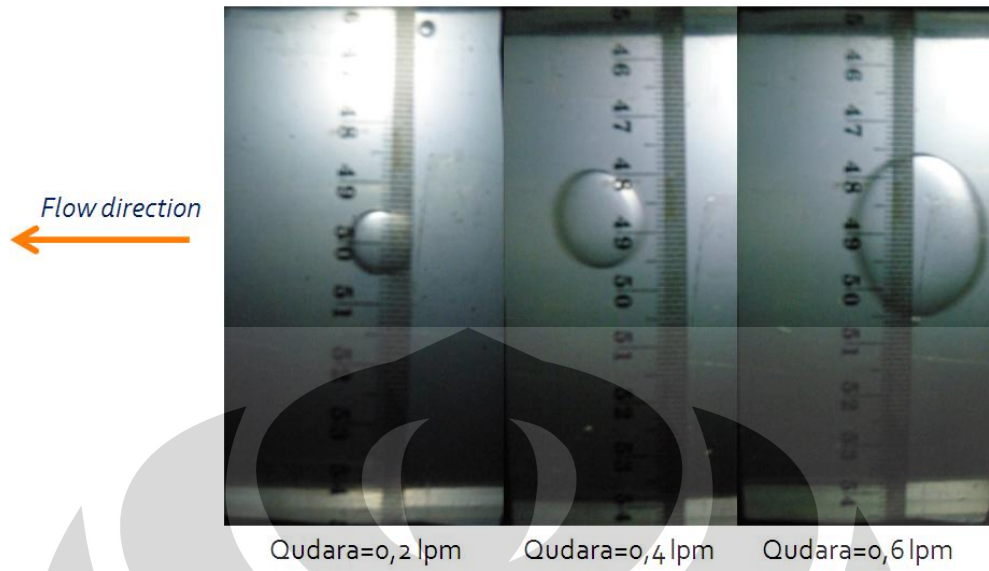
Qudara= 0,186 lpm Qudara=0,371 lpm Qudara=0,557 lpm

Gambar 4.12. Visualisasi pada titik 18-19, $Q_{air}=32,5$ lpm



Qudara= 0,171 lpm Qudara=0,343 lpm Qudara=0,514 lpm

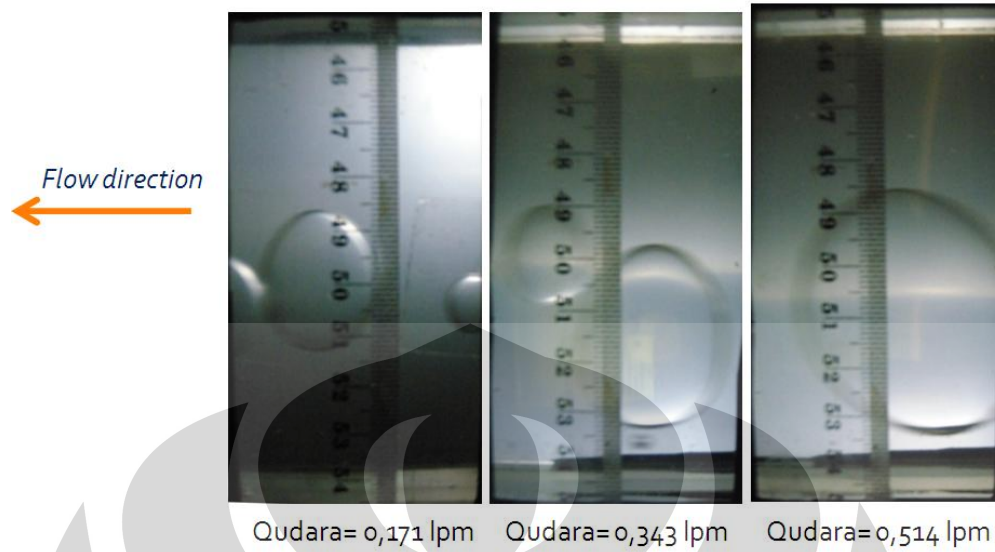
Gambar 4.13. Visualisasi pada titik 18-19, $Q_{air}=30$ lpm



Gambar 4.14. Visualisasi pada titik 10-11, $Q_{air}=35$ lpm



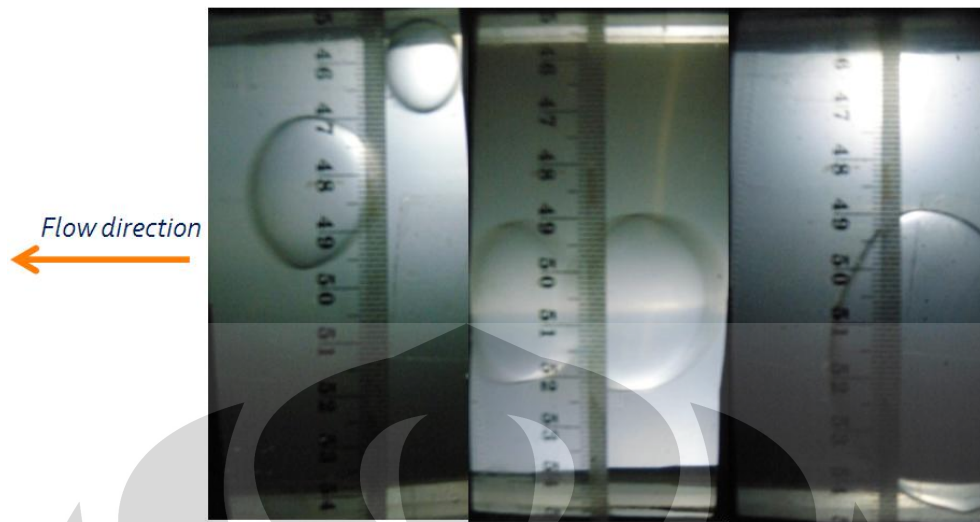
Gambar 4.15. Visualisasi pada titik 10-11, $Q_{air}=32,5$ lpm



Gambar 4.16. Visualisasi pada titik 10-11, Qair=30 lpm



Gambar 4.17. Visualisasi pada titik 4-5, Qair=35 lpm



Qudara= 0,186 lpm Qudara= 0,371 lpm Qudara= 0,557 lpm

Gambar 4.18. Visualisasi pada titik 4-5, $Q_{air}=32,5$ lpm



Qudara= 0,171 lpm Qudara= 0,343 lpm Qudara= 0,514 lpm

Gambar 4.19. Visualisasi pada titik 4-5, $Q_{air}=30$ lpm, $Q_{udara}=0,171$ lpm

Dari gambar visualisasi di atas dapat dilihat bahwa semakin kecil debit air, gelembung yang dihasilkan lebih besar walaupun perbandingan debit air dengan udara sama karena semakin kecil debit air kecepatan juga berkurang sehingga gelembung udara mempunyai waktu yang lebih lama untuk saling menggabungkan diri. Penambahan debit udara membuat pembesaran gelembung sangat signifikan. Jumlah gelembung akan berkurang sepanjang perjalanan melewati *test section* namun diameternya menjadi semakin besar karena bergabungnya gelembung udara yang satu dengan yang lainnya.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan dapat diambil kesimpulan-kesimpulan sebagai berikut :

1. Perbedaan tekanan naik dengan naiknya debit air.
2. Penambahan gelembung udara secara bertahap menurunkan perbedaan tekanan yang terjadi.
3. Penambahan debit udara membuat pembesaran gelembung sangat signifikan. Jumlah gelembung akan berkurang sepanjang perjalanan melewati *test section* namun diameternya menjadi semakin besar karena bergabungnya gelembung udara yang satu dengan yang lainnya.
4. Nilai faktor gesekan yang diperoleh berada di atas *smooth pipe*, nilai faktor gesekan turun dengan bertambahnya debit udara.

5.2. SARAN

Penyempurnaan metoda penelitian untuk mendapatkan karakteristik dan visualisasi aliran harus terus dilakukan untuk mendapatkan hasil yang maksimal. Debit air sebaiknya lebih tinggi sehingga mengurangi waktu gelembung-gelembung untuk saling menggabungkan diri. Gelembung yang dihasilkan dengan debit air yang lebih besar akan lebih berukuran kecil bahkan mikro sehingga yang diperoleh adalah *microbubble*.

DAFTAR ACUAN

- [1] Munson, Bruce R., Donald F. Young, Theodore H. Okiishi, “Mekanika Fluida Jilid 1”, Erlangga, 2003.
- [2] Nakayama, Y., “Introduction to Fluid Mechanics”, Butterworth Heintmann, 2000.
- [3] Munson, Bruce R., Donald F. Young, Theodore H. Okiishi, “Mekanika Fluida Jilid 2”, Erlangga, 2003.
- [4] Kandlikar, S., S. Garimella, D. Li, S. Colin, M.R. King, “Head Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels”, Elsevier, 2006.
- [5] Govier, G. W., K. Aziz, “The Flow of Complex Mixtures in Pipes”, Robert E. Krieger Publishing Company, Inc, 1987.
- [6] Kato, Hiroharu, Kento Miura, Hajime Yamaguchi, Masaru Miyanaaga, “Experimental Study on Microbubble Ejection Method for Frictional Drag Reduction”, Journal of Marine Science and Technology, 1998.
- [7] <http://www.flometrics.com/services/hydbub/hydbub.mpg>, 2 Agustus 2009.
- [8] Nouri, N. M. A., Sarreshtehdari, E. Maghsoudi, A. Moosaie, “Anexperimental study on the influence of fluid flowpattern on microbubble generation”, Jurnal, Springer-Verlag, 2008
- [9] Cengel, Yunus A., Michael A. Boles, “Thermodynamics an Engineering Approach Fourth Edition International Edition”, McGraw-Hill, 2002.
- [10] <http://www.suwaprecision.com>, 2 Agustus 2009.

LAMPIRAN 1

Pengukuran Δp pada titik 4-19 untuk $Q_{air}=35$ lpm

Q udara		0 lpm	0,2 lpm	0,4 lpm	0,6 lpm
P udara (inci air)		0	0.16	0.5	1
ΔP (inci air) untuk percobaan ke-	1	0.16	0.16	0.14	0.14
	2	0.16	0.16	0.14	0.14
	3	0.14	0.14	0.12	0.12
	4	0.18	0.14	0.12	0.12
	5	0.18	0.14	0.14	0.12
	6	0.12	0.12	0.14	0.12
	7	0.10	0.16	0.16	0.10
	8	0.16	0.10	0.16	0.16
	9	0.18	0.18	0.18	0.14
	10	0.12	0.16	0.14	0.12
	11	0.12	0.16	0.14	0.14
	12	0.20	0.16	0.12	0.12
	13	0.16	0.14	0.16	0.10
	14	0.16	0.14	0.12	0.10
	15	0.14	0.16	0.10	0.16
	16	0.16	0.12	0.10	0.18
	17	0.14	0.12	0.14	0.12
	18	0.18	0.12	0.12	0.14
	19	0.16	0.16	0.12	0.12
	20	0.10	0.14	0.14	0.14
	21	0.14	0.14	0.14	0.12
	22	0.14	0.14	0.14	0.12
	23	0.16	0.14	0.16	0.14
	24	0.18	0.14	0.14	0.14
	25	0.14	0.16	0.12	0.12
	26	0.16	0.12	0.12	0.12
	27	0.16	0.18	0.16	0.14
	28	0.14	0.14	0.14	0.12
	29	0.14	0.14	0.14	0.14
	30	0.16	0.14	0.14	0.12
ΔP_{avg} (inci air)		0.151333	0.144	0.136667	0.129333
ΔP_{avg} (N/m²)		37.66687	35.8416	34.01633	32.19107

LAMPIRAN 2

Pengukuran Δp pada titik 4-19 untuk $Q_{air}=32,5$ lpm

Q udara		0 lpm	0,186 lpm	0,371 lpm	0,557 lpm
P udara (inci air)		0	0.14	0.42	0.82
ΔP (inci air) untuk percobaan ke-	1	0.14	0.14	0.12	0.14
	2	0.12	0.14	0.12	0.12
	3	0.16	0.12	0.10	0.12
	4	0.14	0.12	0.14	0.12
	5	0.14	0.16	0.12	0.10
	6	0.16	0.12	0.12	0.10
	7	0.12	0.12	0.16	0.08
	8	0.14	0.10	0.14	0.14
	9	0.14	0.12	0.10	0.16
	10	0.12	0.16	0.08	0.12
	11	0.18	0.12	0.14	0.12
	12	0.16	0.12	0.14	0.14
	13	0.12	0.14	0.10	0.10
	14	0.12	0.14	0.12	0.08
	15	0.14	0.12	0.12	0.12
	16	0.18	0.12	0.14	0.12
	17	0.14	0.14	0.14	0.10
	18	0.12	0.12	0.10	0.10
	19	0.12	0.18	0.12	0.08
	20	0.16	0.16	0.12	0.12
	21	0.10	0.14	0.14	0.12
	22	0.12	0.12	0.14	0.16
	23	0.14	0.10	0.12	0.14
	24	0.14	0.12	0.12	0.08
	25	0.12	0.12	0.14	0.10
	26	0.12	0.10	0.12	0.14
	27	0.14	0.12	0.10	0.10
	28	0.14	0.12	0.12	0.10
	29	0.12	0.14	0.12	0.12
	30	0.14	0.14	0.12	0.12
ΔP_{avg} (inci air)		0.136667	0.129333	0.122667	0.115333
ΔP_{avg} (N/m ²)		34.01633	32.19107	30.53173	28.70647

LAMPIRAN 3

Pengukuran Δp pada titik 4-19 untuk $Q_{air}=30$ lpm

Q udara		0 lpm	0,171 lpm	0,343 lpm	0,514 lpm
P udara (inci air)		0	0.12	0.4	0.78
ΔP (inci air) untuk percobaan ke-	1	0.16	0.14	0.10	0.08
	2	0.14	0.12	0.10	0.08
	3	0.14	0.12	0.10	0.10
	4	0.12	0.14	0.14	0.10
	5	0.12	0.14	0.14	0.10
	6	0.12	0.12	0.12	0.06
	7	0.14	0.08	0.10	0.12
	8	0.14	0.10	0.08	0.12
	9	0.10	0.14	0.08	0.14
	10	0.08	0.10	0.14	0.08
	11	0.08	0.12	0.12	0.14
	12	0.12	0.14	0.12	0.10
	13	0.10	0.10	0.10	0.10
	14	0.12	0.10	0.10	0.12
	15	0.12	0.12	0.10	0.06
	16	0.12	0.08	0.14	0.08
	17	0.14	0.12	0.12	0.10
	18	0.14	0.12	0.10	0.10
	19	0.14	0.12	0.10	0.12
	20	0.10	0.10	0.10	0.10
	21	0.10	0.12	0.08	0.10
	22	0.14	0.08	0.10	0.10
	23	0.12	0.14	0.10	0.12
	24	0.12	0.14	0.12	0.14
	25	0.12	0.10	0.12	0.10
	26	0.14	0.12	0.10	0.10
	27	0.14	0.12	0.12	0.08
	28	0.12	0.10	0.10	0.10
	29	0.12	0.10	0.10	0.10
	30	0.12	0.12	0.10	0.08
ΔP_{avg} (inci air)		0.122667	0.115333	0.108	0.100667
ΔP_{avg} (N/m ²)		30.53173	28.70647	26.8812	25.05593

LAMPIRAN 4

Pengukuran Δp pada titik 4-11 untuk $Q_{air}=35 \text{ lpm}$

Q udara		0 lpm	0,2 lpm	0,4 lpm	0,6 lpm
P udara (inci air)		0	0.16	0.5	1
ΔP (inci air) untuk percobaan ke-	1	0.08	0.06	0.06	0.06
	2	0.08	0.06	0.06	0.06
	3	0.06	0.08	0.08	0.06
	4	0.06	0.06	0.08	0.04
	5	0.08	0.08	0.06	0.06
	6	0.04	0.08	0.08	0.08
	7	0.08	0.06	0.06	0.06
	8	0.10	0.04	0.06	0.06
	9	0.08	0.04	0.08	0.08
	10	0.06	0.06	0.06	0.06
	11	0.06	0.08	0.08	0.06
	12	0.08	0.10	0.06	0.06
	13	0.04	0.06	0.04	0.10
	14	0.08	0.08	0.06	0.06
	15	0.10	0.12	0.06	0.06
	16	0.08	0.06	0.10	0.04
	17	0.08	0.06	0.06	0.06
	18	0.04	0.08	0.08	0.08
	19	0.08	0.06	0.06	0.06
	20	0.06	0.08	0.06	0.06
	21	0.06	0.08	0.08	0.02
	22	0.06	0.06	0.06	0.04
	23	0.08	0.06	0.06	0.06
	24	0.08	0.08	0.04	0.06
	25	0.06	0.06	0.04	0.08
	26	0.08	0.06	0.06	0.06
	27	0.10	0.06	0.04	0.08
	28	0.08	0.06	0.06	0.06
	29	0.06	0.06	0.08	0.06
	30	0.08	0.06	0.06	0.06
ΔPavg (inci air)		0.072	0.068	0.064	0.061333
ΔPavg (N/m²)		17.9208	16.9252	15.9296	15.26587

LAMPIRAN 5

Pengukuran Δp pada titik 4-11 untuk $Q_{air}=32,5$ lpm

Q udara		0 lpm	0,186 lpm	0,371 lpm	0,557 lpm
P udara (inci air)		0	0.14	0.42	0.82
ΔP (inci air) untuk percobaan ke-	1	0.06	0.06	0.06	0.06
	2	0.08	0.06	0.04	0.06
	3	0.08	0.04	0.08	0.04
	4	0.06	0.06	0.06	0.08
	5	0.06	0.04	0.06	0.06
	6	0.08	0.06	0.06	0.04
	7	0.06	0.08	0.08	0.04
	8	0.06	0.08	0.06	0.04
	9	0.06	0.06	0.08	0.06
	10	0.10	0.08	0.06	0.06
	11	0.06	0.10	0.04	0.02
	12	0.04	0.06	0.06	0.04
	13	0.06	0.06	0.04	0.06
	14	0.06	0.04	0.04	0.04
	15	0.04	0.06	0.06	0.06
	16	0.06	0.02	0.06	0.06
	17	0.08	0.06	0.08	0.08
	18	0.08	0.08	0.08	0.06
	19	0.06	0.08	0.06	0.04
	20	0.08	0.06	0.06	0.08
	21	0.06	0.06	0.02	0.04
	22	0.06	0.08	0.04	0.06
	23	0.02	0.06	0.04	0.06
	24	0.06	0.04	0.06	0.08
	25	0.08	0.04	0.08	0.06
	26	0.06	0.06	0.04	0.04
	27	0.10	0.08	0.06	0.04
	28	0.06	0.06	0.04	0.06
	29	0.06	0.06	0.06	0.06
	30	0.06	0.06	0.06	0.06
ΔP_{avg} (inci air)		0.064667	0.061333	0.057333	0.054667
ΔP_{avg} (N/m ²)		16.09553	15.26587	14.27027	13.60653

LAMPIRAN 6

Pengukuran Δp pada titik 4-11 untuk $Q_{air}=30$ lpm

Q udara		0 lpm	0,171 lpm	0,343 lpm	0,514 lpm
P udara (inci air)		0	0.12	0.4	0.78
ΔP (inci air) untuk percobaan ke-	1	0.04	0.06	0.06	0.04
	2	0.06	0.06	0.04	0.04
	3	0.04	0.06	0.04	0.06
	4	0.04	0.04	0.06	0.04
	5	0.06	0.04	0.06	0.04
	6	0.08	0.04	0.04	0.02
	7	0.08	0.06	0.06	0.02
	8	0.06	0.06	0.02	0.04
	9	0.06	0.06	0.04	0.04
	10	0.04	0.08	0.06	0.06
	11	0.06	0.08	0.06	0.06
	12	0.06	0.06	0.08	0.06
	13	0.08	0.04	0.06	0.06
	14	0.04	0.06	0.02	0.04
	15	0.02	0.02	0.04	0.04
	16	0.06	0.04	0.04	0.06
	17	0.08	0.04	0.06	0.04
	18	0.08	0.06	0.06	0.06
	19	0.06	0.06	0.06	0.08
	20	0.06	0.08	0.08	0.06
	21	0.08	0.06	0.06	0.06
	22	0.04	0.06	0.04	0.06
	23	0.06	0.04	0.06	0.04
	24	0.04	0.06	0.04	0.04
	25	0.06	0.04	0.04	0.06
	26	0.06	0.04	0.04	0.02
	27	0.04	0.06	0.06	0.06
	28	0.06	0.04	0.06	0.06
	29	0.06	0.06	0.04	0.04
	30	0.06	0.06	0.06	0.04
ΔP_{avg} (inci air)		0.057333	0.054	0.051333	0.048
ΔP_{avg} (N/m ²)		14.27027	13.4406	12.77687	11.9472

LAMPIRAN 7

Pengukuran Δp pada titik 11-19 untuk $Q_{air}=35$ lpm

Q udara		0 lpm	0,2 lpm	0,4 lpm	0,6 lpm
P udara (inci air)		0	0.16	0.5	1
ΔP (inci air) untuk percobaan ke-	1	0.08	0.06	0.08	0.06
	2	0.06	0.08	0.06	0.06
	3	0.10	0.08	0.08	0.08
	4	0.08	0.06	0.10	0.08
	5	0.08	0.06	0.10	0.06
	6	0.08	0.08	0.06	0.10
	7	0.06	0.10	0.08	0.06
	8	0.08	0.10	0.06	0.08
	9	0.06	0.08	0.08	0.08
	10	0.08	0.12	0.08	0.06
	11	0.08	0.08	0.08	0.04
	12	0.12	0.08	0.06	0.10
	13	0.08	0.10	0.06	0.06
	14	0.12	0.08	0.10	0.04
	15	0.10	0.08	0.06	0.06
	16	0.08	0.06	0.04	0.08
	17	0.08	0.06	0.10	0.06
	18	0.06	0.04	0.08	0.04
	19	0.08	0.06	0.08	0.08
	20	0.10	0.06	0.06	0.08
	21	0.08	0.08	0.08	0.10
	22	0.12	0.10	0.06	0.08
	23	0.08	0.08	0.02	0.08
	24	0.06	0.08	0.04	0.06
	25	0.04	0.06	0.06	0.06
	26	0.08	0.08	0.08	0.10
	27	0.06	0.08	0.10	0.06
	28	0.06	0.06	0.06	0.04
	29	0.08	0.08	0.08	0.06
	30	0.08	0.08	0.08	0.06
ΔPavg (inci air)		0.08	0.076667	0.072	0.068667
ΔPavg (N/m²)		19.912	19.08233	17.9208	17.09113

LAMPIRAN 8

Pengukuran Δp pada titik 11-19 untuk $Q_{air}=32,5$ lpm

Q udara	0 lpm	0,186 lpm	0,371 lpm	0,557 lpm	
P udara (inci air)	0	0.14	0.42	0.82	
ΔP (inci air) untuk percobaan ke-	1	0.06	0.08	0.06	0.06
	2	0.08	0.08	0.06	0.06
	3	0.08	0.06	0.06	0.04
	4	0.06	0.06	0.10	0.06
	5	0.06	0.06	0.06	0.08
	6	0.10	0.04	0.08	0.06
	7	0.06	0.08	0.06	0.04
	8	0.10	0.06	0.06	0.04
	9	0.06	0.06	0.04	0.06
	10	0.10	0.12	0.04	0.02
	11	0.06	0.06	0.06	0.06
	12	0.08	0.04	0.08	0.08
	13	0.06	0.08	0.06	0.08
	14	0.06	0.08	0.08	0.06
	15	0.08	0.06	0.06	0.10
	16	0.10	0.08	0.06	0.06
	17	0.06	0.08	0.04	0.04
	18	0.08	0.08	0.10	0.06
	19	0.04	0.06	0.08	0.06
	20	0.10	0.06	0.08	0.08
	21	0.06	0.04	0.08	0.06
	22	0.06	0.10	0.06	0.06
	23	0.08	0.08	0.06	0.02
	24	0.06	0.06	0.08	0.06
	25	0.10	0.08	0.06	0.10
	26	0.06	0.08	0.06	0.06
	27	0.08	0.06	0.04	0.08
	28	0.06	0.06	0.08	0.08
	29	0.08	0.08	0.06	0.06
	30	0.08	0.06	0.06	0.06
ΔP_{avg} (inci air)	0.073333	0.069333	0.065333	0.061333	
ΔP_{avg} (N/m²)	18.25267	17.25707	16.26147	15.26587	

LAMPIRAN 9

Pengukuran Δp pada titik 11-19 untuk $Q_{air}=30$ lpm

Q udara		0 lpm	0,171 lpm	0,343 lpm	0,514 lpm
P udara (inci air)		0	0.12	0.4	0.78
ΔP (inci air) untuk percobaan ke-	1	0.06	0.06	0.06	0.04
	2	0.06	0.04	0.04	0.06
	3	0.04	0.04	0.06	0.06
	4	0.02	0.06	0.06	0.08
	5	0.06	0.06	0.08	0.06
	6	0.08	0.06	0.06	0.10
	7	0.06	0.08	0.06	0.06
	8	0.06	0.06	0.10	0.06
	9	0.08	0.10	0.08	0.04
	10	0.10	0.06	0.06	0.02
	11	0.10	0.06	0.06	0.02
	12	0.06	0.02	0.04	0.06
	13	0.06	0.04	0.04	0.06
	14	0.08	0.04	0.04	0.04
	15	0.06	0.06	0.06	0.04
	16	0.08	0.06	0.06	0.06
	17	0.06	0.06	0.06	0.04
	18	0.06	0.08	0.02	0.06
	19	0.10	0.06	0.06	0.06
	20	0.06	0.10	0.06	0.08
	21	0.06	0.08	0.04	0.06
	22	0.04	0.06	0.06	0.06
	23	0.08	0.06	0.06	0.04
	24	0.06	0.06	0.08	0.02
	25	0.08	0.04	0.06	0.06
	26	0.06	0.06	0.06	0.04
	27	0.04	0.08	0.02	0.04
	28	0.06	0.06	0.06	0.06
	29	0.06	0.06	0.06	0.06
	30	0.06	0.06	0.06	0.06
ΔP_{avg} (inci air)		0.064667	0.060667	0.057333	0.053333
ΔP_{avg} (N/m ²)		16.09553	15.09993	14.27027	13.27467

LAMPIRAN 10

Physical Properties of Water (SI Units) [3]

Temperature (°C)	Density, ρ (kg/m ³)	Specific Weight, γ (kN/m ³)	Dynamic Viscosity, μ (N.s/m ²)	Kinematic Viscosity, ν (m ² /s)	Surface Tension, σ (N/m)	Vapor Pressure, p_v [N/m ² (abs)]	Speed of Sound, c (m/s)
0	999.9	9.806	1.787 E - 3	1.787 E - 6	7.56 E - 2	6.105 E + 2	1403
5	1000.0	9.807	1.519 E - 3	1.519 E - 6	7.49 E - 2	8.722 E + 2	1427
10	999.7	9.804	1.307 E - 3	1.307 E - 6	7.42 E - 2	1.228 E + 3	1447
20	998.2	9.789	1.002 E - 3	1.004 E - 6	7.28 E - 2	2.338 E + 3	1481
30	995.7	9.765	7.975 E - 4	8.009 E - 7	7.12 E - 2	4.243 E + 3	1507
40	992.2	9.731	6.529 E - 4	6.580 E - 7	6.96 E - 2	7.376 E + 3	1526
50	988.1	9.690	5.468 E - 4	5.534 E - 7	6.79 E - 2	1.233 E + 4	1541
60	983.2	9.642	4.665 E - 4	4.745 E - 7	6.62 E - 2	1.992 E + 4	1552
70	977.8	9.589	4.042 E - 4	4.134 E - 7	6.44 E - 2	3.116 E + 4	1555
80	971.8	9.530	3.547 E - 4	3.650 E - 7	6.26 E - 2	4.734 E + 4	1555
90	965.3	9.467	3.147 E - 4	3.260 E - 7	6.08 E - 2	7.010 E + 4	1550
100	958.4	9.399	2.818 E - 4	2.940 E - 7	5.89 E - 2	1.013 E + 5	1543

LAMPIRAN 11

Properti Fisika dari Udara pada Tekanan Atmosfer Standar (SI Units) [3]

Temperature (°C)	Density, ρ (kg/m ³)	Specific Weight ^b , γ (N/m ³)	Dynamic Viscosity, μ (N·s/m ²)	Kinematic Viscosity, ν (m ² /s)	Specific Heat Ratio, k (—)	Speed of Sound, c (m/s)
-40	1.514	14.85	1.57 E - 5	1.04 E - 5	1.401	306.2
-20	1.395	13.68	1.63 E - 5	1.17 E - 5	1.401	319.1
0	1.292	12.67	1.71 E - 5	1.32 E - 5	1.401	331.4
5	1.269	12.45	1.73 E - 5	1.36 E - 5	1.401	334.4
10	1.247	12.23	1.76 E - 5	1.41 E - 5	1.401	337.4
15	1.225	12.01	1.80 E - 5	1.47 E - 5	1.401	340.4
20	1.204	11.81	1.82 E - 5	1.51 E - 5	1.401	343.3
25	1.184	11.61	1.85 E - 5	1.56 E - 5	1.401	346.3
30	1.165	11.43	1.86 E - 5	1.60 E - 5	1.400	349.1
40	1.127	11.05	1.87 E - 5	1.66 E - 5	1.400	354.7
50	1.109	10.88	1.95 E - 5	1.76 E - 5	1.400	360.3
60	1.060	10.40	1.97 E - 5	1.86 E - 5	1.399	365.7
70	1.029	10.09	2.03 E - 5	1.97 E - 5	1.399	371.2
80	0.9996	9.803	2.07 E - 5	2.07 E - 5	1.399	376.6
90	0.9721	9.533	2.14 E - 5	2.20 E - 5	1.398	381.7
100	0.9461	9.278	2.17 E - 5	2.29 E - 5	1.397	386.9
200	0.7461	7.317	2.53 E - 5	3.39 E - 5	1.390	434.5
300	0.6159	6.040	2.98 E - 5	4.84 E - 5	1.379	476.3
400	0.5243	5.142	3.32 E - 5	6.34 E - 5	1.368	514.1
500	0.4565	4.477	3.64 E - 5	7.97 E - 5	1.357	548.8
1000	0.2772	2.719	5.04 E - 5	1.82 E - 4	1.321	694.8