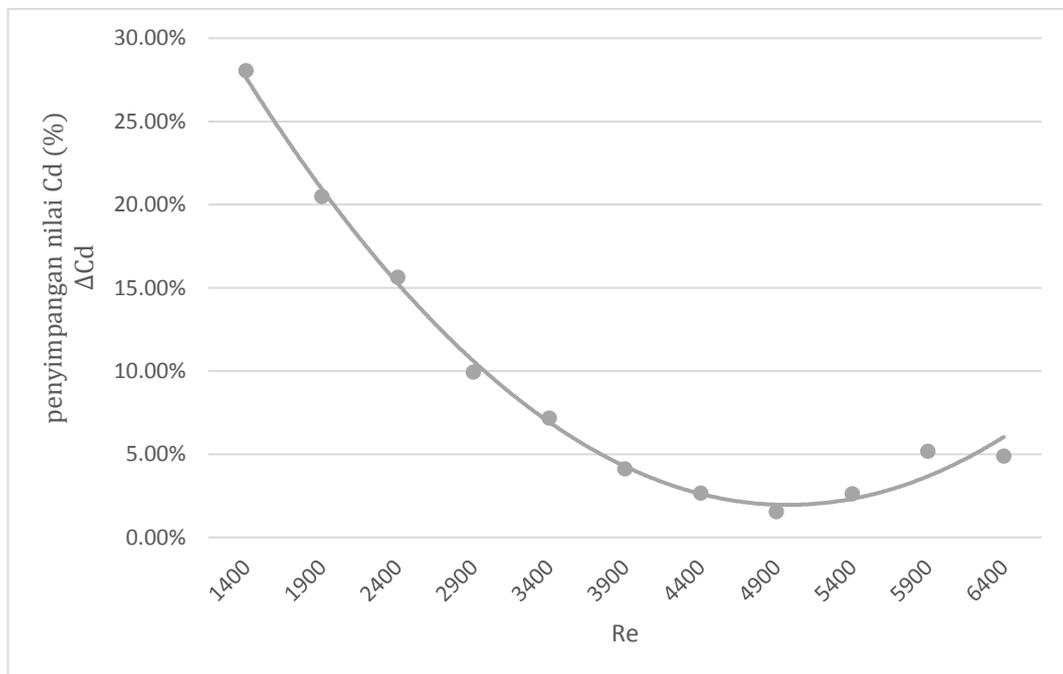


BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Kurniawan (2017) melakukan pengujian *orifice plate meter* sebagai alat ukur debit air dengan kapasitas 7 LPM pada pipa $\frac{1}{2}$ inch dan pipa $\frac{3}{4}$ inch (rasio $\beta = d/D = 0,23$). Pada pengujian ini diameter orifice yang digunakan pada pipa $\frac{1}{2}$ inch yaitu 4,3 mm dan untuk diameter orifice yang digunakan pada $\frac{3}{4}$ 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 hingga 7 LPM dengan kenaikan 0,5 LPM. Dari penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan (2017) didapatkan nilai deviasi *coefficient of discharge* yang dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Grafik Re terhadap ΔC_d (Kurniawan, 2017).

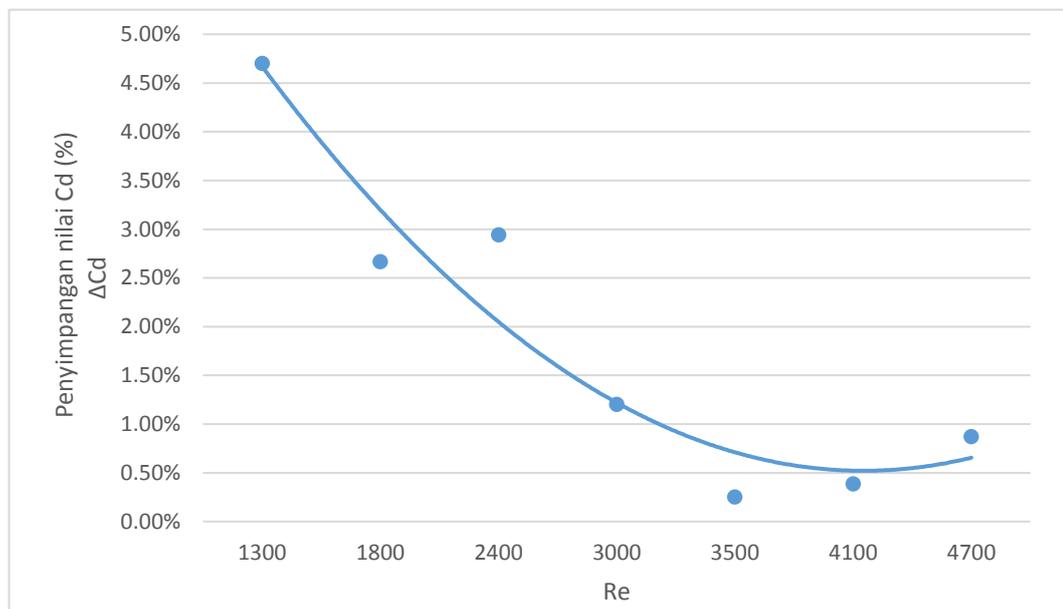
Keterangan :

$$\Delta C_d = 0,005Re^2 - 0,0818Re + 0,353$$

$$R^2 = 0,9933$$

Grafik Re terhadap ΔC_d yang ditunjukkan pada gambar 2.1 menunjukkan nilai penyimpangan *coefficient of discharge* terus menurun dari nilai awal 28,04 % sampai yang paling rendah 1,53% mendekati nilai 0% kemudian berfluktuasi dengan kenaikan dan penurunan yang tidak signifikan . Nilai deviasi tertinggi yaitu pada bilangan Reynolds 1400 dan yang terendah 4900.

Saputra (2017) juga melakukan pengujian *orifice plate meter* sebagai alat ukur debit air dengan kapasitas 11 LPM pada pipa $\frac{1}{2}$ inch dan pipa $\frac{3}{4}$ inch, namun dengan menggunakan rasio $\beta = d/D = 0,16$. Pada pengujian ini diameter orifice yang digunakan pada pipa $\frac{1}{2}$ inch yaitu 2,9 mm dan untuk diameter orifice yang digunakan pada $\frac{3}{4}$ inch yaitu 3,4 mm. Metode yang digunakan oleh Saputra (2017) dengan mengukur nilai beda tekanan pada sisi masuk orifice dan sisi keluar orifice. Nilai beda tekanan diukur tiap 1 hingga 6 LPM dengan kenaikan 0,5 LPM. Dari penelitian ini didapatkan nilai deviasi *coefficient of discharge* yang dapat dilihat pada gambar 2.1.



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

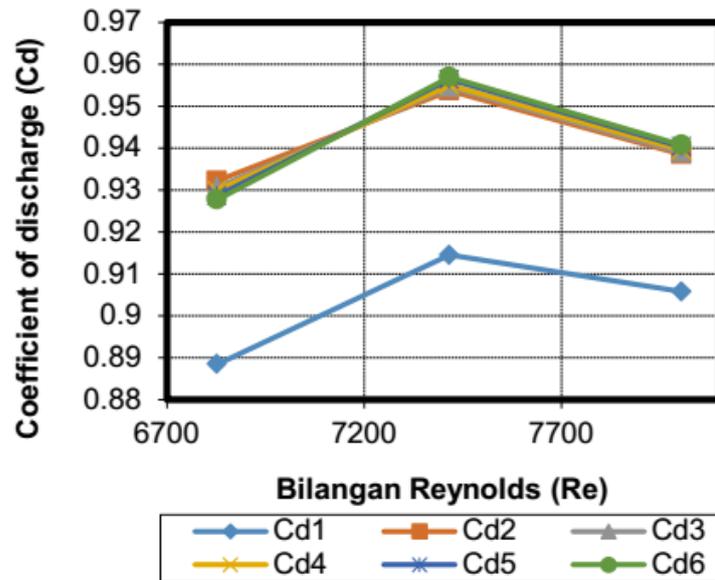
Keterangan :

$$\Delta C_d = 0,0016Re^2 - 0,0195Re + 0,00646$$

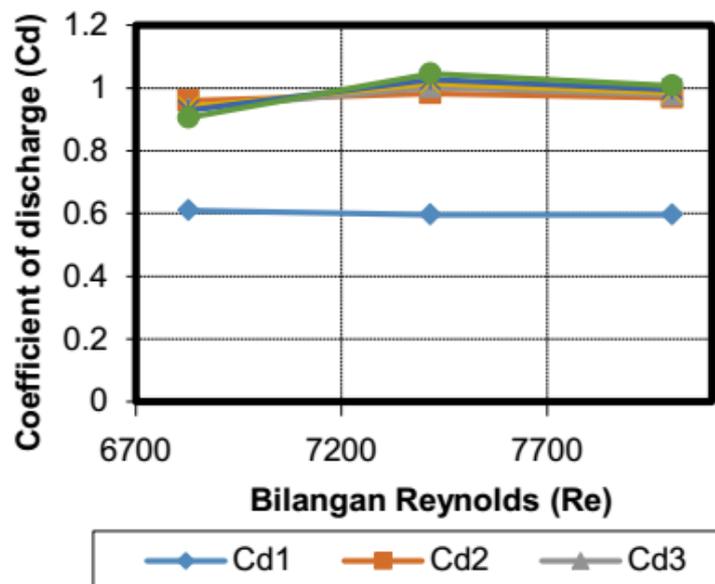
$$R^2 = 0,9156$$

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada gambar 2.2 nilai deviasi *coefficient of discharge* 4,70% pada bilangan Reynolds 1300 mengalami penurunan

hingga angka Reynolds 2400 kembali naik setelah itu nilai deviasi *coefficient of discharge* turun kembali hingga bilangan Reynolds 3500 dengan nilai *coefficient of discharge* mencapai titik terendah yaitu 0,25%, kemudian mengalami kenaikan pada angka Reynolds ≥ 4100 .



Gambar 2. 3 Grafik Re terhadap Cd untuk d = 5,4 mm (Ghurri, 2016).

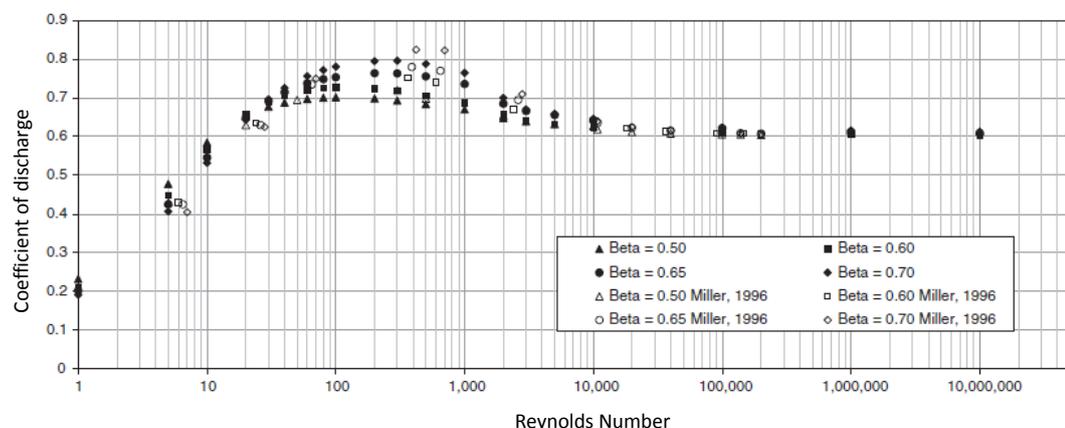


Gambar 2. 4 Grafik Re terhadap Cd untuk d = 10,8 mm (Ghurri, 2016).

Ghurri dkk (2016) melakukan pengujian orifice flow meter dengan kapasitas aliran rendah. Ainun Ghurri dkk menggunakan plat orifice yang berbahan logam dengan ketebalan 10 mm. Untuk rasio diameter Ainun Ghurri dkk menggunakan 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; dan 0,8. Pengujian menggunakan air dengan aliran yang memiliki angka Reynolds dengan kisaran 6827,55 hingga 8004,2. Pada pengujian yang dilakukan Ghurri fluida yang mengalir melewati orifice diukur tekanan pada area *upstream* dan *downstream*. Ghurri dkk menggunakan 5 titik *upstream* untuk pengukuran beda tekanan yaitu h_{up-1} hingga h_{up-5} , sama seperti area *upstream* pada area *downstream* terdapat 5 titik pengukuran beda tekanan yaitu h_{down-1} hingga h_{down-5} . Kapasitas aktual diketahui melalui secara langsung pada outlet penampung. Untuk kapasitas teoritis diketahui melalui perhitungan menggunakan persamaan Bernouli yang telah dimodifikasi. Hasil dari penelitian Ainun Ghurri dkk semakin besar kapasitas dari aliran dan diameter rasio maka semakin kecil *irrecoverable pressure drops*. Perhitungan kapasitas teoritis menggunakan beda tekanan ($h_{down-1} - h_{up-1}$) menghasilkan kapasitas teoritis yang paling mendekati kapasitas aktual yang terukur. Nilai C_d (*coefficient of discharge*) pada pengujian yang dilakukan Ghurri nilainya bekisar 0,3535 – 1,3374 dimana nilai C_d terendah ada pada $d = 14,4$ mm di posisi *pressure tab* h_{down-1} , sedangkan nilai C_d terbesar ada pada posisi h_{down-5} . Berdasarkan nilai C_d letak *pressure tab* yang baik berada pada h_{down-2} dengan nilai $C_d = 1,0073$ pada $d = 14,4$ mm ($Q_{aktual} = 6,3$ liter/menit). Grafik C_d terhadap Re Dapat dilihat pada gambar 2.3 dan 2.4

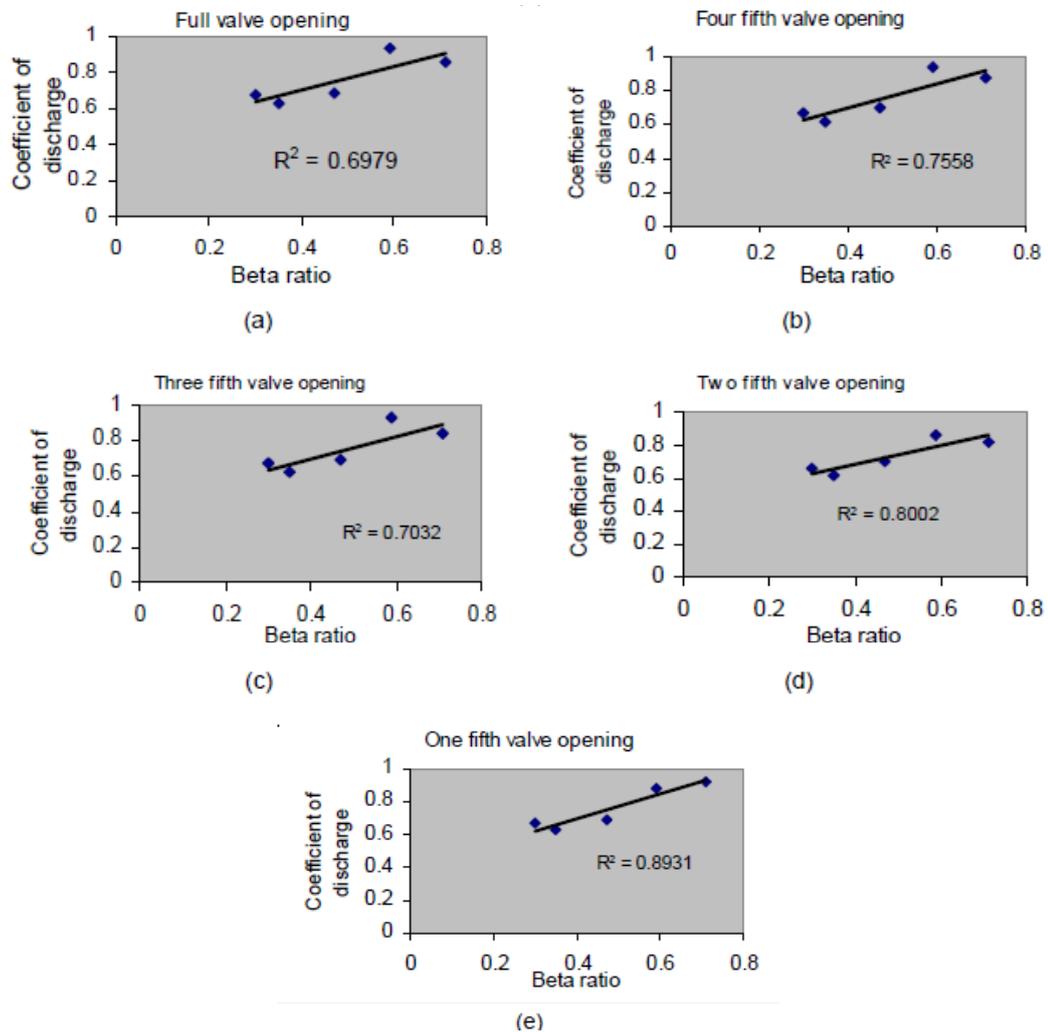
Hollingshead dkk (2011) pernah melakukan penelitian mengenai performa koefisien curah dari venturi, plat orifice konsentris standar, *V-cone*, dan *wedge flow meters* pada angka Reynolds rendah. Pada penelitian plat orifice konsentris standar menggunakan rasio 0,5; 0,6; 0,65 dan 0,7 dengan diameter inlet 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 *coefficient of discharge* ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Grafik Re - C pada plat orifice konsentris (Hollingshead, 2011).

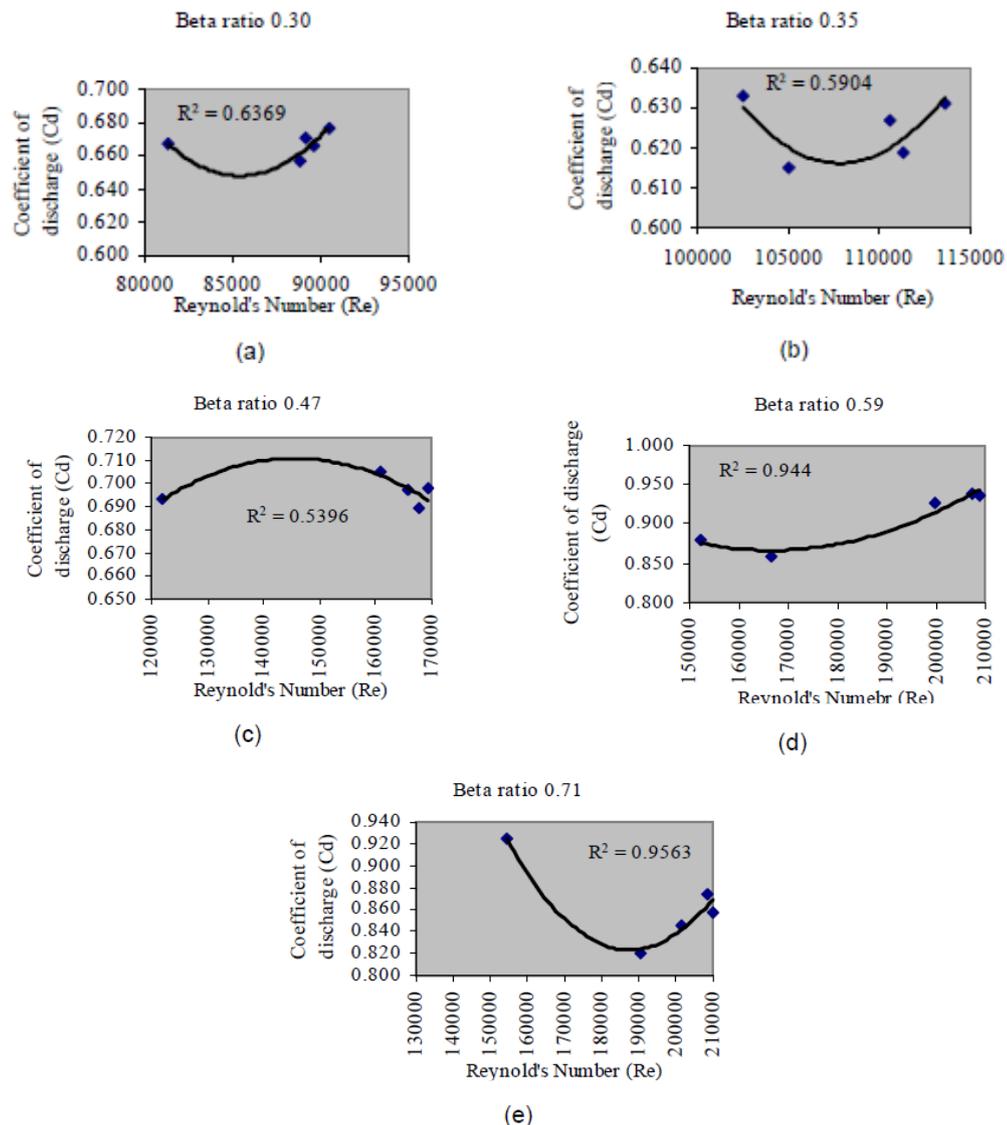
Rahman dkk (2009) melakukan penelitian mengenai pengaruh rasio beta dan angka Reynolds terhadap koefisien curah pada *orifice meter*. M. M. Rahman dkk menggunakan 5 orifice dengan diameter lubang 2,54 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, dan 6 cm yang dipasang secara konsentris pada pipa berukuran 8,5 cm. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan *valve opening* pada pipa *discharge*. Pada pengujian dengan kondisi katup terbuka penuh, terbuka 4/5, terbuka 3/5, terbuka 2/5 dan terbuka 1/5. Hasil pada setiap kasus nilai Cd memiliki hubungan linier positif dengan rasio β , dimana koefisien determinasi (R^2) berbeda untuk setiap lima kondisi pembukaan katup. Nilai koefisien determinasi (R^2) dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Grafik Rasio β Terhadap C_d (Rahman, 2009).

- (a) Katup terbuka penuh. (d) Katup terbuka 2/5.
 (b) Katup terbuka 4/5. (e) Katup terbuka 1/4.
 (c) Katup terbuka 3/5.

Gambar 2.6 menunjukkan bahwa nilai hubungan yang linear dengan rasio beta. Semakin kecil katub dibuka semakin besar nilai koefisien determinasi (R^2) kecuali pada gambar 2.6c katub terbuka 3/5 . Dapat dikatakan bahwa nilai C_d lebih sensitive terhadap rasio beta pada debit yang rendah. Untuk efek angka Reynolds terhadap koefisien curah dapat dilihat pada gambar 2.7.

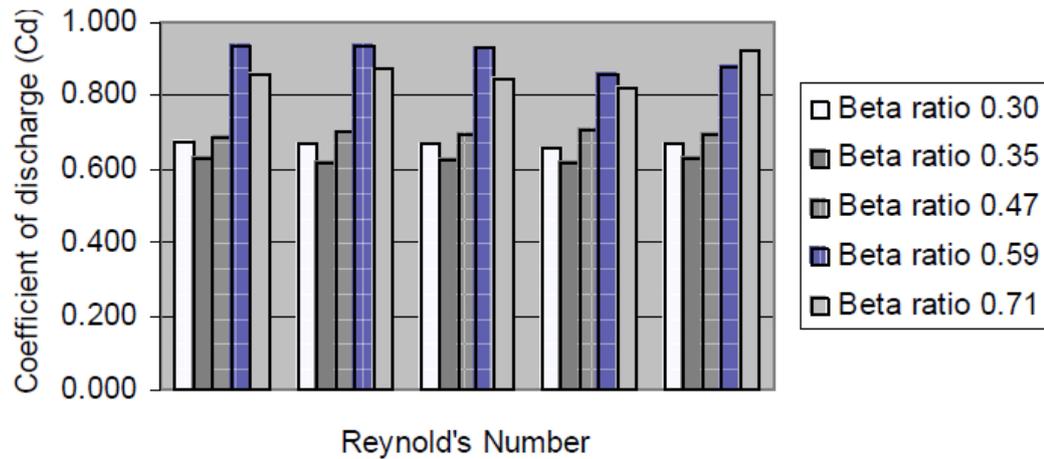


Gambar 2. 7 Grafik Re terhadap Cd (Rahman , 2009).

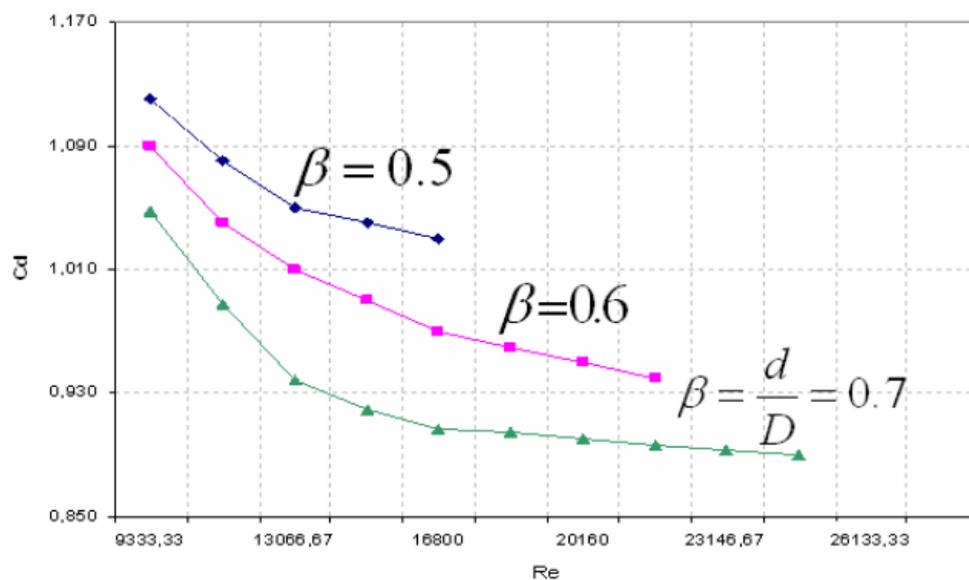
- (a) Rasio Beta 0,3. (d) Rasio Beta 0,59
 (b) Rasio Beta 0,35. (e) RASio Beta 0,71
 (c) Rasio Beta 0,47 .

Gambar 2.7 menunjukkan semua kasus kecuali rasio beta 0,47 yang menghasilkan bentuk grafik yang cembung, dimana nilai Cd yang awalnya rendah lalu naik setelah itu kembali turun. Nilai Cd untuk rasio yang lain menurun dengan kenaikan Re sampai mencapai nilai minimum dan kemudian mulai naik lagi. Hubungan yang kuat dapat dilihat pada rasio beta yang lebih tinggi (0,71) dengan nilai R^2 maksimum 0,9563. Namun, nilai Cd berubah dengan cepat ketika rasio beta

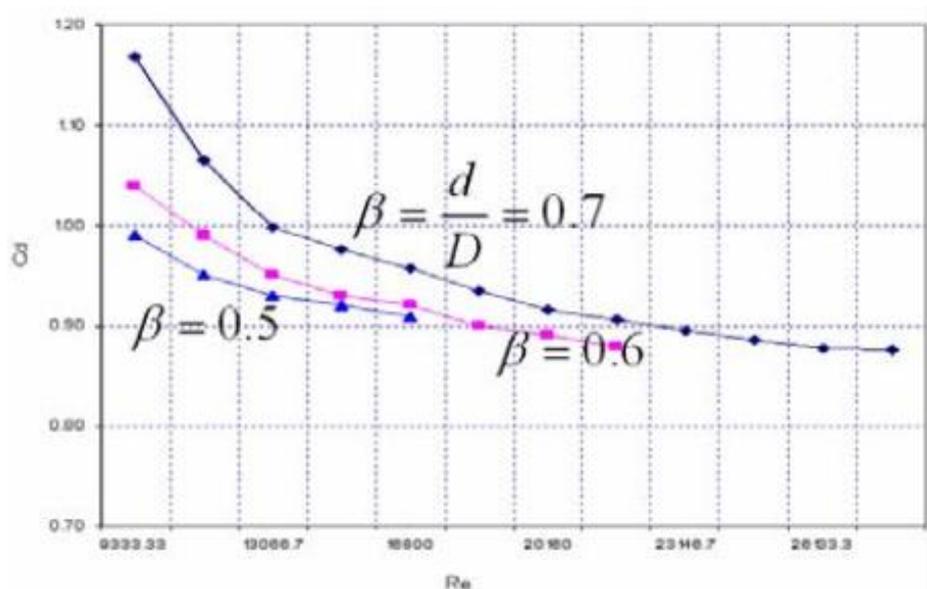
adalah 0,71. Interpretasi gabungan data eksperimen dari diagram batang menunjukkan bahwa orifice meter dengan rasio beta 0,60 dapat digunakan untuk pengukuran aliran dalam pipa yang efisien, ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Diagram batang Rasio β terhadap Cd (Rahman,2009)



Gambar 2. 9 Grafik Re - Cd untuk plat orifice tebal 10 mm (Septiadi, 2008).



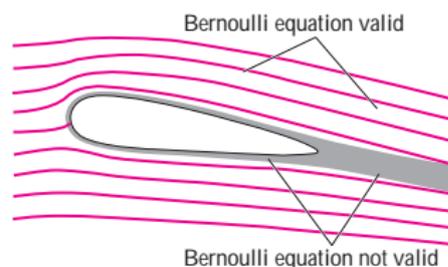
Gambar 2.10 Grafik Re - Cd untuk plat orifice tebal 20 mm (Septiadi, 2008).

Septiadi (2008) pernah melakukan studi eksperimental mengenai pengaruh variasi tebal dan posisi pengukuran beda tekanan aliran yang melintasi plat orifice. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan plat orifice dan pipa berbahan akrilik. Plat orifice yang digunakan dibuat dengan memberikan sedikit bevel pada bagian inlet dengan rasio diameter orifice 0,5; 0,6; dan 0,7 dengan tebal plat orifice 10 mm dan 20 mm. Penelitian ini dilakukan 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 berkisar antara 0,88 sampai 1,17. Untuk nilai Cd plat orifice tebal

20 mm terdapat perbedaan dalam tingkatan letak rasio 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. Nilai C_d plat orifice tebal 20 mm untuk rasio diameter 0,5 nilainya semua >1 sedangkan untuk rasio 0,6 dan 0,7 ada yang <1 dan >1 . Fluktuasi C_d yang besar tetap berada pada nilai Reynolds yang kecil dan pahanilai Reynolds yang besar fluktuasi mulai mendekati konstan. Grafik C_d terhadap angka Reynolds dapat dilihat pada gambar 2.9. dan gambar 2.10

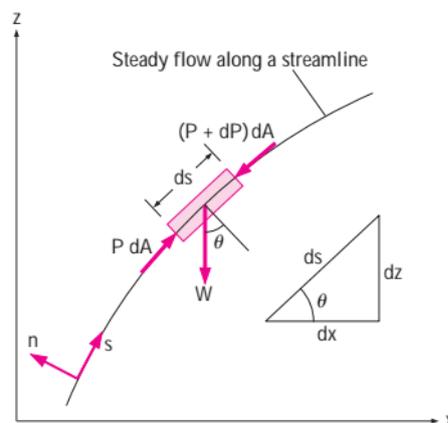
2.2 Dasar Teori

2.2.1 Persamaan Bernoulli



Gambar 2. 11 Area persamaan Bernoulli (Cengel, 2006)

Persamaan Bernoulli adalah suatu hubungan antara tekanan, kecepatan dan elevasi. Persamaan Bernoulli berlaku dialiran steady, aliran tak mampat dan aliran dimana tidak ada gesekan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11 (Cengel, 2006).



Gambar 2. 12 Gaya yang bekerja pada partikel fluida sepanjang streamline (cengel, 2006)

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

$$\sum F_s = m \cdot a_s \dots\dots\dots(2.1)$$

Di daerah aliran dimana gesekan dapat diabaikan, gaya yang bekerja pada arah s adalah tekanan yang menekan pada kedua sisi dan berat partikel diarah s seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12. Maka persamaan 2.1 dapat dituliskan seperti persamaan 2.2.

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

Dimana θ adalah sudut antara garis normal *streamline* terhadap garis vertikal sumbu z pada titik tersebut. $m = \rho \cdot v = \rho \cdot dA \cdot ds$ adalah massa, $W = m \cdot g = \rho \cdot g \cdot dA \cdot ds$ adalah berat partikel fluida dan $\sin\theta = \frac{dz}{ds}$. 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 dihilangkan lalu disederhanakan, sehingga persamaan dapat ditulis seperti persamaan 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 ρ maka persamaan dapat ditulis seperti persamaan 2.5.

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

Setelah itu persamaan 2.5 di integralkan, sehingga persamaan menjadi seperti persamaan 2.6.

Untuk aliran steady :

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

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

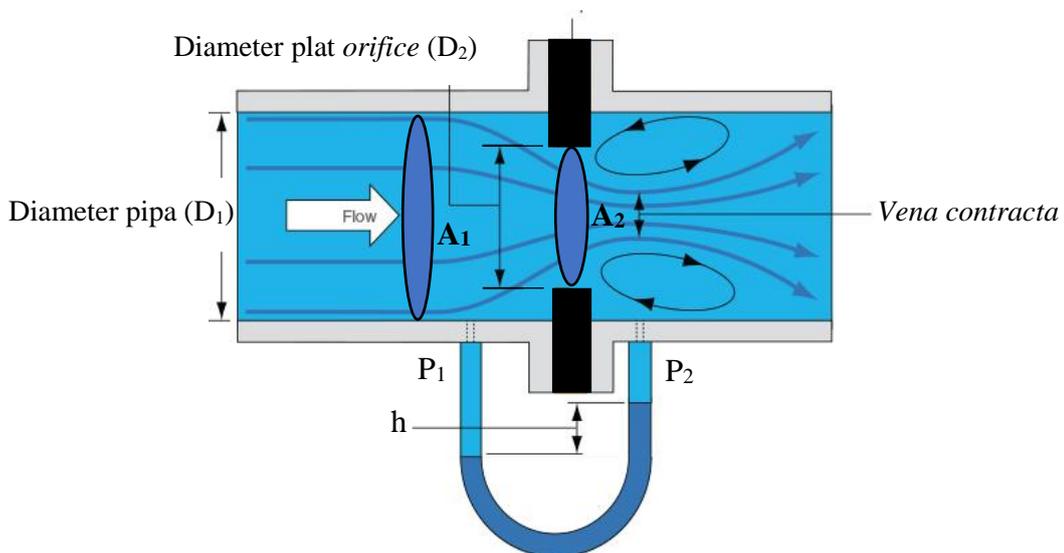
Dimana $\int \frac{dP}{g \cdot \rho} + \frac{v^2}{g \cdot 2} + z = \text{konstan}$ disepanjang *streamline*.

Untuk aliran steady dan tak mampat :

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z = \text{konstan} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\frac{P}{g \cdot \rho} + \frac{v^2}{g \cdot 2} + z = \text{konstan} \dots\dots\dots(2.9)$$

2.2.2 Penerapan Persamaan Bernoulli Pada *Orifice Plate Meter*



Gambar 2. 13 Skema *Orifice Plate Meter* (Al-Shemmeri, 2012)

Penentuan laju aliran dapat dilakukan dengan menerapkan persamaan Bernoulli dan persamaan kontinuitas (Santosa, 2003).

Persamaan kontinuitas untuk penampang 1 dan 2 pada *orifice plate meter* dapat dilihat pada persamaan 2.10. Untuk penampang 1 dan 2 dapat dilihat pada gambar 2.13.

$$\dot{m}_{wtr} = \rho_{wtr,1} \cdot A_{wtr,1} \cdot v_1 = \rho_{wtr,2} \cdot A_{wtr,2} \cdot v_2 \dots\dots\dots(2.10)$$

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_2 = luas penampang *orifice* (m²)
- A_1 = luas penampang pipa (m²)
- v_1 = kecepatan alir fluida pada pipa (m/s)
- v_2 = kecepatan alir fluida pada *orifice* (m/s)

Air yang masuk *orifice plate meter* adalah fluida tak mampat sehingga menjadi persamaan 2.11 dan 2.12.

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_{wtr} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} \cdot v_2 \dots\dots\dots(2.12)$$

Dengan asumsi proses adiabatik, tanpa gesekan, aliran tunak, fluida tak mampat, dan beda potensial diabaikan, maka persamaan Bernoulli menjadi persamaan 2.13 dan 2.14.

$$P_1/\rho_{wtr} + v_1^2/2 = P_2/\rho_{wtr} + v_2^2/2 \dots\dots\dots(2.13)$$

$$P_1 - P_2 = \rho_{wtr}/2 \cdot (v_2^2 - v_1^2) \dots\dots\dots(2.14)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.12) ke persamaan (2.14), maka menjadi persamaan baru yang dapat dilihat pada persamaan 2.15, persamaan 2.16 dan 2.17.

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

$$v_2^2 = \frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho_{wtr} \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]} \dots\dots\dots (2.16)$$

$$v_2 = \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}}} \cdot \sqrt{(P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.17)$$

Persamaan laju aliran volume ideal dapat dilihat pada persamaan 2.18.

$$\dot{V}_{ideal} = A_2 \cdot v_2 \dots\dots\dots (2.18)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.17) ke persamaan (2.18), laju aliran volume ideal menjadi persamaan 2.19.

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

Hubungan antara laju aliran volume air ideal dan aktual dapat di tulis seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.20.

$$\dot{V}_{aktual} = Cd \cdot \dot{V}_{ideal} \dots\dots\dots (2.20)$$

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

\dot{V}_{aktual} didapat dengan mensubstitusikan persamaan (2.19) ke persamaan (2.20). Persamaan dapat dilihat pada persamaan 2.21.

$$\dot{V}_{aktual} = \frac{Cd \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}}} \cdot \sqrt{(P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.21)$$

Bilangan Re aliran dapat ditulis seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.22.

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}_{wtr}}{\pi \cdot D_1 \cdot \mu} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{aktual} \cdot \rho_{wtr}}{\pi \cdot D_1 \cdot \mu} \dots\dots\dots (2.22)$$

Untuk menghitung laju aliran volume fluida harus ditentukan *coefficient of discharge* (Cd) yang merupakan fungsi dari bilangan Re.

Persamaan dapat di tulis seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.23.

$$\dot{V}_{aktual} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot Re \dots\dots\dots (2.23)$$

Persamaan (2.23) disubstitusikan ke persamaan (2.21) menjadi persamaan 2.24.

$$\frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot Re = \frac{Cd \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{(P_1 - P_2)} \dots\dots\dots (2.24)$$

Sehingga koefisien curah (Cd) menjadi persamaan baru.

Persamaan koefisien curah (Cd) dapat dilihat pada persamaan 2.25.

$$Cd = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_{wtr}}{4 \cdot \rho_{wtr}} \cdot \frac{Re}{\sqrt{(P_1 - P_2)}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}{A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_{wtr}}}} \dots\dots\dots (2.25)$$

Untuk menghitung beda tekanan sisi masuk dan keluar orifice menggunakan manometer digital mangka nilai dari beda tekanan akan langsung muncul di layar manometer tersebut.

2.2.3 Coefficient of Discharge

Coefficient of discharge merupakan perbandingan antara debit aktual dengan debit teoritis (santosa, 2003). *Coefficient of discharge* nilai nya tidak selalu konstan. Besar nya nilai *Coefficient of discharge* ditentukan dari kerugian- kerugian gesekan akibat kekasaran bagian dalam pipa, geometri pipa, serta komponen-komponen tambahan pada pipa seperti *elbow*. *Tee*, valve, dll.

Persamaan *coefficient of discharge* dapat dilihat pada persamaan 2.26.

$$Cd = \frac{\dot{V}_{aktual}}{\dot{V}_{ideal}} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dengan :

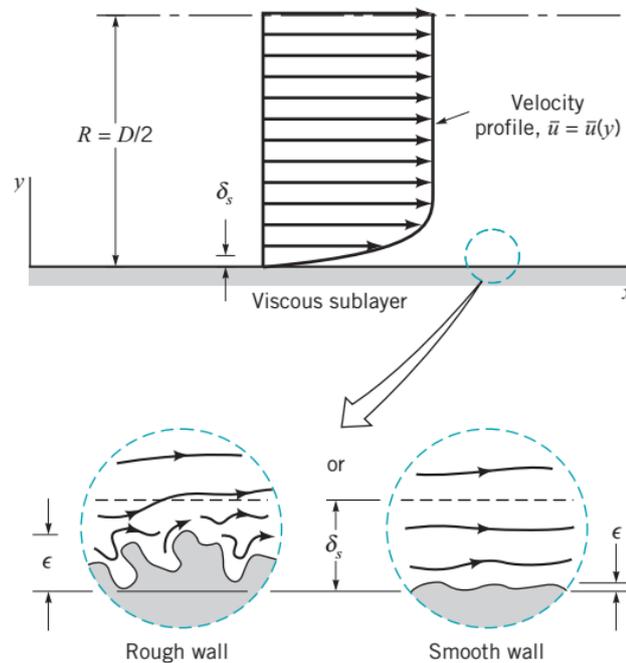
$$\begin{aligned} \dot{V}_{aktual} &= \text{Debit actual yang terbaca di rotameter (m}^3/\text{s)} \\ \dot{V}_{ideal} &= \text{Debit yang dihitung menggunakan persamaan} \\ & \quad 2.19 \text{ (m}^3/\text{s)} \end{aligned}$$

2.2.4 Head Loss (Rugi Aliran)

Pada sistem perpipaan pasti terdapat rugi aliran. Banyak faktor yang menyebabkan terjadi rugi aliran seperti kekasaran permukaan pipa, *fitting*, katup pada system perpipaan dan seberapa jauh fluida dialirkan. Rugi aliran adalah berkurangnya massa, volume dan kecepatan suatu fluida yang mengalir di dalam penyalur fluida. Terdapat 2 jenis rugi aliran.

1. Mayor losses

Mayor losses adalah rugi aliran yang terjadi akibat dari gesekan fluida dengan dinding pipa yang panjang dan lurus. Besar kecilnya gesekan yang terjadi di dalam pipa tergantung dari kekasaran permukaan pipa.



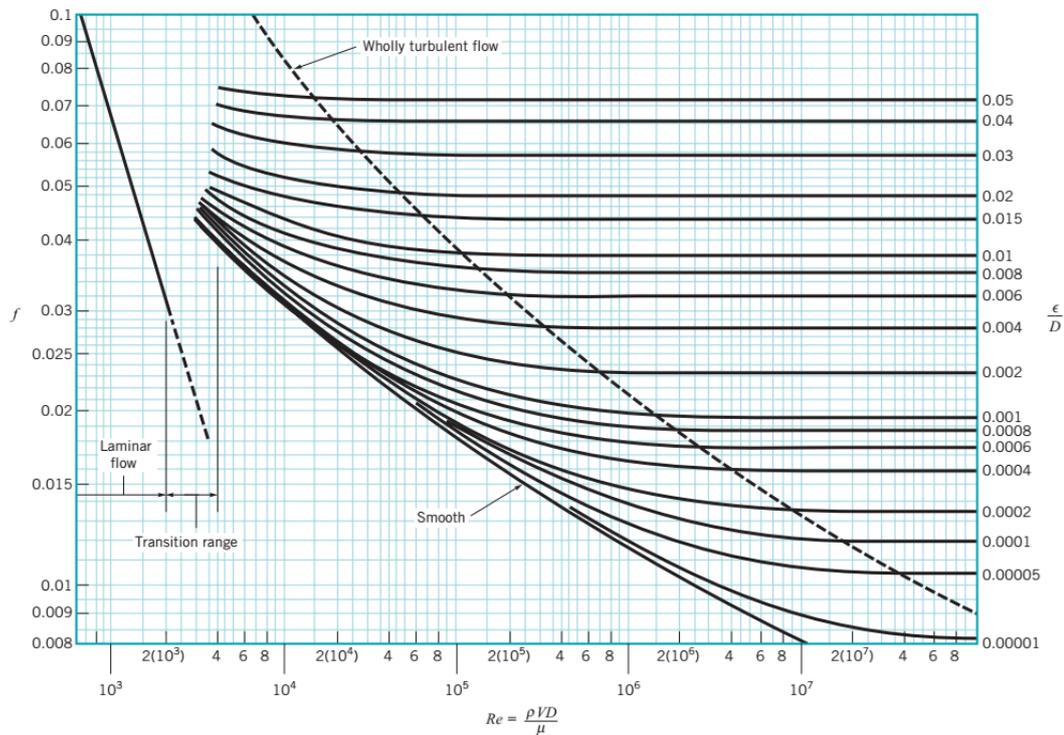
Gambar 2. 14 Aliran didekat dinding kasar dan halus (Munson,2009).

Mayor losses dapat dihitung dengan persamaan Darcy-Weisbach. Persamaan Darcy-Weisbach berlaku untuk setiap aliran pipa tunak, tak mampu mampat dan berkembang penuh. Persamaan ini dapat digunakan untuk pipa horizontal maupun pipa dengan kemiringan tertentu. Persamaan Darcy-Weibach dapat dilihat pada persamaan 2.26.

$$h_l = f \cdot lv^2 / 2Dg \dots\dots\dots (2.27)$$

- Dengan :
- h_l : Head loss (m)
 - f : Koefisien gesekan
 - v : Kecepatan aliran (m/s)
 - D : Diameter dalam pipa (m)
 - g : Percepatan gravitasi bumi (m/s²)
 - l : Panjang pipa (m)

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



Gambar 2. 15 Diagram Moody (Munson,2009)

Tabel 2. 1 Koefisien kekasaran pada pipa baru (Munson,2009)

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)

2. *Minor losses*

Minor losses adalah rugi aliran yang disebabkan komponen komponen tabahan seperti perubahan penampang, adanya katup, *elbow* dan lainnya. *Minor losses* dapat dihitung dengan persamaan 2.27.

$$h_l = K_L \cdot v^2 / 2g \dots\dots\dots (2.8)$$

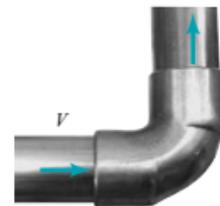
Dengan :

- h_l : Head loss (m)
- K_L : koefisien tahanan
- v : Kecepatan aliran (m/s)
- g : Percepatan gravitasi bumi (m/s²)

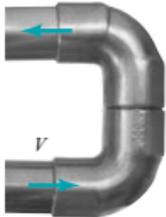
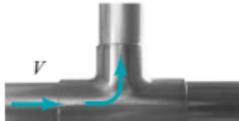
Komponen komponen pipa seperti *elbow*, katub, *tee*, dan lain lain memiliki koefisien kerugian yang berbeda beda tiap komponen.

Tabel 2. 2 Koefisien kerugian pada komponen pipa (munson, 2009).

Component	K_L
a. Elbows	
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



Tabel 2. 2 Koefisien kerugian pada komponen pipa (lanjutan).

Component	K_L	
b. 180° return bends		
180° return bend, flanged	0.2	
180° return bend, threaded	1.5	
c. Tees		
Line flow, flanged	0.2	
Line flow, threaded	0.9	
Branch flow, flanged	1.0	
Branch flow, threaded	2.0	
d. Union, threaded	0.08	
*e. Valves		
Globe, fully open	10	
Angle, fully open	2	
Gate, fully open	0.15	
Gate, $\frac{1}{4}$ closed	0.26	
Gate, $\frac{1}{2}$ closed	2.1	
Gate, $\frac{3}{4}$ closed	17	
Swing check, forward flow	2	
Swing check, backward flow	∞	
Ball valve, fully open	0.05	
Ball valve, $\frac{1}{32}$ closed	5.5	
Ball valve, $\frac{2}{32}$ closed	210	

2.2.5 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 disebut dengan aliran transisi aliran ini merupakan aliran peralihan dari aliran laminar ke turbulen. (Al-Shemmeri, 2012)

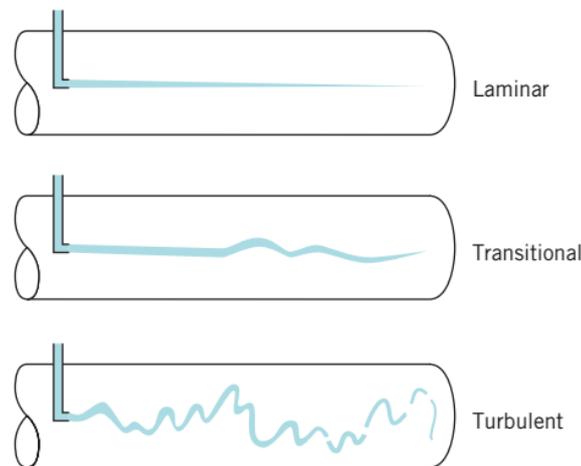
Osborne Reynolds yang pertama kali menemukan dan mengklasifikasikan jenis aliran pada fluida. Untuk menentukan aliran turbulen atau laminar harus dicari terlebih dahulu bilangan Reynoldnya dengan persamaan 2.29,

$$Re = \rho \cdot v \cdot d / \mu \dots\dots\dots (2.29)$$

Dengan :

- Re : Angka Reynolds
- ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3)
- v : Kecepatan fluida (m/s)
- d : Diameter pipa (m)
- μ : Kekentalan fluida (kg/m.s)

Pada persamaan di atas terdapat variable massa jenis, kecepatan diameter dan juga viskositas. Sehingga semakin kecil viskositas nya maka bilangan Reynolds nya akan semakin besar begitu pula sebaliknya. Jika kecepatan aliran semakin kecil maka bilangan Reynolds nya akan semakin kecil pula. Hubungan antara bilangan Reynolds dengan penentuan apakah aliran suatu fluida yang kita tinjau memiliki profil yang laminar, turbulen atau transisi dapat diketahui dengan (White, 1998) :



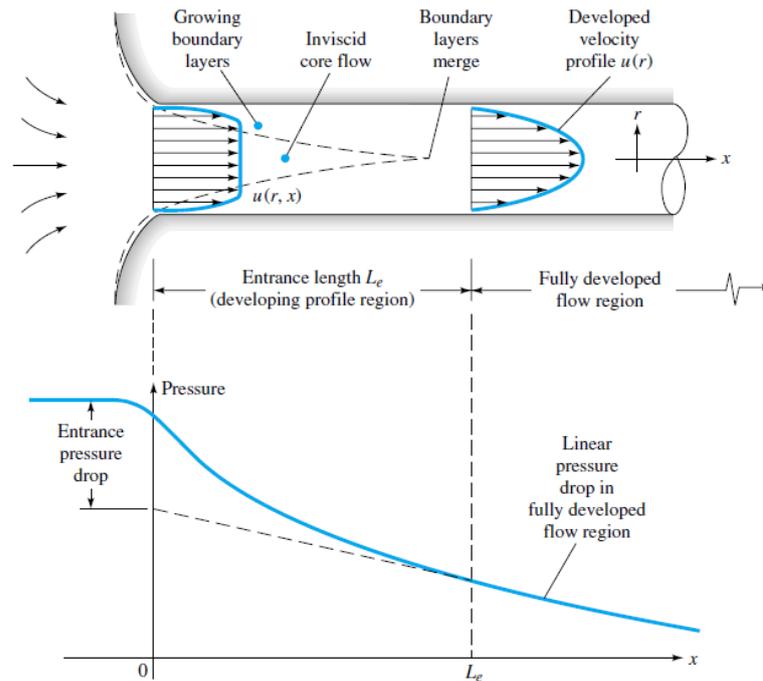
Gambar 2. 16 Profil jenis aliran (Munson, 2009)

1. Apabila *Reynolds number* didapatkan hasil < 2100 maka aliran tersebut dinyatakan sebagai aliran laminar.

2. Apabila *Reynolds number* didapatkan hasil $2100 \leq Re \leq 4000$ maka aliran tersebut dinyatakan sebagai aliran transisi
3. Apabila *Reynolds number* didapatkan hasil > 4000 maka aliran tersebut dinyatakan sebagai aliran turbulen

2.2.6 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 L_1 , maka kecepatan yang diperoleh adalah v , jika kecepatan diukur pada suatu titik di L_2 , kecepatan juga akan tetap v . Sedangkan pada aliran yang belum berkembang penuh akan memiliki variasi kecepatan (White, 1998).



Gambar 2. 17 Skema aliran berkembang penuh kecepatan (White, 1998).

Persamaan aliran berkembang penuh aliran laminar dapat dilihat pada persamaan 2.30 dan 2.31.

$$l_i/D = 0,06 \cdot \rho \cdot v \cdot d / \mu \dots \dots \dots (2.30)$$

$$l_l/D = 0,06. Re \dots\dots\dots(2.31)$$

Persamaan aliran berkembang penuh aliran turbulen dapat dilihat pada persamaan 2.32 dan 2.33

$$l_l/D = 4,4. \left(\rho \cdot v \cdot d / \mu \right)^{1/6} \dots\dots\dots(2.32)$$

$$l_l/D = 4,4. Re^{1/6} \dots\dots\dots(2.33)$$

Dengan :

- l_l : Entrance length (m)
- D : Diameter pipa (m)
- Re : Angka Reynolds

2.2.7 Pengukuran Laju Aliran Fluida

Pengukuran laju aliran fluida aliran adalah salah satu yang terpenting dalam proses *flow control*. Pengukuran laju aliran fluida bertujuan untuk mengetahui kapasitas aliran, massa laju aliran, volume aliran. Pengukuran laju aliran fluida dapat diketahui berdasarkan besarnya kecepatan fluida yang melewati luas penampang tertentu atau perubahan energi kinetiknya. Kecepatan fluida yang mengalir di dalam pipa sangat dipengaruhi oleh perbedaan tekanan dan gesekan fluida terhadap pipa. Selain itu kekentalan dan massa jenis pun sangat berpengaruh terhadap gesekan yang terjadi di dalam pipa. Pemilihan alat ukur aliran tergantung pada ketelitian, kemampuan pengukuran, harga, kemudahan pembacaan, kesederhanaan dan keawetan alat ukur tersebut (Holman, 2001).

Ada beberapa metode untuk melakukan pengukuran laju aliran fluida.

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

2.2.8 Metode *Flow-Obstruction*

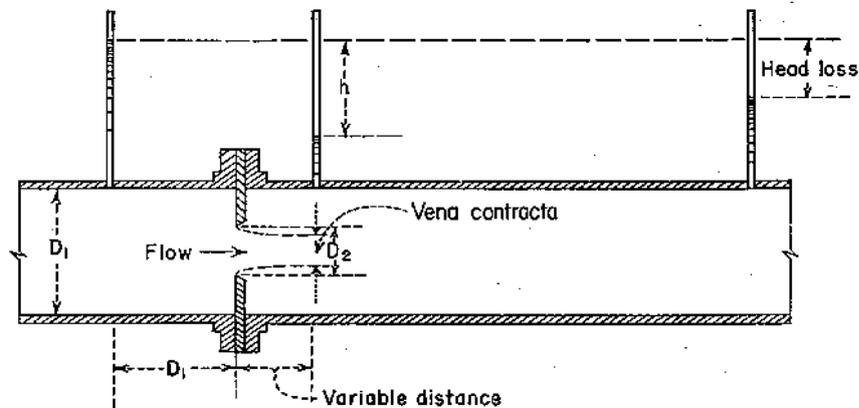
Metode *flow-obstruction* sering disebut dengan head meter karena pengukuran debit berdasarkan *head loss* atau *pressure drop*. Metode *flow-obstruction* juga kadang di sebut *differential pressure meter* yang merupakan *flow meter* yang memanfaatkan perbedaan tekanan. Aliran yang mengalir di dalam pipa dihitung dengan mengukur *pressure drop* yang terjadi pada aliran yang melewati sebuah penghalang yang dipasang dalam aliran tersebut. Pada persamaan Bernoulli flow meter dengan prinsip perbedaan tekanan ini didasarkan saat sinyal yang terukur (yaitu penurunan tekanan) merupakan fungsi dari kuadrat kecepatan aliran (Holman, 2001).

Ada banyak *flow meter* yang memanfaatkan prinsip perbedaan tekanan antara lain seperti :

1. *Orifice plate meter*
2. *Flow nozzle*
3. Venturi meter

2.2.9 *Orifice Plate Meter*

Orifice plate meter adalah salah satu alat yang digunakan untuk mengukur laju aliran volume atau massa fluida di dalam saluran yang tertutup (pipa) berdasarkan prinsip beda tekanan. Alat ini berupa plat tipis dengan gagang yang diapit oleh flens pipa. *Orifice* termasuk alat ukur laju aliran dengan metode rintangan aliran (*Obstruction Device*). Karena geometrinya sederhana, biayanya rendah dan mudah dipasang atau diganti namun memiliki *energy losses* yang cukup besar (Fox dan McDonald, 2011).

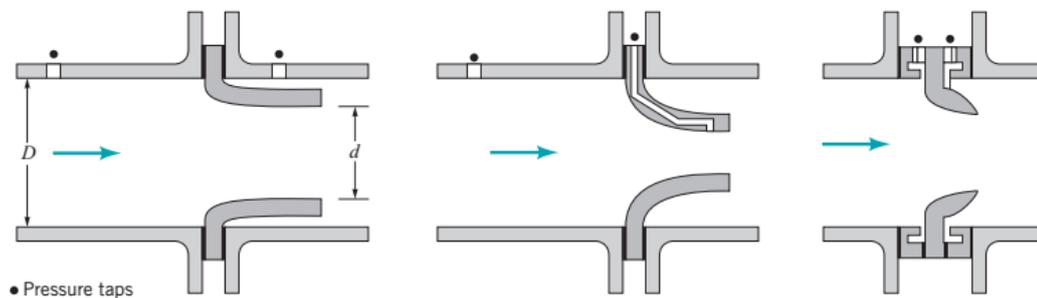


Gambar 2. 18 *Orifice Plate Meter* (Al-shemmeri, 2012)

Prinsip kerja *orifice plate meter* terjadi saat fluida yang mengalir melalui pipa ketika sampai pada orifice akan dipaksa untuk melewati lubang pada *orifice plate meter*. 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.

2.2.10 *Flow Nozzle*

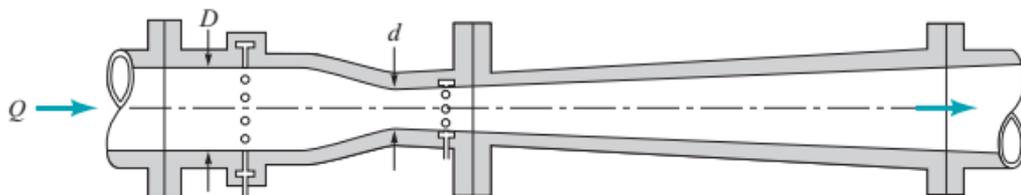
Flow nozzle merupakan alat ukur debit yang memiliki prinsip yang sama dengan *orifice plate meter*. *Flow nozzle* dapat digunakan sebagai elemen pengukur pada ventilasi atau saluran. Di industri *flow nozzle* sering digunakan sebagai elemen pengukur untuk fluida gas. Kelebihan *flow nozzle* adalah perangkatnya yang sederhana, murah serta memungkinkan untuk diaplikasikan dengan berbagai material. Akurasi dari *flow nozzle* dapat di setarakan dengan *orifice plate meter*, namun rugi rugi aliran nya lebih kecil dibandingkan *orifice plate flow meter* dan koefisien aliran dari *flow nozzle* lebih besar dari *orifice plate meter* (Nakayama dan Boucher, 1999).



Gambar 2. 19 *Flow Nozzle* (Munson, 2009)

2.2.11 Venturi Meter

Venturi meter adalah salah satu instrumen pengukuran yang menggunakan metode *differential pressure* sama dengan *flow nozzle* maupun *orifice flow meter*. Pada venturi meter terdapat bagian konvergen pipa lalu diikuti oleh bagian divergen kembali ke diameter pipa asli. Pengecilan diameter pada pipa bertujuan untuk memberikan peningkatan kecepatan aliran. pengukuran tekanan diferensial yang diambil antara posisi inlet dan tenggorokan. geometri dari venturi meter dirancang untuk meminimalkan kerugian energi berfungsi.



Gambar 2. 20 *Venturi meter* (Munson, 2009)

2.2.12 Pengukuran Beda Tekanan

Perbedaan tekanan *orifice plate meter*, *flow nozzle*, serta venturi meter diatas di ukur menggunakan manometer. Manometer adalah alat untuk mengukur perbedaan tekanan antara suatu titik dengan tekanan atmosfer lokal dengan cara mengukur tinggi kolom fluida. Selain menggunakan manometer air raksa pengukuran dapat menggunakan manometer digital.

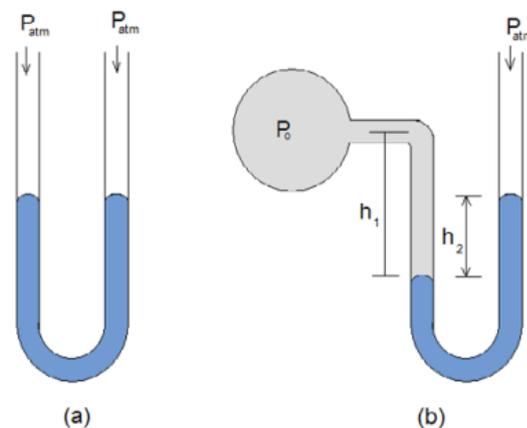
Jenis-jenis manometer adalah sebagai berikut :

1.1 Manometer tabung U (*U-Tube Manometer*)

2.1 Manometer tabung miring

2.2.13 Manometer Tabung U (*U-Tube Manometer*)

Pada pengukuran beda tekanan manometer yang sering digunakan adalah manometer tabung U (Hewakandamby, 2012).



Gambar 2. 21 U-Tube Manometer (*Hewakandamby, 2012*)

Pada gambar 2.15 tabung U sebgaiian 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 ρ_1 dan massa jenis dari air raksa ρ_m . Serta menganggap tekanan di dalam bola P_0 . Ketika kolom air raksa mencapai keseimbangan.

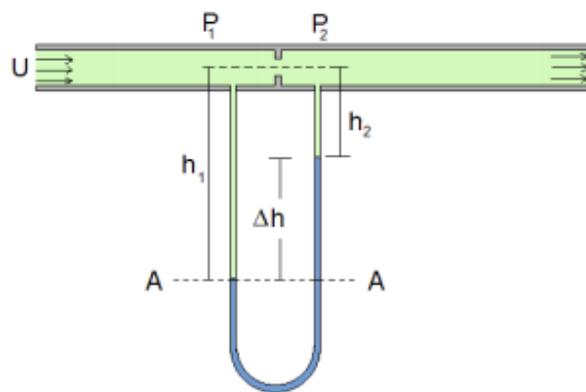
Persamaan dapat dilihat pada persamaan 2.34 dan 2.35.

$$P_0 + h_1 \cdot \rho_1 \cdot g = P_{atm} + h_2 \cdot \rho_m \cdot g \dots\dots\dots (2.34)$$

$$P_0 - P_{atm} = h_2 \cdot \rho_m \cdot g - h_1 \cdot \rho_1 \cdot g \dots\dots\dots (2.35)$$

Manometer dapat digunakan untuk mengukur perbedaan tekanan antara dua titik. mempertimbangkan pengaturan seperti yang ditunjukkan pada gambar 6. Dengan massa jenis fluida di dalam pipa adalah ρ_L dan massa jenis air raksa adalah ρ_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 2.36 dan 2.37.

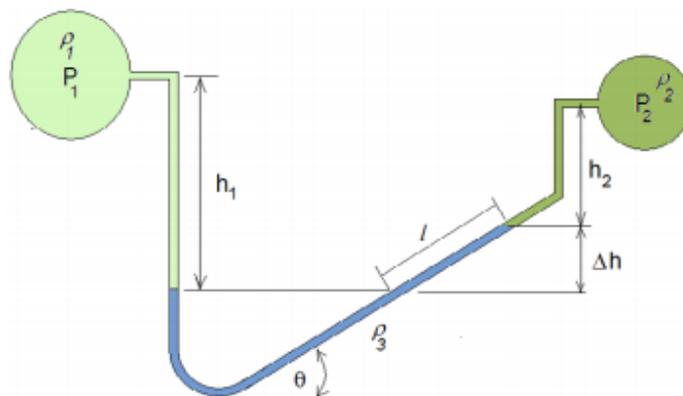


Gambar 2. 22 Pengukuran menggunakan manometer (Hewakandamby, 2012)

$$P_1 + h_1 \cdot \rho_L \cdot g = P_2 + h_2 \cdot \rho_L \cdot g + \Delta h \cdot \rho_m \cdot g \dots\dots\dots (2.36)$$

$$P_1 - P_2 = \Delta h \cdot \rho_L \cdot g - (\rho_m / \rho_L - 1) \dots\dots\dots (2.37)$$

2.2.14 Manometer tabung miring



Gambar 2. 23 Manometer miring (Hewakandamby, 2012)

Manometer tabung miring diperuntukan untuk mengukur beda tekanan yang kecil (Hewakandamby, 2012).

Persamaan perbedaan tekanan dapat dilihat pada persamaan 2.38 dan 2.39.

$$P_1 + h_1 \cdot \rho_1 \cdot g = P_2 + h_2 \cdot \rho_2 \cdot g + l \cdot \sin \theta \cdot \rho_3 \cdot g \dots\dots\dots (2.38)$$

$$P_1 - P_2 = -(h_1 \cdot \rho_1 - h_2 \cdot \rho_2) \cdot g + l \cdot \sin \theta \cdot \rho_3 \cdot g \dots\dots\dots (2.39)$$

Jika fluida di dalam pipa adalah fluida yang sama ($\rho_1 = \rho_2$) maka persamaan dapat di tulis seperti persamaan 2.40.

$$P_1 - P_2 = l \cdot \sin \theta \cdot \rho_3 \cdot g - \Delta h \cdot \rho_1 \cdot g \dots\dots\dots (2.40)$$

Dengan menggunakan hubungan dari $l \cdot \sin \theta = \Delta h$ maka persamaan dapat ditulis seperti persamaan 2.41.

$$P_1 - P_2 = l \cdot \sin \theta \cdot g(\rho_3 - \rho_1) \dots\dots\dots (2.41)$$