



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KARAKTERISTIK ALIRAN AIR PADA SALURAN MINI  
(*MINICHANNEL*) DENGAN PENAMBAHAN GELEMBUNG  
UDARA**

**SKRIPSI**

**REZA AHMAD MUHARAM  
0404020606**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
DEPOK  
DESEMBER 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KARAKTERISTIK ALIRAN AIR PADA SALURAN MINI  
(MINICHANNEL) DENGAN PENAMBAHAN GELEMBUNG  
UDARA**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**REZA AHMAD MUHARAM  
0404020606**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
DEPOK  
DESEMBER 2009**

## **HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar**

**Nama : Reza Ahmad Muharam**

**NPM : 0404020606**

**Tanda tangan :**

**Tanggal : 17 Desember 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi diajukan oleh :

Nama : Reza Ahmad Muharam  
NPM : 0404020606  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Karakteristik Aliran Air pada Saluran Mini  
(*Minichannel*) dengan Penambahan Gelembung  
Udara

Telah berhasil dipertahankan di hadapan 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 (.....)  
Penguji : Dr. Ir. Ahmad Indra S., M.Eng (.....)  
Penguji : Ardiansyah ST, M.Eng (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Januari 2010

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari awal kuliah sampai penyusunan skripsi ini, maka akan sulit bagi saya dalam menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Dr. Ir. Warjito, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing saya dalam menyelesaikan skripsi ini;
2. Pihak Departemen Teknik Mesin yang telah membantu memfasilitasi dalam menyelesaikan skripsi ini;
3. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan dukungan moril dan materil; dan
4. Semua teman dan sahabat yang tidak dapat disebut satu-persatu atas doa dan dukungannya selama ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 7 Januari 2010

Penulis

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

---

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

Nama : Reza Ahmad Muharam  
NPM : 0404020606  
Program studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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 PADA SALURAN MINI  
(MINICHANNEL) DENGAN PENAMBAHAN GELEMBUNG UDARA**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/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

(Reza Ahmad Muharam)

Reza Ahmad Muharam  
NPM 04 04 02 06 06  
Departemen Teknik Mesin

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Warjito, M.Eng

## KARAKTERISTK ALIRAN AIR PADA SALURAN BERUKURAN MINI (MINICHANNEL) DENGAN PENAMBAHAN GELEMBUNG UDARA

### ABSTRAK

*Minichannel* merupakan saluran dengan diameter hidrolis antara 3.0 mm sampai 200  $\mu\text{m}$ . Perbandingan  $\varepsilon/D$  memberikan efek yang sangat besar pada saluran berdiameter kecil seperti *minichannel* dibandingkan dengan saluran konvensional. Dampaknya dapat terlihat dari fenomena peningkatan *pressure drop* dari aliran dan nilai *friction factor* ( $f$ ) yang dihasilkan. Penelitian ini juga untuk mengetahui apakah ada pengaruh penambahan gelembung udara (*bubble*) terhadap nilai *pressure drop* dan *friction factor*.

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental dan hasilnya disampaikan dalam bentuk grafik yang kemudian dianalisa secara deskriptif. Pengamatan dilakukan terhadap *flow rate* dan *head loss* dari aliran dengan cara mengalirkan air dari sebuah bak tampungan air dengan *head* tertentu ke dalam sebuah *test section* berukuran mini (1 mm x 0.8 mm) dengan panjang 65 cm. Hasil penelitian menunjukkan *pressure drop* yang cukup signifikan. Hal ini dapat dilihat dari *head loss* pada manometer yang dipasang pada *test section*. Dan nilai dari *friction factor* yang didapat pun bervariasi pada tiap metode perhitungan nilai *friction factor* yang digunakan. Metode perhitungan yang digunakan adalah Darcys-Weisbach, Poiseuille, Fanning dan korelasinya terhadap rumus  $24/Re$  dan  $14/Re$ .

**Kata kunci :** *Minichannel, pressure drop, friction factor, bubble, Darcys-Weisbach, Poiseuille, Fanning.*

Reza Ahmad Muharam NPM 04 04 02 06 06 Mechanical Engineering Department	Councillor Dr. Ir. Warjito, M.Eng
<b>FLOW CHARACTERISTICS OF WATER AND WATER-AIR MIXTURE          IN MINICHANNEL</b>	
<p><b>ABSTRACT</b></p> <p>Minichannel is a channel with hydraulic diameter of 3.0 mm to 200 <math>\mu\text{m}</math>. Comparison of <math>\epsilon / D</math> provides a very large effect on small diameter channels as minichannel compared with conventional channels. The impact can be seen from the phenomenon of increased pressure drop of the flow and the value of friction factor (<math>f</math>). This research is also to see if there any effects of additional air bubbles (bubble) to the value of pressure drop and friction factor.</p> <p>Research methods that used are experimental methods and the results will be presented in graphical form and then will be analyzed descriptively. Observations were made of flow rate and head loss of flow by pouring water from a tub of water bin with a certain head into a mini-sized test sections (1 mm x 0.8 mm) with a length of 65 cm. The results showed a pressure drop is quite significant. This can be seen from the head loss in manometer mounted on the test section. And the value of the friction factor was obtained in each method varies the value of friction factor calculation used. Calculation method used is Darcys-Weisbach, Poiseuille, Fanning and the correlation with <math>24/Re</math> and <math>14/Re</math> formula.</p> <p><b>Keywords : Minichannel, pressure drop, friction factor, bubble, Darcys-Weisbach, Poiseuille, Fanning.</b></p>	



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>x</b>
<b>DAFTAR GRAFIK</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	<b>xv</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 <b>LATAR BELAKANG</b> .....	<b>1</b>
1.2 <b>BATASAN MASALAH</b> .....	<b>2</b>
1.3 <b>TUJUAN PENULISAN SKRIPSI</b> .....	<b>3</b>
1.4 <b>METODOLOGI PENYUSUNAN SKRIPSI</b> .....	<b>3</b>
1.5 <b>SISTEMATIKA PENULISAN SKRIPSI</b> .....	<b>3</b>
<b>BAB 2 LANDASAN TEORI</b> .....	<b>5</b>
2.1 <b>ALIRAN LAMINAR DAN TURBULEN [1]</b> .....	<b>5</b>
2.2 <b>ALIRAN VISKOS DALAM PIPA [1]</b> .....	<b>6</b>
2.3 <b>DAERAH MASUK DAN ALIRAN BERKEMBANG PENUH [1]</b> .....	<b>7</b>
2.4 <b>PENGUKURAN TEKANAN [1]</b> .....	<b>9</b>
2.5 <b>DARCYS-WEISBACH</b> .....	<b>11</b>
2.6 <b>TEORI MINICHANNEL</b> .....	<b>12</b>
2.7 <b>TEORI MICROBUBBLE [12]</b> .....	<b>17</b>

<b>BAB 3 RANCANG BANGUN ALAT DAN METODE PENGAMBILAN PENGOLAHAN DATA .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 DESAIN ALAT PENELITIAN .....</b>	<b>20</b>
3.1.1 Experimental Set Up.....	20
3.1.2 Test Section .....	21
3.1.3 Bak Penampung Air .....	22
3.1.4 Manometer.....	23
3.1.5 Gelas Ukur.....	24
3.1.6 Pompa Udara Akuarium.....	24
<b>3.2 METODE PENGAMBILAN DATA.....</b>	<b>25</b>
3.2.1 Metode Pengambilan Data Laju Aliran.....	25
3.2.2 Prosedur Pengambilan Data Laju Aliran.....	25
3.2.3 Metode Pengambilan Data Tekanan.....	26
3.2.4 Prosedur Pengambilan Data Tekanan.....	26
<b>3.3 METODE PENGOLAHAN DATA.....</b>	<b>27</b>
<b>BAB 4 PENGOLAHAN DAN ANALISA DATA .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 ANALISA DEBIT ALIRAN .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2 ANALISA HEAD TEKAN.....</b>	<b>32</b>
<b>4.3 PENGARUH INJEKSI GELEMBUNG UDARA.....</b>	<b>35</b>
<b>4.4 PERHITUNGAN FRICTION FACTOR.....</b>	<b>37</b>
4.4.1 Darcys-Weisbach.....	37
4.4.2 Bilangan Poiseuille (Shah and London,1978).....	41
4.4.3 Fanning Friction Factor .....	43
<b>4.5 ANALISA CONSTRICTED FLOW.....</b>	<b>52</b>
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>54</b>
<b>5.1 KESIMPULAN .....</b>	<b>54</b>
<b>5.2 SARAN.....</b>	<b>55</b>
<b>DAFTAR ACUAN .....</b>	<b>56</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>58</b>

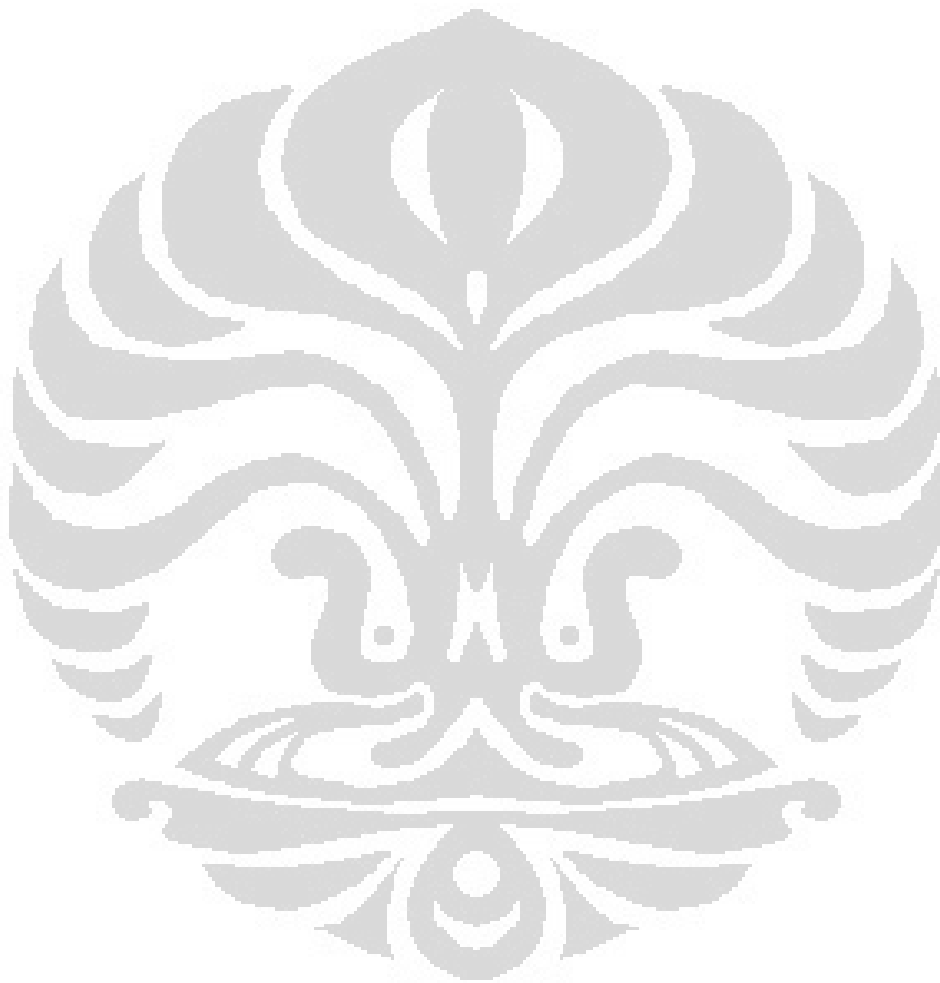
## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Eksperimen Ilustrasi Jenis Aliran .....	6
<b>Gambar 2. 2</b> Aliran dalam Pipa.....	7
<b>Gambar 2. 3</b> Daerah Aliran Sedang Berkembang dan Berkembang Penuh .....	7
<b>Gambar 2. 4</b> Ilustrasi Tekanan .....	10
<b>Gambar 2. 5</b> Barometer air Raksa.....	10
<b>Gambar 2. 6</b> Moody Diagram [4] .....	12
<b>Gambar 2. 7</b> (a) Penampang <i>minichannel</i> beserta <i>aspect ratio</i> dan Bilangan Poiseuille; (b) Beberapa <i>aspect ratio</i> dan Bilangan Poiseuille; (c) grafik <i>aspect ratio</i> vs. Bilangan Poiseuille. [11].....	16
<b>Gambar 2. 8</b> <i>Darcy friction factor plot based on a constricted flow diameter</i> [5] ....	17
<b>Gambar 2. 9</b> Pergerakan <i>microbubble</i> pada daerah sekitar dinding atas <i>channel</i> [13] .....	18
<b>Gambar 2. 10</b> Gambar Skematik <i>bubble</i> yang terbentuk (1) <i>bubble</i> pada saluran konvensional (2a-c) <i>bubble</i> pada <i>minichannel</i> dan <i>microchannel</i> .....	18
<b>Gambar 2. 11</b> Microgravity flow patterns documented by Lowe and Rezkallah (1999). Reprinted from Lowe, D. C. and Rezkallah, K. S., Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void fraction signals .....	19
<b>Gambar 2. 12</b> Air–water flow patterns in 25- $\mu$ m circular channel. Reprinted from Serizawa, A., Feng, Z. and Kawara, Z. Two-phase flow in microchannels, Experimental Thermal & Fluid Science, 26(6–7), pp. 703–714 .....	19
<b>Gambar 3. 1</b> <i>Experimental Set-up</i> .....	20
<b>Gambar 3. 2</b> <i>Minichannel Test Section</i> .....	21
<b>Gambar 3. 3</b> Bak penampung air .....	22
<b>Gambar 3. 4</b> Manometer air .....	23
<b>Gambar 3. 5</b> Gelas ukur .....	24
<b>Gambar 3. 6</b> Pompa udara akuarium.....	24

**Gambar 4. 1** Bentuk gelembung yang terbentuk, gambar (a) menunjukkan *head* yang lebih rendah .....30

**Gambar 4. 2** Distribusi penurunan tekanan pada daerah *entrance flow* dan pada daerah *fully developed* [1].....34

**Gambar 4. 3** Hasil penelitian friction factor Kandlikar (2005).....51



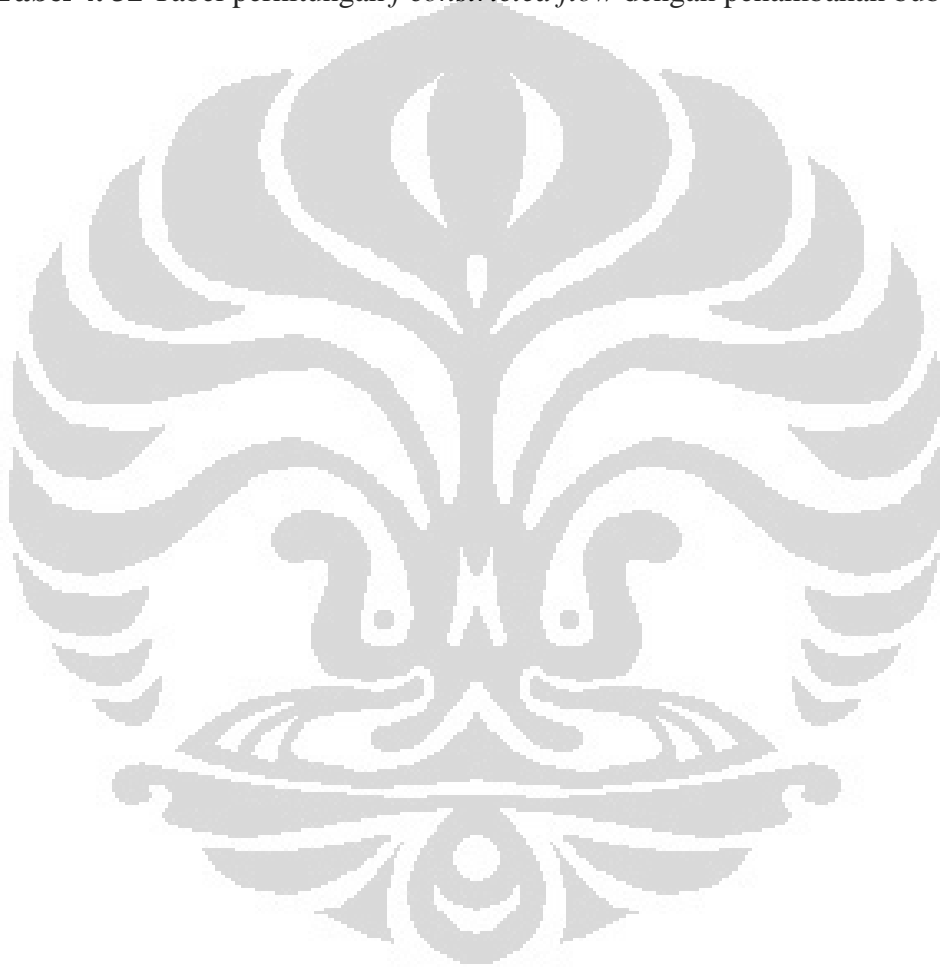
## DAFTAR GRAFIK

<b>Grafik 4. 1</b> Nilai Reynolds yang terjadi untuk setiap ketinggian <i>head</i> .....	29
<b>Grafik 4. 2</b> Distribusi tekanan pada minichannel .....	32
<b>Grafik 4. 3</b> Distribusi penurunan tekanan pada minichannel .....	32
<b>Grafik 4. 4</b> Distribusi pressure drop .....	33
<b>Grafik 4. 5</b> Perbandingan <i>pressure head</i> pada <i>head</i> 65 cm.....	35
<b>Grafik 4. 6</b> Perbandingan <i>pressure head</i> pada <i>head</i> 55 cm.....	36
<b>Grafik 4. 7</b> Perbandingan <i>pressure head</i> pada <i>head</i> 45 cm.....	36
<b>Grafik 4. 8</b> Perbandingan <i>pressure drop</i> pada <i>head</i> 65 cm .....	36
<b>Grafik 4. 9</b> Perbandingan <i>pressure drop</i> pada <i>head</i> 55 cm.....	37
<b>Grafik 4. 10</b> Perbandingan <i>pressure drop</i> pada <i>head</i> 45 cm .....	37
<b>Grafik 4. 11</b> Perbandingan <i>friction factor</i> Darcys-Weisbach.....	41
<b>Grafik 4. 12</b> Perbandingan <i>friction factor</i> Poiseuille .....	43
<b>Grafik 4. 13</b> Perbandingan <i>friction factor</i> Fanning .....	49
<b>Grafik 4. 14</b> Perbandingan <i>friction factor</i> .....	50
<b>Grafik 4. 15</b> <i>f constricted Flow</i> .....	53
<b>Grafik 4. 16</b> <i>f constricted flow</i> dengan <i>bubble</i> .....	53

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 4. 1</b> Data <i>minichannel</i> dan sifat-sifat air .....	28
<b>Tabel 4. 2</b> Tabel hasil pengolahan debit aliran untuk <i>head</i> 90 sampai 70 cm .....	28
<b>Tabel 4. 3</b> Tabel hasil pengolahan debit aliran untuk <i>head</i> 65 sampai 45 cm .....	28
<b>Tabel 4. 4</b> Tabel hasil pengolahan debit aliran yang dengan <i>bubble</i> untuk <i>head</i> 65 sampai 45 cm .....	29
<b>Tabel 4. 5</b> Distribusi <i>pressure drop</i> .....	33
<b>Tabel 4. 6</b> Tabel Perhitungan Darcys Weisbach pada <i>head</i> 90 dan 85 cm .....	38
<b>Tabel 4. 7</b> Tabel Perhitungan Darcys Weisbach pada <i>head</i> 80 dan 75 cm .....	38
<b>Tabel 4. 8</b> Tabel Perhitungan Darcys Weisbach pada <i>head</i> 70 dan 65 cm .....	38
<b>Tabel 4. 9</b> Tabel Perhitungan Darcys Weisbach pada <i>head</i> 60 dan 55 cm .....	39
<b>Tabel 4. 10</b> Tabel Perhitungan Darcys Weisbach pada <i>head</i> 50 dan 45 cm .....	39
<b>Tabel 4. 11</b> Tabel Perhitungan Darcys Weisbach aliran dengan <i>bubble</i> pada <i>head</i> 65 dan 60 cm .....	40
<b>Tabel 4. 12</b> Tabel Perhitungan Darcys Weisbach aliran dengan <i>bubble</i> pada <i>head</i> 55 dan 50 cm .....	40
<b>Tabel 4. 13</b> Tabel Perhitungan Darcys Weisbach aliran dengan <i>bubble</i> pada <i>head</i> 45 cm .....	40
<b>Tabel 4. 14</b> Hasil perhitungan <i>friction factor</i> dengan metode Poiseuille .....	42
<b>Tabel 4. 15</b> Hasil perhitungan <i>friction factor</i> aliran dengan <i>bubble</i> dengan metode Poiseuille .....	42
<b>Tabel 4. 16</b> Tabel perhitungan Fanning pada <i>head</i> 90 cm .....	43
<b>Tabel 4. 17</b> Tabel perhitungan Fanning pada <i>head</i> 85 cm .....	44
<b>Tabel 4. 18</b> Tabel perhitungan Fanning pada <i>head</i> 80 cm .....	44
<b>Tabel 4. 19</b> Tabel perhitungan Fanning pada <i>head</i> 75 cm .....	44
<b>Tabel 4. 20</b> Tabel perhitungan Fanning pada <i>head</i> 70 cm .....	45
<b>Tabel 4. 21</b> Tabel perhitungan Fanning pada <i>head</i> 65 cm .....	45
<b>Tabel 4. 22</b> Tabel perhitungan Fanning pada <i>head</i> 60 cm .....	45
<b>Tabel 4. 23</b> Tabel perhitungan Fanning pada <i>head</i> 55 cm .....	46
<b>Tabel 4. 24</b> Tabel perhitungan Fanning pada <i>head</i> 50 cm .....	46

<b>Tabel 4. 25</b>	Tabel perhitungan Fanning pada <i>head</i> 45 cm.....	46
<b>Tabel 4. 26</b>	Tabel perhitungan Fanning aliran dengan <i>bubble</i> pada <i>head</i> 65 cm .....	47
<b>Tabel 4. 27</b>	Tabel perhitungan Fanning aliran dengan <i>bubble</i> pada <i>head</i> 60 cm .....	47
<b>Tabel 4. 28</b>	Tabel perhitungan Fanning aliran dengan <i>bubble</i> pada <i>head</i> 55 cm .....	47
<b>Tabel 4. 29</b>	Tabel perhitungan Fanning aliran dengan <i>bubble</i> pada <i>head</i> 50 cm .....	48
<b>Tabel 4. 30</b>	Tabel perhitungan Fanning aliran dengan <i>bubble</i> pada <i>head</i> 45 cm .....	48
<b>Tabel 4. 31</b>	Tabel perhitungan <i>f constricted flow</i> .....	52
<b>Tabel 4. 32</b>	Tabel perhitungan <i>f constricted flow</i> dengan penambahan <i>bubble</i> .....	53



## DAFTAR SIMBOL

<b>Simbol</b>	<b>Keterangan</b>	<b>Satuan</b>
$P$	Tekanan	$\text{N/m}^2$
$dP$	Selisih tekanan	$\text{N/m}^2$
$Q$	Debit aliran	ml/min
$V$	Kecepatan fluida	m/s
$D$	Diameter	mm
$D_h$	Diameter hidrolis	mm
$\mu$	Viskositas dinamik	$\text{N.s/m}^2$
$\varepsilon$	Kekasaran ekivalen	mm
$Re$	Bilangan Reynolds	-
$h_L$	<i>Head loss</i>	cm
$f$	<i>Friction factor</i>	-
$f_{cf}$	<i>Friction factor constricted</i>	-
$L$	Panjang saluran	cm
$l_e$	Panjang daerah masuk	cm
$Po$	Bilangan Poiseuille	-
$A$	<i>Aspect Ratio</i>	-
$G$	<i>Mass flux</i>	$\text{kg/m}^2\text{s}$



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Kemajuan teknologi menuntut semakin kompleksnya produk-produk teknologi. Salah satu ciri fisik dari kemajuan teknologi tersebut adalah bentuk dan ukuran produk yang menjadi lebih kecil, mini, ataupun mikro. Namun tetap diharapkan produk tersebut dapat bekerja dengan performa yang lebih baik.

Keuntungan dari produk yang berukuran lebih kecil adalah *material cost* yang rendah dan kemudahan untuk dibawa-bawa (*portable*). Namun hal ini juga menimbulkan masalah yang cukup signifikan, yakni bahwa semakin kecil dimensi suatu produk elektronik, maka kebutuhan akan pendinginan komponennya semakin besar.

Untuk itu, pendinginan yang dilakukan tidak bisa hanya menggunakan *fan* saja, melainkan perlu adanya proses pendinginan yang lebih efisien dimana salah satunya menggunakan air sebagai fluida pendingin.

Penggunaan air sebagai fluida pendingin memang sudah dikenal sejak lama. Namun penggunaannya sebagai pendingin komponen alat elektronik modern yang berdimensi sangat kecil merupakan sebuah inovasi baru, dimana air sebagai media pendingin akan dilewatkan melalui daerah aliran yang berupa pipa atau *channel* yang berukuran mini yang bisa kita sebut *minichannel*.

Keuntungan yang diperoleh dari *minichannel* bila dilihat dari sisi thermofluida adalah nilai *heat transfer* yang lebih besar, karena ukuran yang lebih kecil membuat bidang kontak menjadi lebih besar, *heat exchanger* yang lebih *compact* (kecil), dan volume aliran massa yang lebih kecil. Namun ukuran *minichannel* yang sangat kecil ini juga menimbulkan beberapa kendala, yakni tingginya *pressure drop* akibat peningkatan friksi dan juga masalah fabrikasi, dimana sangat sulit untuk membuat *minichannel* tersebut. Hal lain yang perlu diperhatikan dalam aplikasi *minichannel* untuk *heat exchanger* adalah apabila timbulnya gelembung gelembung udara akibat pemanasan.

Gelembung- gelembung yang timbul akankah mempunyai bentuk seperti apa, dan apakah ukuran dari gelembung tersebut akan mempengaruhi laju aliran. Dimana yang menjadi pertanyaan apakah gelembung tersebut akan meningkatkan atau menurunkan nilai dari *pressure head* akibat dari perubahan friksi. Dari penelitian-penelitian sebelumnya beberapa karakteristik aliran pada mini channel telah dapat dijelaskan dengan baik. Namun demikian masih ada beberapa karakteristik aliran yang penting secara fisik dan praktis masih belum dapat dijelaskan dengan baik, diantaranya adalah pengaruh gelembung pada *pressure drop*. Karena itu penelitian dalam bidang tersebut mempunyai skala prioritas yang tinggi untuk dilakukan

Skripsi ini merupakan laporan penelitian karakteristik aliran pada *minichannel*. Test section terbuat dari bahan *acrylic*, berbentuk empat persegi panjang dengan ukuran 1 mm x 0,8 mm dan panjang 65 cm. Karakteristik aliran yang diteliti adalah *pressure drop* dan pengaruh gelembung pada *pressure drop*. Pengujian dibagi menjadi dua, yaitu pengujian aliran pada *minichannel* tanpa ada gelembung dan pengujian aliran pada *minichannel* dengan adanya penambahan gelembung.

Pada skripsi ini akan dilakukan pengujian menggunakan sebuah *test section* berupa *minichannel* yang terbuat dari bahan *acrylic*. Kemudian *minichannel* tersebut dihubungkan dengan bak penampung air dengan nilai ketinggian (*head*) tertentu. Selanjutnya akan divariasikan ketinggian air pada bak untuk melihat fenomena mekanika fluida yang terjadi, khususnya adalah *pressure drop* yang terjadi dan nilai *friction factor* pada *minichannel* tersebut. Pengujian dibagi menjadi dua, yaitu pengujian aliran pada *minichannel* tanpa ada gelembung dan pengujian aliran pada *minichannel* dengan adanya penambahan gelembung.

## 1.2 BATASAN MASALAH

Permasalahan dibatasi pada fenomena dan perhitungan aliran fluida pada *minichannel* dari sudut pandang ilmu mekanika fluida. Perhitungan lebih difokuskan pada perbandingan nilai *friction factor* berdasarkan metode Darcys –

Weisbach, Poiseuille dan Fanning. Dalam tugas akhir ini tidak dibahas mengenai kinerja air sebagai media pendingin dalam proses *heat transfer* dan penambahan *bubble* yang dilakukan bukan melalui proses pemanasan tapi dengan diinjeksikan udara kedalam saluran *minichannel*.

### 1.3 TUJUAN PENULISAN SKRIPSI

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah :

Mengetahui fenomena aliran air pada *minichannel* dengan mengamati besar *pressure drop* dan *friction factor* yang terjadi pada *minichannel* serta dampak dari penambahan gelembung terhadap *pressure drop* dan *friction factor*.

### 1.4 METODOLOGI PENYUSUNAN SKRIPSI

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah :

1. Tinjauan Pustaka, mempelajari buku, situs, dan artikel yang terkait.
2. Penelitian di Lab dan pengumpulan data.
3. Pengolahan data penelitian dan analisa.
4. Penyusunan Tugas Akhir, dimulai dari pembuatan proposal sampai dengan kesimpulan.

### 1.5 SISTEMATIKA PENULISAN SKRIPSI

Penulisan tugas akhir ini tersusun dalam 5 (lima) bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

#### **BAB I    Pendahuluan**

Bab ini berisi latar belakang, tujuan, batasan masalah, dan metodologi penyusunan tugas akhir.

#### **BAB II   Dasar Teori**

Bab ini berisi dasar teori yang berkaitan dengan penyusunan tugas akhir ini. Adapun dasar teori tersebut adalah Mekanika Fluida.

#### **BAB III  Rancang Bangun Alat dan Metode Pengambilan Pengolahan Data**

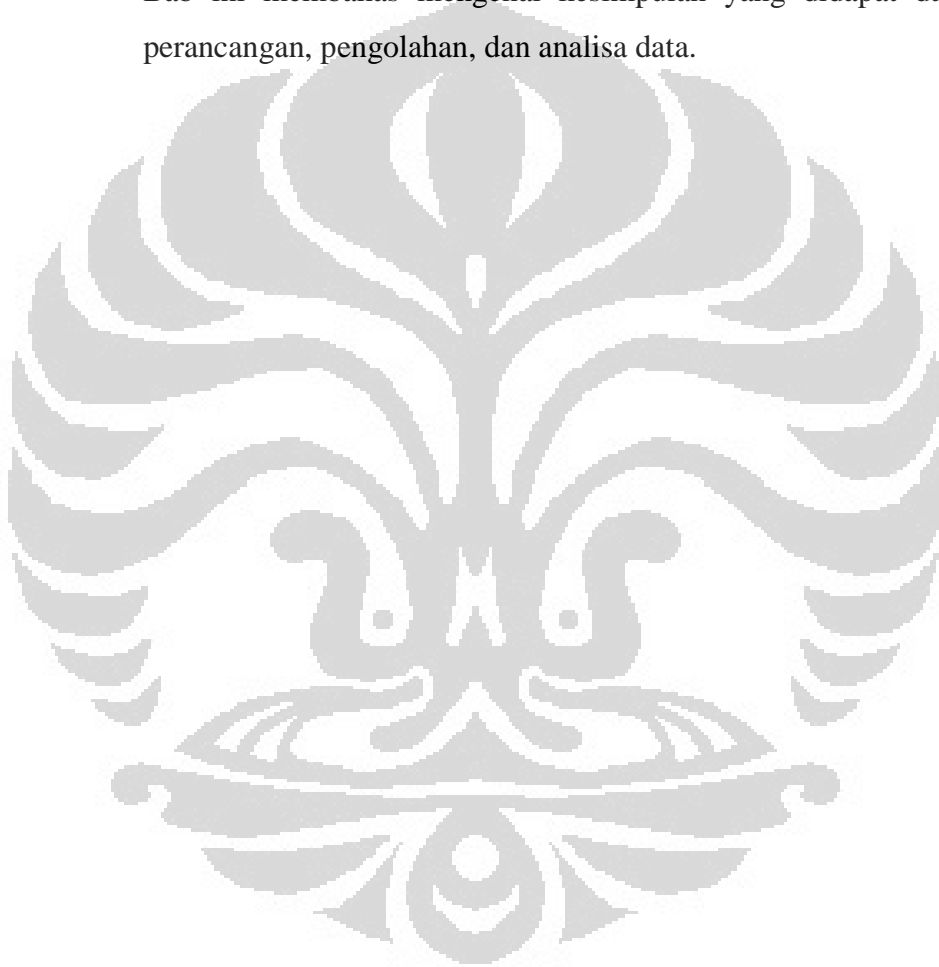
Bab ini berisi cara pembuatan alat uji (*test section*) dan alat-alat pendukung lainnya serta metode dan prosedur dalam pengambilan dan pengolahan data.

#### **BAB IV Pengolahan dan Analisa Data**

Bab ini berisi pengolahan data dan analisa hasil penelitian sehingga didapatkan hubungan antara debit, *head* tekanan, dan *friction factor* ( $f$ ).

#### **BAB V Kesimpulan dan Saran**

Bab ini membahas mengenai kesimpulan yang didapat dari hasil perancangan, pengolahan, dan analisa data.



## BAB 2

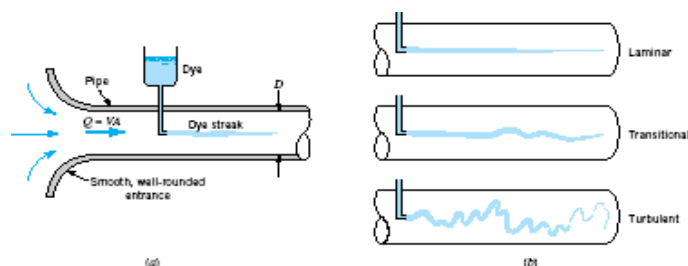
### LANDASAN TEORI

Beberapa materi dari Mekanika Fluida yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain :

- a. Aliran Laminar dan Turbulen,
- b. Aliran Viskos dalam Pipa,
- c. Daerah Masuk dan Aliran berkembang Penuh, dan
- d. Pengukuran Tekanan.
- e. Darcys-Weisbach
- f. *Minichannel*
- g. *Microbubble*

#### 2.1 ALIRAN LAMINAR DAN TURBULEN [1]

Aliran fluida dalam sebuah pipa mungkin merupakan aliran laminar atau turbulen. Osborne Reynolds (1842-1912), ilmuwan dan ahli matematika Inggris, adalah orang yang pertama kali membedakan 2 klasifikasi aliran ini dengan peralatan yang sederhana seperti gambar di bawah ini. Jika suatu air mengalir melalui pipa berdiameter  $D$  dengan kecepatan rata-rata  $V$ , sifat-sifat berikut ini dapat diamati dengan menginjeksikan zat pewarna yang mengambang seperti pada gambar. Untuk "laju aliran yang cukup kecil" guratan zat pewarna akan tetap berupa garis yang terlihat jelas selama mengalir, dengan hanya sedikit saja menjadi kabur karena difusi molekuler dari zat pewarna ke air di sekelilingnya. Untuk suatu "laju aliran sedang" yang lebih besar, guratan zat pewarna berfluktuasi menurut waktu, ruang dan olakan putus-putus dengan perilaku tak beraturan muncul di sepanjang guratan. Sementara itu untuk "laju aliran yang cukup besar" guratan zat pewarna dengan sangat segera menjadi kabur dan menyebar di seluruh pipa dengan pola yang acak. Ketiga karakteristik ini, yang masing-masing disebut sebagai aliran *laminar*, *transisi*, dan *turbulen*.



**Gambar 2. 1** Eksperimen Ilustrasi Jenis Aliran

Untuk aliran pipa, parameter tak berdimensi yang paling penting adalah bilangan Reynolds ( $Re$ ), adalah perbandingan antara efek inersia dan viskositas dalam aliran. Dari hasil analisa, dapat diketahui bahwa aliran pada pipa tergantung terhadap angka Reynolds (*Reynolds Number*),

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana  $V$  adalah kecepatan rata-rata dalam pipa;  $D$  adalah diameter dalam pipa;  $\rho$  adalah kerapatan;  $\mu$  adalah Viskositas. Artinya, aliran di dalam sebuah pipa adalah laminar, transisi atau turbulen dapat diketahui dari bilangan Reynoldsnnya . Aliran dalam pipa berlaku sebagai berikut :

$Re \leq 2300$ , maka aliran tersebut laminar.

$2300 \leq Re \leq 4000$ , maka aliran tersebut transisi.

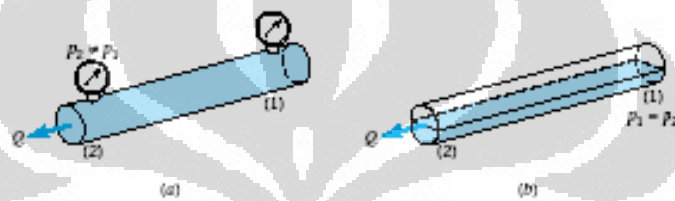
$Re \geq 4000$ , maka aliran tersebut turbulen.

## 2.2 ALIRAN VISKOS DALAM PIPA [1]

Sistem Transportasi fluida dengan menggunakan pipa atau saluran memiliki aplikasi praktik yang cukup banyak. Pabrik kimia dan penyaring oli sangat tergantung dengan pipa-pipa ini. Pembangkit tenaga listrik berisikan bermacam-macam pipa dan saluran untuk memindahkan fluida yang diaplikasikan dalam proses konversi energi dan lain sebagainya.

Walaupun tidak seluruh saluran yang digunakan untuk memindahkan fluida dari suatu tempat ke tempat lainnya mempunyai penampang bundar, namun kebanyakan yang digunakan adalah seperti itu. Saluran ini meliputi pipa-pipa air, selang-selang hidrolis, dan saluran-saluran lainnya yang dirancang untuk menahan perbedaan tekanan yang sangat besar melintasi dinding-dindingnya tanpa mengakibatkan perubahan bentuk.

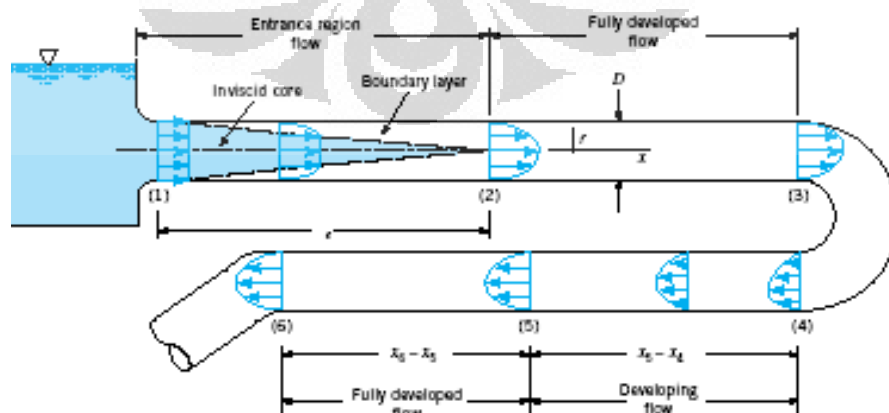
Aliran yang terjadi pada Tugas Akhir ini diasumsikan mengisi penuh pipa seperti pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2. 2** Aliran dalam Pipa

### 2.3 DAERAH MASUK DAN ALIRAN BERKEMBANG PENUH [1]

Setiap fluida yang mengalir dalam sebuah pipa harus memasuki pipa dalam satu lokasi. Daerah aliran di dekat lokasi fluida memasuki pipa disebut sebagai daerah masuk (entrance region) dan diilustrasikan pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2. 3** Daerah Aliran Sedang Berkembang dan Berkembang Penuh

Daerah tersebut mungkin sekitar beberapa kaki permulaan dari sebuah pipa yang dihubungkan pada sebuah tangki atau bagian awal dari sebuah duct udara panas yang berasal dari sebuah tungku.

Aliran di daerah masuk sebuah pipa sangat kompleks, fluida biasanya memasuki pipa dengan profil kecepatan yang hampir seragam pada bagian (1). Selagi pipa fluida bergerak melewati pipa, efek viskos menyebabkan tetap menempel pada dinding pipa (kondisi lapisan batas tanpa selip). Hal ini berlaku jika fluidanya adalah udara yang relatif inviscid, ataupun minyak yang sangat viskos. Jadi, sebuah lapisan batas (boundary layer) dimana efek viskos menjadi penting timbul di sepanjang dinding pipa sedemikian sehingga di luar itu profil kecepatan tidak berubah lagi menurut  $x$ .

Lapisan batas telah tumbuh ketebalannya sehingga memenuhi pipa secara menyeluruh. Efek viskos sangat penting di dalam lapisan batas. Untuk fluida di luar lapisan batas [di dalam inti inviscid (inviscid core) yang mengelilingi garis sumbu (1) dan (2) ], efek viskos dapat diabaikan.

Bentuk dari profil kecepatan di dalam pipa tergantung pada apakah aliran laminar atau turbulen, sebagaimana pula panjang daerah masuk,  $\ell_e$ . Seperti pada banyak sifat lainnya dari aliran pipa, panjang masuk tak berdimensi,  $\ell_e/D$ , berkorelasi cukup baik dengan bilangan Reynolds. Panjang masuk pada umumnya diberikan hubungan :

$$\frac{\ell_e}{D} = 0,006 \text{ Re} \quad \text{untuk aliran laminar.....(2.2)}$$

Dan

$$\frac{\ell_e}{D} = 4,4(\text{Re})^{1/6} \quad \text{Re untuk aliran turbulen....(2.3)}$$

Untuk aliran-aliran dengan bilangan Reynolds sangat rendah, panjang masuk dapat sangat pendek ( $\ell_e = 0,6 D$  jika  $\text{Re} = 10$ ), sementara untuk aliran-



aliran dengan bilangan Reynolds besar, daerah masuk tersebut dapat sepanjang berkali-kali diameter pipa sebelum ujung akhir dari daerah masuk dicapai ( $\ell_e = 120 D$  untuk  $Re = 2000$ ). Untuk banyak masalah-masalah teknik praktis  $10^4 < Re < 10^5$  sehingga  $20D < \ell_e < 30D$ .

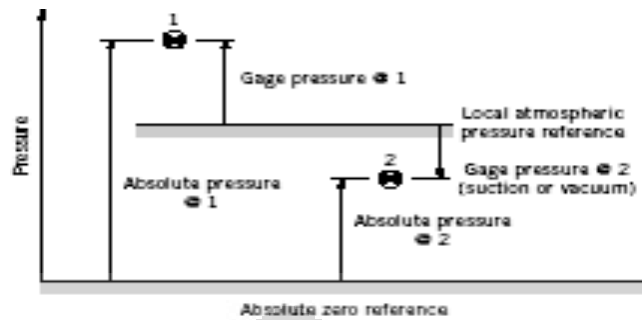
Perhitungan profil kecepatan dan distribusi tekanan di dalam daerah masuk sangat rumit. Namun, apabila fluida telah mencapai ujung akhir dari daerah masuk, bagian (2) dari gambar di atas, aliran lebih mudah digambarkan karena kecepatan hanyalah fungsi jarak dari sumbu pipa,  $r$ , dan tidak bergantung pada  $x$ . Hal ini berlaku sampai sifat dari pipa berubah karena sesuatu hal, misalnya perubahan diameter, atau sampai fluida mengalir melalui sebuah belokan, katup, atau komponen lainnya pada bagian (3). Aliran antara (2) dan (3) disebut berkembang penuh (*fully developed*). Setelah gangguan atas aliran berkembang penuh [pada bagian (4)], aliran secara bertahap mulai kembali ke sifat berkembang penuhnya [bagian (5)] dan terus dengan profil ini sampai komponen pipa berikutnya dicapai [bagian (6)]. Dalam banyak kasus, pipa cukup panjang, sehingga terdapat panjang aliran berkembang penuh yang lebih besar dibandingkan dengan aliran yang sedang berkembang.

## 2.4 PENGUKURAN TEKANAN [1]

Tekanan dinyatakan sebagai gaya per satuan luas. Dimana, satuan tekanan samdenagn tegangan, dan pada umumnya tekanan dapat dianggap sebagai sejenis tegangan juga. Tekanan absolut diukur relatif terhadap suatu keadaan hampa sempurna (tekanan nol mutlak), atau gaya persatuan luas yang bekerja pada dinding penampung fluida. Tekanan relatif atau tekanan pengukuran adalah selisih antara tekanan absolut dan tekanan atmosfer setempat.

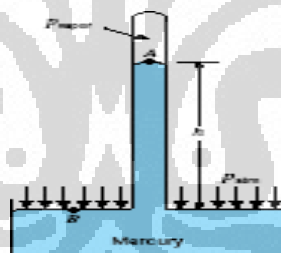
Tekanan mutlak selalu positif, tetapi tekanan pengukuran dapat positif maupun negatif, tergantung apakah tekanan tersebut di atas tekanan atmosfer (bernilai positif) atau di bawah tekanan atmosfer (bernilai negatif). Sebuah tekanan negatif disebut juga sebagai tekanan hisap atau hampa. Misalnya, tekanan mutlak 10 Psi (abs) dapat dinyatakan sebagai pengukuran -4,7 Psi (gage),

jika tekanan atmosfer setempat adalah 14,7 Psi, atau dengan cara lain dinyatakan sebagai tekanan hisap 4,7 Psi atau tekanan hampa 4,7 Psi.



**Gambar 2. 4** Ilustrasi Tekanan

Pengukuran tekanan atmosfer biasanya dilakukan dengan sebuah barometer air raksa, yang bentuk paling sederhananya terdiri dari sebuah tabung gelas tertutup pada satu ujungnya dan ujung terbuka lainnya tercelup dalam sebuah bejana berisi dengan air raksa seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2. 5** Barometer air Raksa

Tabung tersebut mulai diisi penuh dengan air raksa (pada posisi terbalik dengan sisi terbuka menghadap ke atas) dan kemudian diputar ke bawah (ujung terbuka ke bawah) sehingga ujung terbuka di dalam bejana air raksa. Ketinggian kolom air raksa akan mencapai suatu posisi kesetimbangan dimana beratnya ditambah dengan gaya akibat tekanan uap (yang terbentuk pada ruang di atas kolom) mengimbangi gaya karena tekanan atmosfer.

Jadi :

$$P_{atm} = \gamma h + P_{uap} \dots\dots\dots(2.4)$$

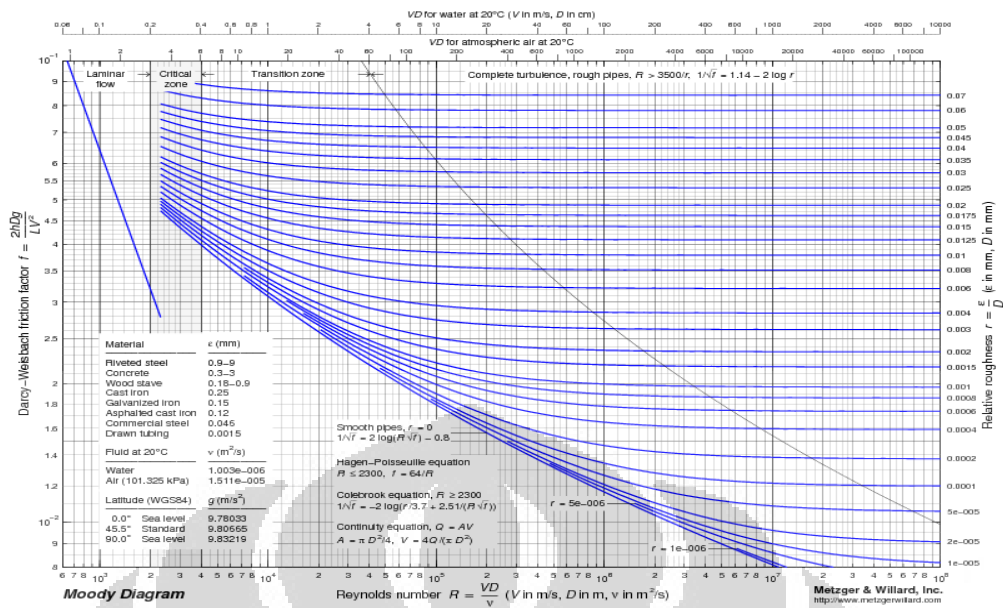
Dimana  $\gamma$  adalah berat jenis air raksa. Untuk kebanyakan tujuan praktis, pengaruh tekanan uap dapat diabaikan karena nilainya sangat kecil [untuk air raksa  $P_{uap} = 0,000023 \text{ lb/in}^2 (\text{abs})$  pada temperatur  $68^0 \text{ F}$ . Ini merupakan cara yang konvensional untuk menyatakan tekanan atmosfer dengan ketinggian  $h$  dalam milimeter atau inch air raksa. Perlu dicatat jika air digunakan sebagai pengganti air raksa, maka ketinggian kolom akan mencapai kira-kira 34 ft, dibandingkan dengan air raksa yang hanya 29,9 inch. Konsep barometer air raksa diciptakan *Evangelista Torricelli* pada tahun 1644.

## 2.5 DARCYS-WEISBACH

Merupakan salah satu persamaan tertua yang masih digunakan dalam permasalahan mekanika fluida. Persamaan ini digunakan untuk menghitung *pressure drop* atau *head loss* pada pipa untuk semua jenis fluida, baik liquid maupun gas [2]. Rumus umum dari persamaan ini adalah : [1]

$$h_L = f \frac{L V^2}{D 2g} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana  $h_L$  adalah head loss (m);  $f$  adalah Darcy's friction factor;  $L$  adalah panjang pipa (m);  $D$  adalah diameter dalam pipa (m); dan  $V$  adalah kecepatan rata-rata aliran. Lalu untuk mendapatkan nilai  $f$  kita perlu melihat *moody diagram* seperti Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2. 6 Moody Diagram [4]

Untuk aliran laminar, biasanya digunakan persamaan yang lebih simpel untuk mendapatkan nilai *friction factor*. Persamaan tersebut sering disebut persamaan konvensional untuk aliran laminar yang membentuk garis linear pada Moody Diagram di atas. Persamaan itu adalah :

$$f = \frac{64}{R_e} \dots\dots\dots (2.6)$$

**2.6 TEORI MINICHANNEL**

Sistem pendinginan dengan *minichannel* telah berhasil membuat pendinginan pada *microprocessor*, pada alat-alat elektronik berdaya besar, maupun *fuel cell* yang sangat *compact*. Hal ini dikarenakan nilai perpindahan kalor yang diperoleh lebih baik dibandingkan dengan saluran konvensional. Perpindahan kalor yang lebih baik ini didapatkan dari ukuran dari kedua tipe saluran yang lebih kecil dibanding dengan saluran konvensional. Dengan begitu didapatkan luasan bidang sentuh yang lebih besar pada ukuran heat exchanger yang sama.

Keuntungan lain yang didapat adalah bahwa dengan berkurangnya nilai *hydraulic diameter* ( $D_h$ ), ukuran dari *heat exchanger* menjadi lebih kecil

(*compact*), dan tak hanya itu, jumlah massa air per satuan waktu sebagai media pendingin menjadi lebih kecil pula. [5]

Klasifikasi dari *minichannel* yang ada telah di presentasikan oleh Kandlikar and Grande (2002). Saluran konvensional memiliki hydraulic diameter lebih besar dari 3.0 mm. Sedangkan untuk *minichannel* adalah diantara 3.0 mm sampai 200  $\mu\text{m}$ . Selain itu, Kandlikar juga mempelajari pengaruh dari kekasaran permukaan pada *minichannel*. Ia menemukan bahwa perbandingan  $\varepsilon/D$  memberikan efek yang sangat besar pada saluran berdiameter kecil seperti *minichannel* dibandingkan dengan perbandingan  $\varepsilon/D$  pada saluran konvensional, khususnya pada aliran turbulen.[5]

Aplikasi dari *minichannel* sampai saat ini antara lain adalah :

- *Electronic Cooling*
  - Komputer
  - Laser Dioda
- *Bio-Medical equipment*
- *Compact Heat Exchanger* untuk sistem AC.
- *Micro-reactor* [6]

Namun disamping kelebihan yang telah disebutkan di atas, *minichannel* juga memiliki beberapa kekurangan, diantaranya adalah :

- *Pressure drop* yang terjadi jauh lebih besar dibandingkan dengan *tube* biasa. Hal ini dikarenakan peningkatan nilai *friction factor* ( $f$ ).
- Debit aliran sangat berpengaruh terhadap terjadinya *pressure drop*, dan juga *heat flux* dari pada *heat exchanger* akan meningkat seiring peningkatan *pressure drop*. [7]
- Fouling sangat mungkin terjadi, dan memicu tersumbatnya saluran *minichannel*. [8]

Pada penelitian yang dilakukan oleh Kandlikar (2005) ada beberapa rumus yang direkomendasikan untuk menghitung *friction factor* aliran laminar pada saluran sempit (*constricted flow*). Beberapa diantaranya adalah : [9]

1. Menentukan panjang masuk aliran pada *minichannel* :

$$\frac{l_e}{D_h} = 0,05 R_e \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

$l_e$  : panjang aliran masuk

$D_h$  : Diameter Hidrolik

$Re$  : Bilangan Reynolds

2. Teori nilai *friction factor* untuk aliran laminar pada *minichannel*

$$f = \frac{24}{R_e} \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

Teori ini mematahkan persamaan 2.6 yang merupakan teori klasik. Dimana nilai  $64/Re$  memiliki nilai ketidakpastian atau penyimpangan yang tinggi, khususnya masalah *flow rate* dan geometri dari *minichannel* tersebut. Sehingga kedepannya, penelitian mengenai *minichannel* dan *microchannel* berpedoman pada persamaan 2.8 di atas.

3. Memprediksi nilai *friction factor* dengan aspect ratio

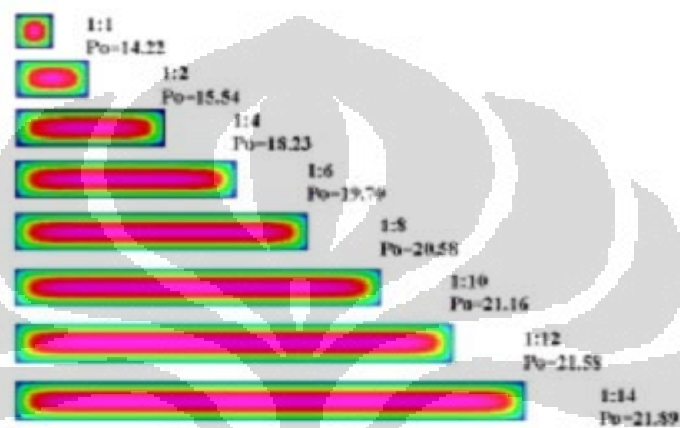
Teori ini menyempurnakan teori sebelumnya yakni  $24/Re$ . Walaupun sudah jauh lebih relevan, namun masih belum dapat mewakili fenomena aliran pada *minichannel*. Sehingga digunakan aspect ratio untuk lebih akuratnya nilai *friction factor* yang didapat. Teori ini dikembangkan oleh Shah and London (1978). Dimana aspek geometri berperan dalam menentukan nilai *friction factor* pada *minichannel*.

$$f_{Po} = \frac{P_o}{R_e} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana  $P_o$  adalah Bilangan Poiseuille. Dan dicari menggunakan rumus :

$$P_o = 24 \begin{pmatrix} 1 - 1.3553\alpha + 1.9467\alpha^2 \\ -1.7012\alpha^3 + 0.9564\alpha^4 \\ -0.2537\alpha^5 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.10)$$

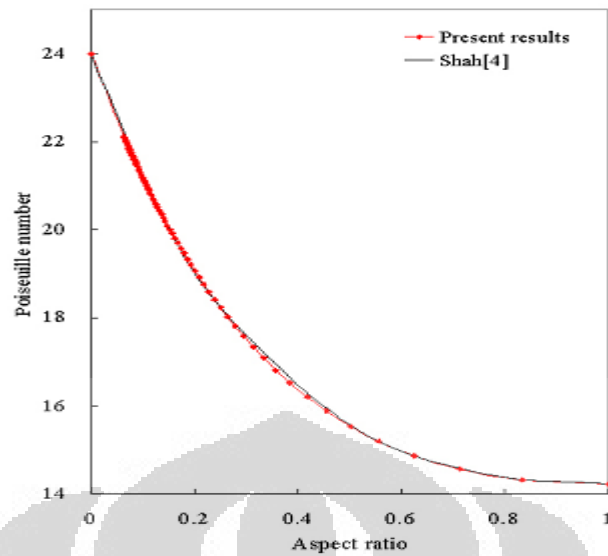
Dimana  $\alpha$  adalah aspect ratio (a/b) atau bila hasilnya lebih dari 1, bisa digunakan inversnya.[10] Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



(a)

Aspect ratio	Present results	Reference [4]
1.000	14.222	14.227
0.500	15.544	15.548
0.250	18.229	18.233
0.125	20.581	20.585
0.000	24.000	24.000

(b)



(c)

**Gambar 2.7** (a) Penampang *minichannel* beserta *aspect ratio* dan Bilangan Poiseuille; (b) Beberapa *aspect ratio* dan Bilangan Poiseuille; (c) grafik *aspect ratio* vs. Bilangan Poiseuille. [11]

#### 4. Fanning Friction Factor [11]

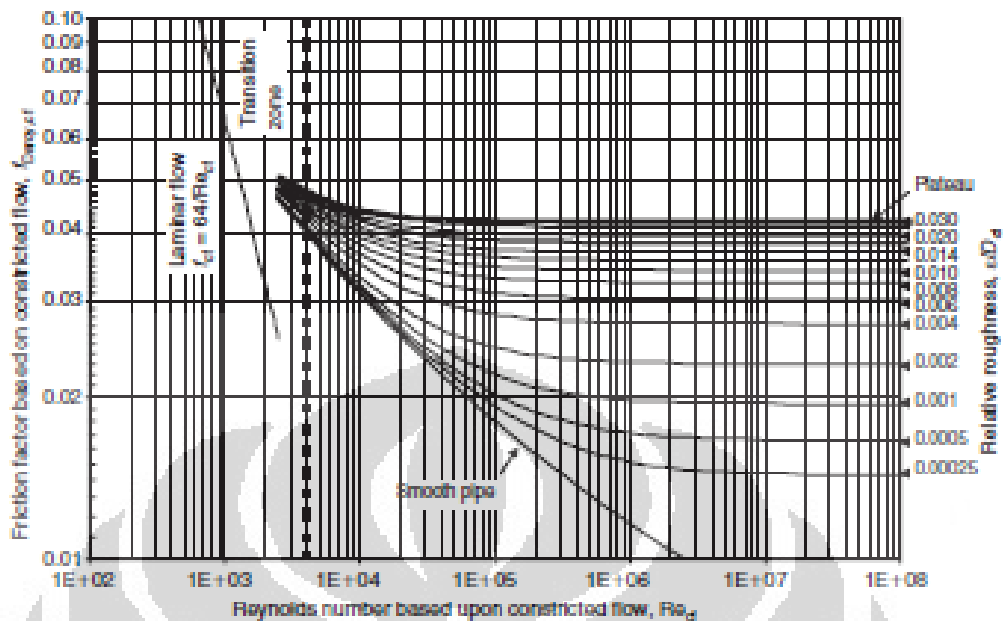
Selain beberapa rumus di atas, terdapat juga rumus Fanning yang menggunakan parameter *pressure drop* dan *mass flux* dari aliran pada *minichannel* sebagai berikut :

$$f_F = \frac{\rho \Delta p D_h}{2LG^2} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

- $\rho$  : densitas
- $\Delta p$  : perbedaan tekanan
- $D_h$  : diameter hidrolik
- $L$  : jarak antar pressure tab
- $G$  : *mass flux*





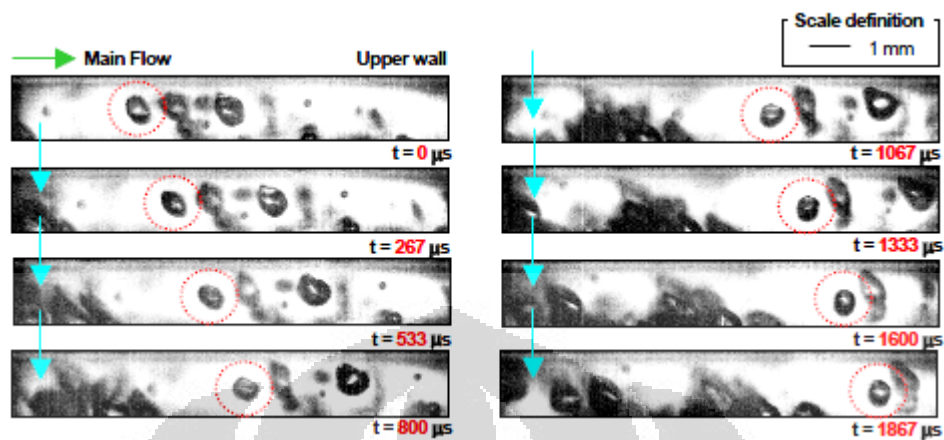
**Gambar 2. 8** Darcy friction factor plot based on a constricted flow diameter [5]

## 2.7 TEORI MICROBUBBLE [12]

Injeksi *microbubble* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengurangi drag yang terjadi pada suatu aliran. Pada fenomena ini kecepatan merupakan faktor yang sangat signifikan dalam hal *drag reduction*. Percepatan *convective fluida* meningkatkan penurunan gaya hambat dibandingkan dengan gaya *bouyancy* atau turbulensi, maka efek dari *drag reduction* akan semakin kecil seiring dengan meningkatnya kecepatan fluida.

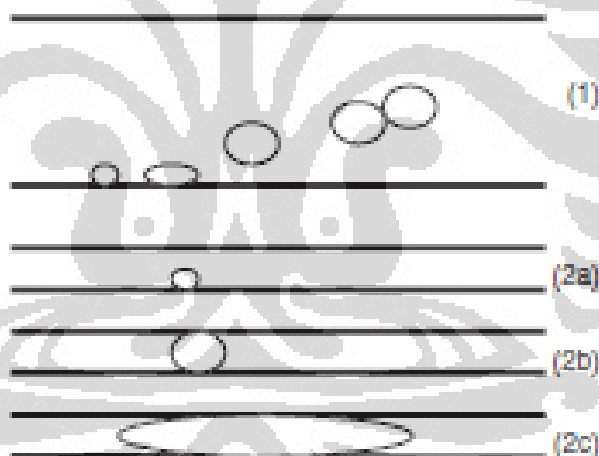
Ukuran daripada gelembung udara sangat mempengaruhi terhadap efek dari *drag*. Ukuran gelembung yang lebih kecil akan menghasilkan efek pengurangan *drag* yang bertahan (*sustained*) sedangkan ukuran gelembung yang lebih besar cuma akan menghasilkan pengurangan *drag* yang sementara (*transitory*). Dalam hal ini ukuran gelembung ideal yang dimaksud adalah gelembung dengan ukuran sedemikian rupa yang lebih besar dari ketebalan viscous sublayer dan lebih tipis dari ketebalan boundary layer. Sehingga ukuran gelembung yang ideal untuk mengurangi drag adalah gelembung dengan ukuran mikro yang biasa disebut sebagai *microbubble*.

Gambar dibawah ini memperlihatkan bentuk *microbubble* pada channel dengan ukuran panjang 3000 mm lebar 100 mm dan tinggi 15 mm.

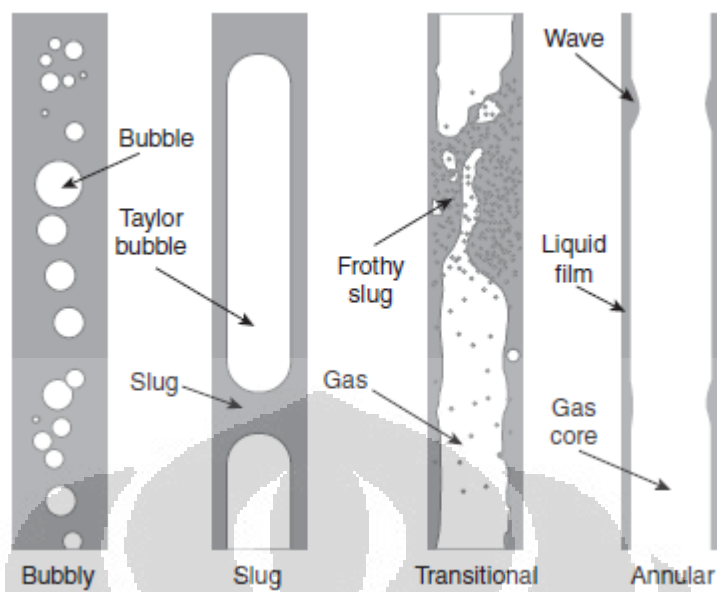


**Gambar 2. 9** Pergerakan *microbubble* pada daerah sekitar dinding atas *channel* [13]

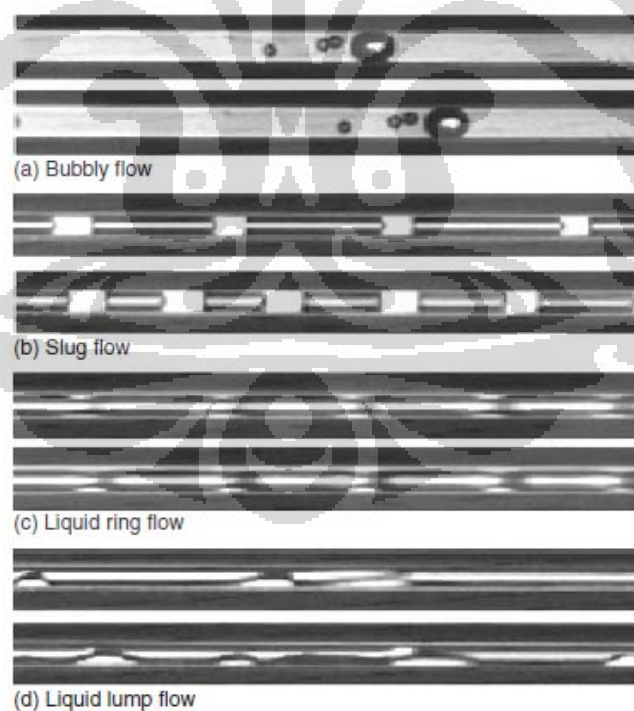
Gambar dibawah ini merupakan gambar skematik bubble yang terbentuk pada saluran konvensional dan minichannel atau microchannel.



**Gambar 2. 10** Gambar Skematik *bubble* yang terbentuk (1) *bubble* pada saluran konvensional (2a-c) *bubble* pada *minichannel* dan *microchannel*



**Gambar 2. 11** Microgravity flow patterns documented by Lowe and Rezkallah (1999). Reprinted from Lowe, D. C. and Rezkallah, K. S., Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void fraction signals



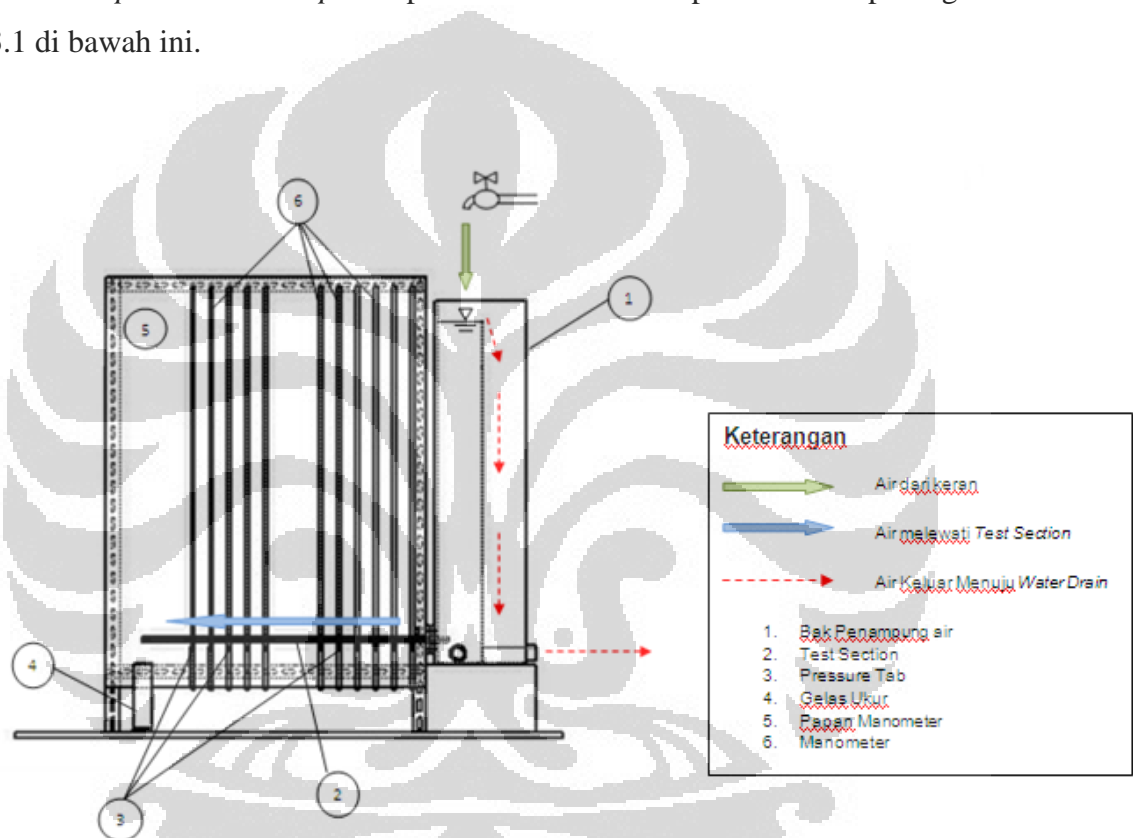
**Gambar 2. 12** Air–water flow patterns in 25- $\mu\text{m}$  circular channel. Reprinted from Serizawa, A., Feng, Z. and Kawara, Z. Two-phase flow in microchannels, Experimental Thermal & Fluid Science, 26(6–7), pp. 703–714

**BAB 3**  
**RANCANG BANGUN ALAT DAN METODE PENGAMBILAN**  
**PENGOLAHAN DATA**

**3.1 DESAIN ALAT PENELITIAN**

**3.1.1 Experimental Set Up**

*Experimental setup* berupa saluran terbuka seperti terlihat pada gambar 3.1 di bawah ini.



**Gambar 3. 1** *Experimental Set-up*

Aliran yang terjadi bersifat *open loop* dan *one through* yakni aliran air dari bak penampung masuk ke *test section* kemudian langsung keluar dari system, tidak dipompakan lagi menuju bak penampung. Air pada bak penampung diberikan dan diatur oleh katup. Lubang-lubang pada dinding penyekat berfungsi sebagai *overflow* sehingga ketinggian permukaan air pada bak tetap.

### 3.1.2 Test Section

*Test section* ini merupakan *minichannel* yang berukuran 1 mm x 0.8 mm dengan panjang test section 65 cm. Panjang ini ditetapkan untuk mendapatkan daerah aliran yang telah berkembang penuh. Panjang *entrance length* agar didapat aliran berkembang penuh sebesar 225 kali diameter hidrolis channel atau kurang lebih 20 cm, ditambah dengan 11 pressure tab dengan masing-masing jarak 5 cm. Dengan begitu panjang 65 cm cukup memenuhi kriteria.



**Gambar 3. 2** *Minichannel Test Section*

*Minichannel* ini terbuat dari 3 lapis *acrylic* dengan lapisan tengah memiliki ketebalan 0.8 mm. Lalu jarak antar lapisan tengah adalah 1 mm. Setelah itu bagian atas bawah dilapisi dengan *acrylic* dengan tebal 5mm. sehingga terbentuklah rongga channel berukuran luas 0.8 mm<sup>2</sup>. Di bagian bawah terdapat tab yang nantinya disambungkan dengan selang manometer untuk mengukur *pressure drop* dari aliran .

*Pressure tab* pada *test section* ini menggunakan ujung jarum suntik dengan ukuran 21G (diameter lubang 0,9 mm) yang telah dipotong hingga rata. Tujuan dari penggunaan ujung jarum suntik ini ialah agar data yang didapat lebih akurat dan memudahkan untuk dihubungkan dengan selang infus.

### 3.1.3 Bak Penampung Air



Gambar 3. 3 Bak penampung air

Bak penampung air ini terbuat dari *acrylic*. Fungsinya adalah menampung air dengan 10 variasi ketinggian, yakni 90, 85, 80, 75, 70, 65, 60, 55, 50 dan 45 cm. Di bagian depan terdapat *open channel* yang nantinya akan disambungkan dengan *minichannel*. Sedangkan lubang di bagian kiri dan belakang merupakan lubang untuk *drainase*.

### 3.1.4 Manometer



**Gambar 3. 4** Manometer air

Manometer yang digunakan adalah manometer sederhana dan konvensional. Alat yang digunakan adalah selang infus. Untuk mengukur nilai head, digunakan milimeter blok.

### 3.1.5 Gelas Ukur



**Gambar 3. 5** Gelas ukur

Untuk mengukur debit air yang keluar dari *minichannel* digunakan gelas ukur seperti gambar di atas ini. Gelas ukur ini memiliki ketelitian sampai 1 ml. Dalam mengukur debit air, dihitung tiap 15 atau 30 detik. Lalu dimasukkan dalam lembar data berupa ml/menit.

### 3.1.6 Pompa Udara Aquarium



**Gambar 3. 6** Pompa udara akuarium

Pompa udara akuarium digunakan untuk menginjeksikan udara ke dalam *minichannel*, ujung dari pada selang yang digunakan telah dimodifikasi dengan selang infus, sehingga bisa masuk ke *pressure tab* pada *test section minichannel*.



## 3.2 METODE PENGAMBILAN DATA

### 3.2.1 Metode Pengambilan Data Laju Aliran

Pengambilan data untuk laju aliran dilakukan dengan menggunakan metode kontinuitas. Dengan cara mengukur volume air yang keluar dari ujung microchannel per satuan waktu. Air yang keluar akan ditampung dalam gelas ukur dengan ketelitian sebesar 1 mm. Data yang diambil dilakukan dengan 10 *head* yang berbeda, yakni : 90, 85, 80, 75,70, 65, 60, 55, 50, dan 45 cm, masing-masing sebanyak 30 kali.

### 3.2.2 Prosedur Pengambilan Data Laju Aliran

#### 3.2.2.a Persiapan Pengambilan Data

Sebelum pengambilan data, adapun persiapan yang dilakukan adalah :

1. Memastikan bak sudah terisi air sampai pada *head* yang diinginkan.
2. Memastikan air mengalir dalam keadaan stabil atau tidak ada gelembung yang terperangkap.
3. Menyiapkan gelas ukur.
4. Menyiapkan *stop watch*.
5. Menyiapkan pompa udara akuarium (untuk penelitian yang memerlukan penambahan gelembung udara).

#### 3.2.2.b Pengambilan Data

Dalam pengambilan data, dilakukan hal-hal berikut :

1. Menaruh gelas ukur tepat di ujung *test section*, sehingga gelas ukur terisi oleh air. Dan bersamaan dengan itu *stop watch* dinyalakan.
2. Setelah 60 detik, ambil gelas ukur dan lihat volume air yang tertampung. Didapat jumlah dengan satuan ml/menit.
3. Ulangi langkah 1 dan 2 sebanyak 30 kali.
4. Ulangi langkah 1,2 dan 3 untuk 10 variasi *head*, yakni : 90, 85, 80, 75,70, 65, 60, 55, 50 dan 45 cm.

5. Untuk Penelitian dengan penambahan gelembung udara, pada *pressure tab* pertama disambungkan dengan selang infus yang telah terhubung dengan pompa udara akuarium.
6. Untuk Penelitian dengan penambahan gelembung udara, lakukan langkah 1,2 dan 3 untuk 5 variasi *head*, yakni : 65, 60, 55, 50 dan 45 cm.

### 3.2.3 Metode Pengambilan Data Tekanan

Pengukuran tekanan pada *minichannel* dilakukan menggunakan manometer sederhana. Manometer tersebut disambungkan dengan *pressure tab* yang ada pada *minichannel* sebanyak 11 buah. Jadi manometer yang digunakan juga sebanyak 11 buah. Data yang diambil adalah perbedaan ketinggian ( $\Delta h$ ) dari manometer.

### 3.2.4 Prosedur Pengambilan Data Tekanan

#### 3.2.4.a Persiapan Pengambilan Data

Sebelum pengambilan data, adapun persiapan yang dilakukan adalah :

1. Memastikan bak sudah terisi air sampai pada head yang diinginkan.
2. Memastikan air mengalir dalam keadaan stabil atau tidak ada gelembung yang terperangkap.
3. Menyiapkan *Datasheet*.
4. Menyiapkan pompa udara akuarium (untuk penelitian yang memerlukan penambahan gelembung udara)

#### 3.2.4.b Pengambilan Data

Dalam pengambilan data, dilakukan hal-hal berikut :

1. Mengamati ketinggian air pada manometer dan mencatatnya pada *datasheet*.
2. Pengambilan data tekanan ini dilakukan sebanyak 30 kali tiap setelah pengambilan data laju aliran.
3. Ulangi langkah 1 dan 2 untuk 10 variasi *head*, yakni : 90, 85, 80, 75,70, 65, 60, 55, 50, 45cm

4. Untuk penelitian dengan penambahan gelembung udara, pada *pressure tab* pertama disambungkan dengan selang infus yang telah terhubung dengan pompa udara akuarium
5. Untuk penelitian dengan penambahan gelembung udara Lakukan langkah 1,2 dan 3 untuk 5 variasi *head*, yakni : 65, 60, 55, 50 dan 45 cm

### 3.3 METODE PENGOLAHAN DATA

Setelah melakukan pengambilan data, hal yang musti dilakukan adalah mengolah data tersebut untuk mendapatkan hasil yang diinginkan atau pun kesimpulan dari penelitian. Beberapa hal tersebut antara lain adalah :

1. Membuat grafik *pressure head* dan *pressure drop* dari data mentah. *Pressure head* merupakan grafik untuk melihat *head* tekanan pada tiap titik *pressure tab*. Sedangkan *pressure drop* adalah grafik untuk melihat besar penurunan tekanan pada tiap *pressure tab*.
2. Data debit aliran diolah untuk mendapatkan kecepatan rata-rata aliran ( $V$ ) dan nilai bilangan Reynold ( $Re$ ).
3. Gabungan data aliran dan tekanan diolah untuk mendapatkan nilai *friction factor* ( $f$ ) dengan menggunakan metode : metode Darcys-Weisbach, metode Bilangan Poiseulle, dan metode Fanning.
4. Membuat grafik *friction factor* gabungan dari hasil perhitungan 3 metode tersebut di atas.

## BAB 4

### PENGOLAHAN DAN ANALISA DATA

#### 4.1 ANALISA DEBIT ALIRAN

Dari penelitian dan pengamatan, didapat data mentah berupa data debit aliran dan *head* tekanan dari tiap manometer. Pengambilan data dilakukan sebanyak 30 kali untuk tiap *head* yang telah ditentukan, yakni : 90, 85, 80, 75, 70, 65, 60, 55, 50, 45 cm. Berikut adalah hasil pengolahan data debit aliran dari tiap ketinggian

**Tabel 4. 1** Data *minichannel* dan sifat-sifat air

	Nilai	Satuan
Area	0,80000	mm <sup>2</sup>
Dh	0,88889	mm
$\mu$	0,00112	Ns/m <sup>2</sup>
$\rho$	1000,00000	kg/m <sup>3</sup>

Dengan menggunakan persamaan (2.1) maka didapatkan nilai bilangan Reynolds Berikut ini adalah hasil pengolahan data *head* tekanan dari *minichannel* pada tiap manometer :

**Tabel 4. 2** Tabel hasil pengolahan debit aliran untuk *head* 90 sampai 70 cm

Head	90	85	80	75	70
Vavg	0.7889	0.7444	0.7042	0.6625	0.6229
Re	626.10	590.83	558.86	525.79	494.38

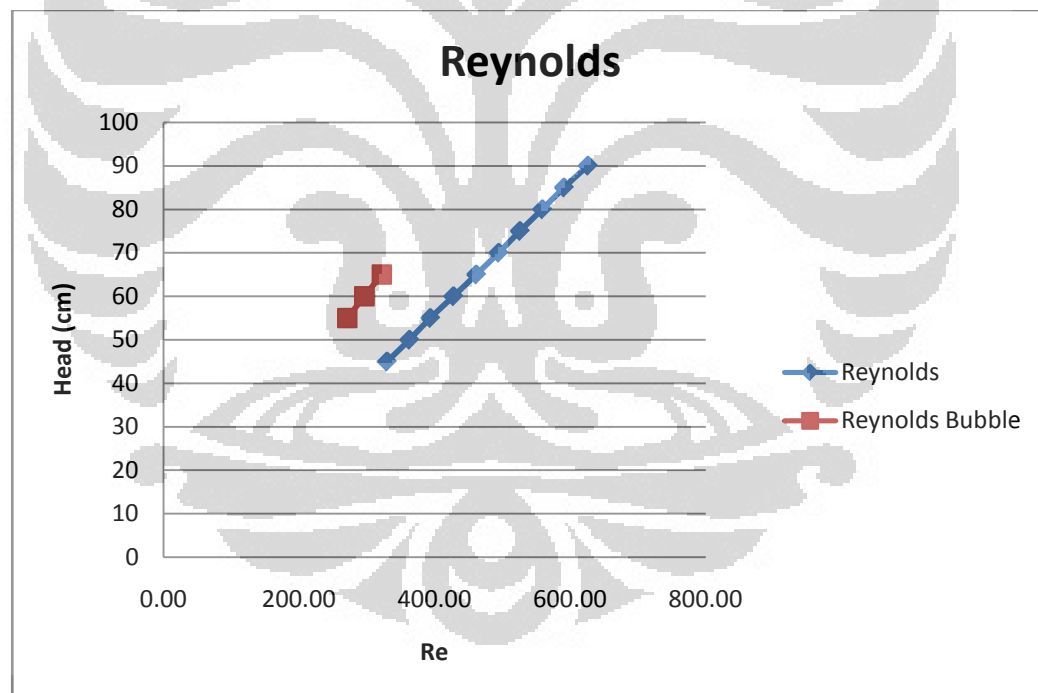
**Tabel 4. 3** Tabel hasil pengolahan debit aliran untuk *head* 65 sampai 45 cm

Head	65	60	55	50	45
Vavg	0.5813	0.5389	0.4958	0.4569	0.4153
Re	461.31	427.69	393.52	362.65	329.59

Bila dibandingkan antara tiap pengujian, yakni *head* 90, 85, 80, 75, 70, 65, 60, 55, 50 dan 45 cm, Nampak bahwa *head* yang semakin tinggi mewakili nilai debit dan bilangan Reynold yang semakin tinggi pula (tabel 4.2 dan tabel 4.3). Hasil yang berbeda akan didapat apabila aliran dalam minichannel telah diinjeksikan dengan gelembung udara (*bubble*). Hal tersebut dapat dilihat pada tabel 4.4 hanya saja pengujian cuma dilakukan pada *head* 65, 60, 55, 50 dan 45

**Tabel 4. 4** Tabel hasil pengolahan debit aliran yang dengan *bubble* untuk *head* 65 sampai 45 cm

Head	65	60	55	50	45
Vavg	0.46806	0.43715	0.40556	0.37326	0.34167
Re	371.47	346.95	321.87	296.24	271.16



**Grafik 4. 1** Nilai Reynolds yang terjadi untuk setiap ketinggian *head*

Berdasarkan hasil yang diperoleh terlihat bahwa terjadi penurunan bilangan Reynold, hal ini dikarenakan debit aliran pada aliran yang telah diinjeksikan dengan gelembung udara mengalami penurunan debit. Berdasarkan

hukum kontinuitas  $Q = V \times A$ , semakin kecil nilai  $Q$  maka semakin kecil pula nilai  $V$  apabila nilai  $A$  konstan, karena bilangan Reynold berbanding lurus dengan  $V$  sehingga nilai bilangan Reynold yang didapat pun semakin kecil. Penurunan debit ini terjadi karena air yang mengalir berselang seling dengan gelembung udara dengan ritme atau jarak yang konstan.

Pada *head* dan kecepatan aliran yang rendah, injeksi dari penambahan udara akan mengakibatkan terbentuknya gelembung gelembung udara berbentuk kapsul dengan ukuran yang sama satu sama lainnya dan mempunyai gap kapsul satu dengan yang satunya sama pula. Ketika *head* dan kecepatan aliran semakin besar kapsul kapsul tersebut akan pecah menjadi kapsul kapsul dengan ukuran semakin kecil, apabila semakin besar lagi *head* dan kecepatan yang diberikan maka bentuk akhir dari gelembung udara itu akan tampak seperti lingkaran lingkaran yang diameternya sesuai dengan lebar dari minichannel dan gap antar lingkaran yang terjadi semakin dekat. Hal ini dikarenakan pada *head* tekanan yang rendah gaya *bouyancy* dari gelembung udara yang diinjeksikan lebih besar dari gaya dorong kecepatan sehingga gaya resultan lebih condong keatas ketimbang sesuai arah laju aliran, akibatnya gelembung udara terakumulasi dalam jumlah banyak sebelum terdorong oleh laju aliran.



**Gambar 4. 1** Bentuk gelembung yang terbentuk, gambar (a) menunjukkan *head* yang lebih rendah

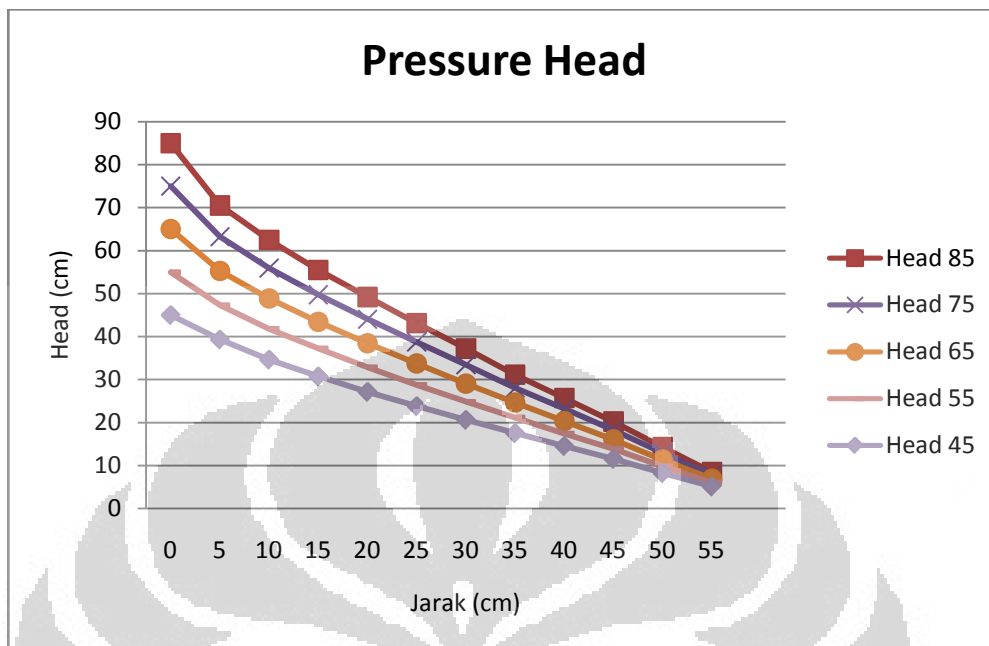
Gelembung udara yang terbentuk bukanlah *microbubble*, sehingga penambahan daripada gelembung ini tidak mengurangi drag yang terjadi namun hal yang terjadi malah sebaliknya. Gaya *buoyancy* dari *bubble* yang bergerak ke

atas akan menahan laju aliran dari pada fluida. Hal ini mengakibatkan terjadinya penurunan kecepatan dari pada aliran fluida. Berdasarkan teori sebelumnya semakin cepat aliran maka akan semakin mengurangi kerugian dari drag dan begitu pula sebaliknya. Pendapat ini akan diperkuat dengan hasil perhitungan friction factor pada pembahasan selanjutnya

Diameter channel yang kecil akan menghasilkan Reynolds number yang lebih rendah dan peningkatan shear dan surface tension. Untuk channel dengan diameter hidrolis kurang dari 1 mm, hanya aliran *slug* yang diamati dengan tanpa memperhatikan kehadiran *bubbly*, *churn*, *slug-annular* and *annular flow* hal ini disebabkan oleh shear dan surface tension yang besar. Bentuk dari pada slug didasarkan oleh efek efek dari *surface tension*, *shear*, and *buoyancy*. Dengan kata lain diameter channel yang semakin kecil akan mengurangi pengaruh daripada efek gravitasi dan gaya inersia namun disisi lain terjadi peningkatan *surface tension* dan *viscous forces*.

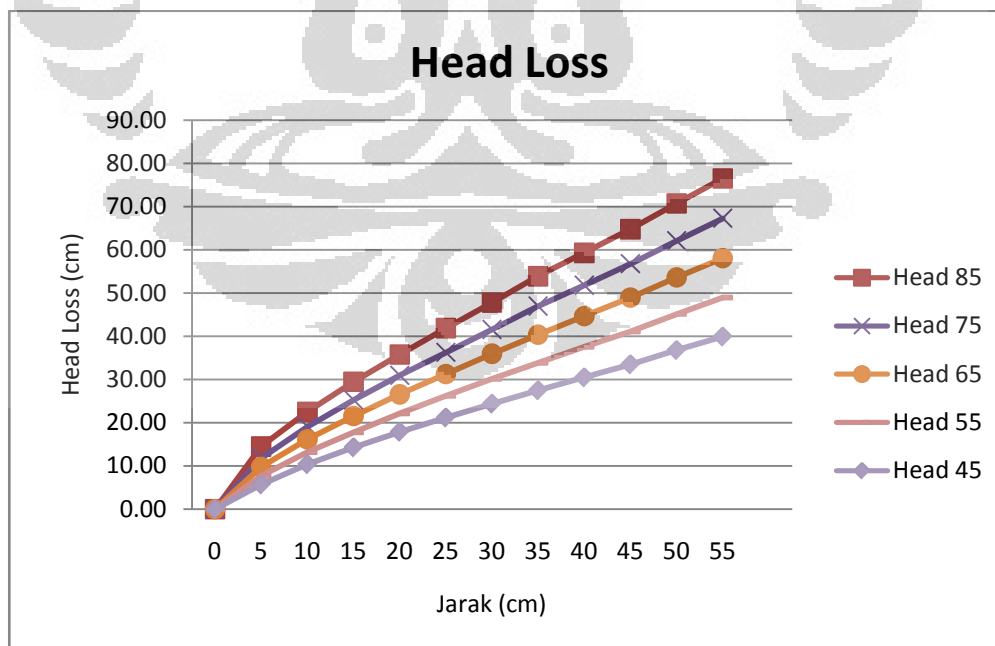
Bentuk gelembung aliran dua phase (air dan udara) yang terjadi adalah Taylor bubble atau slug, namun karena ada kesulitan dalam menghitung debit dan kecepatan udara yang diinjeksikan kedalam minichannel, Maka perhitungan hanya dilakukan pada bilangan Reynolds dari aliran air. Karena bilangan Reynolds dari aliran udara pada penelitian ini diasumsikan mempunyai nilai yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan Reynolds dari aliran air. Oleh karena itu nilai dari Reynolds air sudah cukup untuk mewakili nilai Reynolds campuran air dan udara.

## 4.2 ANALISA HEAD TEKAN



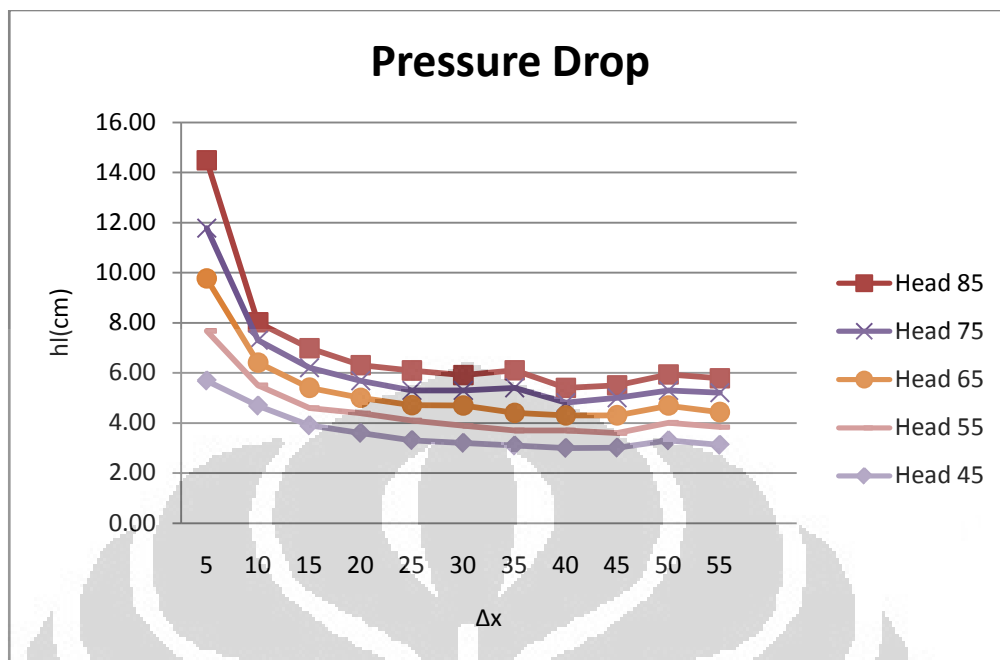
**Grafik 4. 2** Distribusi tekanan pada minichannel

Grafik di atas menunjukkan *head* tekanan pada *minichannel*. Nampak penurunan *head* tekanan yang sangat signifikan.



**Grafik 4. 3** Distribusi penurunan tekanan pada minichannel





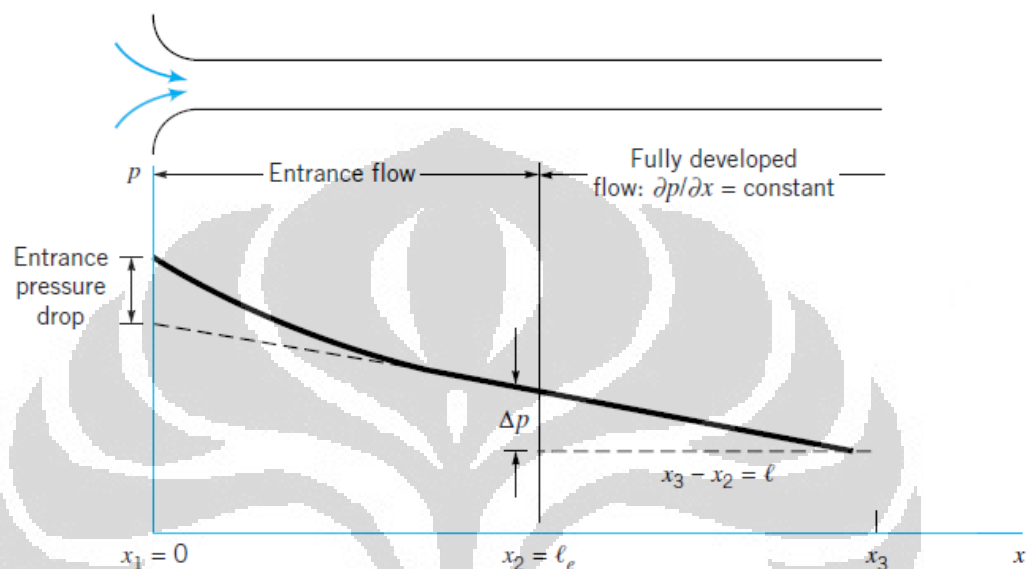
Grafik 4. 4 Distribusi pressure drop

Tabel 4. 5 Distribusi pressure drop

	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45
0 - 5	15.89	14.48	13.08	11.77	10.47	9.76	8.97	7.67	6.49	5.69
5 - 10	8.50	8.01	7.61	7.30	6.80	6.41	5.90	5.50	5.10	4.69
10 - 15	7.69	6.98	6.58	6.20	5.80	5.40	5.11	4.60	4.30	3.90
15 - 20	6.48	6.31	6.03	5.69	5.39	5.00	4.50	4.39	4.09	3.60
20 - 25	6.31	6.09	5.69	5.30	5.00	4.70	4.40	4.10	3.71	3.31
25 - 30	6.21	5.91	5.58	5.30	5.09	4.69	4.28	3.89	3.60	3.20
30 - 35	6.41	6.10	5.79	5.41	4.90	4.40	4.10	3.70	3.39	3.09
35 - 40	5.65	5.40	5.12	4.81	4.50	4.30	4.00	3.70	3.30	3.00
40 - 45	5.77	5.50	5.32	5.00	4.70	4.30	3.80	3.60	3.31	3.01
45 - 50	6.22	5.94	5.58	5.30	5.12	4.69	4.31	4.01	3.71	3.30
50 - 55	5.97	5.78	5.53	5.21	4.93	4.43	4.13	3.84	3.51	3.12

Pada grafik *pressure head* terlihat bahwa tekanan pada daerah aliran masuk mempunyai tekanan yang lebih tinggi dan berangsur angsur turun ketika aliran mulai *fully developed*, hal ini disebabkan karena profil kecepatan berubah dari profil seragam pada bagian masuk *minichannel* menjadi profil berkembang sepenuhnya pada ujung akhir daerah masuk. Perubahan aliran dari belum

berkembang penuh hingga menjadi berkembang penuh dapat dilihat pada tabel 4.5 dimana gradien penurunan tekanan tiap 5 cm pada jarak 0-20 cm dari ujung masuk terlihat turun sangat drastis, sedangkan gradien penurunan tekanan tiap 5 cm pada jarak 20-55 cm dari ujung masuk terlihat konstan. Untuk lebih jelasnya mengenai penurunan tekanan dapat dilihat pada gambar 4.2.



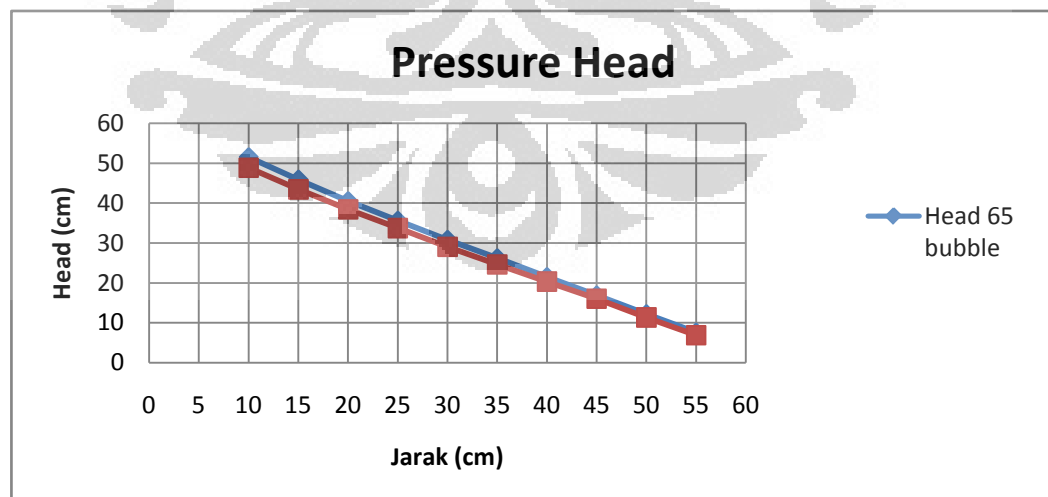
**Gambar 4. 2** Distribusi penurunan tekanan pada daerah *entrance flow* dan pada pada daerah *fully developed* [1]

Hasil *head* tekanan yang didapat dari percobaan memperlihatkan grafik yang mulus terutama pada jarak 20-55 cm dari ujung masuk, walaupun terdapat fluktuasi yang tidak seberapa besar.

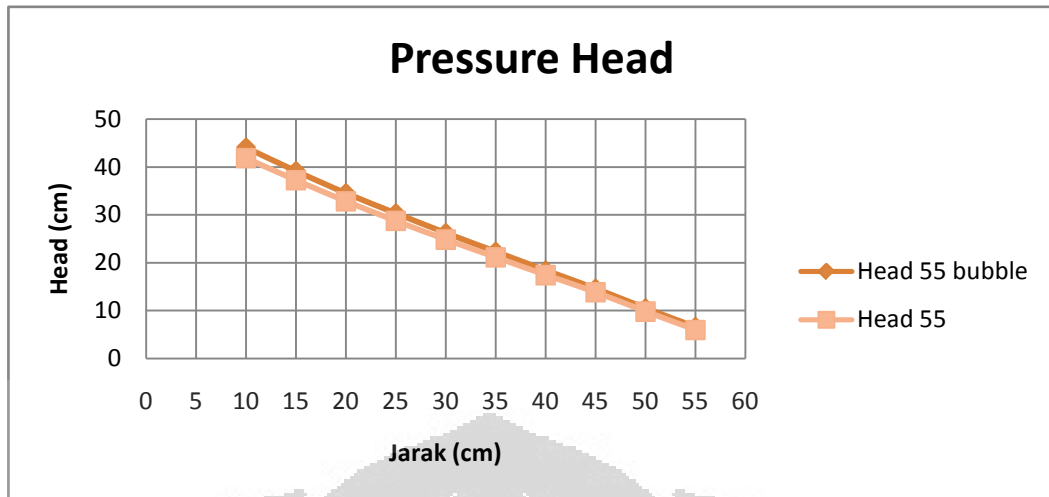
Grafik 4.3 memperlihatkan nilai dari *pressure drop* yang ditunjukkan dalam bentuk *head loss* ( $h_L$ ) untuk setiap  $\Delta x$ . Dari tabel dapat dilihat perbedaan yang sangat signifikan antara *pressure drop* pada daerah yang alirannya belum *fully developed* dengan daerah yang alirannya sudah *fully developed*. Daerah pada tabel yang diberi warna kuning merupakan daerah yang belum *fully developed* sedangkan daerah yang berwarna hijau merupakan daerah yang sudah *fully developed*. Pada daerah yang belum *fully developed* nilai *pressure drop* lebih besar dibandingkan dengan daerah yang sudah *fully developed*, pengukuran nilai *pressure drop* dilakukan dengan jarak tiap 5 cm dan dapat dilihat bahwa nilai *pressure drop* untuk daerah yang *fully developed* mendekati konstan. Dalam

daerah yang belum *fully developed*, seperti pada daerah masuk sebuah *minichannel*, fluida mengalami percepatan atau perlambatan selagi mengalir (profil kecepatan berubah dari dari profil seragam pada bagian masuk *minichannel* menjadi profil berkembang sepenuhnya pada ujung akhir daerah masuk), Jadi, didaerah masuk terdapat terdapat keseimbangan antara gaya-gaya tekanan, viskos dan inersia (percepatan) Hasilnya adalah distribusi tekanan sepanjang *minichannel* horizontal mempunyai kecenderungan penurunan seperti yang terdapat pada gambar 4.2, besarnya gradien tekanan ( $dP/dx$ ) lebih besar didaerah masuk daripada di daerah berkembang penuh, dimana gradien tersebut merupakan sebuah konstanta,  $dP/dx = -\Delta P / l < 0$ . Kenyataannya yaitu bahwa gradien tekanan yang tidak nol sepanjang *minichannel* adalah akibat dari efek viskos, jika viskositas adalah nol, tekanan tidak akan bervariasi terhadap  $x$ . Penurunan tekanan dapat dilihat dari dua sudut pandang yang berbeda. Ditinjau dari kesetimbangan gaya, gaya tekanan diperlukan untuk mengatasi gaya viskos yang timbul. Ditinjau dari kesetimbangan energi, kerja yang dilakukan oleh gaya tekanan diperlukan untuk mengantisipasi disipasi viskos dari energi di seluruh fluida

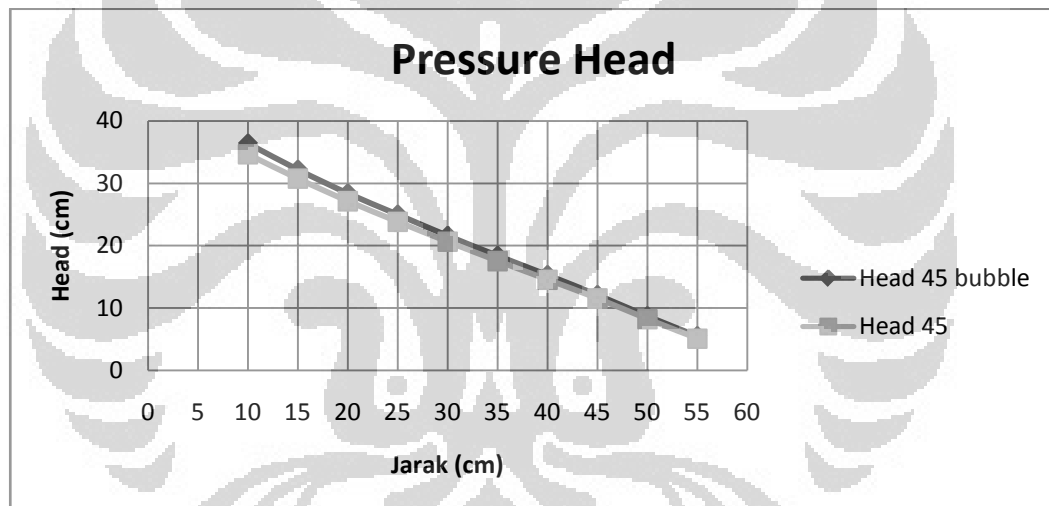
#### 4.3 PENGARUH INJEKSI GELEMBUNG UDARA



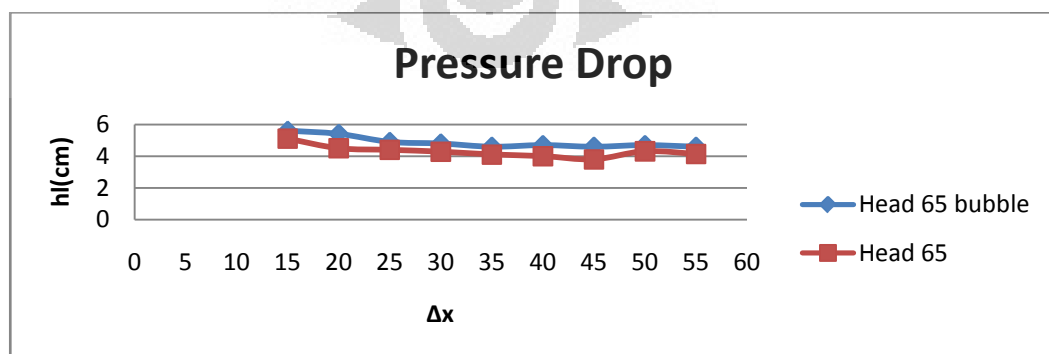
**Grafik 4. 5** Perbandingan *pressure head* pada *head 65 cm*



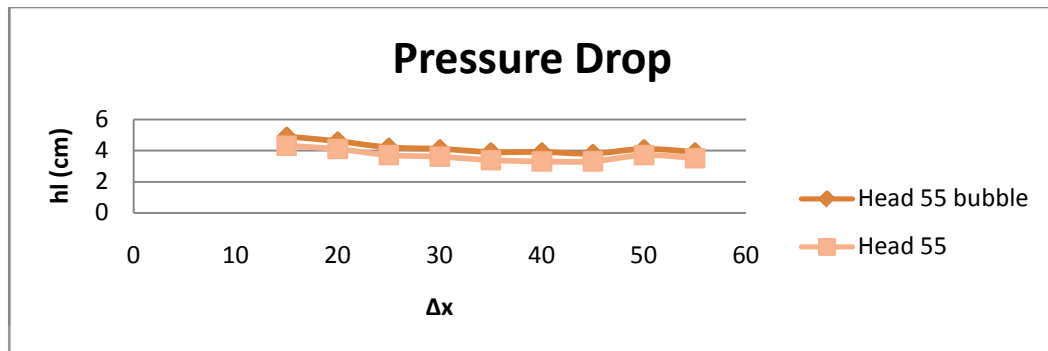
**Grafik 4. 6** Perbandingan *pressure head* pada head 55 cm



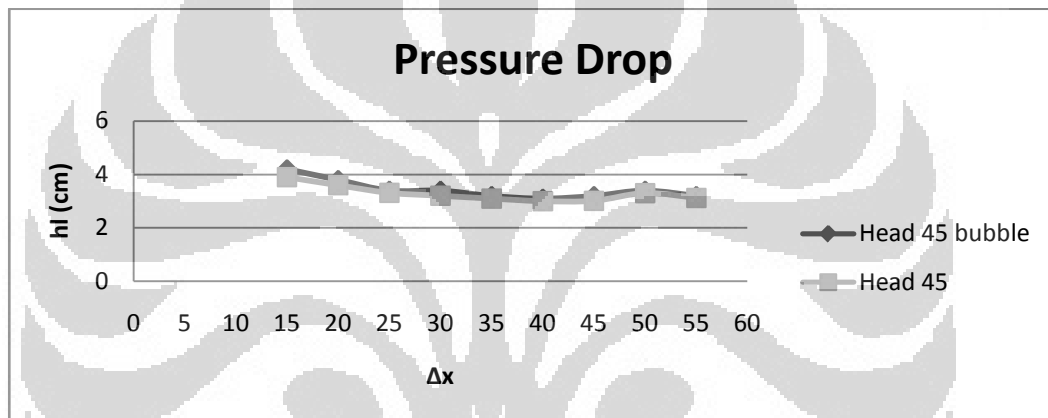
**Grafik 4. 7** Perbandingan *pressure head* pada head 45 cm



**Grafik 4. 8** Perbandingan *pressure drop* pada head 65 cm



Grafik 4. 9 Perbandingan *pressure drop* pada head 55 cm



Grafik 4. 10 Perbandingan *pressure drop* pada head 45 cm

Dampak dari injeksi gelembung udara, mengakibatkan kenaikan dari *pressure head* dan juga kenaikan dari *pressure drop*. Kenaikan dari *pressure head* dapat diakibatkan karena sewaktu udara diinjeksikan kedalam aliran maka secara otomatis ada tekanan yang ditambahkan.

#### 4.4 PERHITUNGAN FRICTION FACTOR

##### 4.4.1 Darcys-Weisbach

Persamaan Darcys-Weisbach dapat digunakan untuk mendapatkan nilai  $f$ . Dengan menggunakan data yang telah diperoleh dan menggunakan persamaan (2.5), maka didapatkan tabel sebagai berikut :

**Tabel 4. 6** Tabel Perhitungan Darcys Weisbach pada *head* 90 dan 85 cm

90	hl	fD	85	hl	fD
20-25	6.31	0.03535	20-25	6.09	0.03835
25-30	6.21	0.03480	25-30	5.91	0.03718
30-35	6.41	0.03594	30-35	6.10	0.03839
35-40	5.65	0.03165	35-40	5.40	0.03399
40-45	5.77	0.03236	40-45	5.50	0.03462
45-50	6.22	0.03488	45-50	5.94	0.03736
50-55	5.97	0.03344	50-55	5.78	0.03638
AVG	6.08	0.03406		5.82	0.03661

**Tabel 4. 7** Tabel Perhitungan Darcys Weisbach pada *head* 80 dan 75 cm

80	hl	fD	75	hl	fD
20-25	5.69	0.04003	20-25	5.30	0.04212
25-30	5.58	0.03923	25-30	5.30	0.04212
30-35	5.79	0.04073	30-35	5.41	0.04297
35-40	5.12	0.03602	35-40	4.81	0.03825
40-45	5.32	0.03740	40-45	5.00	0.03976
45-50	5.58	0.03928	45-50	5.30	0.04212
50-55	5.53	0.03888	50-55	5.21	0.04140
	5.51	0.03879		5.19048	0.04125

**Tabel 4. 8** Tabel Perhitungan Darcys Weisbach pada *head* 70 dan 65 cm

70	hl	fD	65	hl	fD
20-25	5.00	0.04495	20-25	4.70	0.04856
25-30	5.09	0.04578	25-30	4.69	0.04845
30-35	4.90	0.04405	30-35	4.40	0.04546
35-40	4.50	0.04045	35-40	4.30	0.04439
40-45	4.70	0.04225	40-45	4.30	0.04443
45-50	5.12	0.04599	45-50	4.69	0.04842
50-55	4.93	0.04432	50-55	4.43	0.04574
	4.89	0.04397		4.50	0.04649

**Tabel 4. 9** Tabel Perhitungan Darcys Weisbach pada *head* 60 dan 55 cm

60	hl	fD	55	hl	fD
20-25	4.40	0.05281	20-25	4.10	0.0581686
25-30	4.28	0.05145	25-30	3.89	0.0551893
30-35	4.10	0.04929	30-35	3.70	0.0524936
35-40	4.00	0.04804	35-40	3.70	0.0524936
40-45	3.80	0.04560	40-45	3.60	0.0510749
45-50	4.31	0.05177	45-50	4.01	0.0568918
50-55	4.13	0.04965	50-55	3.84	0.0544326
	4.15	0.04980		3.83	0.05439

**Tabel 4. 10** Tabel Perhitungan Darcys Weisbach pada *head* 50 dan 45 cm

50	hl	fD	45	hl	fD
20-25	3.71	0.06192	20-25	3.31	0.06695
25-30	3.60	0.06014	25-30	3.20	0.06472
30-35	3.39	0.05657	30-35	3.09	0.06256
35-40	3.30	0.05513	35-40	3.00	0.06061
40-45	3.31	0.05524	40-45	3.01	0.06088
45-50	3.71	0.06192	45-50	3.30	0.06674
50-55	3.51	0.05863	50-55	3.12	0.06310
	3.50	0.05851		3.15	0.06365

Tabel di atas memperlihatkan beberapa hal, antara lain :

1. Perbandingan *head* tekanan tiap ketinggian .
2. Selisih *head* tekanan pada *minichannel*.
3. Nilai *friction factor* ( $f$ ) yang didapat dari perhitungan Darcys-Weisbach.

Dari tabel di atas diperoleh nilai  $f$  rata-rata untuk ketinggian 90, 85, 80, 75, 70, 65, 60, 55, 50 dan 45 berturut-turut adalah : 0,03406, 0,03661, 0,03879, 0,04125, 0,04397, 0,04649, 0,04980, 0,05439, 0,05851 dan 0,06365. Perhitungan dilakukan pada jarak 20-55 cm dari *opening* untuk memastikan aliran *fully developed*.

**Tabel 4. 11** Tabel Perhitungan Darcys Weisbach aliran dengan *bubble* pada *head* 65 dan 60 cm

65	hl	fD	60	hl	fD
20-25	4.91	0.078121	20-25	4.60	0.083826
25-30	4.80	0.076423	25-30	4.50	0.082004
30-35	4.60	0.073239	30-35	4.20	0.076537
35-40	4.70	0.074831	35-40	3.69	0.078359
40-45	4.61	0.073345	40-45	4.81	0.076537
45-50	4.70	0.074884	45-50	4.41	0.080181
50-55	4.62	0.07361	50-55	4.30	0.078359
	4.71	0.074922		4.43	0.080637

**Tabel 4. 12** Tabel Perhitungan Darcys Weisbach aliran dengan *bubble* pada *head* 55 dan 50 cm

55	hl	fD	50	hl	fD
20-25	4.20	0.0890687	20-25	3.80	0.095132
25-30	4.10	0.086948	25-30	3.70	0.092629
30-35	3.91	0.082848	30-35	3.51	0.087872
35-40	3.90	0.0827773	35-40	3.50	0.087622
40-45	3.80	0.080586	40-45	3.50	0.087622
45-50	4.11	0.0870894	45-50	3.82	0.095716
50-55	3.91	0.0829894	50-55	3.60	0.090125
	3.99	0.0846153		3.63	0.09096

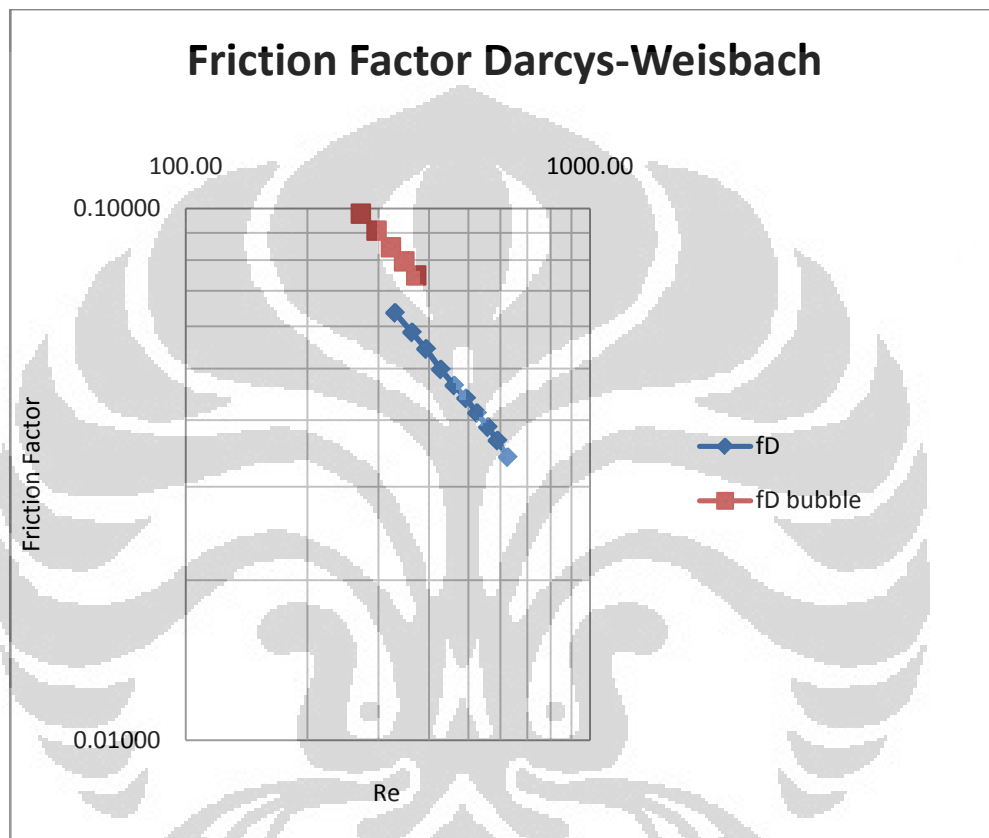
**Tabel 4. 13** Tabel Perhitungan Darcys Weisbach aliran dengan *bubble* pada *head* 45 cm

45	hl	fD
20-25	3.39	0.101391
25-30	3.40	0.10159
30-35	3.20	0.095614
35-40	3.10	0.092626
40-45	3.21	0.096012
45-50	3.40	0.10159
50-55	3.22	0.096311
	3.28	0.097876

Dari tabel diatas terlihat bahwa ada kenaikan *friction factor* setelah aliran diinjeksikan udara, secara berturut turut nilai f untuk ketinggian 65, 60, 55, 40 dan 45 adalah 0,07492, 0,07959, 0,08462, 0,09096 dan 0,09788. Perbedaan



*friction factor* ini disebabkan karena pada aliran yang telah diinjeksikan udara mempunyai *head loss* yang lebih tinggi dan debit aliran yang lebih rendah untuk *head* yang sama. Grafik dibawah ini memperlihatkan perbandingan antara *friction factor* aliran yang tanpa diinjeksikan udara dengan yang telah diinjeksikan udara.



**Grafik 4.11** Perbandingan *friction factor* Darcys-Weisbach

#### 4.4.2 Bilangan Poiseuille (Shah and London,1978)

Bilangan Poiseuille merupakan bilangan tak berdimensi yang menyatakan sifat fluida dengan melihat aspek geometri dari saluran yang dilewatinya. Bilangan Poiseuille ini juga dapat digunakan untuk menentukan nilai *friction factor* dari aliran. Dengan menggunakan persamaan 2.9 dan 2.10 maka didapatkan nilai  $Po$  untuk penelitian ini sebesar 14.38. Sehingga nilai *friction factor* yang didapat adalah :

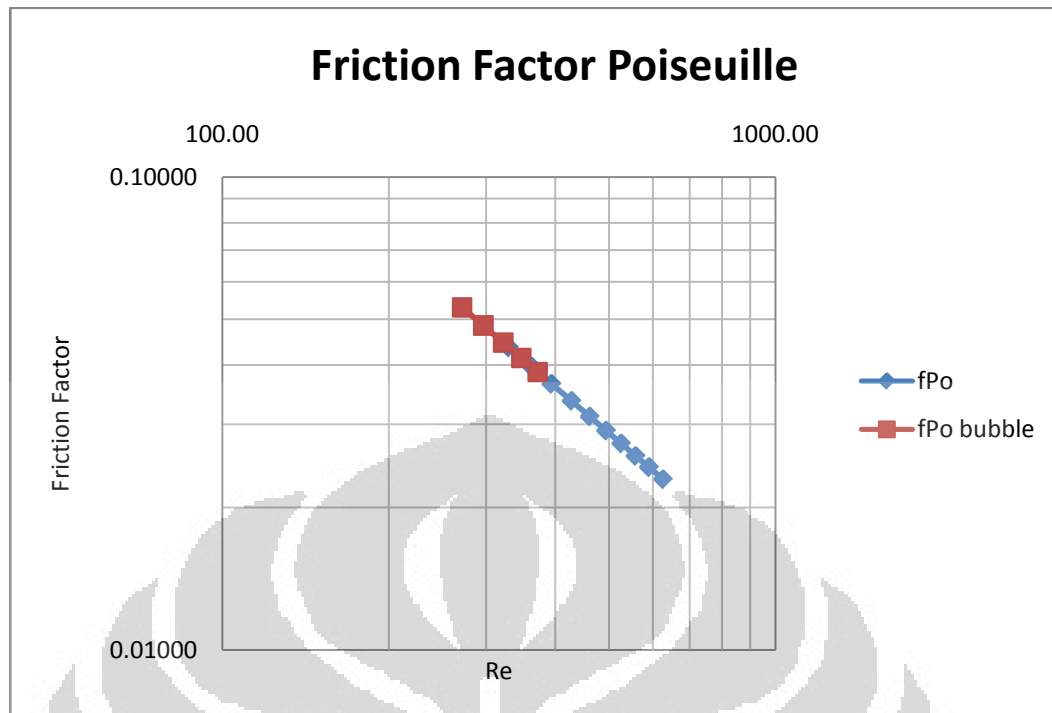
**Tabel 4. 14** Hasil perhitungan *friction factor* dengan metode Poiseuille

Head	Re	fPo
90	626.10	0.02297
85	590.83	0.02434
80	558.86	0.02573
75	525.79	0.02735
70	494.38	0.02909
65	461.31	0.03118
60	427.69	0.03363
55	393.52	0.03655
50	362.65	0.03966
45	329.59	0.04364

**Tabel 4. 15** Hasil perhitungan *friction factor* aliran dengan *bubble* dengan metode Poiseuille

Head	Re	fPo
65	371.47	0.03872
60	346.95	0.04145
55	321.87	0.04468
50	296.24	0.04855
45	271.16	0.05304

Hasil yang tak jauh berbeda dengan hasil yang didapat dari persamaan Darcys-Weisbach bahwa nilai *friction factor* untuk aliran yang telah diinjeksikan udara akan mempunyai nilai *friction factor* yang lebih besar. Dengan membagi nilai  $Po$  dengan nilai  $Re$ , maka didapatkan nilai *friction factor* untuk masing masing ketinggian. Dengan menambahkan aspek geometri, metode Poiseuille ini dapat lebih spesifik menjelaskan bahwa dengan nilai  $Dh$  yang sama namun *aspect ratio*-nya berbeda, maka nilai *friction factor* akan ikut berbeda. Karena percobaan dengan dan tanpa diinjeksikan udara menggunakan minichannel yang sama ( $Dh$  dan *aspect ratio* sama) maka nilai dari *friction factor* kedua percobaan ini akan berhimpit. Hal ini terlihat pada grafik dibawah ini.



**Grafik 4. 12** Perbandingan *friction factor* Poiseuille

#### 4.4.3 Fanning Friction Factor

Metode Fanning ini hampir sama dengan metode Darcys-Weisbach, yang membedakan adalah adanya nilai *pressure drop* ( $dP$ ) yang menggantikan nilai *head loss* ( $hL$ ) dan nilai mass flux ( $G$ ) yang menggantikan nilai kecepatan aliran ( $V$ ).

**Tabel 4. 16** Tabel perhitungan Fanning pada *head* 90 cm

90	$hL$ (cm)	$dP$ (Pa)	$G$	$fF$
20-25	6.31	618.684	788.89	0.00884
25-30	6.21	609.201	788.89	0.00870
30-35	6.41	629.148	788.89	0.00899
35-40	5.65	553.938	788.89	0.00791
40-45	5.77	566.364	788.89	0.00809
45-50	6.22	610.509	788.89	0.00872
50-55	5.97	585.330	788.89	0.00836
AVG	6.08	596.168	788.89	0.00851

**Tabel 4. 17** Tabel perhitungan Fanning pada *head* 85 cm

85	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	6.09	597.756	744.44	0.00959
25-30	5.91	579.444	744.44	0.00929
30-35	6.10	598.410	744.44	0.00960
35-40	5.40	529.740	744.44	0.00850
40-45	5.50	539.550	744.44	0.00865
45-50	5.94	582.387	744.44	0.00934
50-55	5.78	567.018	744.44	0.00909
AVG	5.82	570.615	744.44	0.00915

**Tabel 4. 18** Tabel perhitungan Fanning pada *head* 80 cm

80	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	5.69	558.189	704.17	0.01001
25-30	5.58	547.071	704.17	0.00981
30-35	5.79	567.999	704.17	0.01018
35-40	5.12	502.272	704.17	0.00900
40-45	5.32	521.565	704.17	0.00935
45-50	5.58	547.725	704.17	0.00982
50-55	5.53	542.166	704.17	0.00972
AVG	5.51	540.998	704.17	0.00970

**Tabel 4. 19** Tabel perhitungan Fanning pada *head* 75 cm

75	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	5.30	519.930	662.50	0.01053
25-30	5.30	519.930	662.50	0.01053
30-35	5.41	530.394	662.50	0.01074
35-40	4.81	472.188	662.50	0.00956
40-45	5.00	490.827	662.50	0.00994
45-50	5.30	519.930	662.50	0.01053
50-55	5.21	511.101	662.50	0.01035
AVG	5.19	509.186	662.50	0.01031

**Tabel 4. 20** Tabel perhitungan Fanning pada *head* 70 cm

70	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	5.00	490.500	622.92	0.01124
25-30	5.09	499.656	622.92	0.01145
30-35	4.90	480.690	622.92	0.01101
35-40	4.50	441.450	622.92	0.01011
40-45	4.70	461.070	622.92	0.01056
45-50	5.12	501.945	622.92	0.01150
50-55	4.93	483.633	622.92	0.01108
AVG	4.89	479.849	622.92	0.01099

**Tabel 4. 21** Tabel perhitungan Fanning pada *head* 65 cm

65	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	4.70	461.397	581.25	0.01214
25-30	4.69	460.416	581.25	0.01211
30-35	4.40	431.967	581.25	0.01137
35-40	4.30	421.830	581.25	0.01110
40-45	4.30	422.157	581.25	0.01111
45-50	4.69	460.089	581.25	0.01210
50-55	4.43	434.583	581.25	0.01143
AVG	4.50	441.777	581.25	0.01162

**Tabel 4. 22** Tabel perhitungan Fanning pada *head* 60 cm

60	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	4.40	431.313	538.89	0.01320
25-30	4.28	420.195	538.89	0.01286
30-35	4.10	402.537	538.89	0.01232
35-40	4.00	392.400	538.89	0.01201
40-45	3.80	372.453	538.89	0.01140
45-50	4.31	422.811	538.89	0.01294
50-55	4.13	405.480	538.89	0.01241
AVG	4.15	406.741	538.89	0.01245

**Tabel 4. 23** Tabel perhitungan Fanning pada *head* 55 cm

55	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	4.10	402.210	495.83	0.01454
25-30	3.89	381.609	495.83	0.01380
30-35	3.70	362.970	495.83	0.01312
35-40	3.70	362.970	495.83	0.01312
40-45	3.60	353.160	495.83	0.01277
45-50	4.01	393.381	495.83	0.01422
50-55	3.84	376.377	495.83	0.01361
AVG	3.83	376.097	495.83	0.01360

**Tabel 4. 24** Tabel perhitungan Fanning pada *head* 50 cm

50	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	3.71	363.624	456.94	0.01548
25-30	3.60	353.160	456.94	0.01503
30-35	3.39	332.232	456.94	0.01414
35-40	3.30	323.730	456.94	0.01378
40-45	3.31	324.384	456.94	0.01381
45-50	3.71	363.624	456.94	0.01548
50-55	3.51	344.331	456.94	0.01466
AVG	3.50	343.584	456.94	0.01463

**Tabel 4. 25** Tabel perhitungan Fanning pada *head* 45 cm

45	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	3.31	324.711	415.28	0.01674
25-30	3.20	313.920	415.28	0.01618
30-35	3.09	303.456	415.28	0.01564
35-40	3.00	293.973	415.28	0.01515
40-45	3.01	295.281	415.28	0.01522
45-50	3.30	323.730	415.28	0.01669
50-55	3.12	306.072	415.28	0.01578
AVG	3.15	308.735	415.28	0.01591

Untuk aliran yang diinjeksikan dengan gelembung udara dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4. 26** Tabel perhitungan Fanning aliran dengan *bubble* pada *head* 65 cm

65	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	4.91	481.34	468.056	0.01953
25-30	4.80	470.88	468.056	0.01911
30-35	4.60	451.26	468.056	0.01831
35-40	4.70	461.07	468.056	0.01871
40-45	4.61	451.91	468.056	0.01834
45-50	4.70	461.40	468.056	0.01872
50-55	4.62	453.55	468.056	0.01840
AVG	4.71	461.63	468.056	0.01873

**Tabel 4. 27** Tabel perhitungan Fanning aliran dengan *bubble* pada *head* 60 cm

60	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	4.60	451.59	437.153	0.02100
25-30	4.50	441.78	437.153	0.02055
30-35	4.20	412.35	437.153	0.01918
35-40	3.69	362.32	437.153	0.01685
40-45	4.81	471.86	437.153	0.02195
45-50	4.41	432.29	437.153	0.02011
50-55	4.30	422.16	437.153	0.01964
AVG	4.36	427.76	437.153	0.01990

**Tabel 4. 28** Tabel perhitungan Fanning aliran dengan *bubble* pada *head* 55 cm

55	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-25	4.20	412.02	405.556	0.02227
25-30	4.10	402.21	405.556	0.02174
30-35	3.91	383.24	405.556	0.02071
35-40	3.90	382.92	405.556	0.02069
40-45	3.80	372.78	405.556	0.02015
45-50	4.11	402.86	405.556	0.02177
50-55	3.91	383.90	405.556	0.02075
AVG	3.99	391.42	405.556	0.02115

**Tabel 4. 29** Tabel perhitungan Fanning aliran dengan *bubble* pada *head* 50 cm

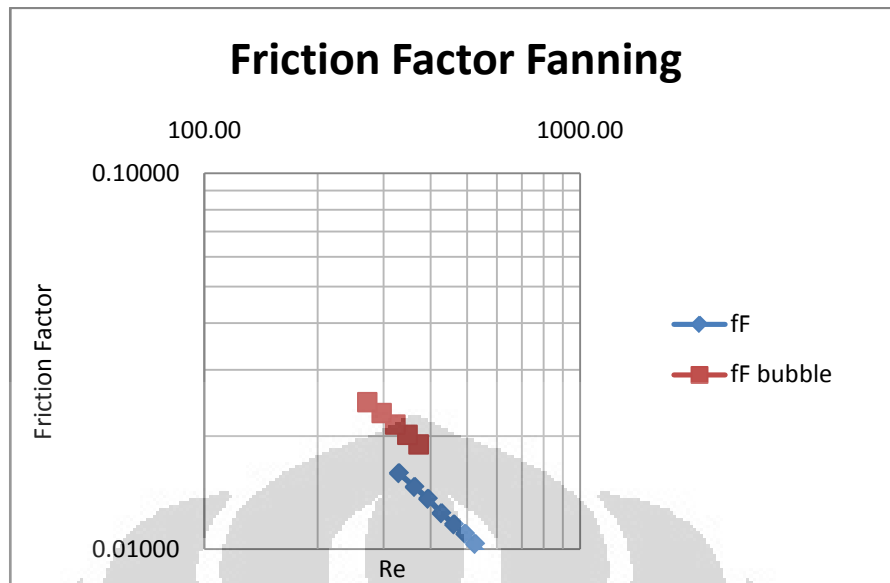
50	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-26	3.80	372.78	373.264	0.02378
25-31	3.70	362.97	373.264	0.02316
30-36	3.51	344.33	373.264	0.02197
35-41	3.50	343.35	373.264	0.02191
40-46	3.50	343.35	373.264	0.02191
45-51	3.82	375.07	373.264	0.02393
50-55	3.60	353.16	373.264	0.02253
AVG	3.63	356.43	373.264	0.02274

**Tabel 4. 30** Tabel perhitungan Fanning aliran dengan *bubble* pada *head* 45 cm

45	hL(cm)	dP (Pa)	G	fF
20-27	3.39	332.89	341.667	0.02535
25-32	3.40	333.54	341.667	0.02540
30-37	3.20	313.92	341.667	0.02390
35-42	3.10	304.11	341.667	0.02316
40-47	3.21	315.23	341.667	0.02400
45-52	3.40	333.54	341.667	0.02540
50-55	3.22	316.21	341.667	0.02408
AVG	3.28	321.35	341.667	0.02447

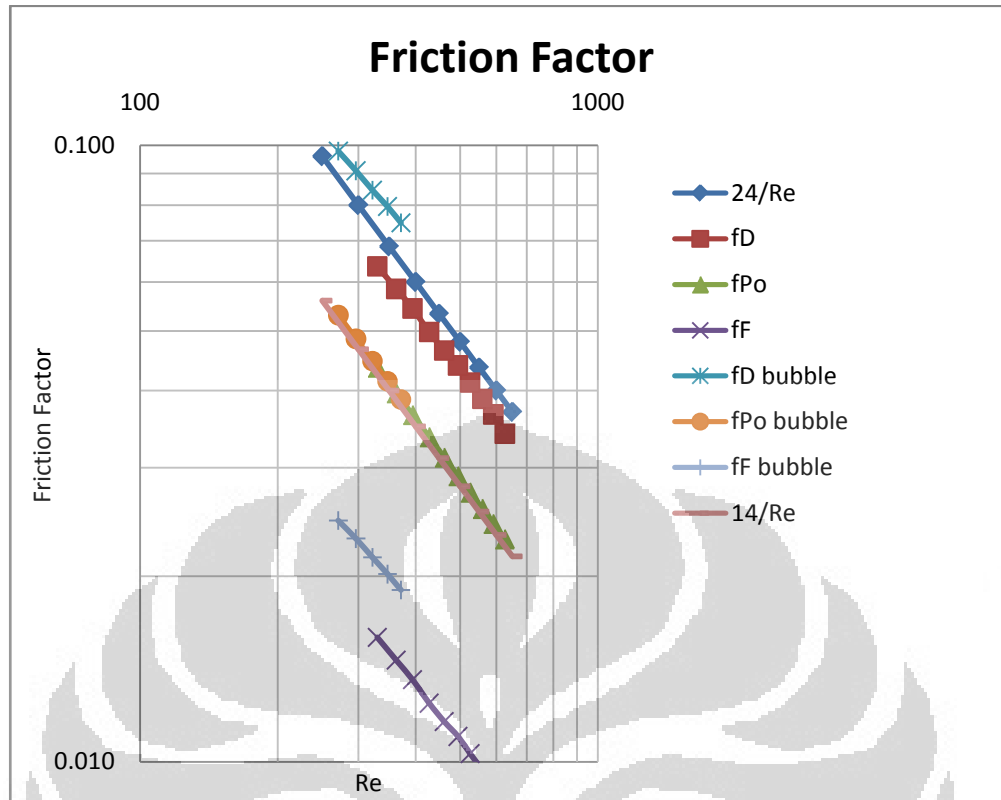
Hasil yang serupa dengan kedua persamaan sebelumnya juga didapat bahwa bahwa nilai *friction factor* untuk aliran yang telah diinjeksikan udara akan mempunyai nilai *friction factor* yang lebih besar. Dari kedua persamaan sebelumnya didapat bahwa nilai *friction factor* dengan metode fanning memberikan nilai yang paling kecil.





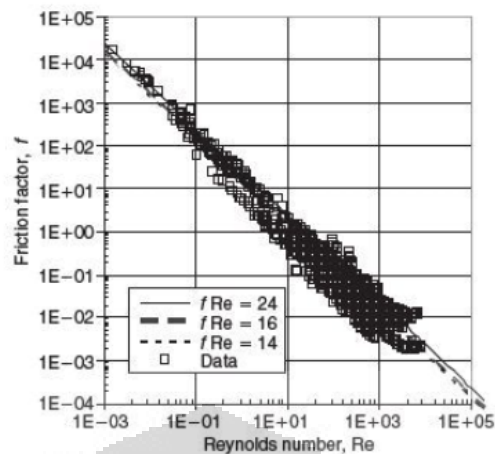
**Grafik 4. 13** Perbandingan *friction factor* Fanning

Bila melihat hasil diatas nampak nilai *friction factor* ( $f$ ) yang dihasilkan berbeda-beda untuk tiap metode. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat kembali pada grafik dibawah ini.



**Grafik 4. 14** Perbandingan *friction factor*

Berdasarkan teori rujukan, yakni dari penelitian Kandlikar pada tahun 2005, nampak bahwa nilai dari eksperimental yang dilakukan masih mengacu pada teori  $24/Re$  untuk umum,  $16/Re$  untuk *circular tube*, dan  $14/Re$  untuk *minichannel* dengan *aspect ratio* mendekati 1. Data yang dimasukkan pun bervariasi dari berbagai literatur sebelumnya. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada gambar 4.3 di bawah ini.



**Gambar 4.3** Hasil penelitian friction factor Kandlikar (2005)

Bila dibandingkan dengan hasil penelitian ini, terlihat bahwa hasilnya memang tidak berbeda jauh. Yakni bahwa nilai yang dihasilkan masih mengacu pada  $24/Re$  walaupun nilai tersebut masih belum mewakili. Sehingga perlu digunakan pendekatan dengan metode Poiseuille dengan menggunakan *aspect ratio*.

Dan dengan menggunakan Rumus Poiseuille didapat nilai  $Po$  sebesar 14.38 untuk *aspect ratio* 0.8. Dan nilai *friction factor* yang dihasilkan pun sesuai dengan teori  $14/Re$  untuk *rectangular minichannel* dengan *aspect ratio* mendekati 1. Sedangkan untuk metode Fanning, dimana hasil *friction factor* yang didapat nilainya ternyata lebih kecil dibandingkan dengan metode Poiseuille yang notabeneanya mengacu pada  $14/Re$ .

Untuk perhitungan Darcys–Weisbach memang tidak direkomendasikan oleh kandlikar dalam menghitung fenomena pada *minichannel*. Hal ini dilihat dari perbedaan yang cukup besar antara hasil dari metode Darcys-Weisbach dengan metode terbaru yakni metode Poiseuille dan Fanning. Namun pada penelitian ini nampak bahwa hasil dari metode Darcys-Weisbach berhimpit dengan teori  $24/Re$ . Sehingga pada penelitian ini metode Darcys-Weisbach masih relevan untuk digunakan. Hasil penelitian untuk aliran dengan *bubble* juga memperlihatkan tren yang serupa, bahwa hasil dari metode Darcys-Weisbach berhimpit dengan teori  $24/Re$ , perbedaan hanya saja terdapat pada nilai *friction factor* dengan *bubble* berada diatas kurva  $24/Re$  sedangkan tanpa *bubble* berada

di bawah kurva  $24/Re$ . Sehingga pada penelitian ini metode Darcys-Weisbach masih relevan untuk digunakan. Untuk perhitungan dengan metode Poiseuille, didapat bahwa penelitian dengan *bubble* dan tanpa *bubble* menunjukkan tren yang serupa hal ini dikarenakan metode ini lebih dititik beratkan pada aspect ratio dari *minichannel*.

Berdasarkan grafik ketiga metode perhitungan *friction factor* menunjukkan tren menurun yang sama. Sehingga masih berlaku hubungan  $Re \cdot f = constant$  untuk aliran laminar pada *minichannel*.

#### 4.5 ANALISA CONSTRICTED FLOW

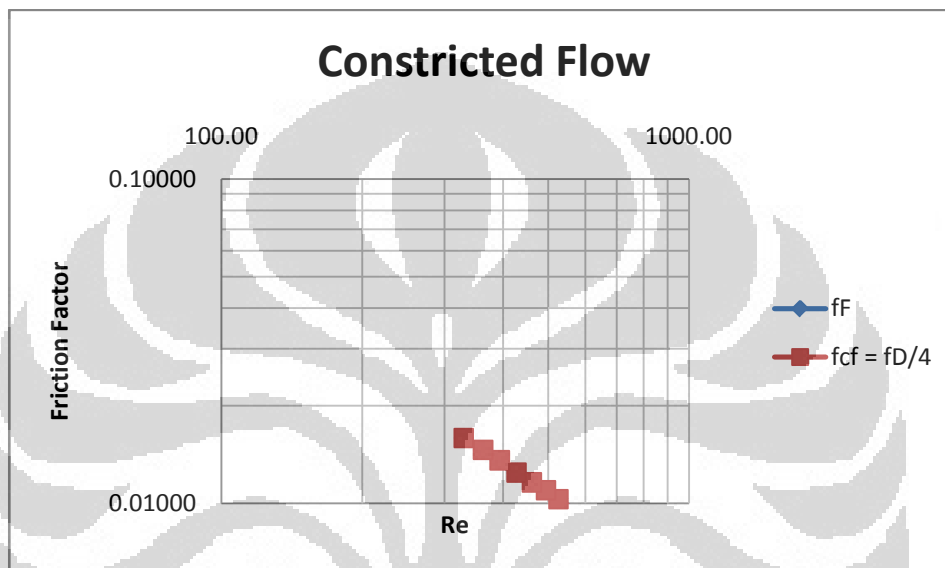
Pada *minichannel*, nilai kekasaran relatif diperkirakan akan lebih besar dari 0,05 yang merupakan limit dari diagram Moody. Oleh karena itu perhitungan *friction factor* pada *minichannel* lebih tepat didekati dengan metode *constricted flow*, dimana *friction factor constricted flow* merupakan *friction factor Darcy* dibagi dengan 4 atau biasa disebut dengan *friction factor Fanning*. Gambar dibawah ini akan memperlihatkan diagram Moody *Constricted Flow*.

Tabel 4. 31 Tabel perhitungan *f constricted flow*

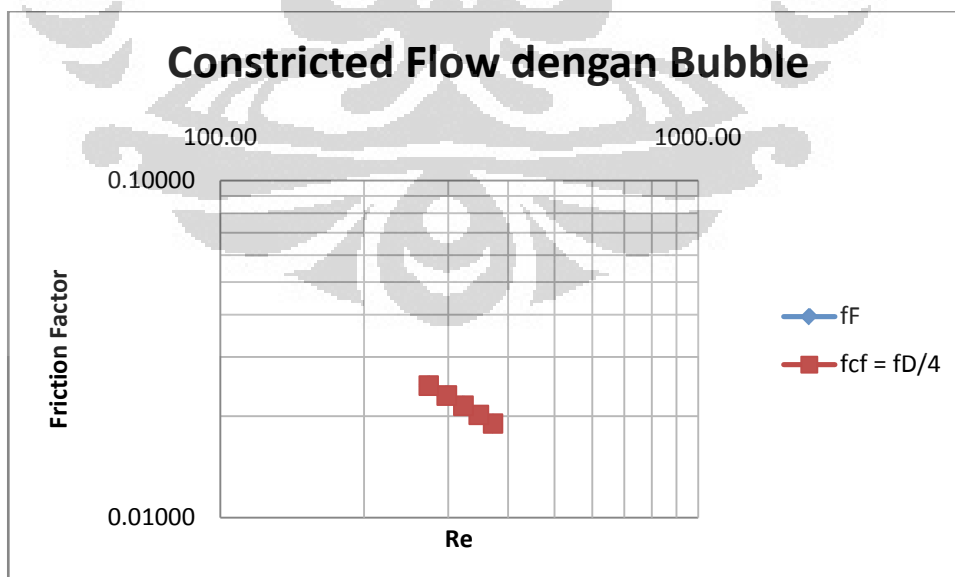
Head	Re	fD	fF	f <sub>cf</sub> = fD/4
90	626,10	0,03406	0,00851	0,00851
85	590,83	0,03661	0,00915	0,00915
80	558,86	0,03879	0,00970	0,00970
75	525,79	0,04125	0,01031	0,01031
70	494,38	0,04397	0,01099	0,01099
65	461,31	0,04649	0,01162	0,01162
60	427,69	0,04980	0,01245	0,01245
55	393,52	0,05439	0,01360	0,01360
50	362,65	0,05851	0,01463	0,01463
45	329,59	0,06365	0,01591	0,01591

**Tabel 4. 32** Tabel perhitungan  $f$  constricted flow dengan penambahan bubble

Head	Re	fD	fF	fcf = fD/4
65	372,02	0,07600	0,01900	0,01900
60	347,22	0,08064	0,02016	0,02016
55	322,42	0,08586	0,02146	0,02146
50	297,62	0,09208	0,02302	0,02302
45	272,82	0,09852	0,02463	0,02463



**Grafik 4. 15**  $f$  constricted Flow



**Grafik 4. 16**  $f$  constricted flow dengan bubble

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan data, hasil pengolahan dan analisa data yang dilakukan disimpulkan:

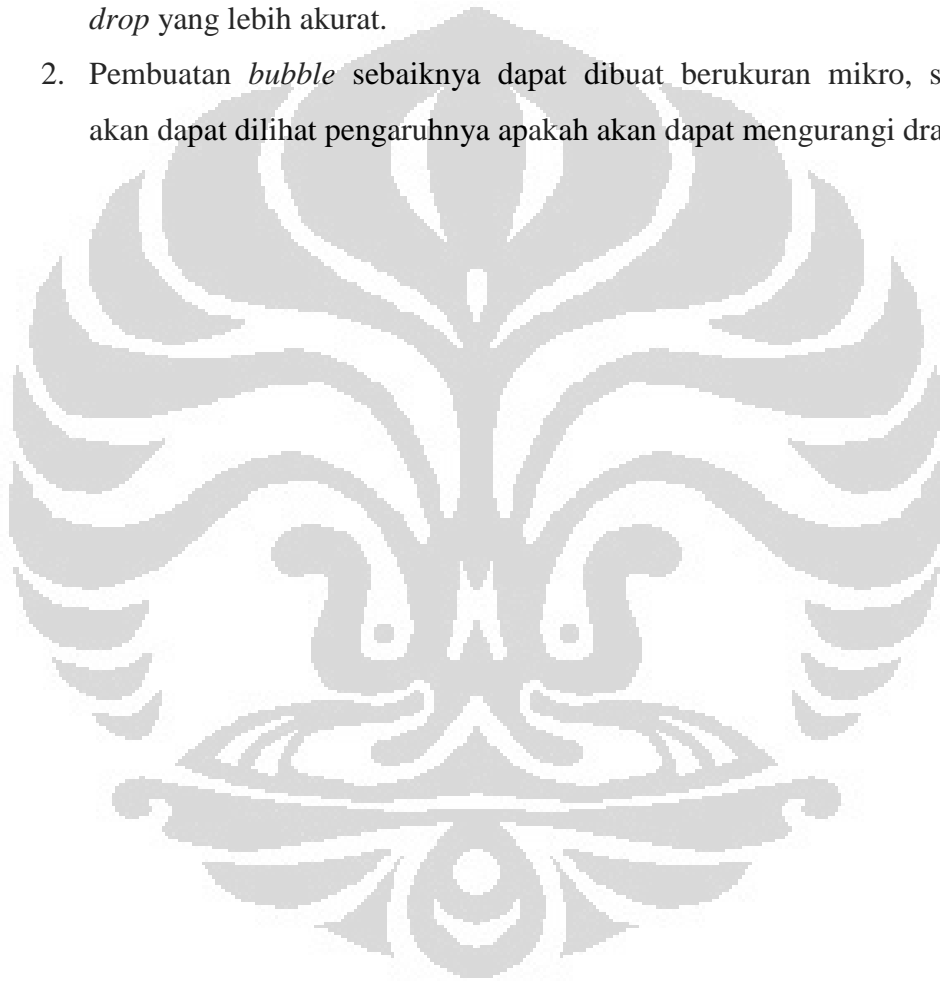
1. *Pressure drop* yang terjadi pada *minichannel* relatif besar dibandingkan *pressure drop* pada saluran konvensional.
2. *Pressure drop* yang terjadi pada *minichannel* sangat besar.
3. *Pressure drop* pada daerah belum fully developed lebih besar dari pada *pressure drop* pada daerah fully developed dan penurunan *pressure drop* pada daerah fully developed menunjukkan gradien  $dP/dx$  yang konstan.
4. Gelembung udara yang terbentuk bukanlah *microbubble*, sehingga penambahan daripada gelembung ini tidak mengurangi drag yang terjadi namun hal yang terjadi malah sebaliknya. Gaya *bouyancy* dari *bubble* yang bergerak ke atas akan menghambat laju aliran dari pada fluida
5. Pada nilai head yang rendah gelembung udara akan berbentuk kapsul dan pada head yang tinggi gelembung udara akan berbentuk lingkaran. Hal ini disebabkan oleh gaya *bouyancy*.
6. Penambahan gelembung udara pada aliran mengakibatkan kenaikan *friction factor* dan berlaku untuk semua metode perhitungan yang digunakan.
7. Dari analisa perhitungan nilai *friction factor*, ketiga metode masih relevan digunakan. Metode Darcys-Weisbach masih relevan untuk digunakan pada *minichannel* karena hasil yang diperoleh mendekati nilai dari  $24/Re$ . Namun metode Poiseuille dan Fanning lebih relevan karena selain lebih spesifik, hasilnya sesuai dengan teori  $14/Re$  untuk *minichannel* dengan *aspect ratio* mendekati 1.
8. Berdasarkan grafik ketiga metode perhitungan *friction factor* menunjukkan tren menurun yang sama. Sehingga masih berlaku hubungan  $Re \cdot f = constant$  untuk aliran laminar pada *minichannel*.

9. Perhitungan *friction factor* pada *minichannel* akan mempunyai hasil yang lebih akurat apabila dilakukan dengan pendekatan *constricted flow*.

## 5.2 SARAN

Adapun saran yang penulis harapkan untuk penelitian selanjutnya agar hasil yang dicapai lebih maksimal diantaranya :

1. Pembuatan *Test Section* agar lebih presisi, agar didapatkan nilai *pressure drop* yang lebih akurat.
2. Pembuatan *bubble* sebaiknya dapat dibuat berukuran mikro, sehingga akan dapat dilihat pengaruhnya apakah akan dapat mengurangi drag.



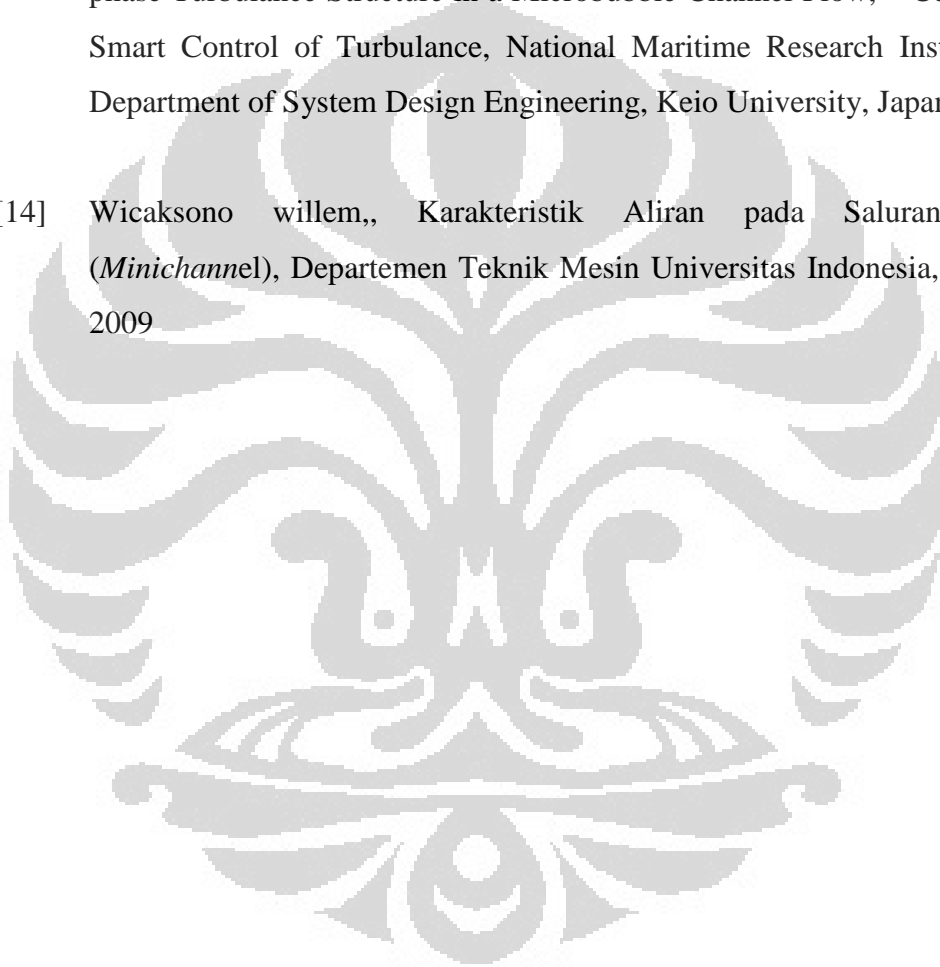
## DAFTAR ACUAN

- [1] Munson, Bruce, Young, Donald F., & Okiishi, Theodore H., Mekanika Fluida Jilid 2”Erlangga, 2003
- [2] Menon, Shashi E., Piping Calculations Manual”McGraw-Hill, 2005
- [3] Nguyen, Nam-Trung, Wereley Steven T., Fundamentals and Applications of Microfluidics”Artech House, 2002
- [4] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/forums/7747/1/moody.png>
- [5] Steinke, Mark E., & Kandlikar, Satish G., Single-Phase Heat Transfer Enhancement Techniques in Microchannels and Minichannels” Thermal Analysis and Microfluidics Laboratory, Mechanical Engineering Department, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY USA, 2002
- [6] Oh, Jong-Taek, Choi, Kwang-Il, Pamitran, A.S., Ardiyansyah, Boiling Heat Transfer in Mini and Microchannels”Energy Laboratory, Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Chonnam National University Republic of Korea
- [7] A.S. Pamitran<sup>a</sup>, Kwang-Il Choi<sup>a</sup>, Jong-Taek Oh<sup>b,\*</sup>, Hoo-Kyu Oh<sup>c</sup>, Two-phase Pressure Drop during CO<sub>2</sub> Vaporization in Horizontal Smooth Minichannels” Chonnam National University Republic of Korea
- [8] Mechanical Engineering Department, San José State University. Thermal Management of Electronics
- [9] Kandlikar, S., Garimella, S., Li, D., Colin, S., King, M. R., Heat Transfer and Fluid Flow In Minichannels and Microchannels”Elsevier. 2005
- [10] Park Jin, Sung, Chung Seok, Woo Bang, Hyun, Modeling and Designing of Microfluidics System Using Poiseuille Number”Seoul National University, Korea
- [11] Steinke, Mark E., & Kandlikar, Satish G., Single-Phase Liquid Friction Factors in Microchannels”Thermal Analysis and Microfluidics



Laboratory, Mechanical Engineering Department, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY USA, 2005

- [12] C. del C. Gutierrez Torres, Y.A. Hassan, J.A. Jimenez Bernal, J.G. Barbosa Saldan,, Drag reduction by microbubble injection in a channel flow, Instituto Politenico Nacional, SEPI-ESIME Zacatenco, 2009
- [13] Atsuhide Kitagawa\*, Koichi Hishida\*\* and Yoshiaki Kodama\*\*,, Two phase Turbulance Structure in a Microbubble Channel Flow, \* Center for Smart Control of Turbulance, National Maritime Research Institute, \* Department of System Design Engineering, Keio University, Japan
- [14] Wicaksono willem,, Karakteristik Aliran pada Saluran Mini (*Minichannel*), Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia, Depok, 2009



## LAMPIRAN

No	Q	Manometer Head 90 cm											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	38	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
2	38	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
3	38	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
4	38	74.10	65.70	58.00	51.50	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
5	37	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
6	37	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.40	26.80	21.10	14.80	8.90	1.90
7	38	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.40	26.80	21.10	14.80	8.90	1.90
8	38	74.20	65.70	57.90	51.40	45.10	38.90	32.40	26.80	21.00	14.80	8.90	1.90
9	38	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.40	26.80	21.10	14.80	8.90	1.90
10	38	74.20	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
11	38	74.10	65.70	58.00	51.50	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
12	38	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
13	38	74.10	65.60	57.90	51.50	45.20	39.00	32.60	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
14	38	74.00	65.50	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
15	38	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
16	37	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
17	38	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
18	38	74.20	65.70	58.00	51.50	45.20	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
19	38	74.20	65.70	58.00	51.50	45.20	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
20	38	74.20	65.70	58.00	51.50	45.20	38.90	32.50	26.80	21.10	14.80	8.90	1.90
21	38	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.80	21.10	14.80	8.90	1.90
22	38	74.10	65.60	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.80	21.10	14.80	8.90	1.90
23	38	74.10	65.60	57.90	51.50	45.20	39.00	32.60	26.70	21.00	14.80	8.90	1.90
24	38	74.10	65.60	57.90	51.50	45.20	39.00	32.60	26.80	21.00	14.80	8.90	1.90
25	37	74.10	65.60	57.90	51.50	45.20	39.00	32.60	26.80	21.10	14.80	8.90	1.90
26	38	74.10	65.60	57.90	51.50	45.20	39.00	32.60	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
27	38	74.10	65.60	57.90	51.50	45.20	39.00	32.60	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
28	38	74.10	65.60	57.90	51.50	45.20	39.00	32.60	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
29	38	74.10	65.50	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
30	38	74.10	65.50	57.90	51.40	45.10	38.90	32.50	26.90	21.10	14.90	8.90	1.90
Avg	37.867	74.113	65.610	57.917	51.440	45.133	38.923	32.510	26.863	21.090	14.867	8.900	1.900

No	Q	Manometer Head 85 cm											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.2	8.5	1.9
2	36	70.5	62.5	55.5	49.3	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.2	8.5	1.9
3	35	70.5	62.5	55.5	49.3	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
4	35	70.6	62.5	55.6	49.3	43.2	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
5	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.3	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
6	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.3	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
7	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.3	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
8	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
9	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
10	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
11	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
12	35	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
13	35	70.5	62.5	55.6	49.2	43.2	37.2	31.2	25.8	20.3	14.3	8.5	1.9
14	35	70.6	62.6	55.6	49.3	43.2	37.2	31.2	25.8	20.3	14.3	8.5	1.9
15	36	70.6	62.5	55.6	49.2	43.2	37.2	31.2	25.8	20.3	14.3	8.5	1.9
16	36	70.6	62.6	55.6	49.2	43.2	37.2	31.2	25.8	20.3	14.3	8.5	1.9
17	36	70.6	62.5	55.6	49.2	43.2	37.2	31.1	25.7	20.2	14.2	8.5	1.9
18	36	70.6	62.5	55.6	49.3	43.2	37.3	31.1	25.7	20.2	14.2	8.5	1.9
19	36	70.6	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.2	8.5	1.9
20	36	70.6	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.2	8.5	1.9
21	35	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
22	35	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.3	31.2	25.8	20.3	14.3	8.5	1.9
23	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
24	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
25	36	70.4	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
26	35	70.4	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
27	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
28	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
29	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
30	36	70.5	62.5	55.5	49.2	43.1	37.2	31.1	25.7	20.2	14.3	8.5	1.9
Avg	35.733	70.520	62.507	55.523	49.217	43.123	37.217	31.117	25.717	20.217	14.280	8.500	1.900

No	Q	Manometer Head 80 cm											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.60	24.50	19.20	13.60	8.10	1.80
2	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.60	24.50	19.20	13.60	8.10	1.80
3	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.60	24.50	19.20	13.60	8.10	1.80
4	34	67	59.30	52.80	46.80	41.00	35.50	29.70	24.50	19.20	13.60	8.10	1.80
5	33	66.9	59.30	52.80	46.70	41.00	35.40	29.60	24.50	19.20	13.70	8.10	1.80
6	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.60	24.50	19.30	13.70	8.10	1.80
7	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.60	24.50	19.30	13.70	8.10	1.80
8	33	67	59.30	52.80	46.70	41.00	35.50	29.70	24.60	19.30	13.70	8.10	1.80
9	33	67	59.40	52.80	46.70	41.00	35.50	29.70	24.60	19.30	13.60	8.10	1.80
10	34	66.9	59.30	52.80	46.70	41.00	35.50	29.70	24.60	19.30	13.60	8.10	1.80
11	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.50	29.70	24.60	19.30	13.60	8.10	1.80
12	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.50	29.70	24.60	19.20	13.60	8.10	1.80
13	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.10	35.50	29.70	24.60	19.20	13.60	8.10	1.80
14	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.10	35.50	29.70	24.60	19.20	13.60	8.10	1.80
15	34	67	59.30	52.70	46.70	41.00	35.50	29.70	24.50	19.10	13.60	8.10	1.80
16	34	67	59.30	52.70	46.70	41.00	35.50	29.70	24.50	19.10	13.60	8.10	1.80
17	33	67	59.30	52.80	46.70	41.10	35.50	29.70	24.50	19.10	13.60	8.10	1.80
18	34	67	59.40	52.80	46.70	41.10	35.50	29.70	24.60	19.10	13.60	8.10	1.80
19	34	67	59.40	52.80	46.70	41.00	35.40	29.70	24.60	19.10	13.70	8.10	1.80
20	34	66.9	59.30	52.80	46.70	41.00	35.40	29.70	24.60	19.20	13.70	8.10	1.80
21	34	66.9	59.30	52.80	46.70	41.00	35.30	29.60	24.50	19.20	13.70	8.10	1.80
22	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.70	24.50	19.20	13.70	8.10	1.80
23	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.70	24.50	19.20	13.60	8.10	1.80
24	34	66.8	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.60	24.50	19.20	13.60	8.10	1.80
25	33	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.60	24.40	19.20	13.60	8.10	1.80
26	33	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.50	24.40	19.20	13.60	8.10	1.80
27	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.50	24.50	19.20	13.60	8.10	1.80
28	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.60	24.50	19.30	13.60	8.10	1.80
29	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.60	24.50	19.30	13.60	8.10	1.80
30	34	66.9	59.30	52.70	46.70	41.00	35.40	29.60	24.50	19.20	13.60	8.10	1.80
AVG	33.800	66.923	59.310	52.733	46.703	41.013	35.437	29.647	24.527	19.210	13.627	8.100	1.800

No	Q	Manometer Head 75 cm											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	32	63.2	55.9	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
2	32	63.2	55.9	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
3	32	63.2	55.9	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
4	31	63.3	56	49.7	44	38.7	33.4	28	23.3	18.2	12.9	7.7	1.8
5	32	63.3	56	49.8	44.1	38.8	33.5	28.1	23.3	18.3	13	7.7	1.8
6	32	63.3	56	49.8	44.1	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
7	32	63.3	56	49.7	44.1	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
8	32	63.3	55.9	49.7	44.1	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
9	31	63.2	56	49.7	44.1	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
10	31	63.2	56	49.7	44.1	38.8	33.5	28.1	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
11	32	63.2	55.9	49.7	44.1	38.8	33.5	28.1	23.2	18.3	12.9	7.7	1.8
12	32	63.1	55.9	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
13	32	63.1	55.8	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
14	32	63.1	55.8	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
15	32	63.2	55.9	49.8	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
16	32	63.2	55.9	49.8	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
17	31	63.2	55.9	49.8	44	38.8	33.5	28.1	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
18	32	63.2	55.9	49.7	44	38.8	33.5	28.1	23.3	18.3	13	7.7	1.8
19	32	63.2	55.9	49.7	44	38.8	33.5	28.1	23.3	18.2	12.9	7.7	1.8
20	32	63.3	56	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
21	32	63.3	56	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
22	32	63.3	56	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
23	31	63.3	55.9	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
24	31	63.3	55.9	49.7	44	38.8	33.5	28.1	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
25	32	63.3	55.9	49.8	44.1	38.8	33.5	28.1	23.2	18.2	13	7.7	1.8
26	32	63.2	55.9	49.7	44.1	38.8	33.5	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
27	32	63.2	55.9	49.7	44.1	38.8	33.5	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
28	32	63.2	55.9	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
29	32	63.2	55.9	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
30	32	63.2	55.9	49.7	44	38.7	33.4	28	23.2	18.2	12.9	7.7	1.8
Avg	31.800	63.227	55.923	49.720	44.033	38.733	33.433	28.027	23.213	18.210	12.910	7.700	1.800

No	Q	Manometer Head 70 cm											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
2	30	59.6	52.8	47	41.6	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
3	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
4	30	59.6	52.8	47	41.6	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.3	7.3	1.8
5	31	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
6	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
7	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
8	30	59.6	52.8	47	41.6	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.3	7.3	1.8
9	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.3	7.3	1.8
10	31	59.6	52.8	47	41.6	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.3	7.3	1.8
11	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
12	30	59.6	52.8	47	41.6	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.3	7.3	1.8
13	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
14	30	59.5	52.7	46.9	41.6	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.2	7.3	1.8
15	29	59.6	52.8	47	41.6	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.3	7.3	1.8
16	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.5	26.6	22.1	17.4	12.2	7.3	1.8
17	30	59.6	52.8	47	41.6	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
18	29	59.6	52.8	47	41.6	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.3	7.3	1.8
19	29	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
20	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
21	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.3	7.3	1.8
22	30	59.5	52.7	46.9	41.6	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.2	7.3	1.8
23	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
24	29	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.5	26.6	22.1	17.4	12.2	7.3	1.8
25	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
26	29	59.6	52.8	47	41.6	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.3	7.3	1.8
27	30	59.5	52.7	46.9	41.6	36.6	31.5	26.6	22.1	17.4	12.2	7.3	1.8
28	30	59.5	52.8	47	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
29	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
30	30	59.5	52.7	46.9	41.5	36.5	31.4	26.5	22	17.3	12.2	7.3	1.8
Avg	29.900	59.530	52.733	46.933	41.540	36.540	31.447	26.547	22.047	17.347	12.230	7.300	1.800

No	Q	Manometer Head 65 cm											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
2	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
3	28	55.3	48.9	43.5	38.5	33.8	29.1	24.7	20.4	16.1	11.4	6.9	1.7
4	27	55.3	48.9	43.4	38.4	33.7	29.1	24.7	20.4	16	11.3	6.9	1.7
5	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
6	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
7	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
8	27	55.3	48.9	43.5	38.5	33.8	29.1	24.6	20.3	16	11.4	6.9	1.7
9	27	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
10	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
11	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
12	28	55.3	48.8	43.4	38.4	33.7	29.1	24.7	20.4	16.1	11.4	6.9	1.7
13	28	55.3	48.9	43.5	38.5	33.8	29.1	24.7	20.4	16.1	11.4	6.9	1.7
14	28	55.3	48.9	43.5	38.5	33.7	29	24.6	20.3	16	11.4	6.9	1.7
15	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
16	29	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
17	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
18	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
19	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
20	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
21	27	55.3	48.9	43.5	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16.1	11.4	6.9	1.7
22	29	55.3	48.9	43.5	38.5	33.8	29.1	24.7	20.4	16.1	11.4	6.9	1.7
23	28	55.3	48.8	43.4	38.4	33.8	29.1	24.7	20.4	16	11.3	6.9	1.7
24	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
25	27	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
26	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
27	28	55.3	48.9	43.5	38.5	33.7	29	24.6	20.3	16	11.4	6.9	1.7
28	28	55.3	48.9	43.5	38.5	33.8	29.1	24.7	20.4	16.1	11.4	6.9	1.7
29	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
30	28	55.2	48.8	43.4	38.4	33.7	29	24.6	20.3	16	11.3	6.9	1.7
Avg	27.900	55.237	48.830	43.427	38.423	33.720	29.027	24.623	20.323	16.020	11.330	6.900	1.700

No	Q	Manometer Head 60 cm											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
2	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
3	25	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
4	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
5	25	51.1	45.2	40.1	35.6	31.2	26.9	22.8	18.8	15	10.7	6.5	1.7
6	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
7	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
8	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
9	26	51.1	45.2	40.1	35.6	31.2	26.9	22.7	18.7	15	10.7	6.5	1.7
10	26	51.1	45.2	40	35.5	31.1	26.9	22.8	18.8	15	10.7	6.5	1.7
11	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.9	22.8	18.8	15	10.6	6.5	1.7
12	25	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
13	26	51.1	45.2	40.1	35.6	31.2	26.9	22.8	18.8	15	10.7	6.5	1.7
14	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
15	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
16	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
17	25	51.1	45.2	40.1	35.6	31.2	26.9	22.8	18.8	15	10.7	6.5	1.7
18	25	51.1	45.2	40.1	35.6	31.2	26.9	22.8	18.8	15	10.7	6.5	1.7
19	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
20	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.9	22.8	18.8	15	10.6	6.5	1.7
21	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
22	27	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
23	26	51.1	45.2	40.1	35.6	31.2	26.9	22.8	18.8	15	10.7	6.5	1.7
24	26	51.1	45.2	40	35.5	31.1	26.9	22.8	18.8	15	10.7	6.5	1.7
25	26	51.1	45.2	40.1	35.6	31.2	26.9	22.8	18.8	15	10.7	6.5	1.7
26	25	51	45.1	40	35.5	31.1	26.9	22.8	18.8	15	10.6	6.5	1.7
27	27	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
28	26	51.1	45.1	40	35.5	31.2	26.9	22.8	18.8	15	10.7	6.5	1.7
29	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
30	26	51	45.1	40	35.5	31.1	26.8	22.7	18.7	14.9	10.6	6.5	1.7
Avg	25.867	51.033	45.130	40.023	35.523	31.127	26.843	22.740	18.740	14.943	10.633	6.500	1.700



No	Q	Manometer Head 55 cm											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
2	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.9	21.2	17.5	13.9	9.8	6	1.7
3	23	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
4	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
5	23	47.4	41.9	37.3	32.9	28.8	24.9	21.2	17.5	13.9	9.9	6	1.7
6	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
7	23	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
8	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
9	24	47.4	41.9	37.3	32.9	28.8	24.9	21.2	17.5	13.9	9.9	6	1.7
10	23	47.4	41.8	37.2	32.8	28.7	24.9	21.2	17.5	13.9	9.9	6	1.7
11	23	47.4	41.9	37.3	32.9	28.8	24.9	21.2	17.5	13.9	9.9	6	1.7
12	24	47.3	41.8	37.2	32.9	28.8	24.9	21.2	17.5	13.9	9.9	6	1.7
13	24	47.4	41.9	37.3	32.9	28.8	24.9	21.2	17.5	13.9	9.9	6	1.7
14	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
15	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.9	21.2	17.5	13.9	9.8	6	1.7
16	25	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
17	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
18	24	47.3	41.8	37.2	32.9	28.8	24.9	21.2	17.5	13.9	9.9	6	1.7
19	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
20	23	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
21	24	47.4	41.9	37.3	32.9	28.8	24.9	21.2	17.5	13.9	9.9	6	1.7
22	24	47.4	41.9	37.3	32.9	28.8	24.9	21.2	17.5	13.9	9.9	6	1.7
23	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
24	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
25	23	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
26	23	47.4	41.9	37.3	32.9	28.8	24.9	21.2	17.5	13.9	9.9	6	1.7
27	25	47.3	41.8	37.2	32.9	28.8	24.9	21.2	17.5	13.9	9.9	6	1.7
28	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
29	24	47.3	41.8	37.2	32.9	28.8	24.9	21.2	17.5	13.9	9.8	6	1.7
30	24	47.3	41.8	37.2	32.8	28.7	24.8	21.1	17.4	13.8	9.8	6	1.7
Avg	23.800	47.327	41.823	37.223	32.837	28.737	24.847	21.147	17.447	13.847	9.837	6.000	1.700

No	Q	Manometer head 50 cm											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
2	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
3	23	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
4	21	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
5	22	43.6	38.5	34.2	30.1	26.4	22.8	19.4	16.1	12.8	9	5.5	1.7
6	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.4	16.1	12.8	9.1	5.5	1.7
7	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
8	21	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
9	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
10	21	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.4	16	12.7	9	5.5	1.7
11	22	43.5	38.5	34.2	30.1	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
12	21	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.4	16.1	12.7	9	5.5	1.7
13	21	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
14	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
15	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.4	16	12.7	9	5.5	1.7
16	22	43.6	38.5	34.1	30.1	26.4	22.8	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
17	23	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16.1	12.8	9.1	5.5	1.7
18	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16.1	12.8	9	5.5	1.7
19	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
20	22	43.6	38.5	34.2	30.1	26.3	22.7	19.4	16	12.7	9	5.5	1.7
21	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
22	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
23	23	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.4	16.1	12.7	9	5.5	1.7
24	22	43.6	38.4	34.1	30.1	26.4	22.8	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
25	21	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
26	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16.1	12.8	9.1	5.5	1.7
27	23	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
28	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
29	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
30	22	43.5	38.4	34.1	30	26.3	22.7	19.3	16	12.7	9	5.5	1.7
Avg	21.933	43.513	38.413	34.110	30.017	26.310	22.710	19.323	16.023	12.717	9.010	5.500	1.700

No	Q	Manometer head 45 cm											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
2	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.6	11.6	8.2	5.1	1.6
3	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
4	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
5	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
6	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
7	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
8	20.000	39.4	34.7	30.8	27.2	23.9	20.7	17.6	14.6	11.6	8.3	5.1	1.6
9	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
10	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
11	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
12	20.000	39.3	34.7	30.8	27.2	23.9	20.7	17.6	14.6	11.6	8.2	5.1	1.6
13	20.000	39.3	34.7	30.8	27.2	23.9	20.7	17.6	14.6	11.6	8.2	5.1	1.6
14	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
15	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.3	5.1	1.6
16	19.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
17	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
18	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.6	14.6	11.6	8.3	5.1	1.6
19	20.000	39.4	34.7	30.8	27.2	23.8	20.6	17.6	14.6	11.6	8.3	5.1	1.6
20	20.000	39.4	34.7	30.8	27.2	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
21	20.000	39.4	34.7	30.8	27.2	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.3	5.1	1.6
22	19.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.3	5.1	1.6
23	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
24	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
25	20.000	39.3	34.7	30.8	27.2	23.9	20.7	17.6	14.6	11.5	8.2	5.1	1.6
26	20.000	39.3	34.7	30.8	27.2	23.9	20.7	17.6	14.6	11.5	8.2	5.1	1.6
27	20.000	39.3	34.6	30.7	27.2	23.9	20.7	17.6	14.6	11.5	8.2	5.1	1.6
28	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
29	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
30	20.000	39.3	34.6	30.7	27.1	23.8	20.6	17.5	14.5	11.5	8.2	5.1	1.6
Avg	19.933	39.313	34.627	30.727	27.130	23.820	20.620	17.527	14.530	11.520	8.220	5.100	1.600

No	Q	Manometer Head 65 cm dengan bubble											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
2	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
3	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
4	22		51.6	46	40.6	35.7	30.9	26.3	21.6	17	12.3	7.6	2.1
5	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
6	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
7	22.5		51.6	46	40.6	35.7	30.9	26.3	21.6	17	12.3	7.6	2.1
8	22.5		51.6	46	40.6	35.7	30.9	26.3	21.6	17	12.3	7.6	2.1
9	22.5		51.6	46	40.6	35.7	30.9	26.3	21.6	17	12.3	7.6	2.1
10	22		51.6	46	40.6	35.7	30.9	26.3	21.6	17	12.3	7.6	2.1
11	22.5		51.6	46	40.6	35.7	30.9	26.3	21.6	17	12.3	7.6	2.1
12	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
13	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
14	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
15	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
16	22.5		51.5	45.9	40.6	35.7	30.9	26.3	21.6	16.9	12.2	7.6	2.1
17	22.5		51.5	45.9	40.6	35.7	30.9	26.3	21.6	16.9	12.2	7.6	2.1
18	23		51.6	46	40.6	35.7	30.9	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
19	22.5		51.6	46	40.6	35.7	30.9	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
20	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
21	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.3	21.6	17	12.3	7.6	2.1
22	22		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.3	21.6	17	12.2	7.6	2.1
23	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
24	22.5		51.6	46	40.6	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
25	23		51.6	46	40.6	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
26	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
27	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
28	22		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
29	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
30	22.5		51.5	45.9	40.5	35.6	30.8	26.2	21.5	16.9	12.2	7.6	2.1
Avg	22.467		51.533	45.933	40.540	35.633	30.833	26.233	21.533	16.927	12.223	7.600	2.100

No	Q	Manometer Head 60 cm dengan bubble											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	21		47.9	42.6	37.7	33.1	28.5	24.3	20.7	15.8	11.4	7.1	2
2	21		47.9	42.6	37.7	33.1	28.5	24.3	20.7	15.8	11.4	7.1	2
3	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
4	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
5	21.5		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
6	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
7	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
8	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
9	21		47.9	42.6	37.7	33.1	28.6	24.4	20.7	15.9	11.5	7.1	2
10	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
11	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
12	21		47.9	42.6	37.7	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
13	20.5		47.9	42.6	37.7	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
14	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
15	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
16	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
17	20.5		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
18	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
19	21		47.8	42.6	37.7	33.1	28.6	24.3	20.7	15.8	11.4	7.1	2
20	21		47.8	42.6	37.7	33.1	28.6	24.4	20.7	15.9	11.4	7.1	2
21	21.5		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
22	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
23	21		47.8	42.5	37.6	33	28.6	24.4	20.6	15.9	11.4	7.1	2
24	20.5		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
25	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
26	21		47.8	42.5	37.6	33.1	28.6	24.4	20.7	15.8	11.4	7.1	2
27	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
28	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
29	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
30	21		47.8	42.5	37.6	33	28.5	24.3	20.6	15.8	11.4	7.1	2
Avg	20.983		47.817	42.523	37.623	33.020	28.517	24.313	20.62	15.810	11.403	7.100	2.000

No	Q	Manometer Head 55 cm dengan bubble											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
2	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
3	19.5		44.1	39.2	34.6	30.4	26.3	22.4	18.5	14.7	10.6	6.6	1.9
4	20		44.1	39.2	34.6	30.4	26.3	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
5	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
6	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
7	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
8	19.5		44.1	39.2	34.6	30.4	26.3	22.4	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
9	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
10	19		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
11	19		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
12	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
13	19.5		44	39.2	34.6	30.4	26.3	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
14	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
15	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
16	20		44	39.1	34.6	30.4	26.3	22.4	18.5	14.7	10.5	6.6	1.9
17	19.5		44	39.1	34.6	30.4	26.3	22.4	18.5	14.7	10.5	6.6	1.9
18	19		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
19	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
20	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
21	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
22	19		44.1	39.2	34.6	30.4	26.3	22.4	18.5	14.7	10.6	6.6	1.9
23	19.5		44.1	39.2	34.6	30.4	26.3	22.4	18.5	14.7	10.6	6.6	1.9
24	19.5		44.1	39.2	34.6	30.4	26.3	22.4	18.5	14.7	10.6	6.6	1.9
25	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
26	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
27	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
28	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
29	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
30	19.5		44	39.1	34.5	30.3	26.2	22.3	18.4	14.6	10.5	6.6	1.9
Avg	19.467		44.020	39.123	34.530	30.330	26.230	22.323	18.420	14.620	10.513	6.600	1.900

No	Q	Manometer Head 50 cm dengan bubble											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	18		40.3	35.8	31.5	27.7	24	20.5	17	13.5	9.6	6	1.8
2	18		40.3	35.8	31.5	27.7	24	20.5	17	13.5	9.6	6	1.8
3	18		40.3	35.8	31.5	27.7	24	20.5	17	13.5	9.6	6	1.8
4	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
5	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
6	17.5		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
7	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
8	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
9	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
10	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
11	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
12	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
13	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
14	17.5		40.3	35.8	31.5	27.7	24	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
15	18		40.3	35.8	31.5	27.7	24	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
16	18		40.3	35.8	31.5	27.7	24	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
17	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
18	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
19	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
20	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
21	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
22	17.5		40.2	35.8	31.5	27.7	24	20.5	17	13.5	9.6	6	1.8
23	18		40.2	35.8	31.5	27.7	24	20.5	17	13.5	9.6	6	1.8
24	18		40.2	35.8	31.5	27.7	24	20.5	17	13.5	9.6	6	1.8
25	17.5		40.2	35.8	31.5	27.7	24	20.5	17	13.5	9.6	6	1.8
26	17.5		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
27	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
28	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
29	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
30	18		40.2	35.7	31.4	27.6	23.9	20.4	16.9	13.4	9.6	6	1.8
Avg	17.917		40.220	35.733	31.433	27.633	23.933	20.423	16.923	13.423	9.600	6.000	1.800

No	Q	Manometer Head 45 cm dengan bubble											
		1(5)	2(10)	3(15)	4(20)	5(25)	6(30)	7(35)	8(40)	9(45)	10(50)	11(55)	12(60)
1	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
2	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
3	16		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
4	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
5	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
6	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
7	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
8	16		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
9	16.5		36.5	32.3	28.5	25.1	21.7	18.5	15.4	12.2	8.8	5.5	1.7
10	16.5		36.5	32.3	28.5	25.1	21.7	18.5	15.4	12.2	8.8	5.5	1.7
11	16.5		36.5	32.3	28.5	25.1	21.7	18.5	15.4	12.2	8.8	5.5	1.7
12	16		36.5	32.3	28.5	25.1	21.7	18.5	15.4	12.2	8.8	5.5	1.7
13	16.5		36.5	32.3	28.5	25.1	21.7	18.5	15.4	12.2	8.8	5.5	1.7
14	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
15	16		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
16	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
17	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
18	16.5		36.5	32.3	28.5	25.1	21.7	18.5	15.4	12.1	8.7	5.5	1.7
19	16.5		36.5	32.3	28.5	25.1	21.7	18.5	15.4	12.1	8.7	5.5	1.7
20	16		36.5	32.3	28.5	25.1	21.7	18.5	15.4	12.1	8.7	5.5	1.7
21	16.5		36.5	32.3	28.5	25.1	21.7	18.5	15.4	12.1	8.7	5.5	1.7
22	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
23	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
24	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
25	16		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
26	16.5		36.4	32.2	28.4	25.1	21.7	18.5	15.4	12.2	8.8	5.5	1.7
27	16.5		36.4	32.2	28.4	25.1	21.7	18.5	15.4	12.2	8.8	5.5	1.7
28	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
29	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
30	16.5		36.4	32.2	28.4	25	21.6	18.4	15.3	12.1	8.7	5.5	1.7
Avg	16.400		36.430	32.230	28.430	25.037	21.637	18.437	15.337	12.123	8.723	5.500	1.700