PENGARUH VARIASI LUBANG *ORIFICE PLATE* TERHADAP FAKTOR KOREKSI *ORIFICE METER*

SKRIPSI

KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh

GIGIH PUNGKY ISTIAWAN
NIM. 0910620053-62

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2013

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT Yang Maha Rahman dan Kuasa yang atas berkat kemurahan dan karunia-Nya lah skripsi dengan judul ”Pengaruh Variasi Lubang *Orifice Plate* terhadap Faktor Koreksi Orifice Meter” ini dapat terselesaikan dengan baik sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak dapat terselesaikan dengan baik tanpa bantuan, petunjuk dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu,penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang sangat mendalam kepada :

1. Bapak Dr.Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Bapak Purnami, ST., MT. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan Dosen Pembimbing yang telah banyak memberikan keluangan waktu, fikiran, dan tenaga untuk membimbing dan berdiskusi dengan penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
3. Bapak Agung Sugeng W., ST., MT., Ph.D., selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Teknik Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Ir. Soeharto, selaku Dosen Wali saya yang telah memberikan bimbingan dan motivasi selama menempuh kuliah di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
5. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan yang sangat mendukung penyusunan skripsi ini.
6. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Teknik Mesin serta Fakultas Teknik Universitas Brawijaya atas bantuan dan kelancaran dalam hal administrasi dan surat menyurat.
7. Kedua orang tua penulis beserta keluarga atas doa dan dukungannya.
8. Dicky Poernomo, Kenjiro Hananto, Sonny Joseph, Andhika Wijayanto, Yogi, Alexander, dan Glorio yang telah banyak memberikan bantuan, waktu luang, dukungan, serta masukan terhadap skripsi penulis.
9. Keluarga Besar CLANZ 10 yang secara langsung maupun tidak langsung membantu penulis dalam menyelesaikan skipsi ini.
10. Keluarga besar Asisten FDM yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

11. Keluarga besar Studio Gambar Mesin, Teman-teman asisten semua, terima kasih atas bantuannya.
12. Teman-teman angkatan 2009 semuanya.
13. Serta semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak memungkinkan penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan skripsi ini masih sangat jauh dari sempurna, maka dari itu penulis sangat mengharapkan masukan, saran dan kritik dari berbagai pihak. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis pada khususnya dan juga bagi pembaca pada umumya. Tidak ada yang sempurna dalam setiap karya manusia, tapi justru itulah yang membuat manusia berpikir untuk menghasilkan karya yang lebih baik.

Malang, November 2013

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR i
DAFTAR ISI iii
DAFTAR TABEL vi
DAFTAR GAMBAR vii
DAFTAR LAMPIRAN ix
DAFTAR SIMBOL x
RINGKASAN xi

BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 4
2.1 Penelitian-penelitian Sebelumnya 4
2.2 Fluida 4
2.2.1 Definisi Fluida 4
2.2.2 Viskositas, Gesekan dan Aliran Ideal 6
2.2.3 Klasifikasi Fluida 7
2.3 Properties Fluida 8
2.3.1 Densitas (ρ) dan Berat Spesifik (γ) 8
2.3.2 Viskositas kinematik (υ) dan viskositas dinamik (μ) 9
2.3.3 Tekanan (*pressure*) 10
2.3.4 Lapisan Batas/ *Boundary layer* 10
2.3.5 Bilangan *Reynold* 11
2.4 Bentuk dan Tipe Aliran Fluida 12
2.4.1 Aliran Laminer dan Aliran Turbulen 12
2.4.2 *Fully Developed Flow* 13
2.5 Aliran Fluida dalam Pipa 15
2.5.1 Analisis Kontinuitas 15

2.5.2 Persamaan Bernoulli Untuk Fluida Ideal 15
2.5.3 Persamaan Bernoulli Untuk Fluida Real 17
2.6 *Head Losses* 17
2.6.1 *Major Losses* 18
2.6.2 *Minor Losses* 18
2.7 *Vortex* 19
2.8 *Orifice Plate* (Plat Orifice) 20
2.9 Pengukuran Aliran *(Flow Metering)* 24
2.9.1 Pengukuran Aliran Internal 24
2.9.1.1 Metode Langsung 24
2.9.1.2 Metode Pembatasan 25
2.10 Faktor Koreksi Orifice *(Coeffisien of Discharge)* 27
2.11 *Flow Straightener* 27
2.12 Hipotesa 28
BAB III METODE PENELITIAN 29
3.1 Metode yang Digunakan 29
3.2 Variabel Penelitian 29
3.3 Alat-alat yang Digunakan 30
3.4 Instalasi Penelitian 35
3.5 Metode Pengambilan Data 36
3.6 Diagram Alir Penelitian 37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 38
4.1 Data Hasil Pengujian 38
4.2 Pengolahan Data Hasil Penelitian 38
4.2.1 Perhitungan Faktor Koreksi *Orifice Meter* 38
4.3 Analisa Statistik 42
4.3.1 Analisa Varian Dua Arah *(Two Ways – Anova)* 42
4.4 Grafik dan Pembahasan 46
4.4.1 Analisa Grafik Hubungan antara Debit Aliran terhadap *Pressure Drop* 46
4.4.2 Analisa Grafik Hubungan antara Debit Aliran terhadap Faktor Koreksi *Orifice Meter* 47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 50
5.1 Kesimpulan 50

5.2 Saran 50

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Karakteristik Alat Ukur Mengukur Debit	25
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Rata-rata	38
Tabel 4.2	*Water Properties* pada Tekanan 1 atm	39
Tabel 4.3	Tekanan Rata-rata pada *Orifice Meter* pada Jumlah Lubang *Orifice Plate* 1	39
Tabel 4.4	Beda Tekanan Rata-rata pada *Orifice Meter* pada Jumlah Lubang *Orifice Plate* 1	40
Tabel 4.5	Faktor Koreksi *Orifice Meter* Rata-rata	41
Tabel 4.6	Data statistika induk perhitungan Anova Faktor Koreksi *Orifice Meter*	43
Tabel 4.7	Analisa Varian Dua Arah Faktor Koreksi *Orifice Meter*	45

DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Perubahan bentuk yang terjadi akibat penempatan gaya geser yang konstan	5
Gambar 2.2	Aliran diantara pelat paralel untuk mengilustrasikan viskositas	7
Gambar 2.3	Diagram rheologi fluida *Newtonian* dan fluida *non-Newtonian*	8
Gambar 2.4	Viskositas kinematik berbagai fluida pada 1 atm	10
Gambar 2.5	Struktur *boundary layer*	11
Gambar 2.6	Aliran laminar	12
Gambar 2.7	Aliran turbulen	13
Gambar 2.8	Perkembangan aliran laminer pada pipa	14
Gambar 2.9	Aliran *steady* dalam pipa	15
Gambar 2.10	Aliran yang telah berkembang penuh antara 2 penampang dalam pipa miring	16
Gambar 2.11	Bentuk-bentuk lokal saluran	18
Gambar 2.12	Geometri *vortex* menurut besar bilangan Reynolds	20
Gambar 2.13	*Vortex* 2 dimensi	20
Gambar 2.14	*Orifice plate*	21
Gambar 2.15	Peletakan *Orifice Plate*	21
Gambar 2.16	Tab *Vena Contracta*	22
Gambar 2.17	Tab *Flange*	23
Gambar 2.18	Tab Pipa	23
Gambar 2.19	Bentuk-bentuk Lokal Saluran	28
Gambar 3.1	Pipa PVC	30
Gambar 3.2	Pompa	30
Gambar 3.3	Bak Penampung	31
Gambar 3.4	Katup	31
Gambar 3.5	Manometer	31
Gambar 3.6	Rotameter	32
Gambar 3.7	*Orifice Meter*	32
Gambar 3.8	*Orifice Plate* (a) 1 lubang, (b) 2 lubang, (c) 3 lubang dan (d) 4 lubang	33
Gambar 3.9	Instalasi Penelitian	35

Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian 37
Gambar 4.1 Grafik Hubungan Antara Debit Aliran terhadap *Pressure Drop* 46
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Antara Debit Aliran terhadap Faktor Koreksi *Orifice Meter* 47

DAFTAR LAMPIRAN

No. Judul

Lampiran 1 Tabel Kerapatan dan kekentalan air pada tekanan 1 atm

Lampiran 2 Gambar Desain *Orifice Plate*

Lampiran 3 Tabel Uji F

Lampiran 4 Hasil Pengujian

Lampiran 5 Foto Dokumentasi

DAFTAR SIMBOL

Besaran Dasar	Satuan dan Singkatannya	Simbol
Berat jenis	Newton per meter kubik (N/m^3)	γ
Debit	meter kubik per sekon (m^3/s)	Q
Densitas	kilogram per meter kubik (kg/m^3)	ρ
Diameter	meter (m)	D
Entrance length	meter (m)	L
Faktor gesek		k
Gaya	Newton (N)	F
Head	meter (m)	H
Head elevasi	meter (m)	Z
Head losses	meter (m)	h
Kecepatan	meter per sekon (m/s)	V
Koefisien distribusi kecepatan		*α*
Koefisien kerugian		ξ
Luas	meter kuadrat (m^2)	A
Mach Number		M
Panjang	meter (m)	l
Percepatan gravitasi	meter per sekon kuadrat (m/s^2)	g
Reynold Number		Re
Tekanan	Pascal (Pa)	P
Viskositas dinamik	kilogram per meter sekon (kg/ms)	μ
Viskositas kinematik	meter kuadrat per sekon (m^2/s)	ɜ
	meter kubik per sekon (m^3/s)	Qo
Debit orifice meter		C_{Qo}
Faktor koreksi orifice meter		

repository.ub.ac.id

RINGKASAN

Gigih Pungky Istiawan, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang, November 2013, *Pengaruh Variasi Jumlah Lubang Orifice Plate Terhadap Faktor Koreksi Orifice Meter* , Dosen Pembimbing: Purnami.

Sistem perpipaan mempunyai fungsi penting dalam berbagai sektor misalnya pada sektor industri, penyulingan minyak, pembangkit listrik, dll. Pada prosesnya, fluida yang mengalir dalam pipa mengalami gesekan dengan dinding pipa yang merupakan penyebab utama terjadinya kerugian energi pada sistem instalasi fluida. Dalam mekanika fluida kerugian energi disebut juga kerugian head *(head losses)*. Kerugian berupa penurunan head yang disebabkan oleh gesekan disebut dengan mayor losses, sedangkan kerugian yang disebabkan oleh perubahan bentuk lokal dari saluran seperti belokan, orifice, katup, sambungan atau perubahan luas penampang disebut dengan minor losses. Dalam industri perpipaan, flow meter yang sering digunakan adalah orifice meter karena beberapa keunggulan yang dimilikinya dibandingkan dengan flow meter lainnya, seperti harga yang murah dan cara pembuatan yang sederhana. Namun, orifice meter memiliki kekurangan yaitu akurasi pengukuran debit yang rendah. Salah satu cara untuk mengatasi rendahnya akurasi pada orifice meter ini adalah dengan memvariasikan jumlah lubang *orifice plate* pada orifice meter.

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental (*experimental research*). Variabel bebas dalam penelitian ini adalah debit aliran fluida dengan variasi 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, dan 1800 liter/jam. Variabel terikat pada penelitian ini adalah faktor koreksi orifice meter. Varibel terkontrol pada penelitian ini adalah jumlah lubang orifice meter yaitu dengan jumlah 1 lubang, 2 lubang, 3 lubang, dan 4 lubang dengan total luasan sama. Menggunakan instalasi *hidraulic bench* dimana orifice meter dipasang sejauh 9D dari hilir belokan.

Dari hasil penelitian ini diketahui bahwa bahwa jumlah lubang *orifice plate* berpengaruh pada nilai *pressure drop*. Dimana *nilai pressure drop* yang paling besar adalah pada debit 1800 liter/jam dan jumlah lubang *orifice plate* 1, sebesar 6221,693 Pa. Sedangkan nilai *pressure drop* yang paling kecil yaitu pada pada debit 1200 liter/jam dan jumlah lubang *orifice plate* 4 sebesar 2395,352 Pa. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa jumlah lubang *orifice plate* berpengaruh terhadap faktor koreksi orifice meter. Dimana nilai faktor koreksi orifice meter rata-rata yang paling rendah adalah 0,7016 pada jumlah lubang *orifice plate* 1 dan yang paling tinggi adalah 0,7524 pada jumlah lubang *orifice plate* 4. Sehingga semakin besar debit aliran dengan jumlah lubang orifice plate yang sama maka nilai *pressure drop*-nya semakin meningkat dan semakin banyak jumlah lubang orifice plate pada debit aliran yang konstan maka nilai *pressure drop* semakin kecil dan faktor koreksi orifice meter semakin meningkat.

Kata kunci: **:** *orifice plate*, jumlah lubang, debit aliran, *pressure drop*, faktor koreksi

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mekanika fluida merupakan cabang ilmu pengetahuan teknik mesin yang mempelajari keseimbangan dan gesekan gas maupun zat cair serta gaya tarik dengan benda-benda disekitarnya atau yang dilalui saat mengalir. Dalam mekanika fluida terdapat salah satu pokok bahasan yang banyak mendapatkan perhatian yaitu aliran fluida dalam pipa. Aliran di dalam pipa merupakan pokok bahasan yang sangat menarik untuk diteliti karena pokok bahasan ini dapat diaplikasikan dalam berbagai sektor. Banyak kajian-kajian yang telah dilakukan oleh para peneliti yaitu berupa kajian teoritis dan empiris.

Untuk mengalirkan fluida dari suatu tempat ke tempat lain dibutuhkan suatu sistem instalasi berupa pipa. Sistem pemipaan mempunyai fungsi penting dalam berbagai sektor misalnya pada sektor industri, penyulingan minyak, pembangkit listrik, dll. Pada prosesnya, fluida yang mengalir dalam pipa mengalami gesekan dengan dinding pipa yang merupakan penyebab utama terjadinya kerugian energi pada sistem instalasi fluida. Dalam mekanika fluida kerugian energi disebut juga kerugian head (*head losses*). Kerugian berupa penurunan head yang disebabkan oleh gesekan disebut dengan *mayor losses*, sedangkan kerugian yang disebabkan oleh perubahan bentuk lokal dari saluran seperti belokan, *orifice*, katup, sambungan atau perubahan luas penampang disebut dengan *minor losses*.

Dalam industri perpipaan, *flow meter* yang sering digunakan adalah *orifice* meter karena beberapa keunggulan yang dimilikinya dibandingkan dengan *flow meter* lainnya, seperti harga yang murah dan cara pembuatan yang sederhana. Namun, *orifice* meter memiliki kekurangan yaitu akurasi pengukuran debit yang rendah.

Untuk mengatasi rendahnya akurasi pengukuran pada *orifice meter* biasanya digunakan suatu alat yang disebut dengan *flow straightener*. *Flow straightener* adalah suatu alat yang dapat mengurangi gangguan-gangguan yang terjadi pada aliran pada suatu instalasi perpipaan sehingga dapat mengurangi turbulensi. *Flow straightener* mempunyai kemampuan untuk mengisolasi ganguan-gangguan aliran yang disebabkan oleh belokan, katup, perubahan luas penampang, dan *orifice*, dengan cara menghilangkan *swirl* atau *vortex*. Sehingga dapat menaikkan keakuratan *orifice meter*.

Keakuratan dari *orifice meter* juga dipengaruhi juga beberapa parameter yaitu diameter *orifice plate*, jumlah lubang *orifice plate*, tebal *orifice plate*, posisi *pressure tap* pada *orifice*, dll. Ketebalan *orifice plate* sangat mempengaruhi pola aliran yang melaluinya yang pada akhirnya mempengaruhi hasil pengukuran. Jika aliran melalui *orifice* tipis maka aliran akan mengalami gangguan yang tak berarti atau *vena contracta* yang terbentuk tidak begitu berarti. Namun apabila aliran melewati *orifice plate* yang tebal maka akan terbentuk suatu *vena contracta* yang lebih besar pada arah depan aliran setelah melewati bagian depan plat *orifice*.

Orifice plate multi lubang merupakan salah satu jenis sensor yang digunakan untuk mengukur aliran fluida dengan konsep pengukuran beda tekanan. Terdiri dari pipa dimana bagian dalamnya diberi plat berlubang dengan jumlah lubang lebih dari satu. Kelebihan yang didapat dengan menggunakan orifice multi lubang adalah dengan adanya rugi tekanan yang kecil sehingga aliran fluida lebih cepat kembali seragam atau *fully developed* selepas orifice.

Berdasarkan latar belakang diatas maka perlu dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui besarnya pengaruh variasi lubang pada *orifice plate* terhadap faktor koreksi *orifice meter*.

1.2 Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang diatas dapat dirumuskan sebuah permasalahan yaitu bagaimana pengaruh variasi lubang *orifice plate* terhadap faktor koreksi *orifice meter*.

1.3 Batasan masalah

Agar permasalahan tidak meluas dan terfokus, maka perlu dilakukan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Fluida yang digunakan adalah air (fluida *incompressible*).
2. Viskositas fluida dianggap konstan.
3. *Flow meter* yang digunakan adalah *orifice meter*.
4. *Orifice* meter diletakkan pada jarak 9D setelah belokan pipa.
5. Jumlah lubang *orifice plate* pada *orifice meter* divariasikan dengan jumlah 1, 2, 3 dan 4 dengan luas total masing-masing variasi sama yaitu dengan diameter lubang 16 mm atau diameter ekivalennya 16 mm.
6. Diameter *hub* pada jumlah lubang 2,3 dan 4 yaitu berturut-turut 11,82 mm, 11,25mm dan 12 mm.

7. Menggunakan belokan 90°.

1.4 Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi lubang *orifice plate* terhadap faktor koreksi *orifice meter*.

1.5 Manfaat penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Memberikan suatu masukan yang bermanfaat bagi industri yang memanfaatkan instalasi perpipaan, dalam usaha memperoleh data yang lebih akurat pada *flow meter* dengan instalasi pipa yang lebih efisien, sehingga akan meminimalisir biaya produksi.
2. Menambah khasanah penelitian bagi dunia ilmu pengetahuan khususnya yang berhubungan dengan Teknik Mesin.
3. Dapat dijadikan sebagai referensi tambahan bagi mahasiswa teknik mesin pada khususnya dalam penelitian – penelitian selanjutnya tentang *orifice plate*.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian-penelitian Sebelumnya

Jeff Deane (1996) dalam penelitiannya tentang *conditioning flow disturbance for precision flow metering* menunjukkan bahwa *flow conditioner* mempunyai peranan penting dalam dunia industri. *Flow conditioner* membantu keakuratan *flowmeter* dengan menghilangkan gangguan – gangguan yang terjadi selama pengukuran.

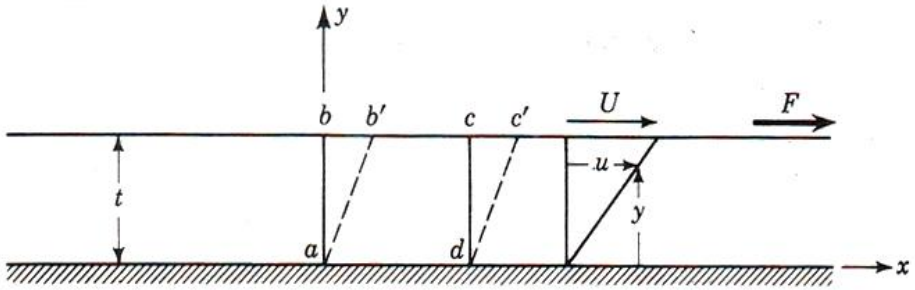
Witanto (2004), dalam penelitiannya tentang pengaruh perforasi terhadap perilaku *vortex* di belokan dan penurunan tekanan pada instalasi pipa. Penelitian ini dilakukan pada belokan pipa dimana pada dinding pipa sebelum belokan pipa dibuat perforasi (lubang-lubang) dengan variasi lubang perforasi. Tujuan dari penelitian ini adalah mengurangi kecepatan aksial sebelum belokan dengan cara membangkitkan aliran radial lewat perforasi sehingga aliran sekunder mengecil dan diameter *vortex* yang terbentuk semakin kecil. Dalam penelitiannya disimpulkan bahwa diamater perforasi yang terlalu besar, dapat meningkatkan koefisien gesek, sehingga tegangan geser menjadi meningkat. Akibatnya *pressure drop* (Δp) menjadi makin meningkat.

Waluyo dan Sugiyanto (2013), dalam penelitiannya tentang uji eksperimental *orifice* multi lubang pada saluran berdiameter 50 mm dengan ukuran diameter tetap pada setiap lubang nya yaitu 14 mm, diameter *hub* 28 mm. Pada penelitian ini dilakukan pengujian eksperimental terhadap bentuk plat *orifice* yang mempunyai lebih dari satu lubang. Tinjauan pengamatan lebih didasarkan pada perbandingan besar harga koefisien alirannya terhadap persamaan kalibrasi. Pada penelitian ini dijelaskan bahwa manfaat yang didapatkan dengan menggunakan *orifice* multi lubang adalah dengan adanya rugi tekanan yang kecil sehingga aliran fluida lebih cepat kembali seragam atau *fully developed* selepas *orifice*. Manfaat kedua memungkinkan terhindarnya jebakan aliran fluida kondensat pada penggunaannya untuk fluida dua fasa.

2.2 Fluida

2.2.1 Definisi Fluida

Fluida adalah zat yang mengalami deformasi (perubahan bentuk) secara kontinyu (terus menerus) apabila dikenai tegangan geser. Tegangan (gaya persatuan luas) geser terbentuk apabila sebuah gaya tangensial bekerja pada sebuah permukaan (Munson. 2003)



Gambar 2.1 Perubahan bentuk yang terjadi akibat penempatan gaya geser yang konstan
Sumber : Streeter (1992)

Pada gambar 2.1 diatas terlihat bahwa suatu zat yang diletakkan diantara 2 pelat diam yang sejajar dengan jarak yang kecil (*t*) dan sedemikian luasnya sehingga pada keadaan tepi-tepinya dapat diabaikan. Apabila pelat bagian atas bergerak dengan kecepatan U yang disebabkan oleh gaya F berapapun kecilnya terhadap suatu luasan A maka dapat disimpulkan bahwa zat diantara pelat tersebut adalah suatu fluida yang mengalami pergerakan dengan kecepatan tertentu dan ditandai perubahan bentuk dari fluida tersebut di sepanjang saluran.

Dari percobaan sebelumnya menunjukkan bahwa *F* sebanding dengan *A* dan *U* serta berbanding terbalik dengan tebal *t*, dengan besaran lainnya dinyatakan konstan yang dinyatakan dengan persamaan:

$$F = «.\frac{AU}{t}$$ (Streeter, 1996 : 4) (2-1)

Keterangan :

F = Gaya (N)

μ = faktor kesebandingan dan pengaruh fluida yang bersangkutan tercakup didalamnya.

U/t = kecepatan sudut garis ab atau laju perubahan bentuk sudut fluida dan dapat ditulis du/dy (m/s)

A = luas penampang (m^2)

Dengan μ adalah faktor kesebandingan dan pengaruh fluida yang bersangkutan tercakup didalamnya. Jika tegangan geser $\tau = F/A$ maka :

$$^2 = «.\frac{U}{t}$$ (Streeter, 1996 : 4) (2-2)

Keterangan :

τ = tegangan geser

U/t = kecepatan sudut garis ab

μ = faktor kesebandingan dan pengaruh fluida yang bersangkutan tercakup didalamnya.

Perbandingan *U/t* adalah kecepatan sudut garis ab, atau laju perubahan bentuk sudut fluida, yaitu laju berkurangnya sudut *bad*. Kecepatan sudut tersebut juga dapat ditulis *du/dy*, karena baik *U/t* maupun *du/dy* menyatakan perubahan kecepatan dibagi jarak sepanjang mana perubahan tersebut terjadi. Namun *du/dy* juga dapat dibayangkan sebagai laju sebuah lapisan yang bergerak relatif terhadap lapisan yang berdekatan. Dalam bentuk diferensiasi :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \qquad \text{(Streeter, 1996 : 4) (2-3)}$$

Keterangan :

τ = tegangan geser

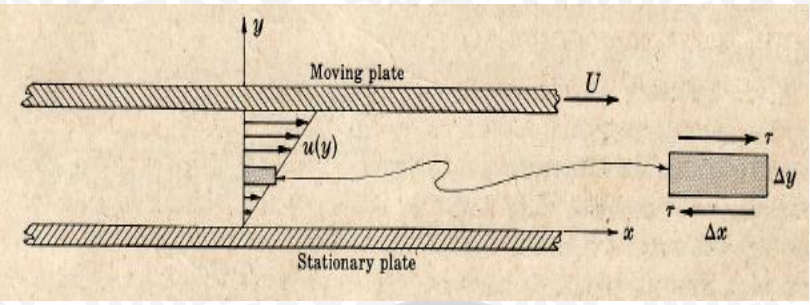
du/dy = kecepatan sudut garis ab

μ = viskositas fluida

Adalah hubungan antara tegangan geser dan laju perubahan bentuk sudut untuk aliran fluida satu dimensi. Faktor kesebandingan μ disebut viskositas fluida, dan persamaan (2-3) adalah hukum viskositas *Newton*.

2.2.2 Viskositas, gesekan, dan aliran ideal.

Setiap fluida mempunyai viskositas yang dapat menyebabkan *friction* (gesekan). Hal yang penting dari gesekan pada kondisi fisis tergantung pada jenis dari fluida dan susunannya ataupun pola aliran. Jika gesekannya diabaikan, kita dapat mengasumsikan bahwa alirannya ideal. Gesekan bisa saja timbul diakibatkan oleh viskositas atapun turbulensi. (Hughes, 1999)



Gambar 2.2 Aliran diantara pelat paralel untuk mengilustrasikan viskositas
Sumber : Hughes (1999)

Menurut Hughes (1999) viskositas adalah ukuran dari ketahanan fluida untuk digeser pada saat fluida itu bergerak (perlu diingat bahwa fluida tidak dapat menahan geseran tanpa bergerak seperti halnya benda solid). Diilustrasikan dengan pelat paralel pada gambar 2.2 dalam kondisi gerak relatif. Fluida antara kedua pelat mempunyai kecepatan yang linear seperti yang diperlihatkan (jika tidak terdapat gradient tekanan sepanjang pelat sesuai dengan arah gerakan). Tidak terdapat *slip* antara fluida dengan pelat, itu mengapa pada hubungan antara fluida dengan benda solid, kecepatan dari fluida harus sama dengan benda solid.

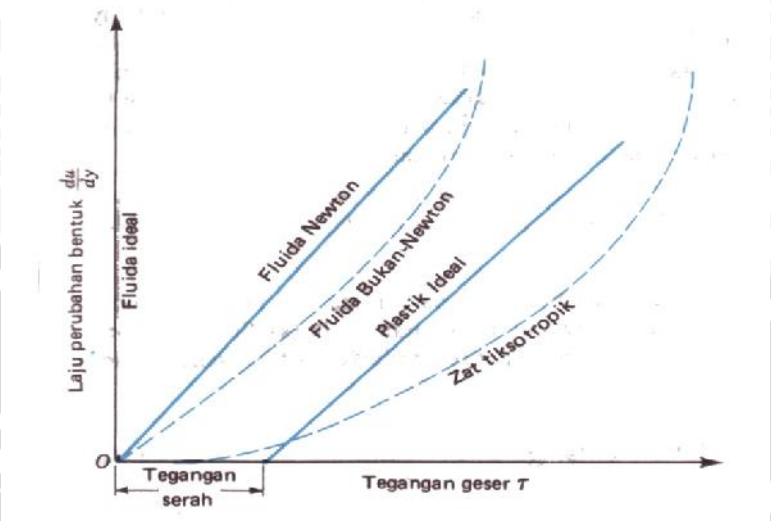
Viskositas adalah sifat fluida yang mendasari diberikannya tahanan terhadap gaya geser oleh fluida tersebut. Hukum viskositas *Newton* (pers.2-3) menyatakan bahwa untuk laju perubahan bentuk sudut fluida yang tertentu maka tegangan geser berbanding lurus dengan viskositas. (Steeter, 1996)

Viskositas gas akan meningkat dengan suhu, tetapi viskositas cairan berkurang dengan naiknya suhu. Perbedaan dalam kecenderungan terhadap suhu tersebut dapat diterangkan dengan memperhatikan penyebab-penyebab viskositas

2.2.3 Klasifikasi Fluida

Berdasarkan kemampuan fluida dalam menahan tegangan geser maka Fluida dapat diklasifikasikan menjadi fluida *Newtonian* dan fluida *non-Newtonian* (Steeter,1996). Apabila suatu fluida dikenai tegangan geser, maka akan terjadi deformasi dan bila tegangan geser tersebut sebanding dengan kecepatan deformasi fluida, maka fluida tersebut dikatakan fluida *Newtonian.* Dengan kata lain kecepatan deformasi fluida itu linier terhadap tegangan geser yang diberikan. Sebaliknya jika suatu fluida mengalami deformasi akibat tegangan geser, namun tegangan geser dan kecepatan deformasi yang terjadi tidak sebanding, maka fluida tersebut disebut fluida *non-Newtonian.* Selain itu, pada fluida *Newtonian* viskositasnya bernilai konstan

sekalipun terdapat gaya yang bekerja pada fluida tersebut. Sedangkan untuk fluida *non-Newtonian* akan mengalami perubahan viskositas ketika dikenakan gaya. Contoh fluida *Newtonian* adalah air, udara, dan oli, sedangkan fluida *non-Newtonian* adalah plastik cair dan lilin cair.



Gambar 2.3 Diagram rheologi fluida *Newtonian* dan fluida *non-Newtonian*
Sumber : Streeter (1996)

Menurut Daugherty (1986) fluida dibagi menjadi 2 yaitu fluida mampu mampat (*compressible*) dan fluida takmampu mampat (*incompressible*). Fluida tak mampu mampat (*incompressible*) adalah fluida yang mempunyai massa jenis (ρ) konstan, tidak terpengaruh oleh perubahan tekanan dρ/dp = 0. Sedangkan untuk fluida mampu mampat (*compressible*) massa jenisnya (ρ) berubah–ubah terhadap tekanan dρ/dp > 0. Contoh fluida takmampu mampat adalah fluida cair dan fluida gas yang memiliki Bilangan Mach atau *Mach Number* (M) < 0,3 sedangkan untuk fluida gas yang memiliki *Mach Number* (M) >0,3 dianggap fluida mampu mampat dan sifat-sifat kompresibelitasnya harus diperhitungkan.

2.3 Properties Fluida

2.3.1 Densitas (ρ) dan Berat Spesifik (γ)

Densitas (ρ) didefinisikan sebagai massa tiap satuan volume, sedangkan berat spesifik (γ) didefinisikan sebagai berat tiap satuan volume. Berat spesifik menggambarkan gaya yang dimiliki oleh gravitasi dalam tiap volume dari fluida, dan oleh karena itu pasti mempunyai satuan gaya tiap unit volume misalnya pon tiap feet kubik (lb/ft^3). (Franzini, 1997) Densitas dan berat spesifik dari fluida dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\rho = \frac{\gamma}{g}$$ (Streeter, 1996 : 10) (2-4)

Keterangan :

ρ = Densitas / massa jenis (kg/m^3)

γ = Berat spesifik (N/m^3)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

harus dicatat bahwa densitas (ρ) adalah konstan. Berat spesifik (γ) disisi lain tidaklah mutlak, tergantung pada nilai percepatan gravitasi (g) yang nilainya beraneka ragam sesuai dengan tempatnya, terutama disebabkan oleh ketinggiannya dari permukaan laut.

2.3.2 Viskositas kinematik (υ) dan viskositas dinamik (μ)

Viskositas dinamik (μ) sering kali disebut dengan viskositas mutlak (*absolute viscosity*) yaitu viskositas yang menunjukkan ketahanan suatu fluida terhadap tegangan geser/ gaya yang bekerja padanya. Sedangkan viskositas kinematik adalah viskositas yang banyak dipengaruhi oleh temperatur tanpa memperhitungkan gaya yang bekerja dan banyak muncul dalam penerapan yang merupakan viskositas terhadap kerapatan massa (Mott,1994).

Berikut ini adalah hubungan antara viskositas kinematik dan viskositas dinamik:

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho}$$ (Streeter, 1996:10) (2-5)

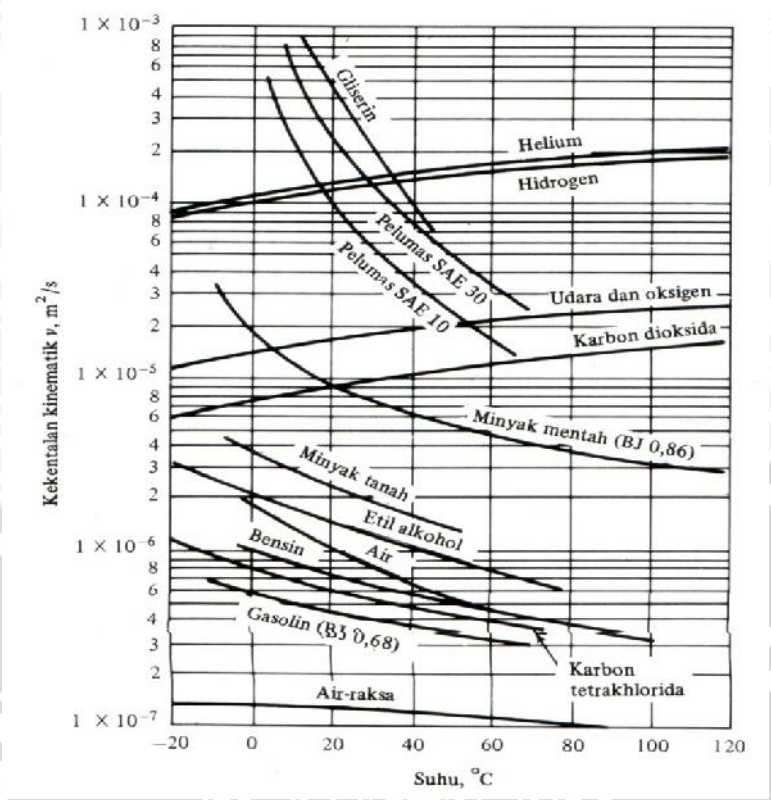
Keterangan :

υ = viskositas kinematik (m^2/s)

ρ = densitas / massa jenis (kg/m^3)

μ = viskositas dinamik (kg/ms)

Viskositas akan bertambah jika pertukaran kalor yang acak antar molekul-molekulnya, sehingga meningkatnya temperatur mengakibatkan viskositasnya juga akan meningkat (Necrasov, 1960).



Gambar 2.4 Viskositas kinematik berbagai fluida pada 1 atm
Sumber : White (1994)

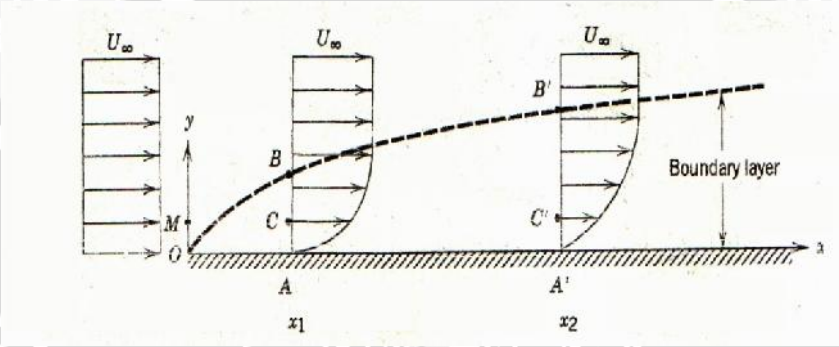
2.3.3 Tekanan (*pressure*)

Tekanan (p) adalah tegangan di suatu titik pada fluida statis. Seiring perubahan kecepatan, tekanan adalah variabel yang paling dinamis dalam mekanika fluida. Perbedaan atau *gradient* tekanan selalu mempengaruhi aliran fluida, khususnya pada saluran pipa. Pada aliran dengan kecepatan rendah, kenyataannya besarnya tekanan dianggap tak penting, kecuali jika tejadi penurunan hingga mencapai kecepatan yang kecil sekali sehingga menyebabkan terbentuknya gelembung-gelembung udara.

2.3.4 Lapisan Batas *(Boundary layer)*

Lapisan batas adalah lapisan tipis fluida pada permukaan benda padat dimana terjadi suatu gradien parameter yang besar. Pada fluida yang mengalir di dalam pipa, terjadi lapisan batas, dimana pada lapisan tersebut terjadi perubahan kecepatan terhadap jarak dari dinding pipa, karena pengaruh dari tegangan geser dinding pipa, sehingga terjadi gradien kecepatan. Pada aliran fluida aktual atau *viscous* yang melalui permukaan suatu benda terdapat suatu daerah dimana aliran fluida masih dipengaruhi gesekan dengan permukaan benda. Pada daerah tersebut kecepatan bertambah, dari nol (pada permukaan benda) hingga mendekati kecepatan aliran utama (kecepatan fluida di

dalam lapisan batas telah mencapai 99% kecepatan aliran utama). Semakin mendekati permukaan diam (dinding pipa), kecepatan semakin berkurang, sebaliknya semakin menjauh kecepatan aliran semakin bertambah. Daerah ini disebut dengan lapisan batas (*boundary layer*) dengan ketebalan yang sangat tipis. Gradien kecepatan tersebut mempengaruhi tegangan geser dalam aliran fluida *viscous* karena besarnya tegangan geser sebanding dengan gradien kecepatan. Gambar 2.5 menjelaskan tentang stuktur *boundary layer*



Gambar 2.5 Struktur *boundary layer*
Sumber: White (1994)

Pada gambar 2.5 terlihat ketika berada pada titik O fluida memilki kecepatan yang seragam, karena aliran fluida masih belum terpengaruh oleh gaya pada permukaan dinding. Saat fluida melewati A, fluida terpengaruh oleh gaya dinding, sehingga terjadi gradien kecepatan. Sedangkan ketika fluida pada A' juga terjadi gradien kecepatan, akan tetapi pengurangan kecepatan semakin besar karena jarak fluida mengalir pada dinding semakin jauh, sehingga pengaruh gaya dinding semakin besar terhadap fluida.

2.3.5 Bilangan *Reynold*

Aliran fluida baik itu *internal flow* ataupun *eksternal flow*, mengalami perubahan pola aliran dari laminer kemudian transisi hingga pada akhirnya menjadi turbulen. Pada *incompressible flow* kondisi aliran laminer atau turbulen ditentukan oleh besarnya bilangan *Reynold*, yaitu suatu parameter yang menyatakan suatu perbandingan kecepatan aliran, dan ukuran yang mewakili diameter penampang yang dilewati aliran fluida terhadap viskositas fluida.

Persamaan bilangan *Reynold* untuk aliran didalam pipa adalah :

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho.V.D}{\mu} = \frac{V.D}{\nu} \qquad \text{(Potter,1997:260) (2-6)}$$

Dengan :

V = kecepatan rata-rata aliran dalam pipa (m/s)

D = diameter pipa (m)

ν = viskositas kinematik (m^2/s)

μ = viskositas absolut/dinamik (kg/ms)

ρ = densitas (kg/m^3)

2.4 Bentuk dan Tipe Aliran Fluida

2.4.1 Aliran Laminer dan Aliran Turbulen

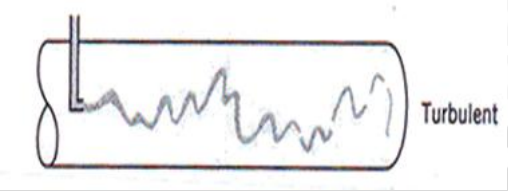
Berdasarkan karakteristik struktur internal aliran, aliran fluida dapat dibedakan menjadi aliran laminer dan turbulen. Aliran laminer adalah aliran fluida yang memiliki *stream line* teratur dan tidak saling berpotongan antara satu dengan yang lain, yang bergerak mengikuti arah kontur dari saluran. Pada aliran laminer lapisan-lapisan atau lamina-lamina fluida bergerak secara lancar dan teratur, dengan tidak ada pencampuran partikel fluida dalam skala besar antara lapisan-lapisan fluida.

Fluida memiliki aliran laminer ketika fluida bergerak dengan kecepatan rendah dan memilki viskositas yang tinggi. Aliran laminer memiliki angka *Reynold* lebih kecil dari 2300. Pada aliran laminer kecenderungan untuk turbulensi diredam oleh gaya viskos yang memberikan tahanan terhadap gerakan relatif lapisan fluida yang berdekatan. Hal tersebut ditunjukkan oleh percobaan Osborne Reynold. Pada laju aliran rendah, aliran laminer tergambar sebagai filamen panjang yang mengalir sepanjang aliran sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 2.6.

Gambar 2.6 Aliran laminar
Sumber: Young (1997)

Aliran Turbulen adalah aliran fluida dimana *stream line* bergerak secara acak ke segala arah dan saling berpotongan antara satu dan yang lain. Hal ini dikarenakan pada aliran turbulen memilki partikel-partikel fluida yang bergerak secara acak dengan saling tukar momentum dan partikel antar lapisan fluida yang berdekatan dalam skala besar.

Karena pada aliran turbulen terjadi pertukaran pertikel dalam skala besar, maka fluida bergerak ke segala arah, dan terjadi pembauran aliran fluida. Aliran Turbulen memiliki angka *Reynold* lebih besar dari 4000. Oleh Osborne Reynold digambarkan sebagai bentuk fluida yang bercampur dalam waktu cepat yang selanjutnya memecah dan menjadi tidak terlihat sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 2.7.



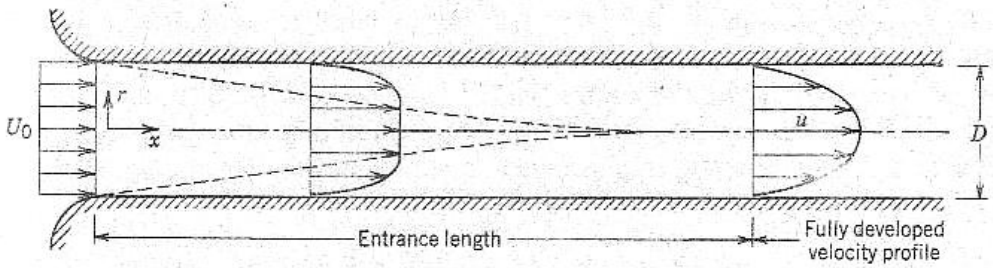
Gambar 2.7 Aliran turbulen
Sumber: Young (1997)

Dalam aliran laminer *losses* pada aliran sebanding dengan kecepatan fluida, tetapi untuk aliran turbulen *losses* sebanding dengan kecepatan fluida pangkat 1,7-2,0. Hal ini membuktikan bahwa pada aliran turbulen cenderung menghasilkan *losses* yang lebih besar.

2.4.2 *Fully Developed Flow*

Aliran dalam pipa awalnya memiliki kecepatan yang seragam, setelah melewati pipa menempuh jarak tertentu kecepatan aliran pada dinding pipa semakin mendekati nol dan akan sama dengan nol bila fluida mengalir pada jarak yang lebih jauh lagi. Adanya penurunan kecepatan pada dinding pipa dikarenakan adanya gaya dinding pipa, sehingga terbentuk gradient kecepatan yang ditunjukkan oleh terbentuknya lapisan batas. Semakin jauh jarak tempuh fluida semakin besar gradient kecepatan yang terjadi.

Setelah mencapai jarak yang mencukupi, lapisan batas akan mengembang dan mencapai garis pusat pipa. Aliran akan seluruhnya kencal (viskos) dan bentuk dari profil kecepatan akan berubah. Ketika bentuk profil kecepatan sudah tidak lagi berubah terhadap bertambahnya jarak tempuh fluida terhadap pipa maka aliran tersebut aliran *fully developed*. Bentuk aktual dari profil kecepatan aliran yang telah berkembang penuh *(fully developed)* tergantung dari apakah aliran tersebut laminar atau turbulen. Proses terbentuknya aliran berkembang penuh dapat dilihat pada gambar 2.8 di bawah ini.



Gambar 2.8 Perkembangan aliran laminer pada pipa
Sumber : Fox (1994)

Pada gambar 2.8 ketika aliran akan masuk ke dalam pipa, aliran memiliki kecepatan yang seragam. Lalu ketika aliran masuk ke dalam pipa, kecepatan aliran pada dinding pipa adalah nol, dan terbentuk lapisan batas karena pengaruh gaya dinding pipa sehingga terjadi pengurangan kecepatan. Semakin jauh jarak tempuh fluida semakin besar gradien kecepatan yang terjadi.

Jarak dari awal masuk pipa sampai aliran berkembang penuh (*fully developed*) terjadi disebut *entrance length*. *Entrance length* merupakan suatu fungsi dari bilangan *Reynold*.

Rumus *Entrance length* adalah :

$$\frac{L}{D} = 0{,}06.\frac{^{\circ}VD}{\text{«}} \qquad \text{(Fox, 1994: 305)} \quad (2\text{-}7)$$

Dengan :

L = *entrance length* (m)

D = diameter pipa (m)

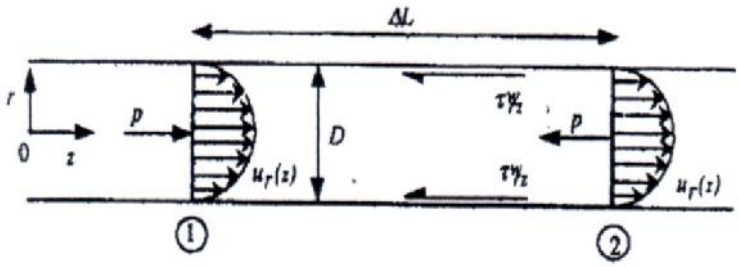
ρ = densitas (Kg/m^3)

V = kecepatan rata-rata (m/s)

μ = viskositas absolut ($N.s/m^2$)

2.5 Aliran Fluida dalam Pipa

2.5.1 Analisis Kontinuitas



Gambar 2.9 Aliran *steady* dalam pipa
Sumber : Papanastasiou (1993)

Berdasarkan gambar 2.9, aliran fluida pada bagian 1 dan 2 mengalir dengan laju aliran yang konstan, sehingga kuantitas massa aliran fluida di berbagai bagian pipa pada waktu yang sama adalah tetap. Jika tidak ada fluida yang ditambahkan, dipindahkan atau diletakkan di antara bagian 1 dan 2, maka massa fluida yang mengalir antara bagian 1 dan 2 tiap satuan waktu adalah tetap, dan dapat dirumuskan dengan (White, Frank M, 1994)

$$m_1 = m_2 = \text{konstan}$$

$$\rho_1 . A_1 . v_1 = \rho_2 . A_2 . v_2$$

Persamaan diatas adalah persamaan kontinuitas apabila aliran fluida yang mengalir adalah *compressible*. Jika fluida yang mengalir didalam pipa adalah *incompressible* maka $\rho_1 = \rho_2$. Sehingga persamaan kontinuitas dapat dirumuskan dengan:

$$Q_1 = A_1 . v_1 = Q_2 = A_2 . v_2 \qquad \text{(White,1994:305) (2-8)}$$

Dengan :

Q = debit aliran fluida (m^3/s)

A = luas penampang pipa (m^2)

v = kecepatan aliran fluida dalam pipa (m/s)

2.5.2 Persamaan Bernoulli Untuk Fluida Ideal

Dalam mendapatkan persamaan Bernoulli terdapat asumsi-asumsi yang harus diperhatikan yaitu alirannya tidak mengalamai perubahan kecepatan (*steady*), tanpa gesekan antara fluida dengan permukaan saluran atau pipa, tak mampu mampat (*incompressible*), dan massa jenis fluida (ρ) konstan:

$$W = m.g.Z + m.\frac{P}{\circ} + m.\frac{V^2}{2} = \text{konstan}$$ (Streeter,1991:4) (2-9)

Bila pada aliran tersebut diambil suatu jumlah fluida untuk tiap 1 kg, maka persamaannya dinamakan persamaan energi persatuan berat fluida. Oleh karena dibagi massa (m) maka didapatkan persamaan energi spesifik yaitu :

$$W = g.Z + \frac{P}{\circ} + \frac{V^2}{2} = \text{konstan}$$ (Streeter,1991:4) (2-10)

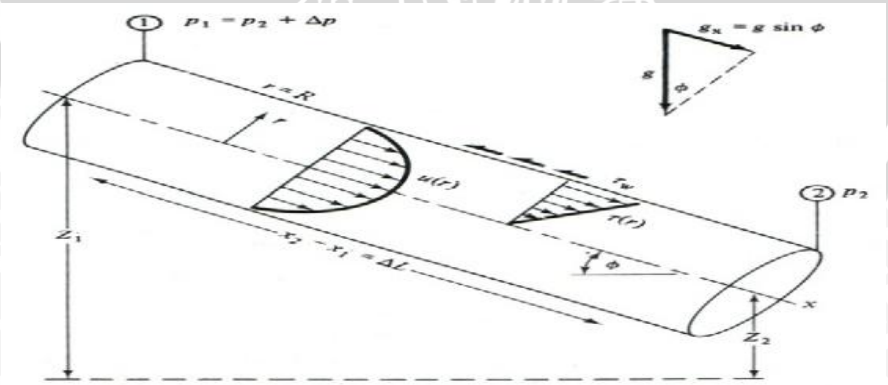
Apabila persamaan tersebut dibagi lagi dengan percepatan gravitasi g, maka akan didapat salah satu ruas dari persamaan Bernoulli yang mempunyai arti ketinggian. Persamaan ketinggiannnya yaitu:

$$H = Z + \frac{P}{\circ.g} + \frac{V^2}{2.g} = \text{konstan}$$ (Streeter,1991:4) (2-11)

Jadi sesuai dengan persamaan ketinggian diatas dan pada gambar 2.10 dapat dijelaskan bahwa pada tiap saat dan tiap posisi yang ditinjau dari suatu aliran fluida di dalam pipa tanpa gesekan yang tidak bergerak maka akan mempunyai energi ketinggian tempat, tekanan dan kecepatan yang sama besarnya. Sebagai contoh aliran air di dalam pipa, pada posisi 1kg air mempunyai tekanan tertentu dan luas penampang yang tertentu pula serta kecepatan V_1

$$Z_1 + \frac{P_1}{\circ.g} + \frac{V_1^2}{2.g} = Z_2 + \frac{P_2}{\circ.g} + \frac{V_2^2}{\circ.g}$$ (Streeter,1991:4) (2-12)

Perubahan bentuk energi akan terjadi bila pada posisi 2 penampang diperkecil, dengan demikian kecepatan fluida naik menjadi V_2 dan tekanan pada posisi 2 akan berkurang, hal ini akan terlihat dengan jelas letak pipa tersebut dibuat mendatar $Z_1 = Z_2$.



Gambar 2.10 Aliran yang telah berkembang penuh antara 2 penampang dalam pipa miring
Sumber : White (1954)

2.5.3 Persamaan Bernoulli Untuk Fluida Real

Persamaan Bernoulli untuk fluida real menggambarkan kesetimbangan energi seperti halnya hukum energi mekanik, tetapi mengikutsertakan kerugian-kerugian energi yang terjadi di dalam persamaan tersebut.

Pada fluida real total energi yang dimilki fluida tidak konstan, karena ada kehilangan energi selama fluida mengalir. Untuk aliran fluida real di dalam pipa ada beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu fluida memiliki viskositas yang menyebabkan distribusi kecepatan pada penampang melintang saluran tidak seragam dan mengakibatkan kehilangan energi (*head losses*). Ketika fluida berviskositas mengalir di dalam pipa, aliran diperlambat oleh gaya viskositas dan adhesi antara molekul fluida dan dinding pipa. Variasi kecepatan terjadi ketika lapisan-lapisan fluida saling terpengaruh satu sama lain karena gaya gesek atau tegangan geser yang disebabkan perbedaan kecepatan antara lapisan fluida. Fluida berviskositas memiliki partikel-partikel yang sering bergerak tak teratur yang dapat menyebabkan timbulnya *vortex* atau *swirl* dan hal ini dapat mengakibatkan kehilangan energi pada fluida.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\circ.g} + \sim_1 \frac{Vm_1^{\,2}}{2.g} = Z_2 + \frac{P_2}{\circ.g} + \sim_2 \frac{Vm_2^{\,2}}{\circ.g} + \sum h \qquad \text{(Necrasov,1990:59) (2-13)}$$

Persamaan di atas adalah persamaan Bernoulli untuk fluida real. Persamaan ini berbeda dengan persamaan Bernoulli untuk fluida ideal. Pada persamaan ini di tampilkan *head losses* (Σh) karena pada fluida real terjadi kehilangan energi dan juga α yang menyatakan koefisien distribusi kecepatan, karena distribusi kecepatan pada fluida real tidak seragam. Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa persamaan Bernoulli untuk fluida real menggambarkan kesetimbangan energi seperti halnya hukum energi mekanik, tetapi mengikutsertakan kerugian-kerugian energi yang terjadi di dalam persamaan tersebut. (Necrasov,1990)

2.6 Head Losses

Head losses adalah energi yang hilang pada fluida ketika fluida mengalir. Besarnya *head losses* tergantung pada bentuk, ukuran dan kekasaran saluran, kecepatan dan viskositas fluida dan tidak tergantung pada tekanan absolut. *Head losses* dibedakan menjadi dua macam, *major losses* dan *minor losses.*

2.6.1 *Major Losses*

Major losses adalah energi yang hilang sepanjang pipa lurus yang seragam dan sebanding dengan panjang pipa. *Losses* ini disebabkan karena gesekan internal fluida dan juga gesekan antara fluida dan dinding saluran, maka di semua pipa baik pipa halus atau pipa kasar muncul *major losses.*

Rumusan untuk *major losses* menurut Parcy.

$$h = \lambda . \frac{l}{d} . \frac{V^2}{2g}$$ (Necrasov,1990:60) (2-14)

Keterangan :

h = *major losses* (m)

λ = faktor gesek

l = panjang pipa (m)

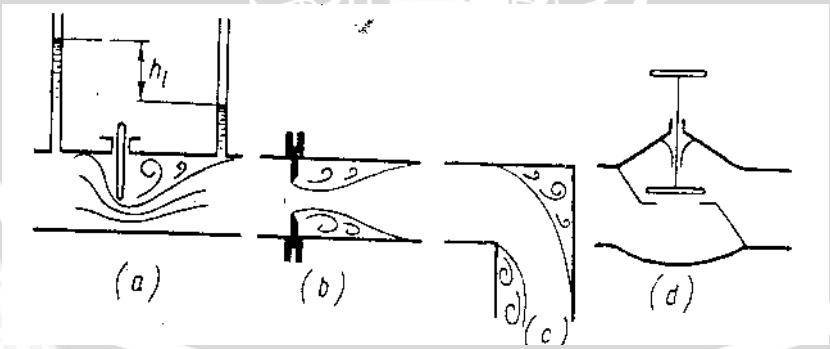
d = diameter pipa (m)

V = kecepatan fluida (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

2.6.2 *Minor Losses*

Minor losses adalah energi yang hilang dari fluida disebabkan oleh bentuk lokal dari saluran, seperti; perubahan luas panampang, katup, belokan, *Verlop sock*, *orifice* dll. *Minor losses* terjadi karena aliran yang mengalir melewati bentuk lokal dari saluran mengalami perubahan kecepatan, arah atau besarnya, maupun keduanya.



Gambar 2.11 Bentuk-bentuk lokal saluran
Sumber : Necrasov (1960)

Minor losses dapat dirumuskan:

$$h = ¶.\frac{V^2}{2g}$$ (Necrasov,1960:61) (2-15)

Keterangan :

h = *minor losses*

ξ = koefisien kerugian

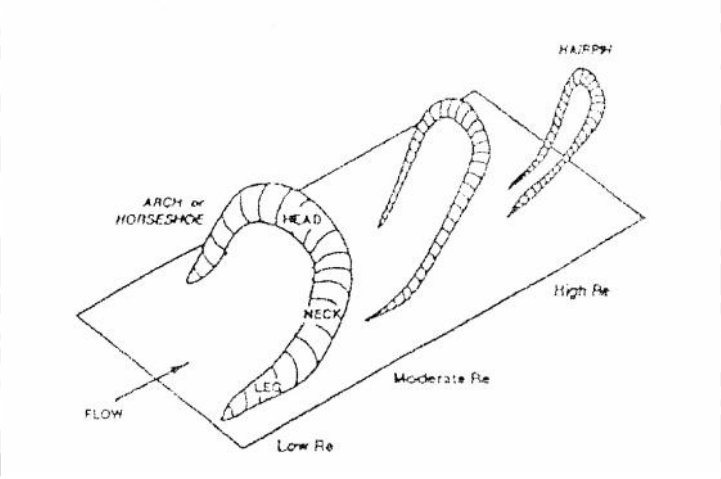
V = kecepatan fluida (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

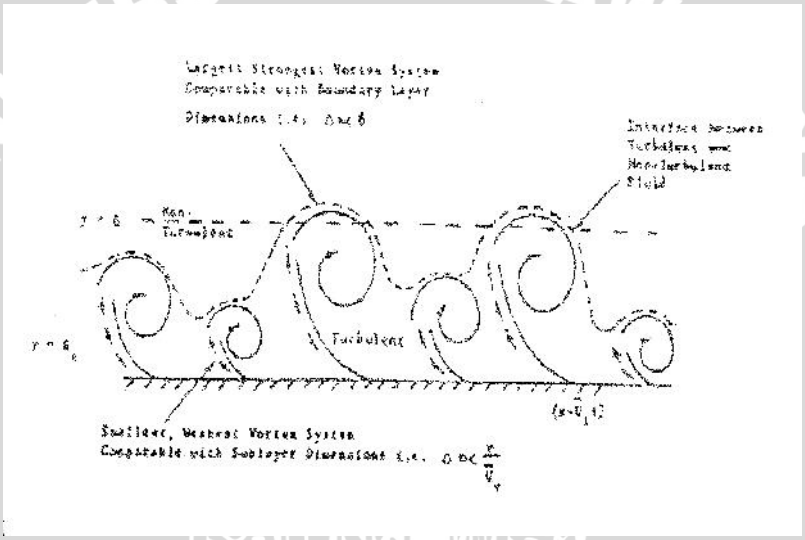
2.7 *Vortex*

Vortex didefinisikan sebagai massa fluida cairan atau gas yang partikel-partikelnya bergerak berputar. Gerakan partikel fluida bergerak berputar disebakan adanya perbedaan kecepatan antara lapisan-lapisan fluida yang bersebelahan dengan jarak tertentu, gradien kecepatan ini akan menyebabkan puntiran (torsi). Torsi ini akan menyebabkan terjadinya *vortex-vortex* pada fluida tersebut. Menurut proses pembentukannya votex dibagi menjadi 2 macam yaitu *vortex* bebas (*free vortex*) dan *vortex* paksa (*forced vortex*). *Vortex* bebas terjadi jika mekanisme pembentukan *vortex* tidak melibatkan energi dari luar sumber. Fluida berputar karena gerakan internalnya contohnya yaitu pusaran air di sungai dan pusaran di belokan pipa akibat aliran sekunder. *Vortex* paksa terjadi jika mekanisme pembentukan *vortex* melibatkan energi dari luar misalnya fluida diberi torsi atau puntiran dari luar. Contohnya yaitu fluida dalam suatu wadah diputar dengan pipa silinder.

Sesungguhnya *vortex* berwujud tiga dimensi dan dapat berubah menurut harga bilangan *Reynold*-nya. Pada bilangan *Reynold* yang rendah, *vortex* berbentuk seperti tapal kuda dan semakin tinggi harga bilangan *Reynold*-nya maka *vortex* akan semakin meruncing



Gambar 2.12 Geometri *vortex* menurut besar bilangan *Reynolds*
Sumber: Steven (1991)

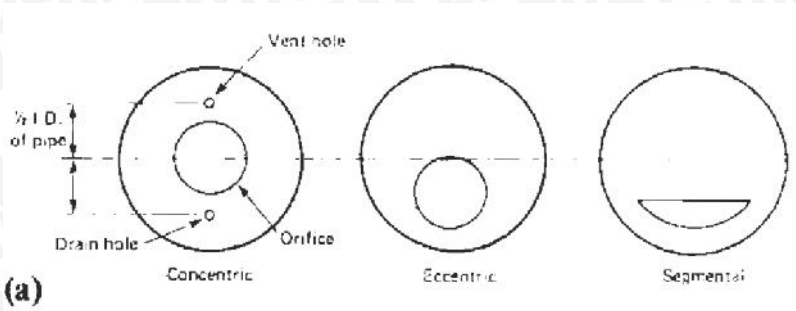


Gambar 2.13 *Vortex* 2 dimensi
Sumber: Steven (1991)

2.8 *Orifice Plate* (Plat *Orifice*)

Orifice plate merupakan salah satu jenis sensor yang digunakan untuk mengukur aliran fluida dengan konsep pengukuran beda tekanan. Terdiri dari pipa dimana bagian dalamnya diberi plat berlubang kecil dari ukuran diameter pipa. Sensor tekanan diletakkan disisi plat bagian inlet P_1 dan satu lagi diletakkan pada sisi plat bagian outlet P_2.

Plat *Orifice* merupakan plat berlubang dengan pinggiran yang tajam. Plat ini terbuat dari bahan-bahan yang kuat seperti logam. Selain terbuat dari logam, ada juga plat *orifice* yang terbuat dari plastik agar tidak dipengaruhi oleh fluida yang mengalir dan terjadi erosi atau korosi. Macam-macam tipe Plat *Orifice* dapat dilihat pada gambar 2.14.

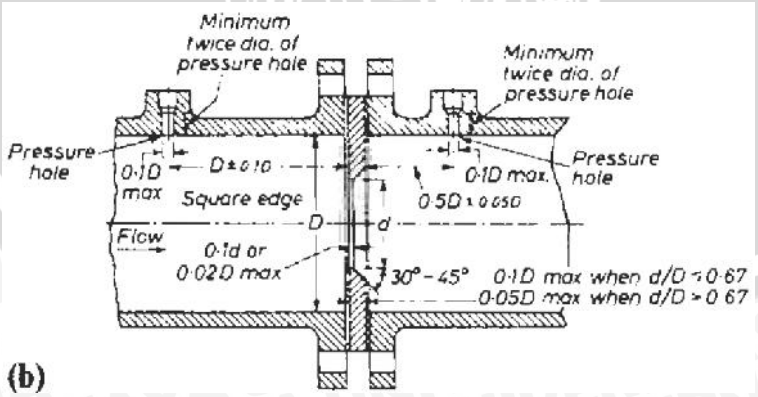


Gambar 2.14 *Orifice Plate*

Sumber : Walt Boyes (2003)

Plat *Orifice* tipe eksentris dan segmental digunakan untuk mengukur aliran yang mengandung bahan-bahan padat. Bila digunakan Plat *Orifice* tipe konsentris, timbul endapan-endapan benda padat yang akan mengganggu pengukuran. Demikian juga lubang kecil yang terletak pada bagian bawah, dibuat sedemikian rupa agar kesalahan pengukuran dapat diperkecil, yaitu untuk mengalirkan fluida akibat kondensasi agar tidak berkumpul pada Plat *Orifice* yang dapat mengganggu pengukuran aliran fluida. Untuk aliran fluida udara yang terjebak dialirkan dengan memberi lubang kecil di bagian atas.

Plat ini umumnya diklem di antara dua flange pada pipa, lubang vent dan drain disediakan untuk mencegah penumpukan/pembentukan endapan dan gas pada sistem, seperti pada gambar 2.15.



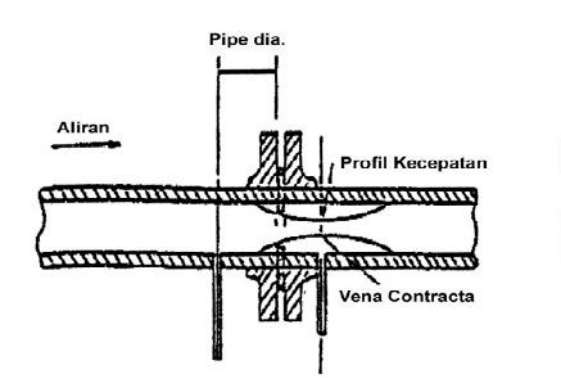
Gambar 2.15 Peletakan *Orifice Plate*

Sumber : Walt Boyes (2003)

Perbedaan tekanan diukur melalui lokasi yang tepat untuk pengukuran tekanan pada pipa yang ada di sisi lain dari *orifice plate*. Penempatan ini bisa saja dilakukan di berbagai tempat tergantung pada pengaplikasiannya. Pemasangan tap (lubang pengukuran untuk *orifice plate*) ada beberapa macam, yaitu :

a. *Tap Vena Contracta*

Tap pertama dari Tap *Vena Contracta* diletakkan pada jarak 1 x D sebelum *orifice* sedangkan tap kedua pada *vena contracta*. Vena adalah tempat di mana luas aliran mencapai minimum, sehingga tekanannya paling kecil seperti terlihat pada gambar 2.16.

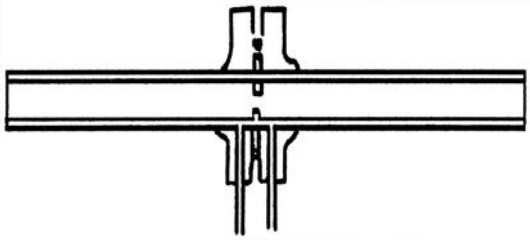


Gambar 2.16 Tap *Vena Contracta*
Sumber : Walt Boyes (2003)

Oleh karena letaknya tergantung kepada diameter pipa dan diameter *orifice* maka pemasangan tap kedua ini akan berbeda untuk pipa dan *orifice* yang berbeda. Keuntungan dari *Tap Vena Contracta* adalah bahwa pengukurannya lebih teliti, karena mendapat tekanan diferensial yang lebih besar. Kerugiannya ialah bahwa tap harus dipasang pada pipa dengan tepat pada tempat *Vena Contracta.*

b. Tap Flange

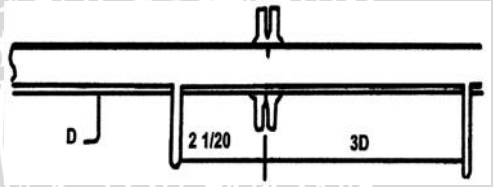
Tap Flange diletakkan simetris di kiri dan kanan *orifice* kira-kira sejauh sati inci. Keuntungan cara ini adalah tap-tapnya dapat dipasang menjadi satu bagian dengan *Flange* pipa tanpa mengganggu. Pipa dan Plat *Orifice* dapat digantikan tanpa harus mengubah letak tap. Kerugiannya adalah hasil pengukuran yang kurang teliti, karena terdapat beda tekanan yang kecil. Pemasangan *Tap Flange* dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 *Tap Flange*
Sumber : Walt Boyes (2003)

c. Tap Pipa

Tap pertama dari Tap Pipa diletakkan sejauh 2½ x D sebelum *orifice* sedangkan tap kedua sejauh 8 x D sesudah *orifice*, seperti terlihat pada Gambar 2.18. Tekanan diferensial yang diukur kecil sekali karena hanya menyatakan rugi tekanan oleh Plat *Orifice*. Agar pengukuran aliran dengan menggunakan Plat *Orifice* dapat dilakukan dengan ketelitian yang tinggi maka di dekat tap-tap, tekanan tidak boleh mengalami gangguan. Ganguan-gangguan ini dapat terjadi bila di dekat tap ini terdapat fitting seperti sambungan pipa, belokan, katup, regulator, pompa dan lain-lain. Umumnya daerah sejauh 5m sebelum *orifice* sampai 20 m sesudah *orifice* harus bebas dari fitting-fitting. Angka-angka ini bisa tergantung pada perbandingan diameter dan tipe fitting yang berbeda dari kiri ke kanan *orifice*.



Gambar 2.18 Tap Pipa
Sumber : Walt Boyes (2003)

Dengan demikian, keuntungan penggunaan dari *orifice plate* yaitu:

1. Pengoperasian sederhana.
2. Handal dan tahan lama.
3. Tidak mahal.

Kerugian:

1. Pemasangan yang cukup rumit.
2. *Pressure loss* yang tinggi.

2.9 Pengukuran Aliran *(Flow Metering)*

Pengukuran aliran adalah pengukuran kapasitas aliran (debit) atau laju aliran massa atau laju volume aliran. Hasil pengukuran yang diharapkan adalah hasil yang akurat, untuk itu keakuratan alat ukur sangat diperlukan. Kondisi yang dapat mengurangi keakuratan suatu flow meter antara lain pipa lurus pendek, katup, belokan, perubahan luas penampang pipa. Hal tersebut menghasilkan ganguan aliran seperti *swirl/vortex*, separasi, dll. Sehingga dibutuhkan suatu alat pengkondisian aliran untuk menghilangkan gangguan-gangguan aliran tersebut.

Terdapat berbagai macam alat-alat dan perhitungan pengukuran aliran. Ditinjau dari jenis saluran aliran fluida, yaitu aliran saluran tertutup dan aliran saluran terbuka, maka alat pengukuran aliran secara umum dapat juga diklasifikasikan menjadi dua bagian yaitu, pengukuran aliran terbuka dan pengukuran aliran tertutup.

Pemilihan alat ukur aliran tergantung pada ketelitian, kemampuan pengukuran, harga, kemudahan pembacaan, kesederhanaan, dan keawetan alat ukur tersebut. Adapun persamaan dasar yang dipergunakan dalam menganalisa pengukuran aliran adalah persamaan kontinuitas, persamaan Bernoulli dan perhitungan *Head Loss* aliran.

2.9.1 Pengukuran Aliran Internal

Pengukuran aliran internal dapat dilakukan dengan empat metode, yaitu :

1. Metode langsung
2. Metode pembatasan

   Orifice, nozzle, venturi, elemen aliran laminer.
3. Metode linear

   Rotameter, turbin flowmeter, vortex flowmeter, elektromagnetik flowmeter, magnetik flowmeter, ultrasonic.
4. Metode pembagian

   Pitot tube, anemometer.

2.9.1.1 Metode Langsung

Metode langsung pengukuran aliran dapat dilakukan dengan mengukur volume atau massa fluida dalam selang waktu tertentu. Dalam selang waktu yang lama dan diukur secara tepat, serta pengukuran volume atau massa diukur secara tepat, maka pengukuran ini tidak memerlukan kalibrasi. Pengukuran laju aliran volume atau massa

dengan metode langsung ini cukup teliti. Akan tetapi apabila fluida yang diukur adalah gas, maka efek kompresibilitasnya harus diperhitungkan.

Persamaannya adalah :

$$\dot{m} = \rho.V.A = \rho\left(\frac{\Delta V}{\Delta t}\right)$$ (White,1994:305) (2-18)

Keterangan :

$\dot{m}$ = laju massa aliran (kg/s)

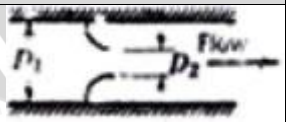
ρ = densitas (kg/m^3)

(ΔV/Δt) = perubahan volume/perubahan waktu (m^3/s)

2.9.1.2 Metode Pembatasan

Metode pembatasan ini mengukur perbedaan tekanan diantara dua penampang aliran yangs ebanding dengan laju aliran. Perhitungan laju aliran teoritis dapat dilakukan berdasarkan hukum kontinuitas dan persamaan Bernoulli. Debit sebenarnya dapat ditentukan dengan memperhitungkan faktor koreksi dari masing-masing alat ukur yang ditentukan secara empiris. Alat ukur metode tak langsung dengan pembatasan ini dianalisa pada penampang 1 yaitu sebelum masuk alat ukur dan penampang 2 yaitu tepat didaerah alat ukur yang biasanya menimbulkan *vena contracta*. *Vena contracta* adalah daerah ini debit minimum dan tekanan aliran pada penampang tersebut seragam.

Tabel 2.1 Karakteristik alat ukur mengukur debit

Flow Meter	Diagram	*Head Loss*	*Cost*
Orifice		*High*	*Low*
Nozzle		*Intermediate*	*Intermediate*
Venturi		*Low*	*High*

Sumber: Fox, (1994)

Beberapa karakteristik alat untuk mengukur debit dengan metode pembatasan dan terlihat juga pada tabel 2.1 antara lain :

1. *Orifice* meter

   Orifice meter merupakan plat tipis yang diflens antara dua buah flens pipa. Bentuknya sederhana, sehingga harganya murah dan mudah untuk dipasang. Kekurangan *orifice* adalah kerugian headnya tinggi dan kapasitas pengukurannya rendah.

   Debit pada *orifice* dapat diukur dengan rumus :

   $$Qo = \frac{®}{4}.D_2^{\,2}\sqrt{\frac{2\Delta H}{°(1-\ ^4)}}$$ (Waluyo, 2013:2) (2-19)

   Untuk *orifice plate* multi lubang diukur dengan rumus :

   $$Qo = \frac{®}{4}.D_e^{\,2}\sqrt{\frac{2\Delta H}{°(1-\ ^4)}}$$ (Waluyo, 2013:4) (2-20)

   Dengan :

   $$\frac{®}{4}.D_e^{\,2} = \frac{®}{4}.N.D_2^{\,2}$$ (Waluyo, 2013:4) (2-21)

   Keterangan :

   Q_o = Debit *orifice* meter (m^3/s)

   D_2 = Diameter lubang dasar *orifice* meter (m)

   D_e = Diameter ekivalen *orifice* meter (m)

   N = Jumlah lubang *orifice* plate

   ΔH = Pressure Drop *Orifice* meter (N/m^2) (Pa)

   ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

   β = rasio diameter D_e/D_1, dengan D_1 = diameter pipa (m)

2. Nozzle meter

   Pemakaian sebagai alat ukur kapasitas dapat dipasang pada instalasi pipa, maupun pada plenum. Nozzle harganya sedang dan kerugian headnya juga sedang.

3. Venturi meter

   Venturi meter dibuat langsung dengan pengecoran dan dihaluskan untuk memperoleh ketentuan sesuai standar. Venturi harganya mahal karena berat dan kapasitas pengukurannya juga tinggi, serta kerugian head-nya rendah.

2.10 Faktor Koreksi *Orifice* (*Coeffisien of Discharge)*

Untuk menentukan aliran sesungguhnya, sangat diperlukan analisa parameter lain. Dalam praktik, aliran sangat jarang laminar, tetapi turbulen. Dengan demikian, laju dari partikel pada aliran adalah acak dan tak mempengaruhi laju aliran secara keseluruhan.

Dalam mengembangkan suatu persamaan, efek dari kekentalan juga diabaikan. Dalam fluida sesungguhnya, hilangnya Head dari setiap bagian lebih besar daripada aliran yang viskositasnya rendah. Untuk memperbaiki hal ini dan efek dari faktor-faktor lainnya, digunakan suatu faktor pada persamaan. Faktor ini dikenal dengan koefisien discharge dan diberikan melalui persamaan.

Discharge Koefisien :

$$C_{Qo} = \frac{Q_{aktual}}{Q_o} \qquad \text{(White, 1994:361) (2-22)}$$

Keterangan :

CQo = faktor koreksi *orifice* meter

Qo = Debit *orifice* meter (m^3/s)

Q_{aktual} = Debit aktual (m^3/s)

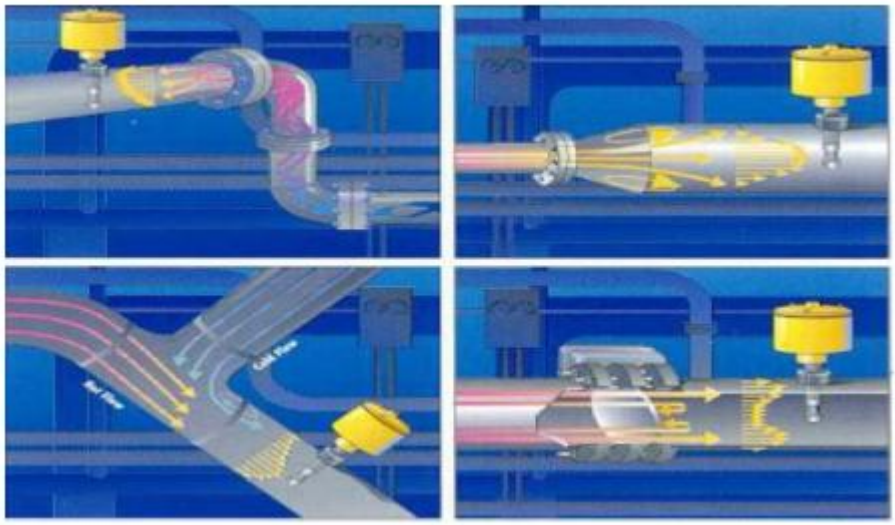
Atau jika kondisi temperatur, densitas, dll bernilai sama pada kedua sisi *orifice plate* maka rumusnya bisa ditulis berdasarkan volume nya.

$$C = \frac{\text{volume aktual}}{\text{volume teoritis}} \qquad \text{(Walt Boyes, 2003:7) (2-23)}$$

Untuk mencari nilai C juga dapat dicari melalui sebuah percobaan yang merupakan fungsi ukuran pipa, tipe *pressure tapping, Reynolds number*.

2.11 *Flow Straightener*

Flow Straightener adalah suatu alat yang dapat mengurangi ganguan-gangguan yang terjadi pada aliran pada suatu instalasi perpipaan sehingga dapat mengurangi turbulensi. *Flow straightener* mempunyai kemampuan untuk mengisolasi gangguan-gangguan aliran yang disebabkan oleh belokan, katup, perubahan luas penampang, dan *orifice* dengan cara menghilangkan separasi dan vortex, seperti terlihat pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Bentuk-bentuk Lokal Saluran
Sumber : Lundberg (1996)

*Flow straightene*r juga bisa mengkondisikan aliran menjadi lebih stabil sehingga dapat mencapai kondisi aliran fully developed (berkembang penuh) lebih cepat dengan menempuh panjang pipa lurus yang lebih pendek (Lundberg,1996). Dimana hal tersebut sangat berpengaruh pada akurasi data yang dihasilkan flow meter. Ada beberapa *flow straightener* yang sering digunakan yaitu, plat perforasi, *honey comb*, vane, tube bundel, dll.

2.12 Hipotesa

Semakin banyak jumlah lubang pada *orifice plate* menyebabkan aliran fluida lebih cepat kembali seragam atau *fully developed* setelah melewati *orifice* sehingga nilai *pressure drop* nya turun dan mengakibatkan faktor koreksi *orifice meter* semakin meningkat.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Metode yang Digunakan

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental (*experimental research*) yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk memperoleh data sebab akibat melalui eksperimen guna mendapatkan data empiris. Dalam hal ini obyek penelitian yang diamati adalah pengaruh variasi jumlah lubang pada *orifice plate* pada *orifice meter* terhada faktor koreksi *orifice meter* . Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Fenomena Dasar Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Variabel bebas (*independent variable*)

   Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan oleh peneliti dan harganya dapat diubah-ubah dengan metode tertentu untuk mendapatkan nilai variabel terikat dari obyek penelitian, sehingga dapat diperoleh hubungan antara keduanya (Murdalis,2006). Variabel bebas dalam penelitian ini adalah debit aliran fluida dengan variasi : 1200 liter/jam; 1300 liter/jam; 1400 liter/jam; 1500 liter/jam; 1600 liter/jam; 1700 liter/jam; dan 1800 liter/jam.

2. Variabel terikat (*dependent variable*)

   Variabel terikat adalah variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan (Murdalis,2006:20). Variabel terikat yang diamati pada penelitian ini adalah faktor koreksi *orifice meter*.

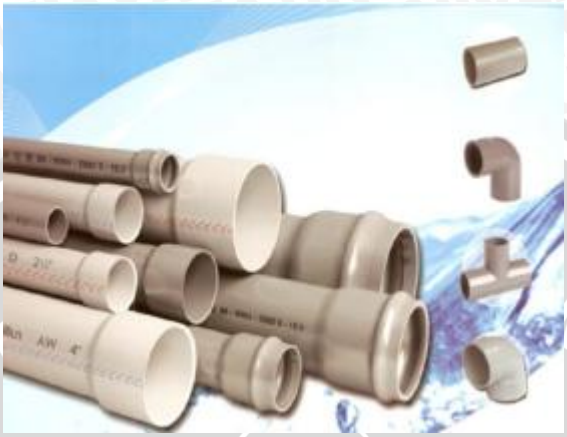
3. Variabel terkontrol (*controlled variable*)

   Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya ditentukan peneliti dan dikondisikan konstan (Murdalis,2006). Variabel terkontrol pada penelitian ini adalah jumlah lubang *orifice plate* dengan variasi : 1 lubang; 2 lubang; 3 lubang; dan 4 lubang.

3.3 Alat-alat yang Digunakan

1. Pipa PVC

Digunakan sebagai jaringan pipa baik lurus maupun belokan pipa. Pada penelitian ini digunakaan diameter pipa untuk belokan yaitu PVC 2 inchi. Kemudian dipasang *orifice meter* pada jarak 9D dari belokan pipa.



Gambar 3.1 Pipa PVC

2. Pompa

Digunakan untuk mengalirkan air dari bak penampungan keseluruh jaringan pipa uji dan dikembalikan lagi ke bak penampung. Spesifikasi alat ini adalah sebagai berikut:

- Laju aliran : 1,35 liter/ detik
- Head pompa : 15 m
- Putaran : 5000 rpm
- Keluaran motor penggerak : 0,35 kW

Gambar 3.2 Pompa

3. Bak Penampung

Digunakan untuk menampung air yang dialirkan oleh pompa dan pembuangan dari jaringan pipa.

Gambar 3.3 Bak Penampung

4. Katup (*valve*)

Digunakan untuk mengontrol aliran air yang melalui jaringan pipa.

Gambar 3.4 Katup (*valve*)

5. Manometer

Manometer berfungsi untuk mengukur *head* fluida yang mengalir sebelum belokan, sesudah melewati belokan dan setelah melewati *honeycomb*.

Gambar 3.5 Manometer

6. Rotameter

Rotameter digunakan untuk mengukur debit aliran air yang melalui belokan pipa uji. Kapasitas rotameter yang digunakan 0-2000 liter/jam.

Gambar 3.6 Rotameter

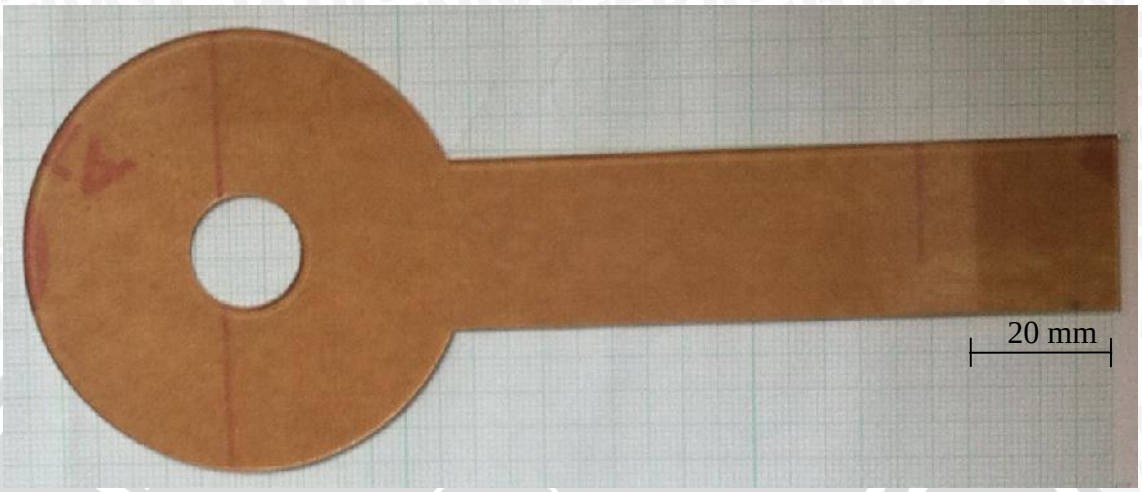
7. Orifice meter

Digunakan untuk mengukur debit aliran air yang melalui instalasi pipa setelah melewati belokan pipa.

Gambar 3.7 *Orifice meter*

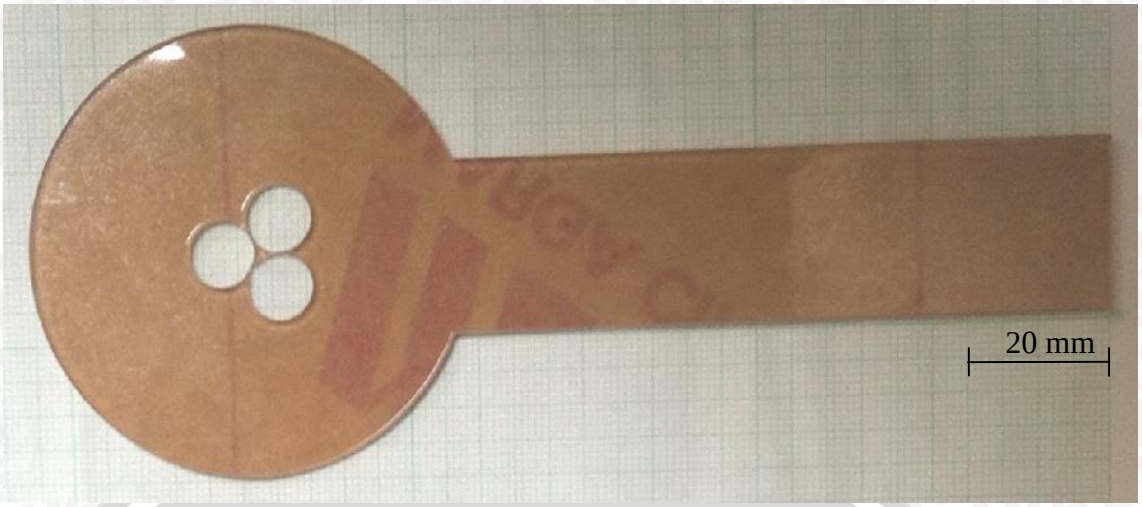
8. *Orifice Plate*

Terbuat dari akrilik dengan tebal 2 mm.

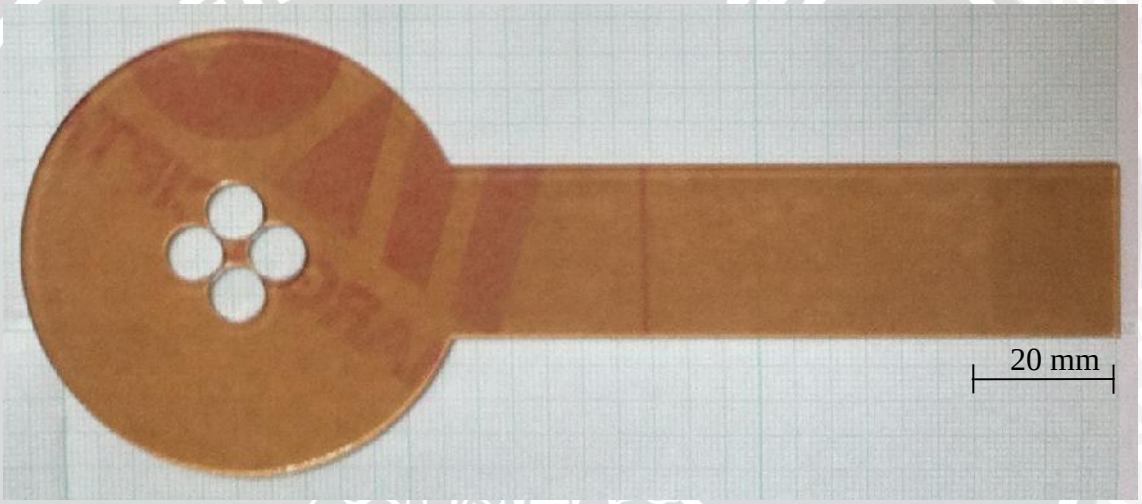


(a)

(b)



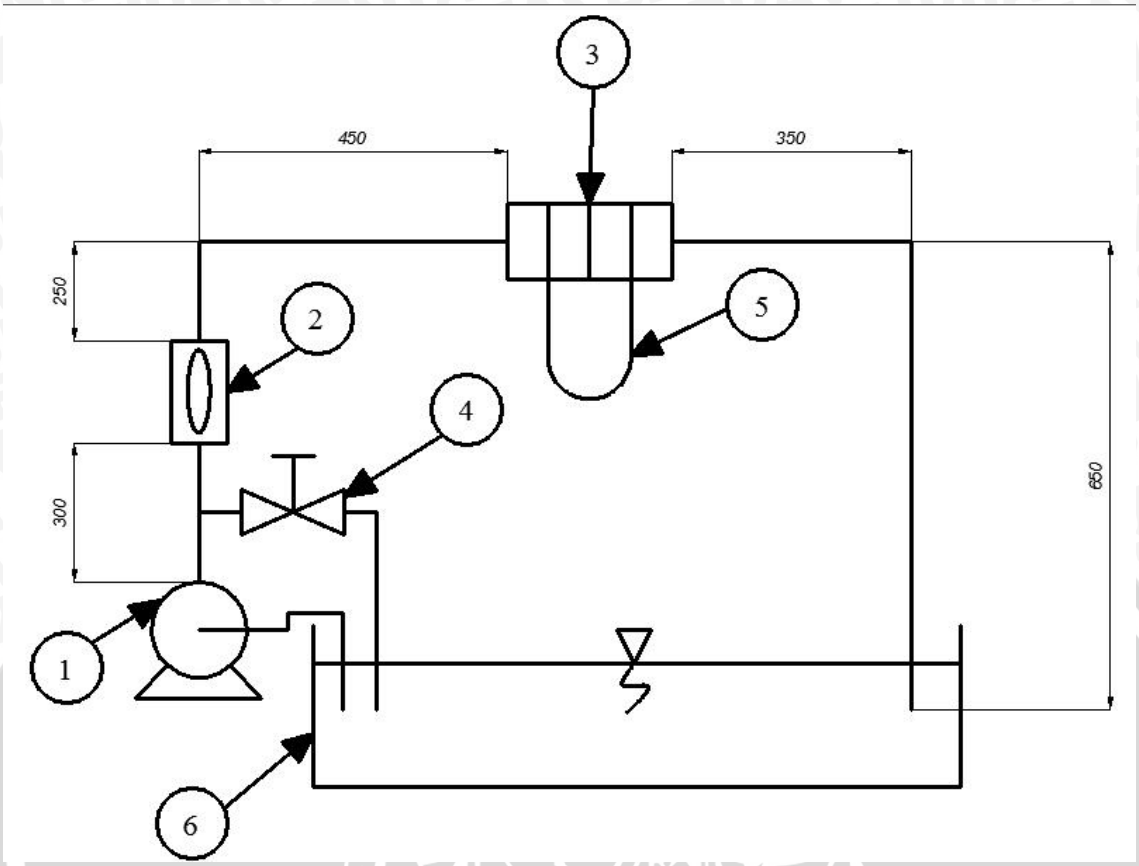
(c)



(d)

Gambar 3.8 *Orifice Plate* (a) 1 lubang, (b) 2 lubang, (c) 3 lubang dan (d) 4 lubang

3.4 Instalasi Penelitian



satuan : mm

Keterangan :

1. Pompa
2. Rotameter
3. Orifice meter
4. Katup
5. Manometer U
6. Bak penampung

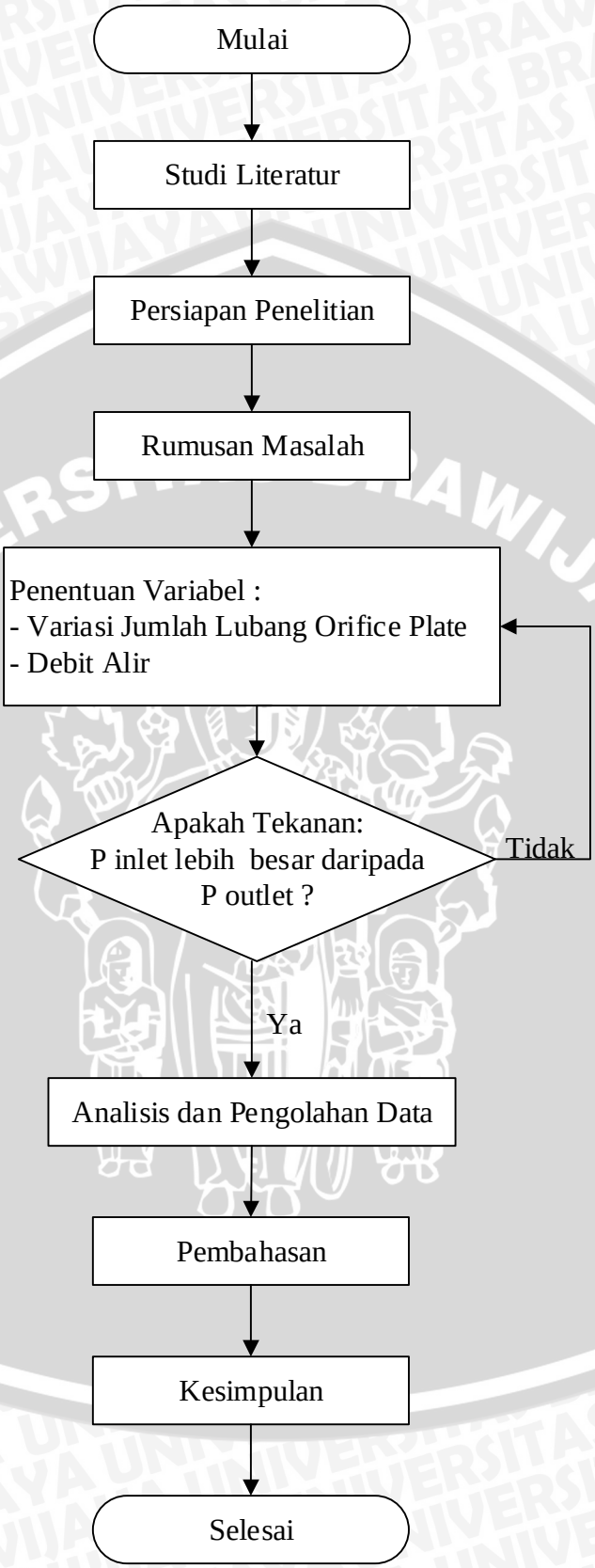
Gambar 3.9 Instalasi Penelitian

3.5 Metode Pengambilan Data

Adapun urutan proses pengambilan data adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan instalasi jaringan pipa dengan sebuah belokan 90^0, *orifice meter* dipasang pada jaraj 9D dari belokan, dengan jumlah diameter *orifice plate* yang telat ditentukan sebagai variable terkontrol.
2. Pengambilan data dimulai setelah mengalirkan fluida dari bak penampung ke seluruh jaringan pipa. Debit aliran diatur dengan melihat rotameter yang pengaturannya menggunakan katup, dimana debit aliran dimulai dari yang terendah yaitu 1200 liter/jam. Pengambilan data dilakukan kembali dengan debit yang baru sampai dengan debit 1800 liter/ jam.
3. Pengambilan data berupa beda tekanan pada *orifice meter* dengan menggunakan manometer.
4. Mengganti *orifice plate* dengan *orifice plate* lain dengan jumlah lubang yang berbeda yang diuji selanjutnya.
5. Mengulangi langkah 1 sampai dengan 3 dengan variasi debit yang tetap.
6. Pengolahan data tekanan untuk mendapatkan tekanan rata-rata aliran fluida pada tiap debit untuk masing-masing pipa uji.

3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian

Dalam penelitian ini, dilakukan pengambilan data tekanan pada sisi masuk dan keluar *orifice* untuk setiap variasi debit dan jumlah lubang pada *orifice plate*. Pengambilan data tekanan menggunakan alat ukur manometer raksa.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Rata-rata

No	Debit (liter/jam)	Jumlah Lubang							
		1		2		3		4	
		H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)
1	1200	212,63	191,93	211,57	192,03	210,60	191,60	210,03	192,07
2	1300	213,63	189,43	213	190	212,20	190	212,10	191
3	1400	215	186,93	215,07	188,50	214	188,13	213,53	189
4	1500	217,17	184,77	216,10	185,50	215,5	185,93	215	186,93
5	1600	219	182,33	218,07	183,33	218,5	184,83	217,10	185
6	1700	221,67	180	221,03	181,83	220	182	219	182,93
7	1800	223,67	177	223,50	179,57	222	179,27	221,23	180,87

4.2 Pengolahan Data Hasil Penelitian

4.2.1 Perhitungan Faktor Koreksi *Orifice* Meter

Perhitungan data dilakukan untuk mencari *pressure drop* (ΔH), debit aliran *orifice meter* (Qo), serta faktor koreksi *orifice* meter (C_{Qo}), dengan data yang diperoleh pada waktu penelitian adalah sebagai berikut :

- Diameter dalam pipa (D) = 50,8 mm = $50{,}8.10^{-3}$ m
- Debit aliran (Q) dengan variasi = 1200 – 1800 liter/jam
- Suhu air (T) = 27˚C

Dari temperatur air pada 27˚C tersebut maka diperoleh nilai densitas sebagai berikut (Berdasarkan table of water properties dari White, 1994) :

Tabel 4.2 *Water Properties* pada Tekanan 1 atm

T, °C	ρ, kg/m^3	μ, N · s/m^2	ν, m^2/s	T, °F	ρ, slug/ft^3	μ, lb · s/ft^2	ν, ft^2/s
0	1000	1.788 E-3	1.788 E-6	32	1.940	3.73 E-5	1.925 E-5
10	1000	1.307 E-3	1.307 E-6	50	1.940	2.73 E-5	1.407 E-5
20	998	1.003 E-3	1.005 E-6	68	1.937	2.09 E-5	1.082 E-5
30	996	0.799 E-3	0.802 E-6	86	1.932	1.67 E-5	0.864 E-5
40	992	0.657 E-3	0.662 E-6	104	1.925	1.37 E-5	0.713 E-5
50	988	0.548 E-3	0.555 E-6	122	1.917	1.14 E-5	0.597 E-5
60	983	0.467 E-3	0.475 E-6	140	1.908	0.975 E-5	0.511 E-5
70	978	0.405 E-3	0.414 E-6	158	1.897	0.846 E-5	0.446 E-5
80	972	0.355 E-3	0.365 E-6	176	1.886	0.741 E-5	0.393 E-5
90	965	0.316 E-3	0.327 E-6	194	1.873	0.660 E-5	0.352 E-5
100	958	0.283 E-3	0.295 E-6	212	1.859	0.591 E-5	0.318 E-5

- Densitas (ρ) = 996,6 kg/m^3

Contoh perhitungan data :

Tabel 4.3 Tekanan rata-rata pada *orifice meter* pada jumlah lubang *orifice plate* 1

No	Debit (l/jam)	Debit (m3/s)	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (Pa)	H_2 (Pa)
1	1200	0,00033	212,63	191,93	28348,701	25588,936
2	1300	0,00036	213,63	189,43	28482,023	25255,631
3	1400	0,00039	215,00	186,93	28664,230	24922,326
4	1500	0,00042	217,17	184,77	28953,094	24633,462
5	1600	0,00044	219,00	182,33	29197,518	24309,045
6	1700	0,00047	221,67	180,00	29553,043	23997,960
7	1800	0,00050	223,67	177,00	29819,687	23597,994

Perhitungan *pressure drop* pada *orifice meter* menggunakan data ke-1 pada tabel 4.3. Data *pressure drop* (ΔH) yang terlihat pada manometer pipa-U dicatat pada tiap titiknya dan dihitung dengan rumus sebagai berikut :

ΔH = *pressure drop* pada *orifice meter* = $H_1 - H_2$

Dengan, H_1 = 28348,701 Pa

H_2 = 25588,936 Pa

ΔH = 28348,701 Pa – 25588,936 Pa

ΔH = 2759.765 Pa

Tabel 4.4 Beda tekanan rata-rata pada *orifice meter* pada jumlah lubang *orifice plate* 1

No	Debit (l/jam)	Debit (m3/s)	ΔH (Pa)
1	1200	0,000333	2759,765
2	1300	0,000361	3226,392
3	1400	0,000389	3741,904
4	1500	0,000417	4319,633
5	1600	0,000444	4888,473
6	1700	0,000472	5555,083
7	1800	0,000501	6221,693

- Debit aliran yang melewati *orifice* (Q_o)

$$Qo = \frac{®}{4}.D_2^{\,2}\sqrt{\frac{2\Delta H}{°(1-\ ^4)}}$$

Dengan $= \frac{D_2}{D_1} = \frac{0{,}016m}{0{,}0508m} = 0{,}315$

$$Qo = \frac{3{,}14}{4}.(0{,}016)^2\sqrt{\frac{2.2759{,}765}{997{,}54(1-0{,}315^4)}}$$

$$Qo = 0{,}0004753\frac{m^3}{s}$$

$$Qo = 4{,}753.10^{-4}\frac{m^3}{s}$$

- Faktor koreksi debit *orifice meter* (C_{Qo})

$$C_{Qo} = \frac{Q_1}{Q_o}$$

$$= \frac{3{,}33.10^{-4}\frac{m^3}{s}}{4{,}753.10^{-4}\frac{m^3}{s}}$$

$$= 0{,}7013$$

Bentuk data lainnya dengan menggunakan perhitungan yang sama diterangkan dalam tabel 4.4

UNIVERSITAS BRAWIJAYA repository.ub.ac.id

Tabel 4.5 Faktor Koreksi *Orifice Meter* Rata-rata

No	Q (l/jam)	Q_1 (m^3/s)	ΔH (Pa) Jumlah Lubang				$Q_0.10^{-4}$ (m^3/s) Jumlah Lubang				C_{Q0} Jumlah Lubang			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	1200	0,00033	2759,765	2604,223	2533,118	2395,352	0,0004753	0,0004617	0,0004553	0,0004428	0,7013	0,7220	0,7320	0,7528
2	1300	0,00036	3226,392	3066,406	2959,748	2813,094	0,0005139	0,0005010	0,0004922	0,0004798	0,7027	0,7208	0,7337	0,7526
3	1400	0,00039	3741,904	3541,921	3448,596	3270,833	0,0005534	0,0005384	0,0005313	0,0005174	0,7027	0,7223	0,7320	0,7516
4	1500	0,00042	4319,633	4079,653	3941,887	3741,904	0,0005946	0,0005779	0,0005680	0,0005534	0,7007	0,7211	0,7335	0,7529
5	1600	0,00044	4888,473	4630,717	4488,507	4279,636	0,0006326	0,0006157	0,0006061	0,0005919	0,7026	0,7219	0,7333	0,7509
6	1700	0,00047	5555,083	5226,222	5066,236	4808,480	0,0006743	0,0006540	0,0006440	0,0006274	0,7003	0,7220	0,7333	0,7527
7	1800	0,00050	6221,693	5857,280	5697,293	5381,765	0,0007136	0,0006924	0,0006829	0,0006637	0,7007	0,7221	0,7322	0,7533

4.3 Analisa Statistik

Dari data hasil pengujian dapat dianalisa apakah faktor-faktor pada pengujian seperti debit aliran dan jumlah lubang pada *orifice plate* memiliki pengary terhadap faktor koreksi *orifice meter* atau tidak. Pada setiap pengambilan data dan perhitungan faktor koreksi kedua faktor diatas terdapat di dalamnya. Oleh karena itu, analisa statistik yang dilakukan adalah analisis varian dua arah *(two ways – Anova).*

4.3.1 Analisa Varian Dua Arah *(Two Ways – Anova)*

Anava atau anova adalah anonim dari analisis varian yang merupakan terjemahan dari *analysis of variance*, sehingga banyak orang yang menyebutnya dengan anova. Anova merupakan bagian dari metode analisis statistika yang tergolong analisis komparatif (perbandingan) lebih dari dua rata-rata.

Untuk mengetahui ada pengaruh atau tidaknya variasi debit aliran dan jumlah lubang pada *orifice plate* terhadap faktor koreksi *orifice meter* perlu dilakukan analisis varian dua arah. Apabila nilai F_{hitung} lebih besar daripada F_{tabel} maka faktor yang diuji berpengaruh secara nyata. Namun, bila nilai F_{hitung} lebih kecil atau sama dengan F_{tabel} maka faktor yang diuji tidak berpengaruh secara nyata.

Hipotesa :

H_0 : Tidak ada pengaruh antara debit aliran dan jumlah lubang *orifice plate* terhadap faktok koreksi *orifice meter*.

H_1 : Ada pengaruh antara debit aliran dan jumlah lubang *orifice plate* terhadap faktor koreksi *orifice meter*.

Tabel 4.6 Data statistika induk perhitungan Anova Faktor Koreksi *Orifice Meter*

Variabel		Pengulangan	Jumlah Lubang pada *Orifice Plate*				Total Baris
			1	2	3	4	
Debit (liter/jam)	1200	1	0,6980	0,7189	0,7282	0,7563	8,7249
		2	0,7013	0,7245	0,7263	0,7500	
		3	0,7048	0,7226	0,7419	0,7521	
	1300	1	0,7027	0,7208	0,7370	0,7490	8,7292
		2	0,6998	0,7208	0,7353	0,7543	
		3	0,7056	0,7208	0,7288	0,7543	
	1400	1	0,7035	0,7232	0,7315	0,7506	8,7256
		2	0,7010	0,7205	0,7301	0,7521	
		3	0,7035	0,7232	0,7343	0,7521	
	1500	1	0,6943	0,7187	0,7319	0,7511	8,7249
		2	0,6997	0,7222	0,7344	0,7538	
		3	0,7084	0,7222	0,7344	0,7538	
	1600	1	0,7091	0,7243	0,7351	0,7486	8,7264
		2	0,6994	0,7223	0,7297	0,7521	
		3	0,6994	0,7192	0,7351	0,7521	
	1700	1	0,6975	0,7229	0,7333	0,7513	8,7250
		2	0,7017	0,7239	0,7333	0,7534	
		3	0,7017	0,7193	0,7333	0,7534	
	1800	1	0,6982	0,7216	0,7299	0,7549	8,7250
		2	0,7019	0,7232	0,7325	0,7530	
		3	0,7019	0,7216	0,7342	0,7521	
Jumlah Total			14.7334	15.1567	15,3905	15,8004	61,0810

$$JKT = \sum X_T^{\,2} - \frac{\left(\sum X_T\right)^2}{N}$$

$$= 44{,}444 - \frac{3730{,}889}{84}$$

$$= 0{,}029$$

$$JKA = \sum \frac{(X_A)^2}{n_A} - \frac{\left(\sum X_T\right)^2}{N}$$

$$= \left(\frac{532{,}984}{12}\right) - \frac{3730{,}889}{84}$$

$$= 0{,}000001236$$

$$JKB = \sum \frac{(X_B)^2}{n_B} - \frac{\left(\sum X_T\right)^2}{N}$$

$$= \left(\frac{933,3188}{21}\right) - \frac{3730,889}{84}$$

$$= 0,02841$$

$$JKAB = \sum \frac{(X_{AB})^2}{n_{AB}} - \frac{\left(\sum X_T\right)^2}{N} - JK_A - JK_B$$

$$= \left(\frac{133,331}{3}\right) - \frac{3730,889}{84} - 0,000001236 - 0,02841$$

$$= 0.00004749$$

JKD = JKT – JKA – JKB – JKAB

= 0,029 – 0,000001236 – 0,02841 – 0,00004749

= 0,0005702

dbA (BARIS) = b – 1 = 7 – 1 = 6

dbB (KOLOM) = k – 1 = 4 – 1 = 3

dbAB (INTERAKSI) = (dbA) . (dbB) = 6.3 = 18

dbD (RESIDU) = N – (b.k) = 84 – (7.4) = 56

dbT (TOTAL) = N – 1 = 84 – 1 = 83

$$KR_A = \frac{JK_A}{db_A} = \frac{0,000001236}{6} = 0,000000206$$

$$KR_B = \frac{JK_B}{db_B} = \frac{0,02841}{3} = 0,00947$$

$$KR_{AB} = \frac{JK_{AB}}{db_{AB}} = \frac{0,00004749}{18} = 0,000002639$$

$$KR_D = \frac{JK_D}{db_D} = \frac{0{,}0005702}{56} = 0{,}0000102$$

$$F_A = \frac{KR_A}{KR_D} = \frac{0{,}000000206}{0{,}0000102} = 0{,}020$$

$$F_B = \frac{KR_B}{KR_D} = \frac{0{,}00947}{0{,}0000102} = 930{,}152$$

$$F_{AB} = \frac{KR_{AB}}{KR_D} = \frac{0{,}000002639}{0{,}0000102} = 0{,}259$$

Tingkat keyakinan α = 0,05

$F_{A(tabel)}$ = 2,262

$F_{B(tabel)}$ = 2,776

$F_{AB(tabel)}$ = 1,792

Dari perhitungan statistik menggunakan analisa varian dua arah, maka akan didapatkan data seperti yang terlihat pada tabel 4.7

Tabel 4.7 Analisa Varian Dua Arah Faktor Koreksi *Orifice Meter*

Sumber Varian (SV)	Jumlah Kuadrat (JK)	Derajat Bebas (db)	Kuadrat Rerata (KR)	F_{hitung}	F_{tabel}
Debit	0,000001236	6	0,000000206	0,020	2,262
Jumlah Lubang	0,0284	3	0,00947	930,152	2,776
Interaksi (DJ)	0,0000475	18	0,000002639	0,052	1,792
Galat	0,000570	56	0,0000102		
Total	0,0290	83			

Kesimpulan :

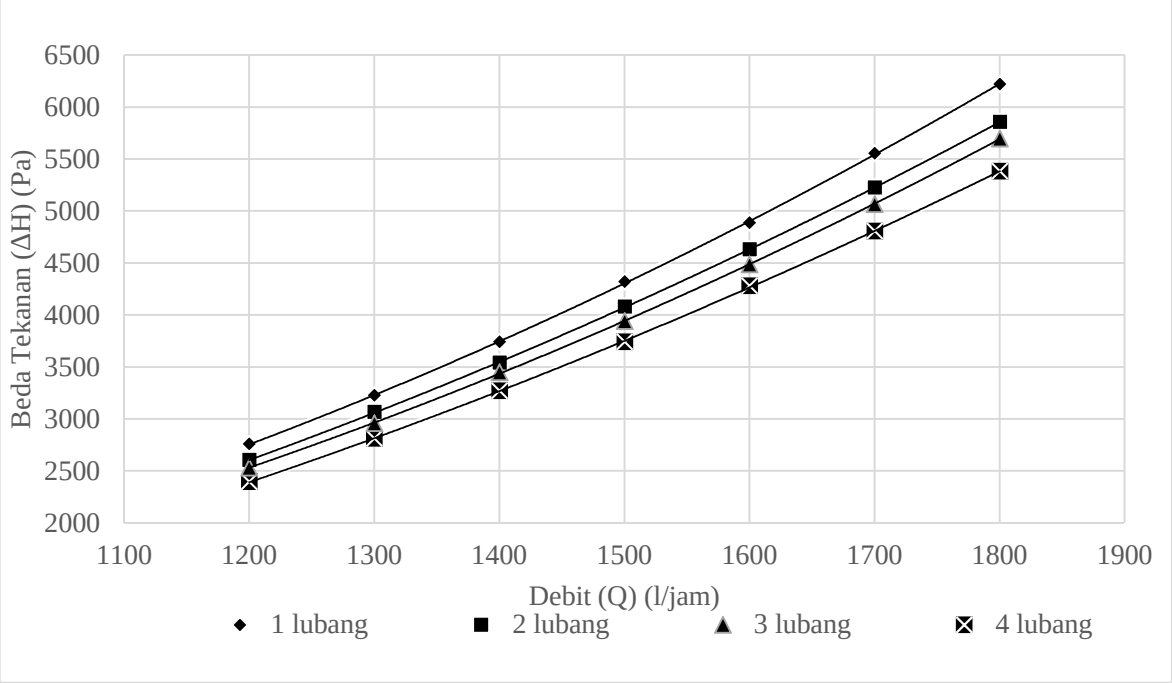
a. $F_{A(hitung)} < F_{A(tabel)}$ yaitu 0,020 < 2,262, maka H_0 diterima dan H_1 ditolak artinya tidak ada pengaruh antara debit aliran terhadap faktor koreksi *orifice meter*.
b. $F_{B(hitung)} > F_{B(tabel)}$ yaitu 930,152 > 2,776, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima jadi artinya ada pengaruh antara jumlah lubang *orifice plate* faktor koreksi *orifice meter*.

c. $F_{AB(hitung)} < F_{AB(tabel)}$ yaitu 0,052 > 2,776, maka H_0 diterima H_1 ditolak jadi tidak ada pengaruh antara debit dan jumlah lubang *orifice plate* terhadap faktor koreksi *orifice meter*.

4.4 Grafik dan Pembahasan

Data perhitungan yang terdapat pada tabel 4.4 dibuat dalam bentuk grafik untuk mempermudah pembahasan masalah dalam penelitian ini.

4.4.1 Analisa Grafik Hubungan antara Debit Aliran terhadap *Pressure Drop*



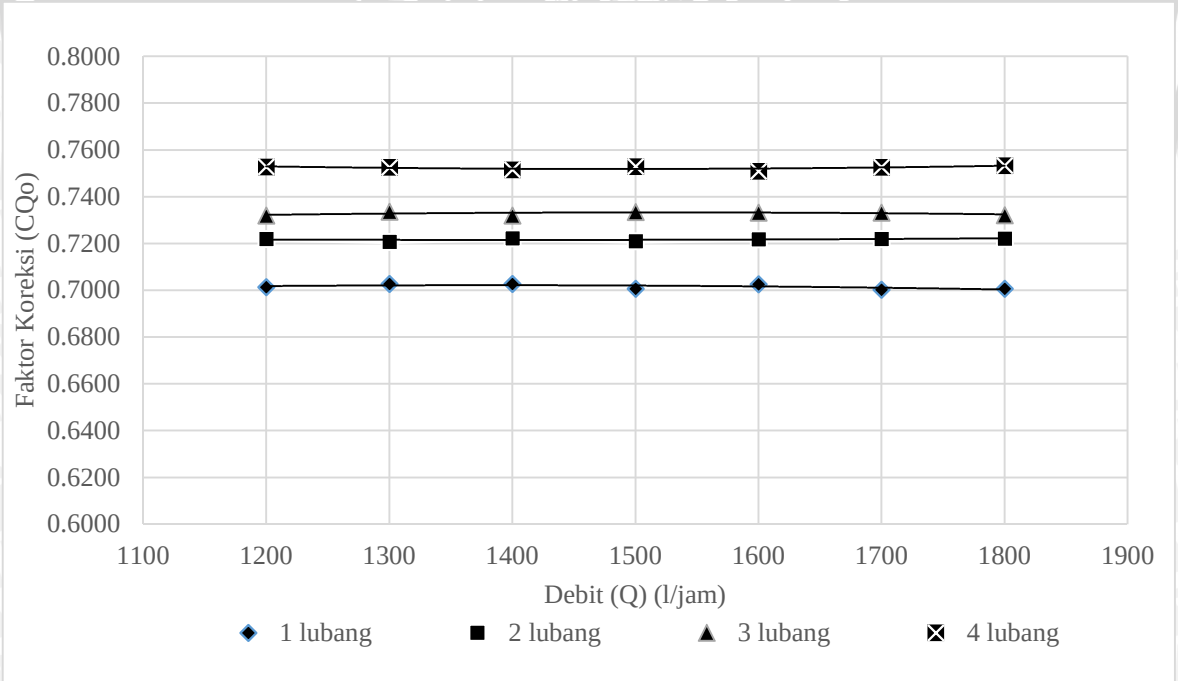
Gambar 4.1 Grafik Hubungan antara Debit Aliran terhadap *Pressure Drop*

Gambar 4.1 menunjukkan grafik hubungan antara debit aliran terhadap *pressure drop* pada jumlah lubang *orifice plate* divariasikan dengan jumlah lubang 1,2,3 dan 4. Pada variasi yang sama semakin tinggi debit aliran maka *pressure drop*-nya semakin meningkat. Pada variasi jumlah lubang yang sama nilai *pressure drop* pada debit aliran 1200 liter/jam adalah sebesar 2759,765 Pa dan mengalami peningkatan hingga mencapai debit aliran 1800 liter/jam yakni sebesar 6221,693 Pa. Demikian pula pada jumlah lubang 2,3, dan 4 *pressure drop*-nya mengalami peningkatan dari debit alir 1200 liter/jam hingga nilai maksimum 1800 liter/jam. Hal ini disebabkan karena semakin bertambahnya debit aliran maka kecepatan aliran fluida meningkat, sehingga menyebabkan nilai *pressure drop* juga meningkat.

Kenaikan *pressure drop* yang besar ini disebabkan karena aliran fluida dalam pipa semakin turbulen yang dapat ditunjukkan dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Dengan keadaan aliran yang turbulen tersebut partikel-partikel yang ada dalam aliran bergerak acak dan tidak stabil sehingga berpotensi untuk membentuk *vortex/swirl*. Dengan semakin bertambahnya kecepatan aliran fluida maka *swirl/vortex* yang terjadi menyebabkan aliran fluida kehilangan energi yang lebih banyak sehingga *pressure drop* yang terjadi semakin besar.

Pada debit alir yang sama, nilai *pressure drop*-nya semakin menurun dengan semakin banyaknya jumlah lubang pada *orifice plate*. Pada debit 1200 liter/jam nilai beda tekanan pada 1 lubang 2759,765 Pa turun seiring dengan bertambah banyaknya lubang, pada 2 lubang nilainya 2604,223 Pa, 3 lubang nilainya 2533,118 Pa hingga pada nilai yang terkecil pada 4 lubang yaitu 2395,352 Pa. Hal ini tejadi karena aliran fluida yang melewati *orifice plate* dengan jumlah lubang yang semakin banyak akan cepat menjadi *fully developed* sehingga *losses* yang terjadi semakin kecil dan menyebabkan *pressure drop*-nya semakin kecil.

4.4.2 Analisa Grafik Hubungan antara Debit Aliran terhadap Faktor Koreksi *Orifice Meter*



Gambar 4.2 Grafik Hubungan antara Debit Aliran terhadap Faktor Koreksi *Orifice Meter*

Gambar 4.2 menunjukkan grafik hubungan antara debit aliran terhadap faktor koreksi *orifice meter* dengan jumlah lubang *orifice plate* divariasikan dengan jumlah lubang 1,2,3 dan 4. Pada variasi lubang yang sama semakin tinggi debit aliran maka faktor koreksinya cenderung konstan. Hal ini disebabkan karena semakin besar debit aliran maka kecepatan aliran fluida akan meningkat. Semakin besar kecepatan aliran maka fluida menjadi semakin turbulen yang dapat ditunjukkan dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Turbulensi tersebut mempunyai partikel-partikel yang bergerak acak dan tidak stabil sehingga sangat potensial untuk membentuk *swirl/vortex*. Semakin besar kecepatan aliran fluida maka *swirl/vortex* yang terjadi menyebabkan aliran fluida kehilangan energi lebih banyak sehingga kerugian head yang terjadi semakin besar. *Head loss* yang besar tersebut mengakibatkan debit yang terukur pada *orifice* meter menjadi lebih tinggi. Dalam teori dikatakan bahwa debit pada setiap titik adalah konstan (tetap), hal ini sesuai dengan hukum kekekalan massa (kontinuitas) yang ditunjukkan pada persamaan (2-20) :

$$Qo = \frac{®}{4}.D_2^{\,2}\sqrt{\frac{2\Delta H}{°(1-\quad^4)}}$$ (Waluyo, 2013:2)

Keterangan :

Q_o = Debit *orifice meter* (m^3/s)

D_2 = Diameter lubang dasar *orifice meter* (m)

N = Jumlah lubang *orifice plate*

ΔH = *Pressure Drop Orifice meter* (N/m^2) (Pa)

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

β = rasio diameter D_e/D_1, dengan D_1 = diameter pipa (m)

Dengan faktor koreksi *orifice* meter ditunjukkan oleh persamaan (2-22) :

$$C_{Qo} = \frac{Q_1}{Q_o}$$ (White, 1994:361)

Keterangan :

CQo = faktor koreksi *orifice meter*

Qo = Debit *orifice meter* (m^3/s)

Q1 = Debit aktual (m^3/s)

Faktor koreksi *orifice* meter merupakan perbandingan antara debit aktual dengan debit teoritis. Debit teoritis dipengaruhi oleh besar *pressure drop* yang terukur pada *orifice* meter dan debit aktual bertambah seiring dengan peningkatan debit yang terukur pada rotameter. Debit teoritis dengan debit aktual sama-sama meningkat seiring dengan peningkatan debit yang terukur pada rotameter oleh karena itu nilai dari faktor koreksinya cenderung konstan.

Pada variasi debit yang sama faktor koreksi pada jumlah lubang *orifice plate* yang berbeda yaitu 1,2,3 dan 4 nilainya semakin meningkat dengan nilai faktor koreksi rata-rata berturut-turut nilainya 0,7016; 0,7217; 0,7329; dan 0,7524. Dengan nilai faktor koreksi yang rata-rata paling rendah adalah 0,7016 pada jumlah lubang *orifice plate* 1 dan yang paling tinggi adalah 0,7524 pada jumlah lubang *orifice plate* 4. Hal ini disebabkan karena aliran fluida yang melewati *orifice plate* dengan jumlah lubang yang semakin banyak akan cepat menjadi *fully developed* sehingga *losses* yang terjadi semakin kecil dan menyebabkan *pressure drop*-nya semakin turun dan membuat debit yang terukur pada *orifice meter* semakin kecil sehingga menyebabkan faktor koreksinya meningkat.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian pengaruh pengaruh variasi lubang *orifice plate* dengan jumlah lubang 1,2,3 dan 4 terhadap faktor koreksi *orifice meter* menghasilkan :

1. Pada jumlah lubang yang sama, semakin besar debit aliran fluida maka *pressure drop* juga akan semakin meningkat. Peningkatan *pressure drop* ini disebabkan karena semakin turbulennya aliran.
2. Pada debit yang sama, semakin banyak jumlah lubang pada *orifice plate* maka semakin turun nilai *pressure drop*-nya. Hal ini disebabkan karena alirannya akan cepat menjadi *fully developed* sehingga *losses* yang terjadi semakin kecil.
3. Semakin banyak jumlah lubang pada *orifice plate* maka faktor koreksi orifice meter semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena alirannya akan cepat menjadi *fully developed* sehingga *losses* yang terjadi semakin kecil. Dalam penelitian ini faktor koreksi orifice meter terbesar pada jumlah lubang *orifice plate* 4.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka disarankan beberapa hal sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh jarak peletakan antar lubang pada *orifice plate* terhadap faktor koreksi orifice meter.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh geometri lubang *orifice plate* terhadap faktor koreksi *orifice meter*.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh variasi luas lubang *orifice plate* terhadap faktor koreksi *orifice meter*.

DAFTAR PUSTAKA

Boyes, Walts. 2003. *Instrumentation Reference Book*. Elsevier Science. USA.

Deane, Jeff. 1996. *Conditioning Flow Disturbances for Precision Flow Metering*. Jurnal; Sr. Engineer Fluid Componen Internasional. San Marcos, CA.

Fox, Robert. L and McDonald, Alan. T. 1994. *Introduction to Fluid Mechanics*. Jhon Wiley & Son Inc. Toronto.

Franzini, Joseph B. & Finnemore E. John. 1997. *Fluid Mechanics with Engineering Applications*. Mc Graw Hill Book Company. New York.

Hughes,W. F , and Brighton, A.J. 1999. *Schaum's Outline of Theory and Problem of Fluid Dynamic Third Edition*. Mc Graw Hill Book Company. New York.

Ludenberg, Don. 1996. *Effect of Flow Conditioning on Liquid Measurements*. Jurnal; Vortab Company. San Marcos, CA.

Murdalis, Drs. 2006. *Metode Penelitian (Suatu Pendekatan Proposal)*. Bumi Aksara. Jakarta.

Necrasov, Boris. 1960: *Hydraulics for Aeronautical Engineers*. Peace Publisers. Moscow.

Papanastasiou, Tasos.C. 1994. *Applied Fluid Mechanics*. Prentice-Hall Inc. New Jersey

Riduwan. 2010. *Dasar-dasar Statistika*. Bandung:Alfabeta.

Streeter, Victor. L and Wylie, E. Benjamin. 1996. *Mekanika Fluida*. Mc Graw Hill Book Company. New York.

Waluyo, Joko & Sugiyanto. 2013. *Uji Eksperimental Orifice Multi Lubang Pada Saluran Berdiameter 50 mm*. Jurnal Teknologi. Yogyakarta.

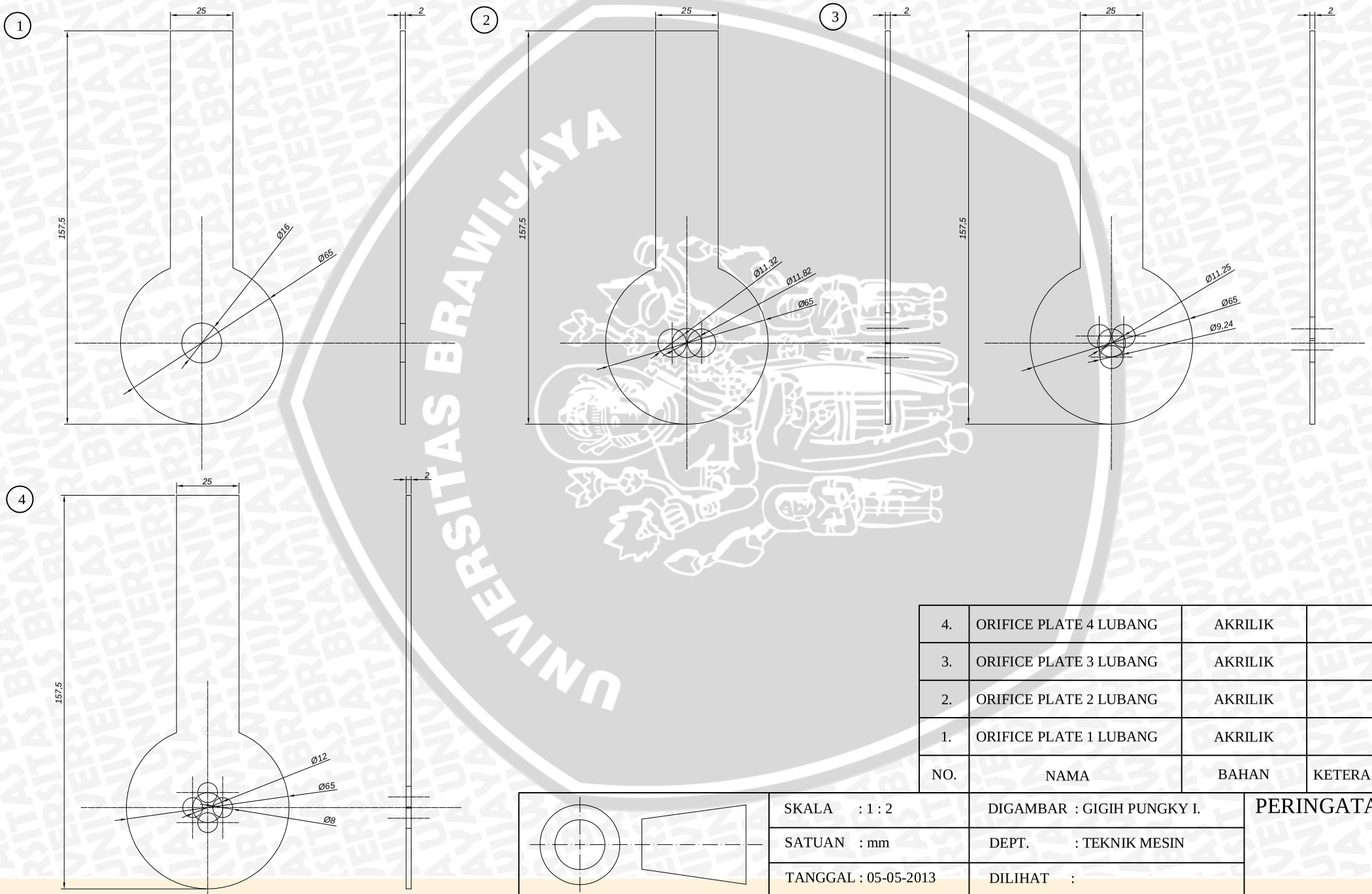
White, Frank M. 1986. *Fluid Mechanic*. Mc Graw Hill Book Company. New York.

Witanto. 2004. Pengaruh Perforasi Terhadap Perilaku *Vortex* di Belokan dan Penurunan Tekanan pada Instalasi Pipa. Jurnal. Jakarta

Young, Donald F. And Okiishi, Thedore H. 1997. *A Brief Introduction to Fluid Mechanics*. Jhon Wiley & Sons, Inc. New York.

Lampiran 1. Tabel Kerapatan dan kekentalan air pada tekanan 1 atm

T, °C	ρ, kg/m^3	μ, N · s/m^2	ν, m^2/s	T, °F	ρ, slug/ft^3	μ, lb · s/ft^2	ν, ft^2/s
0	1000	1.788 E-3	1.788 E-6	32	1.940	3.73 E-5	1.925 E-5
10	1000	1.307 E-3	1.307 E-6	50	1.940	2.73 E-5	1.407 E-5
20	998	1.003 E-3	1.005 E-6	68	1.937	2.09 E-5	1.082 E-5
30	996	0.799 E-3	0.802 E-6	86	1.932	1.67 E-5	0.864 E-5
40	992	0.657 E-3	0.662 E-6	104	1.925	1.37 E-5	0.713 E-5
50	988	0.548 E-3	0.555 E-6	122	1.917	1.14 E-5	0.597 E-5
60	983	0.467 E-3	0.475 E-6	140	1.908	0.975 E-5	0.511 E-5
70	978	0.405 E-3	0.414 E-6	158	1.897	0.846 E-5	0.446 E-5
80	972	0.355 E-3	0.365 E-6	176	1.886	0.741 E-5	0.393 E-5
90	965	0.316 E-3	0.327 E-6	194	1.873	0.660 E-5	0.352 E-5
100	958	0.283 E-3	0.295 E-6	212	1.859	0.591 E-5	0.318 E-5



NO.	NAMA	BAHAN	KETERANGAN
4.	ORIFICE PLATE 4 LUBANG	AKRILIK	
3.	ORIFICE PLATE 3 LUBANG	AKRILIK	
2.	ORIFICE PLATE 2 LUBANG	AKRILIK	
1.	ORIFICE PLATE 1 LUBANG	AKRILIK	

SKALA : 1 : 2	DIGAMBAR : GIGIH PUNGKY I.	PERINGATAN
SATUAN : mm	DEPT. : TEKNIK MESIN	
TANGGAL : 05-05-2013	DILIHAT :	

UNIVERSITAS BRAWIJAYA	DESAIN ORIFICE PLATE	01	A4

repository.ub.ac.id

UNIVERSITAS BRAWIJAYA repository.ub.ac

HARGA DISTRIBUSI F

Baris atas untuk 5%
Baris bawah untuk 1%

v_2 = dk penyebut	v_1 = dk pembilang																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	00
1	161 4.052	200 4.999	216 5.403	225 5.625	230 5.764	234 5.859	237 5.928	239 5.981	241 6.022	242 6.056	243 6.082	244 6.106	245 6.142	246 6.169	248 6.208	249 6.234	250 6.258	251 6.286	252 6.302	253 6.323	253 6.334	254 6.352	254 6.361	254 6.366
2	18,51 98,49	19,00 99,01	19,16 99,17	19,25 99,25	19,30 99,30	19,33 99,33	19,36 99,34	19,37 99,36	19,38 99,38	19,39 99,40	19,40 99,41	19,41 99,42	19,42 99,43	19,43 99,44	19,44 99,45	19,45 99,46	19,46 99,47	19,47 99,48	19,47 99,48	19,48 99,49	19,49 99,49	19,49 99,49	19,50 99,50	19,50 99,50
3	10,13 34,12	9,55 30,81	9,28 29,46	9,12 28,71	9,01 28,24	8,94 27,91	8,88 27,67	8,84 27,49	8,81 27,34	8,78 27,23	8,76 27,13	8,74 27,05	8,71 26,92	8,69 26,83	8,66 26,69	8,64 26,60	8,62 26,50	8,60 26,41	8,58 26,30	8,57 26,27	8,56 26,23	8,54 26,18	8,54 26,14	8,53 26,12
4	7,71 21,20	6,94 18,00	6,59 16,69	6,39 15,98	6,26 15,52	6,16 15,21	6,09 14,98	6,04 14,80	6,00 14,66	5,96 14,54	5,93 14,45	5,91 14,37	5,87 14,24	5,84 14,15	5,80 14,02	5,77 13,93	5,74 13,83	5,71 13,74	5,70 13,69	5,68 13,61	5,66 13,57	5,65 13,52	5,64 13,48	5,63 13,46
5	6,61 16,26	5,79 13,27	5,41 12,06	5,19 11,39	5,05 10,97	4,95 10,67	4,88 10,45	4,82 10,27	4,78 10,15	4,74 10,05	4,70 9,96	4,68 9,89	4,64 9,77	4,60 9,68	4,56 9,55	4,53 9,47	4,50 9,38	4,46 9,29	4,44 9,24	4,42 9,17	4,40 9,13	4,38 9,07	4,37 9,04	4,36 9,02
6	5,99 13,74	5,14 10,92	4,76 9,78	4,53 9,15	4,39 8,75	4,28 8,47	4,21 8,26	4,15 8,10	4,10 7,98	4,06 7,87	4,03 7,79	4,00 7,72	3,96 7,60	3,92 7,52	3,87 7,39	3,84 7,31	3,81 7,23	3,77 7,14	3,75 7,09	3,72 7,02	3,71 6,99	3,69 6,94	3,68 6,90	3,67 6,88
7	5,59 12,25	4,74 9,55	4,35 8,45	4,12 7,85	3,97 7,46	3,87 7,19	3,79 7,00	3,73 6,84	3,68 6,71	3,63 6,62	3,60 6,54	3,57 6,47	3,52 6,35	3,49 6,27	3,44 6,15	3,41 6,07	3,38 5,98	3,34 5,90	3,32 5,85	3,29 5,78	3,28 5,75	3,25 5,70	3,24 5,67	3,23 5,65
8	5,32 11,26	4,46 8,65	4,07 7,59	3,84 7,01	3,69 6,63	3,58 6,37	3,50 6,19	3,44 6,03	3,39 5,91	3,34 5,82	3,31 5,74	3,28 5,67	3,23 5,56	3,20 5,48	3,15 5,36	3,12 5,28	3,08 5,20	3,05 5,11	3,03 5,06	3,00 5,00	2,98 4,96	2,96 4,91	2,94 4,88	2,93 4,86
9	5,12 10,56	4,26 8,02	3,86 6,99	3,63 6,42	3,48 6,06	3,37 5,80	3,29 5,62	3,23 5,47	3,18 5,35	3,13 5,26	3,10 5,18	3,07 5,11	3,02 5,00	2,98 4,92	2,93 4,80	2,90 4,73	2,86 4,64	2,82 4,56	2,80 4,51	2,77 4,45	2,76 4,41	2,73 4,36	2,72 4,33	2,71 4,31
10	4,96 10,04	4,10 7,56	3,71 6,55	3,48 5,99	3,33 5,64	3,22 5,39	3,14 5,21	3,07 5,06	3,02 4,95	2,97 4,85	2,94 4,78	2,91 4,71	2,86 4,60	2,82 4,52	2,77 4,41	2,74 4,33	2,70 4,25	2,67 4,17	2,64 4,12	2,61 4,05	2,59 4,01	2,56 3,96	2,55 3,93	2,54 3,91
11	4,84 9,65	3,98 7,20	3,59 6,22	3,36 5,67	3,20 5,32	3,09 5,07	3,01 4,88	2,95 4,74	2,90 4,63	2,86 4,54	2,82 4,46	2,79 4,40	2,74 4,29	2,70 4,21	2,65 4,10	2,61 4,02	2,57 3,94	2,53 3,86	2,50 3,80	2,47 3,74	2,45 3,70	2,42 3,66	2,41 3,62	2,40 3,60
12	4,75 9,33	3,88 6,93	3,49 5,95	3,26 5,41	3,11 5,06	3,00 4,82	2,92 4,65	2,85 4,50	2,80 4,39	2,76 4,30	2,72 4,22	2,69 4,16	2,64 4,05	2,60 3,98	2,54 3,86	2,50 3,78	2,46 3,70	2,42 3,61	2,40 3,56	2,36 3,49	2,35 3,46	2,32 3,41	2,31 3,38	2,30 3,36
13	4,67 9,07	3,80 6,70	3,41 5,74	3,18 5,20	3,02 4,86	2,92 4,62	2,84 4,44	2,77 4,30	2,72 4,19	2,67 4,10	2,63 4,02	2,60 3,96	2,55 3,85	2,51 3,78	2,46 3,67	2,42 3,59	2,38 3,51	2,34 3,42	2,32 3,37	2,28 3,30	2,28 3,27	2,24 3,21	2,22 3,18	2,21 3,16
14	4,60 8,86	3,74 6,51	3,34 5,56	3,11 5,03	2,96 4,69	2,85 4,46	2,77 4,28	2,70 4,14	2,65 4,03	2,60 3,94	2,56 3,86	2,53 3,80	2,48 3,70	2,44 3,62	2,39 3,51	2,35 3,43	2,31 3,34	2,27 3,26	2,24 3,21	2,21 3,14	2,19 3,11	2,18 3,06	2,14 3,02	2,13 3,00

UNIVERSITAS BRAWIJAYA repository.ub.ac

v_2 = dk penyebut	v_1 = dk pembilang																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	00
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,70	2,64	2,59	2,55	2,51	2,48	2,43	2,39	2,33	2,29	2,25	2,21	2,18	2,15	2,12	2,10	2,08	2,07
	8,68	6,36	5,42	4,89	4,56	4,32	4,14	4,00	3,89	3,80	3,73	3,67	3,56	3,48	3,36	3,29	3,20	3,12	3,07	3,00	2,97	2,92	2,89	2,87
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,45	2,42	2,37	2,33	2,28	2,24	2,20	2,16	2,13	2,09	2,07	2,04	2,02	2,01
	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	4,03	3,89	3,78	3,69	3,61	3,55	3,45	3,37	3,25	3,18	3,10	3,01	2,98	2,89	2,86	2,80	2,77	2,75
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,62	2,55	2,50	2,45	2,41	2,38	2,33	2,29	2,23	2,19	2,15	2,11	2,08	2,04	2,02	1,99	1,97	1,96
	8,40	6,11	5,18	4,67	4,34	4,10	3,93	3,79	3,68	3,59	3,52	3,45	3,35	3,27	3,16	3,08	3,00	2,92	2,88	2,79	2,76	2,70	2,67	2,65
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,37	2,34	2,29	2,25	2,19	2,15	2,11	2,07	2,04	2,00	1,98	1,95	1,93	1,92
	8,28	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,85	3,71	3,60	3,51	3,44	3,37	3,27	3,19	3,07	3,00	2,91	2,83	2,78	2,71	2,68	2,62	2,59	2,57
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,55	2,48	2,43	2,38	2,34	2,31	2,26	2,21	2,15	2,11	2,07	2,02	2,00	1,96	1,94	1,91	1,90	1,88
	8,18	5,93	5,01	4,50	4,17	3,94	3,77	3,63	3,52	3,43	3,36	3,30	3,19	3,12	3,00	2,92	2,84	2,76	2,70	2,63	2,60	2,54	2,51	2,49
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,52	2,45	2,40	2,35	2,31	2,28	2,23	2,18	2,12	2,08	2,04	1,99	1,96	1,92	1,90	1,87	1,85	1,84
	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,71	3,56	3,45	3,37	3,30	3,23	3,13	3,05	2,94	2,86	2,77	2,69	2,63	2,56	2,53	2,47	2,44	2,42
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,28	2,25	2,20	2,15	2,09	2,05	2,00	1,96	1,93	1,89	1,87	1,84	1,82	1,81
	8,02	5,78	4,87	4,37	4,04	3,81	3,65	3,51	3,40	3,31	3,24	3,17	3,07	2,99	2,88	2,80	2,72	2,63	2,58	2,51	2,47	2,42	2,38	2,36
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,47	2,40	2,35	2,30	2,26	2,23	2,18	2,13	2,07	2,03	1,98	1,93	1,91	1,87	1,84	1,81	1,80	1,78
	7,94	5,72	4,82	4,31	3,99	3,76	3,59	3,45	3,35	3,26	3,18	3,12	3,02	2,94	2,83	2,75	2,67	2,58	2,53	2,46	2 42	2,37	2,33	2,31
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,45	2,38	2,32	2,28	2,24	2,20	2,14	2,10	2,04	2,00	1,96	1,91	1,88	1,84	1,82	1,79	1,77	1,76
	7,88	5,66	4,76	4,26	3,94	3,71	3,54	3,41	3,30	3,21	3,14	3,07	2,97	2,89	2,78	2,70	2,62	2,53	2,48	2,41	2,37	2,32	2,28	2,26
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,43	2,36	2,30	2,26	2,22	2,18	2,13	2,09	2,02	1,98	1,94	1,89	1,86	1,82	1,80	1,76	1,74	1,73
	7,82	5,61	4,72	4,22	3,90	3,67	3,50	3,36	3,25	3,17	3,09	3,03	2,93	2,85	2,74	2,66	2,58	2,49	2,44	2,36	2,33	2,27	2,23	2,21
25	4,24	3,38	2,99	2,76	2,60	2,49	2,41	2,34	2,28	2,24	2,20	2,16	2,11	2,06	2,00	1,96	1,92	1,87	1,84	1,80	1,77	1,74	1,72	1,71
	7,77	5,57	4,68	4,18	3,86	3,63	3,46	3,32	3,21	3,13	3,05	2,99	2,89	2,81	2,70	2,62	2,54	2,45	2,40	2,32	2,29	2,23	2,19	2,17
26	4,22	3,37	2,89	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,18	2,15	2,10	2,05	1,99	1,95	1,90	1,85	1,82	1,78	1,76	1,72	1,70	1,69
	7,72	5,53	4,64	4,14	3,82	3,59	3,42	3,29	3,17	3,09	3,02	2,96	2,86	2,77	2,66	2,58	2,50	2,41	2,36	2,28	2,25	2,19	2,15	2,13
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,30	2,25	2,20	2,16	2,13	2,08	2,03	1,97	1,93	1,88	1,84	1,80	1,76	1,74	1,71	1,68	1,67
	7,68	5,49	4,60	4,11	3,79	3,56	3,39	3,26	3,14	3,06	2,98	2,93	2,83	2,74	2,63	2,55	2,47	2,38	2,33	2,25	2,21	2,16	2,12	2,10
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,44	2,36	2,29	2,24	2,19	2,15	2,12	2,06	2,02	1,96	1,91	1,87	1,81	1,78	1,75	1,72	1,69	1,67	1,65
	7,64	5,45	4,57	4,07	3,76	3,53	3,36	3,23	3,11	3,03	2,95	2,90	2,80	2,71	2,60	2,52	2,44	2,35	2,30	2,22	2,18	2,13	2,09	2,06
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,54	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,14	2,10	2,05	2,00	1,94	1,90	1,85	1,80	1,77	1,73	1,71	1,68	1,65	1,64
	7,60	5,52	4,54	4,04	3,73	3,50	3,33	3,20	3,08	3,00	2,92	2,87	2,77	2,68	2,57	2,49	2,41	2,32	2,27	2,19	2,15	2,10	2,06	2,03
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,34	2,27	2,21	2,16	2,12	2,09	2,04	1,99	1,93	1,89	1,84	1,79	1,76	1,72	1,69	1,66	1,64	1,62
	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	3,47	3,30	3,17	3,06	2,98	2,90	2,84	2,74	2,66	2,55	2,47	2,38	2,29	2,24	2,16	2,13	2,07	2,03	2,01
32	4,15	3,30	2,90	2,67	2,51	2,40	2,32	2,25	2,19	2,14	2,10	2,07	2,02	1,97	1,91	1,86	1,82	1,76	1,74	1,69	1,67	1,64	1,61	1,59
	7,50	5,34	4,46	3,97	3,66	3,42	3,25	3,12	3,01	2,94	2,86	2,80	2,70	2,62	2,51	2,42	2,34	2,25	2,20	2,12	2,08	2,02	1,98	1,96
34	4,13	3,28	2,88	2,65	2,49	2,38	2,30	2,23	2,17	2,12	2,08	2,05	2,00	1,95	1,89	1,84	1,80	1,74	1,71	1,67	1,64	1,61	1,59	1,57
	7,44	5,29	4,42	3,93	3,61	3,38	3,21	3,08	2,97	2,89	2,82	2,76	2,66	2,58	2,47	2,38	2,30	2,21	2,15	2,08	2,04	1,98	1,94	1,91

UNIVERSITAS BRAWIJAYA repository.ub.ac

v_2 – dk penyebut	v_1 – dk pembilang																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	00
36	4,11 7,39	3,26 5,25	2,80 4,38	2,63 3,89	2,48 3,58	2,36 3,35	2,28 3,18	2,21 3,04	2,15 2,94	2,10 2,86	2,06 2,78	2,03 2,72	1,89 2,62	1,93 2,54	1,87 2,43	1,82 2,35	1,78 2,26	1,72 2,17	1,69 2,12	1,65 2,04	1,62 2,00	1,59 1,94	1,56 1,90	1,55 1,87
38	4,10 7,35	3,25 5,21	2,85 4,34	2,62 3,86	2,46 3,54	2,35 3,32	2,26 3,15	2,19 3,02	2,14 2,91	2,09 2,82	2,05 2,75	2,02 2,69	1,96 2,59	1,92 2,51	1,85 2,40	1,80 2,32	1,76 2,22	1,71 2,14	1,67 2,08	1,63 2,00	1,60 1,97	1,57 1,90	1,54 1,86	1,53 1,84
40	4,08 7,31	3,23 5,18	2,84 4,31	2,61 3,83	2,45 3,51	2,34 3,29	2,25 3,12	2,18 2,99	2,12 2,88	2,07 2,80	2,04 2,73	2,00 2,66	1,95 2,56	1,90 2,49	1,84 2,37	1,79 2,29	1,74 2,20	1,69 2,11	1,66 2,05	1,61 1,97	1,59 1,94	1,55 1,88	1,53 1,84	1,51 1,81
42	4,07 7,27	3,22 5,15	2,83 4,29	2,59 3,80	2,44 3,49	2,32 3,26	2,24 3,10	2,17 2,96	2,11 2,86	2,06 2,77	1,99 2,70	1,94 2,61	1,89 2,54	1,82 2,46	1,78 2,35	1,73 2,25	1,68 2,17	1,64 2,08	1,60 2,02	1,57 1,94	1,51 1,91	1,54 1,85	1,51 1,80	1,49 1,78
44	4,06 7,24	3,21 5,12	2,82 4,26	2,58 3,78	2,43 3,46	2,31 3,24	2,23 3,07	2,16 2,94	2,10 2,84	2,05 2,75	2,01 2,68	1,98 2,62	1,92 2,52	1,88 2,44	1,81 2,32	1,76 2,24	1,72 2,15	1,68 2,08	1,63 2,00	1,58 1,92	1,56 1,88	1,52 1,82	1,50 1,78	1,48 1,75
46	4,05 7,21	3,20 5,10	2,81 4,24	2,57 3,76	2,42 3,44	2,30 3,22	2,22 3,05	2,14 2,92	2,09 2,82	2,04 2,73	2,00 2,66	1,97 2,60	1,91 2,50	1,87 2,42	1,80 2,30	1,75 2,22	1,71 2,13	1,65 2,04	1,62 1,98	1,57 1,90	1,54 1,86	1,51 1,80	1,48 1,76	1,48 1,72
48	4,04 7,19	3,19 5,08	2,80 4,22	2,56 3,74	2,41 3,42	2,30 3,20	2,21 3,04	2,14 2,90	2,08 2,80	2,03 2,71	1,99 2,64	1,96 2,58	1,90 2,48	1,86 2,40	1,79 2,28	1,74 2,20	1,70 2,11	1,64 2,02	1,61 1,96	1,56 1,88	1,53 1,84	1,50 1,78	1,47 1,73	1,45 1,70
50	4,03 7,17	3,18 5,08	2,79 1,20	2,36 3,72	2,10 3,11	2,29 3,18	2,20 3,02	2,13 2,88	2,07 2,78	2,02 2,70	1,98 2,62	1,95 2,56	1,90 2,16	1,85 2,39	1,78 2,26	1,71 2,18	1,69 2,10	1,63 2,00	1,60 1,91	1,55 1,86	1,52 1,82	1,48 1,76	1,46 1,71	1,44 1,66
55	1,02 7,12	3,17 5,01	2,78 1,16	2,51 3,66	2,38 3,37	2,27 3,15	2,18 2,96	2,11 2,83	2,05 2,75	2,00 2,66	1,97 2,59	1,93 2,53	1,88 2,43	1,83 2,35	1,76 2,23	1,72 2,15	1,67 2,00	1,61 1,96	1,58 1,90	1,52 1,82	1,50 1,78	1,46 1,71	1,43 1,66	1,41 1,61
60	4,00 7,08	3,15 4,98	2,76 4,13	2,52 3,65	2,37 3,31	2,25 3,12	2,17 2,95	2,10 2,82	2,01 2,72	1,99 2,63	1,95 2,56	1,92 2,50	1,86 2,40	1,81 2,32	1,75 2,20	1,70 2,12	1,65 2,03	1,59 1,93	1,56 1,87	1,50 1,79	1,48 1,71	1,44 1,66	1,41 1,63	1,39 1,60
65	3,99 7,04	3,14 4,95	2,75 4,10	2,51 3,62	2,36 3,34	2,24 3,09	2,15 2,93	2,08 2,79	2,02 2,70	1,98 2,61	1,94 2,54	1,90 2,47	1,85 2,37	1,80 2,30	1,74 2,18	1,68 2,09	1,63 2,00	1,57 1,90	1,54 1,84	1,49 1,76	1,46 1,71	1,42 1,64	1,39 1,60	1,37 1,58
70	3,98 7,01	3,13 4,92	2,74 4,08	2,50 3,60	2,35 3,29	2,32 3,07	2,14 2,91	2,07 2,77	2,01 2,67	1,97 2,59	1,93 2,51	1,89 2,45	1,84 2,35	1,79 2,28	1,72 2,15	1,67 2,07	1,62 1,98	1,56 1,88	1,54 1,82	1,47 1,74	1,45 1,69	1,40 1,63	1,37 1,56	1,35 1,53
80	3,96 6,96	3,44 4,88	2,72 4,04	2,48 3,56	2,33 3,25	2,21 3,04	2,12 2,87	2,05 2,74	1,99 2,61	1,95 2,55	1,91 2,48	1,88 2,44	1,82 2,32	1,77 2,24	1,70 2,14	1,65 2,03	1,60 1,94	1,54 1,84	1,51 1,78	1,45 1,70	1,42 1,65	1,38 1,57	1,35 1,52	1,32 1,49
100	3,94 6,90	3,09 4,82	2,70 3,98	2,46 3,51	2,30 3,20	2,19 2,99	2,10 2,82	2,03 2,69	1,97 2,59	1,92 2,51	1,88 2,43	1,85 2,36	1,79 2,26	1,75 2,19	1,68 2,06	1,63 1,98	1,57 1,89	1,51 1,79	1,48 1,73	1,42 1,64	1,39 1,59	1,34 1,51	1,30 1,48	1,28 1,43
125	3,92 6,84	3,07 4,78	2,68 3,94	2,44 3,47	2,29 3,17	2,17 2,95	2,08 2,79	2,01 2,65	1,95 2,58	1,90 2,47	1,86 2,40	1,83 2,33	1,77 2,23	1,72 2,15	1,65 2,03	1,60 1,94	1,55 1,85	1,49 1,75	1,46 1,68	1,39 1,59	1,36 1,54	1,31 1,46	1,27 1,40	1,25 1,37
150	3,91 6,81	3,06 4,75	2,67 3,91	2,43 3,44	2,27 3,13	2,16 2,92	2,07 2,76	2,00 2,62	1,94 2,53	1,89 2,44	1,85 2,37	1,82 2,30	1,76 2,20	1,71 2,12	1,64 2,00	1,59 1,94	1,54 1,82	1,47 1,72	1,44 1,66	1,37 1,56	1,34 1,51	1,29 1,43	1,25 1,37	1,22 1,33
200	3,89 6,76	3,04 4,74	2,65 3,88	2,41 3,41	2,26 3,11	2,14 2,90	2,05 2,73	1,98 2,60	1,92 2,50	1,87 2,44	1,83 2,34	1,80 2,28	1,74 2,17	1,69 2,09	1,62 1,97	1,57 1,88	1,52 1,79	1,45 1,69	1,42 1,62	1,35 1,53	1,32 1,48	1,26 1,39	1,22 1,33	1,19 1,28
400	3,86 6,70	3,02 4,66	2,62 3,83	2,39 3,36	2,23 3,06	2,12 2,85	2,03 2,69	1,96 2,55	1,90 2,16	1,85 2,37	1,81 2,29	1,78 2,23	1,72 2,12	1,67 2,04	1,60 1,92	1,54 1,84	1,49 1,74	1,42 1,64	1,38 1,57	1,32 1,47	1,28 1,42	1,22 1,32	1,16 1,24	1,13 1,19

Lampiran 4 Hasil Pengujian

LABORATORIUM FENOMENA DASAR MESIN
FAKULTAS TEKNIK JURUSAN MESIN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Jl. MT Haryono 167 Malang – Jawa Timur
Telp. (0341) 553286 pes. 215, (0341) 569103 Fax. (0341) 554291

DATA HASIL PENELITIAN

1 Lubang

Debit (l/jam)	Percobaan 1		Percobaan 2		Percobaan 3	
	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)
1200	212.7	191.8	212.7	192	212.5	192
1300	213.7	189.5	213.7	189.3	213.5	189.5
1400	215	187	215	186.8	215	187
1500	217	184	217.5	185	217	185.3
1600	219	183	219	182	219	182
1700	222	180	221.5	180	221.5	180
1800	224	177	223.5	177	223.5	177

2 Lubang

Debit (l/jam)	Percobaan 1		Percobaan 2		Percobaan 3	
	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)
1200	211.7	192	211.5	192.1	211.5	192
1300	213	190	213	190	213	190
1400	215	188.5	215.2	188.5	215	188.5
1500	216.3	185.5	216	185.5	216	185.5
1600	218	183.5	218.2	183.5	218	183
1700	221.1	182	221	182	221	181.5
1800	223.5	179.5	223.5	179.7	223.5	179.5

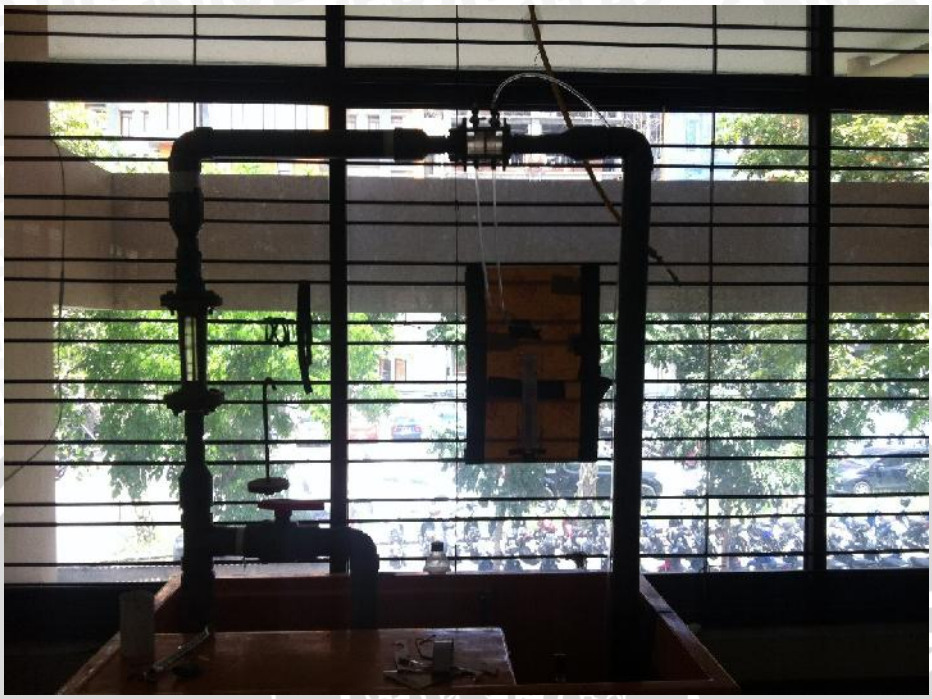
3 Lubang

Debit (l/jam)	Percobaan 1		Percobaan 2		Percobaan 3	
	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)
1200	210.5	191.3	210.8	191.5	210.5	192
1300	212	190	212.1	190	212.5	190
1400	214	188.1	214	188	214	188.3
1500	215.5	185.8	215.5	186	215.5	186
1600	218.5	185	218.5	184.5	218.5	185
1700	220	182	220	182	220	182
1800	222	179	222	179.3	222	179.5

4 Lubang

Debit (l/jam)	Percobaan 1		Percobaan 2		Percobaan 3	
	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (mmHg)	H_2 (mmHg)	H_1 (mmHg)	H2 (mmHg)
1200	210	192.2	210.1	192	210	192
1300	212.3	191	212	191	212	191
1400	213.6	189	213.5	189	213.5	189
1500	215	186.8	215	187	215	187
1600	217.3	185	217	185	217	185
1700	219	182.8	219	183	219	183
1800	221.2	181	221.2	180.8	221.3	180.8

Malang, 10 Oktober 2013
Kepala Laboratorium
Laboratorium Dasar Mesin

Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.
NIP. 19750802 199903 2 002

Lampiran 5 Foto Dokumentasi