



UNIVERSITAS INDONESIA

**APLIKASI GELEMBUNG HIDROGEN UNTUK ANALISA
DINAMIKA FLUIDA PADA PELAT DATAR, PIPA PERSEGI
DAN VENTURI PADA ALIRAN FLUIDA**

SKRIPSI

**BONGGUK REAGAN MONANG
0906604104**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK – JAWA BARAT
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**APLIKASI GELEMBUNG HIDROGEN UNTUK ANALISA
DINAMIKA FLUIDA PADA PELAT DATAR, PIPA PERSEGI
DAN VENTURI PADA ALIRAN FLUIDA**

SKRIPSI

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

**BONGGUK REAGAN MONANG
0906604104**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Bongguk Reagan Monang
NPM : 0906604104
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Aplikasi Gelembung Hidrogen Untuk Analisa
Dinamika Fluida Pada Pelat Datar, Pipa Persegi Dan
Venturi Pada Aliran Fluida

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing	Ir. Dijan Supramono, M.Sc	(.....)
Penguji I	Dr. Ir. Asep H. Saputra, M.Eng	(.....)
Penguji II	Dy. Eny Kuarini, Sai	(.....)
Penguji III	Dr. Ing. Donni Adnata, ST, M.Eng, Sc	(.....)

Ditandatangani di : Depok

Tanggal : 29 Juni 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Bongguk Reagan monang
NPM : 090604104
Tanda Tangan : 
Tanggal : 29 Juni 2012

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

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

Nama : Bongguk Reagan Monang
NPM : 0906604104
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 Pelat Datar, Pipa Persegi Dan Venturi Pada Aliran Fluida

Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, 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 : 29 Juni 2012

Yang Menyatakan


(.....)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yesus Kristus yang atas hikmat dan pertolongan-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Aplikasi Gelembung Hidrogen Untuk Analisa Dinamika Fluida Pada Pelat Datar, Pipa Persegi dan Venturi Pada Aliran Fluida”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik di Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapat bantuan bimbingan dan dorongan serta doa dari berbagai pihak. Untuk itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada yang terhormat :

1. Bapak Ir. Dijan Supramono, M.Sc selaku dosen pembimbing seminar, yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dalam penyusunan makalah seminar,
2. Bapak Prof.Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA, selaku kepala Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia,
3. Dosen Departemen Teknik Kimia UI yang telah memberikan ilmu,
4. Orang Tua, keluarga dan sahabat yang selalu memberikan dukungan moril, material serta doa,
5. Indika Sunarko yang telah memberi dukungan dan semangat,
6. Teman – teman Teknik Kimia Ekstensi 2009 yang telah sama-sama memberi dukungan dan semangat,
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penyusunan seminar ini masih jauh dari sempurna, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi tercapainya kesempurnaan dari makalah ini. Akhir kata dengan segala kerendahan hati, penulis berharap agar makalah ini dapat memberikan manfaat bagi rekan-rekan mahasiswa dan bagi mereka yang membutuhkannya.

Depok, Juni 2012

Penulis

ABSTRAK

Nama : Bongguk Reagan Monang
Program studi : Teknik Kimia
Judul : Aplikasi Gelembung Hidrogen Untuk Analisa Dinamika Fluida Pada Pelat Datar, Pipa Persegi Dan Venturi Pada Aliran Fluida.

Penelitian ini melakukan pengamatan dan analisa dinamika fluida pada pelat datar, pipa persegi dan venturi dengan aplikasi gelembung hidrogen. Visualisasi lapisan batas pada pelat datar pada kecepatan fluida (U_{∞}) 21,43 mm/s adalah sebesar 7,2 - 16,58 mm pada jarak 1 - 9 mm dari tepi pelat datar, lebih besar daripada perhitungan secara teoritis yang sebesar 1,64 - 3,17 mm. Perbedaan tebal lapisan batas terjadi akibat pengaruh gaya apung pada gelembung hidrogen. Visualisasi pada pipa persegi pada dua bilangan reynolds yang berbeda ($Re = 932$ dan $Re = 2278,5$) menghasilkan lapisan batas yang lebih tipis pada bilangan Re yang lebih besar. Dengan bantuan visualisasi gelembung hidrogen dapat dihitung koefisien discharge venturi pada dua kecepatan yang berbeda ($14,9 \text{ mms}^{-1}$ dan $6,7 \text{ mms}^{-1}$) koefisien discharge venturi adalah sebesar 0,052 dan 0,027.

Kata kunci: visualisasi aliran, dinamika fluida, visualisasi gelembung hidrogen

ABSTRACT

Name : Bongguk Reagan Monang
Departement : Chemical Engineering
Subject : Applications of Hydrogen Bubbles for Fluid Dynamics
Analysis On Flat Plate, Rectangular Pipe and Venturi On Fluid Flow

This study observes and analyses the visualization of hydrogen bubbles on a flat plate, a rectangular pipe and a venturi. Visualization of the boundary layer on the flat plate at fluid velocity (U_{∞}) of 21,43 mms-1 shows that the thickness of the boundary layer increase from 7,2 to 16,58 mm at trailing position 1 mm to 9 mm from the end of the plate. Theoretically the thickness should range from 1,64 mm to 3,17 mm at the same position. These differences may have been caused by the buoyancy on hydrogen bubbles. Visualization on the rectangular pipe at 2 different values of Re, i.e 932 and 2278,5 shows that higher Re produces thinner boundary layer. Visualization of hydrogen bubbles can also be used to determine coefficient discharge of the venture at 2 different values input of velocity (16 mms-1 and 6 mms-1), discharge coefficient respectively are 0,05 and 0,03.

Keywords: flow visualization, fluid dynamics, hydrogen bubble visualization

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	iv
LEMBAR PERSEMBAHAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Mekanika fluida.....	5
2.1.1 Profil Kecepatan.....	5
2.1.2 Lapisan Batas.....	6
2.1.3 Koefisien Gesek.....	9
2.1.4 Koefisien Venturi.....	10
2.2 Visualisasi Aliran.....	11
2.2.1 Metode Gelembung Hidrogen.....	12
2.3 Elektrolisis.....	15
2.4 Disain Alat Visualisasi Aliran.....	17
3 METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Pendahuluan.....	19
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	19
3.3 Skema Alat.....	20
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	21
3.5 Prosedur Penelitian.....	21
3.5.1 Persiapan Awal.....	21
3.5.2 Perancangan dan Pembuatan Alat.....	21
3.5.3 Persiapan Uji Operasi.....	22
3.5.4 Pengoperasian Rangkaian Alat.....	22
3.5.4.1 Pengujian Dinamika Fluida Pada Pelat Datar.....	22
3.5.4.2 Pengujian Dinamika Fluida Pada Pipa Perseg.....	22
3.5.4.3 Pengujian Dinamika Fluida Pada pada sistem Venturi.....	23

3.6 Pengolahan dan Analisa Data.....	23
3.6.1 Teknik Pengambilan Data.....	23
3.6.2 Analisa Data.....	23
3.6.2.1 Analisa Kestabilan Aliran Fluida.....	22
3.6.2.2 Lapisan Batas.....	22
3.6.2.3 Venturi.....	22
4 PEMBAHASAN.....	25
4.1 Perancangan Kolom Air.....	25
4.2 System Elektrolisa.....	26
4.3 Analisa Dinamika Fluida.....	27
4.3.1 Uji Kestabilan Aliran Pada Kolom Air.....	27
4.3.2 Dinamika Fluida Pada Pelat Datar.....	31
4.3.3 Dinamika Fluida Pada Pipa Persegi.....	35
4.3.4 Dinamika Fluida Pada Venturi.....	39
5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	41
5.1 Kesimpulan.....	41
5.2 Saran.....	41
DAFTAR PUSTAKA.....	42
LAMPIRAN A.....	44
LAMPIRAN B.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Potensial reduksi standar pada 25°C.....	16
Tabel 4.1	Data pengamatan dan perhitungan uji kestabilan kecepatan fluida (U_{∞}) pada kolom air pada setiap bukaan <i>valve</i>	29
Tabel 4.2	Data intensitas turbulensi aliran fluida pada kolom air	29
Tabel 4.3	Data perbandingan tebal lapisan batas kecepatan kolom air yang berbeda.....	33
Tabel 4.4	Tabel perhitungan \bar{U} pada pipa persegi	37
Tabel 4.5	Tabel analisa lapisan batas pada pipa persegi.....	37
Tabel 4.6	Data dan perhitungan kecepatan alir fluida pada venture.....	39
Tabel 4.7	Hasil perhitungan Kecepatan alir fluida pada bukaan valve 2 dan.....	40

DAFTAR GAMBAR

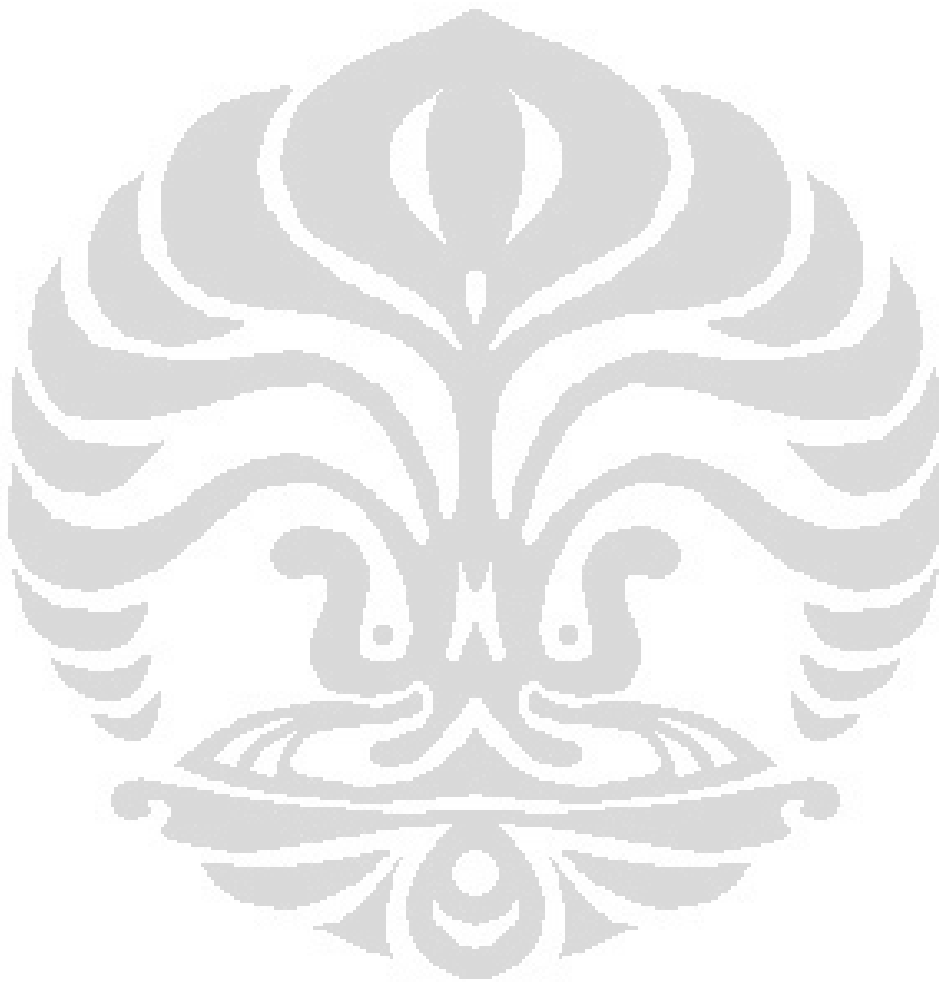
Gambar 2.1	Profil kecepatan laminar	6
Gambar 2.2	Perbandingan lapisan batas pada pelat datar yang tajam (a) pada Reynolds yang rendah; (b) pada Reynolds yang tinggi.....	7
Gambar 2.3	Gaya tekan dan gaya tegangan permukaan pada fluida.....	9
Gambar 2.4	Venturi.....	11
Gambar 2.5	Contoh struktur eddy pada aliran setelah melewati pelat datar sejajar dengan bantuan <i>timeline</i> gelembung hidrogen.....	13
Gambar 2.6	Hubungan antara kecepatan rata-rata kecepatan apung gelembung hidrogen terhadap diameter gelembung hidrogen.....	14
Gambar 2.7	Perancangan kolom air.....	17
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	19
Gambar 3.2	Skema peralatan penelitian.....	20
Gambar 3.3	Skema obyek uji dinamika fluida.....	20
Gambar 4.1	Gambar kolom air.....	25
Gambar 4.2	Skema pengambilan data panjang pulsa gelembung hidrogen.....	28
Gambar 4.3	Kurva perbandingan kestabilan kecepatan alir fluida pada setiap bukaan <i>valve</i>	28
Gambar 4.4	Gelombang pada aliran fluida yang disebabkan getaran pada kolom air.....	30
Gambar 4.5	Visualisasi aliran pada pelat datar ($U_{\infty} = 21,243 \text{ mms}^{-1}$).....	31
Gambar 4.6	Visualisasi aliran pada pelat datar ($U_{\infty} = 27,835 \text{ mms}^{-1}$).....	31
Gambar 4.7	Visualisasi aliran pada pelat datar ($U_{\infty} = 40,468 \text{ mms}^{-1}$).....	32
Gambar 4.8	Skema pengambilan data analisa lapisan batas pada pelat datar.....	32
Gambar 4.9	Grafik perbandingan tebal lapisan batas teoritis dan visual pada $\bar{U}_{\infty} = 21,423 \text{ mm/s}$	33

Gambar 4.10	Grafik perbandingan tebal lapisan batas teoritis dan visual pada $\bar{U}_\infty = 27,835$ mm/s	33
Gambar 4.11	Grafik perbandingan tebal lapisan batas teoritis dan visual pada $\bar{U}_\infty = 40,468$ mm/s.....	34
Gambar 4.12	Visualisasi aliran pada pipa persegi ($U_\infty = 42,76 \text{ mms}^{-1}$).....	35
Gambar 4.13	Visualisasi aliran pada pipa persegi ($U_\infty = 22,17 \text{ mms}^{-1}$).....	36
Gambar 4.14	Visualisasi aliran pada pipa persegi ($U_\infty = 17,51 \text{ mms}^{-1}$).....	36
Gambar 4.15	Kurva perbandingan lapisan pada variasi Reynolds	38
Gambar 4.16	Visualisasi <i>timeline</i> aliran pada <i>venture</i> dengan kecepatan (U) = 14,919 mm/s.....	40
Gambar 4.17	Visualisasi <i>timeline</i> aliran pada venturi dengan kecepatan (U_∞) = 6,704 mm/s.....	40



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A.....	44
Lampiran B.....	48



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Mekanika fluida adalah ilmu yang mempelajari sifat fluida dalam kondisi dinamis maupun dalam kondisi statis, dan efek dari daerah batas fluida yang dapat berupa benda padat atau dengan permukaan cairan lain (White, 2003). Fluida statis adalah fluida dalam keadaan diam dan yang dipelajari dari fluida statis adalah sifat-sifat yang dimiliki oleh fluida itu sendiri, seperti: viskositas, tegangan permukaan, gaya apung (buoyancy). Fluida dinamis adalah fluida yang dalam keadaan bergerak, dan yang dipelajari pada fluida dinamis adalah variabel-variabel yang mempengaruhi pergerakan dari sebuah fluida. Variabel – variabel tersebut antara lain adalah: Tekanan, temperatur, kecepatan, akselerasi.

Secara teoritis sifat dan karakteristik fluida dinamis dapat dihitung berdasarkan variabel – variabel yang mempengaruhi fluida. Untuk mendukung pemahaman fluida secara utuh diperlukan pengamatan visual aliran fluida yang dibandingkan terhadap nilai karakteristik fluida secara teoritis. Sifat fluida yang cenderung transparan menyulitkan untuk dilakukan pengamatan visual secara langsung terhadap karakteristik fluida, maka diperlukan suatu metode visualisasi aliran untuk membantu mengamati karakteristik fluida. Beberapa metode dapat digunakan untuk membantu pengamatan karakteristik fluida. Metode pertama adalah pengamatan yang menggunakan serbuk ringan yang ditaburkan pada permukaan fluida yang mengalir. Metode ini diperkenalkan pertama kali oleh Prandtl dan Tietjen (1934). Metode ini memiliki kekurangan karena sulit untuk menjaga konsentrasi partikel pada lapisan batas, masalah ini karena pengaruh efek kapiler antara permukaan padatan dan fluida (Clayton dan Massey, 1966).

Dalam perkembangannya metode visualisasi fluida mengalami perkembangan dan berbagai metode telah diperkenalkan. Clayton dan Massey (1966) merangkum metode – metode visualisasi fluida tersebut antara lain: (I) *Streaming Birefringence* (Prados and Peebles, 1959; Balint, 1956); (II) *Schlieren Method* (Bland and Pelick, 1962); (III) *Chemical Methods* (Friedman, 1956; Springer, 1964; Denbigh et al, 1962); (IV) *Controlled Introduction of Tracer*

(Bairstow, 1939; Caffin and Underwood, 1952; Faure, 1963); (V) *Hydrogen-Bubble Technique* (Geller, 1954; Schraub et al, 1965; Hama and Nutant, 1963). Metode terakhir adalah metode yang akan digunakan pada penelitian ini.

Hydrogen-Bubbles Technique (teknik gelembung hidrogen) merupakan metode visualisasi aliran yang menggunakan metode elektrolisis. Gelembung hidrogen yang dihasilkan merupakan hasil elektrolisa dari air, di mana gelembung-gelembung hidrogen dihasilkan dari katoda. Metode visualisasi aliran dengan gelembung hidrogen sangat efisien, gelembung hidrogen yang terbentuk ini akan bergerak mengikuti bentuk aliran fluida. Gelembung hidrogen ini dapat memvisualisasikan aliran fluida tidak terbatas pada permukaan fluida, gelembung hidrogen dapat menjadi *tracer* pada setiap lapisan aliran.

Metode gelembung hidrogen ini memiliki konsep dasar visualisasi aliran dengan menggunakan material asing yang dapat terlihat. Ukuran partikel material yang digunakan harus cukup kecil untuk dapat mengikuti gerakan fluida dan memiliki selisih kecepatan yang kecil dengan kecepatan fluida itu sendiri (Meenaksisundaram, 1980). Diameter gelembung hidrogen ini tergantung dari diameter kawat katoda yang digunakan, semakin kecil diameter kawat katoda yang digunakan maka gelembung hidrogen yang dihasilkan akan semakin kecil (Meenaksisundaram, 1980).

Katoda yang secara umum digunakan adalah: Platina, Namun pada beberapa literatur digunakan logam lain seperti: tungsten (Kim dkk, 1991), *stainless steel*. Pemilihan logam katoda dapat disesuaikan terhadap pasangannya anoda, pemilihan kedua kutub ini mengikuti ketentuan deret volta, selain itu logam yang dipilih harus cukup inert. Katoda dan anoda yang akan digunakan pada penelitian ini adalah kawat *Stainless steel*, Katoda ini dipilih karena bersifat *inert*, dan harga lebih murah.

Beberapa karakteristik fluida yang dapat diamati secara visual dengan menggunakan bantuan metode visualisasi aliran dengan menggunakan gelembung hidrogen antara lain adalah: lapisan batas aliran dan profil kecepatan fluida. Dengan pengamatan visual karakteristik fluida tersebut dapat dipelajari hubungan sifat fluida secara makroskopis dan mikroskopis. Pengamatan visual sifat-sifat fluida ini dapat dilakukan pada skala laboratorium. Pada penelitian ini akan dapat

dibuat sebuah modul praktikum untuk pemahaman sifat dasar fluida secara mikroskopis yang disesuaikan dengan kurikulum Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.

1.2 Perumusan masalah

Berdasarkan latar belakang di atas perumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Diperlukan suatu modul di 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 secara visual,
2. Perlunya pengamatan visual terhadap aliran fluida sebagai pelengkap terhadap pengetahuan teoritis,
3. Perancangan sistem visualisasi aliran memanfaatkan gelembung hidrogen hasil elektrolisis air untuk analisa dinamika aliran fluida.

1.3 Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang kolom air dan objek pengamatan dinamika fluida,
2. Merancang sistem elektrolisa air,
3. Mengaplikasikan gelembung hidrogen untuk analisa dinamika fluida.

1.4 Batasan masalah

1. Fluida yang digunakan adalah air yang mengandung elektrolit,
2. Kamera yang digunakan Canon DSLR 550D dan lensa Canon *macro lens* EF 100mm,
3. Sistem elektrolisa yang digunakan memiliki metode pulsa tegangan.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan makalah seminar ini adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Berisikan latar belakang permasalahan, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan

BAB II Tinjauan Pustaka

Berisikan teori mengenai Visualisasi aliran menggunakan Gelembung Hidrogen

BAB III Metodologi Penelitian

Berisikan diagram alir penelitian, rancangan penelitian, prosedur penelitian

BAB IV 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 IV 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 Mekanika Fluida

Mekanika fluida merupakan disiplin ilmu yang mempelajari sifat-sifat fluida baik dalam kondisi statis maupun dinamis, serta mempelajari penerapan dari ilmu mekanika fluida. Beberapa karakteristik fluida yang dapat diamati dengan bantuan visualisasi fluida dengan bantuan gelembung hidrogen.

2.1.1 Profil Kecepatan

Profil kecepatan fluida dikenal dalam tiga jenis rejim aliran, yaitu: Laminer, Transisi, dan turbulen. Ketiga rejim aliran tersebut dinyatakan dalam suatu bilangan tak berdimensi yang dikenal dengan bilangan Reynolds. Untuk aliran di dalam pipa, dengan diameter yang sama dan jenis fluida yang sama bilangan Reynolds dipengaruhi oleh kecepatan alir fluida.

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

Pada pipa persegi diameter pipa (D) diganti dengan diameter hidrolis (D_H), yang dinyatakan dengan:

$$D_H = \frac{4 \text{ luas area penampang pipa}}{\text{Keliling pipa yang terbasa hi}} \quad (2.2)$$

Maka bilangan Reynolds pada pipa persegi dapat dinyatakan sebagai

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} D_H}{\mu} \quad (2.3)$$

di mana: ρ = berat jenis fluida (Kg/m^3)

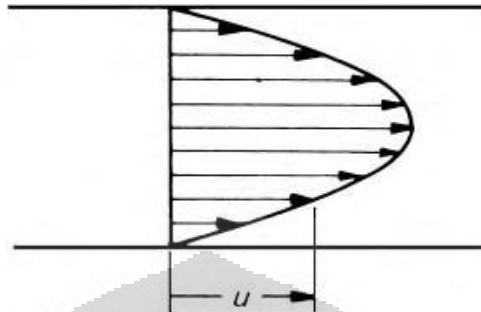
μ = viskositas fluida (Kg/ms)

U_{∞} = Kecepatan fluida (m/s)

D_H = diameter hidrolis pipa (m)

Pada aliran laminer partikel fluida bergerak teratur pada jalurnya dan tidak saling bersilangan dengan jalur partikel fluida yang lain. Pada aliran laminer terdapat gradien kecepatan yang terdapat pada seluruh lapisan partikel. Profil aliran untuk aliran laminer dapat terlihat seperti pada Gambar 2.1. Adanya efek hambatan pada permukaan padat menyebabkan gradien kecepatan. Aliran laminar dapat terjadi pada aliran fluida ketika efek viskositas fluida mendominasi gaya

inersia aliran. Efek ini mengakibatkan jika ada partikel yang akan bergerak keluar dari jalurnya, maka gaya viskosnya akan menahannya dan menjaganya pada jalur tertentu.



Gambar 2.1 Profil kecepatan laminar (Massey dan Smith, 1998)

Berbeda dengan aliran laminar, aliran turbulen tidak memiliki struktur aliran yang teratur. Kecepatan alir fluida berfluktuasi terhadap waktu pada setiap lapisan aliran. Dengan mengukur besarnya fluktuasi kecepatan alir fluida terhadap waktu pada satu lapisan aliran tertentu dapat diketahui seberapa besar nilai intensitas turbulensi fluida. Intensitas turbulensi aliran fluida ini adalah perbandingan antara standar deviasi kecepatan alir fluida terhadap rata-rata kecepatan alir fluida yang dinyatakan dalam besar persen (%).

$$I = \frac{u'}{\bar{U}} \times 100\% \quad (2.4)$$

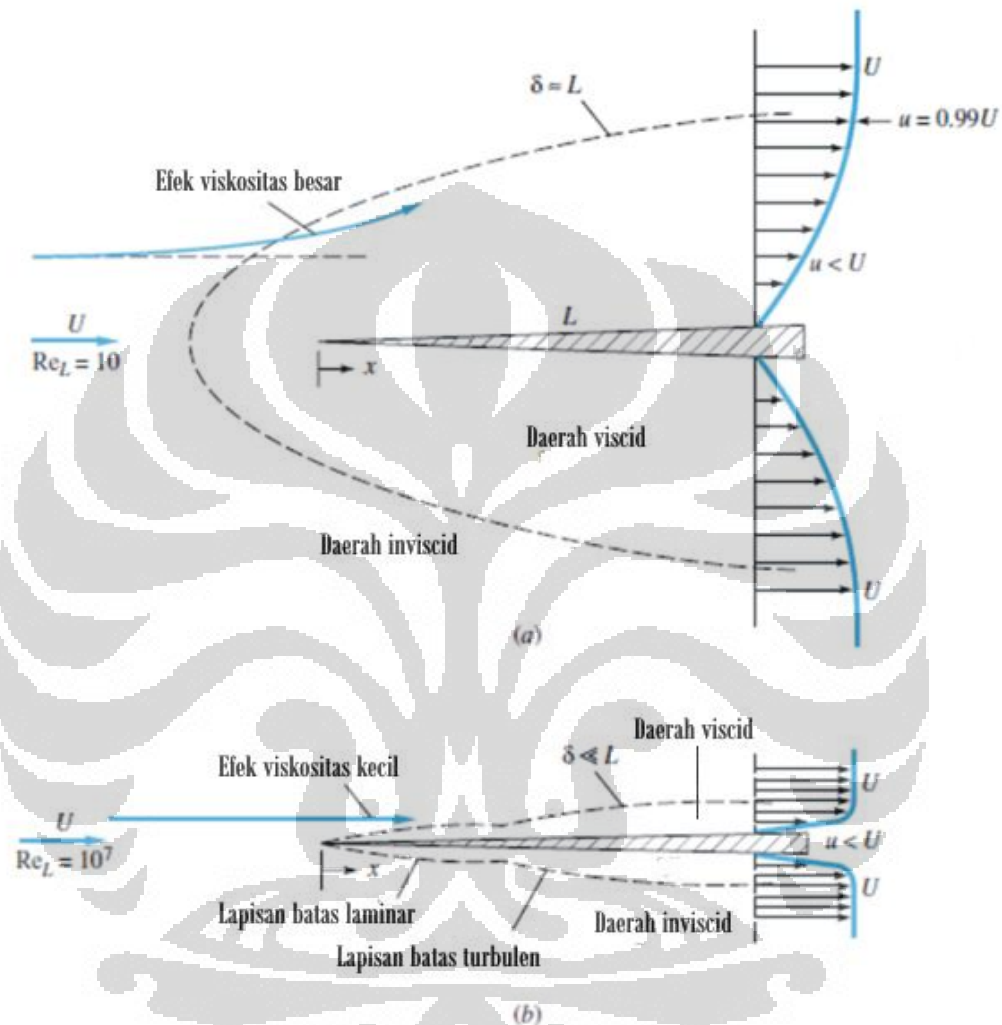
Dimana: u' = standar deviasi kecepatan alir fluida (m/s)

\bar{U} = kecepatan rata – rata kecepatan alir fluida (m/s)

2.1.2 Lapisan Batas

Lapisan batas adalah salah satu fenomena dinamika fluida, lapisan batas ini terbentuk karena adanya tegangan geser antara fluida dengan permukaan benda padat dan antar partikel cairan itu sendiri. Efek tegangan geser tersebut menyebabkan terbentuknya gradien kecepatan pada fluida. Karena penurunan kecepatan fluida pada area dekat dengan dinding benda padat maka efek viskos cairan mempengaruhi aliran fluida. Pada lapisan batas kecepatan fluida berubah dari kecepatan nol pada permukaan batas padatan kemudian meningkat mendekati kecepatan ruahnya pada ketinggian tertentu dari permukaan benda padat. Tahun 1904, Ludwig Prandtl menyatakan pendapat bahwa aliran terbuka terdiri dari 2

hal: (1) pada aliran fluida yang di dalam lapisan batas, tegangan geser merupakan faktor yang sangat penting dan (2) Aliran fluida yang terdapat di luar lapisan batas yang pada umumnya memiliki gradien kecepatan yang sangat kecil maka efek viskositas dapat diabaikan (pada fluida *inviscid*).



Gambar 2.2 Perbandingan lapisan batas pada pelat datar yang tajam (a) pada Reynolds yang rendah; (b) pada Reynolds yang tinggi. (White, 2003)

Lapisan batas yang paling sederhana untuk dipelajari adalah lapisan batas pada aliran sepanjang tepi pelat yang tipis dan halus yang ditempatkan sejajar dengan arah aliran, sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 2.2. Pada aliran fluida yang memiliki bilangan Reynolds yang cukup besar, hanya lapisan tipis pada daerah lapisan batas yang akan terpengaruh efek dari permukaan benda padat. Hal ini disebabkan gaya inersia fluida yang semakin besar dan efek

viskositas dapat diabaikan, sehingga lapisan batas pada dinding pelat semakin tipis (Munson, 2002).

Pada jarak pelat yang dapat ditentukan dapat dihitung berapa besar bilangan Reynolds pada aliran di permukaan benda padat. Dengan menggunakan x sebagai karakteristik panjang, maka bilangan Reynolds pada permukaan pelat datar didefinisikan sebagai:

$$Re_x = \frac{U_\infty x \rho}{\mu} \quad (2.5)$$

di mana: U_∞ = kecepatan alir fluida (m/s),

x = jarak (m),

ρ = densitas fluida (Kg/m^3),

μ = viskositas fluida (Kg/ms).

Apabila pelat memiliki ukuran yang cukup panjang maka bilangan Reynolds akan semakin besar dan aliran berubah menjadi turbulen.

Secara konvensional ketebalan lapisan batas (δ) ditentukan ketika kecepatan aliran lapisan batas 0.99 kali dari kecepatan terminal aliran fluida (Perry's, 1999). Dengan menggunakan konsep lapisan batas, Prandtl menentukan aproksimasi lapisan batas fluida yang melewati suatu bentuk objek (berlaku pada bilangan Reynolds yang besar). Pada tahun 1908, H. Blasius dapat menyelesaikan persamaan ini pada lapisan batas pada pelat datar paralel. Dengan menurunkan persamaan Navier-stokes diperoleh penyederhaan persamaan ketebalan lapisan batas adalah

$$\frac{\delta}{x} = 5.0 Re^{-0.5} \quad (2.6)$$

dengan : δ = tebal lapisan batas (m)

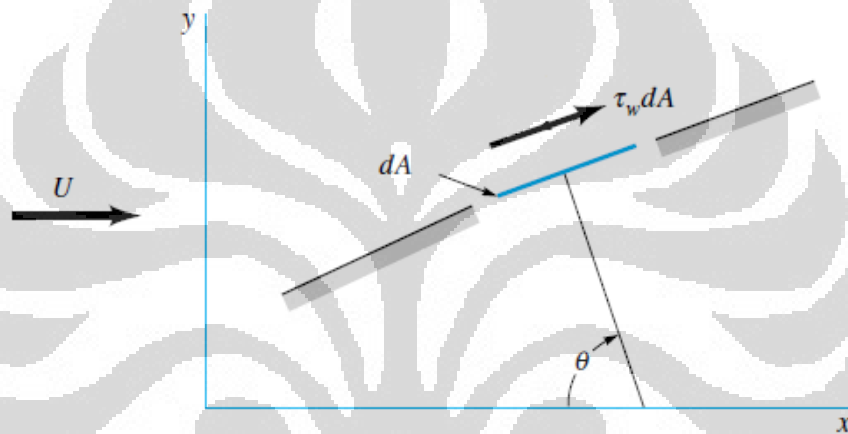
x = jarak dari tepi awal (m)

Persamaan diatas berlaku pada aliran fluida dengan bilangan Reynolds $3.10^5 - 3.10^6$. Untuk aliran yang bersifat turbulen persamaan untuk tebal lapisan batas menjadi

$$\frac{\delta}{x} = 0.16 Re^{-1.7} \quad (2.7)$$

2.1.3 Koefisien Gesek

Setiap fluida yang mengalir melewati sebuah benda maka fluida tersebut akan memberikan gaya pada benda yang dilalui. Munson (2006) menggambarkan gaya yang diberikan oleh suatu aliran terhadap pelat datar yang diletakkan pada sudut tertentu (Gambar 2.3). Pelat datar yang dilalui oleh fluida akan mendapat 2 gaya yang berbeda, gaya yang diberikan fluida terhadap pelat datar adalah gaya tekan dan gaya geser (*shear stresses*). Total kedua gaya tersebut dipengaruhi oleh besar sudut posisi pelat datar terhadap arah alir fluida. Total kedua gaya ini dinyatakan sebagai gaya gesek.



Gambar 2.3 Gaya tekan dan gaya tegangan permukaan pada fluida (Munson, Young dan Okiishi, 2002)

Besar gaya gesek dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\mathcal{D} = \int dF_x = \int P \cos \theta dA + \int \tau_w \sin \theta dA \quad (2.8)$$

di mana τ_w adalah tegangan geser. Pada pelat datar sejajar arah aliran maka besarnya $\theta = 90^\circ$, maka gaya gesek yang diterima fluida adalah:

$$\mathcal{D} = \int dF_x = \int \tau_w dA \quad (2.9)$$

White (2003) menyatakan besarnya τ_w adalah:

$$(\text{laminar}) \tau_w(x) = 0.332 \rho^{0.5} \mu^{0.5} U_\infty^{1.5} x^{-0.5} \quad (2.10)$$

$$(\text{turbulen}) \tau_w(x) = 0.0135 \rho^{\frac{6}{7}} \mu^{\frac{1}{7}} U_\infty^{\frac{13}{7}} x^{-\frac{1}{7}} \quad (2.11)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.9 dan 2.10 ke persamaan 2.9 maka dapat diperoleh total gaya gesek yang terjadi terhadap fluida sepanjang permukaan batas padatnya.

$$\text{(laminar)} \quad D_{(x)} = b \int_0^x \tau_w dx = 0.6646b \rho^{0.5} \mu^{0.5} U_\infty^{1.5} x^{0.5} \quad (2.12)$$

$$\text{(turbulen)} \quad D_{(x)} = b \int_0^x \tau_w dx = 0.01575b \rho^{\frac{6}{7}} \mu^{\frac{1}{7}} U_\infty^{\frac{13}{7}} x^{\frac{6}{7}} \quad (2.13)$$

sehingga persamaan koefisien gesek pada rejim aliran laminar dan turbulen adalah:

$$C_D = \frac{\mathfrak{D}}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 b D} \quad (2.14)$$

keterangan: ρ = massa jenis fluida (Kg/m^3)

U_∞ = Kecepatan fluida (m/s)

b = lebar pelat (m)

D = Diameter/tebal benda (m)

\mathfrak{D} = Gaya gesek (N)

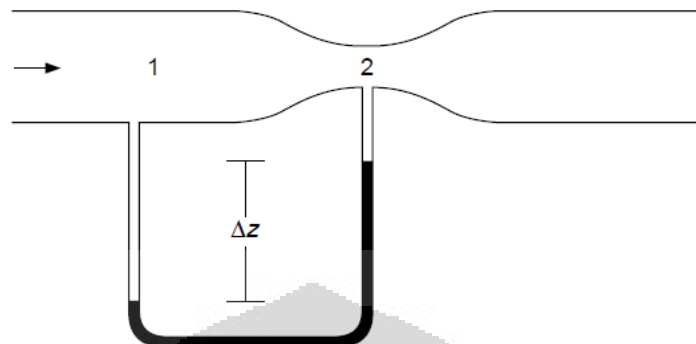
Koefisien gesek suatu benda dipengaruhi oleh bentuk benda sendiri, pada pelat datar yang ditempatkan sejajar dengan arah alir fluida hambatan yang dipengaruhi oleh tegangan geser lebih besar daripada hambatan yang terjadi karena tekanan (P). Pada pelat datar sejajar nilai C_D berdasarkan pada daerah awal kontak dan akan naik sejalan dengan naiknya rasio panjang pelat terhadap diameter benda (ℓ/D). Untuk pelat yang sangat tipis daerah awal kontak menjadi $b\ell$ dalam menentukan koefisien gesek (Munson, 2006). Sehingga Pada perasamaan koefisien gesek nilai ℓ (m) mengganti D (m) menjadi:

$$C_D = \frac{\mathfrak{D}}{\frac{1}{2} \rho U^2 b \ell} \quad (2.15)$$

2.1.4 Koefisien Venturi

Venturi adalah salah satu alat yang digunakan sebagai *flowmeter*. Venturi memiliki desain pipa yang mengecil kemudian membesar secara perlahan, desain ini dapat mengurangi *head losses* pada saat pengukuran (Gambar 2.5). Walaupun memiliki desain optimum, pada Venturi tetap terjadi hilangnya energi pada aliran fluida karena penyempitan dan pelebaran pipa. Hilangnya energi ini diindikasikan dengan berkurangnya tekanan aliran pada daerah hilir Venturi, maka setiap

Venturi akan memiliki *Venturi Coefficient Discharge* (C_v). C_v adalah faktor yang digunakan untuk melambangkan kehilangan energi cairan karena sistem Venturi.



Gambar 2.4 Venturi (Perry's, 1999)

Perhitungan C_v dapat diperoleh dari persamaan venturi sebagai flowmeter. Persamaannya adalah:

$$Q = C_v Q_{ideal} = C_v A_T \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (2.16)$$

di mana: A_T = Luas permukaan pipa pada titik 1 (m)
 P_1 dan P_2 = Tekanan pada titik 1 dan 2 (N/m^2)
 ρ = berat jenis fluida pada manometer (Kg/m^3)
 β = rasio diameter titik 2 terhadap 1

2.2 Visualisasi Aliran

Penelitian mengenai visualisasi aliran dilakukan karena beberapa alasan (1) Untuk mendapatkan gambaran aliran fluida pada skala model dari objek yang sebenarnya; (2) Sebagai sumber inspirasi pengembangan teori-teori aliran fluida yang baru dan lebih baik. (3) Untuk verifikasi sebuah teori atau model mekanika fluida. Meskipun dilakukan secara luas namun metode ini memiliki beberapa masalah, diantaranya: aliran fluida terpengaruhi oleh teknik eksperimen dan tidak semua faktor mekanika fluida dapat divisualisasikan (Post dkk, 1993).

Data visualisasi aliran fluida dapat digunakan untuk memverifikasi model teoritis suatu fenomena fluida dengan eksperimen fundamental terhadap cairan sesungguhnya. Secara garis besar visualisasi aliran terbagi ke dalam dua grup yaitu: (1) metode statis dan (2) metode kinetis (Clayton dan Massey, 1966).

Metode statis merupakan metode visualisasi aliran yang memanfaatkan sifat kelarutan pada air dan kemampuan menguap atau menyublim pada udara dari sebuah lapisan kimia pada permukaan. Ketika aliran fluida melewati lapisan kimia pada permukaan padat, maka sebagian lapisan kimia tersebut akan larut atau menguap dan akan meninggalkan pola sebagai visualisasi aliran. Metode ini dapat menggambarkan pola aliran pada permukaan yang bersinggungan dengan fluida. Metode ini memiliki kelemahan, penggunaan lapisan pada permukaan dapat mempengaruhi aliran pada permukaan. Pola yang terbentuk pada lapisan kimia diragukan keakuratannya, karena dimungkinkan fluida yang membentuk pola aliran terpengaruhi oleh lapisan kimia.

Metode kinetik adalah metode visualisasi aliran yang memanfaatkan penambahan partikel-partikel atau zat pewarna. Berbeda dengan metode statis, metode ini menggunakan partikel-partikel yang dapat digunakan sebagai *tracer* pada aliran fluida. Agar partikel ini dapat mengikuti aliran fluida, maka partikel yang digunakan berukuran kecil dan dapat melayang-layang pada aliran fluida.

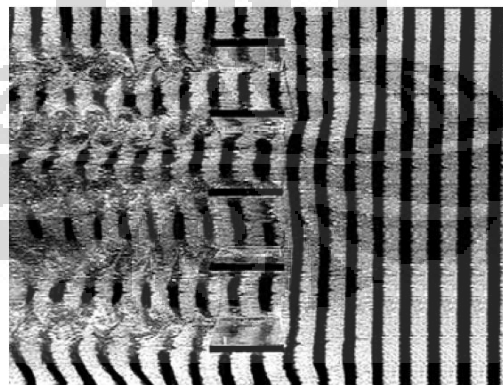
Ada beberapa cara dalam visualisasi aliran fluida dengan menggunakan metode kinetik, antara lain: visualisasi aliran adalah dengan menggunakan partikel terdispersi. Metode ini dapat dilakukan dengan memanfaatkan partikel yang dapat menghasilkan terang. Metode berikutnya adalah *Streaming Birefringence*, metode visualisasi ini memanfaatkan sifat beberapa fluida ataupun koloid yang memiliki sifat *birefringence* (pembiasan). Metode *Schlieren* metode visualisasi fluida yang memanfaatkan gradien panas yang dapat menimbulkan perbedaan indeks bias pada fluida. Metode *Chemical*, metode ini adalah penambahan bahan kimia yang dapat memantulkan cahaya. Secara umum metode-metode ini memiliki kekurangan, karena penambahan-penambahan partikel padat dan pemanasan fluida dapat mempengaruhi sifat-sifat fluida yang dapat berdampak pada pola aliran yang terbentuk.

2.2.1 Metode Gelembung Hidrogen

Metode gelembung hidrogen (*Hydrogen bubble methods*) adalah sebuah metode yang menggunakan gelembung hidrogen sebagai media visualisasi aliran. Gelembung hidrogen dihasilkan melalui proses elektrolisa air, dimana air akan

dihasilkan pada katoda dan oksigen dihasilkan pada anoda. Katoda yang digunakan biasanya menggunakan kawat dengan diameter yang sangat kecil untuk mencegah pengaruh yang besar terhadap aliran fluida. Metoda ini pertama kali dicoba oleh Geller (Thesis, Mississippi College, 1954). Katoda menggunakan kawat platinum diameter 0.001 in, diletakkan melewati saluran fluida dan anoda ditempatkan pada bagian hilir.

Profil kecepatan dan lapisan batas dapat terlihat pada deretan pulsa gelembung hidrogen yang diperoleh dari hasil elektrolisa air. Pengembangan metode gelembung ini di lakukan oleh Clutter dan Smith (1961), dengan menggunakan kawat katoda yang mengerut. Katoda dipasang pada permukaan yang searah dengan arah aliran, gelembung terbentuk pada seluruh bagian kawat katoda. Hama dan Nutant (1963) menggunakan metoda gelembung hidrogen pada aliran fluida tertutup dan dilewtkan pada sebuah pelat sehingga terbentuk lapisan batas pada aliran fluida. Bagian yang rumit seperti daerah rejim transisi dapat tervisualisasikan dengan terperinci. Pulsa gelembung pada interval waktu tertentu menghasilkan *time lines* (Gambar 2.5) yang diperkenalkan oleh Merkirch (1987). Garis waktu ini dimanfaatkan oleh Runstadler (Phd. Dissertation Stanford University, 1963) untuk mempelajari struktur eddy pada lapisan batas turbulen pada pelat datar.



Gambar 2.5 Contoh struktur eddy pada aliran setelah melewati pelat datar sejajar dengan bantuan *timeline* gelembung hidrogen (Kerenyi K, Hillisch S, DrobirH; n.d.)

Untuk memperoleh hasil visualisasi yang optimal maka perlu didukung pencahayaan yang optimal. Menurut Schraub et al (1965) gelembung hidrogen

dapat terlihat dengan baik dengan latar belakang yang hitam, sehingga diperlukan cahaya bantu dengan sudut datang 65° yang paralel dengan arah pengamatan.

Masalah utama metode ini adalah gaya bouyancy (apung) dari gelembung hidrogen. Gaya bouyancy memiliki vektor gerak ke arah permukaan fluida, arah gerak karena gaya apung ini tegak lurus terhadap arah alir fluida. Apabila gaya apung gelembung hidrogen cukup besar, gaya apung ini dapat mempengaruhi vektor gerak dari gelembung hidrogen. Meenakshisundaran (1980) menyatakan terdapat hubungan antara diameter gelembung hidrogen terhadap kecepatan naik gelembung hidrogen yang dipengaruhi oleh gaya apung. Meenakshisundaran menurunkan persamaan gaya apung dan gaya gesek dari gelembung sehingga diperoleh persamaan yang menyatakan hubungan antara diameter gelembung dengan kecepatan naik gelembung hidrogen:

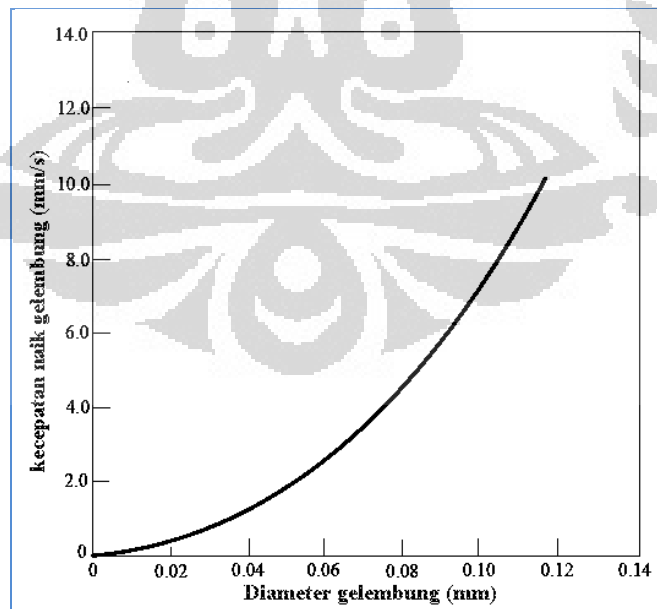
$$\tilde{v} = \frac{d^2 g}{12\nu} \quad (2.17)$$

dimana: \tilde{v} = kecepatan naik gelembung (m/s),

d = diameter gelembung (m),

ν = viskositas kinematik air (m^2/s).

Hubungan antara kecepatan naik gelembung dan diameter gelembung berdasarkan Persamaan 2.20 dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.6 Hubungan antara kecepatan rata-rata kecepatan apung gelembung hidrogen terhadap diameter gelembung hidrogen (Meenakshisundaran, 1980)

Dari gambar 2.6 dapat dilihat semakin besar diameter gelembung hidrogen maka kecepatan naik gelembung hidrogen akan semakin cepat. Dari hubungan tersebut maka diperlukan gelembung hidrogen dengan diameter yang sangat kecil untuk menghilangkan efek dari gaya apung. Clutter dan Smith (1961) menyatakan dengan kecepatan naik gelembung hidrogen sekitar 0.05 in/s sedangkan aliran fluida 6 in/s, maka gaya apung dari gelembung hidrogen dapat diabaikan. Untuk mencapai diameter gelembung yang kecil Schraub et all (1965) memperkirakan bahwa kawat yang digunakan berkisar pada diameter 0.00025 in – 0.002 in.

2.3 Elektrolisis

Elektrolisa adalah sebuah metode untuk mengurai suatu senyawa dengan menggunakan energi listrik. Proses ini menggunakan sebuah sistem untuk proses penguraian senyawa kimianya, sistem ini dikenal dengan istilah sel elektrolisis. Pada sel ini terjadi reaksi redoks, sehingga senyawa kimia yang dapat dipisahkan harus bersifat polar. Metode visualisasi gelembung hidrogen mengadopsi proses elektrolisis untuk menghasilkan gas Hidrogen sebagai *tracer* pada fluida. Air (H_2O) dapat diuraikan dengan metoda elektrolisis. Proses ini akan mengurai air menjadi unsur-unsur pembentuknya. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



Energi listrik yang digunakan untuk proses elektrolisis berasal dari listrik arus searah (DC). Umumnya sumber listrik yang ada merupakan listrik yang bertipe listrik dua arah (AC), sehingga diperlukan suatu rangkaian yang dapat merubah listrik dua arah menjadi listrik satu arah. Dalam proses perangkaian ini perlu diperhatikan berapa tegangan minimal yang diperlukan agar reaksi elektrolisis air dapat terjadi. Secara teoritis tegangan yang diperlukan dalam proses elektrolisis air adalah sebesar 0.83 volt (tabel 2.1), namun tegangan yang digunakan harus lebih tinggi dari tegangan minimum teoritisnya. Tegangan berlebih ini diperlukan untuk mencegah kemungkinan hilangnya tegangan. Selain besar tegangan yang mempengaruhi proses elektrolisis adalah besar arus listrik yang melalui katoda-anoda. Berdasarkan hukum pertama faraday massa zat yang dibebaskan pada elektrolisis (G) berbanding lurus dengan jumlah listrik yang digunakan (Q).

Tabel 2.1 Potensial reduksi standar pada 25°C (salirawati dkk, n.d.)

Reaksi Reduksi Logam	E _o (volt)
$\text{Li}^+ + e \rightarrow \text{Li}$	-3,04
$\text{K}^+ + e \rightarrow \text{K}$	-2,92
$\text{Ba}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Ba}$	-2,90
$\text{Ca}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Ca}$	-2,87
$\text{Na}^+ + e \rightarrow \text{Na}$	-2,71
$\text{Mg}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Mg}$	-2,37
$\text{Al}^{3+} + 3e \rightarrow \text{Al}$	-1,66
$\text{Mn}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Mn}$	-1,05
$2\text{H}_2\text{O} + 2e \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0,83
$\text{Zn}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Zn}$	-0,76
$\text{Cr}^{3+} + 3e \rightarrow \text{Cr}$	-0,71
$\text{Fe}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Fe}$	-0,44
$\text{Cd}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Cd}$	-0,40
$\text{Co}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Co}$	-0,28
$\text{Ni}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Ni}$	-0,25
$\text{Sn}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Sn}$	-0,14
$\text{Pb}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Pb}$	-0,13
$2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2$	0,00
$\text{Sb}^{3+} + 2e \rightarrow \text{Sb}$	+0,10
$\text{Bi}^{3+} + 3e \rightarrow \text{Bi}$	+0,30
$\text{Cu}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Cu}$	+0,34
$\text{Hg}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Hg}$	+0,62
$\text{Ag}^+ + e \rightarrow \text{Ag}$	+0,80
$\text{Pt}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Pt}$	+1,50
$\text{Au}^{3+} + 3e \rightarrow \text{Au}$	+1,70

$$G = \frac{i \cdot t}{96.500} ME \quad (2.19)$$

Dimana: G = Massa gas yang dilepaskan (gram)

i = kuat arus (ampere)

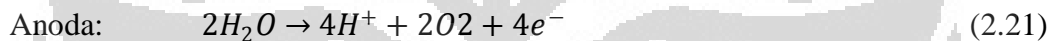
t = waktu (detik)

ME = Massa ekuivalen

Agar diperoleh *time line* pada gelembung hidrogen yang terbentuk maka diperlukan alat elektronik yang dapat memberikan pulse pada tegangan. Pulse ini

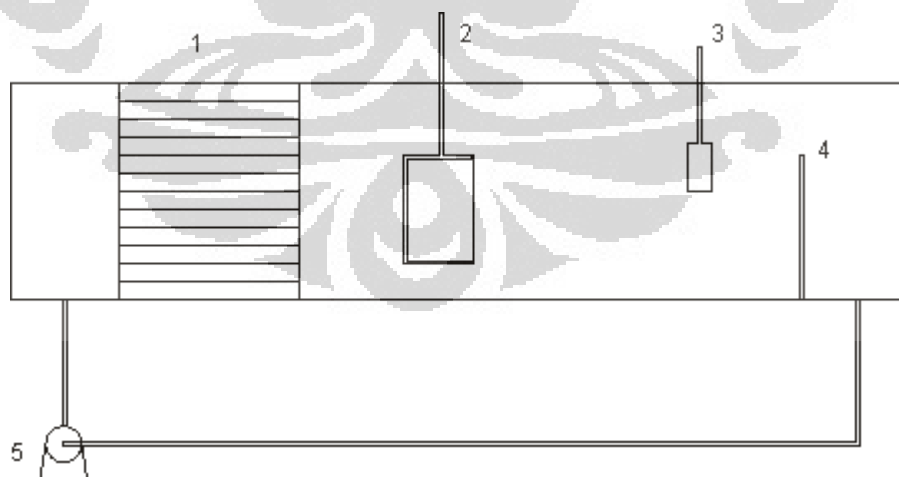
harus dapat diatur besar frekuensi yang diberikan pada proses elektrolisa. *Time line* dapat membantu dalam menganalisa dinamika fluida yang terjadi pada area di sekitar objek pengamatan.

Pada reaksi elektrolisis penting untuk memilih katoda dan anoda yang akan digunakan. Apabila salah dalam pemilihan katoda dan anoda yang tepat, maka reaksi yang terjadi adalah reaksi elektrolisis dari logam katoda atau anoda. Dalam proses elektrolisa air produk yang dihasilkan dari proses elektrolisis adalah hasil penguraian dari air yang mengalir, maka katoda dan anoda yang dipilih harus memiliki potensial reduksi standar yang lebih besar dari potensial reduksi standar air. Pada elektrolisis ini terjadi reaksi elektrolisa pada katoda dan anoda. Hidrogen terbentuk pada katoda, karena pada reaksi elektrolisis ini gas hidrogen mudah tereduksi. Reaksi yang berlangsung pada elektrolisis air adalah:



2.4 Desain Alat visualisasi aliran

Peralatan untuk visualisasi aliran fluida terdiri dari kolom air, kawat katoda-anoda, generator, pompa, kamera, dan objek uji (pelat datar, pipa persegi, dan venturi). Peralatan tersebut disusun seperti Gambar 2.10.



Gambar 2.7 perancangan kolom air

Keterangan gambar:

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

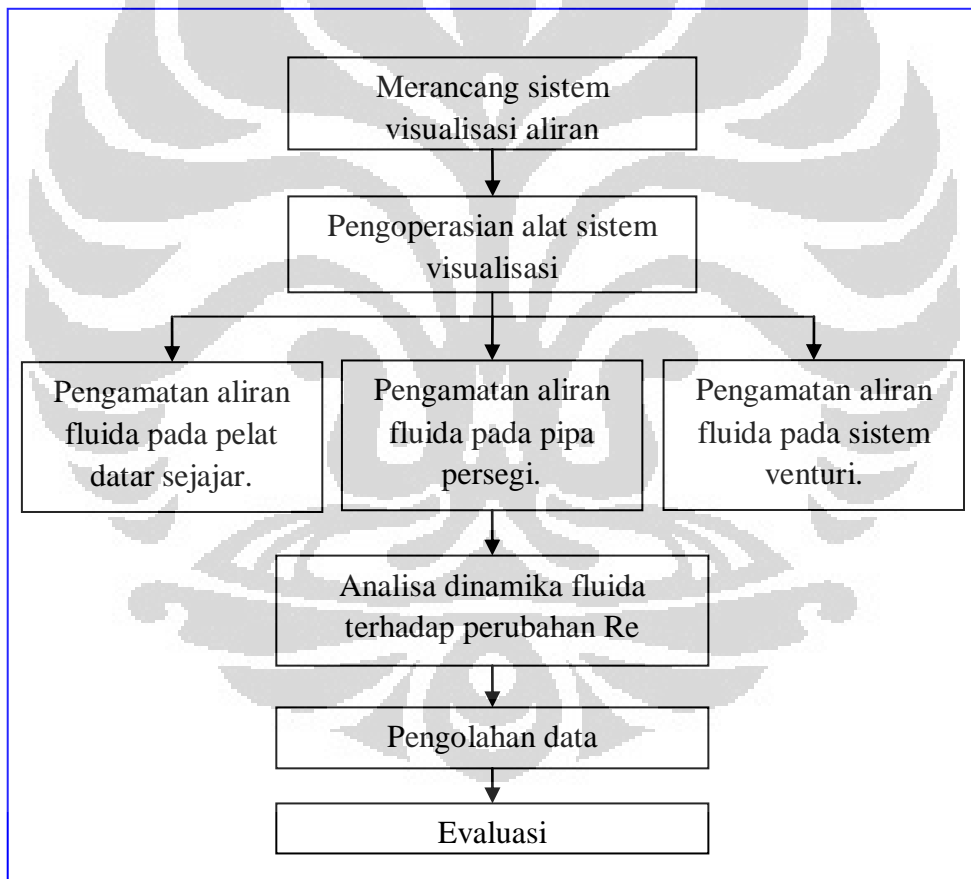
Pompa digunakan untuk mensirkulasi aliran fluida, untuk mencegah terjadinya turbulensi pada aliran fluida digunakan penstabil aliran (*honeycomb*). Honeycomb akan dibuat dengan menggunakan sedotan plastik yang disusun. Katoda diletakkan pada bagian hulu agar gelembung hidrogen yang terbentuk pada kawat katoda terbawa oleh aliran fluida, sedangkan anoda diletakkan pada bagian hilir. Pada bagian tengah kolom diletakkan objek uji yang jaraknya akan disesuaikan terhadap *honeycomb* dan bendungan. Hal ini dilakukan untuk mencegah terbentuknya turbulensi pada area *honeycomb* dan bendungan yang dapat mempengaruhi bentuk aliran pada benda uji. Ukuran keseluruhan kolom air ini akan disesuaikan dengan variasi bilangan Reynolds yang akan digunakan.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Penelitian yang dilakukan adalah Analisa dinamika aliran fluida pada pelat datar, pipa persegi dan Venturi dengan cara visualisasi aliran. Metode visualisasi aliran adalah dengan menggunakan metodologi Gelembung Hidrogen yang dihasilkan dari reaksi elektrolisis. Dengan metode ini dapat dilakukan penelitian mengenai lapisan batas, profil kecepatan dan tipikal aliran fluida.

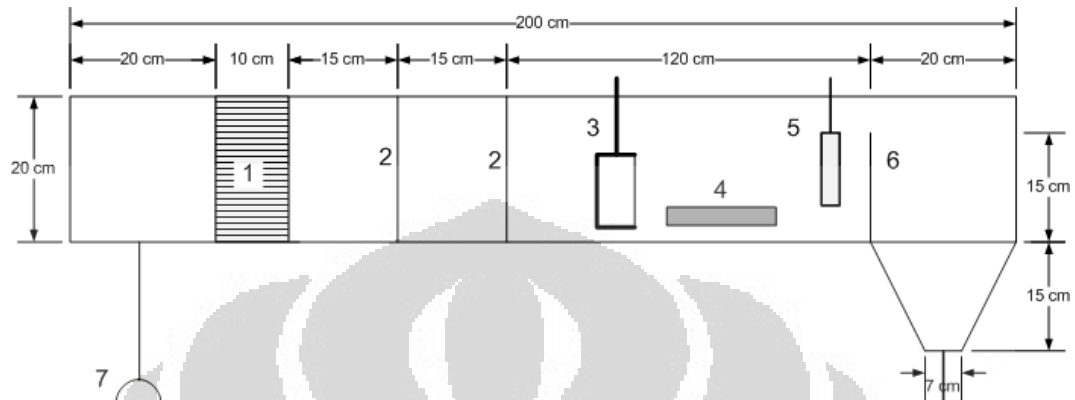
3.2 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.3 Skema Alat

Pada penelitian ini yang pertama dilakukan adalah perancangan alat visualisasi aliran dengan menggunakan gelembung hidrogen, dengan perencanaan skema alat:



Gambar 3.2 Skema kolom air

Keterangan gambar:

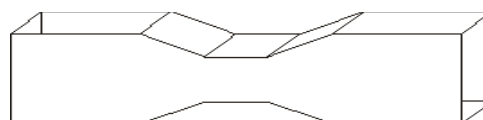
1. Honeycomb
2. Kawat (screen)
3. Katoda
4. Obyek uji
5. Anoda
6. Bendungan (*weir*)
7. Pompa



a. pipa persegi



b. pelat datar



c. venturi

Gambar 3.3 Skema obyek uji dinamika fluida

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

Alat

- Pulsa generator: untuk menghasilkan pulsa listrik untuk elektrolisa
- Katoda: Kutub positif elektroda sebagai penghasil gelembung hidrogen
- Anoda: Kutub negatif elektroda yang dipasang di bagian downstream
- Pelat datar untuk penelitian lapisan batas
- Pipa persegi untuk penelitian profil kecepatan dan rejim aliran
- Venturi untuk penelitian profil kecepatan pada venturi
- Kamera; untuk pengambilan citra visualisasi aliran

Bahan

- Air

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Persiapan Awal

Tahap ini merupakan tahap persiapan peralatan (contoh: perancangan kolom air, perancangan generator gelembung hidrogen, Perancangan pipa persegi, dsb) dan persiapan bahan.

3.5.2 Perancangan dan Pembuatan Alat

Pada tahap ini akan merancang dan membuat alat yang sesuai dengan Gambar 3.2, yaitu:

1. Membuat kolom air dengan ukuran panjang kolom 200 cm, lebar kolom 20 cm, dan tinggi kolom 20 cm;
2. Membuat objek uji yang terbuat dari bahan acrylic yang sama, ujung setiap objek uji pada sisi bagian hulu di tajamkan untuk menghindari dinamika fluida lain yang mengganggu pengamatan,
3. Membuat rangkaian penyangga untuk kolom air yang disesuaikan dengan tinggi tripod kamera,
4. Merangkai sistem perpipaan,
5. Memasang pompa, valve dan tangki penampungan air.

3.5.3 Persiapan Uji Operasi

Pada tahap ini akan menguji aliran dan kebocoran rangkaian alat. Pengujian ini untuk menilai kelayakan rangkaian alat. Langkah-langkah yang dilakukan untuk uji aliran dan kebocoran yaitu:

1. Menutup katup pada rangkaian alat.
2. Memasukkan air ke dalam kolom air sampai diperoleh ketinggian cairan yang diinginkan.
3. Membuka Katup dan menyalakan pompa dan mengamati apakah ada sambungan-sambungan yang mengalami kebocoran.
4. Mengencangkan sambungan-sambungan yang mengalami kebocoran atau bisa dengan menambahkan isolasi pipa.
5. Setting kamera hingga diperoleh nilai *Depth of Field* dan *Frame per Second* yang optimum

3.5.4 Pengoperasian Rangkaian Alat

3.5.4.1 Pengujian Dinamika Fluida Pada Pelat Datar Sejajar

1. Tutup katup pada rangkaian alat,
2. Simpan pelat datar pada area visualisasi kolom air sejajar dengan arah alir fluida,
3. Masukkan air kedalam kolom hingga mencapai ketinggian air yang diinginkan,
4. Hidupkan pompa,
5. Atur bukaan katup hingga diperoleh kecepatan yang di inginkan,
6. Variasikan kecepatan alir fluida,
7. Lakukan pengambilan data

3.5.4.2 Pengujian Dinamika Fluida Pada Pipa Persegi

1. Tutup katup pada rangkaian alat,
2. Simpan pelat datar pada area visualisasi kolom air sejajar dengan arah alir fluida,
3. Masukkan air kedalam kolom hingga mencapai ketinggian air yang diinginkan,

4. Hidupkan pompa,
5. Atur bukaan katup hingga diperoleh kecepatan yang di inginkan,
6. Variasikan kecepatan alir fluida,
7. Lakukan pengambilan data.

3.5.4.3 Pengujian Dinamika Fluida Pada Venturi

1. Tutup katup pada rangkaian alat,
2. Pasang Venturi pada tempat sangkutnya paralel dengan arah aliran,
3. Masukkan air kedalam kolom hingga mencapai ketinggian air yang diinginkan,
4. Hidupkan pompa,
5. Atur bukaan katup hingga diperoleh kecepatan yang di inginkan,
6. Variasikan kecepatan alir fluida,
7. Lakukan pengambilan data.

3.6 Pengolahan dan Analisa Data

3.6.1 Teknik Pengambilan Data

Pengambilan data dari seluruh percobaan menggunakan teknik visualisasi dengan bantuan kamera. Data pengamatan berupa video yang kemudian di pecah menjadi file gambar dengan bantuan software virtualDub. Gambar hasil tangkapan kamera di analisa dengan bantuan software *PivView*. *PivView* adalah *software* yang digunakan sebagai pembanding panjang pixel kamera terhadap panjang sebenarnya dengan menggunakan penggaris sebagai kalibrator.

3.6.2 Analisa Data

3.6.2.1 Analisa Intensitas Turbulensi

1. Memilih gambar dengan fokus yang baik untuk proses analisa pada waktu yang berbeda,
2. Tentukan titik-titik yang akan diukur kecepatan alir fluidanya,
3. Hitung jarak tempuh gelembung hidrogen per pulse alir pada titik-titik yang sama pada waktu yang berbeda,
4. Hitung kecepatan alir fluida,

5. Hitung intensitas turbulensi.

3.6.2.2 Lapisan Batas

1. Memilih gambar dengan fokus yang baik untuk proses analisa untuk setiap objek uji,
2. Hitung tebal lapisan batas pada pelat datar pada setiap satuan jarak (x) yang ditentukan dari tepi awal pelat datar,
3. Hitung secara teoritis tebal lapisan batas dengan menggunakan metode pendekatan blasius,
4. Bandingkan tebal lapisan batas pada kecepatan yang berbeda.

3.6.2.3 Venturi

1. Hitung kecepatan fluida pada setiap bilangan Reynolds pada aliran masuk dan pada penyempitan pipa
2. Hitung besar perbedaan tekanan antara aliran masuk dan pada penyempitan pipa
3. Hitung besar C_v dengan persamaan $Q = C_v A_T \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - \beta^4)}}$.

BAB IV PEMBAHASAN

Tujuan dari penelitian ini adalah analisa dinamika fluida pada aliran fluida dengan bantuan visualisasi gelembung hidrogen. Pengamatan dinamika fluida ini dilakukan pada sebuah kolom air yang dirancang sedemikian rupa sehingga dapat dilakukan pengamatan aliran fluida secara visual. Untuk membantu pengamatan visual terhadap dinamika fluida digunakan gelembung hidrogen sebagai *tracer* bentuk aliran fluida.

4.1 Perancangan Kolom Air

Perancangan kolom air yang akan digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.1



Gambar 4.1 Gambar kolom air

Total panjang kolom air ini adalah sepanjang 200 cm yang terdiri dari 4 bagian, yaitu: *Head Box*, *Honeycomb*, *screen*, dan *visualization area*. Kolom air ini dibuat dari bahan *Acrylic*, Sifat *Acrylic* yang transparan dapat membantu dalam proses pengambilan gambar visualisasi fluida.

Head box adalah suatu area hulu dari kolom air, dimana air pertama kali keluar dari sistem perpipaan. Pada area ini air yang dipompa kemudian disebarkan

merata dengan menggunakan sistem distribusi yang terbuat dari pipa T. Pada pipa T ini dibuat lubang merata sepanjang kepala pipa T, kemudian pipa T ini diletakkan tegak lurus dengan lebar kolom air dan lubang distribusi menghadap bagian hilir kolom air. Distribusi air masuk dilakukan untuk mencegah terjadinya turbulensi fluida akibat perbedaan kecepatan aliran yang terlalu besar.

Honeycomb adalah suatu alat yang memiliki fungsi untuk mengurangi turbulensi aliran fluida dengan melewatkan fluida pada pipa silinder, sistem ini dikenal juga dengan nama *straightener* (Mullen dan Jackson, 2000). *Honeycomb* ini memiliki banyak pipa kecil yang disusun sedemikian rupa hingga menyerupai rumah lebah. Fluida yang keluar dari *headbox* memiliki turbulensi yang sangat besar sehingga ketika memasuki *honeycomb* yang memiliki struktur pipa lurus yang tersusun, maka aliran yang sangat turbulen akan mengikuti bentuk struktur *honeycomb* dan keluar sebagai aliran yang lebih laminar.

Dua buah *screen* yang dipasang setelah *honeycomb* bertujuan untuk mengurangi turbulensi aliran fluida (Groth dan Johansson, 1988) yang terbentuk pada fluida ketika keluar dari sistem *honeycomb*. Idealnya apabila sistem *honeycomb* tersusun dengan baik maka aliran yang keluar dari *honeycomb* berupa aliran laminar. Area terakhir adalah *visualization area*, area ini merupakan tempat pengujian dan pengamatan dinamika fluida pada objek uji. Obyek uji dan katoda-anoda ditempatkan di area ini dan disesuaikan dengan ukuran obyek uji dan jarak antara katoda dengan obyek uji. Kamera sebagai alat bantu visualisasi aliran ditempatkan sejajar dengan area visualisasi.

Kolom air serta obyek uji dirancang dengan menggunakan bahan acrylic, sehingga memudahkan dalam pengamat visual. Sebagai alat sirkulasi fluida pada kolom air digunakan pompa dengan kapasitas maksimal 500 liter per menit. Pompa dengan kapaitas besar ini dimaksudkan agar dapat diperoleh kecepatan alir fluida yang besar pada kolom air.

4.2 Sistem Elektrolisa

Pada penelitian ini digunakan dua tahap trafo yang dapat menghasilkan tegangan listrik DC sebesar 60 volt dengan arus 10 Ampere. Trafo yang pertama merupakan trafo yang dapat merubah tegangan dari AC 220 volt menjadi AC 110

volt. Output dari trafo pertama diterima oleh trafo yang kedua kemudian tegangannya diturunkan menjadi DC 60 volt. Pada trafo kedua dilakukan modifikasi dengan penambahan *relay* yang dihubungkan dengan pulse generator, sehingga frekuensi listrik yang dialirkan pada katoda dapat disesuaikan. Dengan pengaturan frekuensi tegangan maka dapat diperoleh pulse gelembung hidrogen yang dapat membantu analisa dinamika fluida.

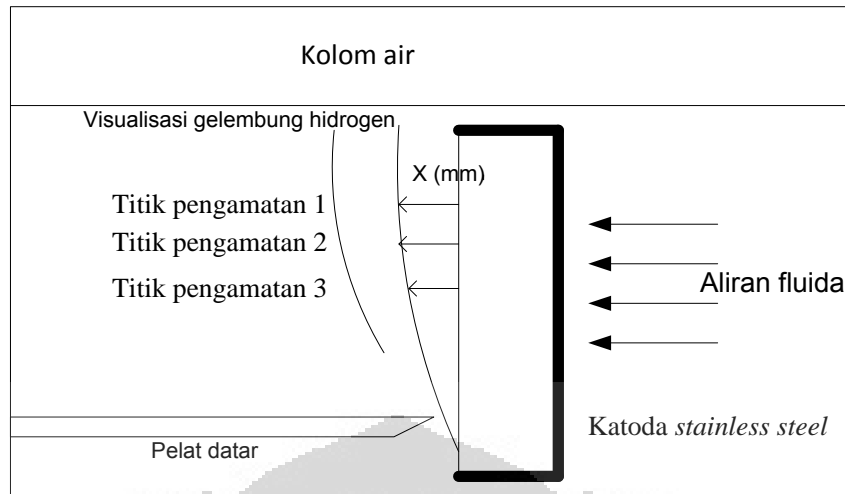
Gelembung hidrogen diperoleh dari kawat stainless steel yang direntangkan. Kawat stainless ini ditopang oleh besi berisolasi sehingga dapat ditempatkan sesuai dengan kebutuhan. Besi berisolasi ini dibentuk menyerupai garpu tala, kemudian kawat katoda dililitkan pada ujung garpu tala dan dihubungkan dengan output positif dari trafo kedua sebagai sumber listrik. Sebagai anoda digunakan pelat stainless steel, pelat ini diletakkan pada bagian hilir kolom air. Pelat stainless steel dihubungkan dengan output negatif dari trafo kedua.

4.3 Analisa Dinamika Fluida

Uji dinamika ini dilakukan pada 3 obyek uji yang berbeda yaitu pelat datar, pipa persegi dan venturi. Ketiga obyek uji ini kemudian diletakkan pada kolom air pada area visualisasi. Pada ketiga obyek uji ini kemudian dialirkan air dengan 3 kecepatan alir yang berbeda. Kawat katoda diletakkan sedemikian rupa sehingga dapat diperoleh visualisasi fluida di sekitar objek uji.

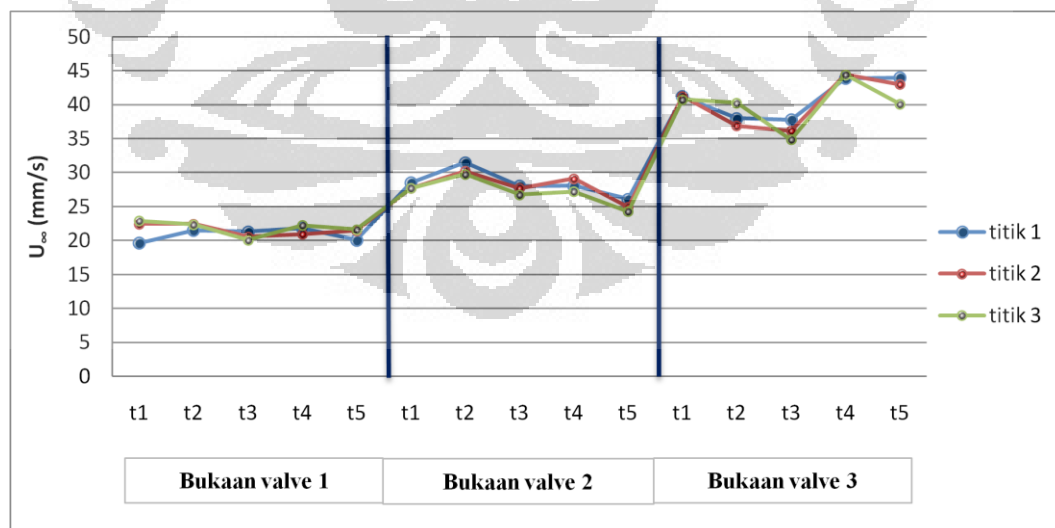
4.3.1 Uji Kestabilan Aliran Pada Kolom Air

Untuk uji kestabilan kolom air ini diambil beberapa data dari pengujian visualisasi pada aliran bebas kolom air. Pengambilan data dilakukan pada setiap titik yang telah ditentukan, titik-titik ini memiliki tinggi tertentu dari permukaan pelat datar. Titik 1 memiliki tinggi 50 mm, titik 2 memiliki tinggi 40 mm dan titik 3 memiliki tinggi 30 mm dari permukaan pelat datar. Skema titik pengambilan data dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan cara perhitungan kecepatan alir fluida dapat dilihat pada lampiran A.



Gambar 4.2 Skema pengambilan data panjang pulsa gelembung hidrogen

Setelah menentukan titik pengamatan, pada setiap titik di ukur panjang visualisasi gelembung hidrogen per pulsa untuk setiap waktu yang berbeda. Waktu pengambilan data panjang gelembung hidrogen per pulsa dinyatakan sebagai $t-1$, $t-2$, $t-3$, $t-4$ dan $t-5$. Waktu pengamatan tidak dapat disesuaikan pada waktu tertentu dikarenakan diperlukan pemilihan hasil visualisasi yang tajam untuk memudahkan analisa, sehingga waktu untuk pengambilan data dinyatakan sebagai $t-1$, $t-2$, $t-3$, $t-4$, dan $t-5$. Data pengamatan dan perhitungan untuk uji kestabilan kecepatan fluida dapat dilihat pada Tabel 4.1.



Gambar 4.3 Kurva perbandingan kestabilan kecepatan alir fluida pada setiap bukaan *valve*

Tabel 4.1 Data pengamatan dan perhitungan uji kestabilan kecepatan fluida (U_{∞}) pada kolom air pada setiap bukaan *valve*

Bukaan valve	titik pengamatan	t-1		t-2		t-3		t-4		t-5	
		x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)
Bukaan valve 1	titik 1	9,81	19,62	10,75	21,49	10,64	21,29	10,93	21,85	10,04	20,08
	titik 2	11,21	22,43	11,21	22,43	10,28	20,56	10,46	20,92	10,74	21,48
	titik 3	11,45	22,89	11,18	22,36	10,05	20,09	11,13	22,25	10,81	21,62
Bukaan valve 2	titik 1	14,26	28,51	15,74	31,48	14,02	28,04	14,02	28,04	13,05	26,10
	titik 2	13,85	27,69	15,11	30,22	13,85	27,70	14,55	29,10	12,47	24,94
	titik 3	13,85	27,69	14,88	29,76	13,38	26,75	13,61	27,23	12,14	24,27
Bukaan valve 3	titik 1	20,60	41,20	19,00	38,00	18,89	37,78	21,94	43,88	21,98	43,96
	titik 2	20,63	41,26	18,45	36,89	18,07	36,15	22,22	44,44	21,50	42,99
	titik 3	20,39	40,77	20,15	40,29	17,43	34,86	22,22	44,44	20,05	40,09

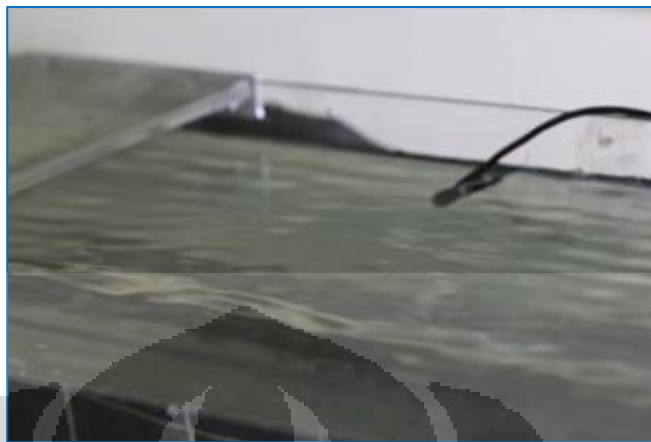
Dari hasil analisa data pada Gambar 4.6 dapat diperoleh besar intensitas turbulensi. Intensitas Turbulensi ini untuk mengetahui seberapa besar turbulensi yang terbentuk oleh suatu aliran fluida. Dari hasil analisa pada hasil visualisasi aliran diperoleh besarnya intensitas turbulensi pada tiap bukaan *valve*.

Tabel 4.2 Data intensitas turbulensi aliran fluida pada kolom air

Bukaan valve	standar deviasi (u')	rata-rata (\bar{U})	Intensitas Turbulensi (%)	Bukaan valve	standar deviasi (u')	rata-rata (\bar{U})	Intensitas Turbulensi (%)	Bukaan valve	standar deviasi (u')	rata-rata (\bar{U})	Intensitas Turbulensi (%)
Bukaan valve 1	0,96	20,87	4,61	Bukaan valve 1	1,94	28,43	6,81	Bukaan valve 1	3,02	40,97	7,36
	0,85	21,56	3,96		1,98	27,93	7,09		3,68	40,35	9,12
	1,08	21,84	4,94		1,97	27,14	7,26		3,42	40,09	8,53

Dari hasil perhitungan intensitas turbulensi aliran fluida pada kolom air diperoleh nilai intensitas turbulensi yang lebih dari 1%. Dengan nilai intensitas turbulensi yang lebih dari 1% kolom air yang dirancang belum cukup laminar (Kerenyi, 1998). Aliran fluida yang tidak laminar dapat disebabkan oleh beberapa faktor,

antara lain adalah: getaran pada kolom serta tidak adanya daerah kontraksi pada bagian hulu.



Gambar 4.4 Gelombang pada aliran fluida yang disebabkan getaran pada kolom air

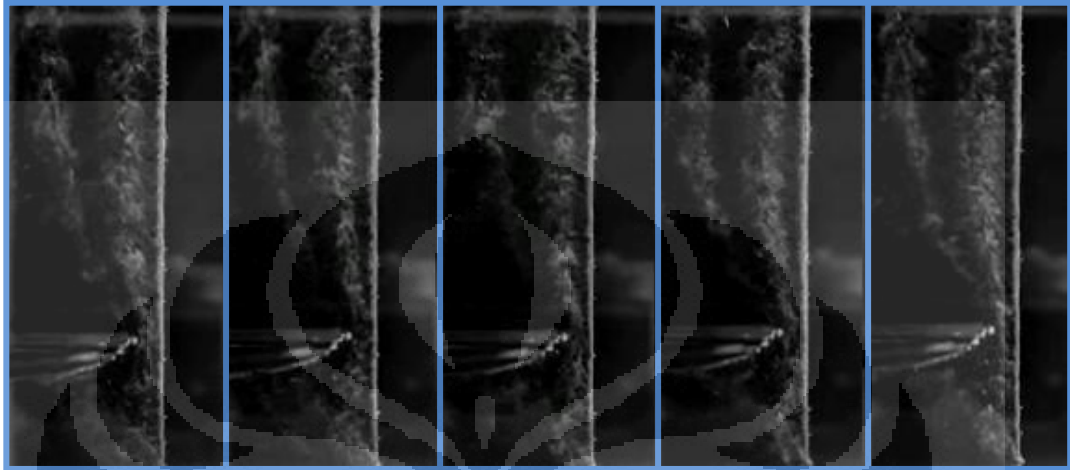
Pada Gambar 4.4 dapat dilihat visualisasi gelombang yang terjadi pada permukaan aliran air. Gelombang fluida pada permukaan aliran air dapat terjadi di seluruh bagian kolom. Gelombang fluida pada kolom dapat diakibatkan oleh getaran yang disebabkan oleh aliran fluida pada sistem perpipaan. Pada sistem perpipaan yang memiliki diameter lebih kecil dari kolom air akan menyebabkan kecepatan air akan meningkat dan menghasilkan turbulensi yang sangat besar. turbulensi aliran air pada pipa menyebabkan pipa bergetar. Getaran pada kolom air ini dapat mempengaruhi gerakan gelembung hidrogen di dalam air. Beberapa cara dapat digunakan untuk meredam getaran pada kolom air, salah satunya adalah dengan memasang peredam getaran pada kaki – kaki penyangga kolom air.

Penambahan kontraksi aliran pada bagian hulu kolom air akan mengakselerasi aliran fluida sehingga aliran akan lebih laminar. Daerah kontraksi pada kolom air di disain tanpa sudut yang tajam (melengkung) karena sudut yang tajam pada daerah kontraksi dapat menghasilkan turbulensi pada aliran fluida.

4.3.2 Dinamika Fluida Pada Pelat Datar

Gambar 4.5, Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 menggambarkan visualisasi aliran air dengan bantuan gelembung hidrogen di sekitar pelat datar. Garis-garis gelembung hidrogen yang mengikuti aliran fluida tergambar tidak mengikuti garis

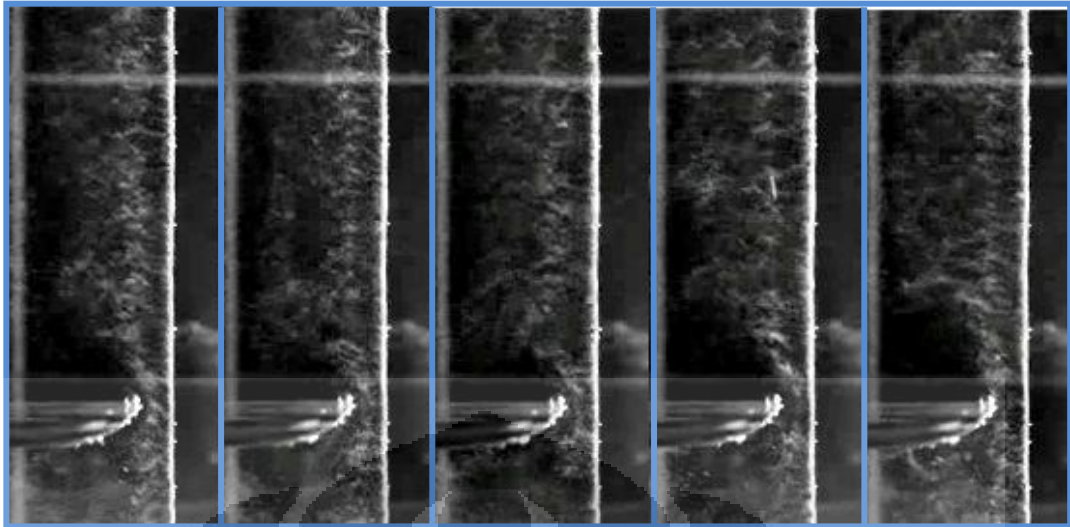
lurus. Visualisasi gelembung ini dapat menggambarkan bahwa aliran air tersebut tidak laminar. Pada Gambar 4.5 gelembung hidrogen cenderung bergerak miring ke arah atas, gerakan gelembung hidrogen ini menggambarkan bahwa terjadi gerakan naik gelembung hidrogen akibat gaya apung yang mempengaruhi visualisasi aliran air.



Gambar 4.5 Visualisasi aliran pada pelat datar ($U_\infty = 21,243 \text{ mms}^{-1}$)

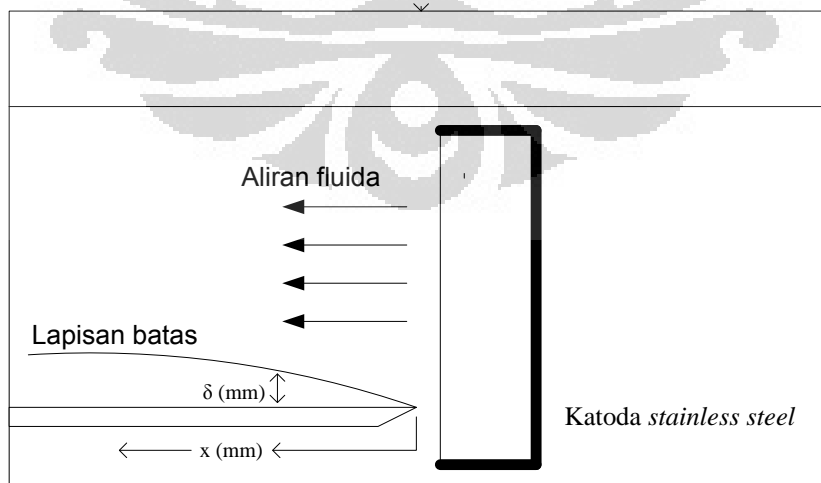


Gambar 4.6 Visualisasi aliran pada pelat datar ($U_\infty = 27,835 \text{ mms}^{-1}$)



Gambar 4.7 Visualisasi aliran pada pelat datar ($U_\infty = 40,468 \text{ mms}^{-1}$)

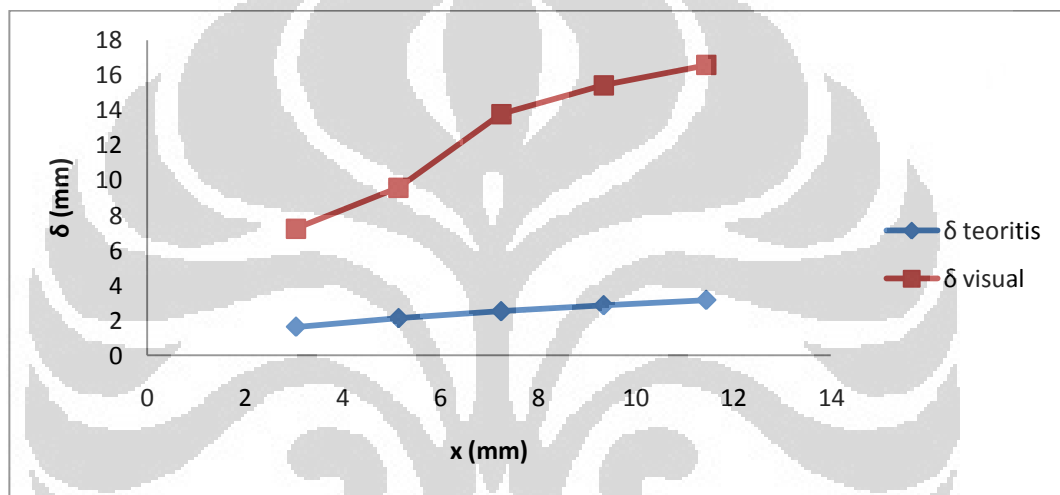
Gaya apung dari gelembung hidrogen ini masih dapat terlihat pada kecepatan alir air (U_∞) sebesar $27,835 \text{ mms}^{-1}$. Efek gaya apung mulai menghilang pada kecepatan alir air sebesar $40,468 \text{ mms}^{-1}$. Pada tepi hulu pelat datar yang dibuat runcing, terlihat kenaikan gelembung hidrogen secara tiba-tiba yang kemudian mulai mengikuti arah aliran air. Pada area ini terbentuk lapisan batas, gelembung hidrogen naik ke permukaan lapisan batas dikarenakan kecepatan alir air yang menurun pada area lapisan batas. Lapisan batas yang tervisualisasi oleh gelembung hidrogen ini dapat dianalisa. Pengambilan data untuk analisa lapisan batas mengikuti skema seperti pada gambar 4.8



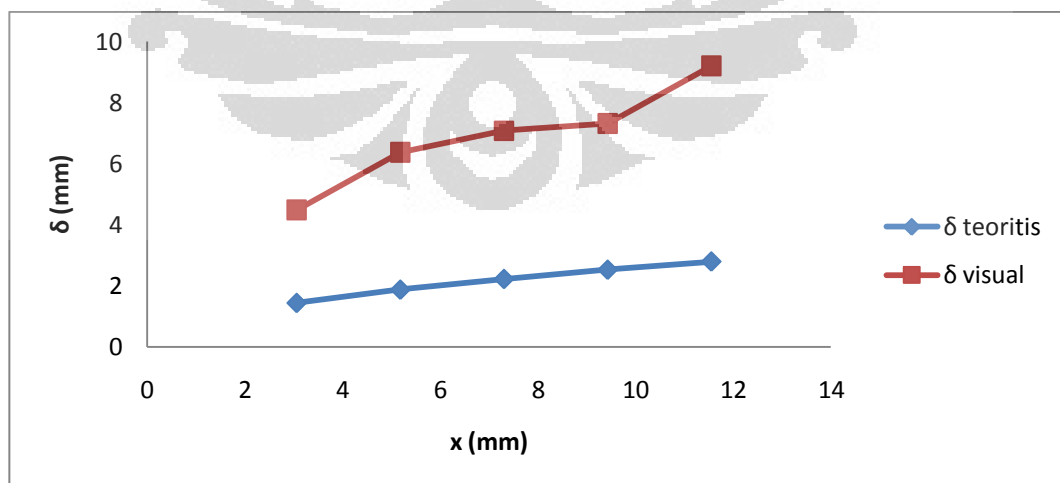
Gambar 4.8 Skema pengambilan data analisa lapisan batas pada pelat datar

Tabel 4.3 Data perbandingan tebal lapisan batas kecepatan kolom air yang berbeda

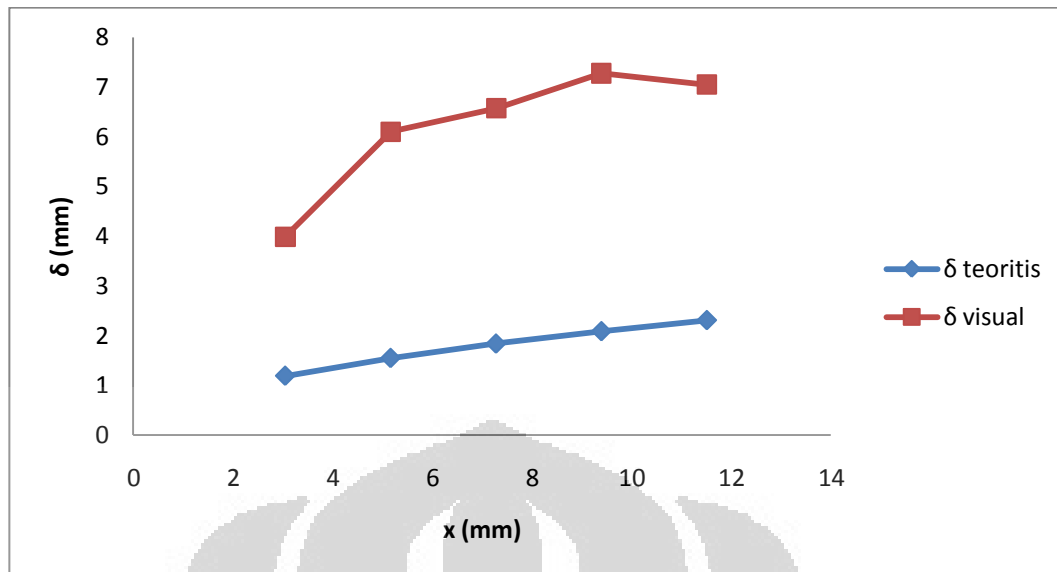
$\bar{U}_\infty = 21,423 \text{ mm/s}$				$\bar{U}_\infty = 27,835 \text{ mm/s}$				$\bar{U}_\infty = 40,468 \text{ mm/s}$			
jarak x (mm)	Re_x	δ teoritis (mm)	δ visual (mm)	jarak x (mm)	Re_x	δ teoritis (mm)	δ visual (mm)	jarak x (mm)	Re_x	δ teoritis (mm)	δ visual (mm)
3,050	87,05	1,635	7,241	3,065	113,66	1,437	4,481	3,052	164,54	1,190	3,991
5,150	146,98	2,124	9,576	5,187	192,35	1,870	6,367	5,165	278,46	1,548	6,103
7,250	206,92	2,520	13,781	7,309	271,04	2,220	7,074	7,278	392,39	1,837	6,573
9,350	266,85	2,862	15,416	9,431	349,73	2,522	7,311	9,391	506,30	2,087	7,276
11,450	326,79	3,167	16,584	11,553	428,42	2,791	9,197	11,504	620,21	2,310	7,046



Gambar 4.9 Grafik perbandingan tebal lapisan batas teoritis dan visual pada $\bar{U}_\infty = 21,423 \text{ mm/s}$



Gambar 4.10 Grafik perbandingan tebal lapisan batas teoritis dan visual pada $\bar{U}_\infty = 27,835 \text{ mm/s}$



Gambar 4.11 Grafik perbandingan tebal lapisan batas teoritis dan visual pada $\bar{U}_\infty = 40,468 \text{ mm/s}$

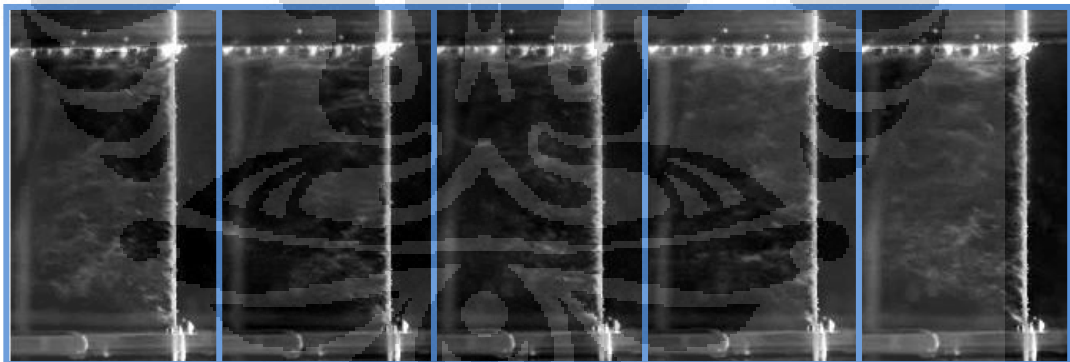
Lapisan batas pada pelat datar dapat dilihat pada Gambar 4.5, Gambar 4.6, dan Gambar 4.7. Hasil visualisasi pada ketiga gambar tersebut dapat dianalisa tebal lapisan batas pada aliran fluida. Data yang diperoleh adalah data antara tebal lapisan batas dan jarak lapisan batas terukur terhadap tepian muka pelat datar. Dengan membandingkan antara Gambar 4.9, Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 dari hasil analisa gambar visualisasi gelembung hidrogen terhadap lapisan batas pada pelat datar dapat dilihat bahwa semakin besar besar kecepatan alir suatu fluida (\bar{U}_∞), maka tebal lapisan batasnya semakin menipis (Gambar 2.2). Pada kecepatan alir fluida yang semakin besar gaya inersia fluida akan semakin besar dan efek viskositas dapat diabaikan, sehingga lapisan batas akan semakin mendekati dinding pelat (munson, 2002).

Berbeda dengan pengaruh jarak pada pelat, semakin jauh jarak yang di tempuh oleh fluida maka semakin besar lapisan batasnya. Hal ini disebabkan oleh total gaya gesek (persamaan 2.12) yang diterima oleh fluida pada lapisan batas. Semakin jauh fluida bergesekan dengan dinding pelat semakin besar gaya gesek yang diterima fluida dan semakin lambat aliran fluida. Semakin lambat kecepatan fluida pada permukaan pelat, maka semakin banyak lapisan fluida yang terpengaruh oleh gaya gesek yang diberikan oleh pelat.

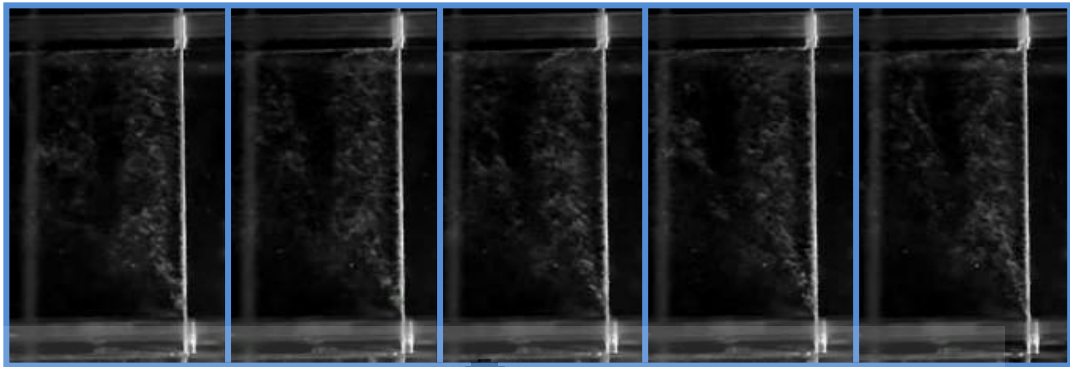
Hasil visualisasi lapisan batas pada kecepatan alir (\bar{U}_∞) yang berbeda memiliki selisih ketebalan yang cukup jauh dengan perhitungan secara teoritisnya (persamaan 2.6). Perbedaan hasil visualisasi dengan hasil secara perhitungan teoritis dapat disebabkan karena pengaruh gaya apung dari gelembung hidrogen. Dengan membandingkan Gambar 4.9, Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 dapat dilihat pada grafik perbedaan lapisan batas pada \bar{U}_∞ yang semakin kecil perbedaan lapisan batas semakin besar.

4.3.3 Dinamika Fluida Pada Pipa Persegi

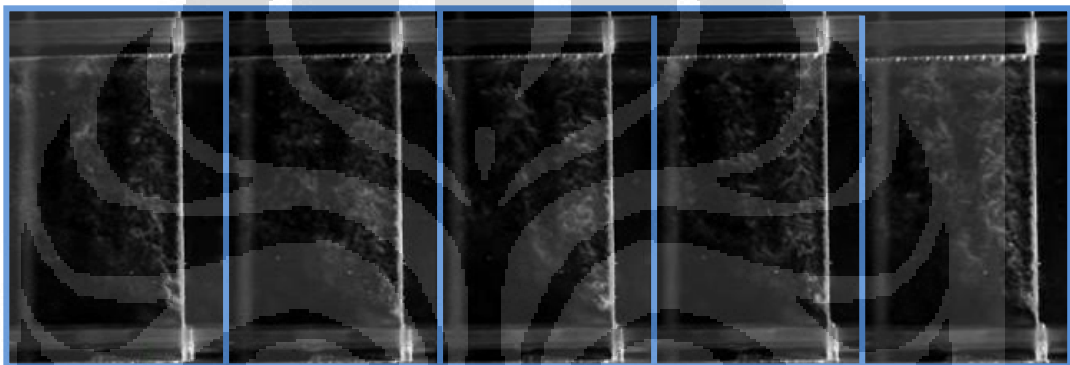
Dari Gambar 4.12, Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 dapat dilihat pola aliran di dalam pipa persegi. Visualisasi pada aliran pada pipa persegi ini tidak banyak berbeda dengan visualisasi aliran air pada pelat datar. Aliran air dalam pipa persegi ini memiliki keteraturan pola aliran yang lebih baik, dapat dilihat pada pola garis-garis yang divisualisasikan oleh gelembung hidrogen. Pada Gambar 4.12 hasil visualisasi gelembung hidrogen lebih memperlihatkan pola aliran bila dibandingkan dengan Gambar 4.7 walaupun memiliki kecepatan alir yang relatif sama.



Gambar 4.12 Visualisasi aliran pada pipa persegi ($U_\infty = 42,76 \text{ mms}^{-1}$)



Gambar 4.13 Visualisasi aliran pada pipa persegi ($U_{\infty} = 22,17 \text{ mms}^{-1}$)



Gambar 4.14 Visualisasi aliran pada pipa persegi ($U_{\infty} = 17,51 \text{ mms}^{-1}$)

Pola aliran pada pipa persegi akan memiliki pola aliran yang lebih baik karena memiliki nilai Reynolds yang lebih rendah. Bilangan Reynolds yang lebih rendah ini menyatakan bahwa aliran di dalam pipa persegi lebih laminar bila dibandingkan dengan aliran kolom air. Namun aliran yang lebih laminar ini belum cukup memadai untuk melakukan analisa lebih mendalam untuk mempelajari profil kecepatan pada area lapisan batas. Ketidakmampuan gelembung hidrogen untuk menembus lapisan batas diakibatkan oleh kecepatan alir air yang sangat lambat. Analisa lapisan batas dapat dianalisa dengan cara mengukur jarak antara gelembung hidrogen terdekat pada dinding pipa. Cara pengambilan data untuk analisa lapisan batas pada pipa persegi berdasarkan pada skema yang di gambarkan pada Gambar 4.8.

Tabel 4.4 Tabel perhitungan \bar{U} pada pipa persegi

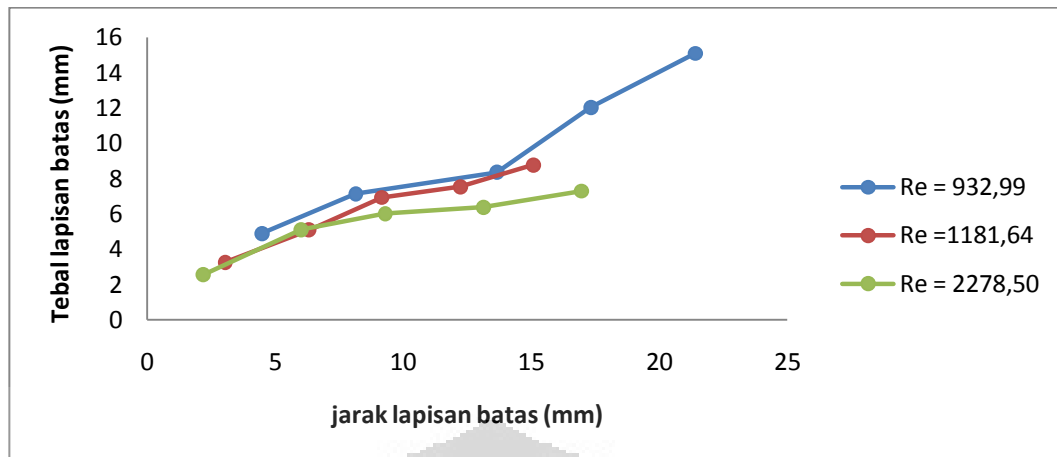
Bukaan valve 1	titik pengamatan	t-1		t-2		t-3		t-4		t-5		rata-rata (\bar{U})
		x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	
	titik 1	8,53	17,06	8,16	16,31	8,77	17,54	8,80	17,61	8,97	17,95	17,291
	titik 2	8,73	17,46	8,97	17,94	8,97	17,94	8,39	16,79	8,97	17,95	17,616
	titik 3	8,93	17,87	8,97	17,94	8,77	17,54	8,39	16,79	8,97	17,95	17,616
											\bar{U}	17,508

Bukaan valve 2	titik pengamatan	t-1		t-2		t-3		t-4		t-5		rata-rata (\bar{U})
		x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	
	titik 1	9,83	19,65	11,26	22,52	11,70	23,39	11,05	22,10	10,81	21,62	21,857
	titik 2	10,03	20,06	10,85	21,71	12,20	24,39	11,25	22,49	11,21	22,42	22,214
	titik 3	11,06	22,11	10,85	21,71	12,29	24,57	11,53	23,06	10,40	20,80	22,451
											\bar{U}	22,174

Bukaan valve 3	titik pengamatan	t-1		t-2		t-3		t-4		t-5		rata-rata (\bar{U})
		x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	
	titik 1	19,40	38,79	19,19	38,39	22,88	45,76	21,89	43,77	22,60	45,20	42,383
	titik 2	19,49	38,99	19,72	39,44	22,49	44,97	22,89	45,78	22,20	44,39	42,715
	titik 3	20,36	40,73	19,29	38,57	22,49	44,98	22,89	45,78	22,91	45,81	43,173
											\bar{U}	42,757

Tabel 4.5 Tabel analisa lapisan batas pada pipa persegi

Titik pengamatan	Re = 932,99		Re = 1181,64		Re = 2278,50	
	jarak lapisan batas (mm)	tebal lapisan batas (mm)	jarak lapisan batas (mm)	tebal lapisan batas (mm)	jarak lapisan batas (mm)	tebal lapisan batas (mm)
1	4,485	4,893	3,058	3,262	2,190	2,555
2	8,155	7,136	6,320	5,096	6,021	5,109
3	13,659	8,358	9,174	6,932	9,306	6,022
4	17,329	12,026	12,232	7,543	13,138	6,386
5	21,407	15,086	15,086	8,767	16,970	7,299



Gambar 4.15 Kurva perbandingan lapisan pada variasi Reynolds

Dari hasil pengamatan aliran fluida pada pipa persegi yang diletakkan pada kolom air pun tidak stabil. Aliran fluida di dalam pipa persegi ini sangat dipengaruhi oleh bentuk aliran yang masuk kedalam sistem pipa persegi. Pada Gambar 4.7, Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa gelembung hidrogen tiba – tiba naik dari dasar pipa ketika baru terbentuk dari katoda. Fenomena ini dipengaruhi oleh lapisan batas yang telah terbentuk pada pipa. Lapisan batas ini terbentuk ketika fluida mulai memasuki pipa, sedangkan gelembung hidrogen di tambahkan dipertengahan pipa. Masuknya gelembung di tengah pipa menyebabkan gelembung tiba-tiba naik pada bagian dasar pipa karena kecepatan di lapisan batas sangat rendah. Kecepatan fluida pada daerah batas menyebabkan gelembung hidrogen naik secara tiba-tiba. karena pengaruh ini pula sulit untuk memvisualisasikan profil kecepatan fluida pada daerah lapisan batas.

Dari Gambar 4.15 kurva perbandingan ini menggambarkan bahwa pada awal terbentuk gelembung pada katoda (area dekat katoda) gelembung tiba-tiba naik dan kemudian perubahan visualisasi ketebalan lapisan batas mulai melandai. Analisa visualisasi diatas berlaku pada kecepatan yang lebih tinggi, sedangkan pada kecepatan yang rendah kenaikan gelembung tidak berubah tetap signifikan, kenaikan ini karena kecepatan fluida tidak dapat mengimbangi kecepatan naik gelembung akibat gaya apung.

Pengaruh gaya apung terhadap kecepatan dapat terlihat pada bagian atas pipa persegi. Pada bagian atas pipa persegi lapisan batas sama sekali tak terlihat. Gaya apung pada gelembung hidrogen mampu mendorong hidrogen untuk

melewati gaya gesek yang terjadi pada lapisan batas. Namun lapisan tipis di bagian atas pipa persegi dapat terlihat sedikit gradien kecepatan pada lapisan batas. Pada Gambar 4.13 dapat dilihat gelembung hidrogen melambat pada kecepatan yang paralel dengan arah alir fluida, yang kemudian gelembung tetap mengapung dan menempel pada permukaan pipa.

4.3.4 Venturi

Dengan menghitung kecepatan alir fluida pada bagian hulu venturi dan mengukur beda tekanan antara bagian hulu dan bagian throat venturi, maka dapat dihitung besarnya *Coefficient discharge* (C_v) venturi. Pengambilan data untuk menghitung kecepatan laju alir dari fluida hanya dilakukan pada bukaan valve 2 dan bukaan valve 3. Hasil perhitungan kecepatan alir pada setiap bukaan valve dapat dilihat pada tabel 4.6.

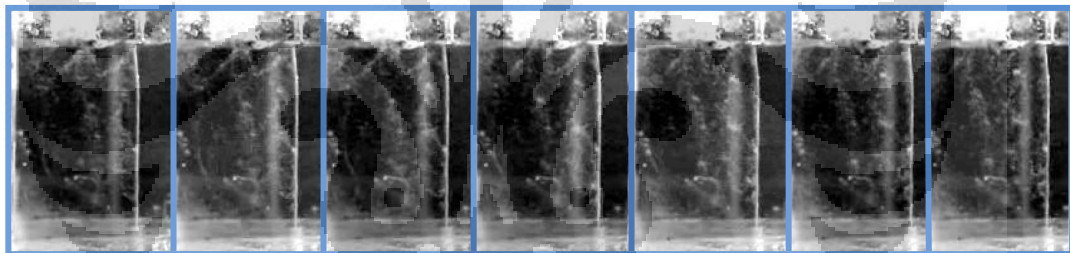
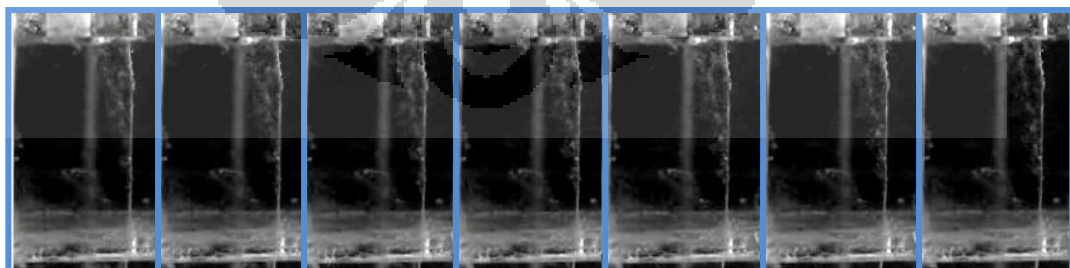
Tabel 4.6 Data dan perhitungan kecepatan alir fluida pada venturi

titik	Bukaan valve 3				Bukaan valve 2			
	t-1		t-2		t-1		t-2	
	x (mm)	U (mm/s)	x (mm)	U (mm/s)	x (mm)	U (mm/s)	x (mm)	U (mm/s)
1	7,830	15,660	6,886	13,772	3,0480	6,096	3,3936	6,787
2	9,035	18,070	6,287	12,575	3,0480	6,096	3,6331	7,266
3	8,131	16,262	6,587	13,173	3,3534	6,707	3,6361	7,272
	\bar{U} (mm/s)	16,664	\bar{U} (mm/s)	13,173	\bar{U} (mm/s)	6,300	\bar{U} (mm/s)	7,109
\bar{U} (mm/s)	14,919				6,704			

Dari hasil perhitungan kecepatan alir fluida dapat dihitung besar *Coefficient discharge* (C_v). Menghitung besarnya C_v pada aliran fluida di dalam venturi dengan menggunakan persamaan 2.16. Pada tabel 4.7 dapat dilihat bahwa nilai koefisien pada venturi yang di desain sangat kecil. Nilai C_v yang kecil dapat menggambarkan terjadinya kehilangan gaya yang sangat besar pada venturi.

Tabel 4.7 Hasil perhitungan Kecepatan alir fluida pada bukaan valve 2 dan 3

	Bukaan valve 3		Bukaan valve 2	
Δh manometer	0,0147	M	0,0122	m
g	9,800	m/s^2	9,800	m/s^2
ρ (metanol)	792,0	Kg/m^3	792,0	Kg/m^3
P1 -P2	114,1	Kg/ms^2	94,6915	Kg/ms^2
A1	0,16	M	0,16	m
A2	0,04	M	0,04	m
$(A1^2/A2^2)$	4		4	
ρ (air)	996,51	Kg/m^3	996,513	Kg/m^3
\bar{U}	0,0149	(m/s)	0,0067	(m/s)
Cv	0,054		0,027	

**Gambar 4.16** Visualisasi *timeline* aliran pada venturi dengan kecepatan $U = 14,919 \text{ mm/s}$ **Gambar 4.17** Visualisasi *timeline* aliran pada venturi dengan kecepatan $U = 6,704 \text{ mm/s}$

Pengamatan laju kecepatan pada aliran fluida di dalam venturi sulit dilakukan, karena aliran di dalam venturi sangat turbulen. Gambar 4.16 memperlihatkan turbulensi aliran langsung terjadi pada area sekitar katoda. Salah satu faktor yang dapat menyebabkan terjadinya turbulensi aliran fluida adalah penyempitan pada leher (*throat*) venturi. Penyempitan pada leher venturi menyebabkan hilangnya tekanan fluida yang yang memasuki leher venturi, kehilangan tekanan ini menyebabkan terjadinya akumulasi massa fluida pada daerah sekitar upstream leher venturi. Akumulasi massa di upstream leher venturi segera diimbangi dengan kenaikan kecepatan alir secara tiba-tiba. Proses yang berlangsung dengan sangat cepat ini menyebabkan turbulensi pada fluida.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, kesimpulan yang dapat diambil adalah:

1. Rata – rata intensitas turbulensi yang cukup besar 4,5% untuk bukaan valve 1; 7,05% untuk bukaan valve 2 dan 8,3% untuk bukaan valve 3 menggambarkan bahwa kolom air yang di desain tidak cukup menghasilkan aliran yang laminar,
2. Hasil analisa visualisasi gelembung hidrogen pada pelat datar dan pipa persegi menggambarkan gelembung hidrogen sangat dipengaruhi oleh gaya apungnya,
3. Gelembung hidrogen dapat memvisualisasikan lapisan batas, namun tidak dapat memvisualisasikan gradien kecepatan pada lapisan batas.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian berikutnya adalah sebagai berikut:

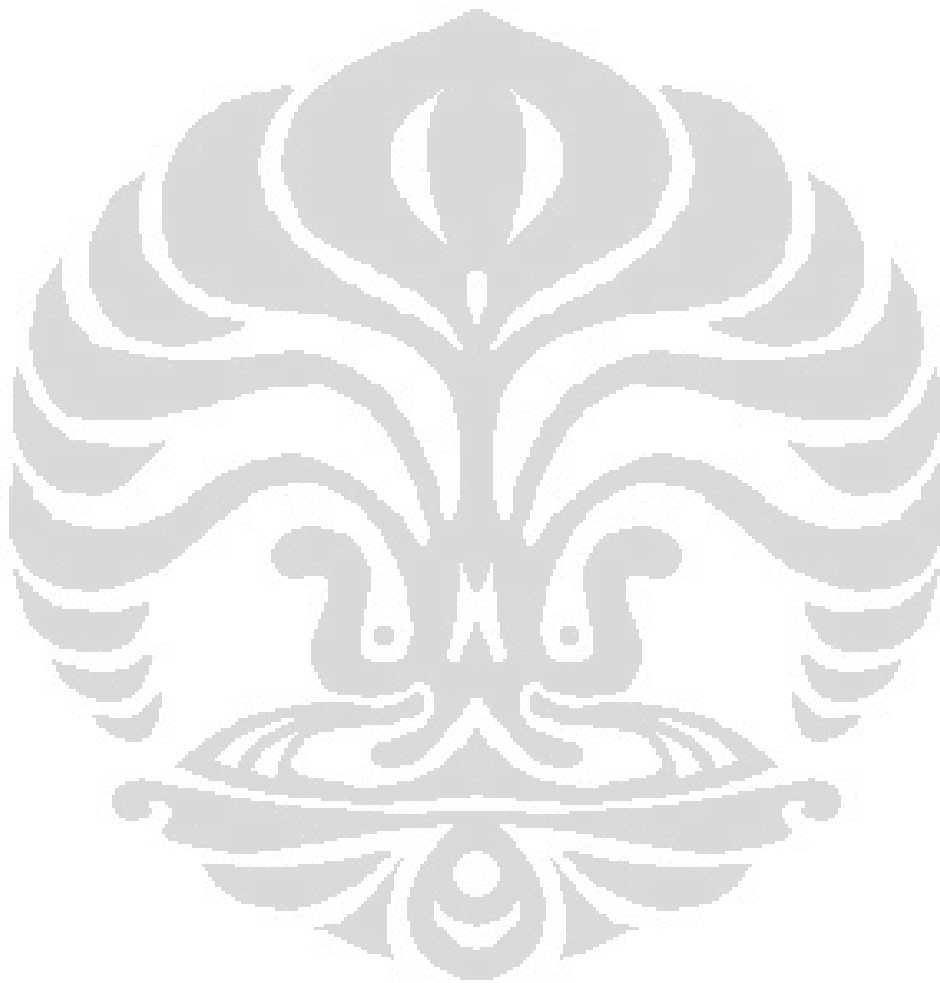
1. Perlu penambahan daerah akselerasi pada bagian hulu kolom air agar aliran fluida yang dihasilkan lebih laminar, karena pengujian karakteristik aliran pada aliran laminar lebih mudah dianalisa,
2. Perlu menggunakan kawat katoda dengan diameter yang lebih kecil, dengan diameter yang lebih kecil dapat menghasilkan gelembung hidrogen dengan diameter yang lebih kecil sehingga dapat meminimalkan kesalahan karena pengaruh gaya apung.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrejasic, M. (t.thn). Laminar Boundary Layer Over a Flat Plate Zero Incidence.
- Bar-meir, G. (2011). *Basics of Fluids Mechanics*. Chicago
- Bucknall, J. (t.thn). *Thrust, Flow Straighteners, Steering and Straight Line Stability*. Di unduh 6 juli 2012 dari <http://www.hovercraft.org.uk/attachment.php?s=66f616268c1acac5cf737e78236e8b82&attachmentid=3345&d=1238359312>
- Burneo, S. D., & Pauley, W. R. (1992). *Digital Image Processing of Hydrogen Bubble Lines for Instantaneous Velocity Profile*. Pennsylvania: Pennsylvania State University
- Clayton, B. R., & Massey, B. S. (1967). *Flow Visualization in Water: a Review Technique*. *IOPScience* , vol. 44
- Groth, J., & Johansson, A. V. (1988). *Turbulence Reduction by Screen*. *J. Fluid Mech.* , 139-155.
- Kerenyi, K., Drobir, H., Hillisch, S., & Staubli, T. (1998). *Flow Visualization Of Oscillating Rectangular Prisms Arranged In Array And In Isolation*. lucerne: Lucerne University of applied sciences and arts.
- Massey, B. (2006). *Mechanics of Fluids (8th. ed)*. New-York: Taylor and Francis
- Mattingly, G. E. (1966). *The Hydrogen Bubble Flow Visualization Technique*. Departement Of The Navy.
- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2002). *Fundamental of Fluid Mechanics (4th. ed)*. New-York: Jhon Wiley and Sons.
- Perry, R. h., & Green, D. W. (1999). *Chemical Engineer' Handbook*. New-York: Mc Graw Hill.
- Post, F. H dan Walsum, T van. (1993). *Fluid Flow Visualization. Focus on Scientific Visualization*, hal. 1-40
- Salirawati, D., Suprihatiningrum, J., & Meiliana, F. (n.d). *Belajar Kimia secara menarik*. jakarta: Grasindo.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-Layer Theory (7th. ed)*. New-York: Mc Graw-Hill.

Thandaveswara, B. S. (1980). Flow Visualization by Hydrogen Bubbles And Its Use In Some Fluida Problem. http://nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Hydraulics/pdfs/Unit4/4_1a.pdf. Diakses 13 November 2011.

White, Frank M. 2003. *Fluid Mechanics (4th ed)*. New York: Mc Graw-hill



LAMPIRAN A

Data Pengamatan dan Perhitungan

- Data uji turbulensi pelat datar

Bukaan valve 1	titik pengamatan	t-1	t-2	t-3	t-4	t-5
		x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)
	titik 1	9,81	10,75	10,64	10,93	10,04
	titik 2	11,21	11,21	10,28	10,46	10,74
Bukaan valve 2	titik pengamatan	t-1	t-2	t-3	t-4	t-3
		x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)
	titik 1	14,26	15,74	14,02	14,02	14,02
	titik 2	13,85	15,11	13,85	14,55	13,85
Bukaan valve 3	titik pengamatan	t-1	t-2	t-3	t-4	t-5
		x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)
	titik 1	20,60	19,00	18,89	21,94	21,98
	titik 2	20,63	18,45	18,07	22,22	21,50
Bukaan valve 3	titik pengamatan	t-1	t-2	t-3	t-4	t-5
		x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)
	titik 1	20,60	19,00	18,89	21,94	21,98
	titik 2	20,63	18,45	18,07	22,22	21,50
Bukaan valve 3	titik pengamatan	t-1	t-2	t-3	t-4	t-5
		x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)
	titik 1	20,60	19,00	18,89	21,94	21,98
	titik 2	20,63	18,45	18,07	22,22	21,50
Bukaan valve 3	titik pengamatan	t-1	t-2	t-3	t-4	t-5
		x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)
	titik 1	20,60	19,00	18,89	21,94	21,98
	titik 2	20,63	18,45	18,07	22,22	21,50
Bukaan valve 3	titik pengamatan	t-1	t-2	t-3	t-4	t-5
		x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)	x (mm)
	titik 1	20,60	19,00	18,89	21,94	21,98
	titik 2	20,63	18,45	18,07	22,22	21,50

Dengan diketahui frekuensi pulsa tegangan 2 Hz maka:
kecepatan gelembung hidrogen:

$$U = x \cdot f$$

$$U = 9,81 \text{ mm} \times 2 \text{ pulsa/s}$$

$$U = 19,62 \text{ mm/s}$$

Dengan cara yang sama diperoleh kecepatan fluida pada setiap pengamatan

Bukaan valve 1	titik pengamatan	t-1		t-2		t-3		t-4		t-5	
		x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)
	titik 1	9,81	19,62	10,75	21,49	10,64	21,29	10,93	21,85	10,04	20,08
	titik 2	11,21	22,43	11,21	22,43	10,28	20,56	10,46	20,92	10,74	21,48
Bukaan valve 2	titik pengamatan	t-1		t-2		t-3		t-4		t-5	
		x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)
	titik 1	14,26	28,51	15,74	31,48	14,02	28,04	14,02	28,04	13,05	26,10
	titik 2	13,85	27,69	15,11	30,22	13,85	27,70	14,55	29,10	12,47	24,94
Bukaan valve 3	titik pengamatan	t-1		t-2		t-3		t-4		t-5	
		x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)
	titik 1	13,85	27,69	14,88	29,76	13,38	26,75	13,61	27,23	12,14	24,27
	titik 2	13,85	27,69	14,88	29,76	13,38	26,75	13,61	27,23	12,14	24,27

Bukaan valve 3	titik pengamatan	t-1		t-2		t-3		t-4		t-5	
		x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)	x (mm)	U_{∞} (mm/s)
	titik 1	20,60	41,20	19,00	38,00	18,89	37,78	21,94	43,88	21,98	43,96
	titik 2	20,63	41,26	18,45	36,89	18,07	36,15	22,22	44,44	21,50	42,99
	titik 3	20,39	40,77	20,15	40,29	17,43	34,86	22,22	44,44	20,05	40,09

Dari data kecepatan yang diperoleh dihitung standar deviasi setiap kecepatan dan rata – rata kecepatan (dengan bantuan Microsoft excel):

Bukaan valve 1	standar deviasi (u')	rata-rata (\bar{U})	Intensitas Turbulensi (%)	Bukaan valve 1	standar deviasi (u')	rata-rata (\bar{U})	Intensitas Turbulensi (%)	Bukaan valve 1	standar deviasi (u')	rata-rata (\bar{U})	Intensitas Turbulensi (%)
	0,96	20,87	4,61		1,94	28,43	6,81		3,02	40,97	7,36
0,85	21,56	3,96	1,98	27,93	7,09	3,68	40,35	9,12			
1,08	21,84	4,94	1,97	27,14	7,26	3,42	40,09	8,53			

- Data Analisa lapisan batas pada pelat datar

Data pengamatan lapisan batas adalah tebal lapisan batas dan jarak lapisan batas dari tepi awal pelat

x (mm)	δ (mm)	x (mm)	δ (mm)	x (mm)	δ (mm)
3,050	7,241	3,065	4,481	3,052	3,991
5,150	9,576	5,187	6,367	5,165	6,103
7,250	13,781	7,309	7,074	7,278	6,573
9,350	15,416	9,431	7,311	9,391	7,276
11,450	16,584	11,553	9,197	11,504	7,046

Dari data x dan δ dihitung nilai Re_x dan nilai δ teoritis

Nilai Re_x dihitung dengan persamaan

$$Re_x = \frac{U_{\infty} x \rho}{\mu}$$

Dimana nilai ρ 996,513 Kg/m³ adalah dan μ adalah 0,00075 Kg/ms, maka nilai Re_x untuk x pada 3,050 dan \bar{U}_{∞} sebesar 21,423 mm/s adalah

$$Re_x = \frac{21,423 \frac{mm}{s} \cdot 3,050 \cdot 996,513 \text{ Kg/m}^3}{0,00077 \text{ Kg/ms}} = 87,05$$

Setelah diketahui Re_x maka kemudian dihitung besar δ teoritis dengan persamaan

$$\frac{\delta}{x} = 5.0 Re^{-0.5}$$

$$\delta = 5.3,050. (87,05)^{-0.5}$$

$$\delta = 1,635 \text{ mm}$$

Dengan cara yang sama diperoleh nilai Re_x dan δ teoritis pada setiap x yang di ukur

$\bar{U}_\infty = 21,423 \text{ mm/s}$				$\bar{U}_\infty = 27,835 \text{ mm/s}$				$\bar{U}_\infty = 40,468 \text{ mm/s}$			
jarak x (mm)	Re_x	δ teoritis (mm)	δ visual (mm)	jarak x (mm)	Re_x	δ teoritis (mm)	δ visual (mm)	jarak x (mm)	Re_x	δ teoritis (mm)	δ visual (mm)
3,050	87,05	1,635	7,241	3,065	113,66	1,437	4,481	3,052	164,54	1,190	3,991
5,150	146,98	2,124	9,576	5,187	192,35	1,870	6,367	5,165	278,46	1,548	6,103
7,250	206,92	2,520	13,781	7,309	271,04	2,220	7,074	7,278	392,39	1,837	6,573
9,350	266,85	2,862	15,416	9,431	349,73	2,522	7,311	9,391	506,30	2,087	7,276
11,450	326,79	3,167	16,584	11,553	428,42	2,791	9,197	11,504	620,21	2,310	7,046

- Data perhitungan U rata-rata pada pipa persegi

Bukaan valve 1	titik pengamatan	t-1 x (mm)	t-2 x (mm)	t-3 x (mm)	t-4 x (mm)	t-5 x (mm)
	titik 1	8,53	8,16	8,77	8,80	8,97
	titik 2	8,73	8,97	8,97	8,39	8,97
	titik 3	8,93	8,97	8,77	8,39	8,97
Bukaan valve 2	titik pengamatan	t-1 x (mm)	t-2 x (mm)	t-3 x (mm)	t-4 x (mm)	t-5 x (mm)
	titik 1	9,83	11,26	11,70	11,05	10,81
	titik 2	10,03	10,85	12,20	11,25	11,21
	titik 3	11,06	10,85	12,29	11,53	10,40
Bukaan valve 3	titik pengamatan	t-1 x (mm)	t-2 x (mm)	t-3 x (mm)	t-4 x (mm)	t-5 x (mm)
	titik 1	19,40	19,19	22,88	21,89	22,60
	titik 2	19,49	19,72	22,49	22,89	22,20
	titik 3	20,36	19,29	22,49	22,89	22,91

Dari data nilai x pada tabel di kalikan dengan frekuensi pulse tegangan ($f=2\text{Hz}$)

$$U = x \cdot f$$

$$U = 8,53 \text{ mm} \times 2 \text{ pulsa/s}$$

$$U = 17,06 \text{ mm/s}$$

Dengan cara yang sama maka kita dapat menghitung U pada setiap titik dan kemudian di rata-rata kan dengan bantuan software Microsoft excel.

Bukaan valve 1	titik pengamatan	t-1		t-2		t-3		t-4		t-5		rata-rata (\bar{U})
		x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	
	titik 1	8,53	17,06	8,16	16,31	8,77	17,54	8,80	17,61	8,97	17,95	17,291
	titik 2	8,73	17,46	8,97	17,94	8,97	17,94	8,39	16,79	8,97	17,95	17,616
	titik 3	8,93	17,87	8,97	17,94	8,77	17,54	8,39	16,79	8,97	17,95	17,616
											\bar{U}	17,508

Bukaan valve 2	titik pengamatan	t-1		t-2		t-3		t-4		t-5		rata-rata (\bar{U})
		x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	
	titik 1	9,83	19,65	11,26	22,52	11,70	23,39	11,05	22,10	10,81	21,62	21,857
	titik 2	10,03	20,06	10,85	21,71	12,20	24,39	11,25	22,49	11,21	22,42	22,214
	titik 3	11,06	22,11	10,85	21,71	12,29	24,57	11,53	23,06	10,40	20,80	22,451
											\bar{U}	22,174

Bukaan valve 3	titik pengamatan	t-1		t-2		t-3		t-4		t-5		rata-rata (\bar{U})
		x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	x (mm)	v (mm/s)	
	titik 1	19,40	38,79	19,19	38,39	22,88	45,76	21,89	43,77	22,60	45,20	42,383
	titik 2	19,49	38,99	19,72	39,44	22,49	44,97	22,89	45,78	22,20	44,39	42,715
	titik 3	20,36	40,73	19,29	38,57	22,49	44,98	22,89	45,78	22,91	45,81	43,173
											\bar{U}	42,757

LAMPIRAN B

Gambar Alat

1. Trafo



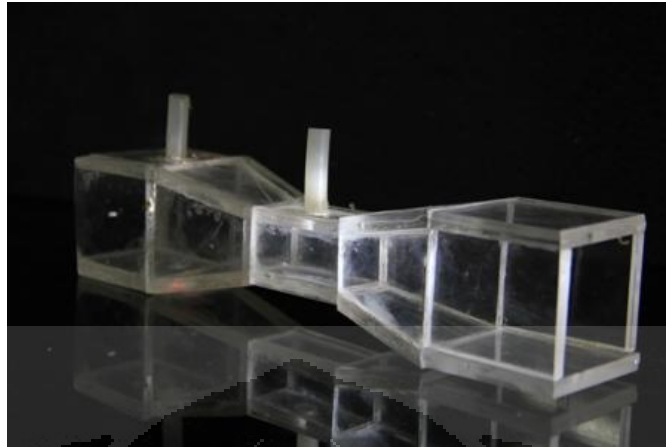
2. Pulse generator



3. Honeycomb



4. Venturi



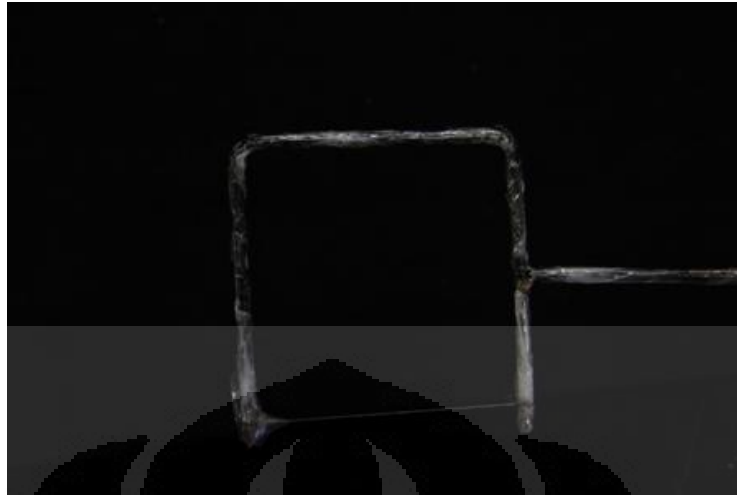
5. Pipa persegi



6. Pelat datar



7. Kawat Katoda



Gambar Visualisasi Gelembung Hidrogen

- Pelat datar



- Pipa persegi



- Venturi

