

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian-Penelitian Sebelumnya

Jeff Deane (1996), tentang *conditioning flow disturbances for precision flow metering* menunjukkan bahwa *flow conditioner* mempunyai peranan penting dalam dunia industri. *Flow conditioner* membantu meningkatkan akurasi *flow meter* dengan mengurangi gangguan-gangguan yang terjadi selama pengukuran.

Witanto (2004), tentang pengaruh perforasi terhadap perilaku *vortex* di belokan dan penurunan tekanan pada instalasi pipa. Penelitian ini dilakukan pada dinding pipa sebelum belokan yang diberi lubang-lubang (perforasi) bervariasi. Tujuannya untuk mengurangi kecepatan aksial sebelum belokan pipa dengan cara membangkitkan aliran radial menggunakan perforasi, sehingga aliran sekunder menurun dan diameter *vortex* yang terbentuk mengecil. Dalam penelitiannya disimpulkan bahwa diameter perforasi yang terlalu besar dapat meningkatkan koefisien gesek, sehingga tegangan geser dan *pressure drop* (Δp) meningkat.

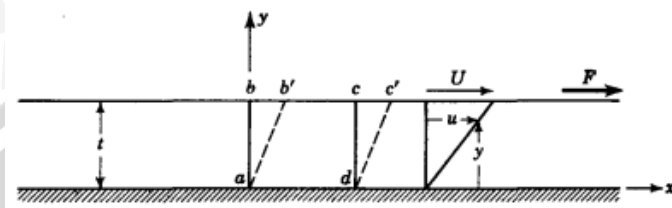
Waluyo dan Sugiyanto (2013), tentang uji eksperimental *orifice* multilubang pada saluran berdiameter 50 mm dengan ukuran diameter tetap pada tiap lubangnya yaitu 14 mm, dengan diameter *hub* 28 mm. Pada penelitian ini dilakukan pengujian eksperimental terhadap bentuk *orifice plate* yang memiliki lebih dari satu lubang. Pengamatan lebih difokuskan pada perbandingan 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 (*fully developed*) setelah melalui *orifice*. Manfaat kedua adalah memungkinkan untuk terhindar dari jebakan aliran fluida kondensat pada penggunaannya untuk fluida dua fase.

Gigih (2013), tentang pengaruh variasi lubang *orifice plate* terhadap faktor koreksi *orifice meter*. Penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jumlah variasi 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*, faktor koreksi *orifice meter* akan semakin meningkat pada debit yang sama.

2.2 Fluida

2.2.1 Definisi Fluida

Fluida adalah zat yang mengalami perubahan bentuk (deformasi) secara terus-menerus (kontinyu) apabila diberi tegangan geser. Gaya geser adalah komponen gaya yang bersentuhan dengan permukaan. Jika gaya geser dibagi dengan luas permukaan, akan menghasilkan suatu nilai yang disebut dengan tegangan geser (Streeter, 1962).



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

Pada Gambar 2.1 terlihat suatu zat yang diletakkan di antara dua pelat sejajar dengan jarak t . Pelat bagian bawah diam, gaya F diberikan pada pelat bagian atas yang akan menghasilkan tegangan geser F/A pada zat di antara kedua pelat. A adalah area pelat bagian atas. Ketika gaya F menyebabkan pelat bagian atas bergerak dengan kecepatan konstan, dapat disimpulkan zat di antara kedua pelat tersebut adalah fluida.

Fluida yang bersentuhan langsung dengan suatu benda padat memiliki kecepatan yang sama dengan benda padat, asalkan tidak terjadi *slip* pada batas fluida dengan benda padat tersebut. Fluida di posisi $a-b-c-d$ mengalir ke posisi yang baru, yaitu $a'-b'-c'-d'$.

Percobaan sebelumnya menunjukkan bahwa gaya F sebanding dengan A , namun berbanding terbalik dengan dengan tebal t , besaran lainnya dijaga konstan, ditunjukkan dalam persamaan:

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

Dengan:

- F : Gaya (N)
- μ : Faktor kesebandingan dan pengaruh fluida
- U/t : Kecepatan sudut atau laju perubahan bentuk sudut fluida, dapat ditulis sebagai du/dy (m/s)
- A : Luas penampang (m^2)

Dengan μ adalah faktor kesebandingan dan pengaruh fluida, jika tegangan geser $\tau = F/A$, maka:

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

Dengan:

- τ : Tegangan geser
- U/t : Kecepatan sudut garis a-b
- μ : Faktor kesebandingan dan pengaruh fluida

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 terjadi. Nilai du/dy juga dapat dinyatakan sebagai laju sebuah lapisan yang bergerak relatif terhadap lapisan yang berdekatan. Dalam bentuk diferensiasi dapat dituliskan seperti di bawah ini:

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

Dengan:

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

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

2.2.2 Klasifikasi Fluida

Berdasarkan kemampuan fluida dalam menahan tegangan geser, fluida dapat digolongkan menjadi fluida *Newtonian* dan fluida *Nonnewtonian* (Streeter, 1962). Fluida *Newtonian* adalah fluida yang memiliki tegangan geser linear terhadap kecepatan deformasi. Sebaliknya, fluida *Nonnewtonian* memiliki tegangan geser tidak linear terhadap kecepatan deformasi.

Viskositas fluida *Newtonian* bernilai konstan sekalipun diberi gaya yang sangat kecil, sedangkan fluida *Nonnewtonian* akan mengalami perubahan viskositas ketika diberi gaya. Contoh fluida *Newtonian* adalah air, udara, dan oli, sedangkan fluida *Nonnewtonian* adalah plastik cair dan lilin cair.

Menurut Cengel (2006), fluida dapat digolongkan menjadi fluida mampu mampat (*compressible*) dan fluida tak mampu mampat (*incompressible*), tergantung dari massa jenis (densitas) fluida selama mengalir. Fluida tak mampu mampat (*incompressible*) adalah fluida yang memiliki massa jenis (ρ) hampir konstan, setiap bagian fluida tidak mengalami perubahan selama bergerak. Fluida mampu mampat (*compressible*) memiliki massa jenis (ρ) berubah-ubah, setiap bagian fluida mengalami perubahan selama bergerak.

Fluida cair termasuk dalam fluida *incompressible*, karena pada dasarnya densitas fluida cair konstan. Pada tekanan 210 atm, fluida cair (air) hanya mengalami perubahan densitas sebesar 1% untuk kenaikan 1 atm tekanan, sedangkan fluida gas mengalami perubahan densitas 1% untuk kenaikan 0,01 atm. Oleh karena itu, fluida gas termasuk dalam fluida *compressible*.

Fluida gas dapat dikatakan *incompressible* jika hanya mengalami perubahan densitas sebesar 5%, dapat terjadi jika fluida gas memiliki bilangan *Mach* (M) kurang dari 0,3. Oleh karena itu, efek kompresibilitas fluida gas (udara) dapat diabaikan jika memiliki kelajuan kurang dari 100 m/s.

2.3 Sifat-Sifat Fluida

2.3.1 Densitas (ρ) dan Berat Spesifik (γ)

Densitas (ρ) didefinisikan sebagai massa tiap satuan volume, sedangkan berat spesifik (γ) didefinisikan sebagai berat tiap satuan volume. Berat spesifik menggambarkan gaya gravitasi dalam tiap satuan volume fluida, sehingga berat spesifik pasti memiliki satuan gaya tiap unit volume, misalnya *Newton* tiap meter kubik (N/m^3) (Daugherty, 1977). Densitas dan berat spesifik fluida dapat dinyatakan sebagai berikut:

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

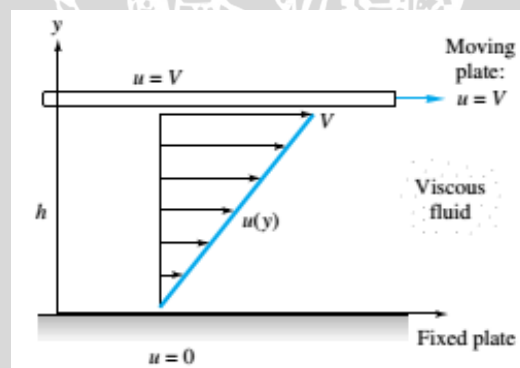
Dengan:

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

Densitas (ρ) bernilai mutlak/konstan, sedangkan berat spesifik (γ) tidak mutlak. Nilai berat spesifik tergantung pada percepatan gravitasi (g) yang dapat berubah sesuai dengan ketinggian dari permukaan laut.

2.3.2 Viskositas (*Viscosity*)

Viskositas fluida adalah ukuran dari ketahanan fluida terhadap geseran atau deformasi sudut. Gaya gesek pada aliran fluida disebabkan oleh kohesi dan pertukaran momentum antarmolekul fluida. Saat temperatur meningkat, viskositas cairan menurun, sedangkan viskositas gas justru meningkat. Hal ini terjadi karena dominasi gaya kohesi yang berkurang seiring dengan kenaikan temperatur. Berbeda dengan cairan, pada gas faktor yang mendominasi adalah pertukaran molekul antarlapisan yang memiliki kecepatan berbeda (Daugherty, 1977).



Gambar 2.2 Aliran fluida viskos di antara dua pelat sejajar
Sumber: White (1998)

Pada Gambar 2.2 dalam kondisi gerak relatif, fluida di antara kedua pelat mempunyai kecepatan linear (jika tidak terdapat gradien tekanan sepanjang pelat sesuai dengan arah gerakan), atau tidak terjadi *slip* antara fluida dengan pelat. Oleh karena itu, pada hubungan antara fluida dengan benda solid, kecepatan fluida harus sama dengan benda *solid*.

Viskositas adalah sifat fluida yang mendasari diberikannya tahanan terhadap gaya geser pada fluida. Hukum viskositas *Newton* (Persamaan 2-3) menyatakan bahwa

untuk laju perubahan bentuk sudut fluida tertentu, tegangan geser berbanding lurus dengan viskositas (Streeter, 1962).

Viskositas fluida dapat digolongkan menjadi dua, yaitu viskositas dinamik (μ) dan viskositas kinematik (ν). Viskositas dinamik (μ) atau disebut juga dengan viskositas mutlak (*absolute viscosity*) adalah viskositas yang menunjukkan ketahanan suatu fluida terhadap tegangan geser/gaya yang bekerja padanya. Jika viskositas dinamik dibagi dengan massa jenis (ρ), akan menghasilkan suatu nilai yang disebut dengan viskositas kinematik (Cengel, 2006).

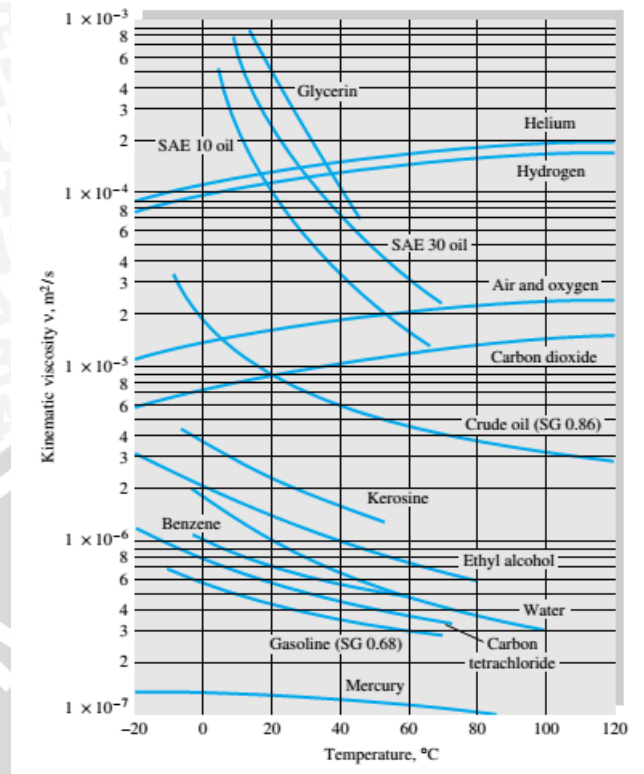
Hubungan antara viskositas dinamik dan viskositas kinematik dapat dirumuskan seperti di bawah ini:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{Cengel, 2006}) \quad (2-5)$$

Dengan:

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

Untuk fluida cair, viskositas dinamik dan kinematik tidak tergantung pada tekanan. Perubahan kecil dari tekanan biasanya diabaikan, kecuali pada tekanan yang sangat tinggi (Cengel, 2006).



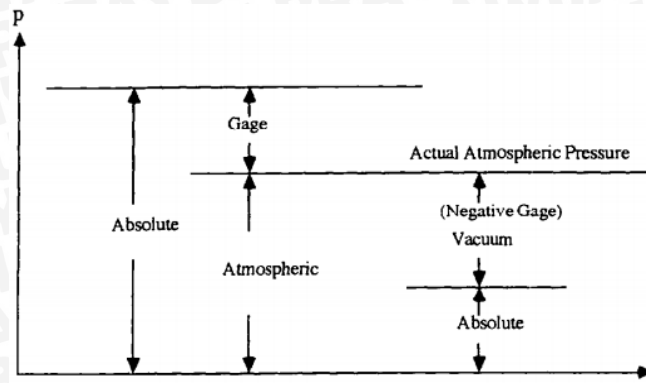
Gambar 2.3 Viskositas kinematik berbagai macam fluida pada tekanan 1 atm
Sumber: White (1998)

2.3.3 Tekanan (*Pressure*)

Tekanan (p) adalah tegangan di suatu titik pada fluida statis. Selain kecepatan, tekanan adalah variabel yang paling dinamis dalam Mekanika Fluida. Perbedaan (*gradient*) tekanan selalu mempengaruhi aliran fluida pada saluran. Pada aliran dengan kecepatan rendah, besarnya tekanan dapat diabaikan, kecuali jika turun sangat rendah hingga terbentuk gelembung uap udara di dalam cairan (White, 1998).

Menurut Bloomer (2000), tekanan dapat digolongkan menjadi tekanan atmosfer aktual (*absolute*), tekanan atmosfer standar, dan tekanan observasi. Tekanan atmosfer aktual adalah berat udara tiap unit area di atas sebuah datum, bervariasi sesuai dengan kondisi cuaca. Biasanya *barometer* digunakan untuk mengukur tekanan ini, sehingga tekanan ini disebut juga dengan tekanan *barometer* (*barometric pressure*).

Pada perjanjian internasional, tekanan atmosfer standar didefinisikan sebagai 101.325 kN/m^2 (kPa). Pada unit USCS, nilai ini adalah 14.696 lbf/in.^2 (psi), atau sama dengan 29,92 inchi merkuri pada temperatur 32 K.

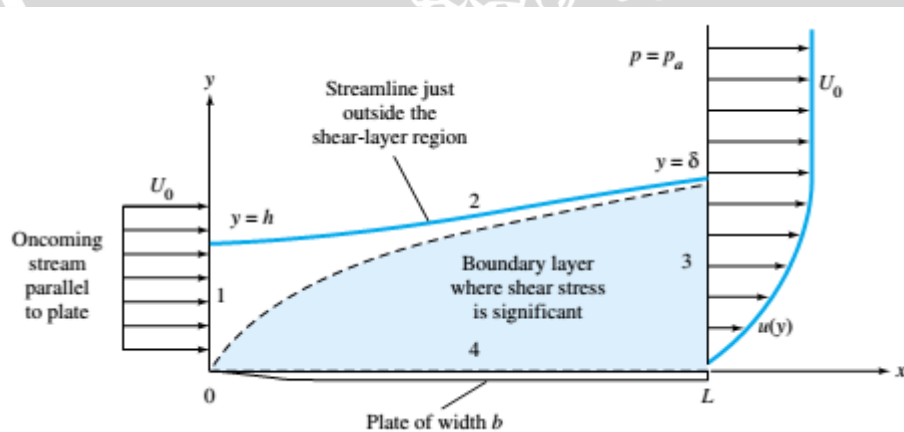


Gambar 2.4 Hubungan tekanan
Sumber: Bloomer (2000)

Alat-alat ukur tekanan (kecuali *barometer*) menunjukkan perbedaan antara tekanan yang diukur dengan tekanan atmosfer. Pada Gambar 2.4, jika nilai tekanan yang diukur berada di atas tekanan atmosfer disebut dengan *gage pressures*, sedangkan jika tekanan yang diukur lebih rendah dari tekanan atmosfer, disebut dengan *vacuum (negative gage) pressures*.

2.3.4 Lapisan Batas (*Boundary Layer*)

Lapisan batas (*boundary layer*) adalah lapisan pada daerah aliran yang berdekatan dengan dinding, disebabkan oleh gaya viskos dan perubahan kecepatan yang signifikan (Cengel, 2006). Lapisan yang menempel pada permukaan padat memperlambat lapisan fluida yang berdekatan. Hal tersebut terjadi karena pengaruh gaya viskos antarlapisan fluida. Kondisi tidak selip (*no slip*) sangat mempengaruhi perkembangan profil kecepatan fluida.



Gambar 2.5 Skema *boundary layer*
Sumber: White (1998)

Pada Gambar 2.5 terlihat ketika berada pada titik 0, fluida memiliki kecepatan yang seragam, karena aliran fluida masih belum terpengaruh oleh gaya pada permukaan dinding. Saat fluida melewati titik 2, fluida terpengaruh oleh gaya dinding, sehingga terjadi gradien kecepatan. Semakin jauh fluida mengalir, semakin besar nilai pengurangan kecepatannya.

2.3.5 Bilangan Reynolds

Bilangan *Reynolds* adalah nilai perbandingan antara inersia dengan gaya viskos (Bloomer, 2000). Aliran fluida dapat mengalami perubahan pola aliran dari laminar bertransisi hingga menjadi turbulen. Pada *incompressible flow*, kondisi aliran laminar atau turbulen ditentukan oleh besarnya Bilangan *Reynolds*.

Persamaan Bilangan *Reynolds* untuk aliran di dalam pipa adalah seperti di bawah ini:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (\text{Nakayama, 1999}) \quad (2-6)$$

Dengan:

- v : Kecepatan rata-rata aliran dalam pipa (m/s)
- D : Diameter pipa (m)
- ν : Viskositas kinematik (m^2/s)
- μ : Viskositas dinamik (kg/ms)
- ρ : Densitas (kg/m^3)

2.4 Bentuk dan Tipe Aliran Fluida

2.4.1 Aliran Laminar dan Aliran Turbulen

Ada dua jenis aliran fluida yang ditunjukkan oleh percobaan Osborne Reynolds pada tahun 1883. Ia menyuntikkan cairan berwarna yang memiliki densitas sama seperti air ke tabung kaca besar tempat air mengalir dari tangki. Sebuah katup di ujung tabung kaca untuk memvariasikan aliran. Ketika kecepatan aliran dalam tabung kecil, cairan berwarna ini terlihat sebagai garis lurus sepanjang tabung, sehingga menunjukkan bahwa partikel air bergerak dalam garis lurus sejajar. Kecepatan air secara bertahap meningkat seiring dengan bukaan katup. Ada titik di mana aliran berubah, garis aliran menjadi bergelombang, pada jarak tidak jauh dari pintu masuk aliran akan terbentuk *vortex* yang kemudian warnanya akan tersebar merata hingga tidak ada arus yang dapat dibedakan (Daugherty, 1977).

Aliran laminar adalah aliran fluida yang memiliki garis aliran (*stream line*) 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, tidak ada percampuran partikel fluida dalam skala besar di antara lapisan-lapisan fluida.

Fluida memiliki aliran laminar ketika fluida bergerak dengan kecepatan rendah dan memiliki viskositas yang tinggi. Aliran laminar memiliki Bilangan *Reynolds* lebih kecil dari 2300. Pada aliran laminar, kecenderungan untuk terjadi turbulensi diredam oleh gaya viskos yang memberikan tahanan terhadap gerakan relatif lapisan fluida yang berdekatan. Pada laju aliran rendah, aliran laminar tergambar sebagai filamen panjang yang mengalir sepanjang aliran sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6 (Pritchard, 2011).



Gambar 2.6 Aliran laminar
Sumber: Munson (2009)

Aliran turbulen adalah aliran fluida yang memiliki garis aliran (*stream line*) bergerak secara acak ke segala arah dan saling berpotongan antara satu dengan yang lain. Hal ini disebabkan oleh partikel fluida yang bergerak secara acak dengan saling tukar momentum dan partikel antarlapisan fluida yang berdekatan dalam skala besar. Fluida bergerak ke segala arah, hingga terjadi pembauran aliran fluida. Aliran turbulen memiliki Bilangan *Reynolds* lebih besar dari 4000. Fluida bercampur dalam waktu cepat yang selanjutnya memecah dan menjadi tidak terlihat sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2.7 (Munson, 2009).



Gambar 2.7 Aliran turbulen
Sumber: Munson (2006)

Aliran yang memiliki Bilangan *Reynolds* di antara 2300 hingga 4000 disebut dengan aliran transisi (*transitional flow*). Aliran transisi adalah aliran peralihan antara

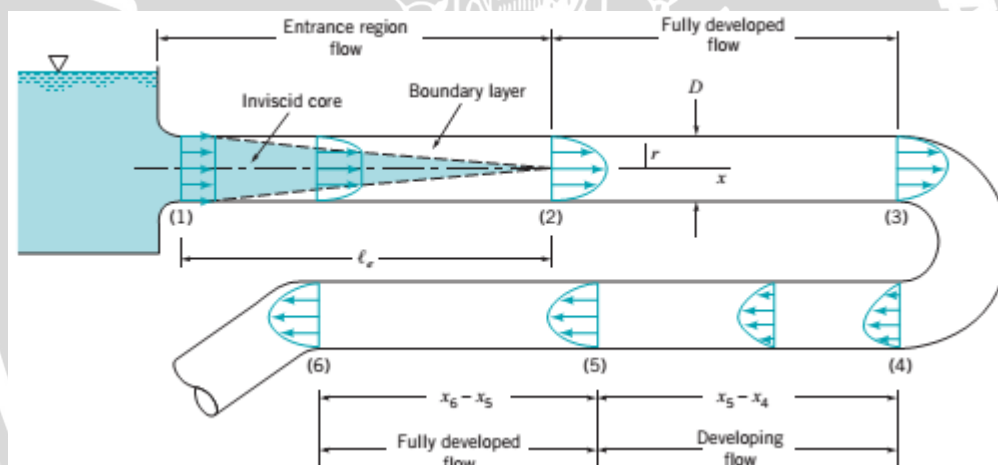
aliran laminar menjadi turbulen. Jenis aliran ini tergantung dari tingkat gangguan aliran yang disebabkan oleh kekasaran permukaan, getaran pipa, dan fluktuasi aliran (Cengel, 2006). Aliran transisi ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Aliran transisi
Sumber: Munson (2006)

2.4.2 Aliran Berkembang Penuh (*Fully Developed Flow*)

Fluida yang mengalir di dalam pipa harus mengisi semua daerah di dalam pipa. Daerah di dekat aliran tempat fluida memasuki pipa disebut dengan *entrance region*, diilustrasikan pada Gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2.9 Perkembangan aliran laminar di dalam pipa
Sumber: Munson (2009)

Pada Gambar 2.9 terlihat bahwa fluida memasuki pipa dengan profil kecepatan yang hampir seragam pada lokasi (1). Fluida bergerak melalui pipa, efek viskos menyebabkan fluida menempel pada dinding pipa (kondisi batas padat dan cair tidak terjadi selip). Lapisan batas (*boundary layer*) di mana efek viskos sangat berpengaruh terjadi sepanjang dinding pipa, sehingga profil kecepatan berubah sepanjang pipa, hingga fluida mencapai akhir dari *entrance length*, pada lokasi (2) profil kecepatan aliran tidak berubah.

Menurut Pritchard (2011), kondisi saat profil kecepatan tidak mengalami perubahan seiring dengan bertambahnya jarak, disebut dengan aliran berkembang penuh (*fully developed flow*). Jarak dari awal masuk pipa hingga aliran berkembang penuh (*fully developed*) disebut *entrance length*. *Entrance length* merupakan suatu fungsi dari Bilangan *Reynolds*. Rumus *entrance length* adalah seperti di bawah ini:

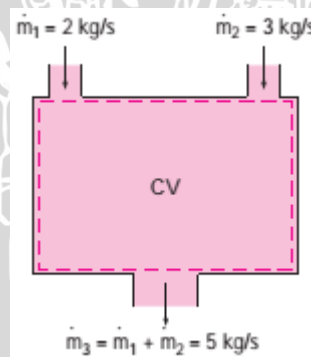
$$\frac{L}{D} = 0,06 \cdot \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot D}{\mu} \quad (\text{Pritchard, 2011}) \quad (2-7)$$

Dengan:

- L : *Entrance length* (m)
- D : Diameter pipa
- ρ : Densitas (kg/m^3)
- \bar{v} : Kecepatan rata-rata (m/s)
- μ : Viskositas absolut ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$)

2.5 Aliran Fluida Dalam Pipa

2.5.1 Analisis Kontinuitas



Gambar 2.10 Prinsip kekekalan massa pada sistem saluran dua lubang masuk dan satu lubang keluar

Sumber: Cengel (2006)

Berdasarkan Gambar 2.10, aliran fluida pada bagian \dot{m}_1 dan \dot{m}_2 mengalir dengan laju aliran konstan, memasuki sebuah penampung, kemudian keluar pada sebuah lubang \dot{m}_3 . Laju aliran masuk dan keluar konstan, sehingga laju aliran pada \dot{m}_3 adalah penjumlahan dari aliran \dot{m}_1 dan \dot{m}_2 (Cengel, 2006).

$$m_1 = m_2 = \text{konstan}$$

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (\text{Cengel, 2006}) (2-8)$$

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

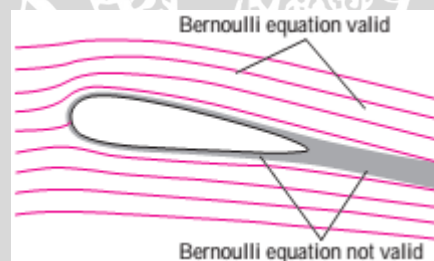
$$Q_1 = Q_2 = \text{konstan}$$

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

Dengan:

- Q : Debit aliran fluida (m³/s)
- A : Luas penampang pipa (m²)
- v : Kecepatan aliran fluida dalam pipa (m/s)

2.5.2 Persamaan *Bernoulli* untuk Fluida Ideal



Gambar 2.11 Daerah prinsip *Bernoulli* berlaku dan tidak berlaku
Sumber: Cengel (2006)

Menurut Cengel (2006), persamaan *Bernoulli* adalah hubungan perkiraan antara tekanan, kecepatan, dan ketinggian yang berlaku di daerah *steady* aliran *incompressible* di mana gaya gesek dapat diabaikan.

$$w = m \cdot g \cdot z + m \cdot \frac{P}{\rho} + m \cdot \frac{V^2}{2} = \text{konstan} \quad (\text{Streeter, 1962}) (2-10)$$

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

$$w = g \cdot z + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{konstan} \quad (\text{White, 1998}) \quad (2-11)$$

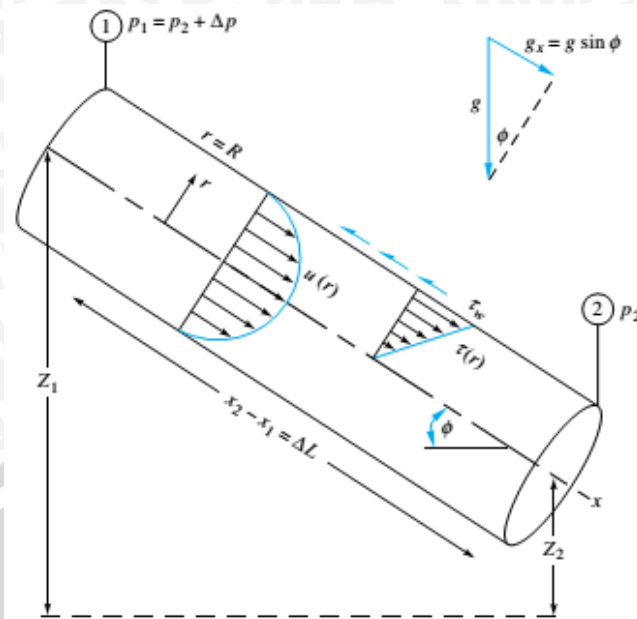
Apabila persamaan tersebut dibagi lagi dengan percepatan gravitasi (g), maka akan didapatkan salah satu ruas dari persamaan *Bernoulli* yang mempunyai arti ketinggian. Persamaan ketinggiannya yaitu:

$$h = z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} = \text{konstan} \quad (\text{White, 1998}) \quad (2-12)$$

Jadi, sesuai dengan persamaan ketinggian di atas pada Gambar 2.12 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 memiliki energi ketinggian tempat, tekanan dan kecepatan yang sama besarnya. Sebagai contoh aliran air di dalam pipa, pada 1 kg air memiliki tekanan tertentu dan luas penampang tertentu, serta V_1 .

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \quad (\text{Streeter, 1962}) \quad (2-13)$$

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 turun, hal ini akan terlihat dengan jelas letak pipa tersebut dibuat mendatar $Z_1=Z_2$.



Gambar 2.12 Aliran yang telah berkembang penuh di antara dua penampang dalam pipa miring

Sumber: White (1998)

2.5.3 Persamaan *Bernoulli* Untuk Fluida Aktual (*Real*)

Persamaan *Bernoulli* untuk fluida aktual (*real*) menggambarkan kesetimbangan energi seperti halnya hukum energi mekanik, tetapi mengikutsertakan kerugian-kerugian energi yang terjadi.

Pada fluida *real*, total energi yang dimiliki fluida tidak konstan, karena terjadi kehilangan energi selama fluida mengalir. Untuk aliran fluida *real* di dalam pipa ada beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu fluida memiliki viskositas yang menyebabkan distribusi kecepatan pada penampang melintang saluran tidak seragam dan berakibat pada hilangnya energi (*head losses*).

Ketika fluida berviskositas mengalir di dalam pipa, aliran diperlambat oleh gaya viskos dan *adhesi* antara molekul fluida dengan dinding pipa. Variasi kecepatan terjadi ketika lapisan-lapisan fluida saling terpengaruh satu sama lain karena gaya gesek atau tegangan geser yang disebabkan oleh perbedaan kecepatan antarlapisan fluida. Partikel-partikel fluida berviskositas bergerak tidak teratur, sehingga dapat menyebabkan timbulnya *vortex* atau *swirl*, hal ini dapat menyebabkan kehilangan energi pada fluida.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \alpha_1 \frac{V \cdot m_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \alpha_2 \frac{V \cdot m_2^2}{2 \cdot g} + \sum h \quad (\text{Nekrasov, 1990}) \quad (2-14)$$

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

2.6 Head Losses

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

2.6.1 Major Losses

Major losses adalah energi yang hilang di sepanjang pipa lurus seragam dan sebanding dengan panjang pipa. Kerugian ini disebabkan oleh gesekan internal fluida dan gesekan antara fluida dengan dinding saluran. *Major losses* akan selalu terjadi di semua pipa, baik pipa halus maupun pipa kasar. Persamaan untuk *major losses* menurut Parcy seperti di bawah ini:

$$h = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (\text{Nekrasov, 1990}) \quad (2-15)$$

Dengan:

- h : *Major losses* (m)
- λ : Faktor gesek
- l : Panjang pipa (m)
- d : Diameter pipa (m)
- v : Kecepatan aliran fluida (m/s)
- g : Percepatan gravitasi (m/s²)

2.6.2 *Minor Losses*

Minor losses adalah energi fluida yang hilang karena bentuk lokal dari saluran, seperti perubahan luas penampang, katup, belokan, *orifice*, dan lain-lain. *Minor losses* terjadi karena aliran yang melewati bentuk lokal dari saluran mengalami perubahan kecepatan dan arah.

Minor losses dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$h = \xi \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (\text{Nekrasov, 1990}) \quad (2-16)$$

Dengan:

- h : *Minor losses* (m)
- ξ : Koefisien kerugian
- v : Kecepatan aliran fluida (m/s)
- g : Percepatan gravitasi (m/s^2)

2.7 *Vortex*

Vortex adalah massa fluida cair atau gas yang partikel-partikelnya bergerak berputar. Gerakan berputar partikel fluida disebabkan oleh adanya perbedaan kecepatan antarlapisan fluida yang bersebelahan dengan jarak tertentu. Gradien kecepatan ini menyebabkan terjadinya gaya puntir (torsi). Torsi ini akan menyebabkan terjadinya *vortex* pada fluida.

Menurut proses terbentuknya, *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, jadi fluida berputar karena gerakan internalnya. Contoh *vortex* bebas yaitu pusaran air di sungai dan pusaran di belokan pipa akibat dari aliran sekunder. *Vortex* paksa terjadi jika proses pembentukan *vortex* melibatkan energi dari luar, misalnya fluida diberi torsi atau puntiran dari luar. Contoh *vortex* paksa yaitu fluida di dalam suatu bejana, lalu diputar dengan pipa silinder.

Sesungguhnya *vortex* berwujud tiga dimensi dan dapat berubah sesuai dengan nilai Bilangan *Reynolds*. Pada Bilangan *Reynolds* rendah, *vortex* berbentuk seperti tapal kuda, semakin tinggi Bilangan *Reynolds* yang dimiliki *vortex*, bentuknya akan semakin meruncing.

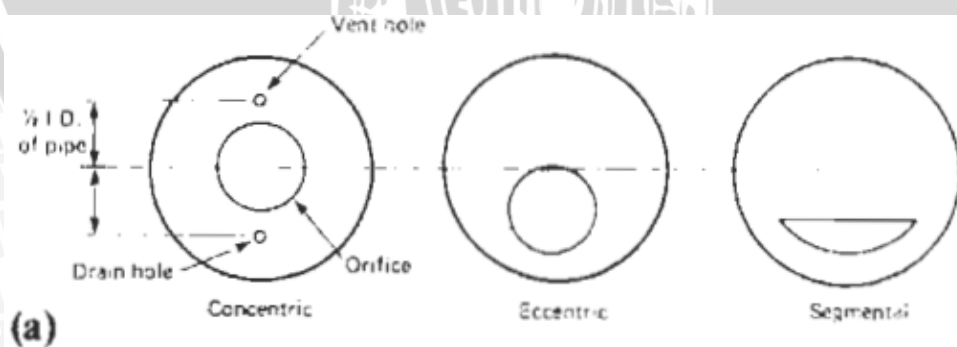


Gambar 2.13 *Vortex* di belakang silinder melingkar
Sumber: White (1998)

2.8 Orifice Plate

Orifice plate merupakan salah satu jenis sensor yang digunakan untuk mengukur aliran fluida dengan konsep pengukuran beda tekanan. *Orifice plate* terdiri dari pipa yang bagian dalamnya diberi pelat berlubang lebih kecil dari ukuran diameter pipa. Sensor tekanan diletakkan di posisi sebelum masuk *orifice plate* (P_1), dan satu lagi diletakkan pada posisi setelah keluar dari *orifice plate* (P_2).

Orifice plate merupakan pelat berlubang dengan pinggiran yang tajam. Pelat ini terbuat dari bahan yang kuat seperti logam. Selain terbuat dari logam, ada juga *orifice plate* yang terbuat dari plastik untuk mengurangi risiko kerusakan akibat karat (korosi). Macam-macam tipe *orifice plate* dapat dilihat pada Gambar 2.14.

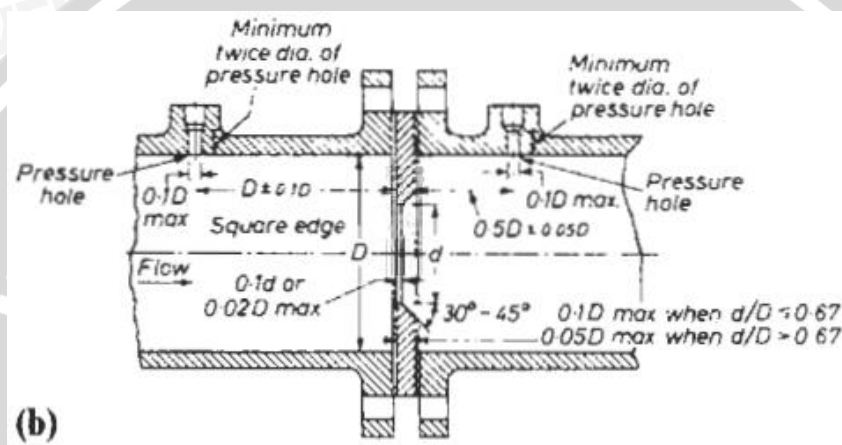


Gambar 2.14 Jenis-jenis *orifice plate*
Sumber: Walt Boyes (2003)

Orifice plate tipe eksentris dan segmental digunakan untuk mengukur aliran yang mengandung bahan-bahan padat. Bila menggunakan *orifice plate* tipe konsentris, akan timbul endapan benda padat yang akan mengganggu pengukuran. Demikian juga

lubang kecil yang terletak pada bagian bawah, dibuat sedemikian rupa agar kesalahan pengukuran dapat ditekan seminimal mungkin. *Orifice plate* jenis ini digunakan untuk mengalirkan fluida akibat sedimentasi agar tidak berkumpul pada *orifice plate* yang nantinya akan mengganggu proses pengukuran aliran fluida. Udara yang terjebak dalam aliran fluida dapat dikeluarkan dengan cara memberi lubang kecil di bagian atas.

Pelat ini umumnya diikat di antara dua *flange* pada pipa, lubang *vent* dan *drain* disediakan untuk mencegah penumpukan/pembentukan endapan dan gas pada instalasi, seperti terlihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Posisi peletakan *orifice plate* konsentris
Sumber: Walt Boyes (2003)

Perbedaan tekanan diukur pada lokasi yang tepat agar mendapatkan hasil pengukuran yang akurat. Penempatan ini dapat dilakukan di berbagai tempat tergantung pada pengaplikasiannya. Pemasangan *tap* (lubang pengukuran untuk *orifice plate*) ada beberapa macam, seperti di bawah ini:

1. *Tap Vena Contracta*

Tap pertama dari *tap vena contracta* diletakkan pada jarak 1D sebelum *orifice*, sedangkan *tap* kedua diletakkan pada *vena contracta*. *Vena contracta* adalah tempat di mana luas aliran mencapai minimum, sehingga tekanannya paling kecil.

Oleh karena letaknya tergantung pada diameter pipa dan diameter *orifice*, maka pemasangan *tap* kedua ini akan berbeda untuk diameter pipa dan *orifice* yang berbeda. Keuntungan menggunakan *tap vena contracta* adalah hasil pengukurannya lebih teliti, karena mendapat tekanan diferensial yang lebih besar. Namun, *tap* harus dipasang pada lokasi yang tepat di mana *vena contracta* terbentuk.

2. Tap Flange

Tap flange diletakkan simetris di sebelah kiri dan kanan *orifice*, sejauh satu *inchi*. Keuntungan dari penggunaan cara ini adalah *tap* dapat dipasang menjadi satu bagian dengan *flange* pipa tanpa terganggu. Pipa dan *orifice plate* dapat diganti tanpa harus mengubah letak *tap*. Kerugiannya adalah hasil pengukuran yang kurang teliti, karena terdapat beda tekanan yang kecil.

3. Tap Pipa

Tap pertama dari *tap* pipa diletakkan sejauh $2\frac{1}{2}D$ sebelum *orifice*, sedangkan *tap* kedua diletakkan sejauh $8D$ setelah *orifice*, seperti terlihat pada Gambar 2.19. Tekanan diferensial yang diukur sangat kecil karena hanya menyatakan rugi tekanan oleh *orifice plate*. Agar pengukuran aliran dengan menggunakan *orifice plate* dapat dilakukan dengan ketelitian yang tinggi, tekanan di dekat *tap* tidak boleh mengalami gangguan. Gangguan-gangguan ini dapat terjadi jika di dekat *tap* terdapat *fitting* seperti sambungan pipa, belokan, katup, *regulator*, pompa, dan lain-lain. Umumnya, daerah sejauh 5 m sebelum *orifice* hingga 20 m setelah *orifice* harus bebas dari *fitting*. Nilai-nilai ini tergantung pada perbandingan diameter dan tipe *fitting* yang berbeda dari kiri ke kanan *orifice*.

Dengan demikian, beberapa keuntungan penggunaan *orifice plate* dalam instalasi pipa antara lain:

1. Pengoperasian sederhana.
2. Andal dan tahan lama.
3. Harga terjangkau.

Di sisi lain, penggunaan *orifice plate* dalam instalasi juga memiliki beberapa kerugian, antara lain:

1. Proses pemasangan rumit.
2. *Pressure loss* tinggi.

2.9 Pengukuran Aliran (*Flow Measurement*)

Pengukuran aliran adalah sebuah teknik yang digunakan dalam proses yang membutuhkan perpindahan materi dari satu tempat ke tempat lain (Walt Boyes, 2003). Terdapat beberapa macam 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 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. Persamaan dasar yang digunakan dalam menganalisis pengukuran aliran adalah persamaan kontinuitas, persamaan *Bernoulli* dan perhitungan *head losses* aliran.

2.9.1 Pengukuran Aliran Internal

Pengukuran aliran internal dapat dilakukan dengan menggunakan empat cara, antara lain:

1. Metode langsung.
2. Metode pembatasan. *Orifice, nozzle, venturi*, dan elemen aliran laminar.
3. Metode linear. *Rotameter, turbine flow meter, vortex flow meter, electromagnetic flow meter, magnetic flow meter*, dan *ultrasonic flow meter*.
4. Metode pembagian. Pipa *pitot (pitot tube)* dan *anemometer*.

2.9.1.1 Metode Langsung

Metode langsung pengukuran aliran dapat dilakukan dengan cara mengukur volume atau massa aliran dalam waktu yang lama dan diukur secara tepat. Pengukuran laju volume aliran atau massa aliran dengan metode langsung ini cukup teliti, tetapi apabila fluida yang diukur adalah gas, efek kompresibilitasnya harus diperhitungkan. Persamaannya adalah sebagai berikut:

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

Dengan:

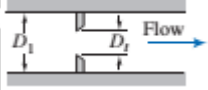

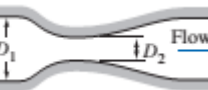
- \dot{m} : Laju massa aliran (kg/s)
 ρ : Densitas (kg/m³)
 $(\Delta V/\Delta t)$: Perubahan volume terhadap perubahan waktu (m³/s)

2.9.1.2 Metode Pembatasan

Metode pembatasan adalah metode untuk 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 aktual dapat ditentukan dengan memperhitungkan faktor koreksi dari masing-masing alat ukur yang ditentukan secara empiris. Alat ukur metode tidak 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*.

Tabel 2.1 Karakteristik alat ukur debit

<i>Flow Meter</i>	<i>Diagram</i>	<i>Head Losses</i>	<i>Cost</i>
<i>Orifice</i>		<i>High</i>	<i>Low</i>
<i>Nozzle</i>		<i>Intermediate</i>	<i>Intermediate</i>
<i>Venturi</i>		<i>Low</i>	<i>High</i>

Sumber: Pritchard (2011)

Penjelasan dari beberapa karakteristik alat pengukur debit dengan metode pembatasan pada Tabel 2.1 adalah sebagai berikut:

1. *Orifice meter*

Orifice meter adalah pelat tipis yang dijepit di antara dua *flange* pipa. Bentuknya sederhana, harganya murah, dan mudah untuk dipasang. Kekurangan penggunaan *orifice* adalah kerugian *head* yang tinggi dan kapasitas pengukuran yang rendah.

Debit pada *orifice* dapat diukur dengan menggunakan rumus matematis di bawah ini:

$$Q_0 = \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta H}{\rho \cdot (1 - \beta^4)}} \quad (\text{Waluyo, 2013}) \quad (2-18)$$

Untuk *orifice* multilubang dapat diukur dengan menggunakan rumus di bawah ini:

$$Q_0 = \frac{\pi}{4} \cdot D_e^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta H}{\rho \cdot (1 - \beta^4)}} \quad (\text{Waluyo, 2013}) \quad (2-19)$$

Untuk:

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

Dengan:

- Q_0 : Debit *orifice meter* (m^3/s)
- D_2 : Diameter lubang dasar *orifice meter* (m)
- D_e : Diameter ekuivalen *orifice meter* (m)
- N : Jumlah lubang *orifice plate*
- ΔH : *Pressure drop orifice meter* (N/m^2) (Pa)
- ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3)
- β : Rasio diameter D_e/D_1 , dengan D_1 : diameter pipa (m)

2. *Nozzle meter*

Nozzle meter adalah alat ukur kapasitas aliran fluida, dapat dipasang pada instalasi pipa. *Nozzle* memiliki harga lebih mahal dibandingkan dengan *orifice meter* dengan kerugian *head* lebih kecil daripada *orifice meter*.

3. *Venturi meter*

Venturi meter dibuat dengan pengecoran logam, lalu dihaluskan untuk memperoleh hasil sesuai dengan ketentuan standar produk. *Venturi meter* memiliki harga paling mahal jika dibandingkan dengan *orifice meter* dan *nozzle meter* karena terbuat dari logam, dengan kapasitas pengukuran aliran fluida paling tinggi dan memiliki kerugian *head* paling rendah.

2.10 Faktor Koreksi *Orifice (Discharge Coefficient)*

Pada kondisi aktual, aliran laminar sangat jarang terjadi. Laju partikel pada aliran cenderung acak dan tidak mempengaruhi laju aliran secara keseluruhan. Dalam fluida aktual, menurunnya nilai *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 *discharge coefficient*, dan dapat diketahui melalui persamaan:

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

Dengan:

- C_{Q_0} : Faktor koreksi *orifice meter*
 Q_0 : Debit *orifice meter* (m³/s)
 Q_{aktual} : Debit aktual (m³/s)

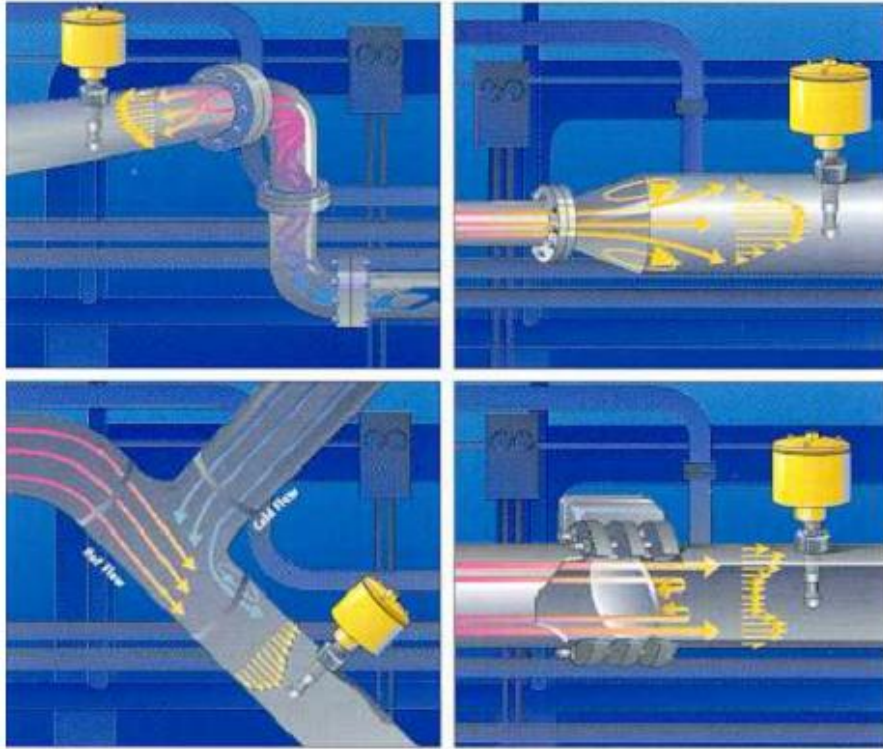
Atau jika kondisi temperatur, densitas, dan lain-lain bernilai sama pada kedua sisi *orifice plate*, maka rumus bisa ditulis berdasarkan volumenya, seperti di bawah ini:

$$C = \frac{\text{volume aktual}}{\text{volume teoritis}} \quad (\text{Walt Boyes, 2003}) (2-22)$$

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 alat yang dapat mengurangi gangguan-gangguan yang terjadi pada aliran di suatu instalasi perpipaan, sehingga dapat mengurangi turbulensi. *Flow straightener* memiliki kemampuan untuk mengisolasi gangguan-gangguan aliran yang disebabkan oleh belokan (*bend*), katup (*valve*), perubahan luas penampang, dan *orifice* dengan cara menghilangkan separasi dan *vortex* seperti terlihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Bentuk-bentuk lokal saluran
Sumber: Jeff Deane (1996)

2.12 Hipotesis

Semakin besar diameter lubang *orifice plate*, aliran fluida akan lebih cepat kembali seragam (*fully developed*), sehingga nilai *pressure drop* menurun dan mengakibatkan faktor koreksi *orifice meter* semakin meningkat.