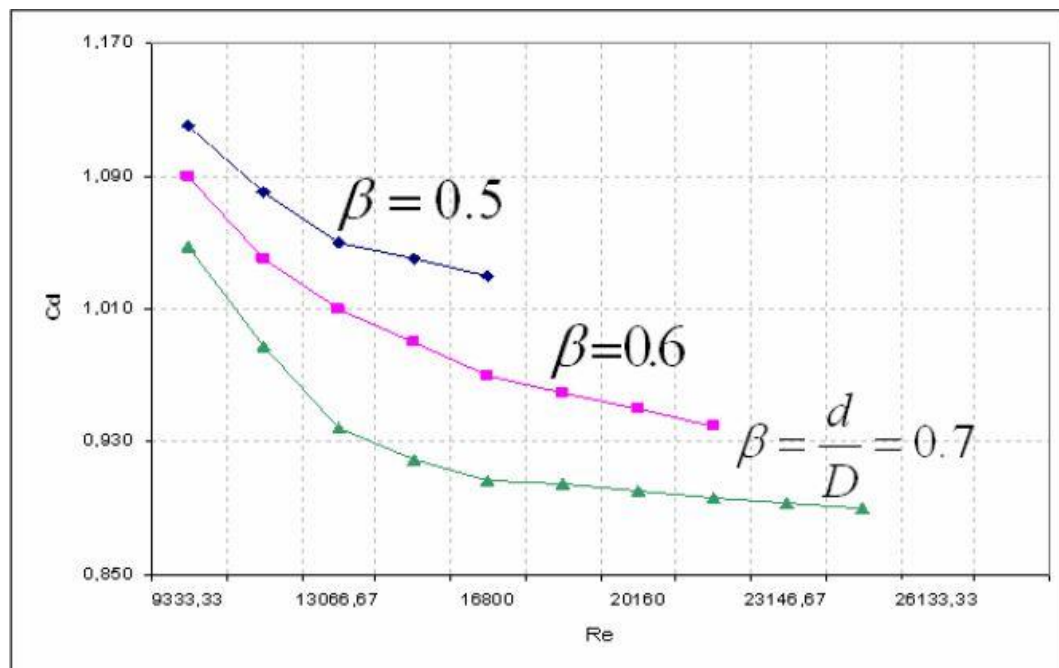


BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

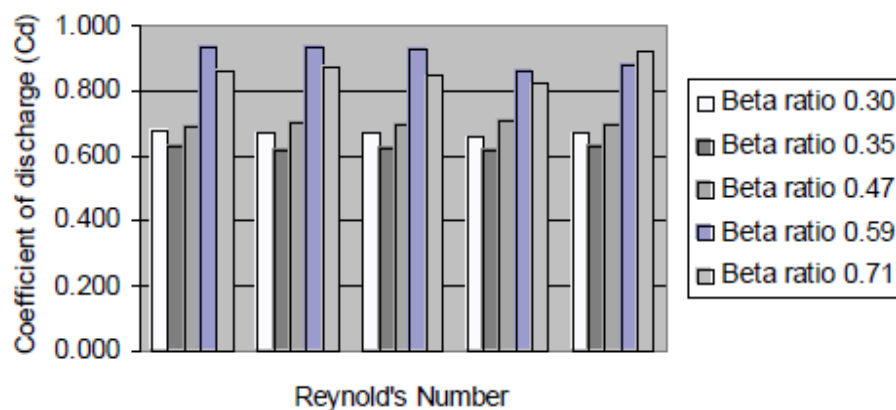
Septiadi (2008) melakukan pengujian *orifice flow meter* dengan variasi tebal plat 20 mm serta variasi rasio beta 0,5; 0,6; dan 0,7. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai koefisien curah dari ketiga variasi rasio beta mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya nilai angka Reynolds. Nilai *coefficient of discharge* tertinggi terjadi pada rasio beta 0,5 dengan kisaran nilai 1,01 sampai 1,17, diikuti dengan rasio beta 0,6 dengan kisaran nilai *coefficient of discharge* 0,93 sampai 1,09, kemudian 0,7 memiliki nilai *coefficient of discharge* 0,85 sampai kurang dari 1,09 yang disajikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Hasil *orifice flow meter* tebal plat 20 mm (Septiadi, 2008)

Rahman dkk (2009) melakukan penelitian mengenai efek rasio beta dan angka Reynolds terhadap *coefficient of discharge* pada *orifice plate meter*. Plat *orifice* yang digunakan sebanyak 5 buah berbahan besi cor dengan tebal plat 6 mm dan rasio beta 0,30; 0,35; 0,47; 0,59; dan 0,71. Metode pengukuran beda tekanan menggunakan alat ukur manometer U, sisi *upstream* dipasang pada jarak 10 cm dari

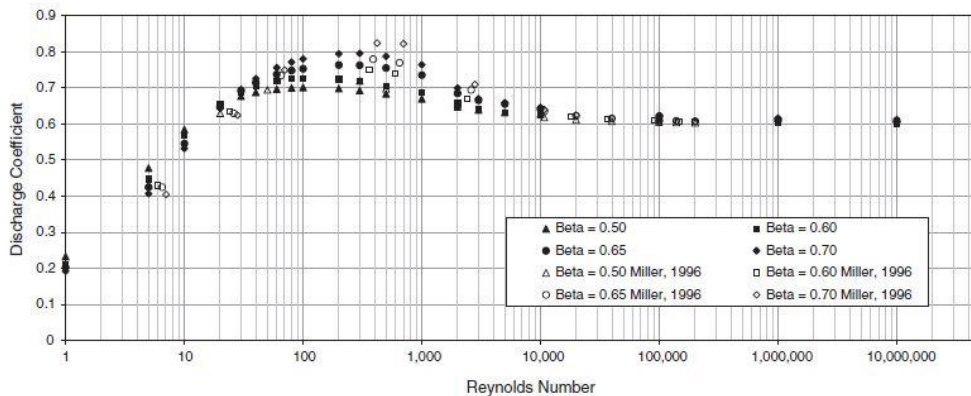
orifice dan sisi *downstream* dipasang pada jarak 8 cm dari *orifice*. Hasil penelitian disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara angka Reynolds dan *coefficient of discharge* yang ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Hubungan antara angka Reynolds dan Cd (Rahman dkk, 2009)

Berdasarkan Gambar 2.2 dapat dilihat bahwa plat *orifice* dengan rasio beta 0,3; 0,35; dan 0,47 memiliki nilai *coefficient of discharge* berkisar antara 0,6 dan 0,8, sedangkan untuk plat *orifice* dengan rasio beta 0,56 dan 0,71 memiliki nilai *coefficient of discharge* berkisar antara 0,8 dan 1. Angka ini konstan baik pada angka Reynolds rendah maupun tinggi.

Hollingshead dkk (2011) melakukan pengujian prestasi kerja koefisien curah (*coefficient of discharge*) pada venturi, plat *orifice* konsentrik, *v-cone*, dan *wedge flow meter* pada angka Reynolds rendah. Pada plat *orifice* diberlakukan nilai rasio beta (β) yaitu 0,5; 0,6; 0,65; dan 0,7 serta nilai diameter dalam pipa berkisar antara 15,47 sampai 20,27 cm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada tiga alat ukur mengalami peningkatan nilai *coefficient of discharge* pada kisaran angka Reynolds 1 sampai 100 kemudian cenderung konstan. Namun, plat *orifice* meter memiliki *trend* nilai *coefficient of discharge* yang berbeda dari dari alat ukur yang lainnya. Nilai *coefficient of discharge* plat *orifice* meter dikisaran angka Reynolds 100 sampai 10000 mengalami peningkatan maksimum pada angka Reynolds 300 lalu menurun perlahan hingga angka Reynolds 10000 yang kemudian cenderung konstan seperti pada Gambar 2.3.

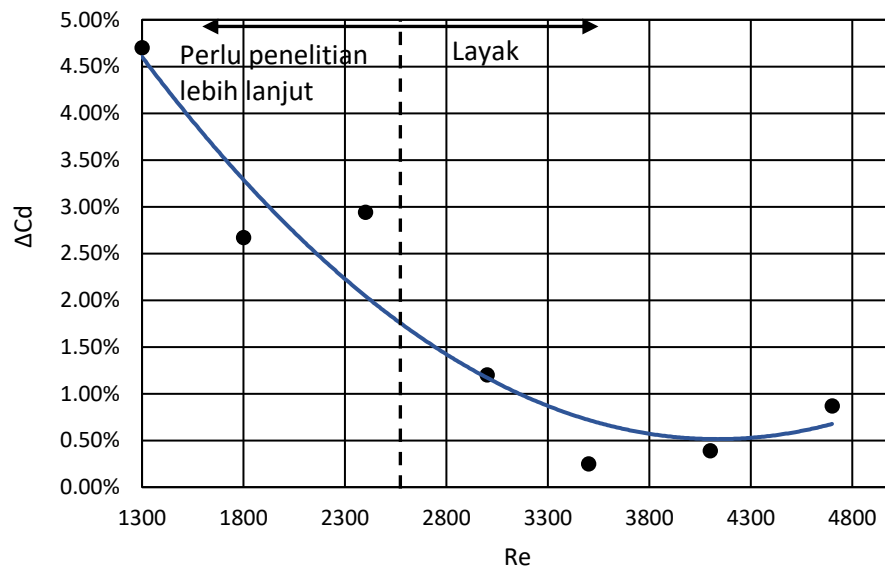


Gambar 2. 3 Hasil pengujian *orifice plate meter* (Hollingshead dkk, 2011)

Gambar 2.3 menunjukkan grafik nilai *coefficient of discharge* terhadap angka Reynolds pada *orifice plate meter*, tren *coefficient of discharge* pada angka Reynolds 1 menunjukkan nilai dengan kisaran 0,2 sampai 0,25 lalu naik hingga angka Reynolds 100 dengan nilai *coefficient of discharge* berkisar antara 0,7 dan 0,8. Hal ini berlaku pada ke empat variasi nilai rasio beta pada plat *orifice*.

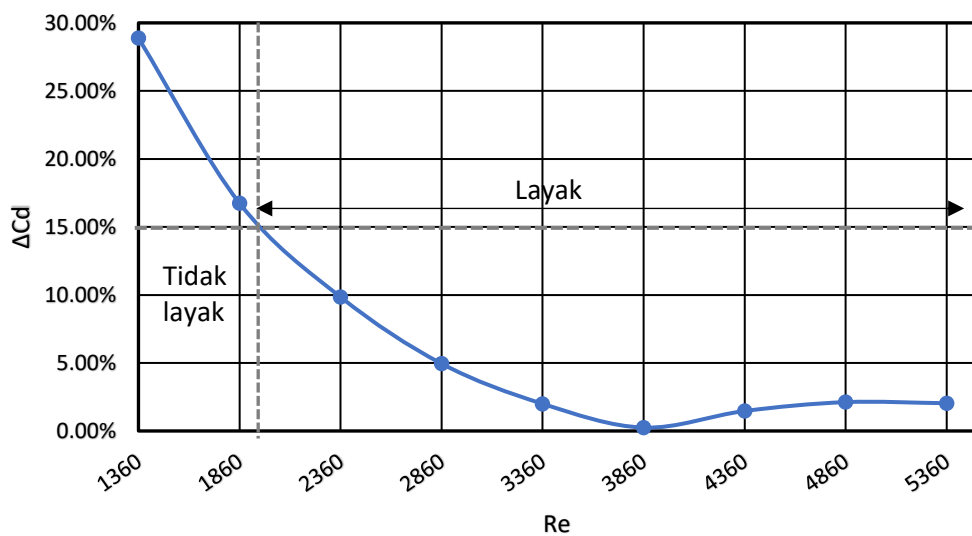
Saputra (2017) melakukan pengujian *orifice* sebagai alat ukur laju aliran fluida pada pipa PVC ukuran $\frac{1}{2}$ inch dan $\frac{3}{4}$ inch dengan rasio beta 0,16. Variasi aliran fluida yang digunakan 1 hingga 6 LPM dengan pencatatan data pada setiap kenaikan 0,5 LPM. Hasil pengujian yang dilakukan akan menampilkan grafik hubungan antara angka Reynolds dan delta *coefficient of discharge* (ΔC_d) yang dapat dilihat pada Gambar 2.4.

Gambar 2.4 juga menunjukkan bahwa nilai delta *coefficient of discharge* menurun seiring dengan meningkatnya angka Reynolds hingga angka tertentu kemudian berfluktuasi secara stabil. Nilai penyimpangan *coefficient of discharge* tertinggi yaitu pada angka Reynolds 1300 sebesar 4,7% dan nilai penyimpangan terendah sebesar 0,25% pada angka Reynolds 3500. Dari grafik diatas menunjukkan batas layak penggunaan plat *orifice* dengan rasio beta 0,16 yaitu pada Angka Reynolds ≥ 2500 .



Gambar 2. 4 Hubungan antara Re dan ΔC_d (Saputra, 2017)

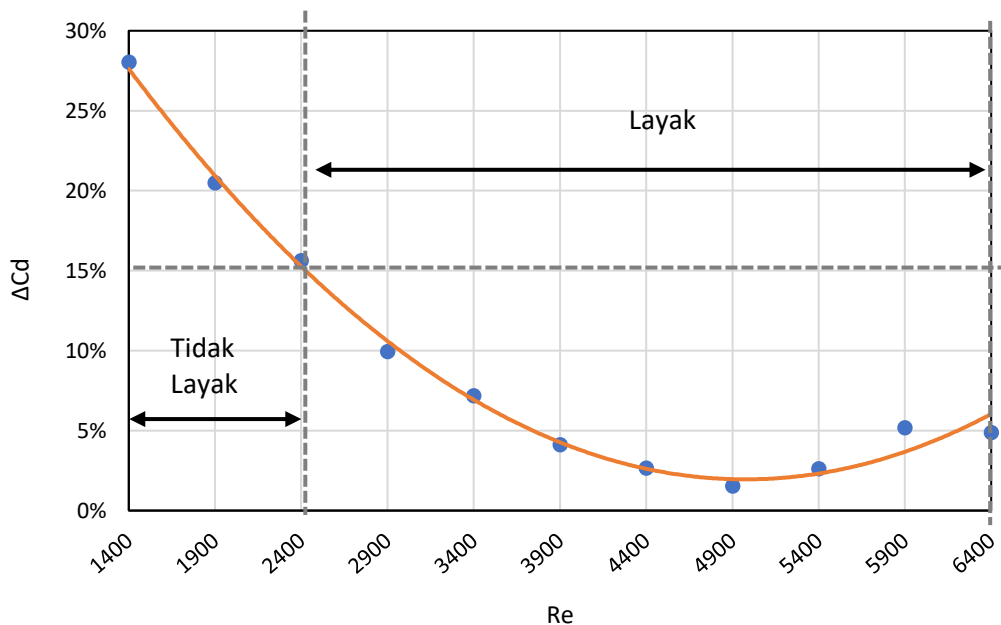
Rosadi (2017) melakukan pengujian *orifice* sebagai alat ukur laju aliran fluida pada pipa PVC ukuran $\frac{1}{2}$ inch dan $\frac{3}{4}$ inch dengan rasio beta 0,19. Variasi debit aliran fluida pada 1 hingga 8 LPM yang pencatatannya dilakukan pada setiap kenaikan 0,5 LPM. Hasil pengujian yang dilakukan akan menampilkan grafik hubungan antara angka Reynolds dan delta *coefficient of discharge* (ΔC_d) yang dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Hubungan antara Re dan ΔC_d terhadap (Rosadi, 2017)

Pada Gambar 2.5, grafik hasil pengujian menunjukkan menunjukkan nilai penyimpangan *coefficient of discharge* tertinggi terjadi pada angka Reynolds 1360, sedangkan nilai penyimpangan terendah terjadi pada angka Reynolds 3860 dan dengan asumsi batas 15%, pengujian pada plat *orifice* dengan rasio beta 0,19 layak untuk digunakan untuk pipa PVC dengan rentang angka Reynolds ≥ 1900 .

Penelitian tentang *orifice plate meter* juga dilakukan oleh Kurniawan (2017) dengan debit fluida 11 LPM menggunakan media pipa PVC berukuran $\frac{1}{2}$ dan $\frac{3}{4}$ inch sebagai penyalurnya. Plat *orifice* yang digunakan berbahan akrilik dengan tebal 3 mm serta memiliki rasio beta 0,24. Pada penelitian ini dihitung nilai beda tekanan sisi masuk dan keluar plat *orifice* menggunakan rumus Bernoulli yang dimodifikasi yang kemudian dibandingkan dengan debit aktual yang terbaca pada rotameter. Pada pengujian ini didapatkan grafik hubungan antara angka Reynolds dan nilai penyimpangan *coefficient of discharge* yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.

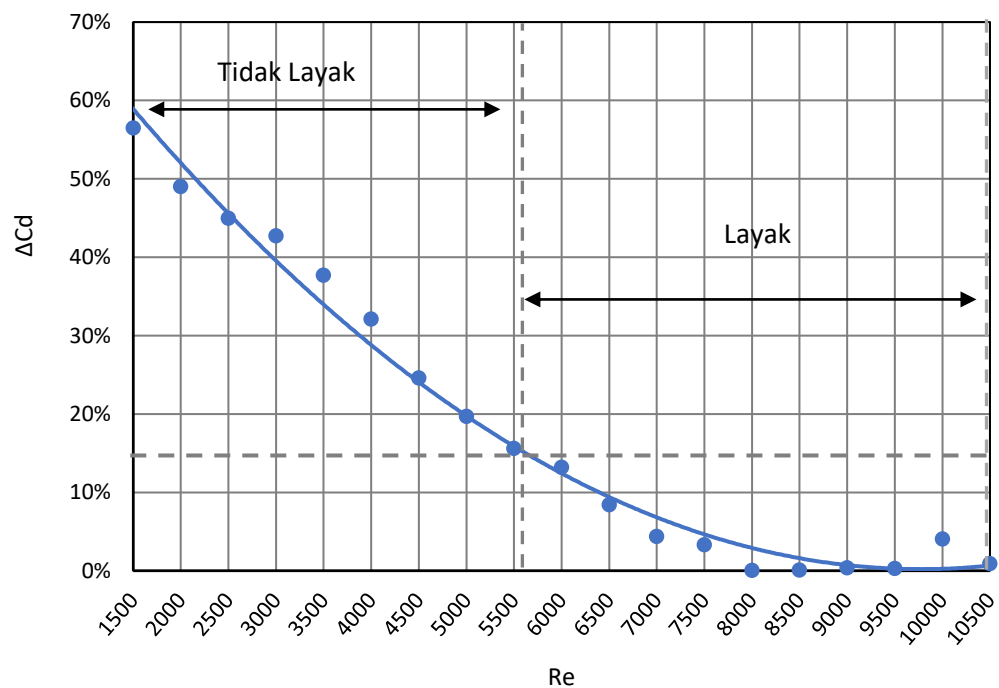


Gambar 2. 6 Hubungan antara Re dan ΔC_d (Kurniawan, 2017)

Grafik pada Gambar 2.6 menunjukkan hubungan antara angka Reynolds dan nilai penyimpangan *coefficient of discharge*. Dari Gambar 2.7 dapat diketahui

bahwa nilai penyimpangan *coefficient of discharge* tertinggi pada angka Reynolds 1400 yaitu sebesar 28,04%, sedangkan terendah yaitu sebesar 1,53% pada angka Reynolds 4900.

Pratama (2017) melakukan penelitian tentang *orifice plate meter* dengan rasio beta 0,4 dan variasi debit 11 LPM dengan kenaikan 0,5 LPM. Media penyalur fluida yang digunakan yaitu pipa PVC merk Wavin berdiameter 0,5 inch dan 0,75 inch. Pada penelitian ini, plat *orifice* berbahan akrilik dengan tebal 3 mm. Metode yang dilakukan pada penelitian ini yaitu dengan menghitung nilai beda tekanan fluida sebelum dan sesudah melewati *flange*. Grafik hubungan antara angka Reynolds dan nilai penyimpangan *coefficient of discharge* dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Hubungan antara Re dan ΔC_d (Pratama, 2017)

Gambar 2.7 dapat diketahui bahwa nilai deviasi *coefficient of discharge* tertinggi yaitu 56,5% pada angka Reynolds 1500. Nilai deviasi tersebut mengalami penurunan yang sedikit berfluktuasi namun cenderung stabil sampai pada angka Reynolds 8000, kemudian konstan sampai angka Reynolds 9500. Nilai penyimpangan *coefficient of discharge* terendah sebesar 0,08% pada angka Reynolds 8000.

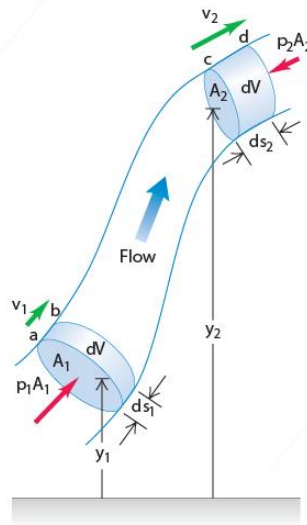
Pada penelitian ini, penulis akan melakukan pengujian pengukuran laju aliran fluida menggunakan plat *orifice* dengan rasio beta 0,24 pada pipa PVC berdiameter $\frac{1}{2}$ dan 1 inch. Metode yang dilakukan dengan mengukur beda tekanan antara sisi *upstream* dan sisi *downstream* pada manometer U yang dipasang antara plat *orifice*. Hasil pengujian akan difokuskan untuk mengkaji hipotesis bahwa dengan rasio beta yang sama pada sebuah *orifice* maka dapat digunakan untuk memprediksi laju aliran fluida pada ukuran pipa yang berbeda.

2.2 Landasan Teori

Mekanika fluida adalah ilmu yang mempelajari fluida baik cair maupun gas. Dalam konsepnya, fenomena mekanika fluida banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, seperti mengalirnya air dari pegunungan menuju lembah, dongkrak hidraulik, rem cakram hidraulik dan lain-lain. Pada penelitian ini akan digunakan beberapa persamaan yang berkaitan dengan mekanika fluida sebagai dasar teori.

2.2.1 Persamaan Bernoulli

Di dalam istilah mekanika fluida, persamaan Bernoulli dapat dinyatakan sebagai hubungan antara kecepatan aliran, elevasi, dan tekanan suatu fluida dalam kondisi *steady* dengan menggunakan konsep usaha dan energi. Kondisi *steady* yang dimaksud adalah aliran fluida tidak mengalami pemampatan yang memiliki ciri-ciri tidak adanya perubahan densitas di sepanjang aliran fluida tersebut. Berikut ilustrasi persamaan Bernoulli seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Ilustrasi persamaan Bernoulli (Reaven, 2016)

Fluida dengan massa jenis ρ dialirkan pada suatu penampang yang memiliki elevasi dan luas yang berbeda. Tekanan P_1 didapat sebagai hasil dari gaya F_1 yang bekerja pada penampang A_1 , sedangkan tekanan P_2 didapat sebagai hasil dari gaya F_2 yang bekerja pada penampang A_2 . Gaya F_1 melakukan usaha sebesar $W_1 = F_1 \cdot s_1$ dan Gaya F_2 melakukan usaha sebesar $W_2 = -F_2 \cdot s_2$. Tanda negatif menandakan bahwa gaya yang bekerja ke arah kiri yang secara sistematis dituliskan pada persamaan 2.1.

$$\begin{aligned}
 W_{total} &= W_1 + W_2 \dots\dots\dots (2.1) \\
 &= F_1 \cdot s_1 + (-F_2 \cdot s_2) \\
 &= P_1 \cdot A_1 \cdot s_1 - P_2 \cdot A_2 \cdot s_2 \\
 &= P_1 \cdot V_1 - P_2 \cdot V_2
 \end{aligned}$$

$$W_{total} = (P_1 - P_2) \frac{m}{\rho} \dots\dots\dots (2.2)$$

Besarnya usaha total (W_{total}) setara dengan perubahan energi mekanik. Energi mekanik sendiri adalah jumlah antara energi potensial dan energi kinetik yang terjadi saat fluida berpindah dari penampang A_1 ke A_2 yang dapat dituliskan dengan persamaan 2.3.

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

Persamaan 2.2 dan 2.3 merupakan persamaan energi yang jika digabungkan maka akan diperoleh persamaan 2.4.

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

Persamaan 2.4 dikenal dengan persamaan Bernoulli. Besaran $\rho g h$ adalah energi potensial fluida per satuan volume (EP/V). Nilai $\frac{1}{2} \rho v^2$ adalah energi kinetik fluida per satuan volume (EK/V) sebab $(m/V) = \rho$.

2.2.2 Penerapan Persamaan Bernoulli pada *Orifice Plate Meter*

Persamaan Bernoulli dan persamaan kontinuitas dapat digunakan secara bersama untuk menghitung laju aliran fluida (Santosa, 2003). Persamaan kontinuitas untuk penampang *orifice* dan penampang pipa dapat dinyatakan dengan persamaan 2.5.

$$\dot{m}_{wtr} = \rho_{wtr.1} \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_{wtr.2} \cdot A_2 \cdot v_2 \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan:

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

- $\rho_{wtr.1}$ = 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)

Fluida yang melewati *orifice* merupakan fluida *incompressible* sehingga persamaan 2.5 dapat dinyatakan dengan persamaan 2.6 dan 2.7.

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

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

Aliran fluida yang mengalir pada sistem diasumsikan mengalami proses adiabatik, tidak mengalami gesekan, aliran tunak, fluida tak mampu mampat, dan beda potensial dianggap tidak ada. Oleh karena itu, persamaan Bernoulli yang digunakan seperti pada persamaan 2.8 dan 2.9.

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

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

Dengan:

$P_1 - P_2$ = Perbedaan tekanan pada sisi masuk dan keluar *orifice* (Pa)

ρ_{wtr} = Massa jenis air (kg/m³)

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.7 ke persamaan 2.9 maka diperoleh persamaan baru yang dapat dilihat pada persamaan 2.12.

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

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

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

Persamaan untuk debit ideal dapat dilihat pada persamaan 2.13.

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

Persamaan 2.12 dan persamaan 2.13 disubstitusikan sehingga persamaan debit ideal menjadi persamaan 2.14.

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

Hubungan antara laju aliran volume (debit) ideal dan aktual dapat ditulis menjadi seperti persamaan 2.15.

$$Q_{aktual} = C \cdot Q_{ideal} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dengan:

C = Koefisien curah (*Coefficient of discharge*)

Q_{aktual} = Debit pada rotameter (LPM)

Substitusi persamaan 2.14 dan 2.15 adalah hubungan antara debit air aktual dan beda tekanan sehingga diperoleh persamaan 2.16.

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

Angka Reynolds (Re) aliran diperoleh melalui persamaan:

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

Dengan D_1 adalah diameter dari pipa (m)

Persamaan 2.17 dapat ditulis menjadi persamaan 2.18.

$$Q_{\text{aktual}} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{\text{wtr}}}{4 \cdot \rho_{\text{wtr}}} \cdot Re \dots\dots\dots (2.18)$$

Persamaan 2.18 disubstitusikan ke persamaan 2.16 menjadi persamaan 2.19 untuk mendapatkan nilai koefisien curah (C).

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

Sehingga persamaan untuk mencari nilai koefisien curah (C) menjadi persamaan 2.20.

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

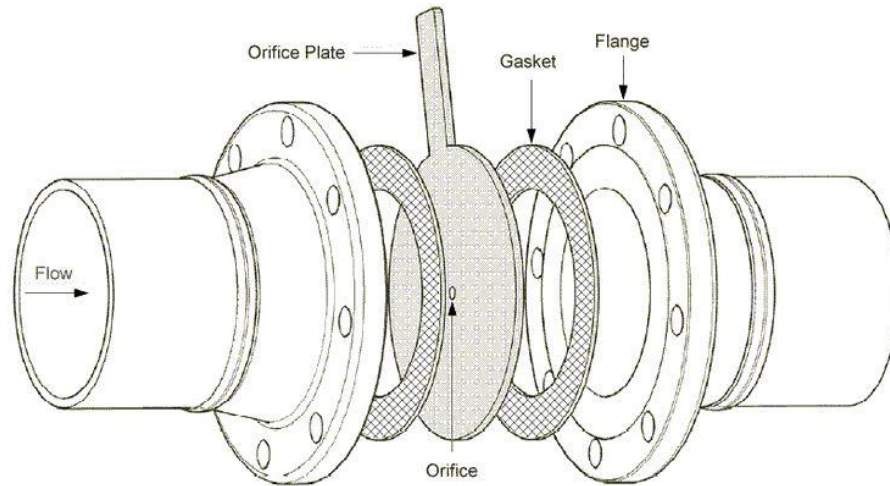
Untuk menghitung perbedaan tekanan yang terjadi pada sisi masuk dan sisi keluar *orifice* menggunakan manometer nilai ΔP diperoleh dari selisih antara P_1 dan P_2 yang terbaca pada rotameter menggunakan persamaan 2.21.

$$P_1 - P_2 = \rho_{\text{air raksa}} \cdot g \cdot (H_1 - H_2) \dots\dots\dots (2.21)$$

Dengan:

- $P_1 - P_2$ = Perbedaan tekanan sisi masuk dan sisi keluar (Pa)
- ρ_{raksa} = Massa jenis air raksa (13600 kg/m³)
- g = Percepatan gravitasi bumi (9,81 m/s²)
- $(H_1 - H_2)$ = Perbedaan elevasi air raksa sisi masuk dan keluar (m)

2.2.3 Orifice Plate Meter



Gambar 2. 9 Komponen *orifice plate meter* (Solken, 2010)

Orifice plate meter merupakan alat ukur laju aliran massa fluida yang menggunakan prinsip perbedaan tekanan. Perubahan kecepatan fluida yang melewati plat *orifice* berkaitan juga dengan perubahan tekanan. Perubahan tekanan ini kemudian diukur menggunakan manometer U untuk selanjutnya diasosiasikan dengan laju aliran.

a. Prinsip kerja *orifice plate meter*

Fluida yang mengalir didalam suatu saluran akan melewati lubang kecil orifis, hal itu akan menyebabkan terjadinya perbedaan kecepatan dan tekanan fluida. Setelah fluida melewati *orifice*, akan ada titik dimana terjadinya kecepatan maksimum yang disebut dengan *vena contracta*. Dari titik *vena contracta* kemudian diukur perbedaan tekanan menggunakan manometer U atau *differential pressure gauge*.

b. Jenis - jenis *orifice plate*

Plat *orifice* memiliki beberapa jenis dan biasanya bergantung dari letak lubang pada plat tersebut seperti pada Gambar 2.10.

1. *Concentric Orifice*

Merupakan *orifice* dengan lubang tepat ditengah lingkaran luar *orifice* dan memiliki kemiringan takik 45 derajat.

2. *Counter Bore Orifice*

Jenis ini hampir mirip dengan *concentric orifice*, namun tidak memiliki takik.

3. *Eccentric Orifice*

Jenis *orifice* ini memiliki takik seperti *concentric orifice*, namun posisi lubang yang tidak berada pada tengah.

4. *Quadrant Bore Orifice*

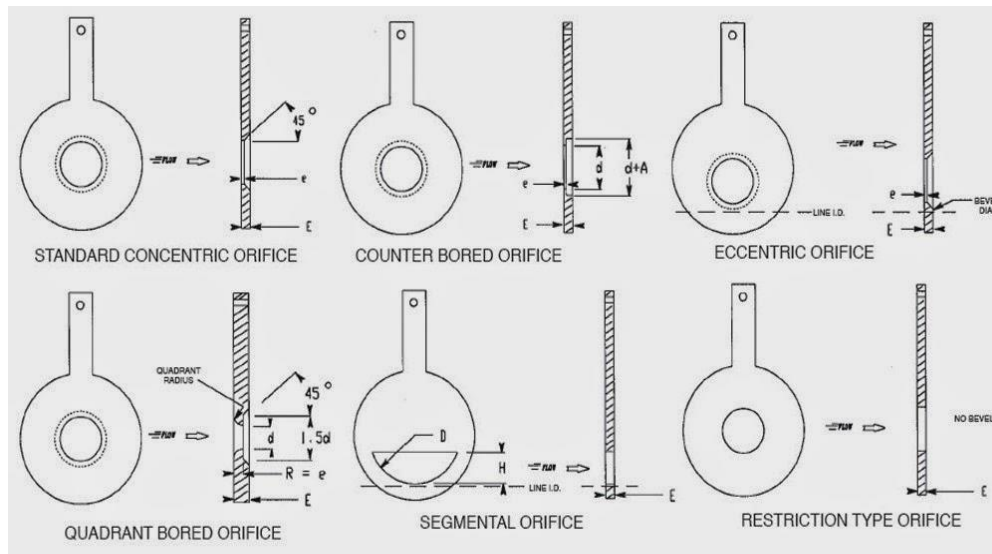
Orifice ini direkomendasikan untuk angka Reynolds dibawah 1000 dengan viskositas (kekentalan) yang tinggi.

5. *Segmental orifice*

Orifice ini memiliki lubang seperti huruf D dengan dirotasi 90⁰ dan posisi lubang berada di bawah. Jenis ini biasanya digunakan untuk fluida dengan kandungan sedimen yang tinggi.

6. *Restriction type orifice*

Jenis ini biasanya digunakan pada fluida gas agar menghasilkan penurunan tekanan yang tinggi.



Gambar 2. 10 Jenis-jenis plat *orifice* (Edoy, 2015)

2.2.4 Rugi-Rugi Aliran (*Headloss*)

Rugi-rugi aliran atau *headloss* adalah fenomena berkurangnya kekuatan mekanik fluida, seperti kecepatan, massa, dan volume sepanjang jalur sistem perpipaan yang dapat terjadi seiring dengan semakin Panjang dan rumit sistem perpipaannya. Rugi – rugi aliran dibagi menjadi 2 jenis, yaitu:

a. Rugi-rugi aliran mayor (*major headloss*)

Rugi-rugi aliran mayor adalah rugi – rugi aliran yang disebabkan karena adanya gesekan baik antara lapis-lapis fluida itu sendiri maupun gesekan antara fluida dan dinding pipa. Besar kecilnya gesekan yang terjadi dipengaruhi oleh nilai dari nilai kekasaran suatu material dan panjang pipa.

Besarnya rugi-rugi aliran mayor dapat dapat diketahui dengan menggunakan persamaan Darcy-Weisbach. Persamaan tersebut berlaku pada suatu aliran pipa tunak, fluida tak mampu mampat (*incompressible*) dan berkembang penuh. Persamaan ini berlaku pada suatu pipa horizontal atau berada pada posisi miring. Berikut ini persamaan Darcy-Weisbach termuat dalam persamaan 2.22.

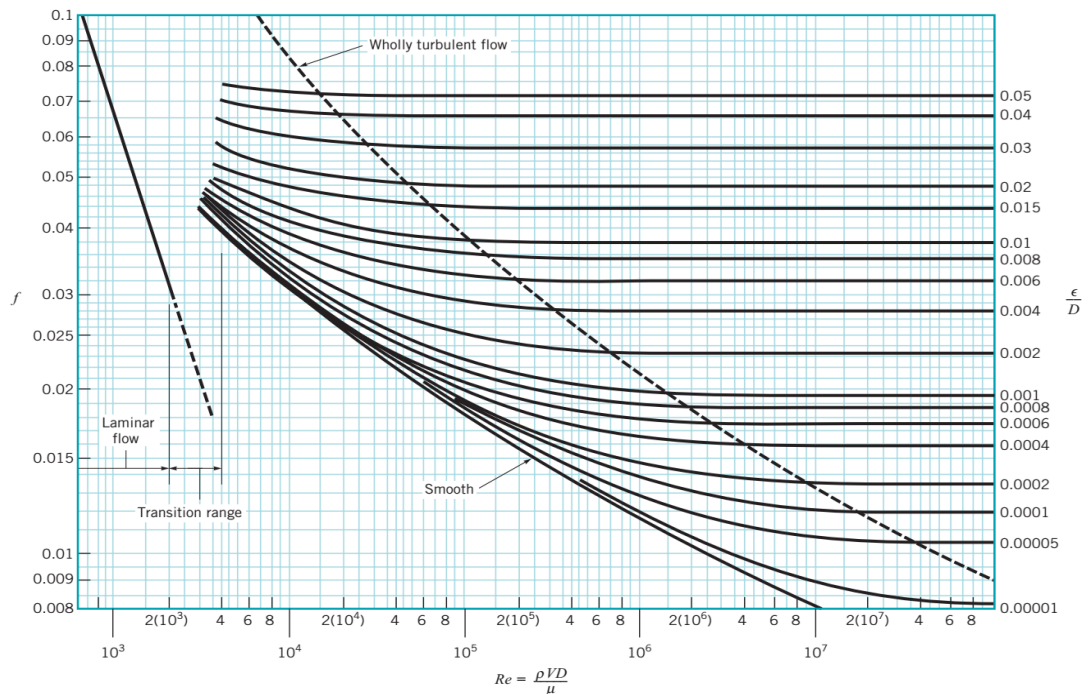
$$h_l = f \frac{L v^2}{D 2g} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dengan:

- h_l = Kerugian gesek dalam pipa (m)
- v = Kecepatan aliran fluida (m/s)
- f = Koefisien gesek
- g = Percepatan gravitasi (m^2/s)
- L = Panjang pipa (m)
- D = Diameter dalam pipa (m)

Nilai f dapat diperoleh dengan membaca diagram Moody pada Gambar

2.11.



Gambar 2. 11 Diagram Moody (Munson, 2009)

b. Rugi-rugi aliran minor (*minor headloss*)

Rugi-rugi aliran minor adalah rugi aliran yang disebabkan karena adanya komponen pendukung pada sepanjang jalur perpipaan, seperti *elbow*, *reducer*, *pressure indicator*, *flange*, dan *valve*. Nilai rugi-rugi aliran minor dapat diperoleh melalui persamaan 2.23.

$$h_l = K \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (2.23)$$

Dengan:

h_l = Kerugian gesek dalam pipa (m)

v = Kecepatan aliran fluida (m/s)

K = Koefisien tahanan

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

2.2.5 Regim Aliran

Aliran fluida dibedakan menjadi tiga jenis yaitu aliran laminar, aliran transisi, dan aliran turbulen. Ketiga jenis ini didapat sebagai hasil dari penelitian yang dilakukan oleh Osborne Reynold pada tahun 1883. Apabila terdapat fluida yang mengalir melewati sebuah pipa berdiameter d dengan kecepatan rata-rata v maka akan didapat angka Reynolds. Angka Reynolds sangat dipengaruhi oleh kecepatan fluida, viskositas, kerapatan, dan juga diameter pipa (Poerboyo, 2013).

Aliran laminar adalah aliran fluida yang memiliki ciri vektor-vektor kecepataannya memiliki arah dan besar yang teratur serta memungkinkan untuk mengenali arah aliran (*streamline*) posisi partikel fluida berbergerak, sedangkan aliran turbulen memiliki ciri yang berbanding terbalik dengan aliran laminar yaitu vektor-vektor kecepataannya memiliki arah dan besar yang tidak teratur serta terindikasi adanya fluktuasi kecepatan (Nurchayadi, 2017). Untuk parameter aliran pipa tak berdimensi, hal yang terpenting yaitu angka Reynolds. Angka Reynolds adalah perbandingan dari efek inersia dengan viskos dalam aliran. Angka Reynolds dinyatakan dalam persamaan 2.24.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dengan:

Re = Angka Reynolds

ρ = Massa jenis (kg/m^3)

μ = viskositas dinamik ($N \cdot s/m^2$)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

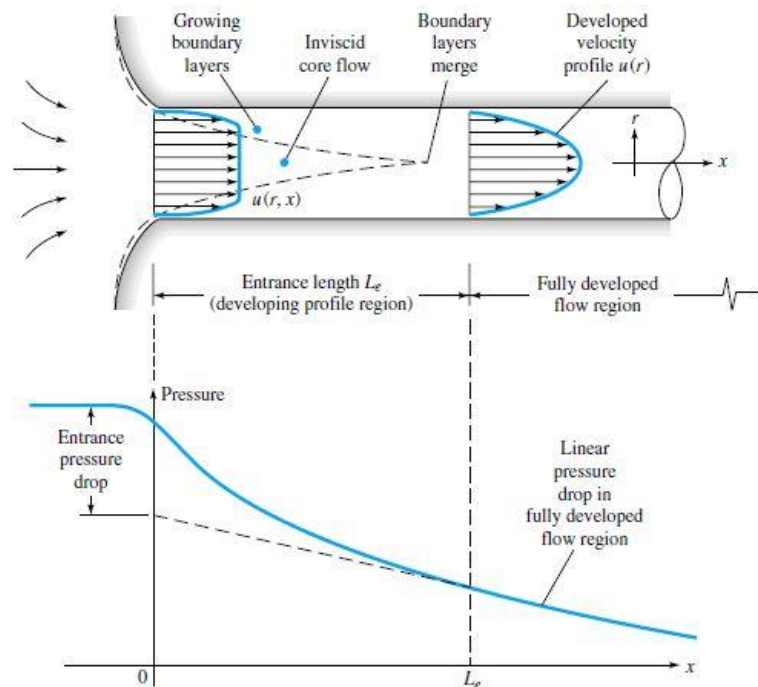
d = diameter dalam pipa (m)

Klasifikasi ketiga jenis aliran yaitu:

1. Jika angka Reynolds < 2100 maka aliran tersebut diklasifikasikan sebagai aliran *laminar*.
2. Jika angka Reynolds $2100 \leq Re \leq 4000$ maka aliran tersebut diklasifikasikan sebagai aliran transisi.
3. Jika angka Reynolds > 4000 maka aliran tersebut diklasifikasikan sebagai aliran turbulen.

2.2.6 Aliran *Fully Developed*

Aliran *fully developed* yaitu kondisi aliran fluida yang melalui suatu pipa sudah berkembang penuh dengan kecepatan yang tetap dan tidak mengalami perubahan karena jarak. Nilai kecepatan fluida tersebut akan sebesar v jika dilakukan pengukuran pada titik L1 dan ketika dilakukan pengukuran pada titik L2 kecepatan yang diperoleh tetap v , sedangkan pada aliran yang belum berkembang penuh akan terjadi perubahan kecepatan (White, 1998). Perubahan kondisi aliran saat memasuki suatu pipa dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Perkembangan profil kecepatan dan perubahan tekanan aliran yang memasuki saluran pipa (White, 1998)

Persamaan *fully developed* pada suatu aliran laminar termuat pada persamaan 2.25 dan 2.26.

$$\frac{l_e}{D} = 0,006 \cdot \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$\frac{l_e}{D} = 0,006 \cdot Re \dots\dots\dots (2.26)$$

Sedangkan persamaan *fully developed* untuk aliran turbulen termuat pada persamaan 2.27 dan 2.28.

$$\frac{l_e}{D} = 4,4 \cdot \left(\frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \right)^{1/6} \dots\dots\dots (2.27)$$

$$\frac{l_e}{D} = 4,4 \cdot Re^{1/6} \dots\dots\dots (2.28)$$

Dengan:

- l_e = Panjang (m)
- D = Diameter pipa (m)
- Re = Angka Reynolds

2.2.7 Coefficient of Discharge

Coefficient of Discharge (C_d) merupakan perbandingan antara debit aktual dan debit ideal (Mannan, 2005). *Coefficient of discharge* adalah suatu fungsi dari angka Reynolds. Angka Reynolds merupakan fungsi dari laju aliran yang dihitung menggunakan nilai C_d . Nilai C_d tidak selalu konstan karena disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya kekasaran permukaan pipa dan komponen-komponen pipa seperti *elbow*, *valve*, sambungan, dan lain-lain. Nilai *coefficient of discharge* dapat dicari dengan persamaan 2.29.

$$C_d = \frac{Q_{aktual}}{Q_{ideal}} \dots\dots\dots (2.29)$$

Dengan:

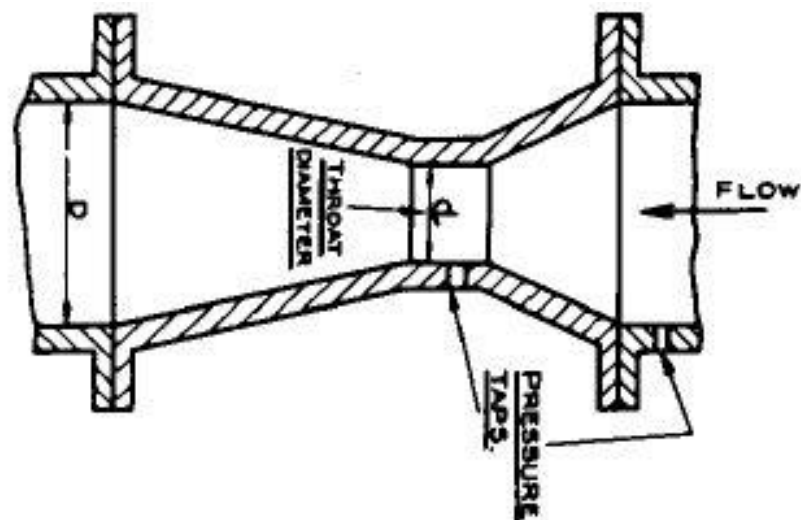
- C_d = *Coefficient of discharge*
- Q_{aktual} = Debit hasil pengukuran (m^3/s)
- Q_{ideal} = Debit hasil perhitungan (m^3/s)

2.2.8 Jenis-Jenis *Flowmeter* dengan Metode *Obstruction Device*

Selain *orifice plate meter*, ada beberapa *flowmeter* yang menggunakan metode rintangan (*obstruction device*) yaitu *venturi meter* dan *flow nozzle*. Kedua alat ukur ini sama-sama menggunakan prinsip perbedaan tekanan dalam pengaplikasiannya. Nilai perbedaan tekanan tersebut kemudian diolah dan dihitung untuk mendapatkan nilai debit fluida yang mengalir. Berikut ini adalah deskripsi dari *venturi meter* dan *flow nozzle*.

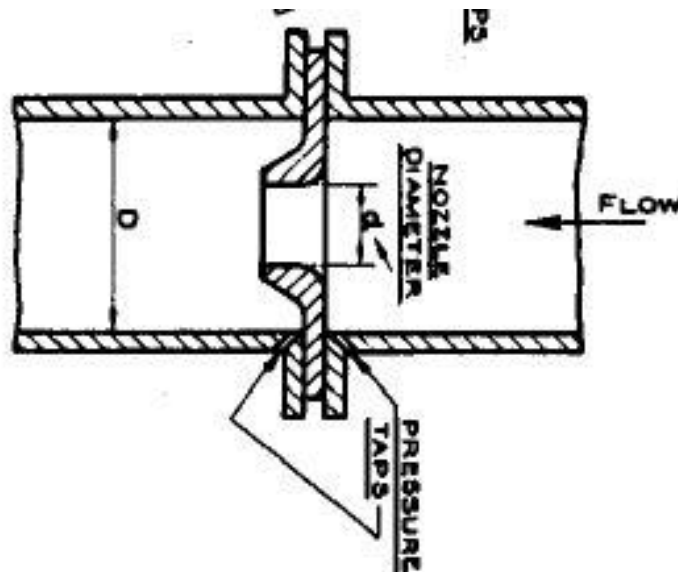
1. *Venturi meter*

Venturi meter adalah alat ukur debit yang menggunakan metode rintangan. Alat ukur ini berupa pipa yang penampang tengahnya memiliki diameter yang lebih kecil dan diletakkan horizontal. Alat ukur tekanan dihubungkan pada sisi penampang yang besar dan penampang yang kecil untuk mendapatkan nilai beda tekanan. Ilustrasi *venturi meter* dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Ilustrasi *venturi meter* (Clark, 1965)

2. *Flow nozzle*



Gambar 2. 14 *Flow nozzle* (Clark, 1965)

Flow nozzle (tertera pada Gambar 2.14) bisa juga disebut dengan setengah venturi. *Flow nozzle* memiliki beberapa kelebihan yaitu harganya lebih murah dari *venturi meter*, dan lebih tahan korosi dari pada *orifice plate meter*.

2.2.9 *Jenis-Jenis Pressure Taps pada Orifice*

Menurut Chugh (2012), *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*

Menurut standar ISO 5167-2 :2003 *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

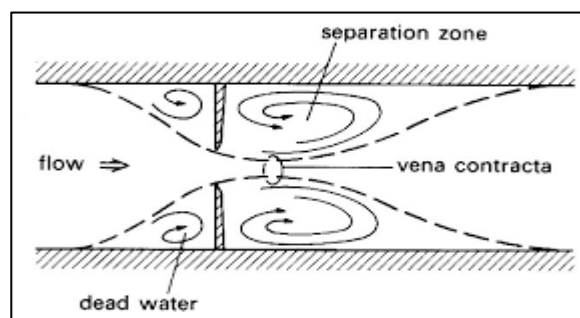
Lubang *pressure taps* jenis ini terletak 1 inch pada sisi *upstream* dan 1 inch pada sisi *downstream*. Tap jenis ini tidak direkomendasikan untuk ukuran pipa di bawah 2 inch karena tap sisi hilir terletak pada daerah tekanan yang tidak stabil.

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 Vena Contracta dan Standar Vena Contracta Taps

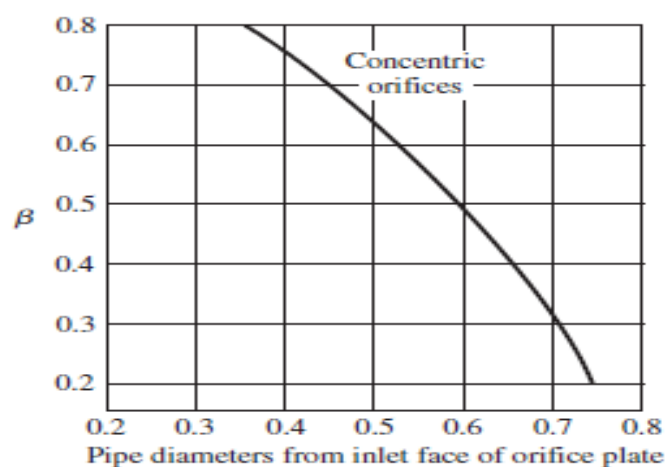
Vena contracta adalah titik yang pada posisi tersebut terjadi diameter terkecil dari aliran fluida dan memiliki kecepatan yang maksimum, seperti dalam kasus *nozzle* atau *orifice*. *Vena contracta* terjadi pada bagian *downstream* atau setelah melewati plat *orifice* seperti pada Gambar 2.15.



Gambar 2. 15 *Vena contracta*

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*, baik pada sisi *upstream* maupun sisi *downstream*.
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*.
3. *Pressure taps* sisi *upstream* diletakkan satu kali diameter dalam pipa, sedangkan pada sisi *downstream* diletakkan pada *vena contracta* yang dapat dilihat pada Gambar 2.16.

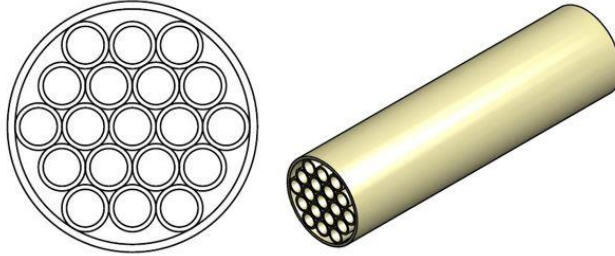


Gambar 2. 16 Lokasi dari *pressure taps orifice* dengan metode *vena contracta taps* (J.P. Holman, 2012)

2.2.11 Penyearah Aliran (*Tube Bundle*)

Menurut Widodo (2016), penyearah aliran adalah sebuah komponen yang berfungsi sebagai *flow conditioner* untuk mengubah aliran turbulen menjadi aliran laminar sebagai akibat karena terdapat pembelokan, katup, perubahan luas penampang pada sebuah sistem perpipaan. Penyearah aliran tersusun dari pipa-pipa kecil yang disusun menyerupai sarang lebah. Dalam penelitiannya pada sistem perpipaan, Widodo melakukan percobaan dengan tiga variasi, yaitu sistem perpipaan tanpa penyearah aliran, penyearah aliran dipasang sebelum belokan (*elbow*), dan penyearah aliran dipasang setelah belokan. Hasilnya, penyearah aliran yang dipasang setelah belokan mampu memperbaiki karakteristik aliran yang awalnya turbulen menjadi laminar dan dapat mengurangi nilai *head loss*. Namun, penyearah aliran memiliki dampak yang buruk pada sistem perpipaan yang

memiliki karakter aliran laminar. Gambar 2.17 menunjukkan ilustrasi desain penyearah aliran.



Gambar 2. 17 Penyearah aliran