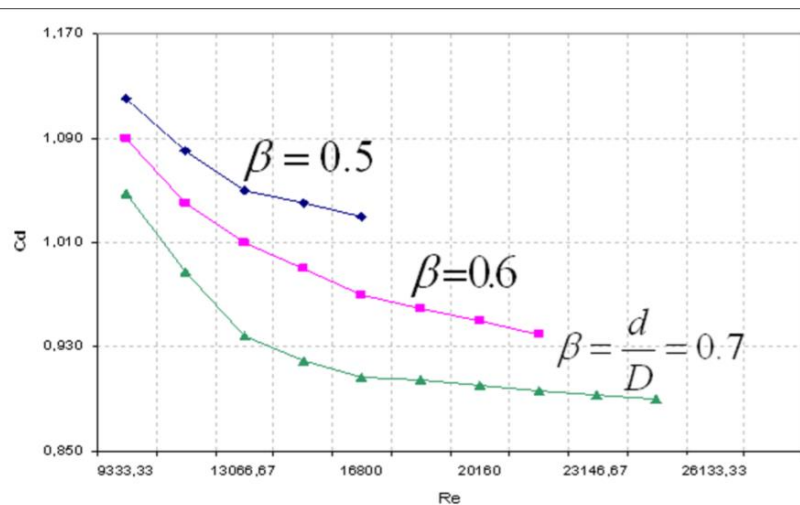


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

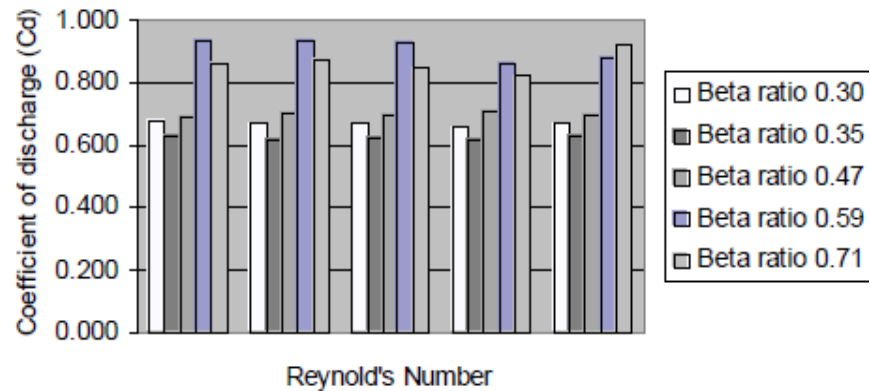
Septiadi (2008) melakukan studi ekperimental *orifice flow meter* dengan variasi tebal dan posisi pengukuran beda tekanan. Dalam pengujian ini rasio beta yang digunakan yaitu 0,5, 0,6, 0,7 dengan tebal 10mm dan 20mm diameter yang digunakan pipa 16mm. hasil dari penelitian ini menunjukkan *pressure drop* terbaik diperoleh menggunakan orifice dengan ketebalan 10mm. semakin tinggi nilai bilangan Reynolds maka akan semakin kecil nilai dari Cd. Nilai Cd *orifice* dengan tebal 10mm berkisar pada angka 1,17 hingga 0,88 sedangkan pada orifice dengan tebal 20mm berkisar pada angka 1,048 hingga 0,94 dimana nilai Cd yang dibawah 1 diperoleh melalui *orifice* dengan rasio β 0,5.



Gambar 2. 1 Grafik hubungan nilai Cd dan Re (septiadi, 2008)

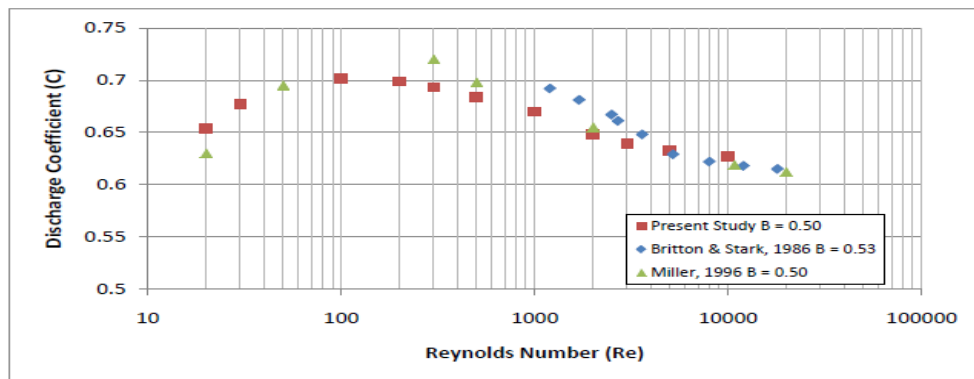
Rahman dkk (2009) meneliti tentang efek rasio beta dan bilangan Reynolds terhadap nilai koefisien discharge pada plat orifice. Plat orifis berbahan besi cor dengan ketebalan 6mm dengan nilai rasio beta 0,30, 0,35, 0,47, 0,59 dan 0,71. Perbedaan tekanan yang terjadi diukur menggunakan manometer dengan jarak 10cm di sisi *upstream* dan 8cm pada sisi *downstream*. Hasil penelitian yang

dilakukan oleh Rahman dkk ini memperoleh hasil terbaik dengan nilai Cd 0,9 menggunakan rasio beta 0,59, dan 0,71.



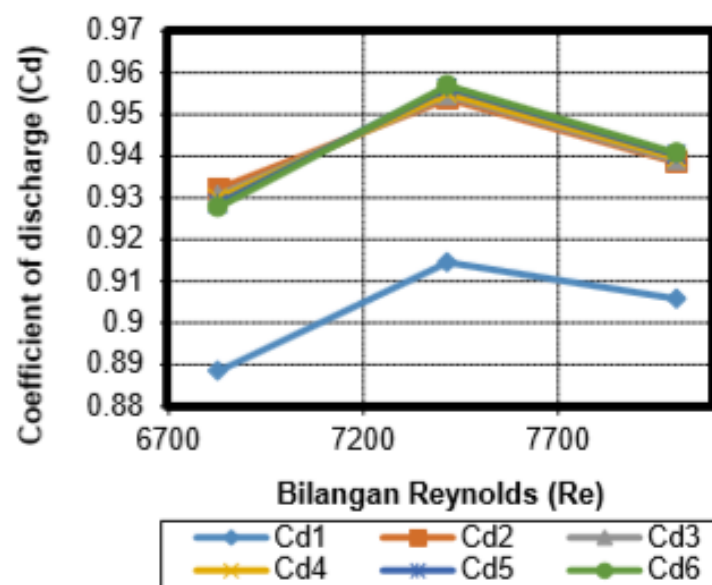
Gambar 2. 2 Grafik ΔC_d terhadap bilangan Re (Rahman dkk, 2009)

Gambar 2.3 menunjukkan bagaimana perbandingan hasil penelitian Hollingshead dkk (2011) dengan Britton dkk (1986) dan Miller (1996). Berdasarkan pada grafik diatas dapat dilihat bahwa terjadi kemiripan nilai koefisien *discharge* terhadap bilangan reynolds pada penelitian Hollingshead dkk (2011) dengan penelitian lainnya. Perbedaan nilai koefisien *discharge* pada penelitian satu dengan yang lainnya hanya sebesar 4 %. Penelitian Hollingshead dkk (2011) menyimpulkan bahwa *orifice plate meter* memiliki koefisien *discharge* yang tidak konstan apabila nilai Re terlalu besar, akan tetapi plat orifis adalah *flow meter* yang paling banyak digunakan karena memiliki harga yang paling murah



Gambar 2. 3 Hubungan antara koefisien discharge dengan bilangan Reynolds (Hollingshead dkk, 2011)

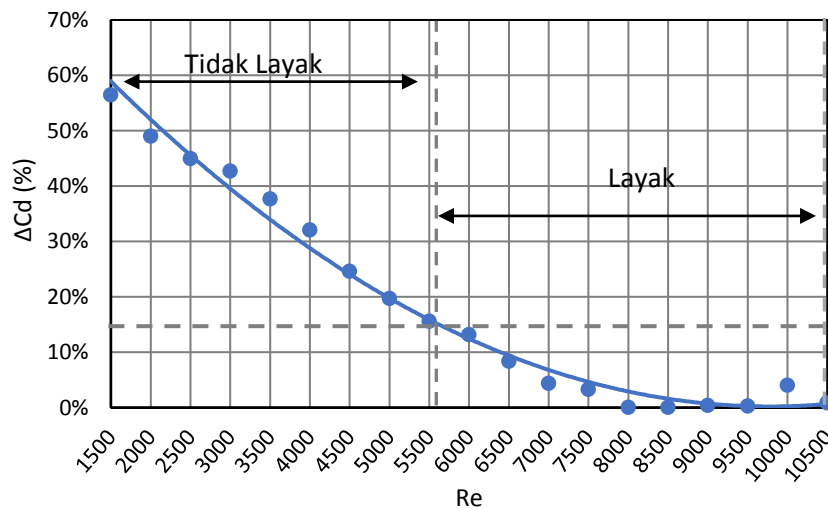
Ghuri dkk (2016) melakukan pengujian *orifice flow meter* dengan kapasitas aliran rendah. Penelitian ini menggunakan enam plat orifice dengan nilai rasio β 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, dan memiliki tebal 10mm. hasil dari penelitian yang dilakukan ini menunjukkan bahwa kapasitas teoritis mendekati dengan kapasitas aktual. Selain itu nilai Cd tyang diperoleh berkisar diantara 0,3535 hingga 1,3374 dengan nilai terendah pada *orifice* $d = 14,4\text{mm}$.



Gambar 2. 4 Grafik Cd terhadap Re (Ghuri dkk, 2016)

Pratama (2017) melakukan pengujian *orifice plate meter* untuk mengukur debit aliran menggunakan fluida air dengan kapasitas 11 LPM pada pipa berdiameter $\frac{1}{2}$ inch dan $\frac{3}{4}$ inch rasio $\beta = 0,4$. Dalam pengujian ini diameter lubang

orifice pada pipa $\frac{1}{2}$ inch sebesar 7,2 mm dan pada pipa $\frac{3}{4}$ inch sebesar 8,5 mm. penelitian ini dilakukan dengan metode menghitung nilai beda tekanan pada sisi sebelum dan sesudah orifice dipasang. Variasi pada pengujian yang dilakukan yaitu dengan menaikkan debit air sebesar 0,5 LPM dengan rentang pengukuran pada 1 sampai 11 LPM. Grafik hubungan antara nilai ΔC_d terhadap besarnya bilangan Reynolds ditampilkan pada gambar 2.4



Gambar 2. 5 Grafik ΔC_d terhadap bilangan Re (Pratama, 2017)

Keterangan:

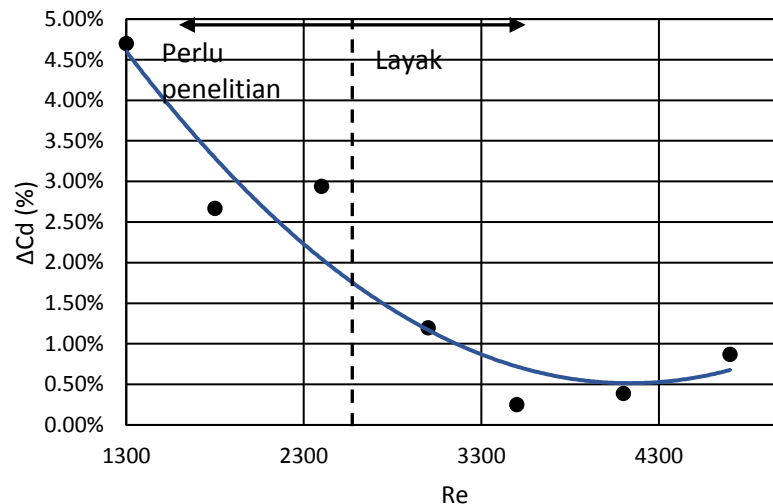
$$\Delta C_d = 0,0021Re^2 - 0,0752 Re + 0,6621$$

$$R^2 = 0,9873$$

Grafik ΔC_d terhadap bilangan Re yang pada gambar 2.1 menunjukkan bahwa nilai deviasi *coeffisien of discharge* tertinggi terjadi pada bilangan Reynolds 1500 dan mengalami penyimpangan sebesar 56,50 %. Nilai tersebut mengalami penurunan hingga pada bilangan Reynolds ≥ 7000 nilai deviasi mengalami fluktuasi dengan rentang antara 0,04 % hingga 4,7 %. Pada bilangan Reynolds 8000 menunjukkan bahwa nilai *coeffisien discharge* memiliki nilai terendah dengan nilai 0,08 %.

Saputra (2017) melakukan pengujian *orifice plate meter* untuk mengukur debit air menggunakan orifice dengan rasio $\beta = 0,16$ pada pipa berdiameter $\frac{1}{2}$ inch dan $\frac{3}{4}$ inch. metode yang digunakan yaitu dengan mengukur beda tekanan yang terjadi pada aliran sebelum dan sesudah orifice. Debit aliran fluida yang digunakan untuk

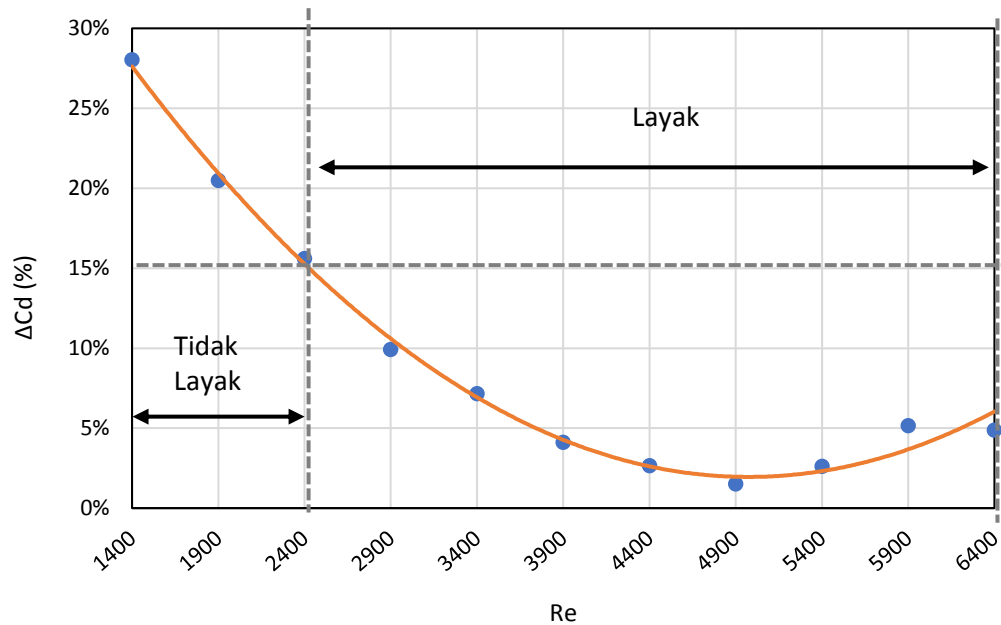
pengujian berada pada range antara 1 hingga 6 LPM dengan kenaikan debit sebesar 0,5 LPM pada setiap pengambilan data. Dari penelitian ini diperoleh nilai ΔC_d pada bilangan Reynolds rendah. Grafik hubungan antara ΔC_d terhadap Re ditunjukkan pada gambar 2.5



Gambar 2. 6 Grafik ΔC_d terhadap bilangan Re (Saputra, 2017)

Grafik pada gambar 2.2 dapat diketahui bahwa semakin besar bilangan Reynolds maka nilai *coeffisien discharge* akan turun hingga titik tertentu, nilai *coeffisien of discharge* mengalami fluktuasi tetapi tidak terlalu signifikan. Grafik menunjukkan adanya penurunan nilai *coeffisien discharge* dari yang semula 4,7 % pada bilangan Reynolds 1300 menjadi 0,25 % pada bilangan Reynolds 3500 kemudian mengalami kenaikan lagi pada bilangan Reynolds ≥ 4100 . Pada bilangan Reynolds 3500 menunjukkan bahwa nilai *coeffisien discharge* terendah, yaitu dengan nilai 0,25 %.

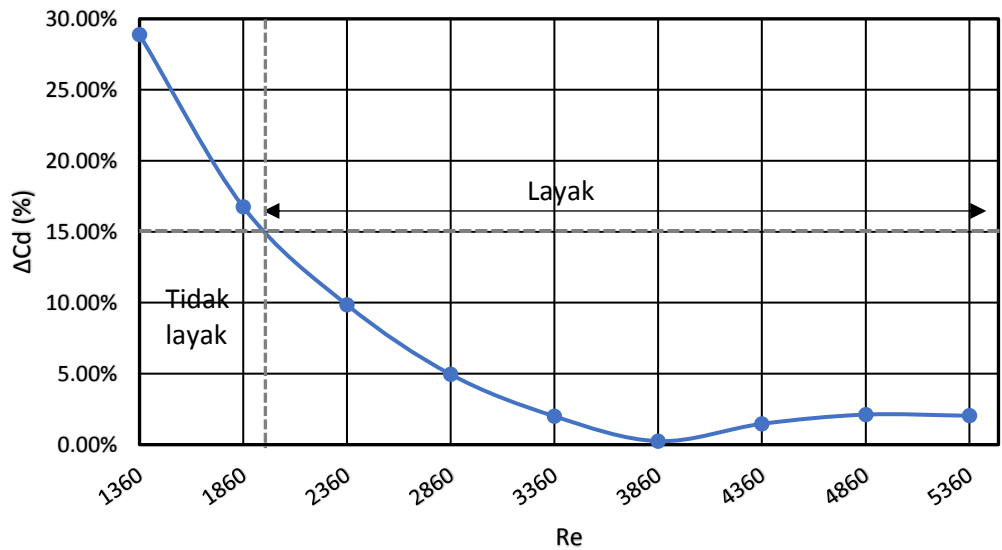
Kurniawan (2017) melakukan pengujian orifice plat meter untuk mengukur debit air pada kapasitas 7 LPM dengan nilai rasio $\beta = 0,24$ pada pipa berdiameter $\frac{1}{2}$ inch dan $\frac{3}{4}$ inch. Metode pengujian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dengan menghitung nilai perbedaan tekanan yang terjadi pada sisi masuk dan sisi keluar orifice. Variasi yang dilakukan oleh kurniawan yaitu debit aliran fluida yang masuk dari 1 hingga 7 LPM dengan kenaikan debit 0,5 LPM disetiap pengambilan data.



Gambar 2. 7 Grafik ΔC_d terhadap bilangan Re (Kurniawan, 2017)

Grafik hasil percobaan dari Kurniawan menunjukkan penyimpangan antara nilai koefisien discharge dengan bilangan Reynolds. Penyimpangan tertinggi terjadi pada bilangan Reynolds 1400 yaitu sebesar 28,04%, sedangkan penyimpangan terendah terjadi pada bilangan Reynolds 4900 dengan persentase sebesar 1,53%.

Rosadi (2017) melakukan pengujian *orifice plate* sebagai alat ukur debit air. Pengujian yang dilakukan dengan batasan Vaktual maksimal 8 LPM dan nilai rasio β 0,19. Metode yang dilakukan pada pengujian ini yaitu dengan menghitung perbedaan tekanan yang terjadi. Dari hasil data perbedaan tekanan tersebut kemudian diolah untuk memperoleh nilai rata-rata ΔP , *coeffisien discharge*, dan bilangan Reynolds.



Gambar 2. 8 Grafik ΔC_d terhadap bilangan Re (Rosadi, 2018)

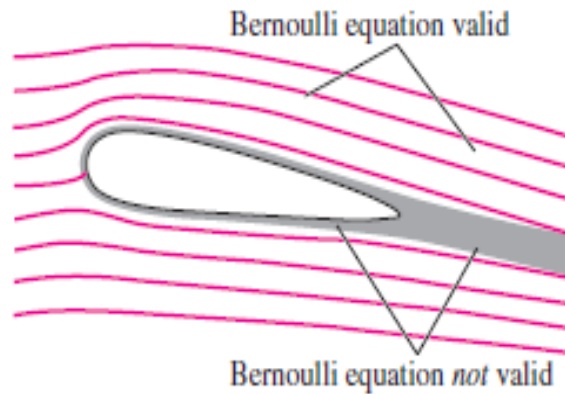
Gambar di atas menunjukkan hubungan antara nilai koefisien dengan bilangan Reynolds. Hasil percobaan Rosadi yang dapat dilihat pada gambar di atas menunjukkan penyimpangan tertinggi terjadi pada bilangan Reynolds 1360, sedangkan penyimpangan terendah terjadi pada bilangan Reynolds 3860 dengan persentase sebesar 0,25%.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian tentang orifice plate meter pada pipa PVC berdiameter $\frac{1}{2}$ inch dan 1 inch dengan rasio beta 0,16 menggunakan alat ukur manometer U belum pernah dilakukan. Maka dari itu penelitian ini dilakukan dengan harapan dapat menambah referensi tentang mekanika fluida khususnya untuk alat ukur debit fluida.

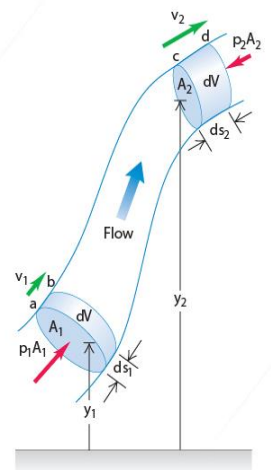
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Persamaan Bernouli

Persamaan Bernouli yaitu hubungan antara tekanan, kecepatan dan elevasi yang berlaku pada suatu aliran fluida dalam kondisi *steady*. Aliran fluida yang tidak mengalami pemampatan dicirikan dengan tidak adanya perubahan densitas dari sepanjang aliran fluida tersebut dan tidak terjadi gesekan seperti yang ditunjukkan pada gambar



Gambar 2. 9 Area persamaan Bernoulli (Cengel, 2006).



Gambar 2. 10 Ilustrasi persamaan Bernoulli (Cengel, 2006).

Fluida dengan massa jenis ρ dialirkan melalui sebuah pipa yang memiliki penampangnya berbeda, gaya F_1 akan menyebabkan tekanan P_1 pada penampang A_1 dan begitu pula yang akan terjadi sebaliknya, gaya F_2 menyebabkan tekanan P_2 pada penampang A_2 . Gaya F_1 memiliki usaha sebesar $W_1 = F_1 \cdot s_1$ dan gaya F_2 melakukan usaha $W_2 = F_2 \cdot s_2$. Tanda minus pada F_2 artinya adalah gaya yang dilakukan ke arah kiri atau berlawanan dengan gaya F_1 . Usaha total dapat ditulis sebagai persamaan berikut.

$$\begin{aligned}
 W_{\text{total}} &= W_1 + W_2 \dots\dots\dots(2.1) \\
 &= F_1 \cdot s_1 + (-F_2 \cdot s_2) \\
 &= P_1 \cdot A_1 \cdot s_1 - P_2 \cdot A_2 \cdot s_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= P_1 \cdot V_1 - P_2 \cdot V_2 \\
 W_{\text{total}} &= (P_1 - P_2) \frac{m}{\rho} \dots\dots\dots(2.2)
 \end{aligned}$$

Besarnya nilai W_{total} ini sesuai dengan perubahan energi mekanik ($E_p + E_k$) yang terjadi saat fluida berpindah dari penampang 1 ke penampang 2.

$$\begin{aligned}
 W_{\text{total}} &= E_m = \Delta E_p + \Delta E_k \\
 &= \left(\frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2\right) + (m g h_2 - m g h_1) \\
 &= \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) + m g (h_2 - h_1) \\
 W_{\text{total}} &= m \left\{ \frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) + g (h_2 - h_1) \right\} \dots\dots\dots(2.3)
 \end{aligned}$$

Apabila persamaan 2.2 dan 2.3 substitusikan maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 (P_1 - P_2) \frac{m}{\rho} &= m \left\{ \frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) + g (h_2 - h_1) \right\} \\
 P_1 - P_2 &= \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (h_2 - h_1) \\
 P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 &= P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \\
 P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h &= \text{konstan} \dots\dots\dots(2.4)
 \end{aligned}$$

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{konstan} \dots\dots\dots(2.5)$$

Penggabungan persamaan diatas dikenal dengan hukum kekekalan energi, dimana $\rho g h$ merupakan energi potensial dari fluida per satuan volume, sedangkan $\frac{1}{2} \rho v^2$ adalah energi kinetik suatu fluida.

2.2.2 Penerapan persamaan bernouli pada orifice plate meter

Penentuan laju aliran masa dilakukan dengan menerapkan persamaan Bernoulli dan persamaan kontinuitas (santosa,2003). Persamaan kontinuitas untuk penampang 1 dan 2 pada orifice seperti pada persamaan. Untuk penampang 1 dan 2 dapat dilihat pada gambar.

$$\dot{m}_{wtr} = \rho_{wtr.1} \cdot A_{1.v_1} = \rho_{wtr.2} \cdot A_{2.v_2} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan :

\dot{m}_{wtr} = laju aliran massa air (kg/s)

$\rho_{wtr.1}$ = massa jenis air pada aliran pipa(kg/m³)

$\rho_{wtr.2}$ = massa jenis air pada aliran *orifice* (kg/m³)

A_1 = luas penampang pipa (m²)

A_2 = luas penampang *orifice* (m²)

v_1 = kecepatan aliran fluida didalam pipa (m/s)

v_2 = kecepatan aliran fluida melewati *orifice* (m/s)

Air yang melewati *orifice* merupakan fluida *incompressible* sehingga persamaan menjadi

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_{wtr} \dots \dots \dots (2.6)$$

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} \cdot v_2 \dots \dots \dots (2.7)$$

Aliran fluida diasumsikan mengalami proses *adiabatic*, tidak mengalami gesekan, aliran tunak, fluida *incompressible*, dan mengabaikan beda potensial, maka digunakan persamaan *bernouli* seperti seperti pada persamaan

$$\frac{P_1}{\rho_{wtr}} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_{wtr}} + \frac{v_2^2}{2} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_{wtr}}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2) \dots \dots \dots (2.9)$$

Dengan :

$P_1 - P_2$ = perbedaan tekanan pada sisi masuk dan keluar *orifice*

ρ_{wtr} = massa jenis air (kg/m³)

Dengan mensubtitusikan persamaan ke persamaan maka diperoleh persamaan baru yang dapat dilihat pada persamaan

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_{wtr} \cdot v_2^2}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (2.10)$$

$$v_2^2 = 2 \cdot (P_1 - P_2) / \rho_{wtr} \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (2.11)$$

$$v_2 = \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}} \cdot \sqrt{P_1 - P_2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \dots \dots \dots (2.12)$$

Persamaan untuk laju aliran volume ideal dapat dilihat pada persamaan

$$v_{ideal} = A_2 \cdot v_2 \dots \dots \dots (2.13)$$

Dari substitusi persamaan dan persamaan, maka persamaan laju aliran volume menjadi

$$v_{ideal} = A_2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}} \cdot \sqrt{P_1 - P_2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \dots \dots \dots (2.14)$$

Maka hubungan antara laju aliran volume ideal dan aktual dapat ditulis menjadi seperti yang tertera pada persamaan

$$\dot{V}_{aktual} = C \cdot \dot{V}_{ideal} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dengan :

$C = \text{coeffisien discharge}$

$\dot{V}_{aktual} = \text{debit dari pembacaan rotameter}$

Persamaan merupakan hasil dari substitusi yang merupakan persamaan untuk hubungan laju aliran volume air aktual

$$\dot{V}_{aktual} = C \cdot A_2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}} \cdot \sqrt{P_1 - P_2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \dots \dots \dots (2.16)$$

Bilangan Reynolds (Re) aliran diperoleh melalui persamaan :

$$Re = \frac{4 \cdot \rho_{wtr} \cdot \dot{V}_{aktual}}{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}} \dots \dots \dots (2.17)$$

Dengan D_1 adalah diameter dari pipa (m)

Untuk menghitung besarnya volume laju aliran dari fluida harus ditentukan koefisien curah (C). persamaan dapat ditulis menjadi

$$\dot{V}_{aktual} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot Re \dots \dots \dots (2.18)$$

Persamaan disubstitusikan ke persamaan menjadi persamaan

$$\frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot Re = C \cdot A_2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}} \cdot \sqrt{P_1 - P_2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \dots \dots \dots (2.19)$$

Sehingga persamaan untuk mencari nilai koefien curah (C) menjadi

$$C = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}{A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}}}} \cdot \frac{Re}{\sqrt{P_1 - P_2}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} \Bigg/ A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}}} \dots \dots \dots (2.20)$$

Untuk menghitung perbedaan tekana yang terjadi pada sisi masuk dan sisi keluar *orifice* menggunakan manometer nilai ΔP diperoleh dari selisih antara P_1 dan P_2 yang terbaca.

2.2.3 Rugi – rugi aliran

Dalam sebuah instalasi perpipaan tidak luput dari adanya rugi – rugi aliran yang disebabkan oleh berbagai faktor. Pada umumnya rugi – rugi disebabkan karena adanya fitting, katup, kekasaran dinding pipa, yang terdapat pada sepanjang instalasi pipa. Rugi – rugi aliran yaitu menurunnya kecepatan, massa, volume fluida yang mengalir pada sebuah instalasi pipa. Rugi – rugi aliran dibagi menjadi 2 jenis, yaitu:

a. Rugi gesek mayor (*major head losses*)

Mayor losses yaitu rugi – rugi aliran yang disebabkan karena adanya gesekan antara fluida dengan dinding pipa. Besar kecilnya gesekan yang terjadi dipengaruhi oleh nilai dari kekasaran dan panjang pipa.

Besarnya rugi – rugi mayor dapat dapat diketahui dengan menggunakan persamaan *Darcy-Weisbach*. Persamaan tersebut berlaku pada suatu aliran pipa tunak, dengan fluida incompressible dan berkembang penuh. Pengaplikasiannya pada suatu pipa horizontal atau berada pada posisi miring. Berikut ini dapat dilihat persaaan *Darcy weisbach* :

$$hl = f \frac{L v^2}{D 2g} \dots\dots\dots(2.21)$$

hl = kerugian gesek dalam pipa (m)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

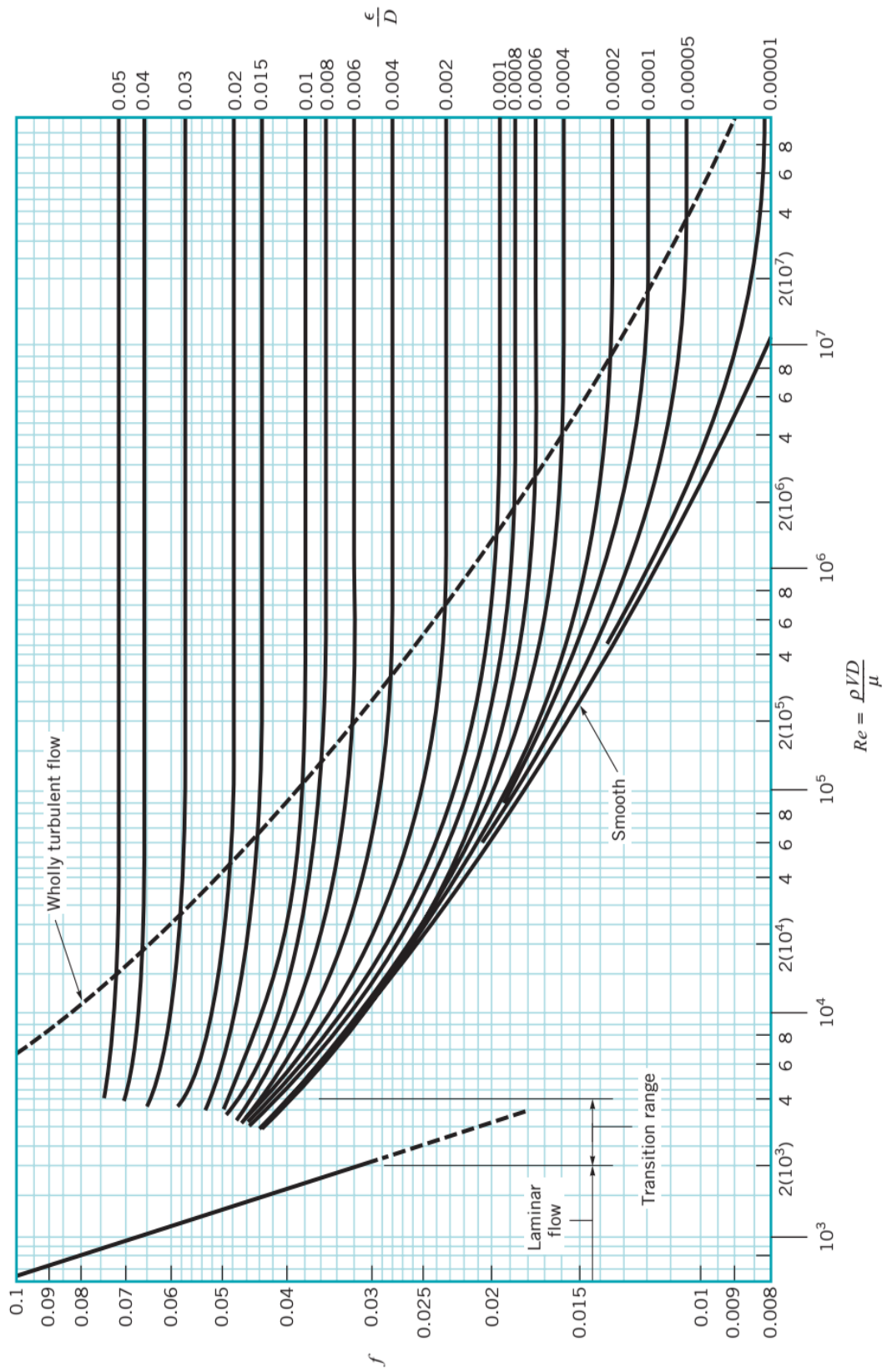
f = koefisien gesek

g = percepatan gravitasi (m²/s)

L = panjang pipa (m)

D = diameter dalam pipa (m)

Nilai dari f dapat diperoleh dengan membaca pada diagram Moody dan diagram kekasaran relatif.



Gambar 2. 11 Diagram Moody (Munson, 2009).

Tabel 2. 1 Nilai kekasaran

Pipe	Equivalent Roughness, ϵ	
	Feet	Millimeters
Riveted steel	0.003–0.03	0.9–9.0
Concrete	0.001–0.01	0.3–3.0
Wood stave	0.0006–0.003	0.18–0.9
Cast iron	0.00085	0.26
Galvanized iron	0.0005	0.15
Commercial steel or wrought iron	0.00015	0.045
Drawn tubing	0.000005	0.0015
Plastic, glass	0.0 (smooth)	0.0 (smooth)

b. Rugi minor (minor head losses)

Kerugian minor yaitu rugi aliran yang diakibatkan karena adanya komponen pendukung pada suatu instalasi perpipaan. Komponen yang mengakibatkan kerugian minor diantaranya yaitu katup, sambungan, belokan, alat ukur, dan alat pendukung lain. Nilai dari kerugian minor dapat diperoleh melalui persamaan

$$h_l = K \frac{v^2}{2g} \dots \dots \dots (2.22)$$

h_l = kerugian gesek dalam pipa (m)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

K = koefisien tahanan

g = percepatan gravitasi (m^2/s)

2.2.4 Rejim aliran

Rejim aliran diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu aliran laminar, turbulen, dan transisi. Ketiga jenis aliran tersebut diperoleh dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Osborn Reynold pada tahun 1883 yang menklasifikasikan aliran menjadi tiga jenis. Apabila suatu fluida mengalir melewati sebuah pipa berdiameter

(D) dengan kecepatan rata-rata (v), maka akan diperoleh bilangan Reynold dimana nilai dari bilangan ini tergantung pada kecepatan aliran fluida, kerapatan, viskositas dan diameter dari pipa.

Pada suatu aliran fluida “laju aliran yang cukup rendah” guratan zat pewarna (sebuah garis guratan) akan tetap berupa garis yang terlihat saat mengalir, hanya sedikit yang kabur karena difusi molekuler dari zat pewarna terhadap air disekelilingnya. Untuk “laju aliran sedang” guratan zat pewarna akan berfluktuasi mengikuti waktu dan ruang dan olakan putus-putus dengan perilaku yang tak beraturan yang muncul disepanjang aliran. Sedangkan muntuk “laju aliran tinggi” guratan zat pewarna akan langsung menjadi kabur dan menyebar dengan pola aliran yang acak. Ketiga karakteristik tersebut yang disebut dengan aliran laminar, transisi, dan turbulen yang dapat dilihat pada gambar2....

Untuk parameter aliran pipa tak berdimensi yang terpenting yaitu bilangan Reynolds. Re perbandingan dari efek inersia dengan viskos dalam aliran. Bilangan Reynolds dinyatakan dalam persamaan

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \dots\dots\dots(2.23)$$

Degan :

Re = bilangan Reynolds

ρ = massa jenis (kg/m^3)

μ = viskositas dinamik (N.s/m^2)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

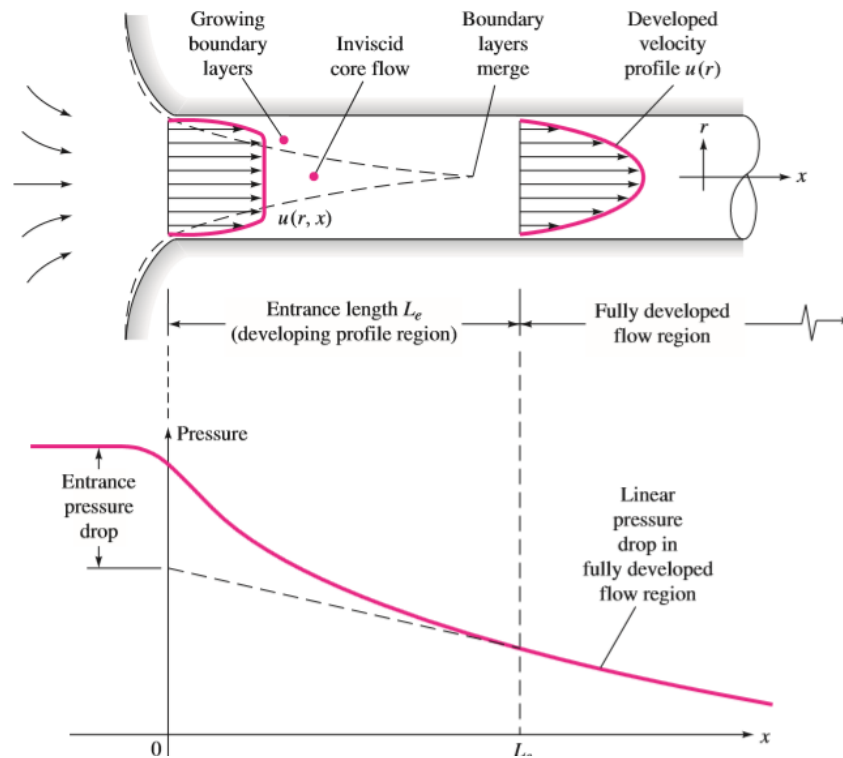
d = diameter dalam pipa (m)

Klasifikasi ketiga jenis aliran yaitu :

1. jika Reynolds *number* < 2100 maka aliran tersebut diklasifikasikan sebagai aliran *laminar*.
2. jika Reynolds *number* $2100 \geq Re \leq 4000$ maka aliran tersebut diklasifikasikan sebagai aliran transisi.

3. jika Reynolds *number* > 4000 maka aliran tersebut diklasifikasikan sebagai aliran *turbulent* .

2.2.5 Aliran fully developed



Gambar 2. 12 profil kecepatan berkembang penuh dan perubahan tekanan

Aliran *fully develop* yaitu kondisi dimana suatu aliran fluida sudah berkembang penuh pipa dengan kecepatan yang tetap, dan tidak mengalami perubahan karena jarak. Jika dilakukan pengukuran kecepatan pada titik L1 maka akan diperoleh kecepatan sebesar V dan tidak mengalami perubahan jika dilakukan pengukuran pada titik L2 kecepatan yang diperoleh tetap V. sedangkan pada aliran yang belum berkembang penuh akan terjadi perubahan kecepatan (white, 1998).

Persamaan *fully developed* pada suatu aliran laminar

$$\frac{l_i}{D} = 0,006 \cdot \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \dots\dots\dots(2.24)$$

$$\frac{l_i}{D} = 0,006 \cdot Re \dots\dots\dots(2.25)$$

Sedangkan persamaan *fully developed* untuk aliran turbulen yaitu :

$$\frac{l_l}{D} = 4,4 \cdot \left(\frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}\right)^{1/6} \dots\dots\dots(2.26)$$

$$\frac{l_l}{D} = 4,4 \cdot Re^{1/6} \dots\dots\dots(2.27)$$

Dengan : l_l : panjang

D: diameter pipa

Re: bilangan Reynolds

2.2.6 Pengukuran laju aliran

Pengukuran laju aliran merupakan salah satu jyang terpenting dalam proses *flow control*. Pengukuran dilakukan dengan tuujuan untuk mengetahui kapasitas aliran, laju aliran, masa dan laju aliran volume. Pengukuran laju aliran dapat diketahui dari kecepatan fluida yang melewati luas penampang atau perubahan energi kinetiknya. Kecepatan fluida yang mengalir didalan pipa sangat dipengaruhi oleh perbedaan tekanan dan geskan fluida terhadap pipa. Faktor lain yang mempengaruhi gesekan yang terjadi didalam pipa adalah kekentalan dan masa jenis fluida itu sendiri. Pemilihan alat ukur aliran tergantung pada ketelitian, kemampuan pengukuran, kemudahan pembacaan, harga, efisien dan keawetan dari alat ukur tersebut (Holman, 2001).

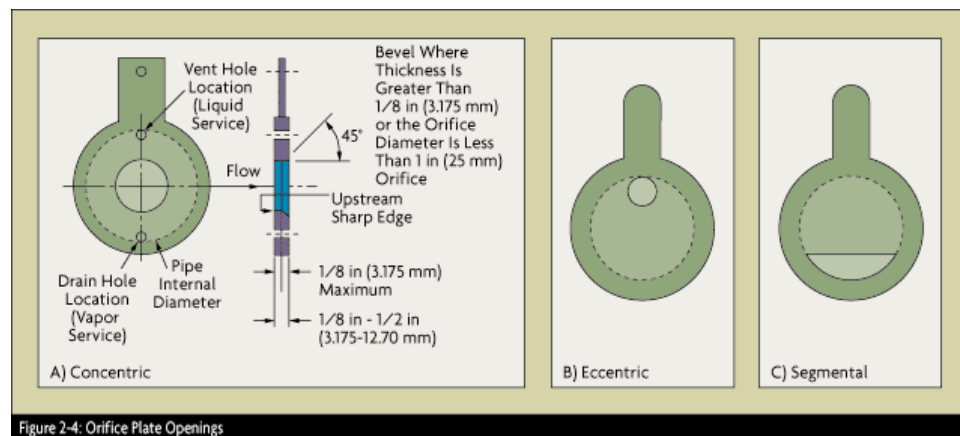
Ada beberapa metode pengukuran laju aliran fluida antara lain :

- a. Metode *positive-displacement*.
- b. Metode *flow-obstruction*.
- c. Mengukur laju aliran berdasarkan *drag effects*.
- d. *Hot-wire and hot- film anemometer*.
- e. *Magnetic flowmeters*.
- f. Metode *flow-visualization*.

2.2.7 Orifice plate meter

Orifice plate meter merupakan salah satu alat ukur laju aliran fluida didalam sebuah system perpipaan tertutup, komponen ini bekerja berdasarkan metode *flow-obstruction*. Terdapat tiga jenis alat yang menggunakan metode flow obstruction diantaranya yaitu *orifice plate meter*, *flow nozzle*, dan *venture meter*. Perubahan

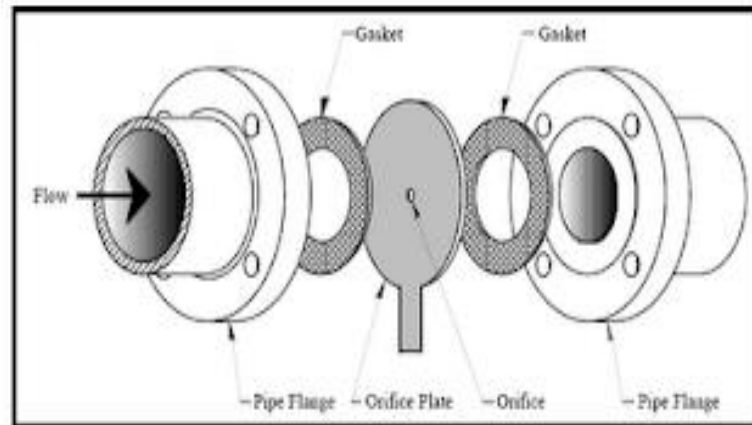
kecepatan fluida yang melewati plat orifice berhubungan dengan terjadinya perubahan tekanan (*differential pressure*). Perubahan tekanan yang terjadi kemudian dilakukan pengukuran dan diasosiasikan kedalam laju aliran. Pengukuran aliran yang melewati orifice pada umumnya yang diukur yaitu perbedaan tekanan yang terjadi (Holman, 2012).



Gambar 2. 13 orifice plate meter (Holman, 2012).

Dari ketiga jenis orifice seperti yang tertera pada gambar yang umum digunakan yaitu orifice dengan lubang *concentric*. *Orifice* tipe ini dibuat dengan sangat presisi dengan posisi lubang berda tepat ditengah, selain itu juga dibuat bevel pada sisi *downstream* dengan kemiringan 45° . Hal tersebut bertujuan untuk mengurangi jarak tempuh dari aliran yang mengalami perbedaan tekanan melintang. Penurunan tekanan terjadi setelah aliran melewati orifice kemudian akan kembali ketekanan semula tetapi dengan sedikit kehilangan tekanan yang permanen (*permanent pressure loss*), sehingga perbedaan yang terjadi di sisi upstream dan downstream tidak terlalu besar. Rasio perbandingan dari diameter orifice dan diameter pipa dilambangkan dengan β . Prinsip kerja orifice pada prinsipnya aliran lairan fluida didalam pipa akan dipaksa melewati orifice, hal tersebut yang akan menimbulkan perbedaan tekanan dan perubahan kecepatan. Titik dimana terjadinya kecepatan maksimal dan minimal disebut dengan vena contracta, setelah melewati vena contracta kecepatan dan tekanan fluida akan mengalami perubahan kembali. Dengan diketahuinya perbedaan yang terjadi pada aliran dalam pipa normal dan tekanan yang berda pada posisi vena contracta, laju aliran volume, dan laju aliran

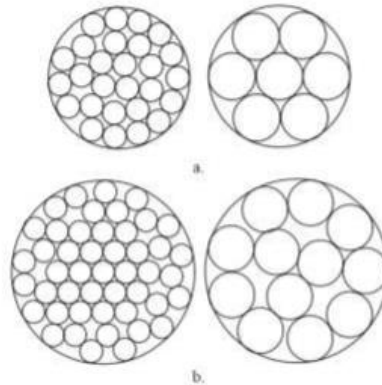
masa maka dapat diperoleh dengan persamaan Bernoulli. Konstruksi dari orifice dapat dilihat pada gambar



Gambar 2. 14 komponen *orifice* (Edoy, 2015).

2.2.8 Penyearah aliran (tube bundle)

Penyearah aliran yaitu sebuah komponen yang berfungsi sebagai *flow conditioner* untuk mengubah aliran turbulen yang diakibatkan karena pembelokan, katup, perubahan luas penampang pada sebuah saluran menjadi aliran yang laminar. Penyearah aliran tersusun dari pipa-pipa kecil yang disusun menyerupai sarang lebah. Susunan dari penyearah aliran akan bekerja untuk menyetabilkan aliran fluida yang semula turbulen menjadi laminar, serta akan menaikkan tekanan yang hilang akibat pembelokan. Penyearah aliran akan berfungsi dengan baik jika dipasang pada suatu aliran yang turbulen, namun sebaliknya jika dipasang pada suatu aliran yang laminar maka akan berpengaruh buruk (widodo, 2016). Visualisasi dari susunan penyerah aliran dapat dilihat pada gambar



Gambar 2. 15 Penampang penyearah aliran / *tube bundle* (Widodo,2016).

2.2.9 Pressure tappings

Menurut (Chugh, 2015) *Pressure taps* (lubang tekanan) pada *orifice plate meter* diklasifikasikan berdasarkan lokasinya. Berikut ini adalah jenis-jenis *pressure taps*.

1. *Corner Taps*

Tap ini terletak di hulu dan hilir flange persis di permukaan plat *orifice*. Tap jenis ini rentan terkena penyumbatan yang disebabkan oleh kotoran.

2. *Radius Taps*

Pressure taps pada jenis ini terletak 1D diameter pipa pada sisi *upstream* dan 1/2D pada sisi *downstream*. Tap jenis ini memiliki kelebihan pada keakuratan pengukuran karena sisi hilir terletak pada rata-rata *vena contracta*.

3. *Pipe Taps*

Pada jenis ini lubang *pressure taps* terletak pada 2,5D sisi *upstream* dan 8D sisi *downstream*. Kedua tap dilokasikan pada daerah aliran *fully developed*.

4. *Flange Taps*

Lubang *pressure taps* jenis ini terletak 1 inch pada sisi *upstream* dan 1 inch pada sisi *downstream*. Tap jenis ini tidak direkomendasikan untuk ukuran pipa dibawah 2 inch karena tap sisi hilir terletak pada daerah tekanan yang tidak stabil.

5. *Vena Contracta Taps*

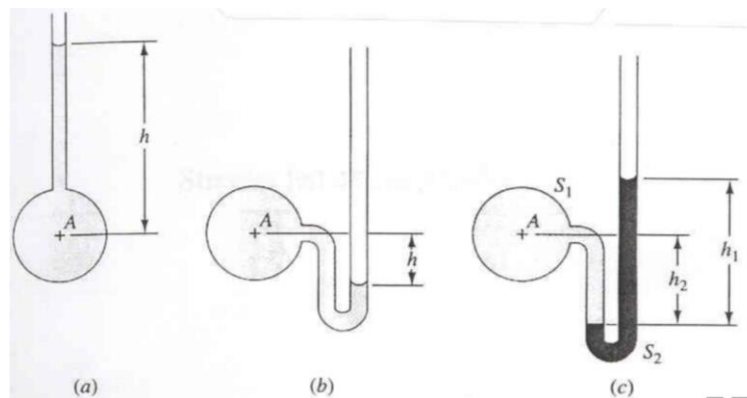
Tap jenis ini terletak $\frac{1}{2} - 2 D$ pada sisi *upstream* dan pada sisi *downstream* terletak pada daerah yang memiliki tekanan paling rendah (*vena contracta*). Secara teori tap jenis ini paling akurat untuk pengukuran tekanan, akan tetapi posisi *vena contracta* akan selalu berubah dengan perubahan laju aliran.

2.2.10 Pengukuran perbedaan tekanan

Perbedaan tekanan yang terjadi pada plat *orifice*, nosel, venture, dan tabung pitot dapat diukur dengan manometer. Manometer merupakan alat ukur perbedaan tekanan antara suatu titik dengan tekanan atmosfer lokal dengan mengukur selisih tinggi kolom cairan.

a. Manometer standar

Manometer yang paling sederhana yaitu *type peizometer*. Manometer tipe ini hanya mampu mengukur tekanan atmosfer lokal, dan tidak dapat digunakan untuk mengukur tekanan negatif. Hal tersebut dikarenakan udara akan mengalir masuk kedalam container melalui tabung. Manometer ini kurang praktis karena untuk mengukur tekanan yang besar dibutuhkan tabung vertical yang tinggi.



Gambar 2. 16 Manometer standar (Sudarja, 2016).

Jika S merupakan gravitasi jenis cairan, maka tekanan pada titik A yaitu :

$$p_A = \gamma h = \gamma_{air} \cdot Sh \dots \dots \dots (2.28)$$

Untuk mengukur tekanan positif dan negative yang kecil digunakan manometer seperti gambar 2. ,karena posisi meniscus mungkin berada dibawah A. hal tersebut dikarenakan tekanan meniscus sama dengan nol gage,

$$p_A + \gamma h = P_{atm} \dots \dots \dots (2.29)$$

$$p_A = -\gamma h(\text{gage}) \rightarrow \frac{p_A}{\gamma h} = -Sh \dots \dots \dots (2.30)$$

Untuk mengukur tekanan positif dan negatif yang besar digunakan manometer seperti contoh pada gambar, yang menggunakan fluida dengan gravitasi jenisnya lebih besar (Sudarja, 2016).

$$p_A + \gamma_1 h_2 - \gamma_2 h_1 = P_{atm} \dots \dots \dots (2.31)$$

$$p_A = P_{atm} + \gamma_2 h_1 - \gamma_1 h_2 \quad (\text{abs}) \dots \dots \dots (2.32)$$

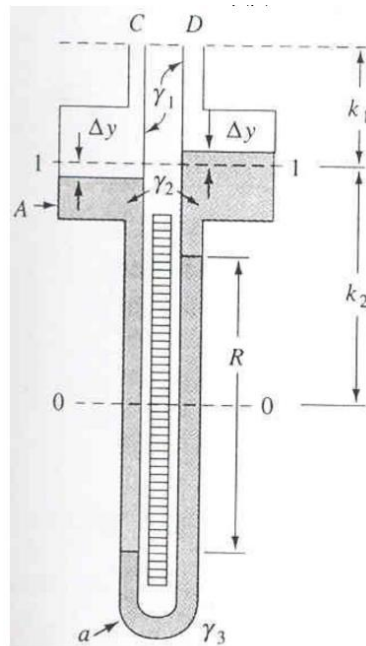
$$\frac{p_A}{\gamma_{air}} = S_2 h_1 - S_1 h_2 \quad (\text{gage}) \dots \dots \dots (2.33)$$

Jika fluida di penampang A adalah gas, $h_2 s_1 \ll h_1 s_2$ maka persamaannya menjadi :

$$\frac{p_A}{\gamma_{air}} = S_2 h_1 \quad (\text{gage}) \dots \dots \dots (2.34)$$

b. Manometer mikro

Manometer mikro merupakan alat ukur perbedaan tekanan yang memiliki ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan dengan manometer yang lain (sudarja, 2016).



Gambar 2. 17 Manometer mikro (Sudarja, 2016).

1-1 : level fluida ketika berada pada kondisi normal

0-0 : level fluida tabung U (s_3) sebelum terhubung pada titik yang akan diukur

A : luas penampang reservoir

a : luas penampang tabung U

Bila titik C'' dan D'' dihubungkan ke titik yang akan diukur, maka:

Cairan S_2 akan mengalami penurunan sejauh Δy pada sisi kiri dan kenaikan setinggi Δy pada sisi kanan. Sedangkan pada cairan S_3 akan mengalami penurunan sejauh $\frac{1}{2} R$ di sisi kiri dan mengalami kenaikan setinggi $\frac{1}{2} R$ di sisi kanan.

$$\Delta y \cdot A = \frac{R}{2} a \rightarrow \Delta y = \frac{Ra}{2A} \dots\dots\dots(2.43)$$

Persamaan untuk manometer, didasarkan pada titik C

$$p_C + (k_1 + \Delta y) \gamma_1 + (k_2 - \Delta y + \frac{R}{2}) \gamma_2 - R\gamma_3 - (k_2 - \frac{R}{2} + \Delta y) \gamma_2 - (k_1 + \Delta y) \gamma_1 = p_D \dots\dots\dots(2.44)$$

$$p_C - p_D = -2 \Delta y \gamma_1 + 2 \Delta y \gamma_2 - R \gamma_2 + R\gamma_3 \dots\dots\dots(2.45)$$

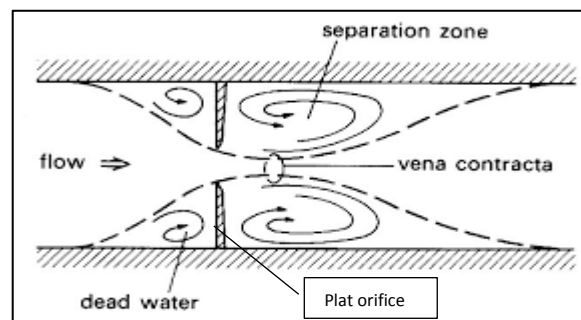
$$p_C - p_D = R(\gamma_3 - \gamma_2(1 - \frac{a}{A}) - \gamma_1 \frac{a}{A}) \dots\dots\dots(2.46)$$

parameter yang berada didalam kurung bernilai konstanata maka perbedaan tekanan pproporsional terhadap R

$$p_C - p_D = (K)R \dots\dots\dots(2.47)$$

2.2.11 Vena contracta

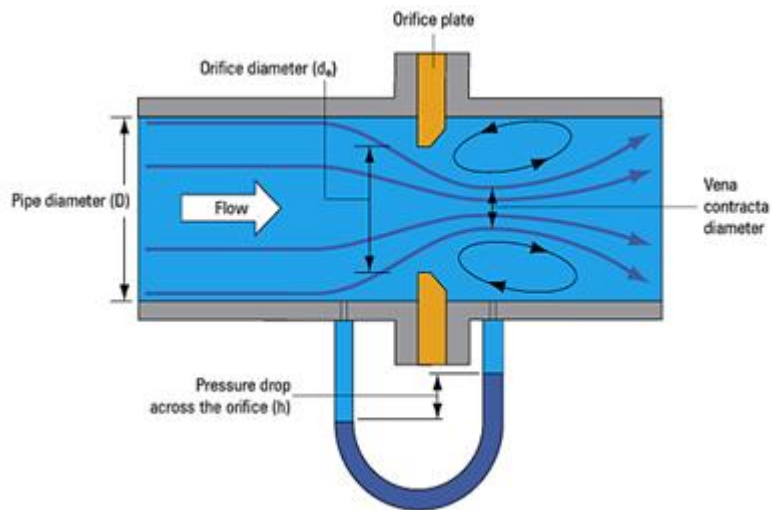
Vena contracta merupakan titik didalam aliran fluida dimana diameter aliran fluida paling kecil dan kecepatan aliran fluida maksimum, seperti dalam kasus nozzle atau orifice (Evangilesta Torricelli, 1643). *Vena contracta* terjadi pada bagian *downstream* atau setelah melewati plat orifice.



Gambar 2. 18 Ilustrasi *vena contracta* (J.P. Holman, 2012)

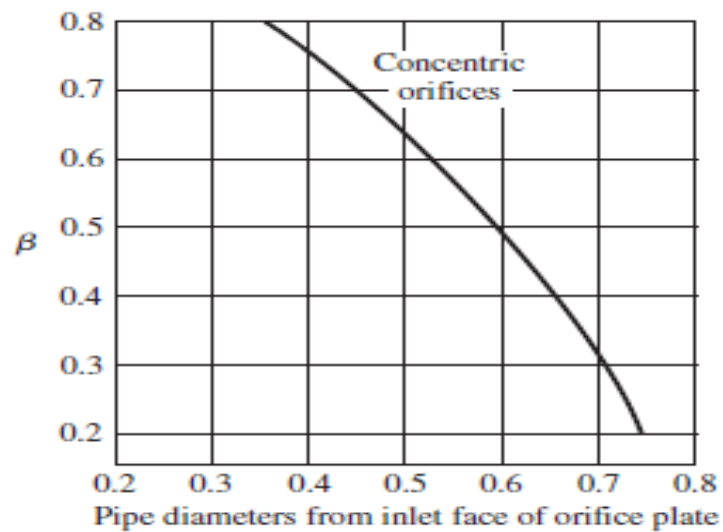
Peletakan lubang tekanan (*pressure taps*) pada *concentric orifice*, dengan *thin plate orifice* yang direkomendasikan oleh J.P. Holman dalam bukunya *Experimental Methods for Engineers* ada tiga standar yang digunakan, yaitu:

1. *Pressure taps* diletakkan pada *flange*
2. *Pressure taps* pada sisi *upstream* diletakkan satu kali diameter dalam pipa, sedangkan *pressure taps* pada sisi *downstream* diletakkan pada setengah diameter dalam pipa yang diukur dari permukaan *inlet* plat orifice.



Gambar 2. 19 Pressure taps (Putra, 2013).

3. *Pressure taps* sisi *upstream* diletakkan satu kali diameter dalam pipa, sedangkan pada sisi *downstream* diletakkan pada *vena contracta* yang dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.20 Lokasi dari *pressure taps* orifice dengan *vena contracta taps* (J.P. Holman, 2012)