

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

*Sling pump* merupakan aplikasi modern dari *archimedean screw pumps*, sebuah pompa yang berbentuk kerucut dan memiliki lilitan selang didalamnya sebagai pengganti ulir akan mengalirkan air ke ujung kerucut sehingga air akan berpindah dari daerah yang elavasinya rendah menuju daerah yang elavasinya lebih tinggi (Hoffman, 2002).

Fahriansyah (2015) melakukan penelitian *sling pump* jenis kerucut berskala laboratorium dengan variasi jumlah *inlet* dan kondisi pencelupan kerangka *sling pump* di dalam air, *sling pump* menghasilkan debit optimum sebesar 10,39 liter/menit pada kondisi pencelupan 80%.

Rizky Irmansyah (2015) melakukan penelitian dengan jumlah *inlet* menggunakan lilitan selang plastik dan redesain *manifold* debit air paling optimal dari hasil penelitian ini terdapat pada jumlah lilitan 16, 1 inlet dengan ketinggian 1 meter yaitu sebesar 4,46 liter/menit.

Penelitian tentang *sling pump* dengan variasi yang sama pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Waliyadi (2016) melakukan penelitian *sling pump* dengan variasi ketinggian dan kondisi pengecelupan 80%, jumlah lilitan 16 dengan menggunakan kecepatan 40 rpm hanya menghasilkan debit air 3,46 liter/menit dengan ketinggian *delivery* 2 meter.

Peneliti menilai bahwa penyebab rendahnya ketinggian *delivery* dan debit yang dihasilkan karena kondisi kebocoran pada *water mur*. Bagian tersebut berfungsi menghubungkan putaran kerangka *sling pump* ke pipa *delivery* untuk mengalirkan air dari selang pada *sling pump* menuju ke bak penampung, akibat dari kebocoran *water mur* mempengaruhi kemampuan untuk mencapai tinggi *delivery* dan debit keluaran *sling pump* yang tidak maksimal. Hasil dari penelitian ini dapat dikembangkan dengan melakukan pergantian *water mur* dengan *water swivel joint*.

Metode yang digunakan pada penelitian *sling pump* dengan variasi ketinggian *delivery* ini adalah pergantian *water mur* dengan *water swivel joint*, menggunakan kecepatan putar *sling pump* 40 rpm, jumlah lilitan selang 16, 1 *inlet* dan kondisi pengecelupan 80%, serta membandingkan hasil yang didapat oleh peneliti sebelumnya.

## **2.2. Dasar Teori**

### **2.2.1. Pengertian dan fungsi pompa**

Pompa adalah peralatan mekanis untuk meningkatkan energi tekanan pada cairan yang di pompa yang merubah energi mekanis dari mesin penggerak pompa menjadi energi potensial tekan. Pengubahan energi mekanis menjadi energi potensial tekan fluida tersebut dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu:

- a. Menggunakan *plunger* dengan gerakan bolak-balik.
- b. Menggunakan sudu atau impeler yang berputar.
- c. Menggunakan fluida perantara baik gas maupun cair yang berkecepatan tinggi, kemudian dicampur dengan fluida yang berkecepatan rendah yang akan dipompakan.
- d. Memangas atau udara bertekanan tinggi yang diinjeksikan ke saluran fluida yang dipompakan

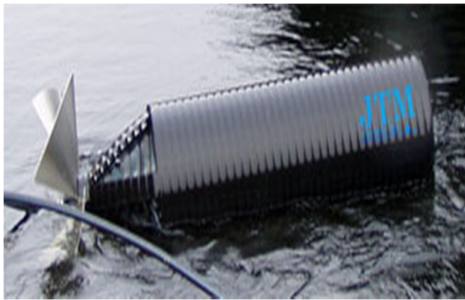
Pemakaian pompa sebagai alat bantu dalam kehidupan sehari-hari telah meluas penggunaannya disegala bidang kehidupan. Perencanaan pompa dibuat dari yang paling kecil, yaitu sebagai alat bantu pada rumah tangga sampai yang besar untuk bidang industri. Pada kehidupan sehari-hari, pompa dipakai dalam masalah ekonomi air, seperti : pompa sumur air, pompa air untuk irigasi, pompa distribusi air, pompa sambungan air dan lain-lain.

### **2.2.2. Sling Pump**

Teknologi *sling pump* merupakan jenis pompa *special effect* adalah pompa yang prinsip kerjanya mengkonversi energi dari energi tekanan dari fluida bergerak menjadi energi gerak sehingga membuat area bertekanan rendah dan dapat menghisap fluida di sisi  *suction* atau sisi hisap. Metode ini dapat digunakan

sebagai metode pembuatan pompa air yang tidak memerlukan energi listrik atau energi fosil.

*Sling Pump* adalah pompa air yang memanfaatkan tenaga *hydropower*, pada Gambar 2.1 *sling pump* menggunakan energi kinetik dari aliran air sungai yang memutar *propeller* dan meneruskan putaran tersebut ke kerangka *sling pump*, maka selang yang berada dalam rumah *sling pump* sebagai pengganti ulir akan merauk air secara terus-menerus, sehingga terjadi tekanan dan laju aliran air di sepanjang lilitan selang. Akibat adanya tekanan air di dalam selang, maka air memiliki gaya dorong, sehingga air akan berpindah dari daerah yang elavasinya rendah menuju daerah yang memiliki elavasinya lebih tinggi.



Gambar 2.1. *Sling pump*

### **2.2.3. Water Swivel Joint**

Penggunaan *water swivel joint* merupakan komponen penting dalam industri pengeboran. *swivel* terletak pada bagian paling atas dari rangkaian pipa bor alat ini mempunyai fungsi memberikan perpaduan gerak *vertikal* dengan gerak berputar dapat bekerja bersama-sama.

Gambar 2.2, merupakan *water swivel joint* yang digunakan pada industri pengeboran . Penggunaan *water swivel joint* pada penelitian *sling pump* terletak diantara kerangka *sling pump* dengan pipa *delivery* , *water swivel joint* digunakan untuk perpaduan gerak kerangka *sling pump* dengan pipa diam untuk dapat bekerja bersama-sama untuk meneruskan air menuju penampung.



Gambar 2.2. *Water swivel joint*

#### 2.2.4. Energi Air

Energi Air menggunakan gerakan air yang disebabkan oleh gaya gravitasi yang diberikan pada substansi yang kurang lebih 1000 kali lebih berat daripada udara, sehingga tidak peduli seberapa lambat aliran air, ia akan tetap mampu menghasilkan sejumlah besar energi. Tenaga aliran air sungai mempunyai beberapa keuntungan, diantaranya adalah:

1. Biaya untuk memanfaatkan energi aliran air sungai jauh lebih murah dibanding energi lain, misalnya minyak bumi.
2. Ketersediaan jumlah air di bumi yang melimpah.
3. Mudah didapat dan untuk memanfaatkan air menjadi suatu energi tidak terlalu rumit khususnya pada aplikasi alat tepat guna.

Air sungai di daerah pengunungan mempunyai energi potensial, tetapi bila air mengalir maka sebagian energi potensial ini akan hilang. Energi potensial yang hilang ini antara lain disebabkan gesekan antara air dengan dinding sungai, pembentukan pusaran dalam aliran sungai, pergeseran lapisan tanah pada dasar sungai dan adanya air terjun.

Untuk mengetahui energi aliran air sungai di daerah datar, digunakan perhitungan energi kinetik, sehingga energi yang dapat dibandingkan oleh air adalah sebesar :

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \dots\dots\dots (2.1)$$

Jika persamaan (2.1) dibagi dengan waktu (t) maka akan diperoleh persamaan:

$$\frac{E}{t} = \frac{1}{2} \times \frac{m}{t} \times v^2 = P$$

Dengan,  $m/t$  : laju aliran massa air (kg/detik)

$$\frac{m}{t} = \rho \times A \times v$$

Sehingga persamaan (2.1) menjadi:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v \times v^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \dots\dots\dots (2.3)$$

- dengan, -  $P$  : Daya air (watt)
- $\rho$  : Massa jenis air (kg/m<sup>3</sup>)
- $A$  : Luas penampang aliran air (m<sup>2</sup>)
- $v$  : Kecepatan aliran air (m/s)
- $m$  : massa (kg)

**2.2.5. Tekanan (P)**

Tekanan (p) merupakan satuan fisika untuk menyatakan gaya (F) per satuan luas (A), dapat diartikan sebagai gaya per satuan luas, dimana arah gaya tegak lurus dengan luas permukaan. Secara matematis, tekanan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$P = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.4)$$

- dengan, -  $P$  : Tekanan (Pa)
- $F$  : Gaya (N)
- $A$  : Luas permukaan (m<sup>2</sup>)

Persamaan (2.3) merupakan penerapan dari hukum *Pascal* ini diterapkan untuk pompa hidrolik, yaitu untuk membangkitkan gaya yang besar dengan gaya (tekanan) yang kecil. Hukum *Pascal* tekanan yang bekerja pada fluida statis dalam ruang tertutup akan diteruskan ke segala arah dengan sama rata.



Gambar 2.3. Pompa hidrolik (Fauziyah, 2012)

Satuan tekanan sering digunakan untuk mengukur kekuatan dari suatu cairan atau gas. Satuan tekanan dapat dihubungkan dengan satuan volume ( $V$ ) dan suhu ( $T$ ). Semakin tinggi tekanan didalam suatu tempat dengan volum yang sama, maka suhu akan semakin tinggi.

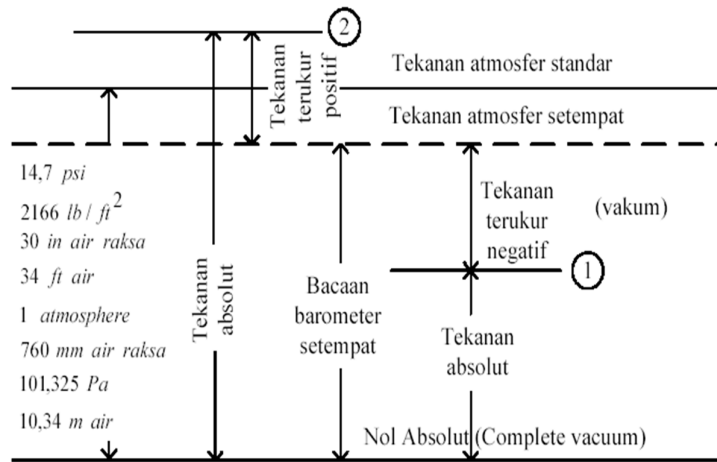
### 2.2.5.1. Skala Tekanan

Dalam pengukuran, kita dapat menggunakan beberapa alat ukur yang sesuai untuk kategori tekanan yang kita ukur sesuai Gambar 2.4 . Diantaranya adalah manometer untuk mengukur tekanan air, dan tabung bourdon untuk mengukur tekanan udara.

Tekanan merupakan perbandingan antara satuan gaya dan luas. Dalam hal ini, tekanan digambarkan dalam bentuk tegak lurus antara gaya dan luas. Simbol satuan tekanan adalah  $p$  atau pressure. Tekanan absolut adalah tekanan yang diukur terhadap tekanan nol absolut atau vakum absolut (*Absolute Zero*), sedangkan tekanan relatif atau tekanan terukur (*gauge pressure*) adalah tekanan yang diukur terhadap tekanan atmosfer setempat, skala tekanan dapat diilustrasikan seperti Gambar 2.5.

	pascal (Pa)	bar (bar)	technical atmosphere (at)	atmosphere (atm)	torr (Torr)	pound force per square inch (psi)
1 Pa	$\equiv 1 \text{ N/m}^2$	$10^{-5}$	$1.0197 \times 10^{-6}$	$9.8692 \times 10^{-6}$	$7.5006 \times 10^{-3}$	$145.04 \times 10^{-6}$
1 bar	100.000	$\equiv 10^8 \text{ dyn/cm}^2$	1.0197	0.98692	750.06	14.5037744
1 at	98.0665	0.980665	$\equiv 1 \text{ kg/cm}^2$	0.96784	735.56	14.223
1 atm	101.325	1.01325	1.0332	$\equiv 1 \text{ atm}$	760	14.696
1 torr	133.322	$1.3332 \times 10^{-3}$	$1.3595 \times 10^{-3}$	$1.3158 \times 10^{-3}$	$\equiv 1 \text{ Torr} \approx 1 \text{ mmHg}$	$19.337 \times 10^{-3}$
1 psi	$6.894 \times 10^3$	$68.948 \times 10^{-3}$	$70.307 \times 10^{-3}$	$68.046 \times 10^{-3}$	51.715	$\equiv 1 \text{ lb/in}^2$

Gambar 2.4. Tabel satuan tekanan



Gambar 2.5. Skala tekanan (Streeter, 1985)

*Standard atmospheric pressure* adalah tekanan rata-rata pada permukaan air laut. Pada Gambar 2.5 titik 2, memiliki tekanan *absolute* sebesar:

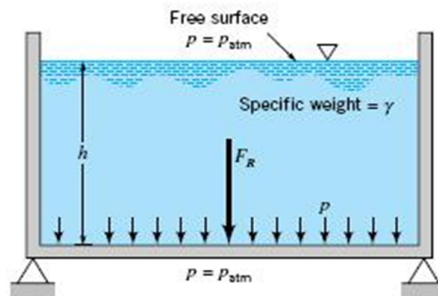
$$P_{abs} = P_{atm} + P_{gauge} \dots\dots\dots (2.5)$$

Sedangkan pada titik 1:

$$P_{abs} = P_{atm} + (-P_{vakum}) = P_{atm} - P_{vakum} \dots\dots\dots (2.6)$$

**2.2.5.2. Tekanan hidrostatis**

Tekanan hidrostatis adalah tekanan yang terjadi di bawah air. Tekanan ini terjadi karena adanya berat air itu sendiri yang membuat air tersebut mengeluarkan tekanan ilustrasi seperti Gambar 2.6. Tekanan air bergantung pada kedalaman air (*h*) di dalam sebuah ruang dan gravitasi (*g*).



Gambar 2.6. Tekanan hidrostatis (Munson dkk, 2003)

Hubungan berat air terhadap ruangan dan gravitasi ini dirumuskan sebagai berikut:

$$P = \rho \times g \times h \dots\dots\dots (2.7)$$

- dengan, -  $P$  : Tekanan hidrostatik ( $N/m^2$ )  
-  $\rho$  : Massa jenis cairan ( $kg/m^3$ )  
-  $g$  : Percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )  
-  $h$  : Kedalaman cairan ( $m$ )

### 2.2.6. Klasifikasi Fluida

Fluida adalah zat yang tidak dapat menahan gaya geser yang bekerja sehingga terjadi deformasi. Fluida dapat diklasifikasikan menjadi beberapa bagian tetapi secara garis besar fluida dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian, yaitu :

#### 2.2.6.1. Fluida Newtonia

Fluida *Newton* adalah suatu zat yang memiliki tegangan geser dan berbanding lurus secara *linier* dengan gradien kecepatan pada arah tegak lurus dengan bidang geser, seperti air, udara, etanol, benzene, dll. Fluida Newtonian akan terus mengalir dan viskositas fluida tidak berubah sekalipun terdapat gaya yang bekerja pada fluida, Viskositas fluida akan berubah jika terjadi perubahan temperature ( $T$ ) dan tekanan ( $P$ ).

#### 2.2.6.2. Fluida Non-Newtonia

Fluida Non-Newtonian adalah fluida yang tidak tahan terhadap tegangan geser (shear stress), gradient kecepatan (shear rate), dan temperature seperti cat, minyak pelumas, darah, bubur kertas, obat-obatan cair, dan lain-lain. Viskositas fluida Non-Newtonian merupakan fungsi dari waktu dimana gradient kecepatannya tidak linier dan tidak mengikuti hukum Newton tentang aliran.

### 2.2.7. Sifat-Sifat Fluida

Ada beberapa sifat fluida yang perlu diketahui, antara lain :

#### 2.2.7.1. Density

*Density* adalah jumlah zat yang terkandung di dalam suatu unit volume. Semua fluida memiliki sifat ini. Sifat ini terbagi menjadi tiga bentuk, yaitu :



a. Densitas massa

Densitas massa adalah perbandingan jumlah massa dan jumlah volume

b. Berat spesifik

Berat spesifik adalah nilai densitas massa dikalikan dengan gravitasi

c. Densitas relatif

Densitas relatif atau *spesifik gravity* (s.g) adalah perbandingan antara densitas massa dengan berat spesifik suatu zat terhadap densitas massa atau berat spesifik dari suatu zat standar, dimana yang dianggap memiliki nilai zat standar adalah air pada temperature 4°C dimana densitas relative tidak memiliki satuan.

### 2.2.7.2. Viskositas (Kekentalan)

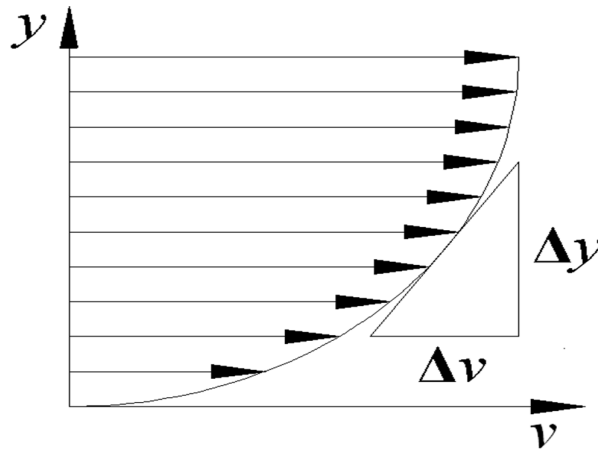
Viskositas banyak dipengaruhi oleh gaya kohesi antar molekul. Viskositas dari suatu fluida dihubungkan dengan tahanan terhadap gaya geser fluida pada lapisan yang satu dengan yang lainnya. Bila suhu naik gaya kohesi akan berkurang sehingga viskositasnya berkurang, jadi kenaikan suhu pada zat cair akan menurunkan viskositasnya. Viskositas rendah maksudnya partikel fluida bergeser dengan mudah seperti air dan kerosin. Viskositas tinggi maksudnya bahwa partikel fluida tidak bergeser dengan mudah seperti *fuel*, *oil*, dan *aspal*.

Viskositas dari cairan (*liquid*) menurun dengan naiknya temperatur. Suatu keadaan yang melukiskan efek viskositas dapat ditunjukkan oleh suatu lapisan yang terletak pada ruang kecil diantara dua plat.

#### 2.2.7.2.1. Viskositas dinamik

Viskositas dinamik adalah perbandingan tegangan geser dengan laju perubahannya, besar nilai viskositas dinamik tergantung dari faktor seperti yang dijelaskan sebelumnya. Untuk viskositas dinamik air pada temperatur lingkungan  $T = 27^{\circ}\text{C}$  adalah  $0,000852 \text{ kg/m}^3$

*Newton*, tegangan geser dalam suatu fluida sebanding dengan laju perubahan kecepatan normal aliran. Laju kecepatan sering disebut dengan gradien kecepatan, seperti terlihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Profil kecepatan dan gradien kecepatan (Streeter, dkk, 1985)

Dari Gambar 2.7, gradien kecepatan pada setiap harga yang melalui sumbu y didefinisikan sebagai: (Olson, 1990)

$$\frac{dv}{dy} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta y} \dots\dots\dots (2.8)$$

Sehingga, tegangan geser fluida yang timbul diformulasikan sebagai: (Olson, 1990)

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \dots\dots\dots (2.9)$$

- dengan, -  $\tau$  : Tegangan geser fluida (*Pa*)
- $\mu$  : Viskositas fluida (*kg/m.s*)
- $dv/dy$  : Gradien kecepatan ( $s^{-1}$ )

Persamaan (2.9) adalah persamaan viskositas yang berlaku untuk fluida *Newtonian*. Untuk fluida *non Newtonian*, maka persamaan (2.9) akan menjadi: (Streeter, 1985).

$$\mu = \frac{\tau}{dv/dy} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$\mu = \frac{F/A}{dv/dy} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan faktor  $\mu$  (viskositas dinamik) kesebandingan yang dikenal sebagai koefisien viskositas dinamik. Dalam satuan SI, tegangan geser diekspresikan

dalam  $N/m^2$  ( $Pa$ ) dan gradien kecepatan dalam  $(m/s)/m$ , karena itu satuan SI untuk viskositas dinamik adalah: (Olson, 1990).

$$\mu = \frac{N/m^2}{(m/s)/m} = \frac{N.s}{m^2} = \frac{Kg}{m.s} \dots\dots\dots (2.12)$$

**2.2.7.1.2. Viskositas Kinematik**

Viskositas kinematik adalah perbandingan viskositas dinamik terhadap density (kerapatan) massa jenis dari fluida tersebut. Viskositas ini terdapat dalam beberapa penerapan antara lain dalam bilangan Reynolds yang merupakan bilangan tak berdimensi. Nilai viskositas kinematik air pada temperature standar  $T = 27^\circ C$  adalah  $8.7 \times 10^{-7} m/s^2$

Viskositas kinematik ( $\nu$ ) adalah perbandingan (*ratio*) antara viskositas dinamik ( $\mu$ ) dengan massa jenisnya ( $\rho$ ) (Streeter, 1985).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots (2.13)$$

Satuan  $\nu$  untuk SI adalah  $(m^2/s)$ .

**2.2.7.3. Bilangan Reynolds**

Bilangan Reynolds adalah bilangan yang tak berdimensi yang digunakan untuk menentukan sifat pokok aliran, apakah laminar atau turbulen, serta posisi relatifnya pada skala yang menunjukkan pentingnya secara relatif kecenderungan turbulen terhadap kecenderungan laminar. Analisis terhadap persamaan bilangan Reynolds dapat dijelaskan bahwa untuk nilai  $Re$  yang besar atau dengan kata lain semua suku dalam pembilang adalah besar dibandingkan penyebut, ini secara tidak langsung menyatakan adanya fluida yang meluas, kecepatan yang tinggi, kerapatan yang besar, viskositas yang sangat kecil atau gabungan hal-hal ekstrim ini

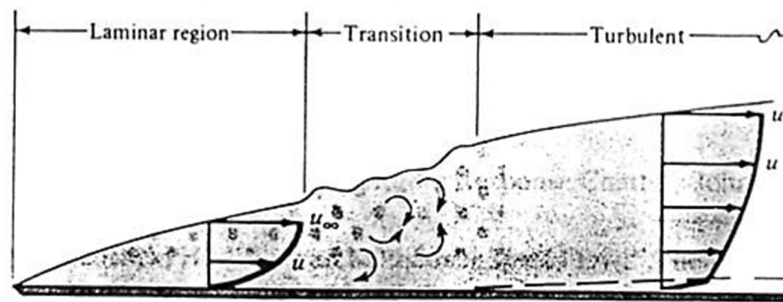
**2.2.8. Aliran Fluida**

Dalam suatu aliran yang melewati sistem atau instalasi perpipaan akan terjadi suatu hambatan aliran, hambatan tersebut disebabkan oleh faktor bentuk

instalasi dan perubahan perubahan pola aliran yang terjadi karena fluida harus mengikuti bentuk dindingnya.

### 2.2.8.1. Aliran *Laminar* Dan *Turbulen*

Aliran laminar didefinisikan sebagai aliran fluida yang bergerak dalam lapisan-lapisan atau lamina-lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar pada lapisan yang bersebelahan dengan saling bertukar momentum secara molekuler saja. Kecenderungan ke arah ketidakstabilan dan turbulensi diredam habis oleh gaya-gaya geser viskos yang memberikan tahanan terhadap gerakan relatif lapisan-lapisan fluida yang bersebelahan, perbedaan aliran laminar dan turbulen dapat digambarkan seperti Gambar 2.8.

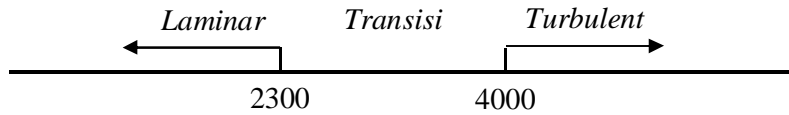


Gambar 2.8. Klasifikasi aliran fluida (Antoni, 2012)

Aliran *turbulen* partikel fluida bergerak dalam lintasan yang tidak teratur, sehingga menyebabkan terjadinya pertukaran momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain. Tegangan geser ( $\tau$ ) yang timbul pada aliran *turbulent* relatif lebih besar dari pada tegangan geser yang terjadi pada aliran *laminar* sehingga kerugian aliranpun akan besar pula. Jika pada aliran *laminar* memiliki kerugian sebanding dengan  $V$ , maka pada aliran *turbulen* sebanding dengan  $V^2$ .

Gambar 2.9, menggambarkan nilai  $Re$  Untuk mengetahui sebuah aliran bersifat *laminar* atau *turbulen* maka dapat dibedakan dengan menggunakan bilangan *Reynolds*, yaitu: (Clifford, 1984).

$$\begin{aligned} Re < 2300 &= \textit{Laminar} \\ 2300 < Re < 4000 &= \textit{Transisi} \\ Re > 4000 &= \textit{Turbulen} \end{aligned}$$



Gambar 2.9. Batasan bilangan *Reynolds* ( $Re_d$ )  
(Kurniawan, 2012)

$$Re_e = \frac{\rho \times v \times d}{\mu} \dots\dots\dots (2.14)$$

- dengan, -  $v$  : Kecepatan aliran ( $m/s$ )  
 -  $\rho$  : Massa jenis ( $kg/m^3$ )  
 -  $\mu$  : Viskositas dinamik ( $kg/m.s$ )  
 -  $Re_d$  : Bilangan *Reynolds*  
 -  $d$  : Diameter dalam pipa ( $m$ )

**2.2.9. Persamaan Kontinuitas**

Persamaan kontinuitas adalah persamaan yang menghubungkan kecepatan fluida dalam dari satu tempat ke tempat lain. Pada gambar 2.10, aliran fluida *internal* tak mampu mampat (*incompressible*) adalah aliran di dalam suatu garis aliran yang penampangnya berupa kurva tertutup dan massa jenis fluida sepanjang medan aliran adalah tetap (tidak berubah).



Gambar 2.10. Aliran fluida *internal* ( Raymond, 2000)

Gambar 2.10 menunjukkan jika terdapat suatu tabung alir, air masuk dari kiri dengan kecepatan  $v_1$  dan keluar di kanan dengan kecepatan  $v_2$ . Pada interval waktu sebesar  $\Delta t$ , laju aliran massa fluida yang berada di ujung bawah bergerak sejauh  $\Delta s_1 = v_1 \Delta t$ . Massa fluida yang berada di ujung bawah adalah: (Streeter, 1985).

$$m = \rho_1 \times v_1$$

$$\dot{m} = \rho_1 \times A_1 \times \frac{x_1}{t}$$

$$m_1 = \rho_1 \times A_1 \times \Delta x_1 = \rho_1 \times A_1 \times \Delta t \dots\dots\dots (2.15)$$

Sedangkan besar laju aliran massa fluida yang berada di ujung atas adalah:

$$m_2 = \rho_2 \times A_2 \times \Delta x_2 = \rho_2 \times A_2 \times \Delta t \dots\dots\dots (2.16)$$

Karena *incompressible* dan *steady*, maka persamaan (2.16) disubsitusikan ke persamaan (2.17), sehingga menjadi :

$$\begin{aligned} \frac{m}{t} &= \dot{m} \\ \dot{m}_1 &= \dot{m}_2 \\ \rho_1 \times A_1 \times v_1 &= \rho_2 \times A_2 \times v_2 \dots\dots\dots (2.17) \end{aligned}$$

Persamaan (2.18) disebut dengan persamaan kontiunitas. Dalam bentuk lain persamaan kontiunitas ini dapat ditulis :

$$\begin{aligned} A_1 \times v_1 &= A_2 \times v_2 = Q \\ D_1^2 \times v_1 &= D_2^2 \times v_2 \dots\dots\dots (2.18) \end{aligned}$$

- dengan, -  $Q$  : Debit ( $m^3/s$ )
- $v$  : Kecepatan aliran ( $m/s$ )
- $A$  : Luas penampang ( $m^2$ )
- $D$  : Diameter (m)

Persamaan (2.18) di atas disebut dengan persamaan *kontiunitas*.

**2.2.10. Prinsip Bernoulli**

Prinsip *Bernoulli* adalah sebuah istilah di dalam mekanika fluida yang menyatakan bahwa jika pada suatu aliran fluida mengalami peningkatan kecepatan dan ketinggian fluida terhadap suatu referensi maka akan menimbulkan penurunan tekanan pada aliran tersebut. Prinsip *bernoulli* seperti Gambar 2.11, merupakan penyederhanaan dari persamaan energi mekanik yang menyatakan bahwa jumlah energi pada suatu titik di dalam suatu aliran tertutup sama besarnya dengan jumlah energi di titik lain pada jalur aliran yang sama.



Gambar 2.11. Prinsip *Bernoulli* ( Raymond, 2000)

Dengan meninjau gambar (2.11) di atas, pada bagian luas penampang  $A_1$ , usaha yang dilakukan oleh  $P_1$  sejauh  $\Delta x_1$  adalah: (Streeter, 1985).

$$\Delta W_1 = P_1 \times A_1 \times \Delta x_1 \dots \dots \dots (2.19)$$

Selanjutnya, pada bagian luas penampang  $A_2$ , usaha yang dilakukan  $P_2$  sejauh  $\Delta x_2$ , adalah: (Streeter, 1985)

$$\Delta W_2 = P_2 \times A_2 \times \Delta x_2 = P_2 \times \Delta V_2 \dots \dots \dots (2.20)$$

- dengan, -  $P$  : Tekanan ( $Pa$ )  
 -  $A$  : Luas penampang ( $m^2$ )  
 -  $\Delta x$  : Perubahan panjang kolom fluida (m)  
 -  $\Delta V$  : Perubahan volume fluida ( $m^3$ )  
 -  $\Delta W$  : Perubahan kerja (*joule*)

$$P_1 + \rho \times g \times z_1 + \frac{1}{2} \times \rho \times v_1^2 = P_2 + \rho \times g \times z_2 + \frac{1}{2} \times \rho \times v_2^2 \dots \dots \dots (2.21)$$

atau,

$$P + \rho \times g \times z_1 + \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 = \text{tetap} \dots \dots \dots (2.22)$$

- dengan, -  $v$  : Kecepatan fluida (m/s)  
 -  $g$  : Percepatan gravitasi bumi ( $m/s^2$ )  
 -  $z$  : Ketinggian relatif (m)  
 -  $P$  : Tekanan fluida ( $Pa$ )

Persamaan (2.22) di atas, disebut dengan persamaan *Bernoulli* yang digunakan untuk perhitungan aliran fluida ideal atau tanpa gesekan dan tak mampu mampat (*incompressible*). Jika persamaan (2.22) dikalikan dengan

volume jenis (*Specific Volume*) dari suatu fluida atau zat, maka persamaan *Bernoulli* akan menjadi:

$$v = \frac{1}{\rho} \Rightarrow \text{Volume jenis (Specific Volume)}$$

$$\frac{P_1}{\rho} + g \times z_1 + \frac{1}{2} \times v_1^2 = \frac{P_2}{\rho} + g \times z_2 + \frac{1}{2} \times v_2^2 \dots\dots\dots (2.23)$$

Selanjutnya, persamaan (2.23) kembali dikalikan dengan percepatan gravitasi ( $1/g$ ), maka bentuk persamaan *Bernoulli* menjadi:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \times g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \times g} \dots\dots\dots (2.24)$$

atau,

$$H_1 = H_2 \dots\dots\dots (2.25)$$

dengan, -  $\gamma$  : Berat jenis zat cair persatuan volum ( $\text{kgf/m}^3$ )

-  $H_1$  : *Head* total 1

-  $H_2$  : *Head* total 2

Persamaan *Bernoulli* di atas juga disebut dengan persamaan *Head*. Pada tiap-tiap suku pada persamaan (2.25) yaitu  $P/\gamma$ ,  $v^2/2g$ , dan  $z$  berturut-turut disebut dengan *head* tekanan, *head* kecepatan, dan *head* potensial. *Head* adalah energi mekanik yang dikandung oleh satu satuan berat ( $1\text{kgf}$ ) zat cair yang mengalir pada sebuah luasan penampang. Satuan energi persatuan berat adalah ekivalen dengan satuan panjang atau tinggi. Maka, *head* total ( $H$ ) yang merupakan penjumlahan dari ketiga suku tersebut adalah energi mekanik total persatuan berat zat cair, dan dinyatakan dengan satuan tinggi kolom zat cair dalam meter (Sularso, 2006).

**2.2.11. Perhitungan *Head loss***

Perubahan tekanan aliran air terjadi karena adanya perubahan ketinggian ( $z$ ), perubahan kecepatan ( $v$ ) akibat perubahan penampang ( $A_p$ ), dan gesekan air terhadap dinding pipa atau penampang selubung ( $A_s$ ). Perubahan tekanan aliran air di sepanjang pipa akibat gesekan terhadap dinding pipa dapat dianalisa melalui persamaan *Bernoulli* yaitu: (Clifford, 1984).



$$H_1 = H_2 + h_L$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2 \times g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2 \times g} + h_L \dots \dots \dots (2.26)$$

Persamaan (2.26) merupakan persamaan *Bernoulli* yang telah dimodifikasi dengan gesekan fluida yang terjadi dengan dinding pipa. Gesekan akan menimbulkan *head loss* di sepanjang aliran. Berdasarkan lokasi timbulnya kehilangan, secara umum kehilangan tekanan akibat gesekan atau kerugian ini digolongkan menjadi 2 macam kerugian aliran yaitu kerugian *mayor* dan kerugian *minor*.

### 2.2.11.1. Perhitungan *Head Loss Mayor*

Kerugian *mayor* adalah kehilangan tekanan akibat gesekan aliran fluida pada pipa lurus.

$$h_{lmy} = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g} \dots \dots \dots (2.27)$$

- dengan, -  $h_{LMY}$  : *Head loss mayor* (m)
- $f$  : Koefisien gesek
- $L$  : Panjang pipa (m)
- $g$  : Percepatan gravitasi bumi ( $m/s^2$ )
- $D$  : Diameter dalam pipa (m)

Koefisien gesek pipa ( $f$ ) dapat diketahui melalui diagram *Moody* pada Lampiran 2. Perhitungan *head loss* adalah perhitungan yang cukup panjang, sehingga dalam sistem perpipaan dibutuhkan persamaan matematika untuk menentukan koefisien gesek ( $f$ ) sebagai fungsi dari bilangan *Reynolds* dan kekasaran relatif.

Selain dari diagram *Moody*, koefisien gesek ( $f$ ) pada pipa juga dapat dicari melalui persamaan *Blasius*. Persamaan *Blasius* ini hanya berlaku pada aliran *turbulen* pada kondisi pipa halus (*smooth pipe*) dengan bilangan *Reynolds* ( $Re_d < 10^5$ ), sehingga faktor kekasaran relatif adalah (Clifford, 1984).

$$f = \frac{0,3164}{Re_d^{0,25}} \dots \dots \dots (2.28)$$

Perhitungan besarnya angka kekasaran relatif ( $f$ ) pada aliran *laminar* dapat dicari dengan menggunakan rumus dibawah ini (Clifford, 1984).

$$f = \frac{64}{Re}$$

**2.2.11.2. Perhitungan *Head Loss Minor***

Kerugian *minor* adalah kehilangan tekanan yang terjadi di selain pipa lurus misalnya kerugian pada katup-katup, sambungan  $T$ , sambungan  $L$ , dan sebagainya. *Head loss minor* merupakan kerugian-kerugian aliran kecil yang dapat dihitung secara umum melalui persamaan (Clifford, 1984).

$$h_{lm} = K \times \frac{v^2}{2 \times g} \dots\dots\dots (2.29)$$

- dengan, -  $h_{LM}$  : *Head loss minor* ( $m$ )  
 -  $K$  : Koefisien tahanan *head loss minor*  
 -  $g$  : Percepatan gravitasi bumi ( $m/s^2$ )

Pada aliran yang melewati belokan dan katup koefisien tahanan ( $K$ ) merupakan fungsi dari *ratio* panjang ekuivalen komponen pipa, diameter komponen pipa ( $L_e/D$ ), dan kekasaran relatif pipa ( $f$ ). Besarnya kehilangan energi (*head loss minor*) yang terjadi pada komponen belokan dan katup dapat dihitung dengan rumusan seperti pada *head loss mayor* yaitu (Clifford, 1984).

$$h_{lm} = f \times \frac{L_e}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g} \dots\dots\dots (2.30)$$

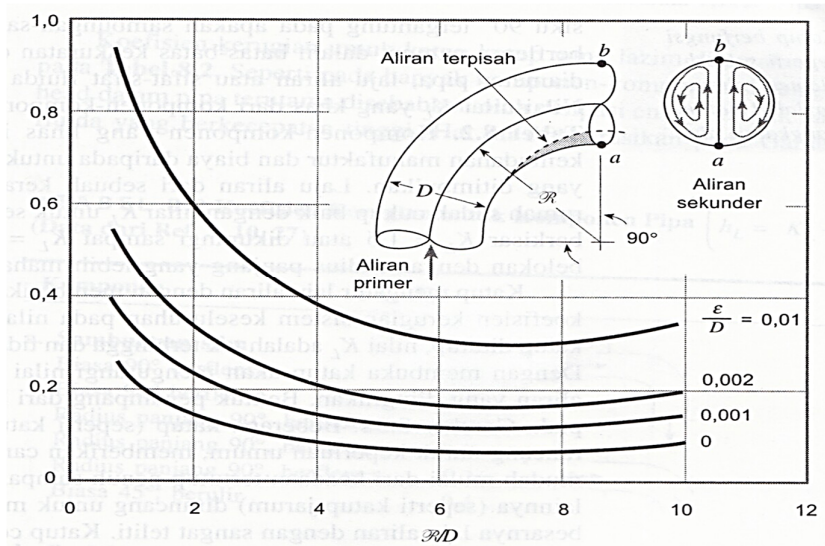
karena,

$$f \times \frac{L_e}{D} = K \dots\dots\dots (2.31)$$

- dengan, -  $L_e$  : Panjang ekuivalen dari komponen ( $m$ )  
 -  $D$  : Diameter komponen katup dan pipa ( $m$ )  
 -  $h_{LM}$  : *Head loss minor* ( $m$ )  
 -  $K$  : Koefisien tahanan  
 -  $f$  : Kekasaran relatif dari diagram *Moody*

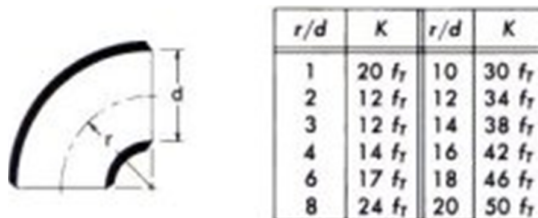
Aliran fluida yang melewati belokan atau *elbow* menimbulkan *head loss* yang lebih besar dari pada aliran yang mengalami pengecilan maupun mengalami

pembesaran secara mendadak. Pada aliran fluida yang melewati belokan, harga koefisien tahanan dipengaruhi oleh *radius* kelengkungan atau kurva belokan pipa. Semakin kecil *radius* kelengkungan belokan maka semakin besar koefisien tahanan belokan. Koefisien tahanan tersebut dapat diketahui melalui grafik seperti di Gambar 2.12, yaitu:



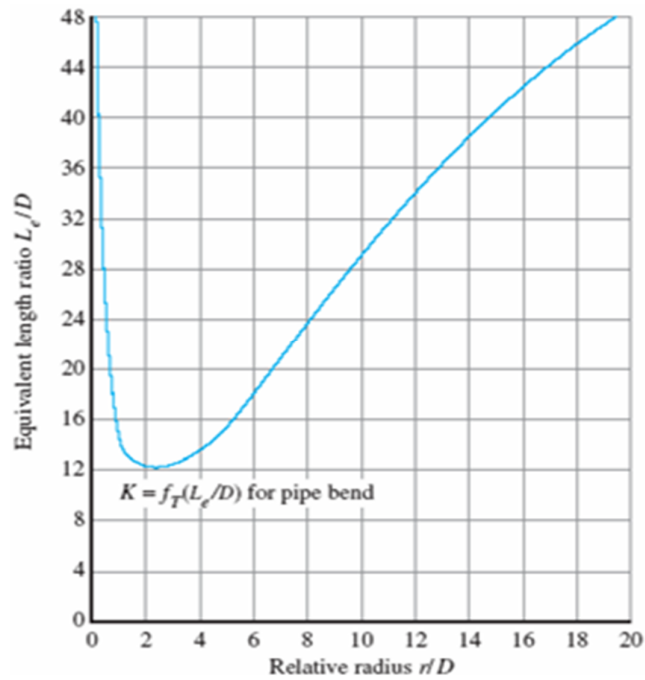
Gambar 2.12. Koefisien tahanan ( $K$ ) pada belokan pipa (*bends*  $90^\circ$ ) (Munson dkk., 2003)

Untuk sambungan yang kelengkungannya halus, koefisien tahanan akan lebih kecil namun pembuatannya lebih sulit sehingga harganya akan lebih mahal. Pada belokan yang kelengkungannya dibentuk dari penyambungan pipa lurus yang disebut dengan *bends*, di Gambar 2.13, koefisien tahanan akan lebih tinggi namun proses pembuatan yang lebih muda dan harganya jauh lebih murah.



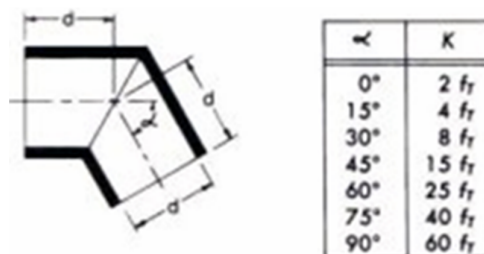
Gambar 2.13. Koefisien tahanan pada *bends*  $90^\circ$  (Clifford, 1984)

Belokan pipa yang kelengkungannya dibentuk dari penyambungan pipa lurus disebut dengan *bends*. Koefisien tahanan pada *bends* akan lebih tinggi namun proses pembuatannya lebih mudah sehingga harganya murah. *Ratio* ( $L_e/D$ ) untuk belokan pipa  $90^\circ$  dapat dicari dari grafik Gambar 2.14, ini:



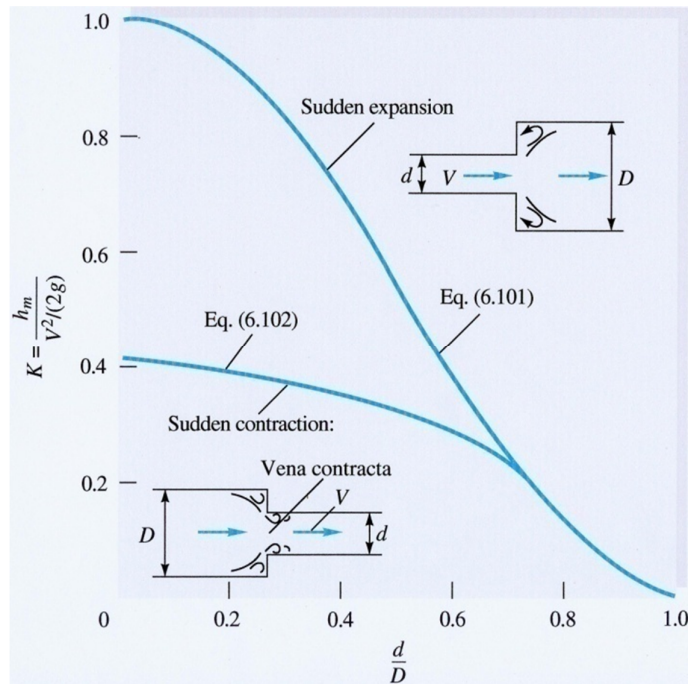
Gambar 2.14. Perbandingan antara panjang ekuivalen terhadap diameter dalam pipa ( $L_e/D$ ) pada belokan pipa  $90^\circ$  (White, 1998)

Gambar 2.15, dibawah ini dapat ketahui nilai aliran yang melewati belokan patah (*mitre bends*) koefisien tahanan *minor* ( $K$ ) merupakan fungsi dari sudut belokan.



Gambar 2.15. Koefisien tahanan ( $K$ ) pada belokan patah (*mitre bends*) (Clifford, 1984)

Pada aliran yang melewati sebuah pipa mengalami pembesaran dan pengecilan penampang secara mendadak seperti Gambar 2.16, menunjukkan nilai koefisien tahanan ( $K$ ) merupakan *ratio* perbandingan antara diameter pipa kecil dengan diameter pipa besar.



Gambar 2.16. Grafik koefisien tahanan pada pengecilan dan pembesaran penampang secara mendadak (White, 1998)

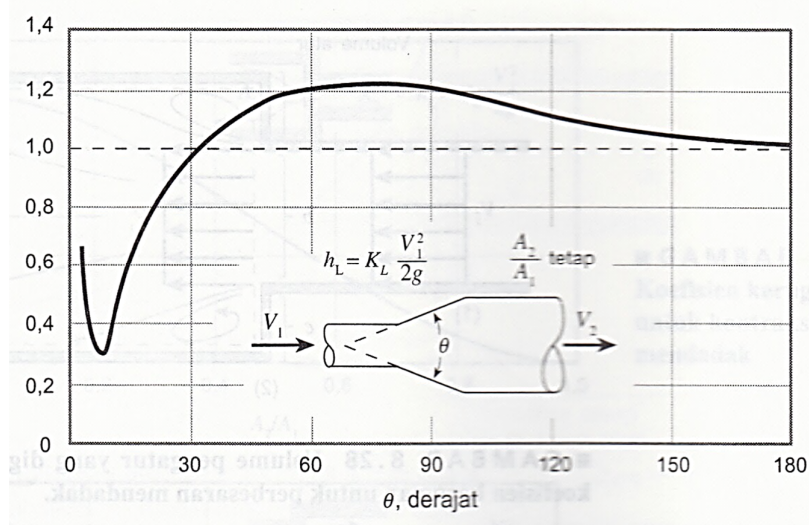
Pada aliran yang mengalami pembesaran penampang secara mendadak (*sudden expansion*), penurunan tekanan (*minor losses*) dihitung melalui persamaan sebagai berikut:

$$h_{lm} = K \times \frac{(v_1 - v_2)^2}{2 \times g} \dots\dots\dots (2.32)$$

- dengan, -  $K$  : Faktor tahanan *head loss minor* pada *sudden expansion*
- $v_1$  : Kecepatan aliran pada pipa kecil ( $m/s^2$ )
- $v_2$  : Kecepatan aliran pada pipa besar ( $m/s^2$ )

Penurunan tekanan ( $P$ ) akibat pengecilan penampang secara mendadak (*sudden contraction*) atau secara *gradual contraction*, perhitungan rugi *minor* (*head loss minor*) mengacu pada persamaan (2.32) di atas. Untuk perubahan

penampang secara *gradual contraction*, koefisien tahanan ( $K$ ) dapat dicari melalui grafik di Gambar 2.17, sebagai berikut:



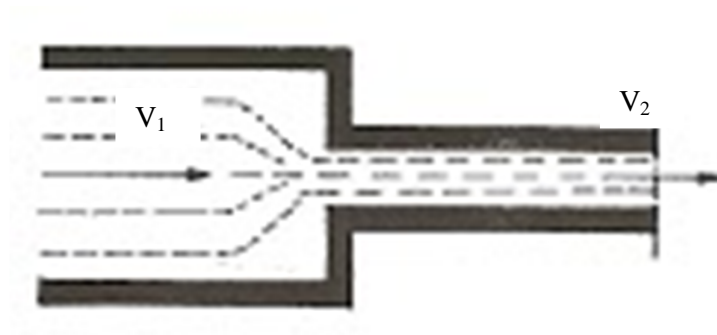
Gambar 2.17. Grafik koefisien tahanan pada *gradual contraction* (Munson dkk, 2003)

Koefisien tahanan ( $K$ ) untuk *sudden expansion* juga dapat diketahui melalui analisis seperti pada persamaan (2.34) dibawah ini: (Munson dkk., 2003).

$$K = \left[ 1 - \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \right]^2 = \left[ 1 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \dots\dots\dots (2.33)$$

- Dengan, -  $K$  : Faktor tahan *head loss minor*  
 -  $A_1$  : Penampang pipa kecil ( $m^2$ )  
 -  $A_2$  : Penampang pipa besar ( $m^2$ )  
 -  $D_1$  : Diameter pipa kecil (m)  
 -  $D_2$  : Diameter pipa besar (m)

Jika aliran air melewati sebuah pipa mengalami pengecilan penampang secara mendadak maka disebut dengan istilah *sudden contraction*.



Gambar 2.18. penyempitan mendadak (Santoso, 2012)

Dengan persamaan kontinuitas: (Munson dkk., 2003).

$$V_0 \times C_c \times A_2 = V_2 \times A_2$$

Dimana  $C_c$  sebagai koefisien penyempitan atau kontraksi yaitu luas jet di penampang O dibagi luas penampang di titik 2. (Munson dkk., 2003).

$$h_c = \left( \frac{1}{C_c} - 1 \right) \times \frac{V_2^2}{(2 \times g)} \dots \dots \dots (2.34)$$

Untuk lubang masuk pipa dari reservoir. (Munson dkk., 2003).

$$h_c = K \times \frac{V_2^2}{(2 \times g)} \dots \dots \dots (2.35)$$

### 2.2.11.3. Head total pompa ( $H_{Pump}$ )

Head total pompa merupakan jumlah dari head secara keseluruhan yang dibutuhkan untuk:

- Mengatasi kerugian aliran akibat gesekan-gesekan (*head loss*).
- Membangkitkan tekanan ( $P$ ) yang tinggi pada sisi masuk, sehingga dapat mengalirkan fluida dengan debit ( $Q$ ) sesuai yang direncanakan.
- Mengatasi beda elevasi  $\Delta z$ .

Head total pompa yang harus disediakan untuk mengalirkan sejumlah air seperti yang direncanakan, dapat ditentukan dari kondisi pompa. Head total pompa dapat ditulis sebagai berikut: (Clifford, 1984).

$$H_{pump} = \frac{\Delta P}{\gamma} + h_1 + z + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2 \times g} \dots \dots \dots (2.36)$$

dengan, -  $H_{pump}$  : *Head* total pompa (m)

- $z$  : Perbedaan ketinggian antar titik isap dan titik keluar (m)
- $\Delta P$  : Perbedaan tekanan statik (m)
- $\gamma$  : Berat jenis air per satuan volume (N/m<sup>3</sup>)
- $h_L$  : Kerugian aliran total dimana [ $h_L = h_{LMY} + h_{LM}$ ]
- $v_2$  : Kecepatan di titik isap (m/s)
- $v_1$  : Kecepatan di titik keluar (m/s)

- Head Tekanan

Head tekanan adalah perbedaan head tekanan yang bekerja pada permukaan zat cair pada sisi tekan dengan head tekanan yang bekerja pada permukaan zat cair pada sisi isap.

- Head Kecepatan

Head kecepatan adalah perbedaan antar head kecepatan zat cair pada saluran tekan dengan head kecepatan zat cair pada saluran isap.

- Head Statik

Head statis total adalah perbedaan tinggi antara permukaan zat cair pada sisi tekan dengan permukaan zat cair pada sisi isap