

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian-penelitian Sebelumnya

Deane (1996) melakukan penelitian tentang *conditioning flow disturbances for precision flow metering*. Pada penelitiannya ini menunjukkan bahwa *flow conditioner* mempunyai peranan penting dalam *flow measurement*. *Flow conditioner* membantu meningkatkan akurasi *flow meter* dengan mengurangi gangguan-gangguan yang terjadi selama pengukuran.

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

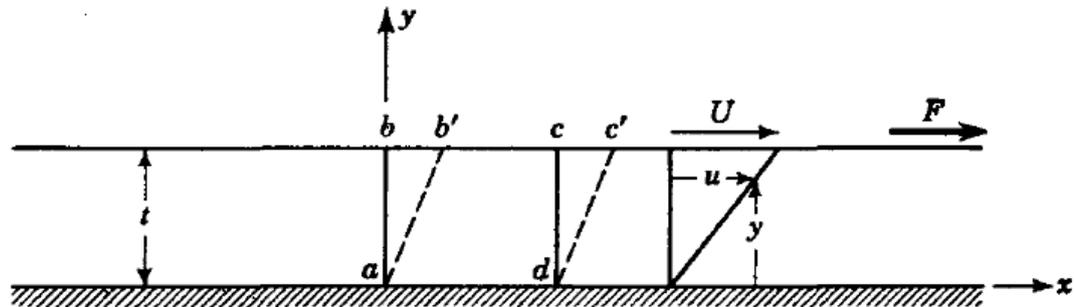
Waluyo dan Sugiyanto (2013), dalam penelitiannya tentang uji eksperimental *orifice* multilubang pada saluran berdiameter 50 mm dengan ukuran diameter tetap pada tiap lubangnya yaitu 14 mm, dengan diameter *hub* 28 mm. Pada penelitian ini dilakukan pengujian eksperimental terhadap bentuk pelat *orifice*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

Istiawan (2013), melakukan penelitian tentang pengaruh variasi lubang *orifice plate* terhadap faktor koreksi *orifice meter*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi jumlah lubang pada *orifice plate* dengan luas penampang lubang tetap terhadap faktor koreksi *orifice meter*. Dalam penelitiannya dapat disimpulkan bahwa semakin banyak lubang pada *orifice plate*, maka faktor koreksi *orifice meter* akan semakin meningkat pada debit yang sama.

2.2 Fluida

2.2.1 Definisi Fluida

Dari sudut pandang mekanika fluida, semua materi hanya memiliki dua wujud, padat (*solid*) dan fluida (*fluid*). Yang membedakan adalah reaksi yang terjadi pada kedua wujud tersebut ketika diberi tegangan geser atau tegangan tangensial. Materi padat dapat menahan tegangan geser dengan deformasi statis, namun tidak dengan fluida. Tegangan geser sekecil apapun yang diberikan pada fluida akan mengakibatkan perubahan bentuk pada fluida tersebut. Fluida akan bergerak dan berdeformasi (berubah bentuk) secara terus menerus (*continuously*) selama dikenai tegangan geser. (White, 1998)



Gambar 2.1 Perubahan bentuk karena pemakaian gaya geser yang konstan
Sumber: Streeter (1962)

Pada Gambar 2.1 di atas terlihat bahwa suatu zat yang diletakkan di antara 2 pelat diam sejajar dengan jarak yang dekat (t) dengan luas daerah seperti di gambar sehingga keadaan di tepi-tepinya dapat diabaikan. Apabila pelat bagian atas bergerak dengan kecepatan U yang disebabkan oleh gaya F sekecil apapun terhadap suatu luasan A , maka dapat disimpulkan bahwa zat di antara pelat tersebut adalah suatu fluida yang mengalami pergerakan dengan kecepatan tertentu dan ditandai dengan perubahan bentuk dari fluida tersebut di sepanjang saluran.

Percobaan sebelumnya menunjukkan bahwa F sebanding dengan A dan U , namun berbanding terbalik dengan dengan tebal t , dengan besaran lainnya dinyatakan konstan yang ditunjukkan dalam persamaan:

$$F = \mu \cdot \frac{A \cdot U}{t} \quad (\text{Streeter, 1962}) \quad (2-1)$$

Keterangan:

- F : Gaya (N)
 μ : Faktor kesebandingan dan pengaruh fluida yang bersangkutan tercakup di dalamnya.
 U/t : Kecepatan sudut garis a-b atau laju perubahan bentuk sudut fluida dan dapat ditulis du/dy (m/s).
 A : Luas penampang (m²)

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

$$\tau = \mu \cdot \frac{U}{t} \quad (\text{Streeter, 1962}) \quad (2-2)$$

Keterangan:

- τ : Tegangan geser
 U/t : Kecepatan sudut garis a-b
 μ : Faktor kesebandingan dan pengaruh fluida yang bersangkutan tercakup di dalamnya.

Perbandingan U/t adalah kecepatan sudut garis a-b, atau laju perubahan bentuk sudut fluida, yaitu laju berkurangnya sudut b-a-d. kecepatan sudut tersebut juga dapat ditulis du/dy, karena baik U/t maupun du/dy menyatakan perubahan kecepatan dibagi dengan jarak sepanjang perubahan tersebut terjadi. Nilai du/dy juga dapat dinyatakan sebagai laju sebuah lapisan yang bergerak relatif terhadap lapisan yang berdekatan.

Dalam bentuk diferensiasi:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (\text{Streeter, 1962}) \quad (2-3)$$

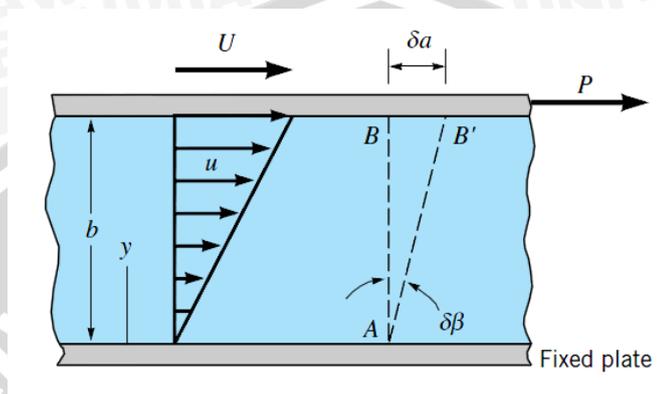
Keterangan:

- τ : Tegangan geser
 du/dy : Kecepatan sudut garis a-b
 μ : Viskositas fluida

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

2.2.2 Viskositas

Viskositas adalah ketahanan fluida terhadap gerakan. Fluida dalam keadaan diam pada dasarnya tidak dapat menahan tegangan geser sekecil apapun. Pemberian tegangan sekecil apapun akan menyebabkan distorsi yang terus menerus dan permanen yang dikenal dengan aliran. (Bloomer, 2000)



Gambar 2.2 Aliran di antara pelat paralel yang mengilustrasikan viskositas
Sumber: Munson *et al* (2002)

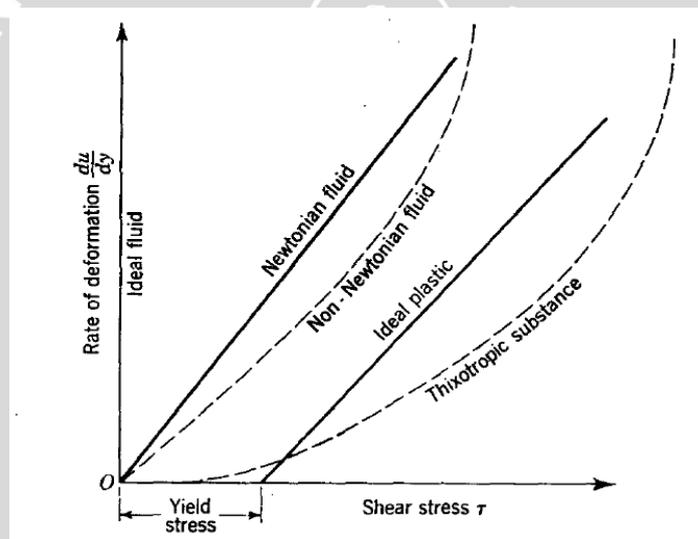
Menurut Munson *et al* (2002) viskositas adalah sifat fluida yang menghubungkan tegangan geser dengan gerakan fluida tersebut. Diilustrasikan dengan pelat paralel pada Gambar 2.2, pelat bagian bawah posisinya *fixed* (tidak bergerak) sedang pada pelat bagian atas diberikan gaya P , maka pelat bagian atas akan bergerak dengan kecepatan U dan mengakibatkan fluida di bagian atas juga ikut bergerak. Fluida di antara kedua pelat mempunyai kecepatan linear seperti yang diperlihatkan (jika tidak terdapat gradien tekanan sepanjang pelat sesuai dengan arah gerakan). Tidak terjadi slip antara fluida dengan pelat. Oleh karena itu, pada hubungan antara fluida dengan benda solid, kecepatan fluida akan menyamai benda solid.

Viskositas gas akan meningkat seiring dengan kenaikan suhu, sedangkan viskositas zat cair akan menurun seiring dengan kenaikan suhu. Perbedaan kecenderungan terhadap suhu tersebut dapat diketahui dengan cara memperhatikan penyebab-penyebab viskositas.

2.2.3 Klasifikasi Fluida

Klasifikasi fluida dapat ditinjau dari beberapa segi. Ditinjau dari pengaruh tegangan geser terhadap terjadinya deformasi pada fluida, maka fluida dapat

diklasifikasikan menjadi fluida *Newtonian* dan fluida *non-Newtonian* (Streeter, 1962). Apabila suatu fluida dikenai tegangan geser, maka akan terjadi deformasi dan bila tegangan geser tersebut sebanding dengan kecepatan deformasi fluida, maka fluida tersebut dikatakan fluida *Newtonian*. Dengan kata lain, kecepatan deformasi fluida linier terhadap tegangan geser yang diberikan. Sebaliknya, jika suatu fluida mengalami deformasi akibat tegangan geser, namun tegangan geser dan kecepatan deformasi yang terjadi tidak sebanding, maka fluida tersebut disebut fluida *non-Newtonian*. Selain itu, pada fluida *Newtonian* viskositasnya bernilai konstan sekalipun terdapat gaya yang bekerja pada fluida tersebut. Sedangkan untuk fluida *non-Newtonian* akan mengalami perubahan viskositas ketika dikenakan gaya. Contoh fluida *Newtonian* adalah air, udara, dan oli, sedangkan fluida *non-Newtonian* adalah plastik cair dan lilin cair. Klasifikasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Diagram Rheologi fluida *Newtonian* dan fluida *non-Newtonian*
Sumber: Streeter (1962)

Berdasarkan kemampuan untuk dimampatkan fluida dibagi menjadi dua jenis yaitu fluida mampu mampat (*compressible*) dan fluida tak mampu mampat (*incompressible*). Karakteristik ini ditentukan oleh susunan dan jarak antar molekul atau fase dari fluida. Secara umum, perubahan densitas dapat diabaikan pada fluida tak mampu mampat (*incompressible*), tapi tidak pada fluida mampu mampat (*compressible*). (Bloomer, 2000). Dengan kata lain fluida tak mampu mampat (*incompressible*) adalah fluida yang mempunyai massa jenis (ρ) konstan, tidak

terpengaruh oleh perubahan tekanan $dp/dp = 0$. Sedangkan untuk fluida mampu mampat (*compressible*) massa jenisnya (ρ) berubah-ubah terhadap tekanan $dp/dp > 0$. Contoh fluida tak mampu mampat adalah fluida cair dan fluida gas yang memiliki Bilangan *Mach* atau *Mach Number* (M) $< 0,3$, sedangkan untuk fluida gas yang memiliki *Mach Number* (M) $> 0,3$ dianggap fluida mampu mampat dan sifat-sifat kompresibilitasnya harus diperhitungkan.

2.3 *Properties Fluida*

2.3.1 Densitas (ρ) dan Berat Spesifik (γ)

Densitas (ρ) didefinisikan sebagai massa tiap satuan volume. Nilai dari densitas bervariasi antara fluida satu dan lainnya, pada fluida cair, pengaruh dari tekanan dan suhu umumnya kecil terhadap massa jenisnya. (Munson *et al*, 2002)

Berat spesifik adalah berat fluida tiap unit volume, di notasikan dengan γ (gamma). Berat spesifik memiliki dimensi gaya per satuan volume. (Jeppson, 1974) Densitas dan berat spesifik dari fluida dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (\text{Daugherty, 1977}) \quad (2-4)$$

Keterangan:

- ρ : Densitas/massa jenis (kg/m^3)
- γ : Berat spesifik (N/m^3)
- g : Percepatan gravitasi (m/s^2)

Perlu diingat bahwa di sini densitas (ρ) adalah konstan. Berat spesifik (γ) di sisi lain tidaklah mutlak, tergantung pada nilai percepatan gravitasi (g) yang nilainya dapat berubah-ubah sesuai dengan tempatnya, terutama disebabkan oleh ketinggian dari permukaan laut.

2.3.2 Viskositas Kinematik (ν) dan Viskositas Dinamik (μ)

Viskositas dinamik (μ) disebut juga dengan viskositas mutlak (*absolute viscosity*) yaitu viskositas yang menunjukkan ketahanan suatu fluida terhadap tegangan geser/gaya yang bekerja padanya. Sedangkan viskositas kinematik adalah hasil bagi antara viskositas dinamik dengan dengan massa jenisnya. (Jeppson, 1974).

Berikut ini adalah hubungan antara viskositas kinematik dan viskositas dinamik:

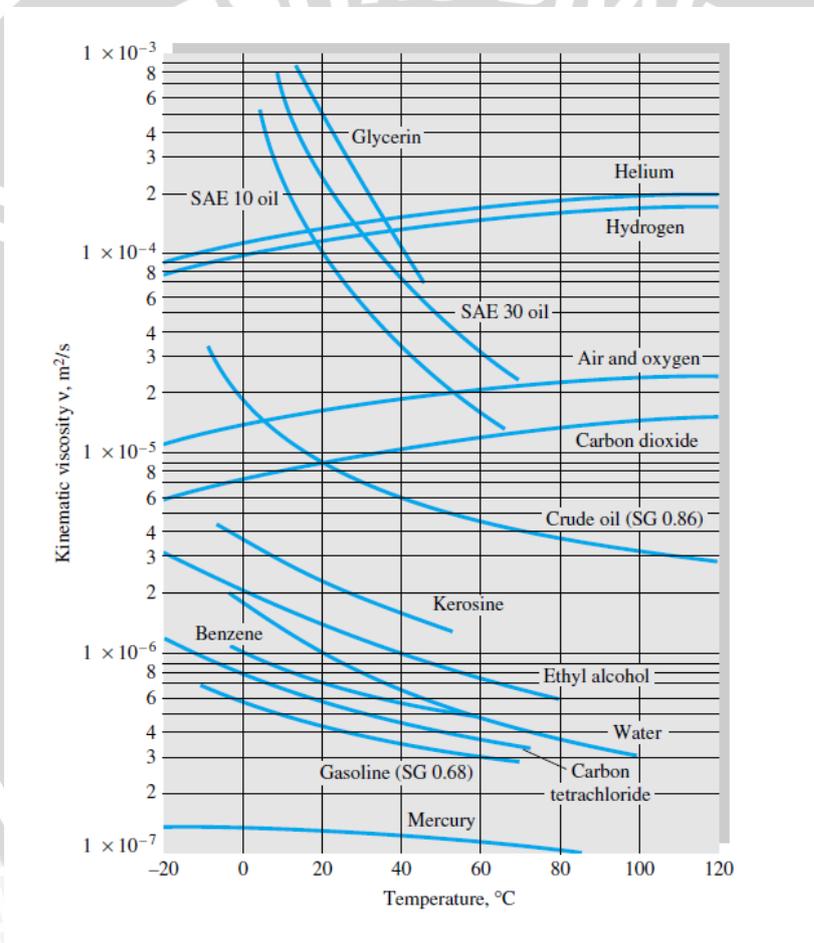
$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

(Cengel, 2006) (2-5)

Keterangan:

- ν : Viskositas kinematik (m^2/s)
- μ : Viskositas dinamik (kg/ms)
- ρ : Densitas/massa jenis (kg/m^3)

Viskositas akan meningkat jika terjadi pertukaran kalor yang acak antarmolekulnya, sehingga kenaikan temperatur berakibat pada peningkatan nilai viskositas. Viskositas kinematik berbagai fluida dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Viskositas kinematik berbagai fluida pada 1 atm
Sumber: White (1998)

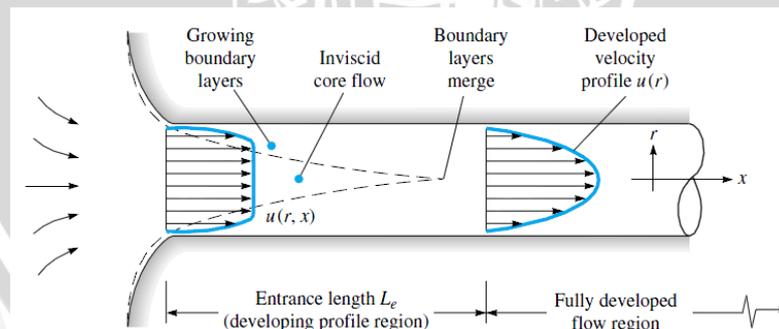
2.3.3 Tekanan (*Pressure*)

Tekanan (p) adalah tegangan di suatu titik pada fluida statis. Tekanan adalah variabel yang paling dinamis dalam mekanika fluida setelah kecepatan. Perbedaan atau gradien tekanan selalu mempengaruhi aliran fluida, khususnya pada saluran pipa. Pada

kecepatan aliran rendah, besarnya tekanan seringkali dianggap tidak penting, kecuali jika terjadi penurunan hingga mencapai kecepatan yang kecil sekali, sehingga menyebabkan terbentuknya gelembung-gelembung udara. (White, 1998)

2.3.4 Lapisan Batas (*Boundary Layer*)

Lapisan batas adalah lapisan tipis fluida pada permukaan benda padat dimana terjadi suatu gradien parameter yang besar. Pada fluida yang mengalir di dalam pipa, terjadi lapisan batas, dimana pada lapisan tersebut terjadi perubahan kecepatan terhadap jarak dari dinding pipa. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh dari tegangan geser dinding pipa, sehingga terjadi gradien kecepatan. Pada aliran fluida aktual atau *viscous* yang melalui permukaan suatu benda, terdapat suatu daerah dimana aliran fluida masih dipengaruhi gesekan dengan permukaan benda. Pada daerah tersebut kecepatan bertambah dari nol (pada permukaan benda) hingga mendekati kecepatan aliran utama (kecepatan fluida di dalam lapisan batas telah mencapai 99% kecepatan aliran utama). Semakin mendekati permukaan diam (dinding pipa), kecepatan semakin menurun, sebaliknya semakin menjauh kecepatan aliran semakin meningkat. Gradien kecepatan tersebut dipengaruhi tegangan geser dalam aliran fluida *viscous* karena besarnya tegangan geser sebanding dengan gradien kecepatan. Lapisan fluida yang kecepatannya dipengaruhi tegangan geser ini disebut lapisan batas (*boundary layer*). (Streeter, 1962). Gambar 2.5 menjelaskan tentang struktur *boundary layer*.



Gambar 2.5 Struktur *boundary layer*

Sumber: White (1998)

Pada Gambar 2.5 terlihat ketika memasuki pipa fluida memiliki kecepatan yang seragam, karena aliran fluida masih belum terpengaruh oleh gaya pada permukaan dinding. Saat fluida melewati *entrance length*, fluida terpengaruh oleh gaya dinding, sehingga terjadi gradien kecepatan. Semakin jauh fluida mengalir pada *entrance length*,

pengurangan kecepatan semakin besar karena jarak fluida mengalir pada dinding semakin jauh, sehingga pengaruh gaya dinding semakin besar terhadap fluida.

2.3.5 Bilangan Reynolds

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

Persamaan bilangan Reynolds untuk aliran di dalam pipa adalah:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (\text{White, 1998})(2-6)$$

Dengan:

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

D : diameter pipa (m)

ν : viskositas kinematik (m^2/s)

μ : viskositas absolut/dinamik (kg/ms)

ρ : densitas (kg/m^3)

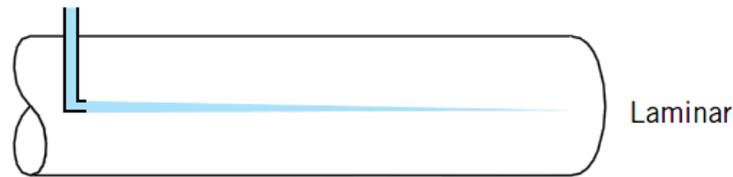
2.4 Bentuk dan Tipe Aliran Fluida

2.4.1 Aliran Laminar dan Aliran Turbulen

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

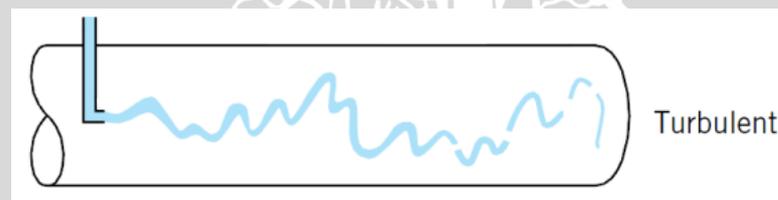
Fluida memiliki aliran laminar ketika fluida bergerak dengan kecepatan rendah dan memiliki viskositas yang tinggi. Aliran laminar memiliki angka Reynolds lebih kecil dari 2300. Pada aliran laminar kecenderungan untuk turbulen diredam oleh gaya viskos yang memberikan tahanan terhadap gerakan relatif lapisan fluida yang berdekatan. Hal tersebut ditunjukkan oleh percobaan Osborne Reynolds. Pada laju

aliran rendah, aliran laminar tergambar sebagai filamen panjang yang mengalir sepanjang aliran sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Aliran laminar
Sumber: Munson *et al* (2002)

Aliran turbulen adalah aliran fluida dimana *streamline* bergerak secara acak ke segala arah dan saling berpotongan antara satu dan yang lain. Hal ini dikarenakan pada aliran turbulen memiliki partikel-partikel fluida yang bergerak secara acak dengan saling tukar momentum dan partikel antar lapisan fluida yang berdekatan dalam skala besar. Karena inilah maka fluida bergerak ke segala arah, dan terjadi pembauran aliran fluida. Aliran turbulen memiliki angka *Reynolds* lebih besar dari 4000. Oleh Osborn Reynolds digambarkan sebagai bentuk fluida yang bercampur dalam waktu cepat yang selanjutnya memecah dan menjadi tidak terlihat sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2.7.



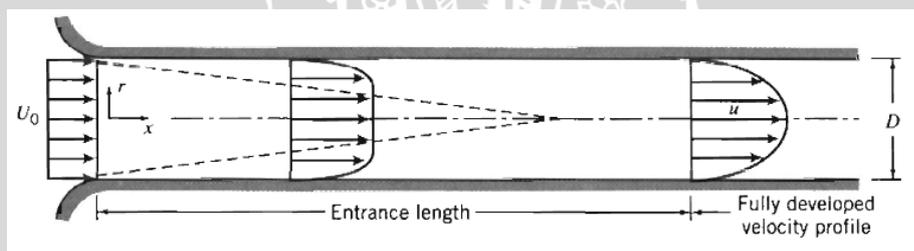
Gambar 2.7 Aliran turbulen
Sumber: Munson *et al* (2002)

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

2.4.2 Fully Developed Flow

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

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



Gambar 2.8 Perkembangan aliran laminar pada pipa

Sumber: Fox *et al* (2004)

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

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

Rumus *entrance length* adalah:

$$\frac{L}{D} = 0,06 \cdot \frac{\rho V D}{\mu} \quad (\text{Fox } et \text{ al, } 2004:305) \quad (2-7)$$

Dengan:

L : entrance length (m)

D : diameter pipa (m)

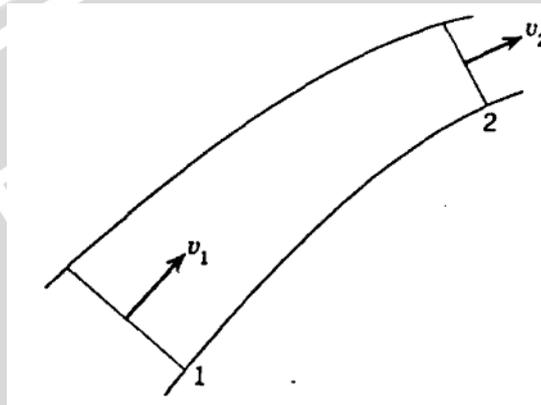
ρ : densitas (Kg/m^3)

V : kecepatan rata-rata (m/s)

μ : viskositas absolut (Ns/m^3)

2.5 Aliran Fluida dalam Pipa

2.5.1 Analisis Kontinuitas



Gambar 2.9 Aliran *steady* dalam pipa

Sumber: Streeter (1962)

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

$$m_1 = m_2 = \text{konstan} \quad (\text{White, 1998}) \quad (2-8)$$

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

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

$$Q_1 = A_1 \cdot v_1 = Q_2 = A_2 \cdot v_2 \quad (\text{White, 1998}) \quad (2-9)$$

Dengan:

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

A : luas penampang pipa (m^2)

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

2.5.2 Persamaan *Bernoulli* untuk Fluida Ideal

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

$$W = m \cdot g \cdot z + m \cdot \frac{p}{\rho} + m \cdot \frac{v^2}{2} = \text{konstan} \quad (\text{Streeter, 1991}) \quad (2-10)$$

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

$$W = g \cdot Z + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{konstan} \quad (\text{Streeter, 1991}) \quad (2-11)$$

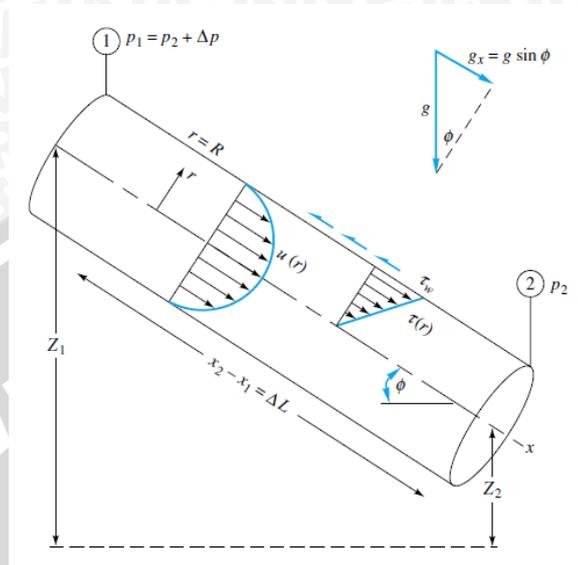
Apabila persamaan tersebut dibagi lagi dengan percepatan gravitasi g , maka akan didapat salah satu ruas dari persamaan *bernoulli* yang mempunyai arti ketinggian. Persamaan ketinggian yaitu:

$$H = Z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} = \text{konstan} \quad (\text{Streeter, 1991}) \quad (2-12)$$

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

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \quad (\text{Streeter, 1991:4}) \quad (2-13)$$

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



Gambar 2.10 Aliran yang telah berkembang penuh antara 2 penampang dalam pipa miring

Sumber: White (1998)

2.5.3 Persamaan *Bernoulli* untuk Fluida *Real*

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

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

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \alpha_1 \frac{V_{m1}^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \alpha_2 \frac{V_{m2}^2}{\rho \cdot g} + \sum h \quad (\text{Nekrasov, 1990}) \quad (2-14)$$

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

2.6 Head Losses

Head losses adalah energi yang hilang pada fluida ketika fluida mengalir. Besarnya *head losses* tergantung pada bentuk, ukuran dan kekasaran saluran, kecepatan dan viskositas fluida dan tidak tergantung pada tekanan absolut. *Head losses* dibedakan menjadi 2 macam, *major losses* dan *minor losses*.

2.6.1 Major Losses

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

Rumusan untuk *major losses*:

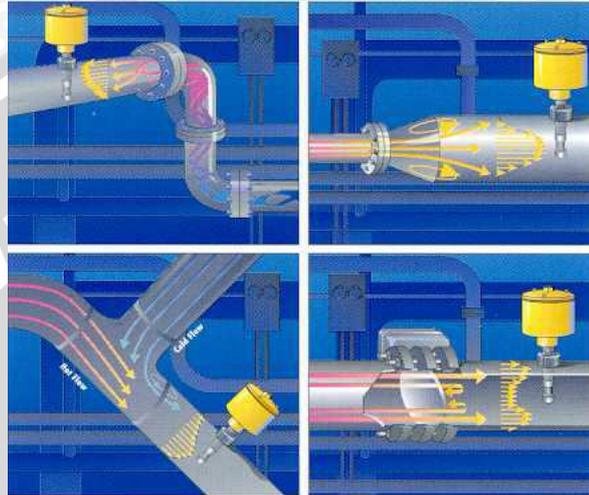
$$h = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Nekrasov, 1990}) \quad (2-15)$$

Keterangan:

- h : *major losses* (m)
- λ : faktor gesek
- l : panjang pipa (m)
- d : diameter pipa (m)
- V : kecepatan fluida (m/s)
- g : percepatan gravitasi (m/s²)

2.6.2 *Minor Losses*

Minor losses adalah energi yang hilang dari fluida disebabkan oleh bentuk lokal dari saluran, seperti; perubahan luas penampang, katup, belokan, *verlop sock*, *orifice*, dll. *Minor losses* terjadi karena aliran yang mengalir melewati bentuk lokal dari saluran mengalami perubahan kecepatan, arah atau besarnya, maupun keduanya. Contoh bentuk lokal saluran dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Bentuk-bentuk lokal saluran
Sumber: Deane (1996)

Minor losses dapat dirumuskan:

$$h = \xi \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Nekrasov, 1960}) \quad (2-16)$$

Keterangan:

h = *minor losses*

ξ = koefisien kerugian

V = kecepatan fluida (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

2.7 *Vortex*

Vortex didefinisikan sebagai massa fluida cairan atau gas yang partikel-partikelnya bergerak berputar. Gerakan partikel fluida bergerak berputar disebabkan adanya perbedaan kecepatan antara lapisan-lapisan fluida yang bersebelahan dengan jarak tertentu, gradien kecepatan ini akan menyebabkan puntiran (torsi). Torsi ini akan

menyebabkan terjadinya *vortex-vortex* pada fluida tersebut. Menurut proses pembentukannya *vortex* dibagi menjadi 2 macam yaitu *vortex* bebas (*free vortex*) dan *vortex* paksa (*forced vortex*). *Vortex* bebas terjadi jika mekanisme pembentukan *vortex* tidak melibatkan energi dari luar sumber. Fluida berputar karena gerakan internalnya contohnya yaitu pusaran air di sungai dan pusaran di belokan pipa akibat aliran sekunder. *Vortex* paksa terjadi jika mekanisme pembentukan *vortex* melibatkan energi dari luar misalnya fluida diberi torsi atau puntiran dari luar. Contohnya yaitu aliran fluida dalam suatu pipa melewati suatu silinder. Bentuk *vortex* yang melewati silinder dapat dilihat pada Gambar 2.12.

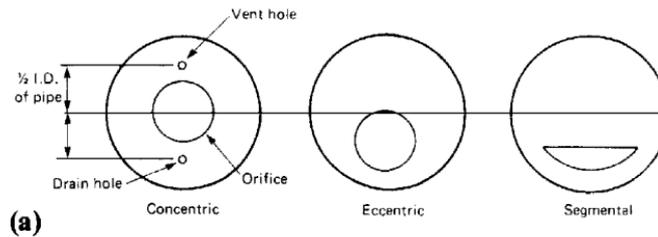


Gambar 2.12 Bentuk *vortex* setelah melewati silinder
Sumber: White (1998)

2.8 Orifice Plate (Pelat Orifice)

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

Pelat *orifice* merupakan pelat berlubang dengan pinggiran yang tajam. Pelat ini terbuat dari bahan-bahan yang kuat seperti logam. Selain terbuat dari logam, ada juga pelat *orifice* yang terbuat dari plastik agar tidak dipengaruhi oleh fluida yang mengalir dan terjadi erosi atau korosi. Macam-macam tipe pelat *orifice* dapat dilihat pada Gambar 2.13.

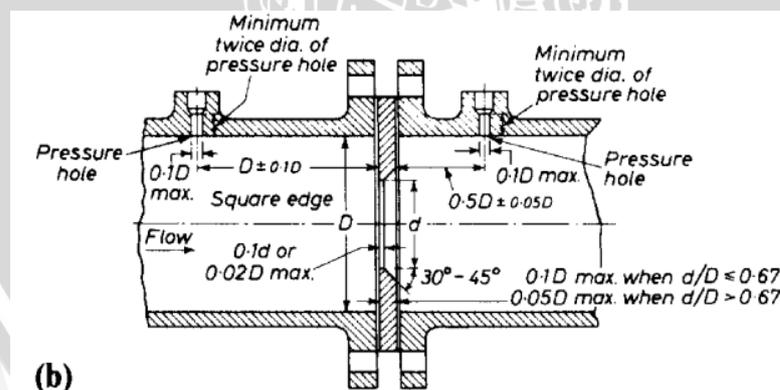


Gambar 2.13 Orifice Plate

Sumber: Boyes (2011)

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

Pelat ini umumnya diklem di antara dua *flange* pada pipa, lubang *vent* dan *drain* disediakan untuk mencegah penumpukan/pembentukan endapan dan gas pada sistem seperti pada Gambar 2.14.



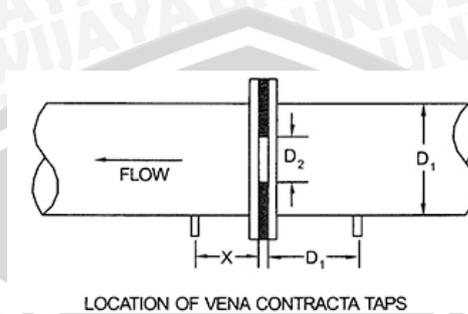
Gambar 2.14 Peletakan Orifice Plate

Sumber: Boyes (2011)

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

a. *Tap Vena Contracta*

Tap pertama dari *tap vena contracta* dipasang pada jarak $1 \times D_1$ (diameter pipa) sebelum *orifice* sedangkan *tap* kedua pada *vena contracta*. Vena adalah tempat dimana luas aliran mencapai minimum, sehingga tekanannya paling kecil seperti terlihat pada Gambar 2.15

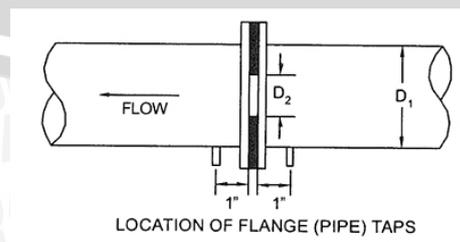


Gambar 2.15 *Tap Vena Contracta*
Sumber: Murty (2010)

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

b. *Tap Flange*

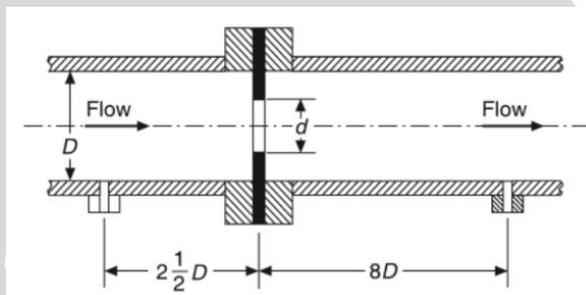
Tap flange diletakkan secara simetris di kiri dan kanan *orifice* sejauh satu inci. Keuntungan cara ini adalah *tap-tap*nya dapat dipasang menjadi satu bagian dengan *flange* pipa tanpa mengganggu instalasi pipa tersebut. Pipa dan pelat *orifice* dapat digantikan tanpa harus mengubah letak *tap*. Kerugiannya adalah hasil pengukuran yang kurang teliti, karena terdapat beda tekanan yang kecil. Pemasangan *Tap flange* dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 *Tap Flange*
Sumber: Murty (2010)

c. *Tap* Pipa

Tap pertama dari *tap* pipa diletakkan sejauh $2\frac{1}{2} \times D$ (diameter pipa) sebelum *orifice* sedangkan *tap* kedua sejauh $8 \times D$ sesudah *orifice*, seperti terlihat pada Gambar 2.17. Tekanan diferensial yang diukur kecil sekali karena hanya menyatakan rugi tekanan oleh Pelat *orifice*. Agar pengukuran aliran dengan menggunakan Pelat *Orifice* dapat dilakukan dengan ketelitian yang tinggi maka di dekat *tap-tap*, tekanan tidak boleh mengalami gangguan. Gangguan-gangguan ini dapat terjadi bila di dekat *tap* ini terdapat *fitting* seperti sambungan pipa, belokan, katup, *regulator*, pompa, dan lain-lain. Umumnya daerah sejauh 5 m sebelum *orifice* sampai 20 m sesudah *orifice* harus bebas dari *fitting*. Angka-angka ini bisa tergantung pada perbandingan diameter dan tipe *fitting* yang berbeda dari kiri ke kanan *orifice*.



Gambar 2.17 *Tap* Pipa
Sumber: Murty (2010)

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

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

Kerugian:

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

2.9 Pengukuran Aliran (*Flow Metering*)

Pengukuran aliran adalah pengukuran kapasitas aliran (debit) atau laju aliran massa atau laju volume aliran. Hasil pengukuran yang diharapkan adalah hasil yang akurat, untuk itu keakuratan alat ukur sangat diperlukan. Beberapa kondisi yang dapat mengurangi keakuratan *flow* meter antara lain pipa lurus pendek, katup, belokan,

perubahan luas penampang pipa. Kondisi ini menghasilkan gangguan aliran seperti *swirl/vortex*, separasi, dan lain-lain. Sehingga dibutuhkan suatu alat pengkondisian aliran untuk menghilangkan gangguan-gangguan aliran tersebut.

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

Pemilihan alat ukur aliran tergantung pada ketelitian, kemampuan pengukuran, harga, kemudahan pembacaan, kesederhanaan, dan keawetan alat ukur tersebut. Adapun persamaan dasar yang digunakan dalam menganalisis pengukuran aliran adalah persamaan kontinuitas, persamaan *Bernoulli* dan perhitungan *head loss* aliran.

2.9.1 Pengukuran Aliran Internal

Pengukuran aliran internal dapat dilakukan dengan empat metode, yaitu:

1. Metode langsung
2. Metode pembatasan
Orifice, nozzle, venturi, elemen aliran laminar
3. Metode linear
Rotameter, turbin flowmeter, vortex flowmeter, elektomagnetik flowmeter, magnetik flowmeter, ultrasonic.
4. Metode pembagian
Pitot tube, anemometer.

2.9.1.1 Metode Langsung

Metode langsung pengukuran aliran dapat dilakukan dengan mengukur volume atau massa fluida dalam selang waktu tertentu dalam selang waktu yang lama dan diukur secara tepat, serta pengukuran volume atau massa diukur secara tepat, maka pengukuran ini tidak memerlukan kalibrasi. Pengukuran laju aliran volume atau massa dengan metode langsung ini cukup teliti. Akan tetapi apabila fluida yang diukur adalah gas, maka efek kompresibilitasnya harus diperhitungkan.

Persamaannya adalah:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A = \rho \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right) \quad (\text{White, 1998})(2-17)$$

Keterangan:

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

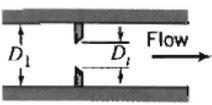
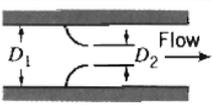
ρ : densitas (kg/m³)

$\Delta V/\Delta t$: perubahan volume/perubahan waktu (m³/s)

2.9.1.2 Metode Pembatasan

Metode pembatasan ini mengukur perbedaan tekanan di antara dua penampang aliran yang sebanding dengan laju aliran. Perhitungan laju aliran teoritis dapat dilakukan berdasarkan hukum kontinuitas dan persamaan *Bernoulli*. Debit sebenarnya dapat ditentukan dengan memperhitungkan faktor koreksi dari masing-masing alat ukur yang ditentukan secara empiris. Alat ukur metode tak langsung dengan pembatasan ini dianalisis pada penampang 1 yaitu sebelum masuk alat ukur dan penampang 2 yaitu tepat di daerah alat ukur yang biasanya menimbulkan *vena contracta*. *Vena contracta* adalah daerah ini debit minimum dan tekanan aliran pada penampang tersebut seragam. Karakteristik alat mengukur debit dengan metode pembatasan dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Karakteristik alat ukur mengukur debit

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

Sumber: Fox *et al* (2004)

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

1. Orifice meter

Orifice meter merupakan pelat tipis yang diikat di antara dua buah *flange* pipa. Bentuknya sederhana, sehingga harganya murah dan mudah untuk dipasang. Kekurangan *orifice* adalah kerugian *head*-nya tinggi dan kapasitas pengukurannya rendah.

Debit pada *orifice* dapat diukur dengan rumus:

$$Q_o = \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \sqrt{\frac{2\Delta H}{\rho(1-\beta^4)}} \quad (\text{Waluyo dan Sugiyanto, 2013}) \quad (2-18)$$

Untuk *orifice plate* multilubang diukur dengan rumus:

$$Q_o = \frac{\pi}{4} D_e^2 \sqrt{\frac{2\Delta H}{\rho(1-\beta^4)}} \quad (\text{Waluyo dan Sugiyanto, 2013}) \quad (2-19)$$

Dengan:

$$\frac{\pi}{4} D_e^2 = \frac{\pi}{4} \cdot N \cdot D_2^2 \quad (\text{Waluyo dan Sugiyanto, 2013}) \quad (2-20)$$

Keterangan:

- Q_o : Debit *orifice meter* (m^3/s)
- D_2 : Diameter lubang dasar *orifice* meter (m)
- D_e : Diameter ekivalen *orifice* meter (m)
- N : Jumlah lubang *orifice plate*
- ΔH : *Pressure drop orifice* meter (Pa)
- ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
- β : rasio diameter D_e/D_1 , dengan D_1 = diameter pipa (m)

2. *Nozzle meter*

Dipakai sebagai alat ukur kapasitas, dapat dipasang pada instalasi pipa, maupun pada *plenum*. *Nozzle* harganya sedang dan kerugian *head*-nya juga sedang.

3. *Venturi meter*

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

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

Pada pengukuran aliran sesungguhnya, sangat diperlukan analisis parameter lain. Dalam praktik, aliran sangat jarang laminar, tetapi turbulen. Dengan demikian, laju

dari partikel pada aliran adalah acak dan tidak mempengaruhi laju aliran secara keseluruhan.

Dalam mengembangkan suatu persamaan, efek dari kekentalan juga diabaikan. Dalam fluida sesungguhnya, hilangnya *head* dari setiap bagian lebih besar daripada aliran yang memiliki viskositas rendah. Untuk memperbaiki hal ini dan efek dari faktor-faktor lainnya, digunakanlah suatu faktor pada persamaan. Faktor ini dikenal dengan *coefficient of discharge*, dan dapat diketahui melalui persamaan:

$$C_{Q0} = \frac{Q_{\text{aktual}}}{Q_0} \quad (\text{White, 1998}) \quad (2-21)$$

Dengan:

- C_{Q0} : Faktor koreksi *orifice meter*
- Q_0 : Debit *orifice meter* (m^3/s)
- Q_{aktual} : Debit aktual (m^3/s)

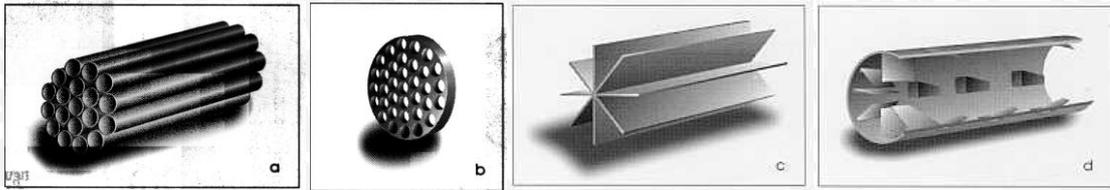
Atau jika kondisi temperatur, densitas, dan lain-lain bernilai sama pada kedua sisi pelat *orifice*, maka rumus bisa ditulis berdasarkan volumenya, seperti di bawah ini:

$$C = \frac{\text{volume aktual}}{\text{volume teoritis}} \quad (\text{Boyes, 2011}) \quad (2-22)$$

Nilai C juga dapat dicari melalui sebuah percobaan yang merupakan fungsi ukuran pipa, tipe *pressure tapping*, *Reynolds Number*.

2.11 Flow Straightener

Flow straightener adalah suatu alat yang digunakan untuk mengurangi gangguan-gangguan yang terjadi pada aliran di suatu instalasi perpipaan, sehingga dapat meningkatkan keakuratan pengukuran pada saat fluida melewati *flow meter*. *Flow straightener* memiliki kemampuan untuk mengisolasi gangguan-gangguan aliran yang disebabkan oleh belokan, katup, perubahan luas penampang, dan *orifice* dengan cara menghilangkan separasi dan *vortex*. Berbagai macam *flow conditioner* yang sering digunakan misalnya (a) *vanes*, (b) pelat perforasi, (c) *tube bundles*, dan (d) *tab-type conditioner* seperti terlihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Macam-macam *flow straightener*
Sumber: Deane (1996)

2.12 Hipotesis

Semakin besar diameter *hub* pada pelat *orifice*, menyebabkan aliran fluida lebih cepat kembali seragam (*fully developed*) setelah melewati pelat *orifice*, sehingga nilai *pressure drop* menurun dan mengakibatkan faktor koreksi *orifice meter* semakin meningkat.

