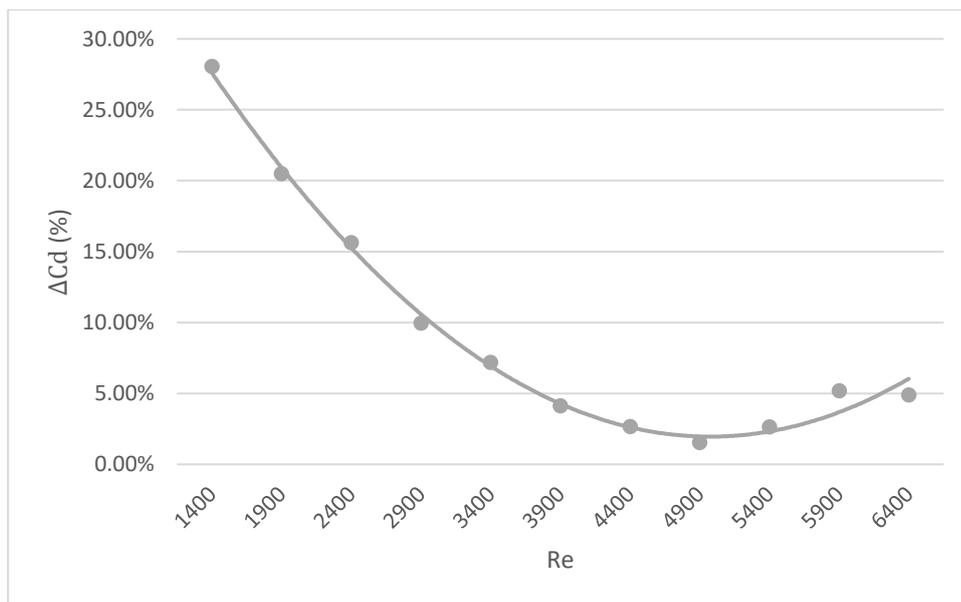


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Tinjauan Pustaka

Kurniawan (2017) melakukan pengujian dan penelitian mengenai *orifice plat meter* sebagai alat ukur debit air dengan kapasitas 11 LPM dengan rasio orifice  $\beta = d/D = 0,23$  pada pipa  $\frac{1}{2}$  inch dan  $\frac{3}{4}$  inch. Diameter orifice yang digunakan pada pipa  $\frac{1}{2}$  yaitu 4,3 mm dan diameter orifice pada pipa  $\frac{3}{4}$  inch yaitu 5,1 mm. Penelitian ini dilakukan dengan mengukur nilai beda tekanan pada sisi masuk orifice dan sisi keluar orifice. Nilai beda tekanan diukur tiap 1; 1,5; 2; 2,5; 3 hingga 7 LPM. Dari penelitian ini didapatkan nilai deviasi koefisien curah yang dapat dilihat pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Grafik Deviasi  $\Delta C_d$  (Kurniawan, 2017)

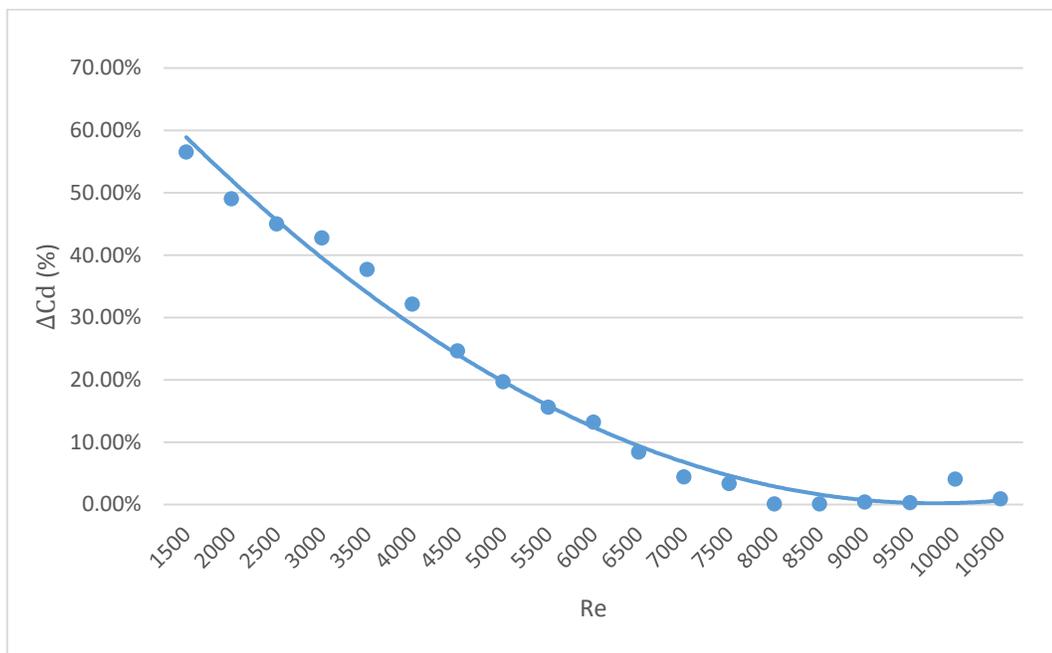
Keterangan :

$$\Delta P = 0,005x^2 - 0,0818x + 0,353$$

$$R^2 = 0,9933$$

Grafik standar deviasi diatas menunjukkan nilai koefisien C menurun drastis dari nilai awal yaitu 28,04% sampai yang paling rendah 1,53% mendekati nilai 0% kemudian konstan. Nilai deviasi tertinggi yaitu pada bilangan Reynolds 1400 dan yang terendah 4900.

Pratama (2017) melakukan pengujian *orifice plate meter* sebagai alat ukur debit air dengan kapasitas 11 LPM dengan rasio orifice  $\beta = d/D = 0,4$  pada pipa  $\frac{1}{2}$  inch dan  $\frac{3}{4}$  inch. Diameter orifice yang digunakan pada pipa  $\frac{1}{2}$  yaitu 7,2 mm dan diameter orifice pada pipa  $\frac{3}{4}$  inch yaitu 8,5 mm. Penelitian ini dilakukan dengan mengukur nilai beda tekanan pada sisi masuk orifice dan sisi keluar orifice. Nilai beda tekanan diukur tiap 1; 1,5; 2; 2,5; 3 hingga 11 LPM. Dari penelitian ini didapatkan nilai deviasi koefisien curah yang dapat dilihat pada gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Grafik Deviasi  $\Delta C_d$  (Pratama, 2017)

Keterangan :

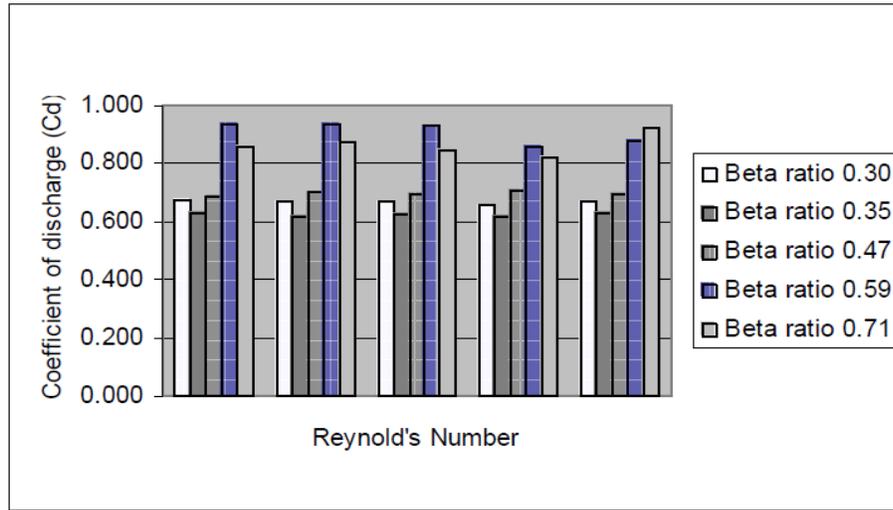
$$\Delta P = 0,0021x^2 - 0,0752x + 0,6621$$

$$R^2 = 0,9873$$

Dari grafik standar deviasi yang ditunjukkan pada gambar 2.1 menunjukkan bahwa semakin besar bilangan Reynolds maka semakin kecil nilai koefisiennya. Nilai

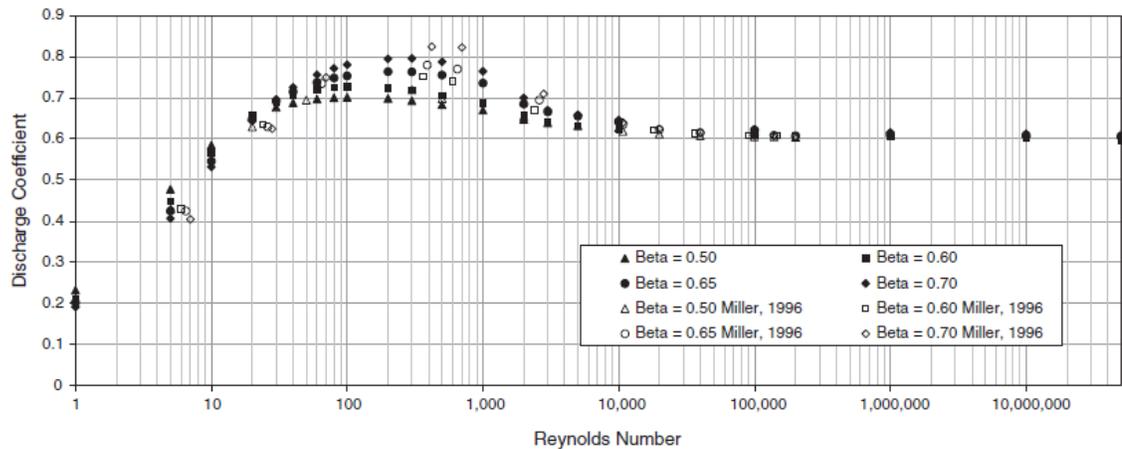
deviasi koefisien curah tertinggi terjadi pada bilangan Reynolds 1500 dengan nilai penyimpangan 56,50 %. Nilai tersebut terus turun hingga pada bilangan Reynolds  $\geq$  7000 nilai deviasi berfluktuasi namun cenderung stabil dengan range 0,04 % hingga 4,7 %. Nilai deviasi koefisien curah terendah terjadi pada bilangan Reynolds 800 dengan nilai 0,08 %.

Rahman dkk (2009) melakukan penelitian pengaruh rasio beta dan angka *Reynolds* pada orifice meter terhadap *Coefficient Discharge*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan lima plat *orifice* yang memiliki rasio beta 0,30, 0,35, 0,47, 0,59 dan 0,71 di pasang secara konsentris dalam pipa berdiameter 8.5 cm. Hasil penelitian untuk semua pengujian kecuali rasio beta 0,47 yang menunjukkan grafik berbentuk cembung, pertama koefisien debit menurun dengan kenaikan Re mencapai nilai minimum dan kemudian mulai naik kembali. Hubungan yang lain adalah rasio beta yang lebih tinggi 0,71 dengan nilai koefisiensi determinasi ( $R^2$ ) maksimum 0,9563 namun perubahan koefisien debit cepat ketika rasio beta 0,71. dalam kasus ini Cd mengikuti tren kenaikan secara konstan, nilai minimum koefisien debit yaitu nilai kritis Re yang Cd-nya minimum untuk rasio beta tertentu. Interpretasi gabungan data eksperimen dari diagram batang menunjukkan bahwa *orifice* meter dengan rasio beta 0,60 dapat digunakan untuk pengukuran aliran dalam pipa yang efisien, ditunjukkan pada gambar 2.6.



**Gambar 2.3** Diagram batang koefisien debit (Cd) terhadap rasio beta ( $\beta$ ) (Rahman,2009)

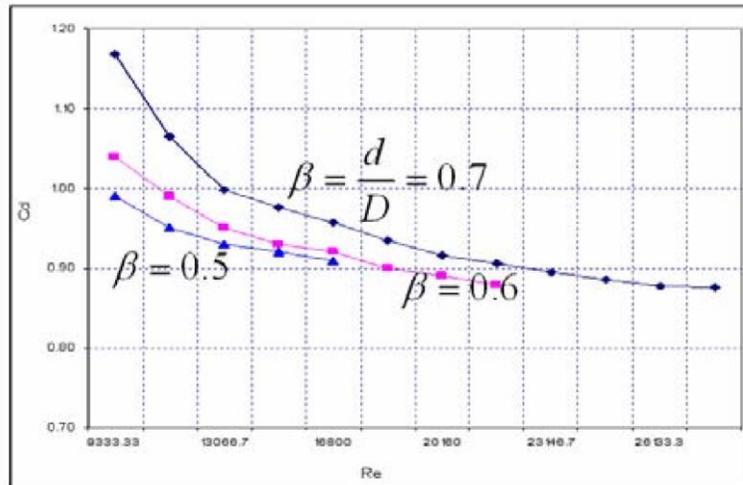
Hollingshead dkk (2011) pernah melakukan penelitian mengenai performa koefisien curah dari venturi, plat orifice konsentris standar, *V-cone*, dan *wedge flow meters* pada angka Reynods rendah. Pada penelitian plat orifice konsentris standar menggunakan rasio 0,5; 0,6; 0,65 dan 0,7 dengan diameter inlet orifice meter bekisar 15,41 sampai 20,27 cm. Tujuan menggunakan diameter yang berbeda untuk menentukan jika hasil tergantung dari diameter inlet. Hasil dari koefisien curah pada plat orifice konsentris standar berbeda dari flow meter yang lain pada angka Reynolds 100 hingga 10000. Untuk bilangan Reynolds 100 turun ke 1, nilai koefisien debit menurun sekitar 0.7-0.8 menjadi sekitar 0.2-0.25 tergantung pada nilai rasio untuk orifice tertentu. Pada venture, *V-cone*, dan *wedge flow meters* nilai koefisien curah berbanding lurus dengan angka Reynolds. Semakin kecil angka Reynolds maka semakin kecil koefisien curahnya. Untuk plat orifice konsentris standar nilai dari koefisien curah tidak mengikuti tren flow meter lainnya. Penurunan angka Reynolds akan mengakibatkan nilai koefisien curah meningkat sampai maksimum sebelum turun tajam pada penurunan angka Reynolds lebih lanjut. Grafik hubungan antara bilangan *Reynolds* dengan *Discharge coefficient* ditunjukkan pada gambar 2.5.



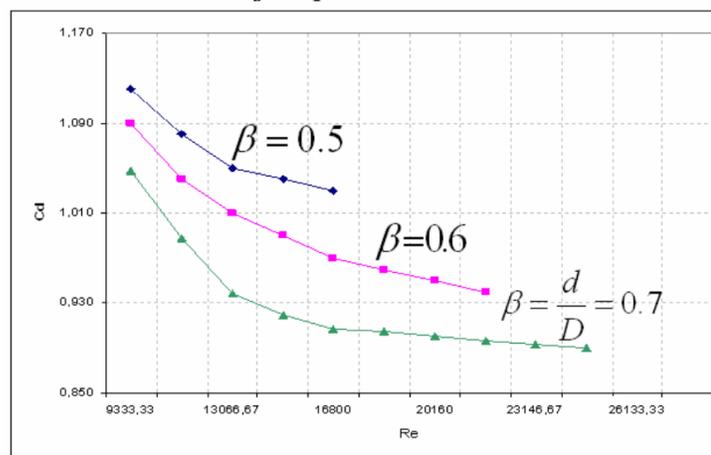
**Gambar 2.4** Grafik hubungan antara bilangan Reynolds dengan *Discharge coefficient* pada plat orifice konsentris standar (Hollingshead dkk, 2011)

Septiadi (2008) melakukan studi eksperimental *orifice flow meter* dengan variasi tebal dan posisi pengukuran beda tekanan aliran melintasi *orifice plat*. Plat orifice dibuat dengan memberikan sedikit bevel pada bagian sisi masuknya dengan rasio diameter ( $\beta$ ) = 0,5; 0,6; dan 0,7 dengan tebal plat orifice 10 mm dan 20 mm. Penelitian ini di lakukan pada aliran yang memiliki bilangan Reynolds 9333,33 hingga 28000. Kapasitas aktual diukur menggunakan *V-notch weir* dan *sight glass*. Untuk kapasitas teoritis dihitung menggunakan persamaan kontinuitas dan persamaan Bernoulli yang telah dimodifikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa presentase *irrecoverable pressure drop* semakin turun jika kapasitas aliran semakin kecil jika kapasitas alir semakin besar. Pada rasio diameter 0,7 tebal 10 mm *irrecoverable pressure drop* terhadap *maximum pressure drop* mencapai nilai yang cukup rendah yaitu lebih kecil dari 40% pada bilangan Reynolds kurang lebih 1300, sedangkan yang memiliki tebal 20 mm pada rasio 0,7 m yaitu lebih kecil dari 40% pada bilangan Reynolds kurang lebih 1500. Nilai Cd untuk plat orifice tebal 10 mm pada masing masing rasio berfluktuasi pada angka Reynolds 9333,33 sampai 14933,33 setelah itu nilai Cd mulai mendekati konstan. Nilai Cd bekisar antara 0,88 sampai 1,17. Untuk nilai Cd plate orifice tebal 20 mm terdapat perbedaan dalam tingkatan letak rasi

diameternya yakni pada plat orifice tebal 10 mm rasio yang paling kecil (0,5) berada paling bawah grafik sedangkan untuk plat orifice tebal 20 mm rasio diameter yang paling kecil (0,5) berada paling atas pada grafik.



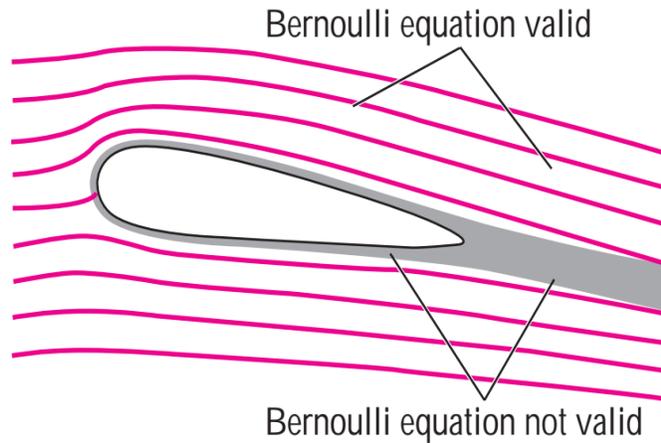
**Gambar 2.5** Grafik *discharge coefficient* orifice flow meter tebal 10 mm (Septiadi, 2008)



**Gambar 2.6** Grafik *discharge coefficient* orifice flow meter tebal 20 mm (Septiadi, 2008)

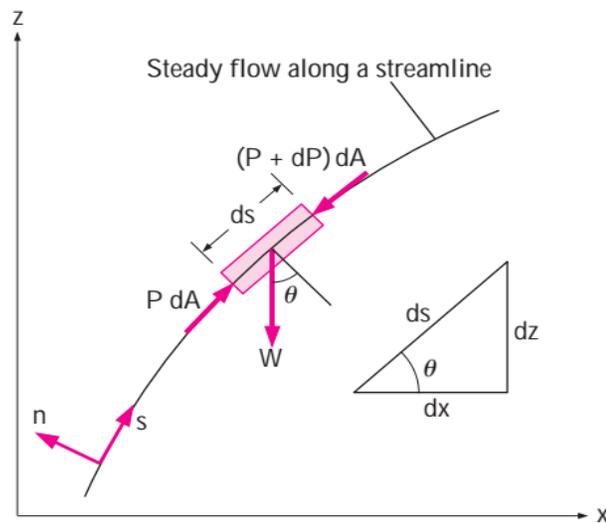
## 2.1 Dasar Teori

### 1.2.1 Persamaan Bernoulli



**Gambar 2.7** Area Persamaan Bernoulli (Cengel, 2006)

Persamaan Bernoulli adalah suatu hubungan antara tekanan, kecepatan dan elevasi yang berlaku dialirkan *steady*. Aliran fluida tak mampat yang dicirikan dengan tidak berubahnya densitas dari fluida di sepanjang aliran tersebut dan tidak ada gesekan aliran yang ditunjukkan pada gambar 2.8 (Cengel, 2006)



**Gambar 2.8** Gaya yang bekerja pada partikel fluida sepanjang *streamline*

Dari hukum Newton ke 2 (yang disebut sebagai konservasi hubungan momentum linear pada mekanika fluida). Dalam arah s pada partikel yang bergerak sepanjang *streamline*. Hukum Newton ke 2 dapat ditulis pada persamaan 2.1.

$$\sum F_s = ma_s \dots \dots \dots (2.1)$$

Di daerah aliran dimana gesekan dapat diabaikan, gaya yang bekerja pada daerah s adalah tekanan yang menekan pada kedua sisi dan berat partikel diarah s seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9. Maka persamaan 2.1 dapat dituliskan seperti pada persamaan 2.2.

$$P \cdot dA - (P + dP)dA - W \cdot \sin \theta = mv \frac{dv}{ds} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana  $\theta$  adalah sudut antara garis normal *streamline* terhadap garis vertical sumbu z pada titik tersebut  $m = \rho v = \rho dA ds$  adalah massa  $W = mg = \rho g dA ds$  adalah berat partikel fluida dan  $\sin \theta = dz/ds$ . Lalu disubstitusikan ke persamaan 2.2 sehingga persamaan dapat ditulis seperti persamaan 2.3.

$$-dP \cdot dA - \rho \cdot g \cdot dA \cdot ds \cdot \frac{dz}{ds} = \rho \cdot dA \cdot ds \cdot v \cdot \frac{dv}{ds} \dots \dots \dots (2.3)$$

Setelah itu nilai  $dA$  ditiadakan lalu disederhanakan, sehingga persamaan dapat ditulis seperti persamaa 2.4.

$$-dP - \rho \cdot g \cdot dz = \rho \cdot v \cdot dv \dots \dots \dots (2.4)$$

Memperhatikan bahwa  $v \cdot dv = \frac{1}{2} \cdot v^2$  dan membagi setiap istilah dengan  $\rho$  maka persamaan dapat ditulis seperti persamaan 2.5.

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot d(v^2) + g \cdot dz = 0 \dots \dots \dots (2.5)$$

Setelah itu persamaan 2.5 diintegalkan, sehingga persamaan menjadi seperti 2.6.

Untuk aliran stedy :

$$\int \frac{dP}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z = \text{konstan (sepanjang streamline)} \dots \dots \dots (2.6)$$

Untuk aliran stedy dan tak mampat :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z = \text{konstan (sepanjang streamline)} \dots \dots \dots (2.7)$$

### 1.2.2 Penerapan Persamaan Bernoulli Pada Orifice Plat Meter

Penentuan laju aliran dapat dilakukan dengan menerapkan persamaan Bernoulli dan persamaan kontinuitas.

Persamaan kontinuitas untuk penampang pada orifice meter dapat ditulis pada persamaan 2.8.

$$\dot{m}_{wtr} = \rho_{wtr,1} \cdot A_{wtr,1} \cdot v_1 = \rho_{wtr,2} \cdot A_{wtr,2} \cdot v_2 \dots \dots \dots (2.8)$$

Air yang masuk orifice plate meter adalah fluida tak mampat sehingga dapat ditulis pada persamaan 2.9 dan 2.10.

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_{wtr} \dots \dots \dots (2.9)$$

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} \cdot v_2 \dots \dots \dots (2.10)$$

Dengan asumsi proses adiabatik, tanpa gesekan, aliran tunak, fluida tak mampat, dan beda potensial diabaikan, persamaan Bernoulli menjadi persamaan 2.11 dan 2.12.

$$\frac{P_1}{\rho_{wtr}} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_{wtr}} + \frac{v_2^2}{2} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_{wtr}}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2) \dots \dots \dots (2.12)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.10) ke persamaan (2.12), persamaan menjadi 2.13, 2.14, dan 2.15.

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_{wtr} \cdot v_2^2}{2} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \cdot v_2 \right) \right] \dots \dots \dots (2.13)$$

$$v_2^2 = \frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho_{wtr} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$v_2 = \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}} \cdot (P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \dots \dots \dots (2.15)$$

Persamaan laju aliran volume ideal dapat ditulis pada persamaan 2.16.

$$\dot{V}_{aktual} = A_2 \cdot v_2 \dots \dots \dots (2.16)$$

Dengan memsubtitusikan persamaan (2.15) ke persamaan (2.16), laju aliran volume ideal menjadi persamaan 2.17.

$$\dot{V}_{ideal} = A_2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}} \cdot (P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \dots \dots \dots (2.17)$$

Hubungan antara laju aliran volume air ideal dan actual dapat di tulis pada persamaan 2.18.

$$\dot{V}_{aktual} = C \cdot \dot{V}_{ideal} \dots \dots \dots (2.18)$$

$\dot{V}_{aktual}$  di tentukan langsung dari pembacaan rotameter.

volume air actual dengan beda tekanan sisi masuk dan keluar orifice di lakukan dengan mensubtitusikan persamaan (2.17) ke persamaan (2.18) menjadi persamaan 2.19.

$$\dot{V}_{aktual} = \frac{C \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{(P_1 - P_2)} \dots \dots \dots (2.19)$$

Bilangan Re aliran dapat ditulis pada persamaan 2.20.

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}_{wtr}}{\pi \cdot D_1 \cdot \mu} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{aktual} \cdot \rho_{wtr}}{\pi \cdot D_1 \cdot \mu} \dots \dots \dots (2.20)$$

Untuk menghitung laju aliran volume fluida harus ditentukan koefisien curah (C) yang merupakan fungsi dari bilangan Re.

Persamaan (21) dapat ditulis pada persamaan 2.21.

$$\dot{V}_{aktual} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot Re \dots \dots \dots (2.21)$$

Persamaan (2.21) disubtitusikan ke persamaan (2.19) menjadi persamaan 2.22.

$$\frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot Re = \frac{C \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{(P_1 - P_2)} \dots \dots \dots (2.22)$$

Sehingga koefisien curah (C) ditulis pada persamaan 2.23.

$$C = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot \frac{Re}{\sqrt{(P_1 - P_2)}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}{A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}}}} \dots \dots \dots (2.23)$$

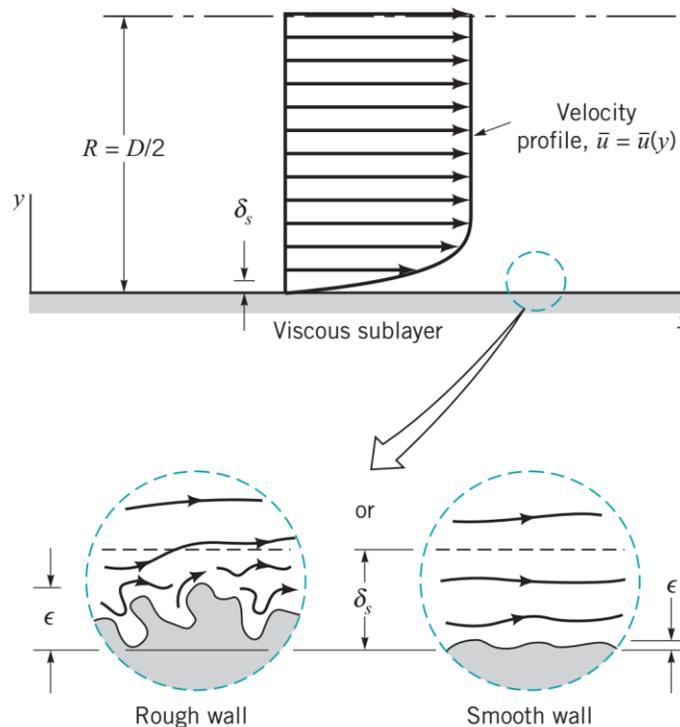
Untuk menghitung beda tekanan sisi masuk dan sisi keluar orifice menggunakan *pressure differential* yang langsung didapat nilai  $\Delta P$ .

### 1.2.3 Head Losses

Pada sistem perpipaan pasti terdapat kerugian tekanan yang terjadi pada aliran pipa. *Head losses* terjadi karena berbagai hal seperti gesekan fluida dengan dinding pipa dan adanya hambatan pada pipa seperti belokan, percabangan, katup, dan *fitting*. Rugi aliran adalah berkurangnya massa, volume, dan kecepatan suatu fluida yang mengalir di dalam pipa atau penyalur fluida. Terdapat 2 jenis rugi aliran yaitu :

#### a. Major losses

*Major losses* adalah kerugian pada aliran dalam pipa yang disebabkan oleh gesekan yang terjadi di sepanjang aliran fluida yang mengalir terhadap dinding pipa. Besar kecilnya gesekan yang terjadi di dalam pipa tergantung dari kekasaran permukaan pipa.



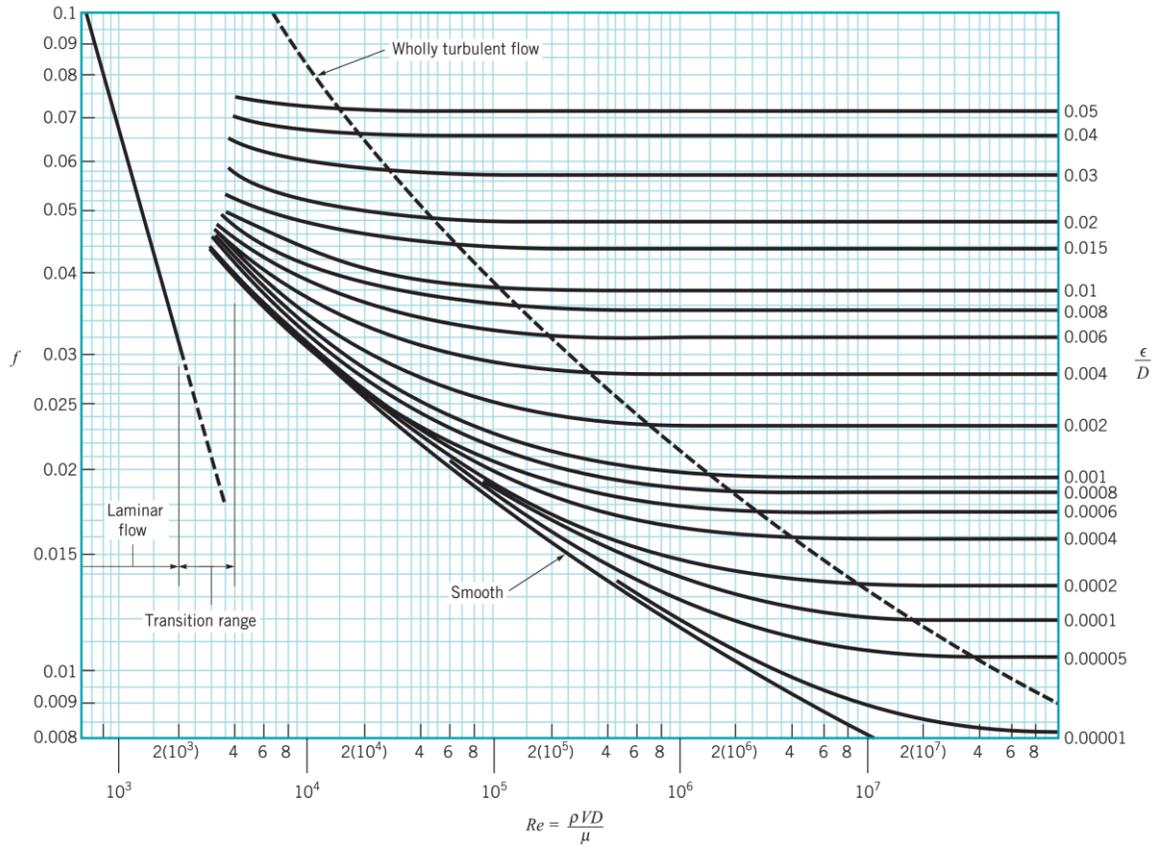
**Gambar 2.9** Aliran pada dinding kasar dan dinding halus (Munson, 2009)

Mayor losses berdasarkan persamaan Darcy-Weisbach berlaku untuk setiap pipa tunak, tak mampu mampat, dan berkembang penuh. Dalam aliran melalui jalur pipa, kerugian juga akan terjadi apabila ukuran pipa, bentuk penampang, atau arah aliran berubah. Kerugian Head ditempat-tempat transisi yang demikian itu dapat dinyatakan secara umum dengan persamaan 2.24.

$$h_l = \frac{f \cdot l v^2}{2 \cdot d \cdot g} \dots \dots \dots (2.24)$$

- Dengan :
- $h_l$  : Head loss (m)
  - $f$  : Koefisien gesekan
  - $v$  : Kecepatan aliran (m/s)
  - $D$  : Diameter dalam pipa (m)
  - $g$  : Percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)
  - $l$  : Panjang pipa (m)

Nilai  $f$  dapat ditentukan dengan mengacu kepada diagram Moody dan diagram kekasaran relatif.



**Gambar 2.10** Diagram Moody (Munson, 2009)

**Tabel 2.1** Koefisien kekasaran pada pipa baru (Munson, 2009)

Pipe	Equivalent Roughness, $\epsilon$	
	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. *minor losses*

*Minor losses* adalah kerugian aliran yang terjadi didalam pipa yang disebabkan oleh komponen-komponen tambahan seperti katup/valve, elbow, perubahan penampang, *elbow*, percabangan Tee, dan lainnya. Dalam kasus ini kerugian minor lebih besar dari kerugian mayor. *Minor losses* dapat dihitung dengan persamaan 2.25.

$$h_l = K_L \cdot v^2 / 2 \cdot g \dots\dots\dots(2.25)$$

- Dengan :
- $h_l$  : Head loss (m)
  - $K_L$  : Koefisien kerugian
  - $v$  : Kecepatan aliran (m/s)
  - $g$  : Percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

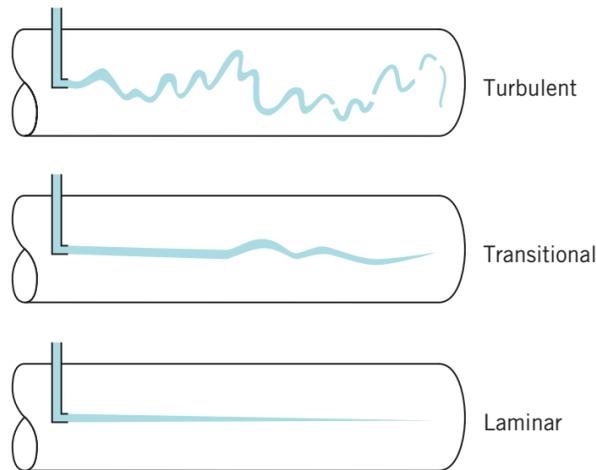
Komponen komponen pipa seperti *elbow*, katup, *tee*, dan lain-lain memiliki koefisien kerugian yang berbeda beda di setiap komponen.

**Tabel 2.2** Koefisien kerugian pada komponen pipa (munson, 2009)

Component	$K_L$	
<b>a. Elbows</b>		
Regular 90°, flanged	0.3	
Regular 90°, threaded	1.5	
Long radius 90°, flanged	0.2	
Long radius 90°, threaded	0.7	
Long radius 45°, flanged	0.2	
Regular 45°, threaded	0.4	
<b>b. 180° return bends</b>		
180° return bend, flanged	0.2	
180° return bend, threaded	1.5	
<b>c. Tees</b>		
Line flow, flanged	0.2	
Line flow, threaded	0.9	
Branch flow, flanged	1.0	
Branch flow, threaded	2.0	
<b>d. Union, threaded</b>		
	0.08	
<b>e. Valves</b>		
Globe, fully open	10	
Angle, fully open	2	
Gate, fully open	0.15	
Gate, 1/4 closed	0.26	
Gate, 1/2 closed	2.1	
Gate, 3/4 closed	17	
Swing check, forward flow	2	
Swing check, backward flow	∞	
Ball valve, fully open	0.05	
Ball valve, 1/2 closed	5.5	
Ball valve, 3/4 closed	210	

### 1.2.4 Rejim aliran

Berdasarkan variasi kecepatan fluida yang mengalir di dalam pipa. Tidak ada gerakan fluida yang langsung bersinggungan dengan dinding pipa, dan kecepatan aliran fluida meningkat menjauhi dinding pipa. Gradien kecepatan dalam pipa mengikuti hukum parabola pada tingkat aliran rendah. Aliran ini disebut aliran laminar. Sedangkan ketika kecepatan aliran yang mengalir di dalam pipa tinggi dan membentuk seperti pusaran aliran ini disebut aliran turbulen. Ada pula yang di sebut dengan aliran transisi aliran ini merupakan aliran peralihan dari aliran laminar ke turbulen (Al-Shemmeri, 2012).



**Gambar 2.11** Pola Aliran (Munson, 2009)

Osborne Reynolds yang pertama kali menemukan dan mengklasifikasikan jenis aliran pada fluida. Untuk menentukan aliran turbulen atau laminar harus dicari terlebih dahulu Reynolds nembernya dengan persamaanya 2.26.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \dots \dots \dots (2.26)$$

Dengan :

- $Re$  : Angka Reynolds
- $\rho$  : Massa jenis fluida (*Density*) ( $\text{kg/m}^3$ )
- $v$  : Kecepatan Fluida (m/s)
- $d$  : Diameter pipa (m)
- $\mu$  : Kekentalan fluida (*Viscosity*) ( $\text{kg/m.s}$ )

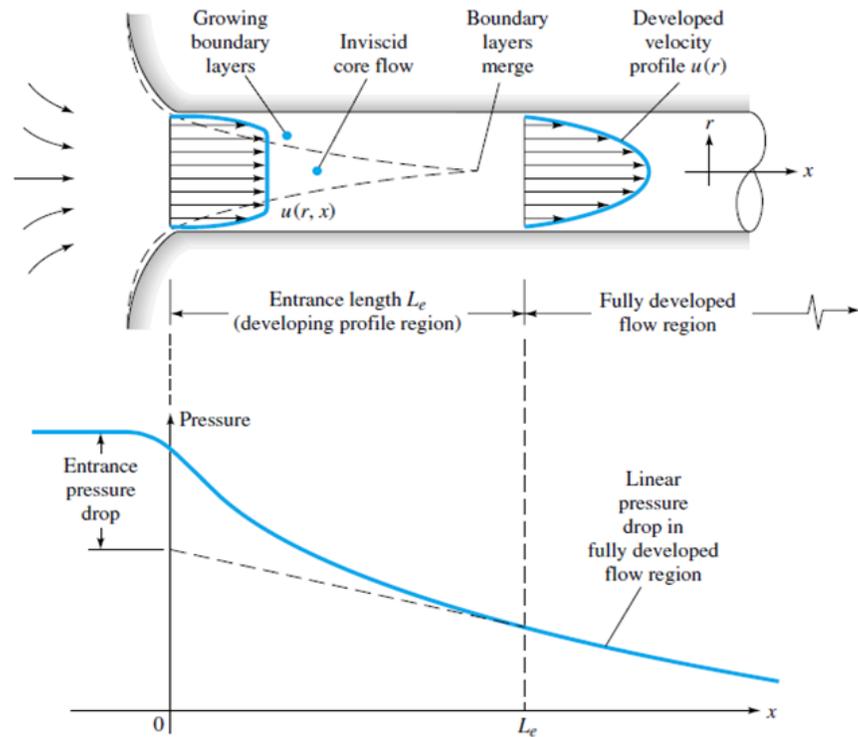
Pada persamaan diatas terdapat variable massa jenis, kecepatan, diameter, dan juga viskositas. Sehingga semakin kecil viskositas maka bilangan Reynolds akan semakin besar. Jika kecepatan aliran semakin kecil maka bilangan Reynolds akan semakin kecil. (White, 1998).

Pembagian jenis aliran menurut Reynold Number yaitu :

- 1) Jika *Reynold Number*  $< 2100$  adalah jenis aliran laminar.
- 2) Jika *Reynold Number*  $2100 \leq Re \leq 4000$  adalah jenis aliran transisi.
- 3) Jika *Reynold Number*  $> 4000$  adalah jenis aliran turbulen.

### **1.2.5 Aliran *Fully Developed***

Aliran berkembang penuh (*Fully developed flow*) adalah aliran di dalam pipa yang profil kecepatan tetap, tidak berubah akibat perubahan jarak. Jadi jika kecepatan diukur pada suatu titik L1, maka kecepatan yang diperoleh adalah V, jika kecepatan diukur pada suatu titik di L2, kecepatan juga akan tetap V. Sedangkan pada aliran yang belum berkembang penuh akan memiliki variasi kecepatan (White, 1998).



**Gambar 2.12** Skema aliran berkembang penuh (White, 1998)

Persamaan aliran berkembang penuh aliran laminar dapat ditulis pada persamaan 2.27 dan 2.28.

$$\frac{l_i}{D} = 0,06 \cdot \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \dots \dots \dots (2.27)$$

$$\frac{l_i}{D} = 0,06 \cdot Re \dots \dots \dots (2.28)$$

Persamaan aliran berkembang penuh aliran turbulen dapat ditulis pada persamaan 2.29 dan 2.30.

$$\frac{l_i}{D} = 4,4 \cdot \left( \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \right)^{1/6} \dots \dots \dots (2.29)$$

$$\frac{l_i}{D} = 4,4 \cdot Re^{1/6} \dots \dots \dots (2.30)$$

Dengan :

- $l_i$  : Entrance length (m)
- D : Diameter pipa (m)

$Re$  : Angka Reynolds

### 1.2.6 Pengukuran Laju Aliran

Pengukuran laju aliran fluida adalah salah satu yang terpenting dalam proses *flow control*. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas aliran fluida, massa laju aliran, dan volume aliran. Aliran pada umumnya diukur berdasarkan besarnya kecepatan fluida yang melewati luas penampang tertentu. Pengukuran laju aliran ditentukan dengan mengukur kecepatan cairan atau perubahan energi kinetiknya. Perbedaan tekanan yang terjadi pada saat cairan melintasi pipa mempengaruhi kecepatan suatu aliran.

Pada prinsipnya besar aliran fluida dapat diukur melalui.

1. Kecepatan (*Velocity*)
2. Berat (massa)
3. Luas bidang yang dilalui
4. Volume

Selain itu kekentalan dan massa jenis sangat berpengaruh terhadap gesekan yang terjadi di dalam pipa. Pemilihan alat ukur tergantung pada ketelitian, kemampuan pengukuran, harga, kemudahan pembacaan, kesederhanaan, dan keawetan alat ukur (Holman, 2012).

Ada beberapa metode untuk melakukan pengukuran laju aliran :

1. Metode *positive - displacement*
2. Metode *flow - obstruction*
3. Pengukuran laju aliran berdasarkan *drag effect*
4. *Magnetic flowmeter*
5. *Hot - wire and hot - film anemometer*
6. Metode *flow - visualization*

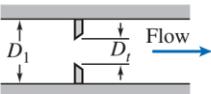
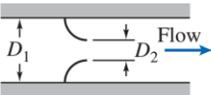
### 1.2.7 Flow Meter Berbasis Beda Tekanan

Pada peralatan pengukuran aliran berbasis perbedaan tekanan, aliran dihitung dengan mengukur *pressure drop* yang terjadi pada aliran yang melwati sebuah penghalang yang dipasang dalam aliran tersebut. Flow meter berbasis perbedaan tekanan ini didasarkan pada persamaan Bernoulli dimana sinyal yang terukur (penurunan tekanan) merupakan fungsi dari kuadrat kecepatan aliran. (Fox dan McDonald, 1994)

Tipe-tipe flowmeter berbasis beda tekanan adalah

- *Orifice plat* (plat orifice)
- *Flow nozzle* (nosel aliran)
- *Venturi tube* (tabung venture)

**Tabel 2.3** Karakteristik *orifice, flow nozzle, venturi* (McDonalds, 2011)

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

### 1.2.8 Plat Orifice

Orifice merupakan salah satu komponen dari perangkat primer (*primary device*) untuk mengukur aliran dengan menggunakan prinsip mengubah kecepatan aliran, aslinya yaitu mengubah luasan yang dilalui aliran fluida tersebut (orifice). Plat orifice dipasang diantara dua sambungan pipa (*flange*). Sebagai peralatan primer, orifice

menahan aliran cairan untuk menghasilkan perbedaan tekanan sepanjang pekat. Keuntungannya adalah tidak ada bagian yang bergerak dan harganya tidak proporsional dengan peningkatan ukuran pipa. Tingkat akurasi semua flowmeter orifice tergantung pada kondisi pemasangan, perbandingan area orifice, dan sifat fisik cairan diukur.



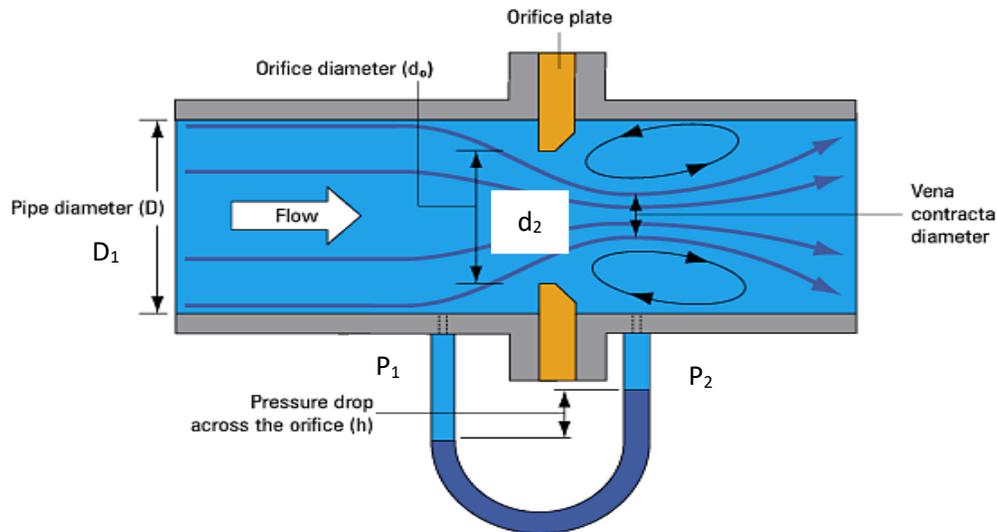
**Gambar 2.13** *Orifice Plat Meter*

Perubahan kecepatan setelah melalui orifice plat tersebut berkaitan dengan perubahan tekanan (*differential pressure*). Perubahan tekanan ini yang kemudian diukur (di *tapping*) dan kemudian diasosiasikan dengan laju aliran. Dalam kaitannya dengan orifice dan pengukuran aliran, umumnya yang diukur adalah *differential pressure*.

Untuk plat orifice ini, fluida yang digunakan adalah jenis cair dan gas. Pada plat orifice ini piringan harus bentuk plat dan tegak lurus pada sumbu pipa. Piringan tersebut harus bersih dan diletakkan pada perpipaan yang lurus untuk memastikan pola aliran yang normal dan tidak terganggu oleh *fitting*, kran/katup, dan peralatan lainnya.

Prinsip dasar pengukuran plat orifice dari suatu penyempitan yang menyebabkan timbulnya suatu perbedaan tekanan pada fluida yang mengalir (Natanael, 2015).

#### A. Prinsip Kerja Plat Orifice



**Gambar 2.14** Prinsip kerja plat orifice

Pada dasarnya orifice berupa plat tipis dengan lubang di bagian tertentu (umumnya di tengah). Fluida yang mengalir melalui pipa ketika sampai pada orifice akan dipaksa untuk melewati lubang pada orifice. Hal itu menyebabkan terjadinya perubahan kecepatan dan tekanan. Titik dimana terjadi kecepatan maksimum dan tekanan minimum disebut *vena contracta*. Setelah melewati *vena contracta* kecepatan dan tekanan akan mengalami perubahan lagi. Dengan mengetahui perbedaan tekanan pada pipa normal dan tekanan pada *vena contracta*, laju aliran volume dan laju aliran massa dapat diperoleh dengan persamaan Bernoulli (Natanael, 2015).

#### 1.2.9 Pengukuran Perbedaan Tekanan

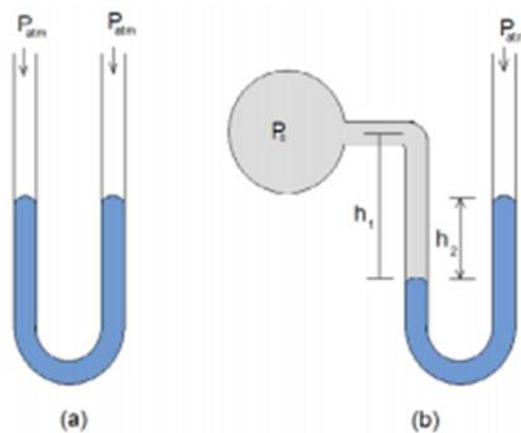
Perbedaan tekanan yang terjadi pada Orifice dapat diukur dengan menggunakan manometer U. Manometer adalah peralatan pengukuran tekanan yang menggunakan kolom fluida dalam tabung vertical atau miring.

Jenis-jenis manometer adalah sebagai berikut :

- A. Manometer tabung U
- B. Manometer miring

a. Manometer tabung U

Di dalam pengukuran beda tekanan manometer yang paling banyak digunakan adalah manometer U. selain menggunakan manometer, beda tekanan juga dapat diukur dengan *pressure differential* lain yang menggunakan instrument-instrumen elektronik.



**Gambar 2.15** Manometer tabung U (Hewakandaby, 2012)

Pada gambar 2.19 tabung U sebagian diisi dengan air raksa untuk mengukur tekanan relative terhadap tekanan atmosfer atau perbedaan tekanan pada dua titik. Ketika kedua ujung dari tabung U terbuka dan bersentuhan dengan atmosfer maka tinggi air raksa dalam tabung U akan sejajar. Pada gambar 5.b menunjukkan bahwa salah satu ujung dari tabung U terbuka dan bersentuhan dengan atmosfer sedangkan yang lainnya terhubung ke suatu vessel dengan tekanan yang berbeda dari tekanan atmosfer, menyebabkan ketinggian air raksa dalam kolom akan berbeda.

Ketika fluida dalam bola memiliki massa jenis  $\rho_1$  dan massa jenis dari air raksa  $\rho_m$ . Serta menganggap tekanan di dalam bola  $P_0$ . Ketika kolom air raksa mencapai keseimbangan.

Persamaan dapat dilihat pada persamaan 2.31 dan 2.32.

$$P_0 + h_1 \cdot \rho_1 \cdot g = P_{atm} + h_2 \cdot \rho_m \cdot g \dots\dots\dots (2.31)$$

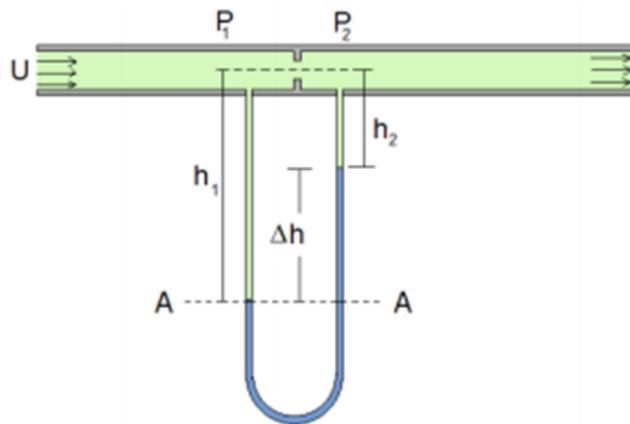
$$P_0 - P_{atm} = h_2 \cdot \rho_m \cdot g - h_1 \cdot \rho_1 \cdot g \dots\dots\dots (2.32)$$

Manometer dapat digunakan untuk mengukur perbedaan tekanan antara dua titik. mempertimbangkan pengaturan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12 Dengan massa jenis fluida di dalam pipa adalah  $\rho_L$  dan massa jenis air raksa adalah  $\rho_m$ , serta tekanan pada dua kolom yang lengan manometer terhubung ke pipa adalah  $P_1$  dan  $P_2$  ( $P_1 > P_2$ ).

Persamaan beda tekanan dapat dilihat pada persamaan 2.33 dan 2.34.

$$P_1 + h_1 \cdot \rho_L \cdot g = P_2 + h_2 \cdot \rho_L \cdot g + \Delta h \cdot \rho_m \cdot g \dots\dots\dots (2.33)$$

$$P_1 - P_2 = \Delta h \cdot \rho_L \cdot g - (\rho_m / \rho_L - 1) \dots\dots\dots (2.34)$$

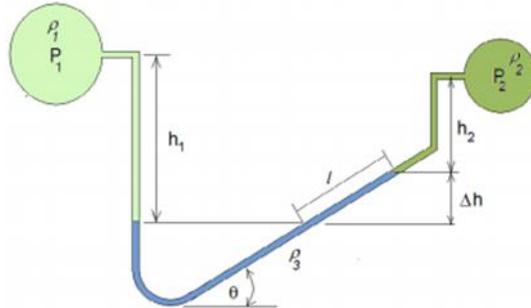


**Gambar 2.16** Pengukuran beda tekanan menggunakan manometer (Hewakandamby, 2012)

b. Manometer tabung miring

Masalah yang umum dihadapi dalam pengukuran beda tekanan adalah jika kecepatan aliran rendah maka akan menghasilkan ketinggian kolom air manometer

yang rendah pula sehingga sulit diamati. Dalam keadaan demikian salah satu pilihannya adalah menggunakan manometer tabung miring. Memiringkan manometer dapat meningkatkan akurasi pengukuran.



**Gambar 2.17** Manometer tabung miring (Hewakandaby, 2012)

Persamaan perbedaan tekanan dapat dilihat pada persamaan 2.35 dan 2.36.

$$P_1 + h_1 \cdot \rho_1 \cdot g = P_2 + h_2 \cdot \rho_2 \cdot g + l \cdot \sin \theta \cdot \rho_3 \cdot g \dots\dots\dots (2.35)$$

$$P_1 - P_2 = -(h_1 \cdot \rho_1 - h_2 \cdot \rho_2) \cdot g + l \cdot \sin \theta \cdot \rho_3 \cdot g \dots\dots\dots (2.36)$$

Jika fluida di dalam pipa adalah fluida yang sama ( $\rho_1 = \rho_2$ ) maka persamaan dapat di tulis seperti persamaan 2.37.

$$P_1 - P_2 = l \cdot \sin \theta \cdot \rho_3 \cdot g - \Delta h \cdot \rho_1 \cdot g \dots\dots\dots (2.37)$$

Dengan menggunakan hubungan dari  $l \cdot \sin \theta = \Delta h$  maka persamaan dapat ditulis seperti persamaan 2.38.

$$P_1 - P_2 = l \cdot \sin \theta \cdot g(\rho_3 - \rho_1) \dots\dots\dots (2.38)$$