



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**APLIKASI GELEMBUNG HIDROGEN UNTUK ANALISA  
DINAMIKA FLUIDA PADA BOLA, BOLA GOLF DAN  
*ORIFICE* DI ALIRAN FLUIDA**

**SKRIPSI**

**ICHIKO THAMBRYANA DWITA**

**0906604546**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**PROGRAM SARJANA EKSTENSI**

**DEPOK**

**JUNI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**APLIKASI GELEMBUNG HIDROGEN UNTUK ANALISA  
DINAMIKA FLUIDA PADA BOLA, BOLA GOLF DAN  
*ORIFICE* DI ALIRAN FLUIDA**

**SKRIPSI**

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

**ICHIKO THAMBRYANA DWITA**

**0906604546**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**PROGRAM SARJANA EKSTENSI**

**DEPOK**

**JUNI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Ichiko Thambryana Dwita**

**NPM : 0906604546**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 21 Juni 2012**

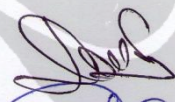
## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Ichiko Thambryana Dwita  
NPM : 0906604546  
Program Studi : Teknik Kimia.  
Judul Skripsi : Aplikasi Gelembung Hidrogen untuk Analisa Dinamika Fluida pada Bola, Bola Golf dan *Orifice* di Aliran Fluida

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Ir. Dijan Supramono, M.Sc. (  )

Penguji : Dr. Ir. Asep H Saputra, MEng (  )

Penguji : Dr. Ing. Donni Adinat, ST. Meng, Sc (  )

Penguji : Dr Eny Kusriani S.Si (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 03 Juli 2012



## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan makalah seminar ini. Seminar merupakan syarat kelulusan yang harus dilaksanakan oleh mahasiswa Program S1 Departemen Teknik Kimia. Judul seminar yang penulis pilih adalah **“Aplikasi Gelembung Hidrogen untuk Analisa Dinamika Fluida pada Bola, Bola Golf dan Orifis di Aliran Fluida”**

Pada saat penyusunan makalah seminar ini penulis mendapatkan bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis sampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Ir. Dijan Supramono, M.Sc selaku pembimbing I seminar.
2. Ir. Yuliusman, M. Eng selaku Koordinator Seminar Jurusan Teknik Kimia FTUI.
3. Ir. Setiadi, M. Eng selaku pembimbing akademik.
4. Prof . Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
5. Seluruh pihak Departemen Teknik Kimia dan Fakultas Teknik yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang diperlukan.
6. Orang tua dan keluarga besar saya yang telah memberikan bantuan dukungan material maupun spiritual.
7. Teman-teman Ekstensi Teknik Kimia 2009 yang telah membantu, baik secara material maupun spiritual.
8. Teman terdekat penulis, puji, wika, uni, mia, indi, ira, pebe, bongguk, indri yang telah memberi dukungan dalam senang maupun sedih.
9. Teman Depok *Photografi*, yang telah memberi pengetahuan lebih dalam tentang fotografi kepada penulis.

Penulis menyadari terdapat ketidaksempurnaan dalam skripsi ini. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun dari berbagai pihak demi kebaikan bersama.

Akhir kata penulis mengharapkan semoga makalah ini dapat memberikan manfaat kepada berbagai pihak yang berkepentingan.

Depok, 21 Juni 2012

Ichiko Thambryana Dwita



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

---

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

Nama : Ichiko Thambryana Dwita

NPM : 0906604546

Program Studi: Teknik Kimia.

Departemen : Teknik Kimia.

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:

“Aplikasi Gelembung Hidrogen untuk Analisa Dinamika Fluida pada Bola,  
Bola Golf dan Orifis di Aliran Fluida”.

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok.

Pada Tanggal : 21 Juni 2012.

Yang menyatakan



(Ichiko Thambryana Dwita)

## ABSTRAK

Nama : Ichiko Thambryana Dwita  
Program studi : Teknik Kimia  
Judul : Aplikasi Gelembung Hidrogen untuk Analisa Dinamika Fluida pada Bola, Bola Golf dan *Orifice* di Aliran Fluida

Analisa dinamika fluida dibutuhkan untuk memberikan gambaran yang lebih jelas dalam memvisualisasikan aliran pada mekanika fluida, akan tetapi metode ini tidak terdapat pada modul di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia sehingga dibutuhkan suatu metode untuk melengkapinya. Alat gelembung hidrogen dirancang dan diuji agar dapat memvisualisasikan aliran, menentukan profil kecepatan yang terbentuk di sekitar bola dan bola golf serta mengamati pengaruh penambahan *orifice* dalam aliran fluida terhadap perubahan tekanan dan kecepatan yang terjadi. Proses visualisasi aliran dilakukan dengan cara mengambil gambar saat pembentukan aliran hidrogen terjadi. Parameter yang divariasikan adalah bilangan Reynold yang didasarkan pada kecepatan fluida di hulu serta bergantung pada struktur yang dipakai (bentuk bola, bola golf atau radius hidraulik pipa persegi empat di mana terdapat *orifice*). Kenaikan kecepatan yang sebanding dengan bilangan Reynold setelah melewati bagian hulu menuju hilir terjadi pada semua variabel yang diuji namun karena pengaruh getaran yang timbul pada *water tunnel* membuat visualisasi kurang terlihat dari pembentukan gelembung hidrogen terhadap aliran fluida. Bilangan Reynold yang dihasilkan menggunakan alat ini pada rentang 5000-18000. Aliran yang paling laminar ditunjukkan dengan nilai intensitas turbulen yang paling rendah, yaitu 10,59 dengan kecepatan aliran rata-rata 28,24 mm/s. Rata-rata *coefficient discharge* sebesar 0,4660 sepanjang Re 12-18 pada aliran yang dilewati *orifice*

Kata kunci: gelembung hidrogen, visualisasi aliran, elektrolisis, *orifice*, bilangan Reynold.

## ABSTRACT

Name : Ichiko Thambryana Dwita  
Major : Chemical Engineering  
Title : Application of Hydrogen Bubble for Fluid Dynamics on Ball,  
Golf Ball and Orifice in Fluid Flow

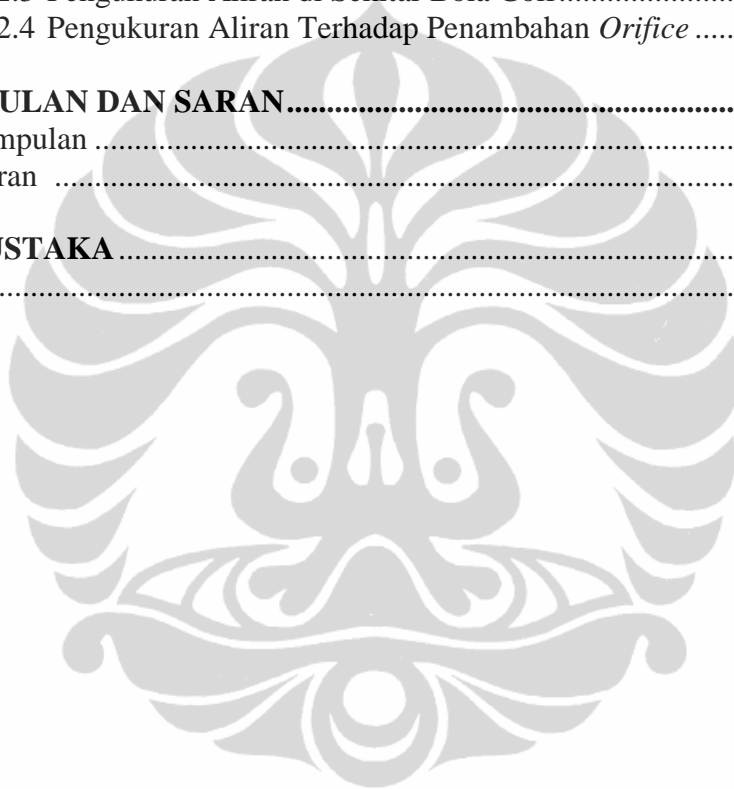
Analysis of fluid dynamics is require to provide a clearer picture in visualizing the flow on fluid mechanics, but the method has not been include in laboratory teaching module at Department of Chemical Engineering University Indonesia. Hydrogen bubble device is designed and tested in order to visualize the flow, determine the velocity profile is formed around the sphere, golf ball and observe the effect of adding orifice in fluid flow against the pressure and velocity changes that occur. Flow visualization is process by taking pictures during the formation of hydrogen flow. The parameters was varied the Reynolds number based on fluid velocity in the upstream as well as dependent on the structure used (a ball, golf ball or hydraulic radius of pipe where there is a rectangular orifice). The increase in speed is proportional to the Reynolds number after passing through the upstream side toward the downstream in all variables tested but due to the influence of vibrations that occur in a water tunnel to visualize the less visible than the formation of hydrogen bubbles on the fluid flow. The experiment obtain 5000-18000 Reynold number and most laminar flow is indicated by the value of the lowest turbulence intencity, which is 10.5969 with an average flow rate of 28,24 mm/s. Coefficient discharge overall on the flow passing the orifice were 0,4660 in 12-18 Reynold number

Key words: hydrogen bubbles, flow visualization, electrolysis, orifice, Reynolds number.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vi
ABSTRAK .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Aliran Fluida Cair .....	6
2.1.1 Karakteristik Aliran .....	7
2.1.2 Aliran yang Melewati Bola .....	8
2.1.3 Lapisan Batas ( <i>Boundary Layer</i> ) .....	10
2.2 Visualisasi Aliran .....	11
2.3 Gelembung Hidrogen .....	13
2.3.1 Pengukuran Laju Alir Gelembung Hidrogen .....	16
2.4 Elektrolisis Air .....	16
2.5 <i>Orifice</i> .....	17
2.6 Penelitian Yang Berkaitan .....	20
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>21</b>
3.1 Pendahuluan .....	21
3.2 Diagram Alir Penelitian .....	21
3.3 Skema Rancangan Alat .....	23
3.4 Alat dan Bahan Penelitian .....	24
3.5 Prosedur Penelitian .....	25
3.5.1 Persiapan Awal .....	25
3.5.2 Proses Pembuatan dan Uji Operasi .....	26
3.5.3 Pengoperasian Rangkaian Alat .....	26
3.5.4 Kalibrasi Jarak Aliran .....	26
3.5.5 Pengukuran Aliran yang Melewati Bola .....	27
3.5.6 Pengukuran Aliran yang Melewati Bola Golf .....	27
3.5.7 Pengukuran Kuantitatif Orifis .....	28
3.6 Pengolahan dan Analisa Data .....	28
3.6.1 Analisa Kualitatif .....	29
3.6.2 Analisa Kuantitatif .....	29
3.6.2.1 Kecepatan Alir Fluida .....	29

3.6.2.2 Kecepatan Alir Orifis.....	29
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>32</b>
4.1 Perancangan Alat .....	32
4.1.1 Terowongan Air ( <i>water tunnel</i> / tangki air).....	32
4.1.2 Alat Elektrolisis .....	33
4.1.3 Alat Listrik.....	34
4.1.4 Fluida .....	34
4.2 Pengujian Alat.....	34
4.2.1 Pengukuran Laju Aliran Tangki .....	35
4.2.2 Pengukuran Aliran di Sekitar Bola .....	36
4.2.3 Pengukuran Aliran di Sekitar Bola Golf.....	41
4.2.4 Pengukuran Aliran Terhadap Penambahan <i>Orifice</i> .....	48
<b>BAB 5 SIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>52</b>
5.1 Simpulan .....	52
5.2 Saran .....	52
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>53</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>55</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Aliran Di Sekitar Bola.....	8
Gambar 2.2 Gambar Lapisan Batas Di sekitar Aliran pada Plat.....	9
Gambar 2.3 Lapisan Batas Disekitar Bola pada Aliran Laminer.....	10
Gambar 2.4 Elektrolisis Gelembung Hidrogen dalam Air.....	13
Gambar 2.5 Sistem Visualisasi Aliran Gelembung Hidrogen .....	13
Gambar 2.6 Pembentukan Gelembung Hidrogen .....	14
Gambar 2.7 Diagram Sistem Elektrolisis Air .....	16
Gambar 2.8 Diagram <i>Orificemetre</i> .....	18
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	21
Gambar 3.2 Skema Alat Gelembung Hidrogen .....	22
Gambar 3.3 Skema Alat Pola Aliran di Sekitar Bola.....	22
Gambar 3.4 Alat <i>Orifice</i> .....	23
Gambar 3.5 Skema <i>Orifice</i> .....	29
Gambar 3.5 Gambar Menghitung $C_d$ pada <i>Orifice</i> .....	29
Gambar 4.1 Terowongan Air/ <i>water tunnel</i> .....	32
Gambar 4.2 Getaran dalam Tunnel .....	33
Gambar 4.3 Rangkaian Alat Listrik .....	34
Gambar 4.4 Pengukuran Kecepatan Aliran Fluida .....	36
Gambar 4.5 Jejak Aliran di Sekitar Bola .....	37
Gambar 4.6 Perbedaan Kecepatan pada Aliran di Sekitar Bola.....	38
Gambar 4.7 Pengaruh Bilangan Reynolds di Kecepatan Sekitar Bola .....	39
Gambar 4.8 Titik Perhitungan Kecepatan Aliran pada Bola dan Bola Golf .....	39
Gambar 4.9 Pengukuran 3 Titik Kecepatan pada Aliran di Sekitar Bola .....	40
Gambar 4.10 Titik Pengukuran Lapisan Batas .....	40
Gambar 4.11 Pengukuran Lapisan Batas di Sekitar Bola .....	41
Gambar 4.12 Aliran di Sekitar Bola Golf .....	42
Gambar 4.13 Jejak Aliran di Sekitar Bola Golf .....	43
Gambar 4.14 Perbedaan Kecepatan pada Aliran di Sekitar Bola Golf .....	44
Gambar 4.15 Pengaruh Bilangan Reynolds di Kecepatan Sekitar Bola Golf ..	45
Gambar 4.16 Pengukuran 3 Titik Kecepatan pada Aliran Sekitar Bola Golf ..	46
Gambar 4.17 Pengukuran Lapisan Batas di Sekitar Bola Golf .....	46
Gambar 4.18 Perbedaan Jejak Aliran di Sekeliling Bola dan Bola Golf .....	47
Gambar 4.19 Perbandingan Lapisan Batas pada Bola dan Bola Golf.....	48
Gambar 4.20 Perbedaan Kecepatan pada Variaso Pengujian di <i>Orifice</i> .....	49
Gambar 4.21 Perbedaan Bilangan Reynolds terhadap Kecepatan di <i>Orifice</i> ...	49
Gambar 4.22 Pengaruh nilai Reynold Terhadap <i>Discharge Coefficient</i> .....	50
Gambar 4.23 Aliran dan Jejaknya di Dalam <i>Orifice</i> .....	51



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Fluida merupakan zat yang dapat mengalami perubahan bentuk secara terus menerus bila terkena tegangan geser. Fluida dapat mengalir bila mempunyai partikel yang mudah bergerak dan berubah bentuk tanpa terjadi pemisahan massa. Mudah-mudahan fluida berubah bentuk dikarenakan gaya gesek terlibat didalamnya. Dinamika fluida adalah subdisiplin dari mekanika fluida yang mempelajari fluida bergerak, terutama cairan dan gas. Penyelesaian dari masalah dinamika fluida biasanya melibatkan perhitungan banyak sifat dari fluida, seperti kecepatan, tekanan, kepadatan, dan suhu sebagai fungsi ruang dan waktu.

Selama berabad-abad para peneliti aliran fluida telah mempelajari aliran fluida dalam berbagai cara dan sampai hari ini aliran fluida masih merupakan bidang penting. Aliran gas dipelajari untuk pengembangan mobil, pesawat dan juga untuk desain mesin seperti turbin dan mesin pembakaran. Penelitian aliran cairan diperlukan untuk aplikasi angkatan laut, seperti desain kapal, serta secara luas dipergunakan dalam proyek-proyek teknik sipil seperti desain pelabuhan dan perlindungan pesisir. Dalam ilmu kimia, pengetahuan tentang aliran fluida dalam tangki reaktor perlu dipelajari begitu pula dalam kedokteran yang mempelajari aliran di dalam pembuluh darah.

Mekanika fluida secara jelas menerangkan dan mengkaji perilaku dari zat cair dan gas dalam keadaan diam ataupun bergerak (Munson, dkk). Dalam mengkaji perilaku ini dibutuhkan sebuah sistem yang dapat menggambarkan karakteristik secara kualitatif dan kuantitatif dari fluida tersebut. Aspek kualitatif berfungsi untuk mengidentifikasi sifat dasar atau karakteristik, sedangkan aspek kuantitatif lebih mendalam memberikan ukuran numerik dari karakteristik fluida. Penggunaan kedua aspek ini dapat diimplementasikan ke dalam praktikum yang dapat dilakukan di laboratorium.

Pada faktanya bahwa hampir semua modul praktikum yang berkaitan dengan aliran fluida hanya mempelajari aspek makroskopik pada aliran fluida, seperti

modul Aliran Fluida dan *Compressible Flow*, sehingga dibutuhkan suatu metode untuk memberikan gambaran yang lebih jelas dalam memvisualisasikan aliran pada akhirnya dapat menjelaskan aspek kualitatif dan kuantitatif dari aliran tersebut secara mikroskopik.

Keuntungan unik dari teknik visualisasi aliran ini adalah bahwa sifat-sifat tertentu dari aliran menjadi langsung dapat diakses dengan persepsi visual dan proses fisik menjadi lebih jelas. Visualisasi pada aliran fluida cair akan lebih mudah dibuat dan diamati dibandingkan visualisasi pada aliran fluida padat karena lebih mudahnya fluida cair terdeformasi (Young, dkk). Kebanyakan cairan adalah media transparan dan pergerakan mereka tetap tak terlihat oleh mata manusia selama pengamatan berlangsung. Namun, gerakan cairan tersebut dapat ditangkap dengan memanfaatkan teknik di mana aliran dibuat. Metode visualisasi aliran secara umum dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok (Meenakshisundaram, 1980), yaitu :

1. Penambahan bahan asing pada fluida yang mengalir
2. Metode optik untuk aliran kompresibel
3. Penambahan kontaminan pada pembentukan energi panas atau listrik.

Salah satu metode yang mudah dan dapat diaplikasikan di laboratorium dengan skala kecil adalah penambahan bahan asing pada fluida yang mengalir termasuk di dalam metode ini adalah metode gelembung hidrogen. Metode ini dilakukan dalam aliran yang mengalir secara terus menerus yang didasari pada kemampuan elektrolisis dari air (Milazzo, 1963). Elektrolisis dari air dengan bantuan anoda dan katoda air akan menghasilkan gelembung hidrogen. Gelembung hidrogen yang dihasilkan ini kemudian digunakan sebagai partikel pelacak dalam memvisualisasikan aliran. Kelebihan metode ini antara lain (Meenakshisundaram, 1980) :

1. Sebagai bahan pelacak, gelembung hidrogen tidak pernah mencemari air dan sangat cocok untuk sistem resirkulasi.
2. Injeksi gelembung dengan presisi tinggi mengarah pada evaluasi yang lebih baik dari data kuantitatif.

3. Perhitungan distribusi kecepatan melalui seluruh penampang aliran pada satu waktu menjadi bisa dilakukan.
4. Teknik gelembung hidrogen dapat digunakan tanpa membutuhkan peralatan yang rumit .

Dari sekian banyak keuntungan dari metode ini, salah satu kekurangannya adalah bila penggunaan kawat pada elektrolisa yang terlalu besar bisa mengakibatkan gangguan pada aliran yang terbentuk, sehingga pengamatannya akan sulit dilakukan. Kelemahan yang lain adalah bahan kawat bisa terkorosi jika kurang inert karena terlalu lama bersinggungan dengan air yang mengandung elektrolit.

Pada penelitian sebelumnya dilakukan perancangan alat visualisasi gelembung hidrogen dengan 2 cara, yaitu alat visualisasi biasa dan alat visualisasi dengan tambahan *pulse time*. (Budwig dkk, 1988). Pada alat visualisasi biasa ini hanya diperoleh visualisasi aliran yang sama tanpa bisa dihitung kecepatan alirannya. Sedangkan alat yang kedua dengan penambahan sensor *pulse time* diperoleh alat yang dapat memvisualisasikan aliran dengan baik serta dapat diukur kecepatan alirannya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang di atas yang menjadi permasalahan adalah

1. Diperlukan modul pada laboratorium Proses dan Operasi Teknik di Departemen Teknik Kimia UI untuk memberikan pemahaman terhadap aspek mikroskopik aliran fluida, yang mempelajari fenomena dinamika yang terjadi pada badan fluida.
2. Dibutuhkan alat gelembung hidrogen yang sesuai serta dapat memvisualisasikan aliran yang diinginkan dengan biaya yang terjangkau.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk merancang alat gelembung hidrogen agar dapat memvisualisasikan aliran.

2. Untuk menentukan profil kecepatan yang terbentuk di sekitar benda padat (bola dan bola golf).
3. Untuk mengamati pengaruh penambahan orifis dalam aliran terhadap perubahan tekanan dan kecepatan yang terjadi serta faktor friksi yang terjadi.

#### 1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Metode visualisasi aliran yang digunakan adalah metode gelembung hidrogen, dengan pengujian secara kuantitatif dan kualitatif pada aliran fluida di bagian hulu.
2. Untuk penentuan profil kecepatan pada bola (bola biasa dan bola golf) yang diamati adalah pola aliran serta kecepatan rata-rata di sekitar benda dengan mengasumsikan *friction factor* dari bola dan bola golf dianggap sama.
3. Untuk penentuan kuantitatif pada orifis yang ditambahkan pada aliran yang diamati adalah kecepatan rata-rata pada bagian hulu orifis, perbedaan tekanan antara hulu dan hilir orifis serta faktor friksi.
4. Parameter yang divariasikan adalah bilangan Reynolds yang didasarkan pada kecepatan fluida di hulu serta bergantung pada struktur yang dipakai (bentuk bola, bola golf atau radius hidraulik pipa persegi empat di mana terdapat orifis).
5. Kamera yang digunakan adalah kamera DSLR dengan kecepatan video 25fps.

#### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

##### **BAB 1. PENDAHULUAN**

Berisikan latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

##### **BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA**

Berisikan studi literatur secara umum dan khusus mengenai hal-hal yang berkaitan dalam penelitian.

##### **BAB 3. METODE PENELITIAN**

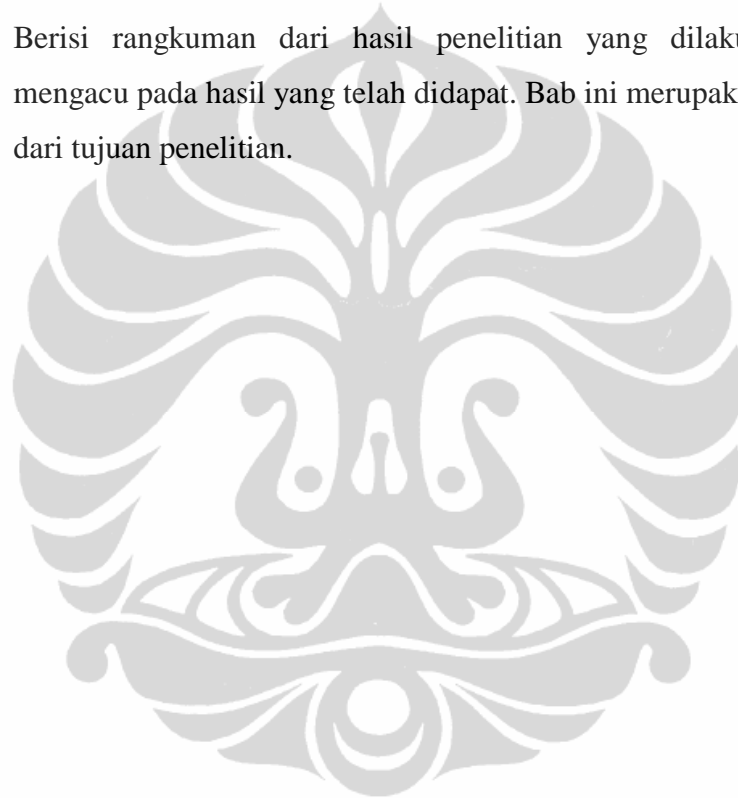
Berisikan diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, dan prosedur penelitian.

#### **BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi hasil penelitian yang telah dilakukan berdasarkan prosedur yang tertera di bab sebelumnya. Dalam bab ini juga terdapat analisa dan pembahasan dari hasil penelitian yang telah diperoleh.

#### **BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN**

Berisi rangkuman dari hasil penelitian yang dilakukan yang mengacu pada hasil yang telah didapat. Bab ini merupakan jawaban dari tujuan penelitian.



## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Fluida Cair

Fluida memegang peranan penting dalam setiap aspek kehidupan. Fluida bersirkulasi dalam tubuh kita serta mengatur keadaan cuaca disekitar kita. Fluida adalah zat yang dapat mengalir, kita gunakan istilah fluida untuk cairan dan gas (Young, 2002). Suatu fluida jika diuraikan mempunyai volume tertentu tetapi bukan bentuk tertentu. Fluida mengalir untuk menyesuaikan pada bentuk wadah dia tempatkan. Fluida mempunyai volume tertentu yang dipertahankan meskipun berubah bentuk. Molekul-molekul suatu fluida hampir sedekat dalam padatan tetap merekat, tapi tidak mempunyai posisi tetap (Keenan dan Kleinfelter, 1992)

Zat cair (yang merupakan suatu jenis fluida) umumnya mempunyai bentuk yang ditetapkan oleh wadahnya masing-masing (di mana wadah tersebut biasanya terbuat dari zat padat) dan bila dilihat dari struktur molekulnya, fluida memiliki jarak antarmolekul yang lebih besar serta gaya kohesi antar-molekul yang lebih rapat dibandingkan zat padat sehingga fluida mudah berubah bentuk tergantung dari wadah atau tempatnya (Mulyadi, 2009)

### 2.2 Aliran Fluida Cair

Osborne Reynolds (1842-1912), ilmuwan dan ahli matematika Inggris pertama kali menambahkan pewarna cair ke dalam aliran yang bergerak dan menemukan bahwa pada laju alir yang rendah, zat warna akan membentuk garis-garis yang halus dan bergerak kearah axial. Aliran ini kemudian dikenal sebagai aliran laminar (Noel, 1932). Dalam aliran laminar ini viskositas berfungsi untuk meredam kecenderungan terjadinya gerakan relatif antara lapisan, sehingga aliran laminar dapat memenuhi hukum viskositas Newton, yaitu :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

Nilai  $\tau$  merupakan tegangan geser,  $\mu$  adalah viskositas dan  $du/dy$  merupakan gradien kecepatan terhadap sumbu  $y$ . Aliran laminar ini lebih mudah di amati

dibandingkan aliran turbulen, karena memudahkan kita dalam melihat arah dan bentuk alirannya.

Pada laju alir yang lebih tinggi diperoleh pusaran air, lekukan lekukan, dan ketidaksamaan aliran serta mengakibatkan aliran menjadi fluktuasi (Geankoplis,2003). Pergerakan dari partikel-partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran partikel antar lapisan, yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain dalam skala yang besar. Dalam keadaan aliran turbulen maka turbulensi yang terjadi membangkitkan tegangan geser yang merata diseluruh fluida.

Jenis aliran yang terjadi pada fluida merupakan masalah yang sangat penting dalam dinamika fluida (Geankoplis,2003), karena aliran fluida perlu ditentukan besarnya, atau arah vektor kecepatan aliran pada suatu titik ke titik yang lain sehingga memperoleh penjelasan tentang medan fluida, kondisi rata-rata pada daerah aliran atau volume sehingga dapat diukur dan dihitung menggunakan instrument yang sesuai.

### 2.1.1 Karakteristik Aliran

Sebuah benda yang terendam di dalam fluida yang bergerak mengalami gaya-gaya resultan akibat interaksi antara benda dengan fluida disekelilingnya. Pada pesawat terbang yang terbang melewati udara yang diam, fluida yang berada jauh dari benda berada dalam keadaan diam dan benda tersebut bergerak melewati fluida dengan suatu kecepatan. Berbeda lagi kondisinya dengan angin yang bertiup melewati bangunan.

Struktur dari aliran dan tingkat kemudahan di mana aliran dapat digambar dan dianalisa sering tergantung pada sifat alami dari benda didalam aliran. Dua kategori umum dari benda berdasarkan dimensinya adalah sebagai berikut (Noel, 1932) :

- a. Benda dua dimensi (panjang tak terhingga dengan bentuk dan ukuran penampang yang konstan)
- b. Benda tiga dimensi

Klasifikasi lain dari bentuk benda dapat tergantung pada apakah benda tersebut dibuat mulus mengikuti arus (*streamlined*) atau tumpul. Karakteristik aliran sangat tergantung pada seberapa banyak bagian yang dibuat mulus tersebut.

Secara umum, benda-benda *streamline* (*airfoil*, mobil balap dan lain-lain) memiliki pengaruh kecil pada fluida yang mengelilinginya, dibandingkan dengan pengaruh yang dimiliki benda tumpul (contohnya parasut dan gedung-gedung) pada fluida. Biasanya, akan lebih mudah untuk mendorong sebuah benda *streamline* melewati suatu fluida daripada mendorong sebuah benda tumpul yang ukurannya sama agar bergerak dengan kecepatan yang sama. (Munson, 2003). Salah contoh yang dijelaskan berikut ini merupakan aliran yang melalui benda padat atau bola.

### 2.1.2 Aliran yang Melewati Bola

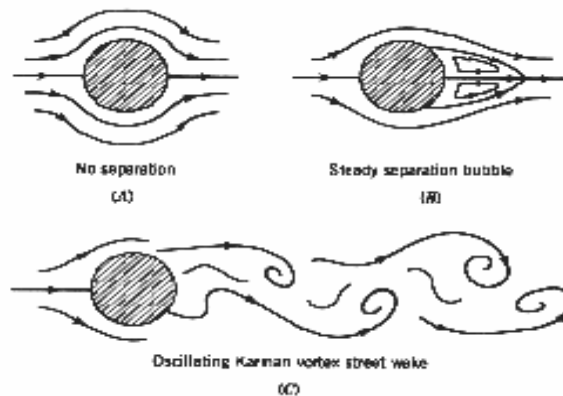
Bila suatu medan aliran fluida cair terhalang oleh sebuah benda maka pola aliran fluida tersebut akan terganggu dari kondisi stasionernya lalu akan mencari kondisi kesetimbangan barunya. Misalkan sebuah bola yang berada dalam aliran tunak, maka akan terjadilah suatu pola aliran tertentu di sekeliling permukaan bola tersebut. Pada aliran fluida ini terdapat titik stagnasi di depan benda tersebut yang berkecepatan nol. Titik ini memiliki tekanan yang relatif lebih besar dan membagi fluida menjadi dua bagian. Sebagian akan mengalir melewati bagian atas dan sebagian lagi melewati bagian bawah benda tersebut.

Ternyata, pola aliran ini salah satunya bergantung pada suatu parameter yang disebut Bilangan Reynolds (*Reynolds number*). Bilangan Reynolds menyatakan perbandingan dari efek inersia terhadap efek viskos, dapat didefinisikan dengan:

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\mu} \quad (2.2)$$

$\rho$  adalah densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ ),  $d$  adalah diameter bola (m),  $v$  adalah kecepatan aliran fluida (m/s) dan  $\mu$  menyatakan viskositas kinematis fluida ( $\text{Ns/m}^2$ ). Berdasarkan banyak percobaan visualisasi aliran yang telah dilakukan, nilai Reynolds inilah yang akan menentukan bagaimana bentuk pola aliran yang akan terjadi. Sebagai kaidah umum untuk aliran dengan  $Re > 100$  didominasi oleh efek inersia, sedangkan aliran-aliran dengan  $Re < 1$  didominasi oleh efek viskos.





**Gambar 2.1** Aliran di sekitar bola (Kothandaraman, 1999)

Beberapa di antaranya misalnya, bila nilai  $Re < 5$ , maka yang terjadi adalah pola aliran yang mulus (Gambar 2.1.a), tanpa terjadi pusaran-pusaran lokal fluida (*vortex*) dan tidak terjadi pula pemisahan aliran pada saat aliran sudah melewati bola (*creeping flow*). Selanjutnya bila kecepatan aliran dinaikkan, yang berarti nilai  $Re$  makin bertambah besar, misalnya untuk rentang  $5 < Re < 40$ , maka akan mulai terbentuk vortek. Dalam rentang nilai  $Re$  ini akan terbentuk sepasang vortek simetris di belakang bola yang berputar stasioner tanpa terpecah selama rentang nilai  $Re$  tidak berubah (Gambar 2.1.b).

Namun ketika nilai  $Re$  ini terus dinaikkan, maka medan aliran makin menjadi tidak stabil, yang mana lambat-laun formasi vortek yang terbentuk mulai berantakan dengan pola-pola yang tertentu. Maka pada saat itulah akan timbul suatu fenomena yang dinamakan Pelepasan Vortek (*Vortex Shedding*), yang mulai terjadi pada saat nilai  $Re > 40$  (Gambar 2.1.c). Fenomena ini adalah terlepasnya vortek secara bolak-balik di sisi-sisi bola dengan pola dan frekuensi tertentu. Pola pelepasan vortek ini pun secara lebih detil akan memiliki bentuk tertentu sesuai dengan rentang angka Reynoldsnya.

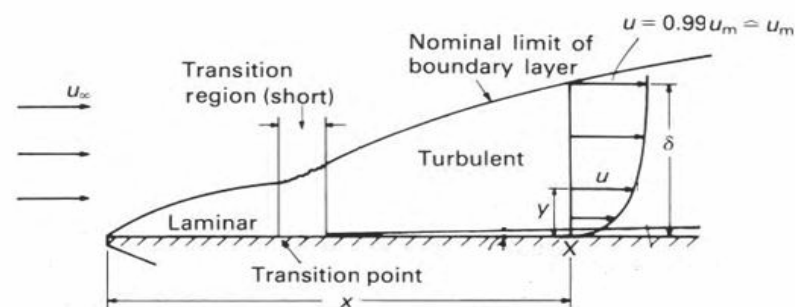
Fenomena pelepasan vortek ini memang biasa terjadi pada jenis aliran fluida yang memiliki nilai angka  $Re > 40$ . Pada nilai  $Re$  ini, lapisan batas (*boundary layer*) di sekeliling permukaan bola akan memisah akibat adanya gradien tekanan balik dari geometri yang divergen dari aliran di sekitar sisi belakang bola. Akibatnya terbentuklah suatu lapisan geser (*shear layer*).

### 2.1.3 Lapisan Batas (*Boundary Layer*)

Lapisan batas (*boundary layer*) ditemukan oleh Ludwig Prandtl (1875-1953). Ia menjelaskan bahwa lapisan batas merupakan sebuah daerah tipis di permukaan suatu benda di mana efek-efek viskos sangat penting dan di luarnya fluida berperilaku seakan-akan inviscid.

Pada aliran yang melewati pelat datar, diperoleh lapisan batas yang terbentuk karena pemisahan aliran yang terjadi ketika arah kecepatan aliran di permukaan berbanding terbalik dengan arah kecepatan arus bebas (Masey, 2001). Berdasarkan Gambar 2.2, dapat dijelaskan sebagai berikut, fluida awal memiliki kecepatan ( $u_\infty$ ) ke arah plat akan terhambat di sekitar permukaan, dan lapisan batas mulai terbentuk pada sisi terluar dari plat. Semakin lama cairan yang melewati plat akan melambat dan ketebalan lapisan akan meningkat.

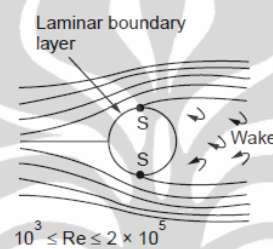
Ketebalan lapisan diukur pada jarak dari permukaan di mana kecepatan mencapai 99% dari kecepatan dari aliran utama. Aliran dalam bagian pertama dari lapisan batas (dekat sisi terluar plat) sepenuhnya laminar. Dengan ketebalan yang meningkat lapisan laminar menjadi tidak stabil, dan gerakan di dalamnya menjadi terganggu. Penyimpangan dari aliran semakin berkembang menjadi turbulensi, dan ketebalan lapisan meningkat lebih cepat. Daerah perubahan yang berlangsung dari aliran laminar menjadi aliran turbulen dikenal sebagai daerah transisi. Bagian hilir wilayah transisi lapisan batas hampir seluruhnya turbulen, dan kenaikan ketebalannya akan terjadi lebih besar. Pada setiap  $x$  jarak dari tepi terkemuka dari pelat lapisan batas  $\delta$  ketebalan sangat kecil bila dibandingkan dengan  $x$ .



**Gambar 2.2** Lapisan batas disekitar aliran pada plat (Masey, 2001)

Pada aliran yang melewati bola, ada perubahan di daerah aliran karena obstruksi dan karenanya dapat menghasilkan gradien tekanan yang berbeda dari aliran yang melewati pelat datar. Peningkatan di daerah sepanjang aliran

menyebabkan kenaikan tekanan karena perbedaan daerah aliran. Dalam kasus ini baik tekanan dan *drag friction* berkontribusi terhadap total drag. Sedangkan pemisahan dan pembentukan aliran di bagian belakang berkontribusi terhadap tekanan drag. Pola aliran dan variasi koefisien drag ditunjukkan pada Gambar 2.3. Koefisien drag hampir konstan dari  $Re = 10^3$  sampai  $5 \times 10^5$ . Lapisan batas di bagian depan pada rentang bilangan Reynolds tersebut diperkirakan masih dalam aliran Laminar dalam kisaran ini. Pemisahan ini ditemukan terjadi pada sekitar bagian tengah dan olakan (*wake*) terbentuk karena pengaruh tekanan yang lebih rendah pada bagian belakang. (Kothandaraman, 1999)



**Gambar 2.3** Lapisan batas disekitar bola pada aliran laminar (Kothandaraman, 1999)

## 2.2 Visualisasi Aliran

Teknik visualisasi untuk penentuan karakteristik aliran fluida telah menjadi sangat beragam sejak percobaan transisi Reynolds pada tahun 1880. Visualisasi aliran bertujuan untuk menggambarkan keadaan sebenarnya dari fenomena fisik yang terjadi di dalam aliran fluida. Teknik visualisasi aliran telah turut serta dalam pengembangan pemahaman fisika terhadap fenomena aliran yang rumit (Kline, 1978) dan telah menjadi elemen tambahan pada penelitian eksperimental terhadap mekanika fluida. Metode yang menunjukkan pola aliran mungkin secara luas diklasifikasikan menjadi dua kelompok (Massey, 1966), yaitu

- a. Metode statis, yaitu metode yang diterapkan pada permukaan batas, Teknik ini menggambarkan pola gradien kecepatan dan tegangan geser pada batas padat sehingga dapat digunakan untuk mendeteksi batas pemisahan lapisan dan transisi. Metode yang melibatkan pengendapan padatan atau cairan pada permukaan batas masuk ke dalam kategori ini, begitu juga dengan metode penguapan yang sesuai atau sublimasi dari lapisan di udara.

- b. Metode kinetik. yaitu metode yang diterapkan dalam cairan itu sendiri, baik dalam aliran bebas atau di lapisan batas. Metode dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok yaitu penambahan bahan asing pada fluida yang mengalir, metode optik untuk aliran kompresibel serta penambahan kontaminan pada pembentukan energi panas atau listrik (Meenakshisundaram, 1980). Kelompok yang pertama atau penambahan bahan asing pada fluida yang mengalir dianggap lebih mudah dibuat dan dianalisa. Salah satunya adalah penambahan zat pewarna pada fluida mengalir masih merupakan metode yang paling populer (Werle, 1960). Akan tetapi penambahan zat pewarna memberikan kekurangan, pada aliran fluida tertutup zat pewarna tersirkulasi dan mengkontaminasi air yang dapat mengakibatkan kesulitan dalam pengamatan aliran yang terbentuk. Kelemahan ini menjadi pemacu bagi Birkhoff dan Caywood (1949) dengan mengamati distribusi kecepatan pada air dengan menggunakan kenaikan pembentukan gelembung dalam air.

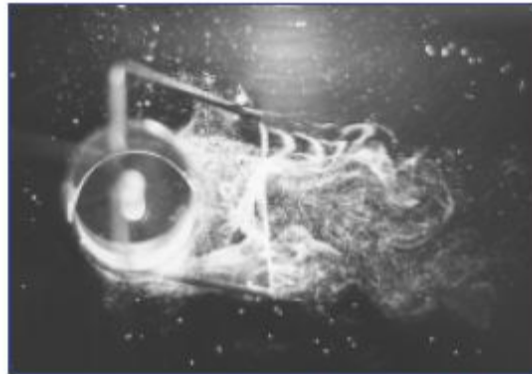
Visualisasi aliran yang dihasilkan dari interaksi antara cahaya dan materi telah berguna untuk eksperimen desain dan untuk penafsiran yang tepat dari pengukuran konvensional. Kemajuan pesat saat ini dalam teknologi ilmiah telah memungkinkan visualisasi aliran untuk digunakan sebagai alat pengukuran langsung pada karakteristik aliran melalui penerapan teknik pengolahan gambar digital

Penggunaan pengolahan gambar digital merupakan penekanan saat mendeteksi dan mengklasifikasikan struktur berskala besar dalam arus. Menggunakan teknik pengolahan foto digital, informasi dari medan aliran yang diam pada aliran visualisasi gambar dapat diukur, sementara teknik pengukuran konvensional seperti panas-kawat anemometri dan pengukuran LDV (*Laser Doppler Anemometry*) hanya memungkinkan teknik pengukuran satu titik (Kim, 1991).

### 2.3 Gelembung hidrogen

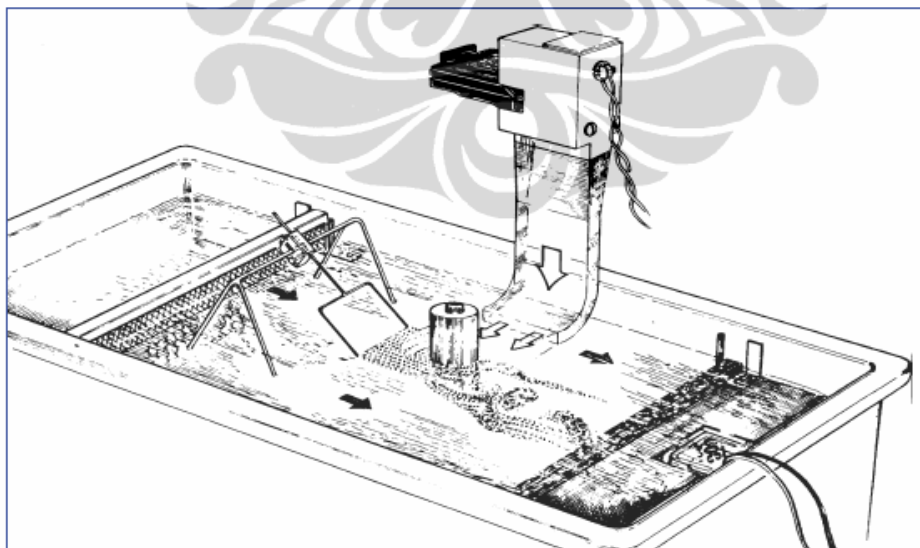
Gelembung hidrogen ditemukan secara tidak sengaja oleh FX Wortmann saat menyuntikkan senyawa Telurium ke dalam air dengan menggunakan pulsa ke dalam kawat (Davis dan Fox, 1967). EW Geller memperbaiki teknik Wortmann dalam tesis masternya tahun 1954 dengan mengamati evolusi gas, dan sampai saat ia paling diakui sebagai pencetus teknik gelembung hidrogen. Pengembangan lebih lanjut dari teknik ini dilakukan oleh Clutter DW dan A.M. Smith di Douglas Aircraft Company. Clutter dan Smith (1961) memperkenalkan dunia ilmiah dengan fleksibilitas metode ini. Mereka menunjukkan dalam aliran aerodinamis dan sistem aliran internal, dan direkomendasikan penggunaannya untuk mempelajari aliran di sungai (Clutter dan Smith, 1961).

Teknik penggunaan gelembung dengan elektrolisis air sebagai alat visualisasi aliran menggunakan kawat halus yang dipasang tegak lurus terhadap dinding sebagai katoda dalam rangkaian DC dan bahan lain seperti kuningan, sebagai anoda. Produksi hidrogen akan terjadi pada kawat ketika mulai dialiri pulsa listrik, yang dapat dilihat pada Gambar 2.4. (Clutter dan Smith 1961). Begitu tegangan ditambahkan pada elektroda, gelembung yang dihasilkan akan cenderung naik secara vertikal di bawah pengaruh gaya apung. Awalnya pada tegangan yang rendah, gelembung tidak dapat dibedakan karena gelembung yang dihasilkan belum sempurna. Dengan peningkatan tegangan lebih lanjut membuat gelembung yang sempurna dan meningkatkan diameter gelembung serta meningkatkan kecepatan pembentukan gelembung. Selain hasil kuantitatif seperti profil waktu, varian kecepatan arus air, teknik gelembung secara kualitatif berguna untuk mengamati aliran yang mengalir secara keseluruhan. Proses ini secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.4** Elektrolisis gelembung hidrogen dalam air (Clutter dan Smith 1961)

Analisis kuantitatif dari pembentukan gelembung hidrogen diperkenalkan oleh Schraub et al. (1965) yang menggunakan teknik untuk mengukur medan kecepatan waktu tergantung pada air mengalir di kecepatan rendah. Davis dan Fox (1967) menggunakan kabel hidrogen gelembung dalam tabung, Kim et al. (1971) menerapkan dalam lapisan batas turbulen, dan Lu dan Smith (1985) mengembangkan teknik untuk pengolahan gambar digital secara otomatis dalam menyelidiki statistik turbulensi dan karakteristik ledakan. Selain hasil kuantitatif seperti profil waktu-varian kecepatan arus air, teknik gelembung secara kualitatif berguna untuk mengamati aliran yang mengalir secara keseluruhan.



**Gambar 2.5** Sistem visualisasi aliran gelembung hidrogen (George M, 1966)

Teknik dalam pengukuran dari daerah kecepatan pada gelembung hidrogen dapat dilakukan secara cepat dan praktis karena telah dikembangkan dengan bantuan kemajuan alat elektronik dan teknologi optik. Gambar yang dihasilkan diproses

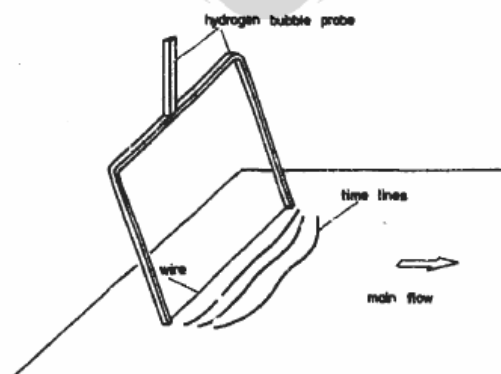
melalui metode fotografi dimana partikel benda dapat tertangkap kamera sehingga daerah kecepatan bisa di petakan .

Gaya yang bekerja pada kenaikan pembentukan gelembung di air adalah kecepatan yang stabil ( $V$ ), daya apung ( $B$ ) dan *drag force* ( $D$ ). Efek Bouyancy akan semakin tinggi dan *drag force* akan semakin rendah. Setelah menyamakan kekuatan buoyance dan *drag force* pada gelembung hidrogen di peroleh persamaan

$$\bar{v} = \frac{d^2}{12\nu} \quad (2.3)$$

dimana,  $d$  adalah diameter gelembung (m) dan  $\nu$  adalah kecepatan kinematik dari air (m/s).

Matsui et al (1977) mempelajari efek dari ukuran dan bahan dari katoda untuk menentukan pengaruhnya terhadap pembentukan hidrogen. Eksperimen dilakukan menggunakan dua jenis kawat, yaitu kawat platinum dengan diameter  $30\mu\text{m}$  dan kawat tungsten berdiameter  $10\mu\text{m}$ . Pada kawat platinum dengan diameter  $30\mu\text{m}$  menghasilkan gelembung sangat kecil yang rapat di permukaan air dengan diameter gelembung yang tidak seragam (0,5 sampai 1,5 kali dari diameter kawat). Hal ini berbeda pada kawat tungsten berdiameter  $10\mu\text{m}$ , gelembung yang dihasilkan dekat dengan kawat dan tidak saling menyatu antar gelembung serta ukuran dari gelembung cukup sama. Berikut merupakan gambar gelembung hidrogen yang mulai terbentuk pada ujung kawat katoda :



**Gambar 2.6** Pembentukan gelembung hidrogen (Smith and Paxon, 1983)

### 2.3.1 Pengukuran Laju Alir Gelembung Hidrogen

Untuk memperoleh velocity dari baris waktu, video atau frame foto digunakan teknik penghitungan waktu tinggal. *Velocity* (U) masing-masing gelembung lokal di setiap lokasi (y) diperkirakan sebagai :

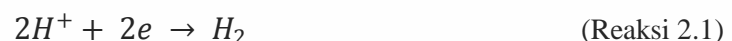
$$U_b(y, t) = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.4)$$

di mana  $\Delta x$  adalah perpindahan horisontal antara dua waktu pembentukan gelembung dan  $\Delta t$  adalah periode waktu antar pulsa gelembung, sehingga dengan menerapkan metode ini akan dapat diperoleh profil kecepatan untuk lintasan gelembung.

### 2.4 Elektrolisis Air

Elektrolisis merupakan proses kimia yang mengubah energi listrik menjadi energi kimia. Elektrolisis pada air dapat menghasilkan gas hidrogen dan oksigen. Hukum Faraday menyatakan bahwa jika dua elektroda yang direndam dalam larutan berair dari asam, garam atau basa dan terhubung ke sumber arus kontinu dari sebuah ketegangan yang cukup tinggi, akan ada suatu bagian listrik melalui larutan dan pada saat yang sama berbagai reaksi kimia akan terjadi pada elektroda. Reaksi ini mungkin termasuk evolusi gas, pemisahan zat, pelepasan elektroda, atau penampakan zat baru dalam larutan (Milazzo 1963).

Selama reaksi elektrolisis, air sebenarnya merubah menjadi hidrogen dan molekul oksigen. Saat proses elektrolisis dimulai, elektron di ujung katoda akan bereaksi dengan air, menyebabkan tiap molekul air untuk melepaskan satu atom hidrogen, dapat dilihat pada reaksi 2.1. Atom-atom hidrogen akan membentuk gelembung hidrogen dan ion bermuatan negatif meninggalkan kelompok hidroksil (OH).



Karena gugus hidroksil bermuatan negatif, mereka ditolak oleh ujung katoda dan kemudian bermigrasi ke anoda untuk menjalani reaksi yang berbeda. Reaksi yang



terjadi dapat dilihat pada reaksi 2.2. Gugus hidroksil mengkonversi ke gelembung oksigen pada anoda akhir sesuai dengan reaksi berikut :

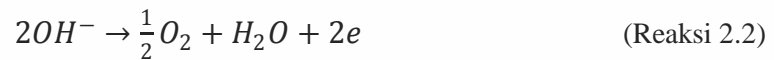
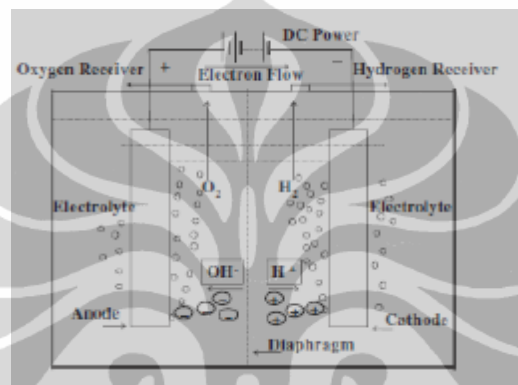


Diagram sederhana dari sistem elektrolisis dapat dilihat pada gambar 2.4 menunjukkan di mana terjadi pembentukan gelembung hidrogen dalam sistem. Penambahan elektrolit ke sistem elektrolisis perlu dilakukan karena yang diperlukan untuk memulai reaksi elektrolisis.



**Gambar 2.7** Diagram sistem elektrolisis air (Eric Stahl, 2010)

Elektroda yang digunakan dalam proses elektrolisis dapat digolongkan menjadi dua, yaitu:

- Elektroda inert, seperti kalsium (Ca), potasium, grafit (C), Platina (Pt), dan emas (Au) digunakan sebagai katoda
- Elektroda aktif, seperti seng (Zn), tembaga (Cu), dan perak (Ag) sebagai anoda

Pemilihan elektroda yang sesuai bisa menghasilkan reaksi pembentukan hidrogen yang lebih besar, serta meminimalisasi terbentuknya korosi pada elektroda. Semakin inert elektroda yang digunakan maka semakin sulit untuk terkorosi.

## 2.5 Orifice

*Orificemeter* adalah alat paling umum digunakan untuk pengukuran aliran fluida, terutama untuk mengukur hidrokarbon. Dengan bentuk yang mudah, simpel dan cocok untuk penggunaan lapangan di bawah kondisi cuaca ekstrim. Pada 1779, seorang fisikawan Italia bernama Giovanni B. Venturi (1746-1822) melakukan pekerjaan yang tercatat pertama menggunakan lubang untuk

pengukuran aliran fluida. Bertahun-tahun pengalaman lapangan dengan berbagai ukuran, berbagai cairan, dan tes investigasi banyak telah mengidentifikasi semua faktor utama ketidakpastian pengukuran lubang. Karena sejarah panjang penggunaannya dan dominasi dalam pengukuran aliran fluida, desain, persyaratan instalasi, dan persamaan untuk perhitungan laju aliran telah distandarkan oleh organisasi yang berbeda di Amerika Serikat dan internasional. Standar ini memberikan pedoman bagi pengguna untuk mencapai pengukuran aliran akurat dan meminimalkan ketidakpastian pengukuran. Banyak faktor yang mempengaruhi ketidakpastian pengukuran secara keseluruhan yang terkait dengan aplikasi celah dalam orfisi. Kontributor utama untuk ketidakpastian pengukuran meliputi prediktabilitas profil aliran, sifat fluida pada kondisi mengalir, presisi dari persamaan empiris untuk koefisien debit, toleransi manufaktur dalam komponen meter, dan ketidakpastian yang berhubungan dengan perangkat sekunder memantau tekanan jaringan statis, tekanan diferensial di seluruh lubang piring, suhu, dll. Sebuah celah pengukuran aliran adalah perangkat yang sangat mudah dan untuk sebagian besar aplikasi, dengan perawatan normal dalam instalasi dan instrumentasi, akurasi pengukuran secara konsisten lebih baik dari  $\pm 1\%$ . Jika kesalahan pengukuran lebih besar dari  $\pm 1\%$ , kita harus melihat kesalahan yang jelas dalam instalasi dan instrumen.

Prinsip kerja setiap pengukuran *orifice* didasari oleh prinsip fisika yaitu peningkatan kecepatan menyebabkan penurunan tekanan. Korelasi ini memberikan cara untuk mengukur laju aliran dalam pipa (Munson, 2002). Pada keadaan delta P yang rendah, kecepatan rata-rata dihitung dengan merata-ratakan kecepatan pada penampang dan kecepatan lokal dihitung dengan gelembung hidrogen. Persamaan Bernoulli yang sesuai dengan kondisi ini adalah sebagai berikut :

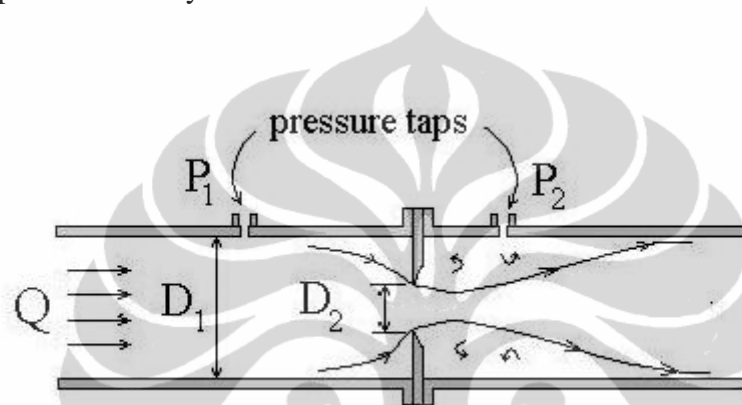
$$Q_{ideal} = A_2 V_2 = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (2.5)$$

A : luas penampang aliran (m)

V : kecepatan fluida (m/s)

- $p$  : tekanan aktual dari fluida yang mengalir ( $\text{N/m}^2$ )  
 $\rho$  : densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\beta$  : perbedaan diameter hulu dan hilir ( $D_2/D_1$ ) (m)

Pada plat *orifice* ini piringan harus berbentuk plat dan tegak lurus pada sumbu pipa. Piringan tersebut harus bersih dan diletakkan pada perpipaan yang lurus untuk memastikan pola aliran yang normal dan tidak terganggu oleh *fitting*, kran atau peralatan lainnya.



Gambar 2.8 Diagram *Orificemeter*

Laju aliran yang melalui sebuah *orifice* dapat dinyatakan sebagai :

$$Q = C_0 Q_{ideal} = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (2.6)$$

- $C_0$  merupakan koefisien discharge dari *Orifice*
- $A_0$  adalah luas lubang pada pelat *Orifice* ( $\pi d^2/4$ ) (m)
- $\beta$  adalah rasio daerah penyempitan terhadap pipa ( $D_2/D_1$ )
- $p$  : tekanan aktual dari fluida yang mengalir ( $\text{N/m}^2$ )
- $\rho$  : densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

Dalam pengambilan beda tekanan, lokasi pengambilan beda tekanan dalam pengukuran besaran aliran fluida sangat penting baik dalam lubang sebelum alat ukur maupun sesudah alat ukur. Untuk pengukuran cairan, penumpukan sisa-sisa dari gas atau uap pada sambungan-sambungan antara pipa dan alat pengukur harus dihindari. Hal ini bertujuan agar pengukuran tidak meleset dan stabil. Maka

lubang pengambilan beda tekanan pada umumnya ditempatkan pada bidang horizontal dari garis tengah pipa. Sama halnya untuk pengukuran gas, penumpukan sisa-sisa dari cairan atau uap harus dihindari, karena itu lubang-lubang pengambilan beda tekanan biasanya ditempatkan pada bagian atas pipa. Tekanan awal dan akhir dari plat *orifice* akan sangat berbeda oleh jarak dari plat *orifice*. Oleh karena itu standar dari penentuan jarak ini tergantung dari pipa yang digunakan.

## 2.6 Penelitian Yang Berkaitan

Sejumlah peneliti telah menggunakan visualisasi aliran gambar untuk mendapatkan informasi kuantitatif dari medan aliran keseluruhan. Bruneau dan Pauley (1992) menggunakan visualisasi aliran pada pembentukan gelembung hidrogen untuk memproses gambar digital yang dihasilkan dalam upaya mendapatkan profil kecepatan aliran secara cepat. Mereka menggunakan katoda *stainless steel* karena lebih kuat daripada Platina, walaupun *stainless steel* lebih mudah terkorosi. Anoda yang digunakan adalah alumunium dengan ketebalan 1,9 cm. Dinding area pengukuran menggunakan kaca dengan ketebalan 0,5” dan panjang 3,66 m, serta ditambahkan *honeycomb* pada bagian upstream.

Sama halnya dengan visualisasi yang dibuat oleh Bruneau dan Pauley (1992), penelitian ini dilakukan menggunakan visualisasi aliran untuk memperoleh hasil secara kualitatif dan kuantitatif pada seluruh medan aliran namun perbedaannya hanya pada objek uji yang digunakan. Pada penelitian sebelumnya hanya meneliti tidak menggunakan objek uji, sedangkan di penelitian ini menggunakan objek uji bola, bola golf dan *orifice*.

## BAB 3

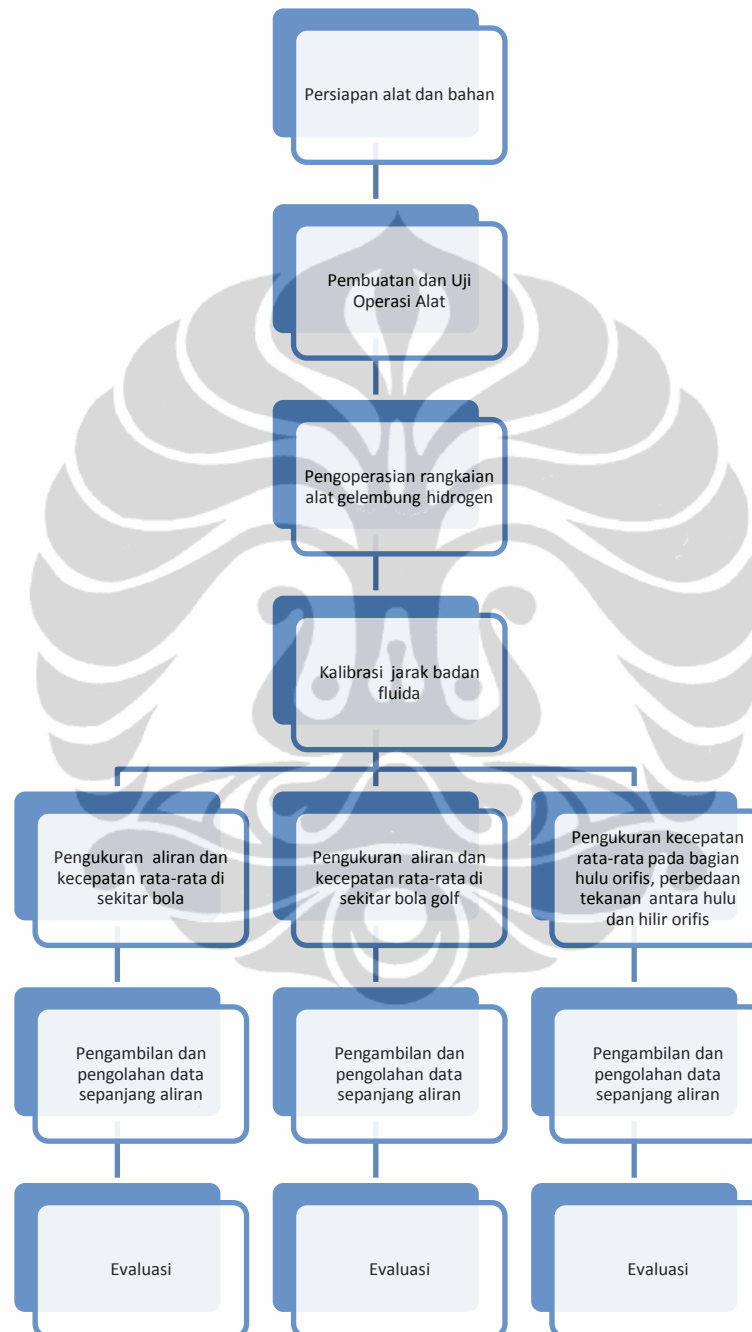
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Pendahuluan

Metodologi penelitian ini adalah pengukuran profil kecepatan dengan menggunakan gelembung-gelembung hidrogen. Dari penelitian ini ingin diketahui aliran yang terbentuk di sekitar bola dan bola golf serta pengaruh penambahan *orifice* pada aliran.

#### 3.2 Diagram Alir Penelitian

Aktivitas utama penelitian dilakukan di Laboratorium Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok. Untuk mempermudah pelaksanaan kegiatan penelitian, secara berurutan akan dilakukan tahapan pengerjaan penelitian yang meliputi studi literatur, persiapan alat dan bahan, pembuatan dan uji operasi alat, pengoperasian rangkaian alat gelembung hidrogen, kalibrasi jarak badan dan kelaminaran fluida, serta pengukuran aliran di setiap objek uji. Secara garis besar tahapan-tahapan penelitian tersebut dijelaskan pada diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1

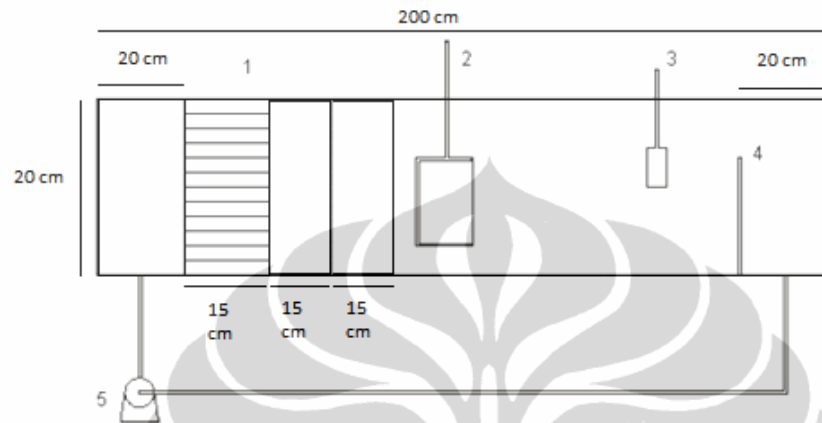


**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

### 3.3 Skema Rancangan Alat

Untuk melaksanakan penelitian ini diperlukan alat yang sesuai, yang akan disusun sebagai berikut :

- a. Skema alat gelembung hidrogen dalam saluran air

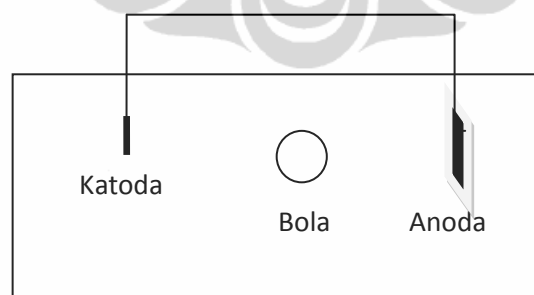


**Gambar 3.2** Skema Alat Gelembung Hidrogen

Keterangan gambar :

1. *Honeycomb*
2. Katoda
3. Anoda
4. Bendungan
5. Pompa

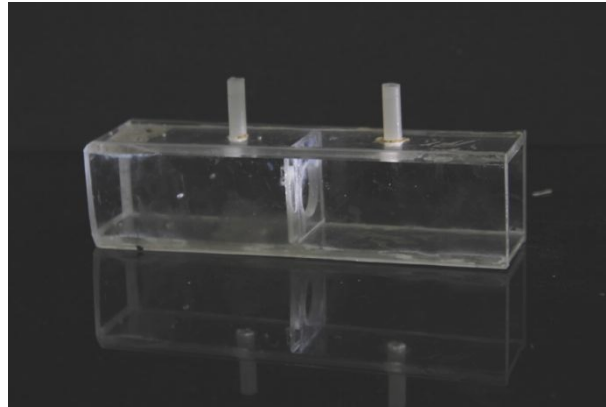
- b. Skema alat pola aliran di sekitar bola



**Gambar 3.3** Skema alat pola aliran di sekitar bola

- c. Alat *orifice*

*Orifice* dibuat dengan menambahkan plat yang berlubang (diameter 3cm) pada pipa persegi empat dengan (diameter 4 cm) dan akan diletakkan di dalam saluran air.



**Gambar 3.4** Alat *orifice*

### 3.4 Alat dan Bahan Penelitian

Alat :

- Alat gelembung hidrogen  
Merupakan peralatan utama dalam percobaan dan berfungsi sebagai tempat terjadinya pembentukan gelembung hidrogen dan visualisasi aliran
- Pompa 5000 lpm  
Berfungsi untuk mengalirkan fluida cair (air) dari bagian hilir ke hulu generator.
- Akrilik / kaca  
Bahan pembuatan tangki.
- Lem Akrilik
- Kawat kasa  
Digunakan untuk mengurangi turbulensi aliran.
- Sedotan  
Berfungsi sebagai penyearah aliran
- *Orifice*  
*Orifice* dibuat dengan menambahkan pelat yang berlubang pada pipa persegi empat.
- Manometer  
Digunakan untuk menghitung perbedaan tekanan yang terjadi
- Bola
- Bola Golf



- Kayu  
Digunakan sebagai penyangga tangki air.
- Wadah besar penampung air  
Sebagai tempat tampungan air sebelum melewati pompa.
- Karton hitam  
Sebagai latar tempat pengambilan gambar aliran.
- Kamera digital  
Kamera digunakan untuk mengambil gambar pembentukan hidrogen dan alirannya. Kamera yang digunakan adalah kamera DSLR Canon 550D dengan lensa makro Canon EF 100mm
- Lampu LED  
Sebagai sumber cahaya saat pengukuran
- Pipa  
Tempat mengalirnya fluida menuju pompa.
- Penggaris  
Berfungsi untuk kalibrasi *alat gelembung hidrogen*

Bahan :

- Kawat *stainless steel* sebagai katoda pada proses pembentukan gelembung hidrogen
- Plat besi sebagai anoda
- Air

### 3.5 Prosedur Penelitian

#### 3.5.1 Persiapan Awal

Tahap ini meliputi persiapan peralatan (desain alat gelembung hidrogen) dan bahan (air, katoda dan anoda) yang akan dipergunakan dalam penelitian ini.

### 3.5.2 Proses Pembuatan dan Uji Operasi Alat Gelembung Hidrogen

Tahap ini meliputi proses pembuatan dan pengujian operasi dari alat gelembung hidrogen. Uji operasi dilakukan untuk mencegah terjadinya kebocoran serta kelayakan operasi rangkaian alat. Langkah-langkah yang dilakukan adalah :

1. Menyambungkan setiap alat sesuai skema yang telah dibuat dan memastikan apakah aliran listrik sudah mengalir.
2. Memasukkan air ke dalam generator, sampai ketinggian fluida yang diinginkan.
3. Menyalakan pompa
4. Menyalakan rangkain listrik antara katoda dan anoda.
5. Memastikan apakah adanya indikasi kebocoran, serta tidak berfungsinya pompa atau katoda dan anoda.
6. Menutup setiap indikasi kebocoran

### 3.5.3 Pengoperasian Rangkaian Alat

Pengoperasian rangkaian alat bertujuan untuk analisa aliran yang terbentuk pada bagian hulu di mana aliran yang terbentuk pada bagian hulu harus laminar. Proses ini dilakukan dengan cara :

1. Menyalakan rangkaian listrik yang tersambung pada anoda dan katoda.
2. Menyalakan pompa.
3. Mengatur aliran air yang akan masuk menuju generator.
4. Melakukan pengambilan data

Data yang diambil adalah kecepatan aliran fluida dan bentuk aliran menggunakan kamera di bagian hulu aliran

5. Peralatan dioperasikan selama waktu yang ditentukan
6. Setelah selesai maka air harus dikeluarkan, katoda serta anoda dibersihkan untuk mencegah terjadinya korosi.

### 3.5.4 Kalibrasi Jarak Aliran

Proses kalibrasi jarak dalam aliran di lakukan menggunakan program PivView untuk mengetahui jarak dalam badan aliran yang sebenarnya dengan membandingkan panjang penggaris sebagai kalibrator yang diketahui panjang sebenarnya dengan panjang pixel pada citra yang diambil oleh kamera. Panjang pixel bisa diperoleh dengan memproses citra aliran dengan program PivView. Proses kalibrasi ini dilakukan untuk setiap pengambilan citra data visualisasi

### 3.5.5 Pengukuran Aliran yang Melewati Bola

Pengukuran aliran diantara bola dilakukan dengan menambahkan bola di depan aliran yang terbentuk pada tangki secara kualitatif dan kuantitatif. Proses ini dilakukan dengan :

1. Menambahkan bola antara bagian hulu dan hilir dari generator.
2. Menyalakan rangkaian listrik yang tersambung pada anoda dan katoda.
3. Menyalakan pompa.
4. Mengatur aliran air yang akan masuk menuju generator.
5. Melakukan pengambilan data

Data yang diambil adalah kecepatan aliran fluida di hulu atau hilir dari bola, bentuk pemisahan bentuk aliran menggunakan kamera di bagian hilir dari bola.

6. Peralatan di operasikan selama waktu yang ditentukan
7. Setelah selesai maka air harus dikeluarkan, katoda serta anoda dibersihkan untuk mencegah terjadinya korosi.

### 3.5.6 Pengukuran Aliran yang Melewati Bola Golf

Pengukuran aliran diantara bola dilakukan dengan menambahkan bola golf di depan aliran yang terbentuk pada tangki secara kualitatif dan kuantitatif. Proses ini dilakukan dengan :

1. Menambahkan bola antara bagian hulu dan hilir dari generator.

2. Menyalakan rangkaian listrik yang tersambung pada anoda dan katoda.
3. Menyalakan pompa.
4. Mengatur aliran air yang akan masuk menuju generator.
5. Melakukan pengambilan data

Data yang diambil adalah kecepatan aliran fluida di hulu atau hilir dari bola, bentuk dan pemisahan, bentuk aliran menggunakan kamera di bagian hilir dari bola, Peralatan di operasikan selama waktu yang ditentukan

6. Setelah selesai maka air harus dikeluarkan, katoda serta anoda dibersihkan untuk mencegah terjadinya korosi.

### 3.5.7 Penentuan Kuantitatif pada *orifice*

Penentuan kuantitatif pada *orifice* dilakukan terhadap kecepatan bagian hulu *orifice* serta perbedaan tekanan pada hulu dan hilir *orifice*, yaitu dengan menambahkan *orifice* pada aliran di alat gelembung hidrogen. Penentuan ini dilakukan dengan cara :

1. Memasang manometer pada *orifice*.
2. Menyalakan rangkaian listrik yang tersambung pada anoda dan katoda.
3. Menyalakan pompa.
4. Melakukan pengambilan data

Data yang diambil adalah kecepatan rata-rata pada bagian hulu *orifice*, perbedaan tekanan antara hulu dan hilir *orifice* serta penghitungan faktor friksi.

5. Peralatan dioperasikan selama waktu yang ditentukan
6. Setelah selesai maka air harus dikeluarkan, katoda serta anoda dibersihkan untuk mencegah terjadinya korosi.

### 3.6 Pengolahan dan Analisa Data

Sampel yang diperoleh dari hasil percobaan akan mengalami analisis kualitatif dan kuantitatif.

### 3.6.1 Analisis Kualitatif

Pada analisa ini dilakukan dengan melihat aliran yang terbentuk pada fluida baik di hulu ataupun di hilir generator dengan menggunakan kamera.

### 3.6.2 Analisis Kuantitatif

Analisis Kuantitatif dilakukan dengan beberapa parameter :

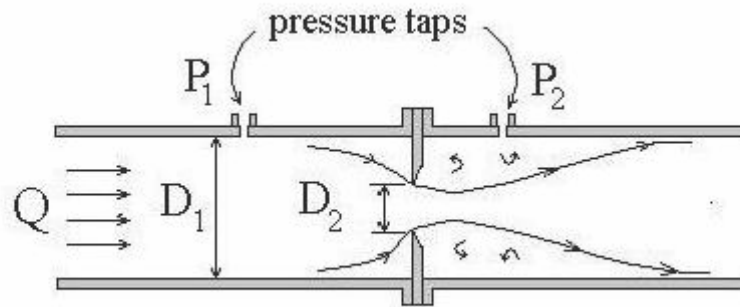
#### 3.6.2.1 Kecepatan Alir Fluida

Untuk pengukuran kecepatan alir fluida ini bisa dilakukan di hulu, datanya akan digunakan untuk melihat gradien kecepatan, eksperimen akan menggunakan kamera. Hasil pencitraan kamera akan diproses di komputer menggunakan perangkat lunak *PivView7*, menghasilkan panjang aliran. Kecepatan dihitung dengan mengkorelasi antara gelembung yang terbentuk yang menunjukkan panjang aliran/image ( $\Delta x$ ) dengan beda waktu pembentukan gelembung yang diatur ( $\Delta t$ ), kecepatan dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.1)$$

#### 3.6.2.2 Kecepatan Alir *Orifice*

Kecepatan aliran *orifice* diukur pada bagian hulu dengan mengukur perbedaan tekanan pada titik P1 dan P2 pada *orifice* dengan menggunakan manometer (Munson, 2002), bisa dilihat pada gambar berikut :



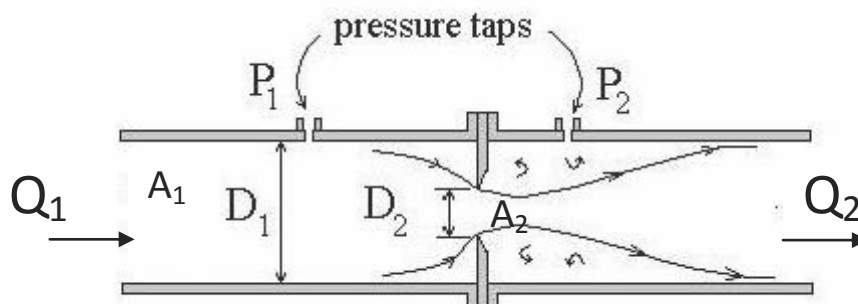
**Gambar 3.5** Skema Orifice

*Discharge coefficient* dari *orifice* dapat dihitung dengan memplot antara Reynolds number terhadap rasio penyempitan terhadap pipa dan dimasukkan pada grafik koefisien discharge *orifice*, sehingga laju aliran yang melalui sebuah *orifice* dapat dinyatakan sebagai :

$$Q = C_d Q_{ideal} = C_d A_0 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (3.6)$$

- $C_d$  merupakan *Discharge coefficient* dari *orifice*
- $A_0$  adalah luas lubang pada pelat *orifice* ( $\pi d^2/4$ ) (m)
- $\rho$  : densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\beta$  adalah rasio daerah penyempitan terhadap pipa ( $D_2/D_1$ ) (m)
- $p$  : tekanan aktual dari fluida yang mengalir ( $\text{N/m}^2$ )

*Discharge coefficient* bisa diperoleh dengan membandingkan keadaan pada hulu dan hilir *orifice*, hal ini bisa dilihat melalui gambar berikut :



**Gambar 3.6** Menghitung  $C_d$  pada Orifice

Laju alir pada awal sama dengan laju alir di akhir *orifice*, sehingga:

$$Q_1 = Q_2 \quad (3.7)$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (3.8)$$

$$V_2 = \frac{V_1 A_1}{A_2} \quad (3.9)$$

Menggunakan persamaan Bernoulli pada *orifice* sebagai berikut :

$$Q = C_d Q_{ideal} = V_2 A_2 = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - (A_2/V_1)^2)}} \quad (3.10)$$

$V_2$  diganti dengan  $\frac{V_1 A_1}{A_2}$ , menjadi :

$$C_d \frac{V_1 A_1}{A_2} A_2 = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - (A_2/V_1)^2)}} \quad (3.11)$$

Nilai  $C_d$  bisa dihitung menjadi :

$$C_d V_1 = \frac{A_2}{A_1} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - (A_2/V_1)^2)}} \quad (3.12)$$

$$C_d = \frac{\frac{A_2}{A_1} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - (A_2/V_1)^2)}}}{V_1} \quad (3.13)$$

Keterangan :

- $A_1$  : luas penampang masuk aliran (m)
- $A_2$  : luas lubang pada pelat *orifice* ( $\pi d^2/4$ ) (m)
- $V_1$  : kecepatan fluida diawal (m/s)
- $P_1$  : tekanan fluida yang mengalir dititik 1 ( $N/m^2$ )
- $P_2$  : tekanan fluida yang mengalir dititik 2 ( $N/m^2$ )
- $\rho$  : densitas fluida ( $kg/m^3$ )
- $C_d$  : koefisien discharge dari *orifice*

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk membuat alat yang dapat memvisualisasikan aliran fluida secara maksimal, di mana alat ini merupakan tempat berlangsungnya proses visualisasi aliran terhadap bola, bola golf dan *orifice* serta pengaruhnya terhadap aliran fluida. Sebelum dilakukan pengujian alat visualisasi aliran yang menggunakan gelembung hidrogen, dirancang terlebih dahulu tangki air untuk tempat berlangsungnya proses visualisasi, dan setelah itu baru dilakukan analisa untuk memperoleh profil dan gradien kecepatan terhadap masing-masing benda uji.

#### 4.1 Perancangan Alat

##### 4.1.1 Terowongan air (*water tunnel/tangki air*)

Gambar 4.1 memperlihatkan terowongan air/tangki air yang dibuat menggunakan bahan akrilik berbentuk persegi panjang dengan ukuran lebar dalam tangki 20 cm dan pemilihan ini didasarkan pada pertimbangan bahwa material tersebut memiliki kemudahan dalam penanganan dan perawatan, serta memudahkan untuk mengamati fenomena yang terjadi di dalam tangki selama proses visualisasi.



**Gambar 4.1** Terowongan air / *water tunnel*



Pada tangki ditambahkan penyebar arus pada bagian hulu yang berupa plat stainless tahan korosi sehingga aliran air dapat menyebar secara rata ke seluruh bagian tangki, karena tanpa penambahan penyebar arus maka kecepatan aliran air terkonsentrasi di bagian permukaan air dan menyebabkan perbedaan kecepatan yang cukup signifikan. Penyearah aliran juga ditambahkan pada tangki air berupa sedotan yang sudah disusun sedemikian rupa sehingga diharapkan dapat menyearahkan aliran air yang baru masuk ke dalam tangki, serta mengurangi efek turbulensi. Efek turbulensi ini juga dikurangi secara bertahap lagi dengan penambahan dua buah kawat kasa sebagai penyaring aliran dan memungkinkan pada tempat uji visualisasi sudah terbentuk aliran yang sejenis dan bisa diamati.

Tangki dibuat panjang untuk mengurangi efek getaran dari pompa yang ditambahkan, sehingga tidak mempengaruhi aliran yang terjadi di dalam tangki. Akan tetapi masih terdapat getaran pada alat yang telah dibuat, dilihat pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Getaran dalam tunnel

#### **4.1.2 Alat Elektrolisis**

Pada penelitian ini menggunakan alat elektrolisis kawat stainless berdiameter  $0,1 \mu\text{m}$  sebagai anoda dan plat stainless sebagai katoda, tempat terbentuknya hasil elektrolisis yaitu hidrogen pada bagian anoda yang digunakan sebagai media visualisasi dan oksigen pada bagian katoda. Pemilihan penggunaan plat stainless daripada plat karbon sebagai katoda adalah karena proses pembentukan gelembung menjadi lebih cepat dibandingkan menggunakan plat karbon. Kawat stainless digunakan karena lebih kuat terhadap korosi bila dibandingkan dengan kawat besi.

### 4.1.3 Alat Listrik

Penelitian ini menggunakan tiga buah alat listrik untuk mendukung terbentuknya hidrogen pada alat elektrolisis yang diperlihatkan pada Gambar 4.2. Alat ini terdiri dari transformer penurun arus, pengubah arus AC ke DC dan *pulse generator*. Transformer penurun arus berfungsi menurunkan arus listrik dari 220V menjadi 110V agar bisa menghasilkan arus yang sesuai dengan pengubah arus AC ke DC. Pengubah arus berfungsi untuk mengubah arus dari AC ke DC dan menjadi sumber arus searah yang dapat menghasilkan gelembung hidrogen pada bagian anoda.



**Gambar 4.2** Rangkaian alat listrik

Pada pengubah arus ini pula ditambahkan relay sebagai pemancing pulse generator agar dapat bekerja. *Pulse generator* berfungsi untuk menghasilkan pulsa dalam berbagai kisaran frekuensi, yang menjadi dapat terukur karena dapat dikorelasikan dengan hasil visualisasi aliran.

### 4.1.4 Fluida

Fluida yang digunakan adalah air tanpa penambahan elektrolit, karena air yang digunakan sudah terdapat elektrolit yang cukup banyak sehingga dapat menghasilkan gelembung hidrogen dengan baik.

## 4.2 Pengujian Alat

Parameter yang harus diperhatikan saat pengujian alat gelembung hidrogen adalah kecepatan aliran, teknik pengambilan gambar dan penempatan objek uji yang tepat karena dapat mempengaruhi kondisi aliran fluida yang mempengaruhi besarnya kecepatan fluida serta pembentukan gelembung di sepanjang aliran fluida terhadap profil kecepatan yang akan terbentuk

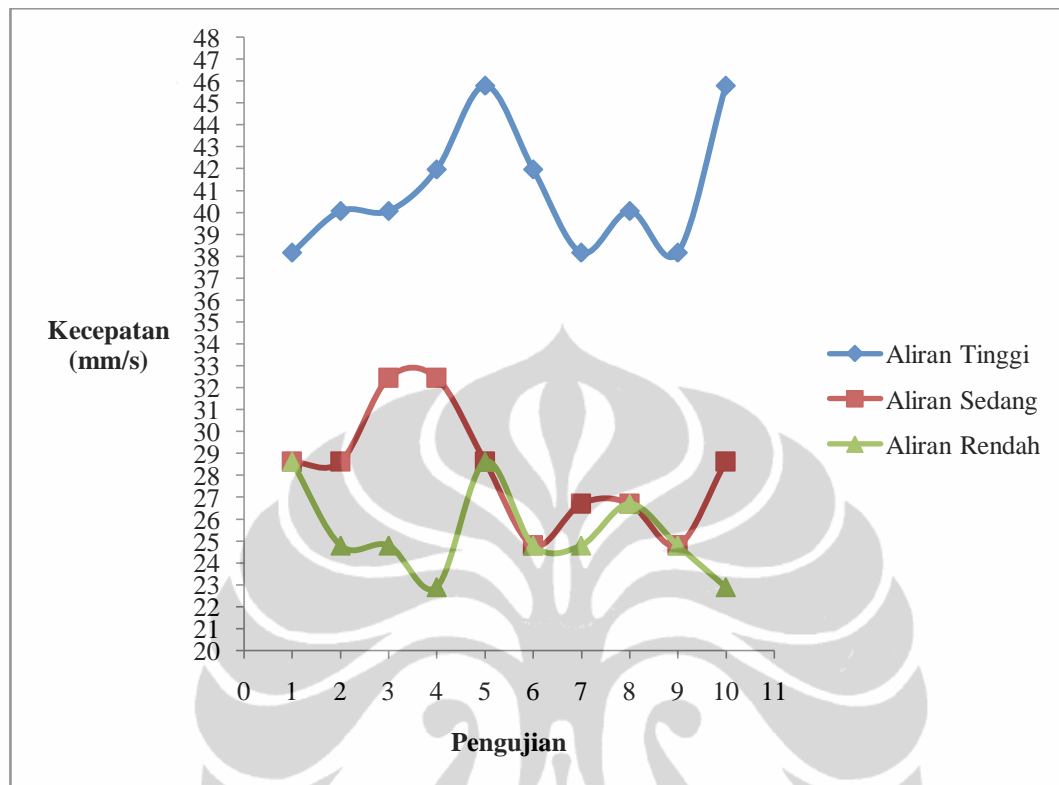
Pengujian alat dilakukan dengan menjalankan pompa setelah mengisi penuh tangki air dan menyalakan alat elektrolisis serta menyiapkan alat penangkap gambar. Pengisian tangki air harus dengan air yang sudah bersih atau dengan penambahan kain kasa sebagai penyaring, dengan tanpa penyaring menyebabkan kotoran-kotoran masuk ke tangki dan dapat mempersulit pada saat melakukan pengamatan aliran. Proses pengujian hanya dilakukan setelah melalui tahap *conditioning* alat, yang berfungsi untuk menyeragamkan arus di sepanjang aliran tangki. Selain itu proses *conditioning* juga dapat mempengaruhi kondisi aliran fluida yang mengalir dalam kolom gelembung pancaran sehingga mempengaruhi besarnya kecepatan maksimum fluida yang mengalir di sepanjang dan distribusi kecepatan (gradien kecepatan) yang terbentuk. Aliran yang digunakan divariasikan menjadi tiga kecepatan aliran dengan cara memutar valve dengan tiga titik yang berbeda.

Pada pengujian aliran untuk memperoleh gradien kecepatan digunakan metode PIV dengan menggunakan kamera kecepatan tinggi dan perangkat lunak berupa *software PIV View1.7* dan *Virtualdub*. Penambahan latar yang sudah diberi tanda sebagai pembanding terhadap gambar dengan jarak yang sebenarnya juga diperlukan untuk mengkalibrasi.

#### **4.2.1 Pengukuran laju aliran tangki / *water tunnel***

Pengukuran laju aliran tangki dilakukan untuk mengetahui kecepatan aliran pada tangki sebelum penambahan benda uji. Pengukuran ini dilakukan juga untuk mengetahui kemungkinan terjadinya aliran yang turbulen (*turbulence intensity*) dengan mengukur kecepatan aliran pada 1 titik yang sama pada jeda waktu yang berbeda. Kecepatan yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan nilai standar deviasinya. Semakin tinggi perbandingannya maka semakin besar kemungkinan aliran ini turbulen. Kemungkinan ini diperlihatkan pada Gambar 4.4. Pada gambar ini dihitung 10 jeda waktu yang berbeda, dengan pengukuran pada tiga variasi kecepatan yang berbeda pula. Di kecepatan rendah diperoleh nilai perbandingan 12,55; di kecepatan sedang nilai perbandingannya 10,60 dan di kecepatan tinggi 14,25. Ketiga data ini memperlihatkan bahwa pada kecepatan aliran sedang memiliki *turbulence intensity* yang paling rendah dibandingkan

kecepatan aliran rendah dan kecepatan aliran tinggi, sehingga aliran sedang mempunyai kelaminaran yang lebih baik daripada kecepatan di aliran yang lain.



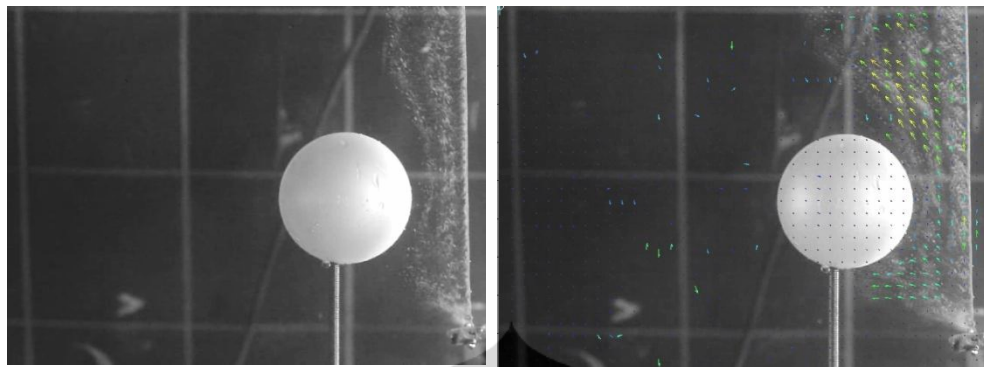
**Gambar 4.4** Pengukuran Kecepatan Aliran Fluida

#### 4.2.2 Pengukuran Aliran yang Melewati Bola

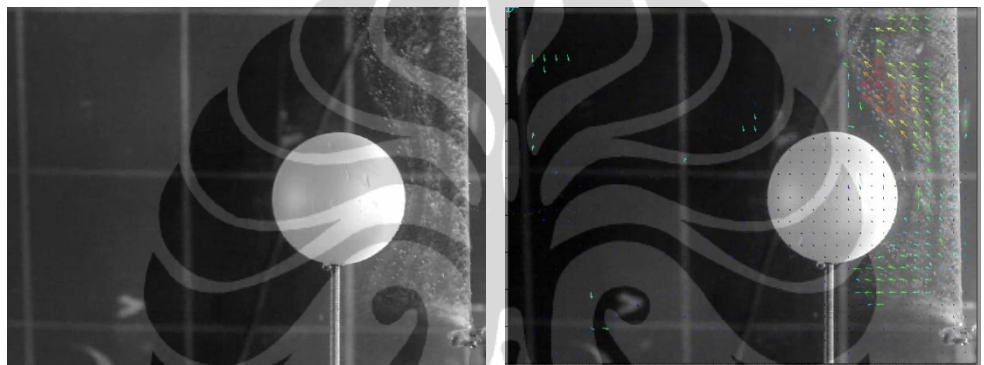
Pada penelitian ini, data diambil menggunakan kamera dengan kecepatan 25 frame/seconds dengan perbedaan tiga kecepatan. Dari masing-masing kecepatan diambil 3 data yang representatif dan dapat diukur perbedaan kecepatannya.

Gambar 4.5 menggambarkan pola aliran yang terjadi di sekitar bola dimana pada penelitian ini pola aliran hanya dapat dilihat sampai bagian tengah bola, karena jejak aliran yang berhenti sampai bagian ini. Aliran yang terbentuk semula datar dan saat mengenai bola akan terpisah menjadi dua aliran yang berbeda. Sebelum terjadi pemisahan, kecepatan bola menjadi lebih rendah dan seolah olah tertahan. Hal ini terlihat bahwa di ujung bagian bola atau aliran yang akan mengenai bola terdapat ketebalan garis arah aliran yang semakin pendek bila dibandingkan dengan garis arah sebelum mengenai bola. Aliran di sekitar bola ini menuju titik stagnasi (Munson dkk, 2003). Pada aliran ketiga atau yang palung

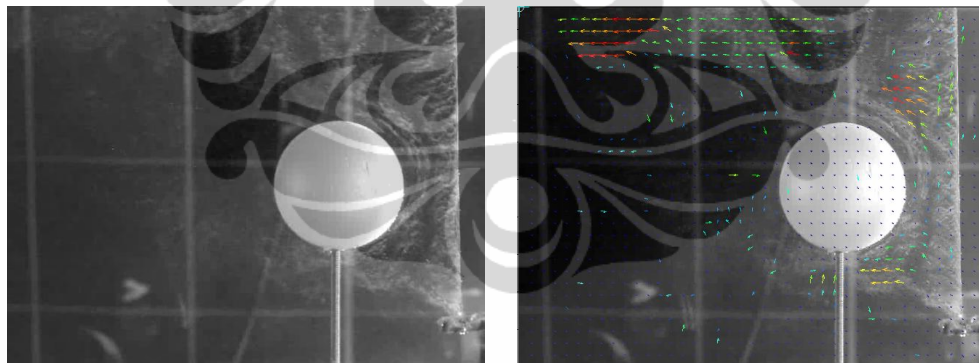
cepat diantara yang lain terlihat jejak yang mulai merata di bagian hilir bola akan tetapi masih sulit untuk diamati.



(a.) Aliran rendah di sekitar bola



b. Aliran sedang di sekitar bola

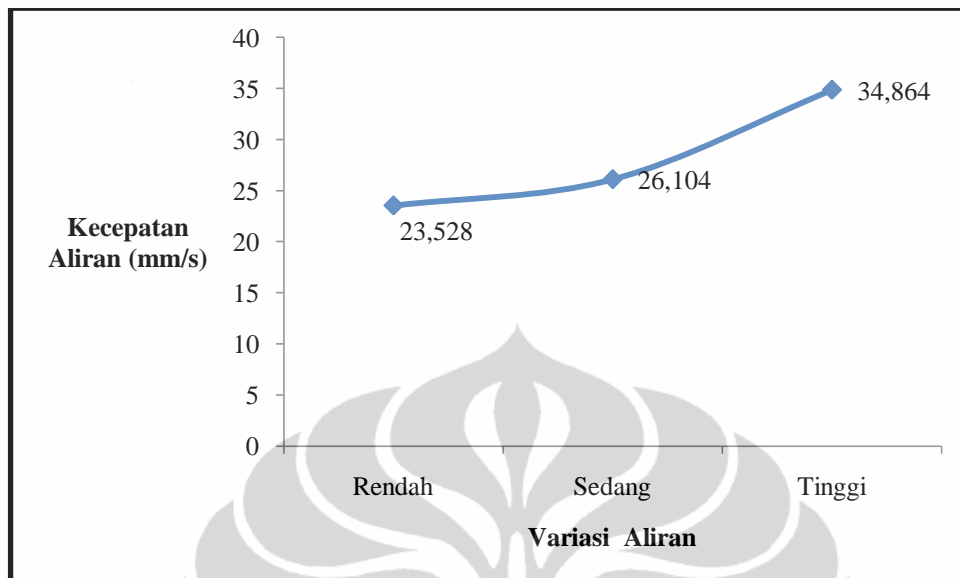


c. Aliran tinggi di sekitar bola

**Gambar 4.5** Jejak aliran di sekitar bola

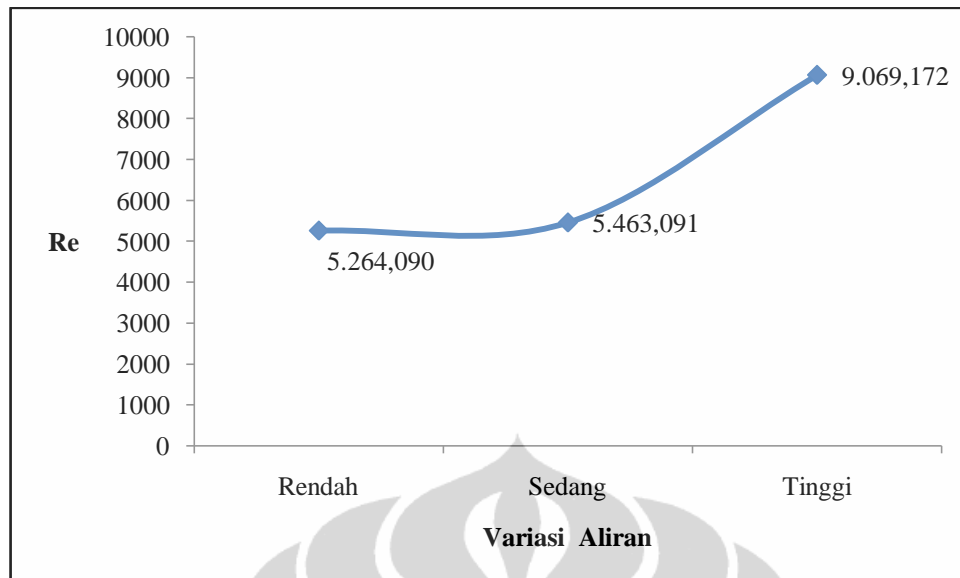
Gambar 4.6 menggambarkan perbedaan kecepatan yang signifikan dari pengujian pertama, kedua dan ketiga. Pengujian pertama memiliki kecepatan 23,528 mm/s, kecepatan kedua 26,104 mm/s dan kecepatan ketiga 34,864 mm/s. Dilihat dari kenaikan nilai kecepatan yang didapat. Pengujian pertama memiliki kecepatan yang lebih rendah dari pada pengujian kedua, pengujian kedua lebih rendah dari pengujian ketiga dan pengujian pertama merupakan pengujian yang memiliki

aliran yang berkecepatan paling rendah dibandingkan pengujian kedua dan ketiga. Kecepatan aliran fluida ini akan berpengaruh terhadap bilangan Reynolds.



**Gambar 4.6** Gambar perbedaan kecepatan pada aliran di sekitar bola

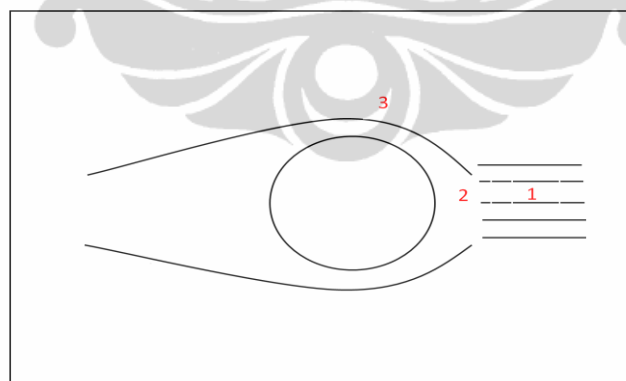
Bilangan Reynolds berpengaruh terhadap kelaminaran fluida, dapat dilihat secara visual bahwa seiring dengan kenaikan bilangan Reynolds maka fluida menjadi semakin tidak laminar. Begitu pula pada Gambar 4.7 dari pengujian satu didapatkan nilai bilangan Reynolds yang dihitung berdasarkan diameter bola, 5264 yang lebih besar dari 4000, ini menandakan aliran yang terbentuk merupakan aliran turbulen. Di pengujian kedua naik menjadi 5463 dan masih masuk ke batasan aliran turbulen. Pada pengujian ketiga menjadi lebih tinggi, yaitu 9069 dan masih merupakan aliran turbulen. Karena itu ketiga variasi aliran yang diperoleh masuk ke dalam aliran turbulen, yang diperkuat dengan jejak aliran yang masih berupa jejak lurus namun tidak seragam dan sudah mulai hilang jejak alirannya di bagian hilir.



**Gambar 4.7** Pengaruh bilangan Reynolds pada kecepatan di sekitar bola

Bilangan Reynolds yang tinggi dibarengi dengan kecepatan yang tinggi mengakibatkan jejak yang dihasilkan oleh gelembung hidrogen menjadi tidak beraturan, bisa dilihat pada bagian atas aliran di sekitar bola. Terbentuk olakan-olakan yang tidak beraturan.

Pada aliran yang melewati bola terjadi kenaikan kecepatan dari bagian hulu sampai ke hilir, dengan mengambil 3 titik yang di perlihatkan Gambar 4.8 yaitu di bagian awal, tengah dan akhir aliran yang melewati bola dan masih bisa diamati kita bisa mengetahui kenaikan kecepatan yang terjadi.

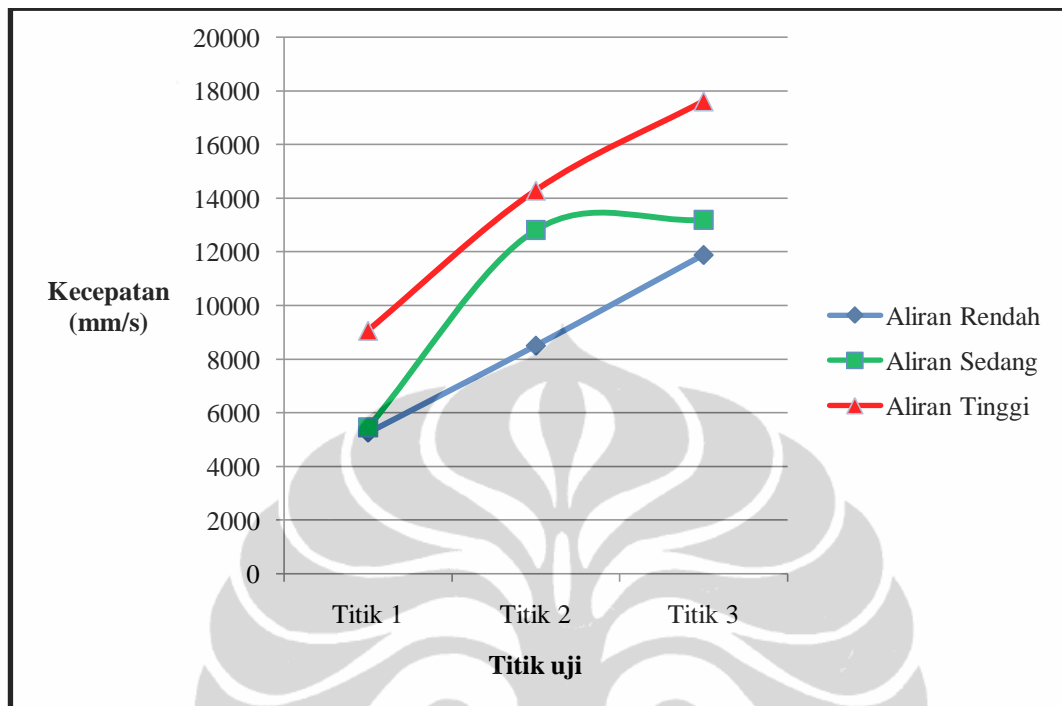


**Gambar 4.8** Titik perhitungan kecepatan aliran pada bola dan bola golf

Gambar 4.9 menggambarkan kenaikan kecepatan ini pada ketiga titik tersebut, pengujian pertama memiliki kecepatan yang paling rendah karena gelembung hidrogen belum mengenai bola. Pengujian kedua mengalami kenaikan kecepatan pada saat aliran tepat mengenai bola dan pada pengujian terakhir yang dilakukan pada titik tepat diatas bola terjadi kenaikan kecepatan yang paling tinggi.

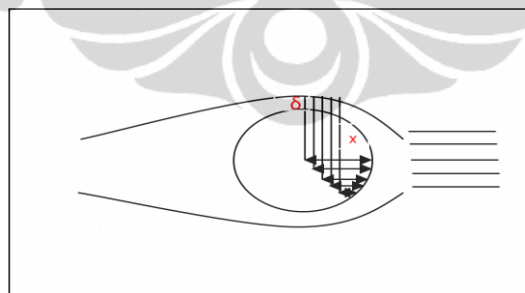


Kenaikan yang begitu besar ini diakibatkan oleh pengaruh tekanan yang terjadi akibat gesekan aliran antara aliran dengan permukaan bola.



**Gambar 4.9** Pengukuran kecepatan 3 titik pada aliran di sekitar bola (awal aliran, sebelum mengenai bola dan di bagian atas bola)

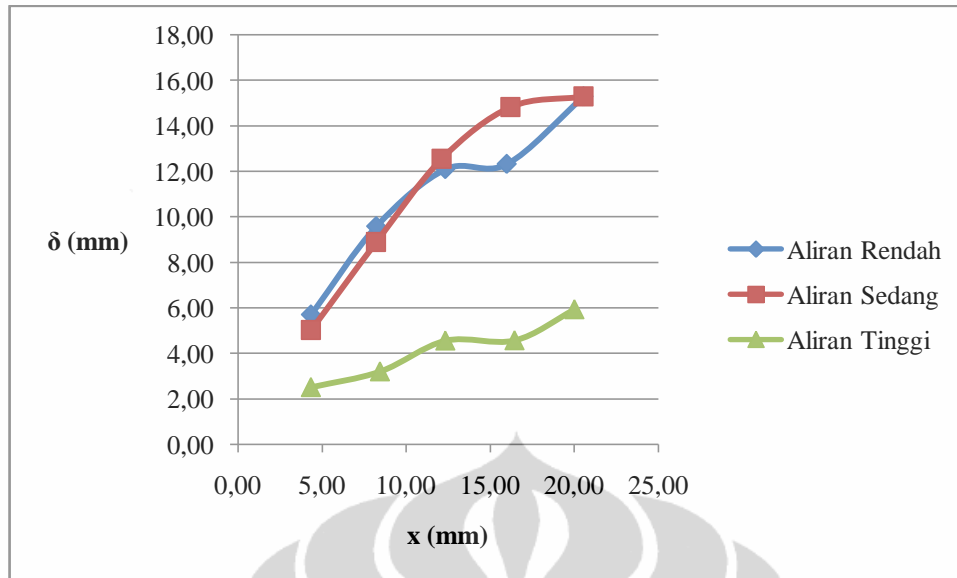
Pengukuran lapisan batas dilakukan dengan menghitung ketebalan lapisan batas yang terbentuk di sekitar bola terhadap diameter bola yang diperlihatkan pada Gambar 4.10.



**Gambar 4.10** Pengukuran lapisan batas

Lapisan batas yang terbentuk ketebalannya cenderung naik dari sisi terluar sampai sisi kedalam bola, yang bisa dilihat pada Gambar 4.11. Kenaikan ketebalan ini berbanding terbalik dengan kecepatan aliran. Semakin tinggi kecepatan aliran maka semakin kecil ketebalan lapisan batasnya. Hal ini sesuai dengan yang diungkapkan Monsoon, 2012.





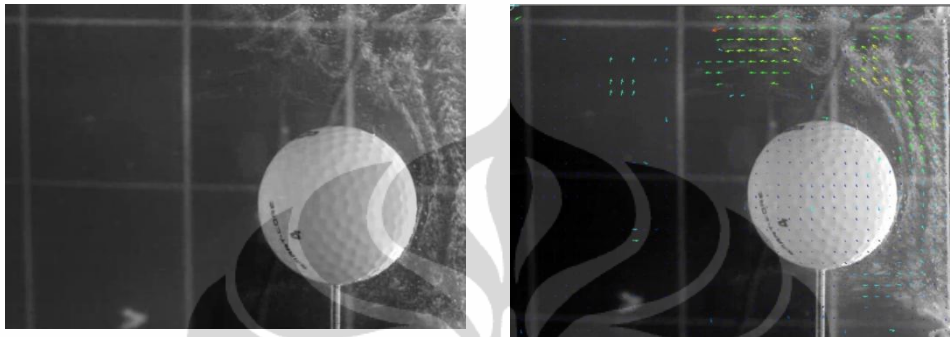
**Gambar 4.11** Pengukuran lapisan batas di sekitar bola

#### 4.2.3 Pengukuran Aliran di Sekitar Bola Golf

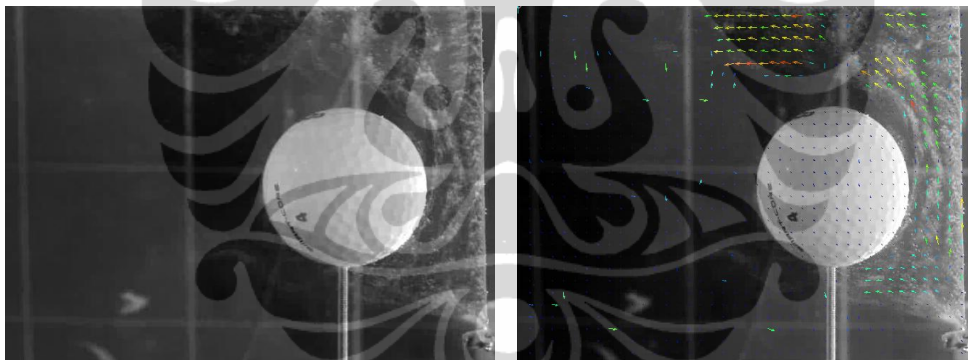
Pada penelitian ini, data diambil menggunakan kamera dengan kecepatan 25 frame/seconds dengan perbedaan tiga kecepatan. Dari masing-masing kecepatan diambil 3 data yang representatif dan dapat diukur perbedaannya. Proses kalibrasi dilakukan untuk mengamati aliran sebelum aliran tersebut mengenai bola golf.

Gambar 4.12 menggambarkan pola aliran yang terjadi di sekitar bola dimana pada penelitian ini pola aliran hanya dapat dilihat sampai bagian tengah bola, karena jejak aliran yang berhenti sampai bagian ini. Aliran yang terbentuk semula datar dan saat mengenai bola akan terpisah menjadi dua aliran yang berbeda. Sebelum terjadi pemisahan, kecepatan bola menjadi lebih rendah dan seolah olah tertahan. Hal ini terlihat bahwa di ujung bagian bola atau aliran yang akan mengenai bola terdapat ketebalan garis arah aliran yang semakin pendek bila dibandingkan dengan garis arah sebelum mengenai bola. Aliran di sekitar bola ini menuju titik stagnasi (Munson dkk, 2003). Pada aliran di setiap pengujian terlihat jejak yang mulai merata di bagian hilir bola akan tetapi masih sulit untuk diamati karena tidak merata sampai ke seluruh bagian bola golf. Dapat diamati juga bahwa aliran yang ditimbulkan oleh gelembung hidrogen pada bagian hulu bola golf mendekati bola golf, berbeda dengan aliran yang melewati bola biasa. Terlihat terbentuk lagi garis tipis di bagian hulu, garis ini diperoleh karena adanya *dimple*,

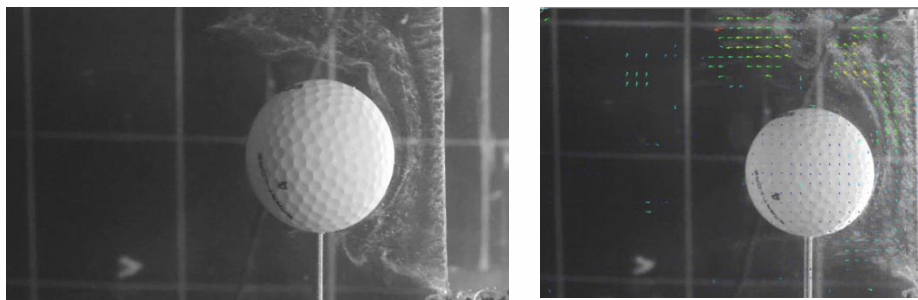
atau cekukan dipermukaan bola golf. Fenomena ini sangat berkaitan dengan teori yang dihasilkan oleh cekukan tersebut, cekukan tersebut membuat aliran yang lewat memiliki perbedaan kecepatan, dan dengan jarak cekukan yang tidak berjauhan satu sama lain, mengakibatkan pola kecepatan yang hampir sama dan mengakibatkan perbedaan tekanan yang semakin kecil (Chang Hsein, 2006).



(a.) Aliran rendah di sekitar bola golf



b. Aliran sedang di sekitar bola golf

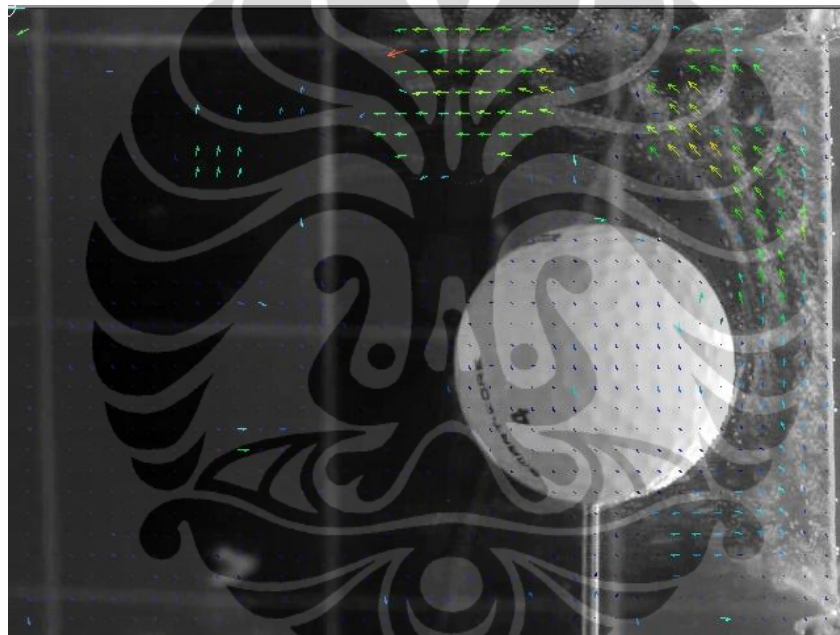


c. Aliran cepat di sekitar bola golf

**Gambar 4.12** Aliran di sekitar bola golf

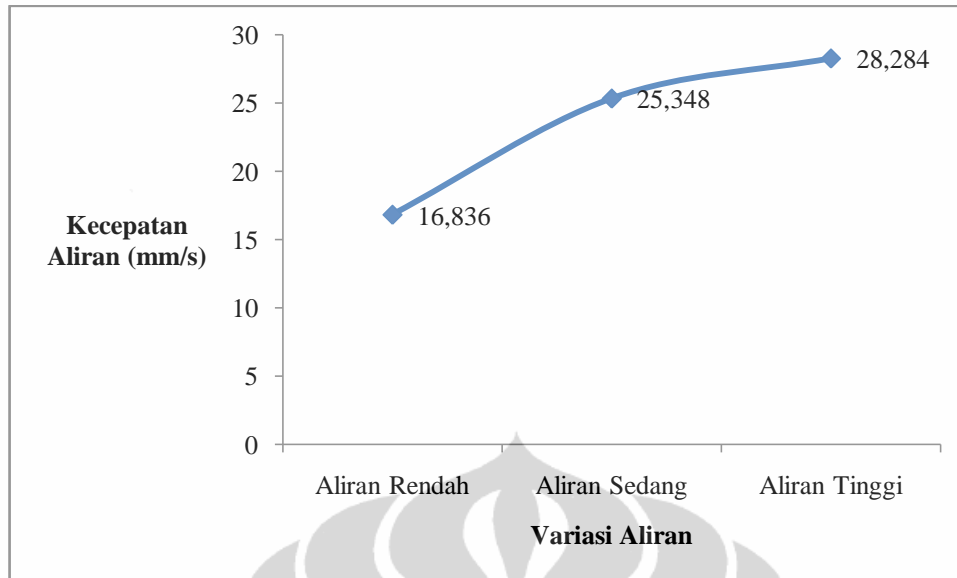
Dari Gambar 4.13 dapat diamati juga bahwa aliran yang ditimbulkan oleh gelembung hidrogen pada bagian hulu bola golf mendekati bola golf atau bagian

atas bola golf, berbeda dengan aliran yang melewati bola biasa. Terlihat terbentuk lagi garis tipis di bagian hulu, garis ini diperoleh karena adanya *dimple*, atau cekukan dipermukaan bola golf. Fenomena ini sangat berkaitan dengan teori yang dihasilkan oleh cekukan tersebut, cekukan tersebut membuat aliran yang lewat memiliki perbedaan kecepatan, dan dengan jarak cekukan yang tidak berjauhan satu sama lain, mengakibatkan pola kecepatan yang hampir sama dan mengakibatkan perbedaan tekanan yang semakin kecil. Dengan perbedaan tekanan yang makin kecil maka aliran disekitar bola golf menjadi semakin rapat dan mengurangi turbulensi pada bagian akhir bola, yang dalam percobaan ini tidak dapat terlihat.



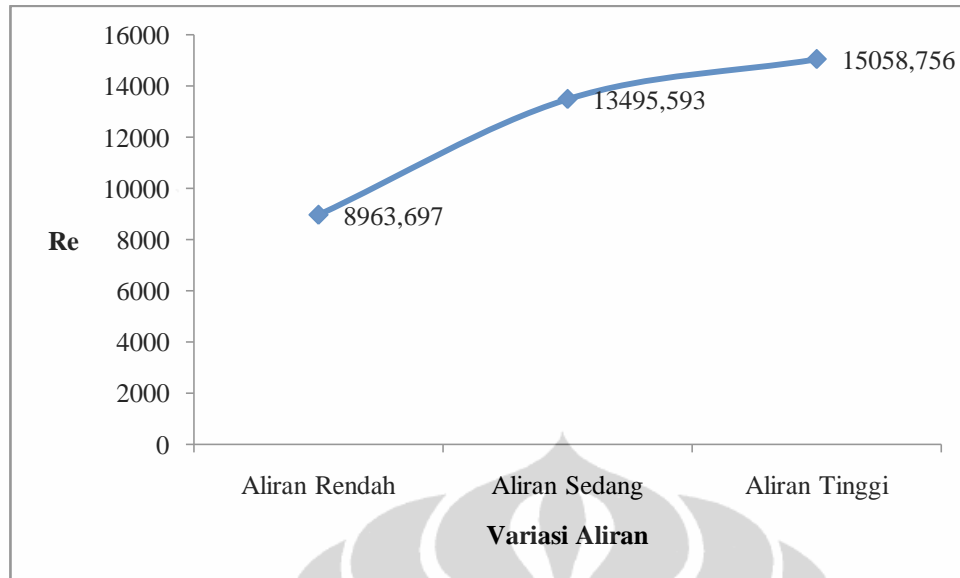
**Gambar 4.13** Jejak aliran di sekitar bola golf

Gambar 4.14 menggambarkan perbedaan kecepatan yang signifikan dari pengujian pertama, kedua dan ketiga. Pengujian pertama memiliki kecepatan 4,209 mm/s, kecepatan kedua 6,337 mm/s dan kecepatan ketiga 7,071 mm/s. Dilihat dari kenaikan nilai kecepatan yang didapat. Pengujian pertama memiliki kecepatan yang lebih rendah dari pada pengujian kedua, pengujian kedua lebih rendah dari pengujian ketiga dan pengujian pertama merupakan pengujian yang memiliki aliran yang berkecepatan paling rendah dibandingkan pengujian kedua dan ketiga. Kecepatan aliran fluida ini menentukan besarnya bilangan Reynolds.



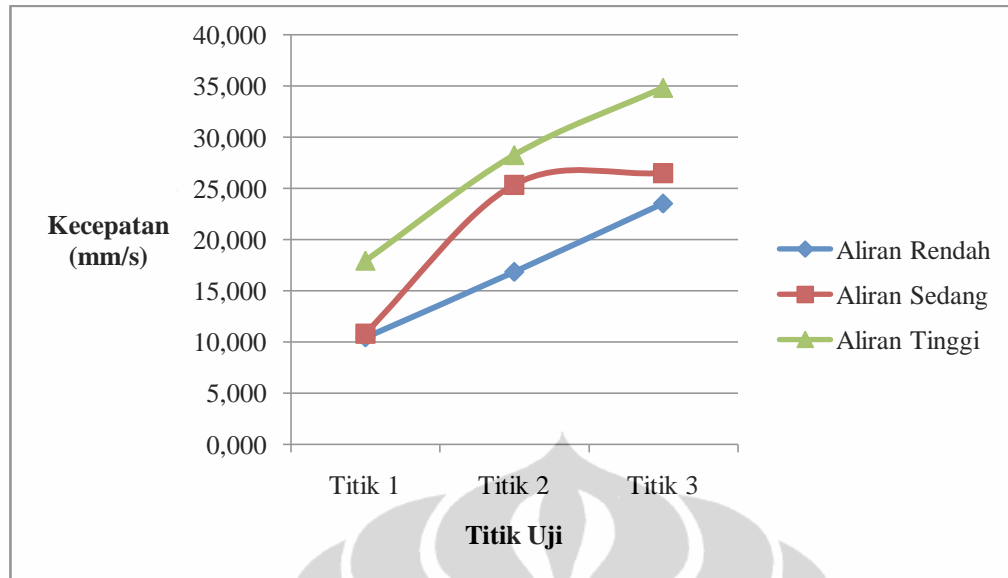
**Gambar 4.14** Perbedaan kecepatan pada aliran di sekitar bola golf

Pada aliran di sekitar bola, bilangan Reynolds dihitung berdasarkan diameter bola. Bilangan Reynolds berpengaruh terhadap kelaminaran fluida, hal ini dapat dilihat bahwa seiring dengan kenaikan bilangan Reynolds maka fluida menjadi semakin tidak laminar. Begitu pula pada Gambar 4.15 dari pengujian satu didapatkan nilai bilangan Reynolds 8963 yang lebih besar dari 4000 yang menandakan aliran yang terbentuk merupakan aliran turbulen. Di pengujian kedua naik menjadi 13495 dan masih masuk ke batasan aliran turbulen. Pada pengujian ketiga menjadi lebih tinggi, yaitu 15058 dan masih merupakan aliran turbulen. Hasil perhitungan ini diperkuat dengan jejak aliran yang masih berupa jejak lurus namun tidak seragam dan sudah mulai hilang jejak alirannya di bagian hilir.



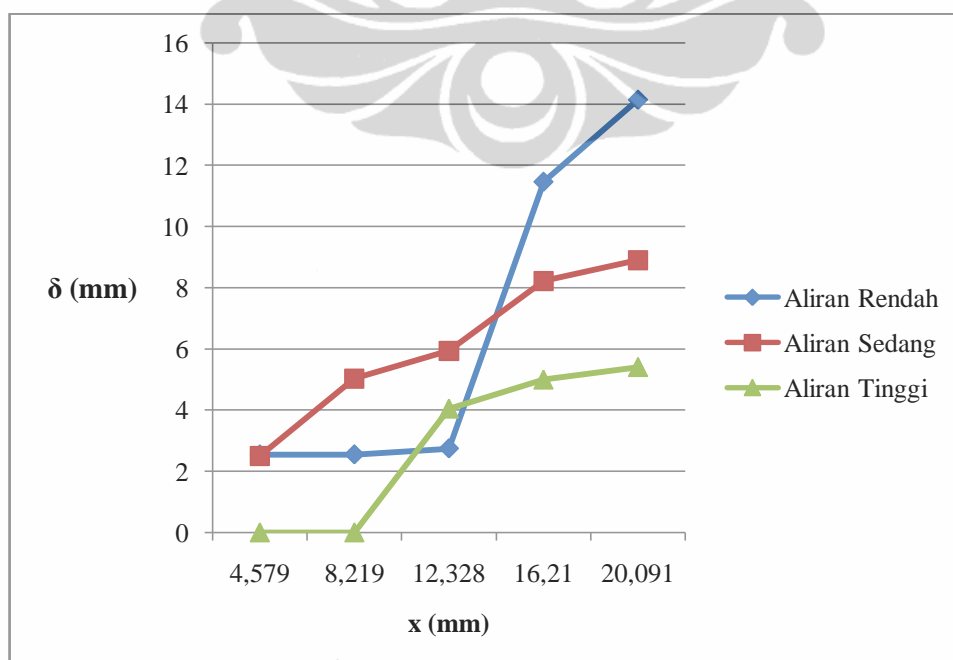
**Gambar 4.15** Pengaruh bilangan Reynolds di kecepatan sekitar bola golf  
 Bilangan Reynolds yang tinggi dibarengi dengan kecepatan yang tinggi mengakibatkan jejak yang dihasilkan oleh gelembung hidrogen menjadi tidak beraturan, bisa dilihat pada bagian atas aliran di sekitar bola. Terbentuk olakan-olakan yang tidak beraturan.

Pada aliran yang melewati bola terjadi kenaikan kecepatan dari bagian hulu sampai ke hilir, dengan mengambil 3 titik seperti diperlihatkan pada Gambar 4.8 yaitu bagian awal, tengah dan akhir aliran yang melewati bola dan masih bisa diamati kita bisa mengetahui kenaikan kecepatan yang terjadi. Gambar 4.16 menggambarkan kenaikan kecepatan ini pada ketiga titik tersebut, pengujian pertama memiliki kecepatan yang paling rendah karena gelembung hidrogen belum mengenai bola. Pengujian kedua mengalami kenaikan kecepatan pada saat aliran tepat mengenai bola golf dan pada pengujian terakhir yang dilakukan pada titik tepat diatas bola terjadi kenaikan kecepatan yang paling tinggi. Kenaikan yang begitu besar ini diakibatkan oleh pengaruh tekanan yang terjadi akibat gesekan aliran antara aliran dengan permukaan bola.



**Gambar 4.16** Pengukuran 3 titik kecepatan pada aliran sekitar bola golf (awal aliran, sebelum mengenai bola dan di bagian atas bola)

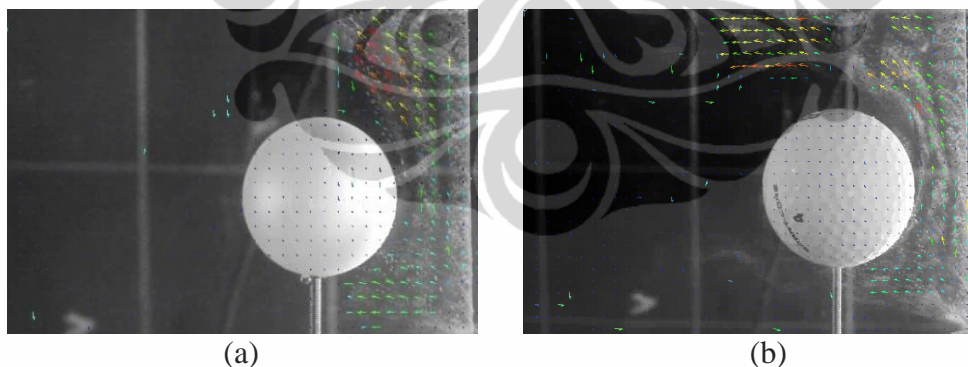
Pengukuran lapisan batas dilakukan dengan menghitung ketebalan lapisan batas yang terbentuk di sekitar bola terhadap diameter bola yang diperlihatkan pada Gambar 4.10. Lapisan batas yang terbentuk ketebalannya cenderung naik dari sisi terluar sampai sisi kedalam bola, yang bisa dilihat pada Gambar 4.17. Kenaikan ketebalan ini berbanding terbalik dengan kecepatan aliran. Semakin tinggi kecepatan aliran maka semakin kecil ketebalan lapisan batasnya. Hal ini sesuai dengan yang diungkapkan Monsoon, 2012.



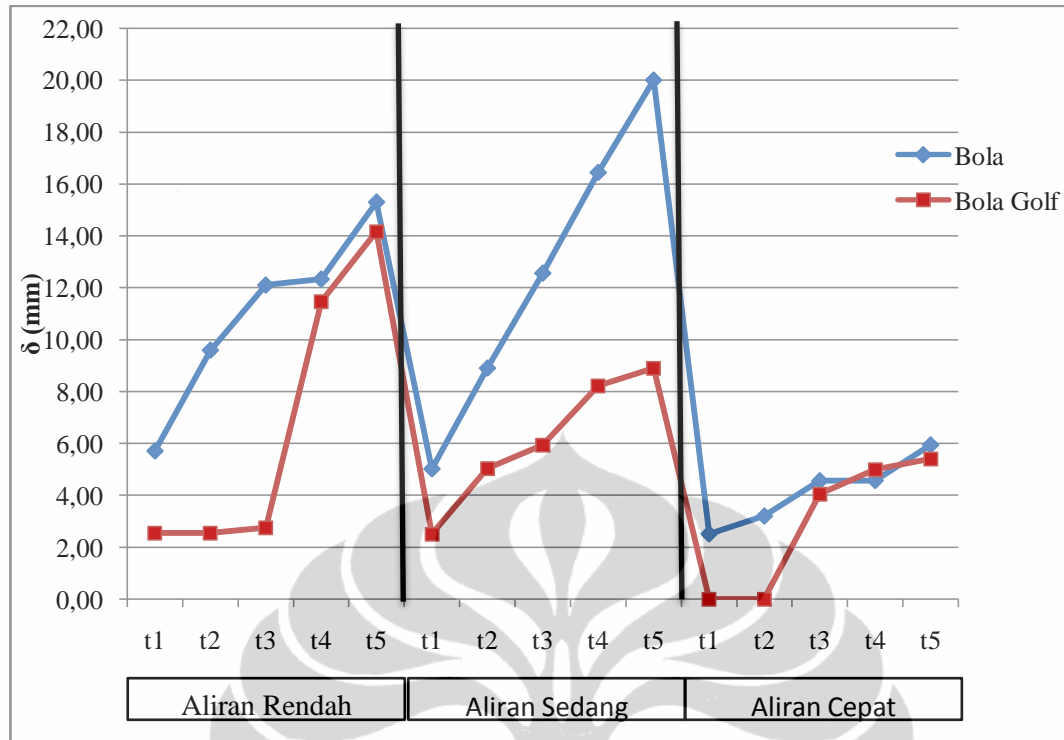
**Gambar 4.17** Pengukuran lapisan batas di sekitar bola golf



Perbedaan jejak antara bola golf dan bola biasa dilihat pada gambar 4.18. Pada gambar ini terlihat jelas pada bagian atas bola golf memiliki jejak aliran yang lebih rapat dibandingkan dengan bola biasa. Pada aliran yang mengenai bola biasa di permukaannya terjadi drag/hambatan udara yang sangat besar dibanding dengan permukaan bola golf yang dibuat tidak rata. Permukaan tidak rata (bisa disebut juga *roughness*) pada permukaan bola golf menimbulkan efek turbulensi pada aliran udara lapisan permukaan bola golf. Turbulensi pada lapisan permukaan ini mempunyai tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan area aliran udara disekeliling bola golf sehingga aliran turbulensi pada lapisan permukaan bola golf ini mengurangi sebagian udara disisi belakang (terhadap arah laju bola golf) yang lebih lanjut lagi akan menyebabkan separasi udara pada sisi bola berkurang dan sedikit mundur pada bagian belakang bola golf serta menyebabkan berkurangnya batas separasi udara atau lapisan batas dengan permukaan bola golf (Chang Hsei, 2006). Diperkuat juga dengan gambar 4.19 ketebalan lapisan batas pada bola lebih besar bila dibandingkan dengan bola golf. Sehingga kemungkinan pembentukan lapisan batas pada bola golf akan lebih lambat daripada bola biasa karena perbedaan tekanan yang lebih kecil daripada bola biasa.



**Gambar 4.18** Perbedaan jejak aliran disekeliling bola dan bola golf  
 (a) jejak aliran disekeliling bola, (b) jejak aliran disekeliling bola golf



**Gambar 4.19** Perbandingan lapisan batas pada bola dan bola golf

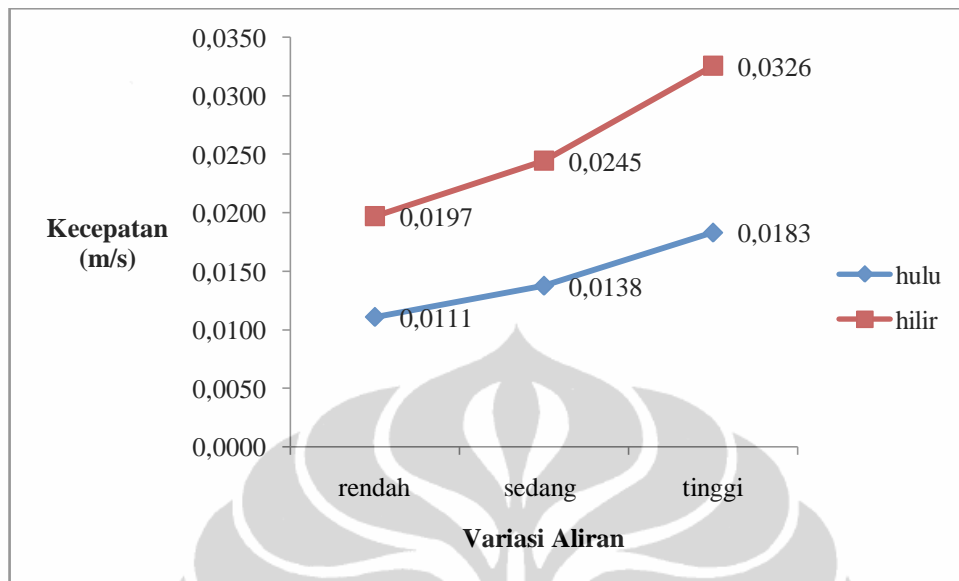
#### 4.2.4 Pengukuran Aliran Terhadap Penambahan *Orifice*

Pada pengukuran ini *orifice* yang digunakan mempunyai diameter 4cm dan diameter lubang *orifice* sebesar 3cm. Pengukuran perbedaan tekanan dilakukan dengan menambahkan manometer yang berisi alkohol. Jarak antar manometer atau *taps* adalah 1 dan 1,5 kali diameter dalam *orifice*, atau disebut juga *vena contra taps*. Data yang diambil menggunakan kamera dengan kecepatan 25 frame/seconds dengan tiga nilai kecepatan yang berbeda. Dari masing-masing kecepatan diambil 3 data yang representatif dan dapat diukur perbedaan kecepatannya.

Gambar 4.20 menunjukkan perbedaan kecepatan di bagian hulu dan hilir *orifice* pada 3 variasi pengujian. Terjadi kenaikan kecepatan dari masing-masing pengujian 1,2 dan 3 yang diatur lebih tinggi dari pengujian 1 ke pengujian 2 dan ke pengujian 3. Perbedaan kecepatan terjadi pada kecepatan pertama dan kedua, kecepatan kedua lebih tinggi daripada kecepatan pertama. Kecepatan pertama diukur pada bagian hulu *orifice* dan kecepatan kedua diukur pada bagian hilir *orifice*. Perbedaan kecepatan ini terjadi karena aliran yang masuk ke dalam *orifice* akan mengalami penyempitan saat melalui bagian tengah *orifice*. Penyempitan ini

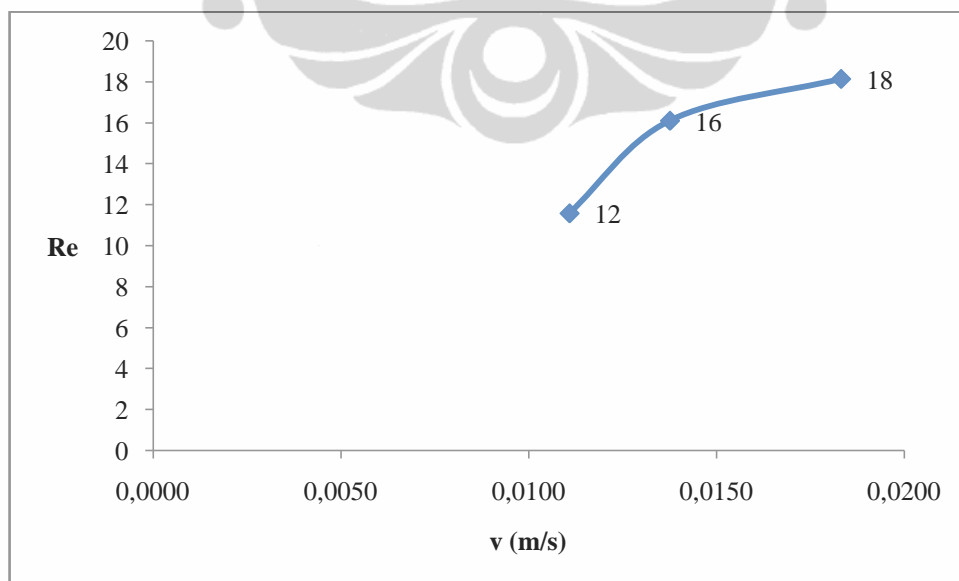


mengakibatkan kenaikan tekanan dan menaikkan kecepatan setelah melewati bagian tengah *orifice*.



**Gambar 4.20.** Perbedaan kecepatan pada variasi pengujian

Bilangan Reynolds yang tinggi menghasilkan kecepatan yang tinggi, karena nilai kecepatan sebanding terhadap bilangan Reynolds. Hal ini bisa dilihat pada Gambar 4.21. Pada kecepatan rendah diperoleh nilai  $Re$  yang cukup rendah yang dihitung berdasarkan hydraulic radius *orifice*, yaitu 12, pada kecepatan sedang terjadi kenaikan nilai  $Re$  dari sebelumnya yaitu sebesar 16 dan untuk kecepatan yang lebih tinggi lagi terjadi kenaikan nilai  $Re$  18.

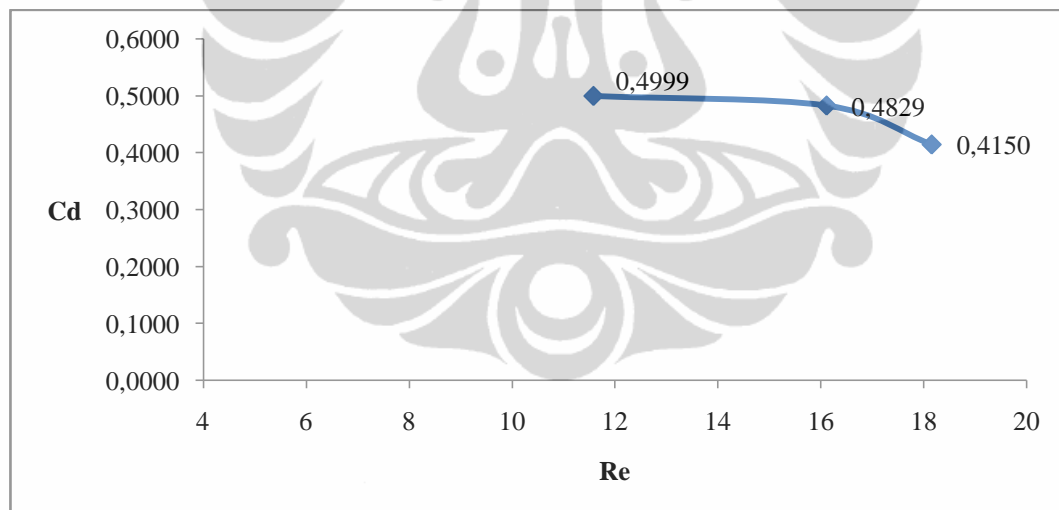


**Gambar 4.21** Perbedaan bilangan Reynolds terhadap kecepatan di *orifice*

$C_d$  adalah koefisien *orifice* yang telah memperhitungkan kecepatan aliran yang masuk ke dalam *orifice*. Koefisien ini ditentukan dari pengujian yang dilakukan terhadap perubahan rasio diameter *orifice*. Pengaruh nilai koefisien ini diperlihatkan pada Gambar 4.22. Dengan kenaikan nilai Reynolds yang sebanding dengan kenaikan kecepatan aliran seperti dijelaskan pada Gambar sebelumnya, terjadi penurunan nilai koefisien *orifice*. Nilai koefisien ini turun dikarenakan berbanding terbalik dengan kecepatan, yang sebanding dengan bilangan Reynolds dan diturunkan melalui persamaan berikut 3.12, yaitu

$$C_d = \frac{\frac{A_2}{A_1} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - (A_2/V_1)^2)}}}{V_1}$$

Nilai  $C_d$  diperoleh dengan membandingkan keadaan pada hulu dan hilir *orifice*, yaitu luas area terhadap kecepatan yang memasuki *orifice*. Penurunan nilai koefisien ini akan semakin kecil dengan naiknya bilangan Reynolds pada *orifice* (Munson, 2003).

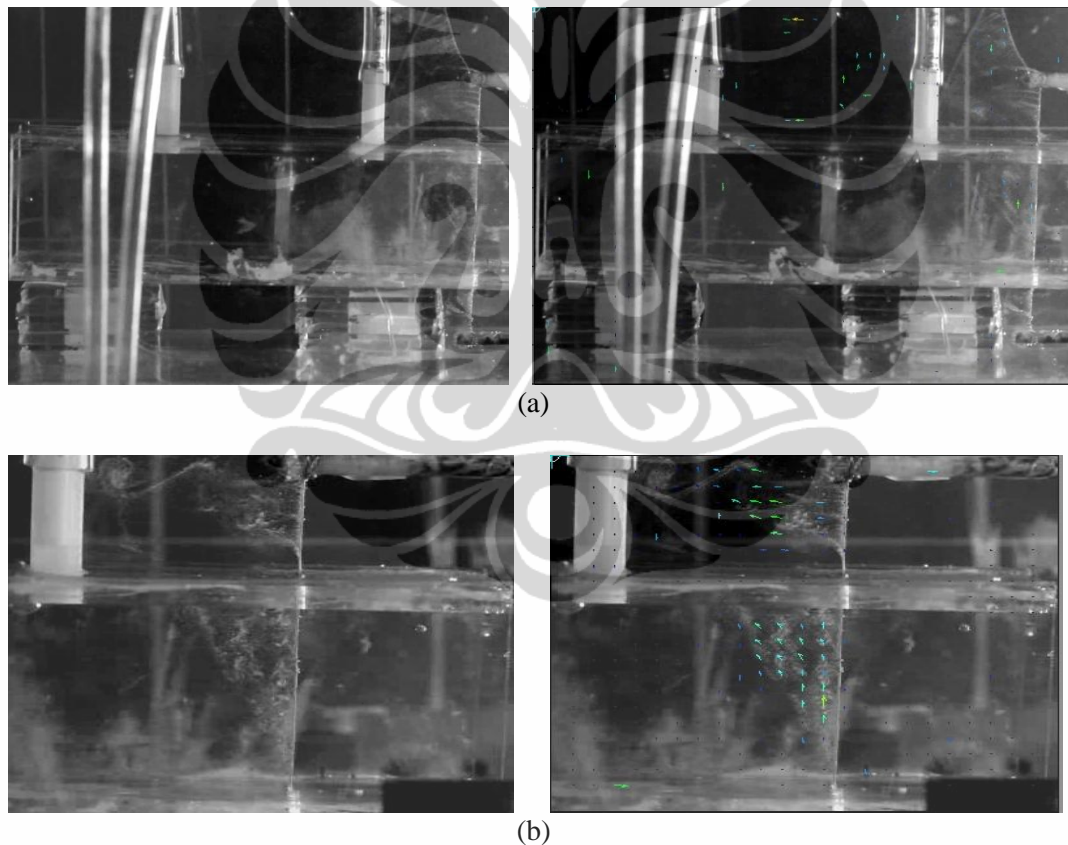


**Gambar 4.22** Pengaruh nilai Re terhadap  $C_d$

Adanya penambahan *orifice* dalam suatu aliran fluida dapat dianggap sebagai suatu *immersed body* yang akan mengganggu aliran di dalamnya, yang diperlihatkan pada Gambar 3.6. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya *wake region* yang mengandung *vortex* sehingga aliran mengalami separasi. *Vortex* ini akan meningkatkan akumulasi *vorticity* pada bagian hilir *orifice* setelah aliran mengalami relaksasi yang mempunyai kontribusi terhadap perkembangan

*boundary layer* dan mengakibatkan terjadinya *losses* pada aliran yang diwujudkan dengan adanya *pressure drop* sepanjang dinding saluran.

Penambahan *orifice* ini menimbulkan *drag force* pada *up stream* sehingga aliran mengalami separasi pada *down stream region*. Proses yang terjadi di dalam *orifice* bisa dilihat pada Gambar 4.23. Di bagian (a) tidak terlihat begitu jelas aliran yang terbentuk, maka di perbesar menjadi bagian (b). Aliran bagian b cukup terlihat jejak yang timbul, dimana aliran yang dihasilkan masih belum cukup sama dan bisa terlihat di seluruh bagian *orifice*. Hal ini disebabkan pengaruh nilai kecepatan yang terlalu rendah di bagian hulu, sehingga gelembung hidrogen yang terbentuk tidak sanggup dialirkan oleh fluida alir yang bergerak.



**Gambar 4.23** Aliran dan jejaknya di dalam *orifice*  
 (a) aliran di dalam *orifice*, (b) pembesaran aliran di dalam *orifice*

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 SIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

- a. Alat gelembung hidrogen yang dibuat telah dapat memvisualisasikan aliran namun karena pengaruh getaran dari alat ini, membuat aliran yang terbentuk tidak terbentuk sempurna di bagian hilir fluida. Getaran juga mempengaruhi kelaminaran dari fluida mengakibatkan aliran yang terbentuk memiliki intensitas turbulensi yang cukup tinggi. Intensitas turbulensi yang paling rendah ditunjukkan pada aliran sedang, yaitu 10,59 dengan kecepatan rata-rata 28,24 mm/s.
- b. Profil kecepatan yang terbentuk di sekitar bola dan bola golf hanya bisa diamati sampai bagian tengah bola yang menyebabkan tidak bisa teramatinya boundary layer yang terbentuk di bagian hilir. Terjadinya kenaikan kecepatan sepanjang pergerakan dari hulu menuju hilir aliran yang melalui bola dan bola golf. Nilai Re yang diperoleh pada rentang 5000-18000
- c. Penambahan orifice pada aliran menyebabkan terjadinya perubahan tekanan dan kecepatan di bagian hulu sampe hilir, namun tidak bisa diamati sampai bagian hilir dikarenakan gelembung hidrogen yang dihasilkan tidak bisa mencapainya. Rata-rata nilai coefficient discharge yang diperoleh pada rentang Re 12 sampai 18 adalah 0,4660.

#### 5.2 SARAN

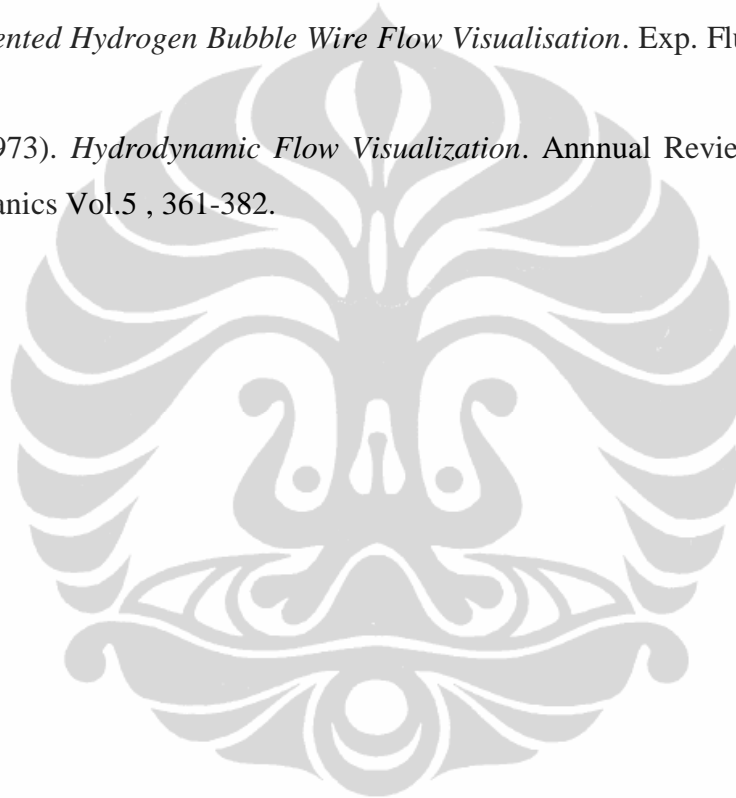
Saran yang dapat diberikan oleh penulis antara lain :

- a. Mengurangi getaran yang terjadi pada terowongan air dengan memperbesar jarak terowongan air terhadap titik uji.
- b. Menentukan kelaminaran fluida terlebih dahulu agar aliran gelembung hidrogen yang dihasilkan dapat diamati secara penuh dari hulu sampai ke hilir.
- c. Menggunakan metode lain, yaitu dengan menggunakan gas hidrogen yang langsung (bukan produk hasil elektrolisis) serta dialirkan melalui pipa yang berlubang.
- d. Dilakukan pengukuran *drag coefficient* dari bola dan bola golf.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bruneau, S. D. (1992). *Digital Image Processing of Hydrogen Bubble Lines for Instantaneous Velocity Profiles*. Pennsylvania.
- Chang Hsien Tai, Chih Yeh Chao, Jik Chang Leong, Qing Shan Hong. (2006). *Effect of Golf Ball Dimple Configuration on Aerodynamics, Trajectory, And Acoustics*.
- Clayton, B. R., & Massey, B. S. (1967). *Flow Visualization in Water : a Review of Techniques*. Journal of Scientific Instrumen Volume 4 , 2-11.
- Clutter, D. W., & Smith, A. M. (1961). *Flow Visualization by Electrolysis of Water*. Aerospace Engineering, 24-76.
- Geankoplis, C. J. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles 4th Edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- Geller, E. W. (1955). *An Electrochemical Method of Visualizing the Boundary Layer*. Journal Scientific Aeronaut Vol 22 No. 12 , 869-870.
- Keenan dan Kleinfelter. 1979. *Kimia Fisik Untuk Universitas*. Jakarta: Erlangga.
- Kothandaraman, C. (2007). *Fluid Mechanics and Machinery 2nd Edition*. New Delhi: New Age International Limited Publisher.
- Massey, B. (2001). *Mechanics of Fluids 8th Edition*. Londond: Taylor and Francis.
- Milazzo, G. (1963). *Electrochemistry, Theoretical Principles and Practical Applications* . Amsterdam: Elsevier Pub Co.
- Mulyadi, Muhamad. 2009. *Analisis Aerodinamika Pada Sayap Pesawat Terbang Dengan Menggunakan Software Berbasis Computational Fluida Dynamics (CFD)*.
- Young, Hugh. 2002. *Fisika Universitas*. Jakarta: Erlangga
- Munson, B. R., Young, F. D., & Okiishi, H. T. (2005). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. English: Wiley.
- Nevers, N. d. (2005). *Fluid Mechanics for Chemical Engineering*. New York: Mc Graw-Hill.
- R, B., & R, P. (1989). *Two New Circuits for Hydrogen Bubble Flow Visualisation*. J. Phys. E: Sci. Instrum , 250-254.

- S, M. (1980). *Flow Visualisation by Hydrogen Bubble technique and its use in some Fluid problems.*
- Schwind, F. A., & Kline, S. J. (1965). *Use of Hydrogen Bubble for Quantitative Determination of Time Dependent Velocity Fields in Low Speed Water Flows.* Journal of Basic Engineering Volume (Smith & Paxson, 1983). 87 , 429-444.
- Smith, C. R., & Paxson, R. D. (1983). *A Technique for Evaluation of Three Dimensional Behaviour in Turbulent Boundary Layers Using Computer Augmented Hydrogen Bubble Wire Flow Visualisation.* Exp. Fluida 1 , 43-49.
- Werle, H. (1973). *Hydrodynamic Flow Visualization.* Annual Review of Fluid Mechanics Vol.5 , 361-382.



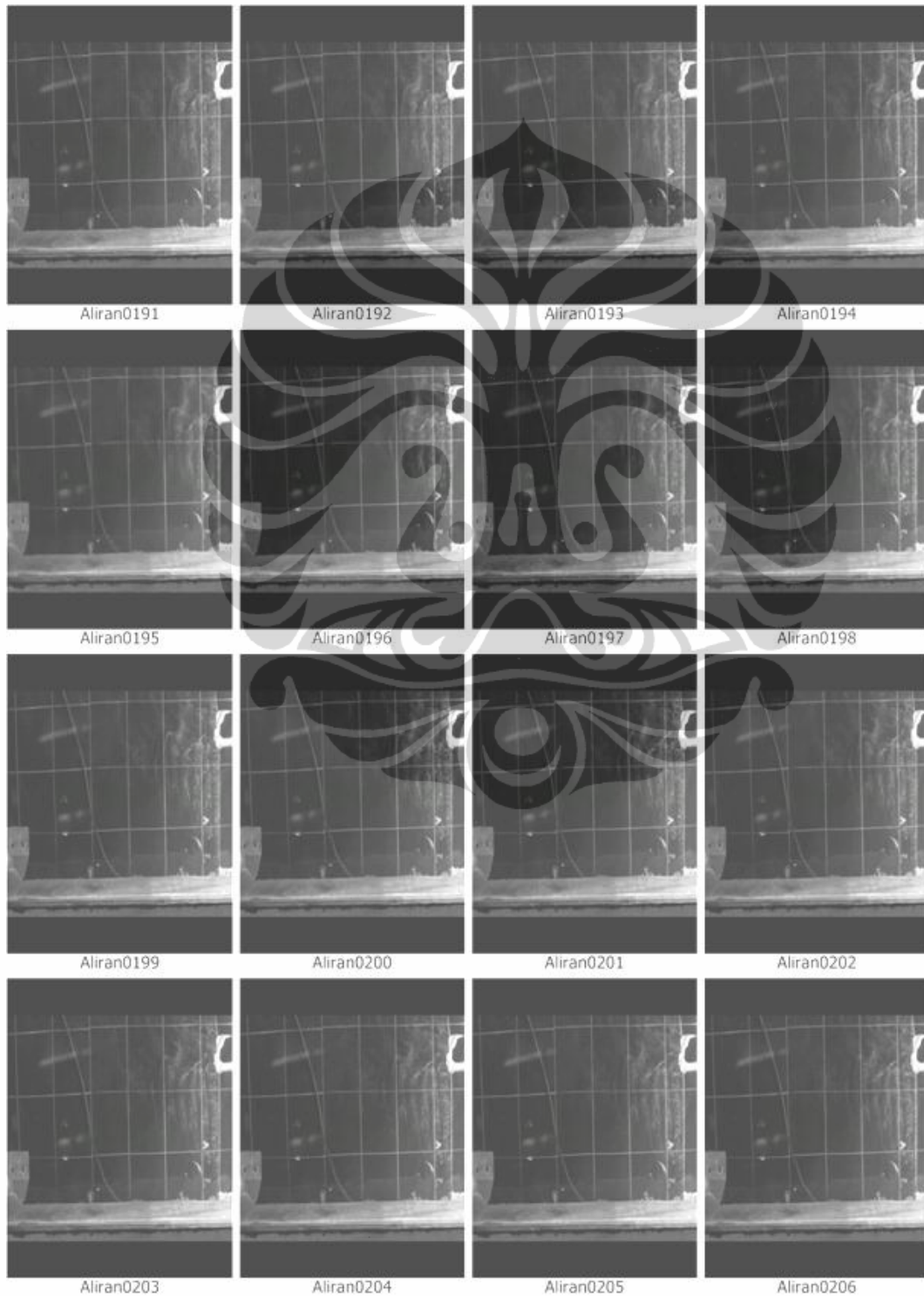
## LAMPIRAN 1

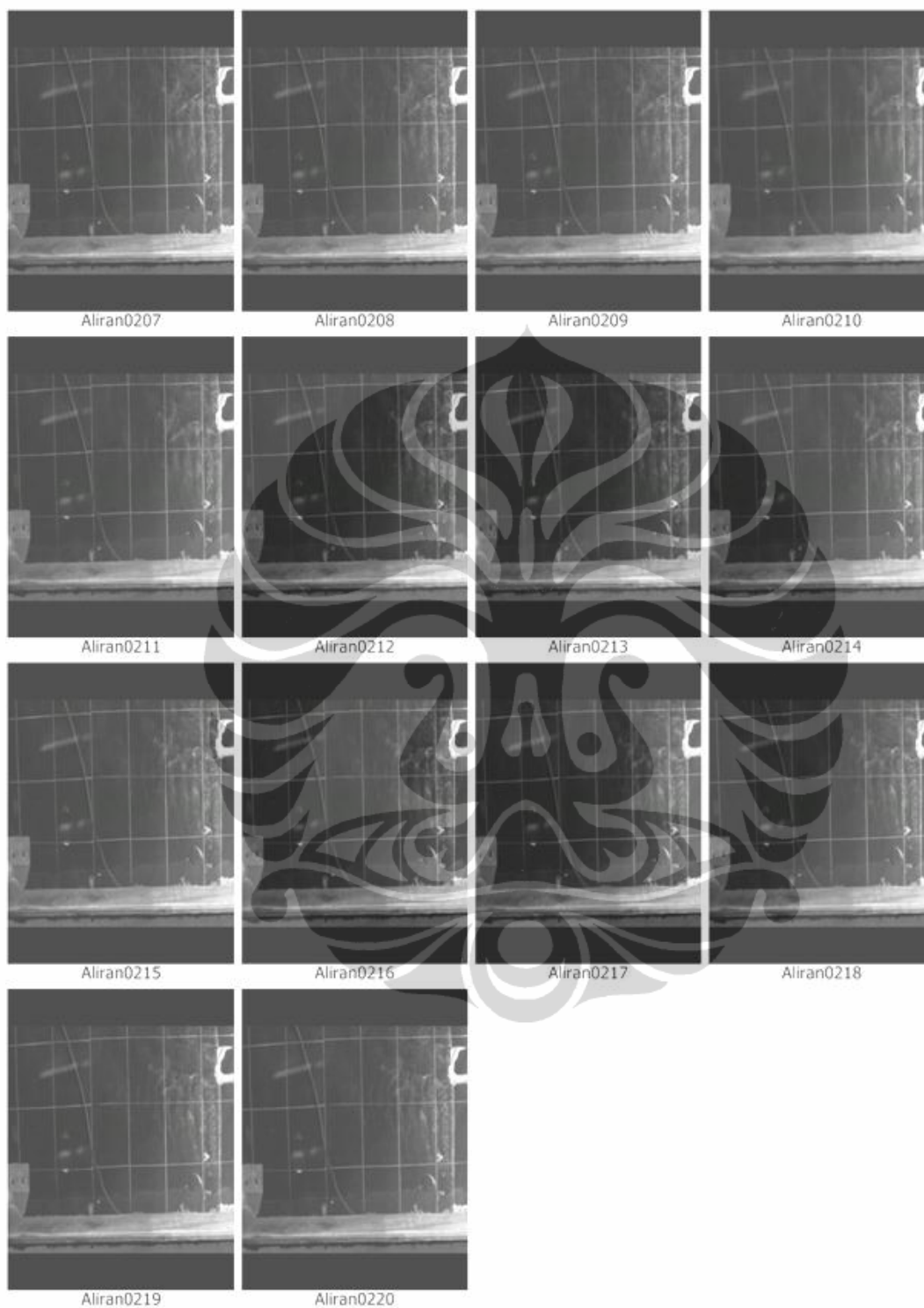
### DATA PENGAMATAN

#### 1.1 Data Pengambilan Gambar pada Aliran Terowongan Air

##### 1.1.1 Aliran Rendah

Gambar dari masing-masing frame dimulai dari frame 191 sepanjang pengamatan.



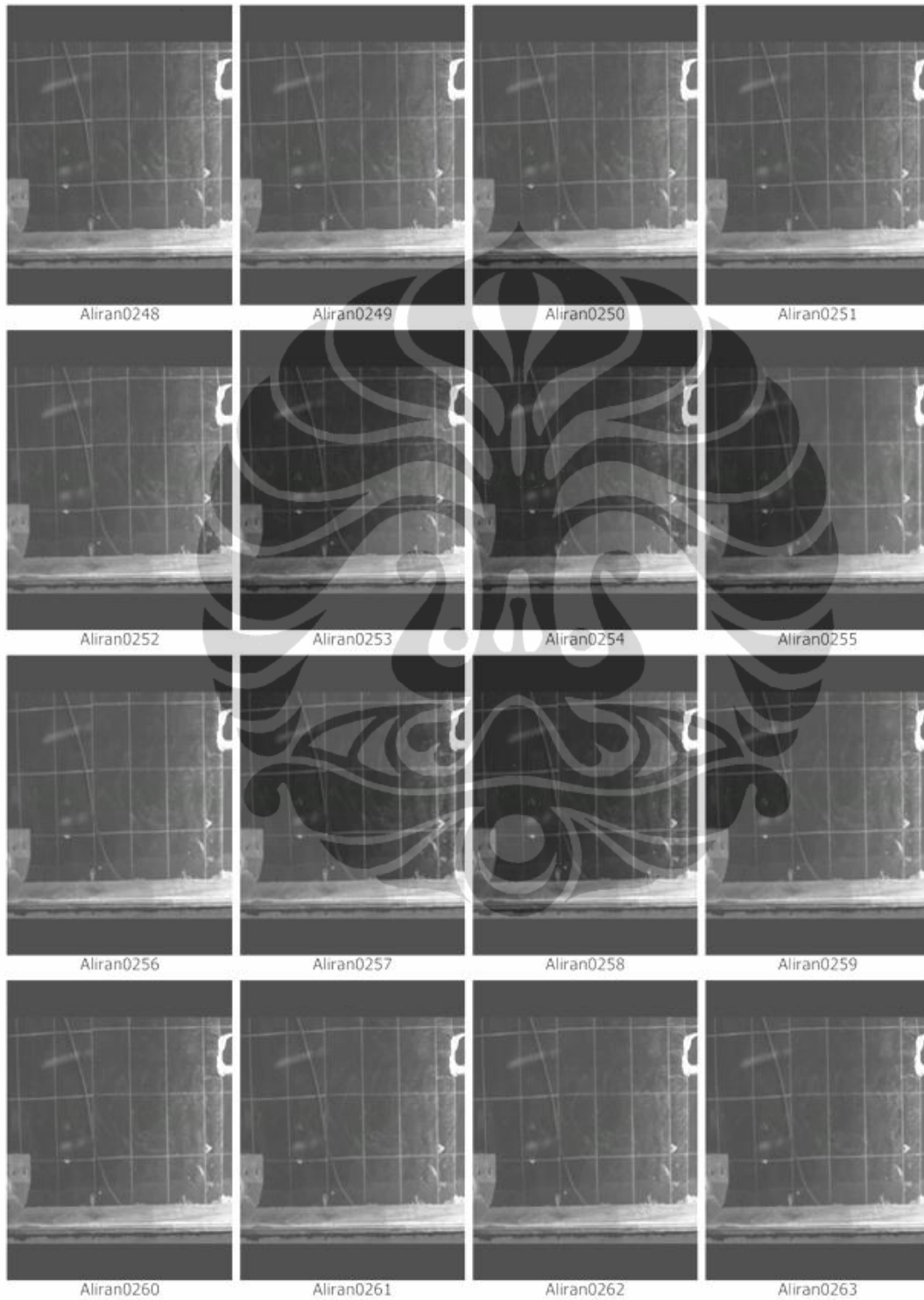


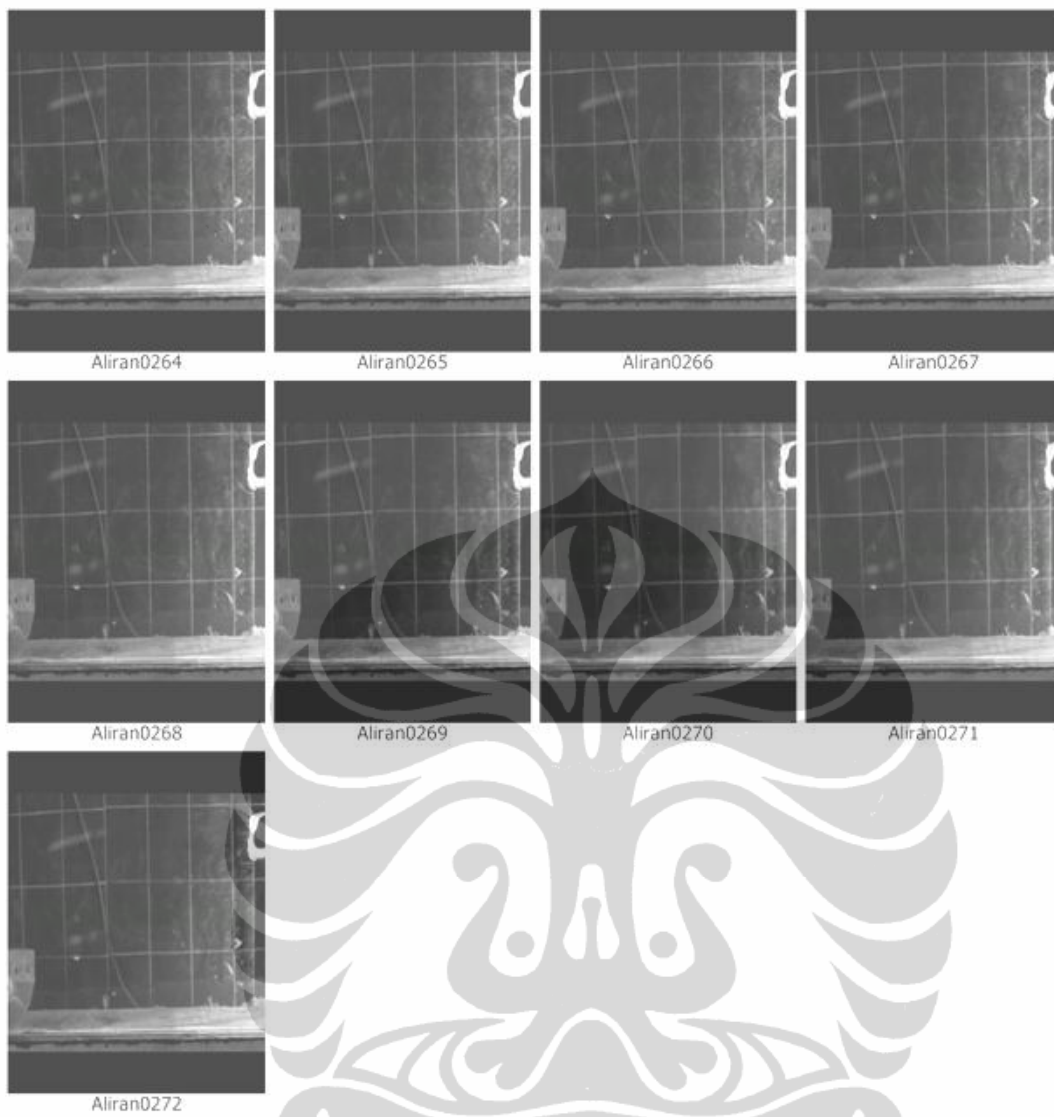
Gambar 1.1 Pengambilan Gambar pada Aliran Rendah



### 1.1.2 Aliran Sedang

Gambar dari masing-masing frame dimulai dari frame 248 sepanjang pengamatan

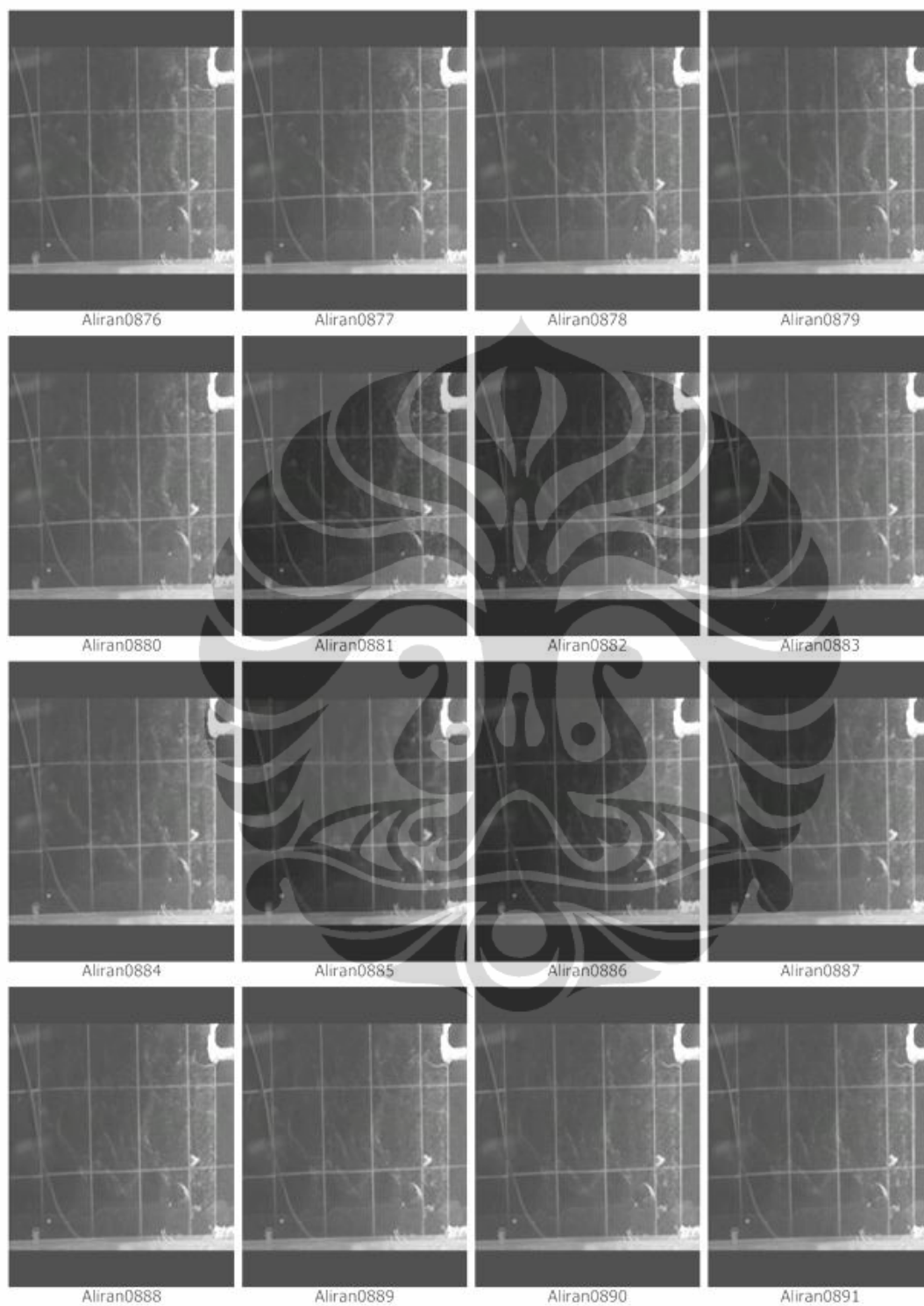


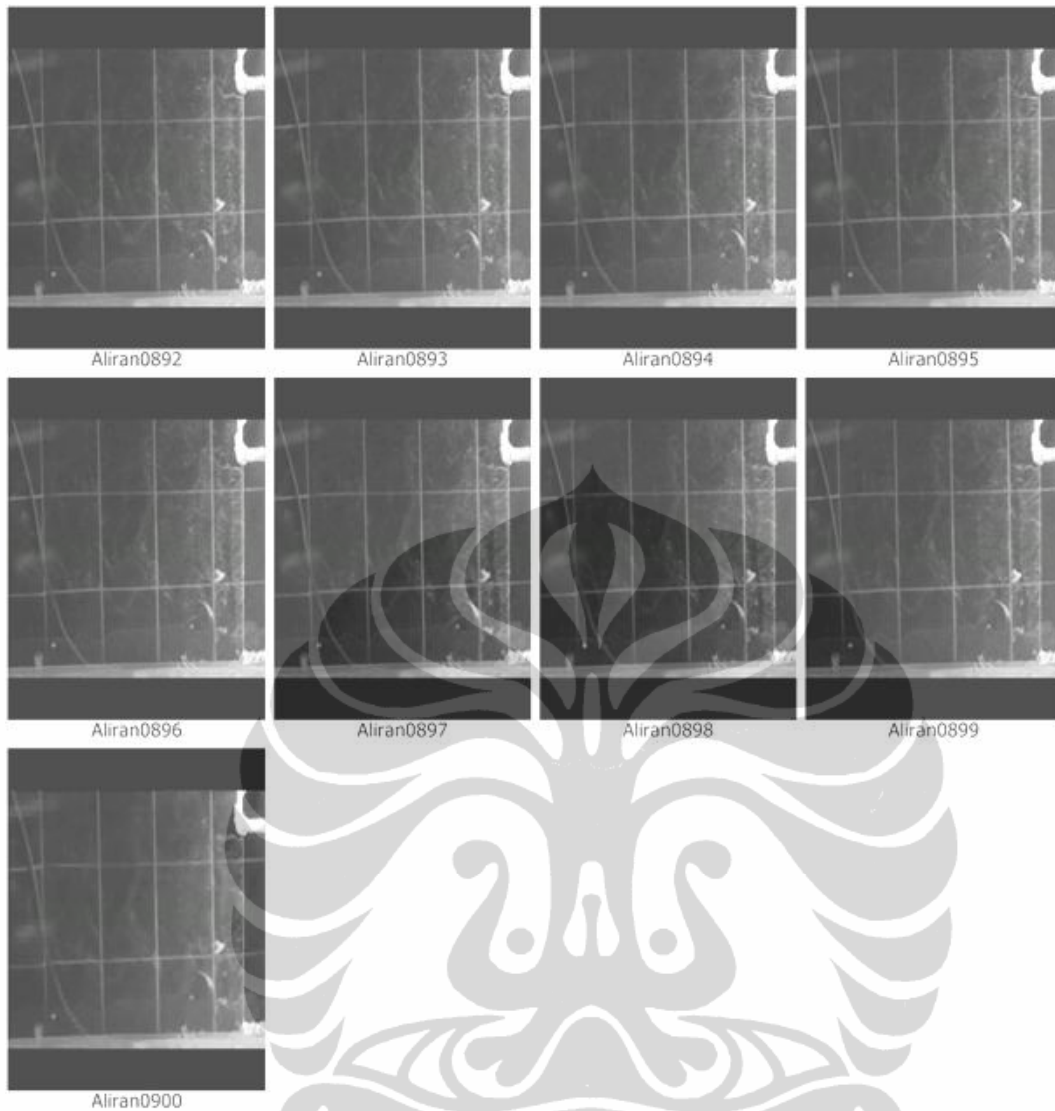


Gambar 1.2 Pengambilan gambar di aliran sedang

### 1.1.3 Aliran Tinggi

Gambar dari masing-masing frame dimulai dari frame 876 sepanjang pengamatan

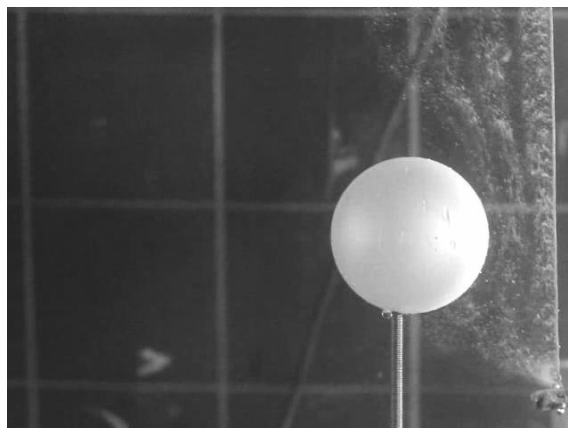




Gambar 1.3 Pengambilan gambar pada aliran tinggi

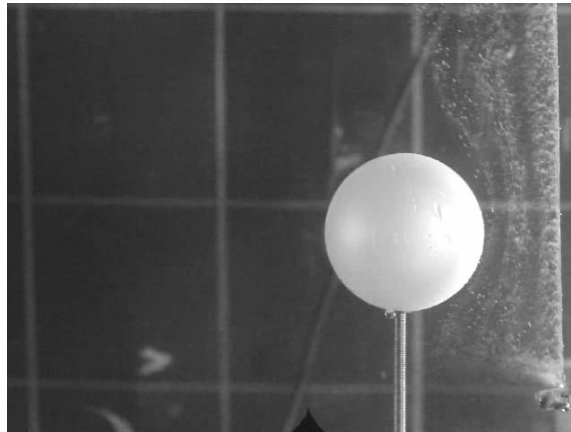
## 1.2 Data Pengambilan Gambar pada Aliran yang Melewati Bola

### 1.2.1 Aliran Rendah



Gambar 1.4 Aliran yang melewati bola pada kecepatan rendah

### 1.2.2 Aliran Sedang



Gambar 1.5 Aliran yang melewati bola pada kecepatan sedang

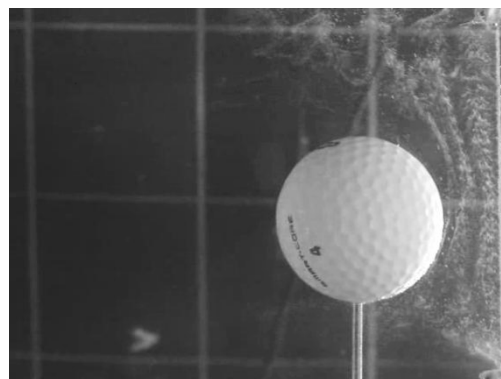
### 1.2.3 Aliran Tinggi



Gambar 1.5 Aliran yang melewati bola pada kecepatan tinggi

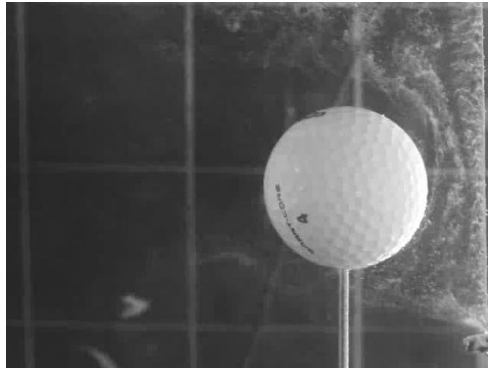
## 1.3 Data Pengambilan Gambar pada Aliran yang Melewati Bola Golf

### 1.3.1 Aliran Rendah



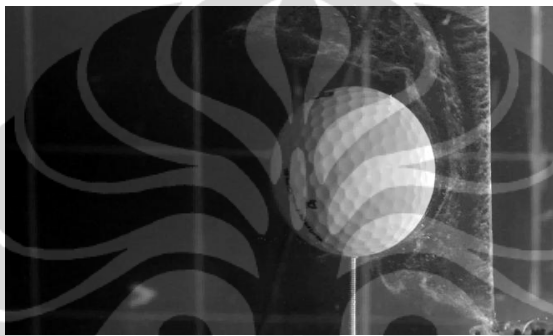
Gambar 1.6 Aliran yang melewati bola golf pada kecepatan rendah

### 1.3.2 Aliran Sedang



Gambar 1.7 Aliran yang melewati bola golf pada kecepatan sedang

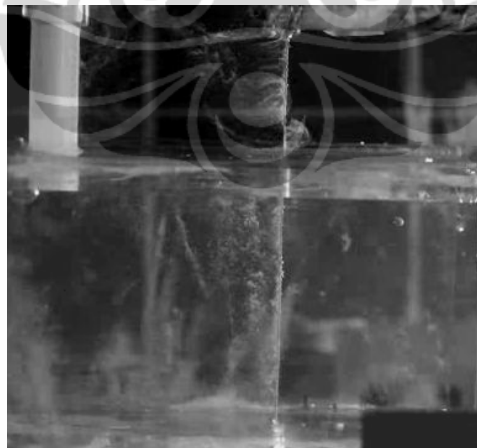
### 1.3.3 Aliran Tinggi



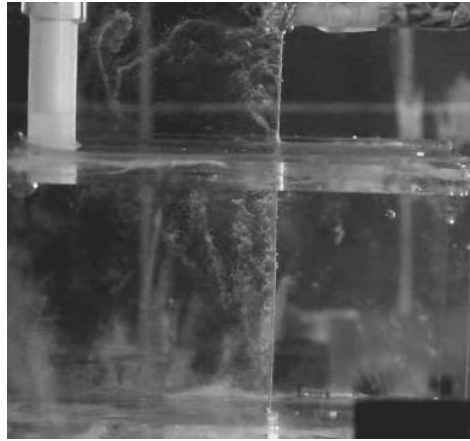
Gambar 1.8 Aliran yang melewati bola golf pada kecepatan rendah

## 1.4 Data Pengambilan Gambar pada Aliran yang Melewati *Orifice*

### 1.4.1 Aliran Rendah



Gambar 1.9 Aliran yang melewati *orifice* pada pengujian pertama

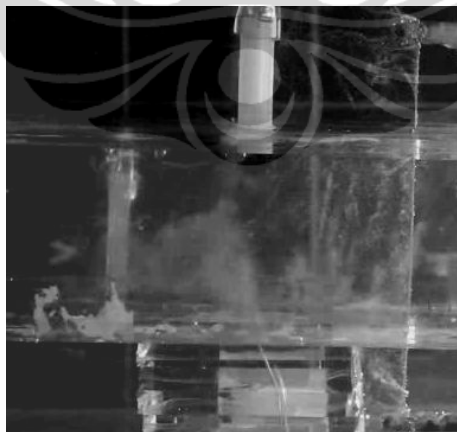


Gambar 1.10 Aliran yang melewati *orifice* pada pengujian kedua



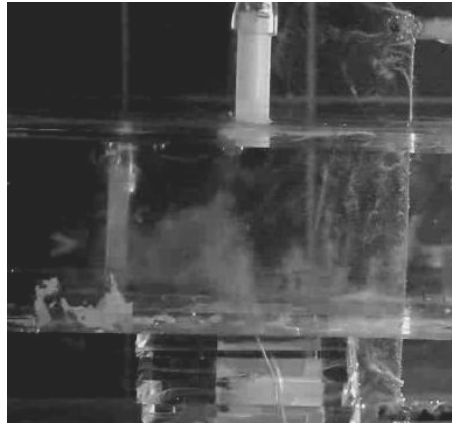
Gambar 1.11 Aliran yang melewati *orifice* pengujian ketiga

#### 1.4.2 Aliran Sedang



Gambar 1.12 Aliran yang melewati *orifice* pada pengujian pertama





Gambar 1.13 Aliran yang melewati *orifice* pada pengujian kedua



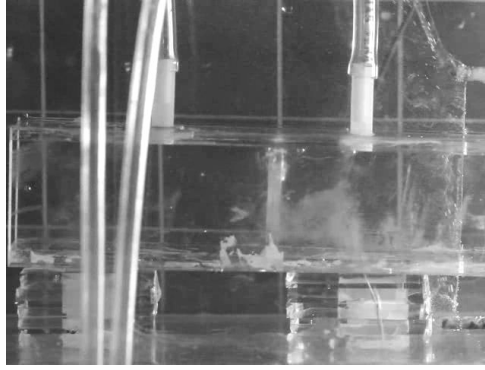
Gambar 1.14 Aliran yang melewati *orifice* pada pengujian ketiga

### 1.4.3 Aliran Tinggi



Gambar 1.15 Aliran yang melewati *orifice* pada pengujian pertama





Gambar 1.16 Aliran yang melewati *orifice* pada pengujian kedua



Gambar 1.17 Aliran yang melewati *orifice* pada pengujian ketiga

## LAMPIRAN 2

### PENGOLAHAN DATA

#### 2.1 Perhitungan Jarak Alir di Aliran Fluida

Jarak alir dihitung pada aliran fluida dengan menggunakan software PIView yang sebelumnya gambar diproses dengan VirtualDub, berikut ini tahapannya :

- Hasil video yang diperoleh di konversi menjadi file .mpeg atau .avi
- Proses berikutnya adalah mengubah video menjadi gambar menggunakan VirtualDub dan hasil gambarnya harus memiliki format .bmp
- Hasil gambar yang diperoleh diproses menggunakan PIView dengan mengkalibrasi jarak yang sebelumnya sudah diukur. Jarak yang diukur adalah jarak per 2 Hz pulsa yang dihasilkan. Jarak ini adalah pada saat gelembung hidrogen terbentuk sampai terbentuk lagi gelembung setelahnya yang diperlihatkan garis biru pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Penghitungan jarak aliran.

Kecepatan di aliran fluida secara keseluruhan dihitung dengan menarik hubungan antara frekuensi dan jarak aliran. Jarak aliran yang sebelumnya dihitung per 1 Hz frekuensi, sehingga perlu dikonversi menjadi 2 Hz sesuai alat yang digunakan.

#### 2.2 Perhitungan di Aliran Fluida

##### 2.2.1 Perhitungan Kecepatan dan Intensitas Turbulensi di Aliran Fluida Bebas

Kecepatan di aliran bebas fluida dihitung dengan mengukurnya pada satu titik dengan perbedaan waktu.. Persamaan yang digunakan adalah :

$$fps = \frac{\text{jumlah frame}}{\text{waktu (sec)}}$$

Jumlah frame yang dihitung selama gelembung hidrogen mulai terbentuk sampai ke titik yang ditentukan menghasilkan waktu yang ditempuh gelembung hidrogen, dan dengan mengetahui jarak titik yang telah ditentukan maka bisa menghitung kecepatannya

Intensitas turbulensi dihitung menggunakan persamaan :

$$T.I = \frac{\text{standar deviasi}}{\text{kecepatan rata - rata}}$$

- Kecepatan di aliran rendah

Contoh pengujian pertama :

$$fps = \frac{\text{jumlah frame}}{\text{waktu (sec)}}$$

$$\text{waktu (s)} = \frac{\text{jumlah frame}}{fps}$$

$$\text{waktu (s)} = \frac{15}{25 fps} = 0,6 s$$

0,6 s menempuh jarak 23,54 mm (kecepatan) sepanjang 1Hz

Untuk sepanjang 2 Hz :

$$\frac{23,54 \text{ mm}}{0,6 s} \times \frac{2 \text{ Hz}}{1 \text{ Hz}} = 14,2 \text{ mm/s}$$

	No	No. Foto	Jumlah frame	Fps	Jarak pengujian (mm)	frekuensi (Hz)	Kecepatan (mm/s)
Pengujian	1	263	15	25	23,854	2	28,62
	2	264	13	25	23,854	2	24,81
	3	265	13	25	23,854	2	24,81
	4	266	12	25	23,854	2	22,90
	5	267	15	25	23,854	2	28,62
	6	268	13	25	23,854	2	24,81
	7	269	13	25	23,854	2	24,81
	8	270	14	25	23,854	2	26,72
	9	271	13	25	23,854	2	24,81
	10	272	12	25	23,854	2	22,90
Kecepatan rata-rata							25,38
Standar deviasi							2,02

Tabel 2.1 Kecepatan fluida di aliran rendah

Menghitung intensitas turbulen

$$T.I = \frac{\text{standar deviasi}}{\text{kecepatan rata - rata}}$$

$$T.I = \frac{2,02}{25,38} = 12,55$$

- Kecepatan di aliran sedang

Sedang	2282	No. Foto	Jumlah frame	Fps	Jarak pengujian (mm)	frekuensi (Hz)	Kecepatan
Pengujian	1	891	15	25	23,854	2	28,62
	2	892	15	25	23,854	2	28,62
	3	893	17	25	23,854	2	32,44
	4	894	17	25	23,854	2	32,44
	5	895	15	25	23,854	2	28,62
	6	896	13	25	23,854	2	24,81
	7	897	14	25	23,854	2	26,72
	8	898	14	25	23,854	2	26,72
	9	899	13	25	23,854	2	24,81
	10	900	15	25	23,854	2	28,62
Kecepatan rata-rata							28,24
Standar deviasi							2,67

Tabel 2.2 Kecepatan fluida di aliran sedang

Menghitung intensitas turbulen

$$T.I = \frac{\text{standar deviasi}}{\text{kecepatan rata - rata}}$$

$$T.I = \frac{2,67}{28,24} = 10,60$$

- Kecepatan di aliran tinggi

Tinggi	2280	No. Foto	Jumlah frame	Fps	Jarak pengujian (mm)	frekuensi (Hz)	Kecepatan
Pengujian	1	211	20	25	23,854	2	38,17
	2	212	21	25	23,854	2	40,07
	3	213	21	25	23,854	2	40,07
	4	214	22	25	23,854	2	41,98
	5	215	24	25	23,854	2	45,80
	6	216	22	25	23,854	2	41,98
	7	217	20	25	23,854	2	38,17
	8	218	21	25	23,854	2	40,07
	9	219	20	25	23,854	2	38,17
	10	220	24	25	23,854	2	45,80
Kecepatan rata-rata							41,03

Standar deviasi	2,88
-----------------	------

Tabel 2.3 Kecepatan fluida di aliran tinggi

Menghitung intensitas turbulen

$$T.I = \frac{\text{standar deviasi}}{\text{kecepatan rata - rata}}$$

$$T.I = \frac{2,88}{41,03} = 14,25$$

### 2.2.2 Perhitungan di Aliran Fluida yang Melewati Bola

Kecepatan Aliran dihitung dengan mengukur kecepatan setiap titik yang melalui bola dengan cara yang sama sebelumnya.

Bilangan Reynolds dihitung dengan persamaan berikut :

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot V}{\mu}$$

Dimana :

$\rho$  = densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$d$  = adalah diameter bola (m),

$v$  = kecepatan aliran fluida (m/s)

$\mu$  = viskositas kinematis fluida ( $\text{Ns/m}^2$ ).

Sebagai contoh pada aliran rendah di awal bola,

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot V}{\mu}$$

$$Re = \frac{995,7 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0405 \text{ m} \cdot 15,837 \text{ e}^{-3} \text{ m/s}}{7,98 \text{ e}^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2}$$

$$Re = 8003,014$$

- Aliran rendah

Pengukuran	Jarak (mm)	Velocity (mm/s)	Re
Titik 1	7,919	15,837	8.003,014
Titik 2	12,895	25,790	13.032,627
Titik 3	32,352	64,704	32.697,291

Tabel 2.4 Perhitungan kecepatan dan bilangan Reynolds di aliran rendah

- Aliran sedang

Pengukuran	Jarak (mm)	Velocity (mm/s)	Re
Titik 1	8,640	17,280	8.732,214
Titik 2	6,279	12,558	6.346,015
Titik 3	12,325	24,650	12.456,544

Tabel 2.5 Perhitungan kecepatan dan bilangan Reynolds di aliran sedang

- Aliran tinggi

Pengukuran	Jarak (mm)	Velocity (mm/s)	Re
Titik 1	5,535	11,069	5.593,771
Titik 2	5,991	11,982	6.054,739
Titik 3	17,972	35,944	18.163,814

Tabel 2.6 Perhitungan kecepatan dan bilangan Reynolds di aliran tinggi

Perhitungan lapisan batas

Aliran Rendah		Aliran Sedang		Aliran Tinggi	
Jarak dari tepi pelat datar (mm)	lapisan batas (mm)	Jarak dari tepi pelat datar (mm)	lapisan batas (mm)	Jarak dari tepi pelat datar (mm)	lapisan batas (mm)
4,34	5,71	4,34	5,02	4,34	2,51
8,22	9,59	8,22	8,90	8,44	3,20
12,33	12,10	12,10	12,56	12,33	4,56
15,98	12,33	16,21	14,84	16,44	4,57
20,55	15,30	20,55	15,30	20,00	5,94

### 2.2.3 Perhitungan di Aliran Fluida yang Melewati Bola Golf

Perhitungan kecepatan dan bilangan Reynolds pada bola golf sama seperti pada bola diatas.

- Aliran rendah

Pengukuran	Jarak (mm)	Velocity (mm/s)	Re
Titik 1	5,209	10,417	5546,141
Titik 2	8,418	16,836	8963,697
Titik 3	11,764	23,528	12526,602

Tabel 2.7 Perhitungan kecepatan dan bilangan Reynolds di aliran rendah

- Aliran sedang

Pengukuran	Jarak (mm)	Velocity (mm/s)	Re
Titik 1	5,405	10,810	5755,805
Titik 2	12,674	25,348	13495,593
Titik 3	13,254	26,104	13898,096

Tabel 2.8 Perhitungan kecepatan dan bilangan Reynolds di aliran sedang

- Aliran tinggi

Pengukuran	Jarak (mm)	Velocity (mm/s)	Re
Titik 1	8,973	17,946	9555,101
Titik 2	14,142	28,284	15058,756
Titik 3	17,432	34,864	18562,030

Tabel 2.9 Perhitungan kecepatan dan bilangan Reynolds di aliran tinggi

#### Perhitungan lapisan batas

Aliran Rendah		Aliran Sedang		Aliran Tinggi	
Jarak dari tepi pelat datar (mm)	lapisan batas (mm)	Jarak dari tepi pelat datar (mm)	lapisan batas (mm)	Jarak dari tepi pelat datar (mm)	lapisan batas (mm)
4,58	2,55	4,34	2,50	4,34	0,00
8,22	2,55	8,22	5,03	8,51	0,00
12,33	2,75	12,10	5,94	12,11	4,05
16,21	11,47	16,44	8,22	16,49	5,00
20,09	14,16	20,09	8,90	20,10	5,41

#### 2.2.4 Perhitungan di Aliran Fluida yang Melewati Orifice

- Menghitung Kecepatan Alir yang Melalui Orifice

Kecepatan alir dihitung dengan cara yang sama seperti bola dan bola golf namun dilakukan pengulangan tiga kali.

Pengujian	Aliran Rendah		Aliran Sedang		Aliran Tinggi	
	jarak (mm)	Kecepatan (m/s)	jarak (mm)	Kecepatan (m/s)	jarak (mm)	Kecepatan (m/s)
Simplo	5,607	0,0112	6,452	0,0129	9,373	0,0187
Duplo	5,489	0,0110	6,774	0,0135	8,710	0,0174
Triplo	5,5329	0,0111	7,4193	0,0148	9,4047	0,0188
Rata-rata	5,5432	0,0111	6,8817	0,0138	9,1623	0,0183

Tabel 2.10 Kecepatan pada aliran yang melalui orifice

- Menghitung kecepatan alir di bagian hilir

Menghitung kecepatan alir di bagian hilir orifice menggunakan rumus (3.9)

$$V_2 = \frac{V_1 A_1}{A_2}$$

Keterangan :

- $A_1$  : luas penampang masuk aliran (m)
- $A_2$  : luas lubang pada pelat *orifice* ( $\pi d^2/4$ ) (m)
- $V_1$  : kecepatan fluida diawal (m/s)

Sebagai contoh menghitung kecepatan alir di bagian hilir pada kecepatan rendah :

$$V_2 = \frac{V_1 A_1}{A_2}$$

$$V_2 = \frac{0,0112 \text{ m/s} \cdot 0,001256 \text{ m}}{0,000707 \text{ m}}$$

$$V_2 = 0,0197 \text{ m/s}$$

Aliran	V1 (m/s)	V2 (m/s)
rendah	0,0111	0,0197
sedang	0,0138	0,0245
tinggi	0,0183	0,0326

Tabel 2.11 Kecepatan alir di bagian hilir orifice

- Menghitung *discharge coefficient* dari *orifice*

$$C_d = \frac{\frac{A_2}{A_1} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - (A_2/V_1)^2)}}}{V_1}$$

Keterangan :

- $A_1$  : luas penampang masuk aliran (m)
- $A_2$  : luas lubang pada pelat *orifice* ( $\pi d^2/4$ ) (m)
- $V_1$  : kecepatan fluida diawal (m/s)
- $P_1$  : tekanan fluida yang mengalir dititik 1 ( $N/m^2$ )
- $P_2$  : tekanan fluida yang mengalir dititik 2 ( $N/m^2$ )
- $\rho$  : densitas fluida ( $kg/m^3$ )
- $C_d$  : *discharge coefficient* dari *orifice*



Sebagai contoh menghitung *discharge coefficient* pada kecepatan rendah :

$$C_d = \frac{\frac{A_2}{A_1} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - (A_2/V_1)^2)}}}{V_1}$$

$$C_d = \frac{\frac{0,000707 \text{ m}}{0,001256 \text{ m}} \sqrt{\frac{2(0,048136 \text{ N/m}^2)}{995,7 \text{ kg/m}^3 (1 - (0,000707 \text{ m}/0,0111 \text{ m/s})^2)}}}{0,0111 \text{ m/s}}$$

$$C_d = 0,4999$$

- Menghitung Bilangan Reynolds :

Bilangan Reynolds dihitung menggunakan persamaan yang sama pada perhitungan bilangan Reynolds pada aliran disekitar bola

Aliran	V1 (m/s)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )	Cd	Re
rendah	0,0111	0,048136	0,4999	12
sedang	0,0138	0,069316	0,4829	16
tinggi	0,0183	0,090882	0,4150	18

Tabel 2.12 Nilai Cd dan bilangan Reynolds pada aliran melalui orifice