

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Rahkman (2009) pernah meneliti unjuk kerja *sling pump* dengan skala laboratorium. Penelitian ini menggunakan variasi kecepatan putar 30, 40, dan 50 rpm dengan pencelupan 50% di dalam air, menggunakan selang plastik 3/4". Hasil yang diperoleh adalah debit optimal sebesar 2.5 liter/menit pada putaran 50 rpm.

Syamsuddin (2015) meneliti unjuk kerja *sling pump* kerucut menggunakan variasi jumlah lilitan selang yaitu 5 lilitan, 6 lilitan, dan 7 lilitan. Diameter selang yang digunakan yaitu 3/4" dan putaran *sling pump* 40 rpm. Dari hasil penelitian diperoleh debit terbesar pada jumlah lilitan 6, dengan debit air sebesar 7,29 liter/menit.

Kurniawan (2015) pernah melakukan penelitian unjuk kerja *sling pump* jenis kerucut menggunakan variasi kecepatan putar dan kondisi pencelupan 50-90%, serta ketinggian *delivery* 2 m. Dari hasil penelitian diketahui debit optimal terjadi pada kecepatan 50 rpm dengan kondisi pencelupan 50% yaitu sebesar 4,71 liter/menit.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Purnama (2016) menggunakan variasi kecepatan putar dan kondisi pencelupan *sling pump* pada ketinggian *delivery* 1 m. Hasil dari penelitiannya menunjukkan debit air paling optimal diperoleh pada kecepatan putaran *sling pump* 50 rpm yaitu sebesar 7,88 liter/menit dengan *manifold* sejajar.

Pada penelitian yang pernah dilakukan dengan menggunakan *water mur*, debit yang dihasilkan kurang optimal. Hal ini disebabkan oleh kebocoran yang terjadi pada *water mur*. *Water mur* berfungsi menghubungkan putaran *sling pump* ke pipa *delivery* yang tidak berputar. Penelitian ini menggunakan *water swivel joint* untuk mengganti penggunaan *water mur*, serta mengevaluasi pengaruh kecepatan putar *sling pump* terhadap debit yang dihasilkan dan membandingkan hasil dengan penelitian sebelumnya.

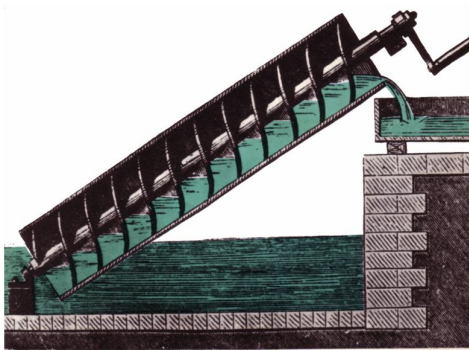
## 2.2. Dasar Teori

### 2.2.1. Pompa

Pompa adalah salah satu jenis mesin fluida yang berfungsi untuk memberikan energi kepada fluida, dimana fluida adalah zat cair, sehingga zat cair tersebut dapat dipindahkan dari suatu tempat ke tempat lain. Selain dapat memindahkan cairan, pompa juga berfungsi untuk meningkatkan kecepatan, tekanan dan ketinggian cairan. Dalam operasinya pompa perlu digerakkan oleh suatu penggerak mula, dalam hal ini dapat digunakan motor listrik maupun motor bakar (Sularso, 2000).

### 2.2.2. Pompa Ulir

Pompa *Screw* (ulir) pertama kali dikembangkan oleh *Archimedes*, ia menggunakan satu buah ulir untuk memindahkan air dari tempat yang rendah ke sawah-sawah untuk keperluan irigasi. Oleh karena hal inilah pompa ulir dengan satu ulir pada Gambar 2.1 disebut juga pompa ulir *Archimedes*.



Gambar 2.1. Pompa ulir *Archimedes*

Prinsip kerja pompa *Arcimedes* adalah fluida kerjanya masuk melalui sisi inlet pompa dipindahkan oleh ulir melalui sela-sela ulir ketika ujung engkol diputar.

### 2.2.3. Sling Pump

*Sling pump* merupakan pompa air bebas energi fosil untuk memompa dan mentransfer air. Berdasarkan prinsip kerja pompa *Archimedes*, diperlukan beberapa modifikasi untuk memperoleh suatu pompa yang bersifat *non* konvensional namun tidak memerlukan energi listrik. Modifikasi ini terfokus pada penggantian ulir pipa pompa dengan lilitan selang yang dililitkan ke rangka pompa dan penggantian poros engkol pompa dengan sebuah *propeller*. Pompa ini memerlukan energi aliran untuk memutar *propellernya* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 sehingga, hasil modifikasi pompa ini dapat diaplikasikan pada aliran sungai yang mengalir sepanjang waktu.



Gambar 2.2. *Sling pump*.

*Sling pump* memiliki beberapa kelebihan yaitu ramah lingkungan, mudah dalam perawatannya, jumlah komponen sedikit, pengoperasiannya aman dan mampu beroperasi terus menerus selagi ada aliran sungai. Sedangkan kekurangan *sling pump* yaitu debit yang dihasilkan tergantung oleh kecepatan arus sungai, dan *head* yang dihasilkan rendah.

### 2.2.4. Water Swivel Joint

Dalam industri pengeboran, mesin bor yang digunakan untuk melakukan pengeboran ke dalam *reservoir* bawah tanah untuk memperoleh air, minyak, atau gas bumi, membutuhkan komponen *water swivel joint*. Alat ini berfungsi untuk melewati fluida seperti air, lumpur, dari pompa menuju ke dalam stang bor ketika proses pengeboran, dan *water swivel joint* tidak ikut berputar ketika pipa

bor diputar, seperti Gambar 2.3 *water swivel joint* dapat digunakan sebagai penghubung dari komponen yang tidak bergerak ke peralatan yang bergerak.



Gambar 2.3. *Water swivel joint*

Penggunaan *water swivel joint* pada penelitian ini dimodifikasi dengan prinsip yang sama terhadap komponen mesin bor tersebut untuk memindahkan air dari *sling pump* menuju *delivery*. Letak *water swivel joint* berada diantara kerangka *sling pump* dan pipa *delivery*.

#### 2.2.5. Mekanika Fluida

Mekanika fluida adalah disiplin ilmu bagian dari bidang mekanika terapan yang mengkaji perilaku zat-zat cair dan gas dalam keadaan diam ataupun bergerak (Munson dkk., 2003). Teori mekanika fluida berhubungan erat dengan fluida. Secara khusus, fluida diartikan sebagai sebagai zat cair yang berdeformasi terus-menerus selama dipengaruhi oleh suatu tegangan geser. Fluida sendiri dapat dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu fluida bergerak (dinamika fluida) dan fluida tidak bergerak (statika fluida). Ditinjau dari jenis zatnya, fluida bisa dibedakan menjadi zat cair dan gas. Gas dan cairan dibedakan karena gaya kohesinya yang berlainan.

Cairan cenderung mempertahankan bentuk sesuai dengan bentuk wadahnya, sedangkan gas bebas berekspansi sampai terdapat dinding padat yang membendungnya (Giles, 1997).

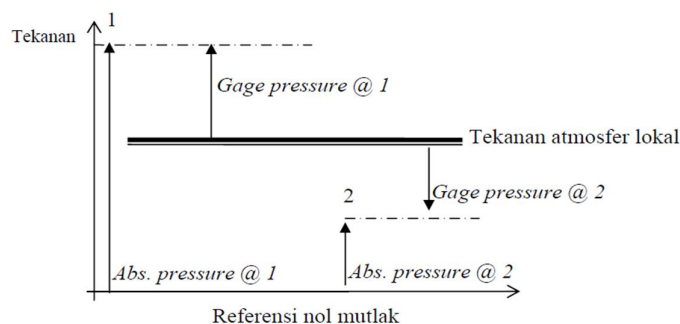
### 2.2.6. Pengukuran Tekanan ( $P$ )

Tegangan normal pada setiap bidang yang melalui unsur fluida yang diam mempunyai nilai unik yang disebut tekanan fluida (White, 1998). Tekanan dinyatakan sebagai gaya yang dibagi dengan luas bidang kerjanya (Giles, 1997).

$$P = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

- dengan, -  $P$  : Tekanan ( $Pa$ )  
 -  $F$  : Gaya (N)  
 -  $A$  : Luas permukaan ( $m^2$ )

Tekanan pada sebuah titik dalam sebuah massa fluida dapat diartikan sebagai sebuah tekanan mutlak (*absolute pressure*) atau dapat juga diartikan sebagai tekanan pengukuran (*gage pressure*). Dalam melakukan pengukuran tekanan terdapat dua referensi pembacaan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 yaitu referensi nol mutlak dan referensi nol atmosfer lokal. Jika tekanan diukur dari titik referensi nol mutlak maka  $P_{abs}$ , dan bila diukur dari atmosfer lokal maka  $P_{gauge}$ . Kemudian ada juga tekanan dibawah takanan atmosfer lokal yaitu  $P_{vakum}$  dan diukur dengan pengukur vakum yang menunjukkan perbedaan antara tekanan atmosfer dan tekanan absolut (Munson dkk., 2003).



Gambar 2.4. Representasi grafik tekanan pengukuran dan tekanan mutlak (Munson dkk., 2003)

Sehingga tekanan diukur:

$$P_{gauge} = P_{abs} - P_{atm} \dots\dots\dots(2.2)$$

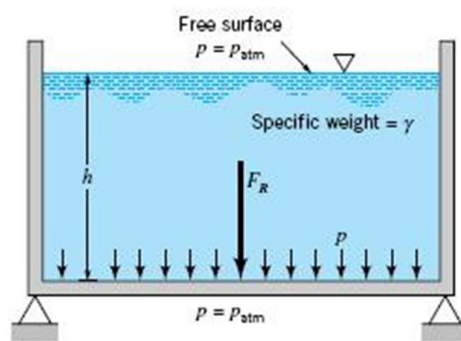
(untuk  $P > P_{atm}$ )

$$P_{vakum} = P_{atm} + P_{abs} \dots\dots\dots(2.3)$$

(untuk  $P < P_{atm}$ )

### 2.2.7. Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik adalah tekanan yang diberikan oleh cairan pada kesetimbangan karena pengaruh gaya gravitasi. Pada sebuah permukaan datar, seperti dasar dari sebuah tangki yang terisi suatu cairan (Gambar 2.5), besarnya gaya resultan adalah  $F_R = P$ , untuk tangki terbuka,  $p = \gamma h$ . Gaya resultan dari fluida statis pada permukaan sebuah bidang adalah akibat dari distribusi tekanan hidrostatik pada permukaan tersebut (Munson dkk., 2003).



Gambar 2.5. Tekanan hidrostatik (Munson dkk., 2003)

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

$$P = \rho \times g \times h \dots\dots\dots(2.4)$$

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

### 2.2.8. Sifat-sifat Fluida

#### 2.2.8.1. Kerapatan ( $\rho$ )

Kerapatan didefinisikan sebagai massa fluida per satuan volume. Kerapatan biasanya digunakan untuk mengkarakteristikan massa sebuah sistem fluida (Munson dkk., 2003)

#### 2.2.8.2. Berat jenis ( $\gamma$ )

Berat jenis dari sebuah fluida, didefinisikan sebagai berat fluida per satuan volume. Berat jenis berhubungan dengan kerapatan, dalam bentuk persamaan:

$$\gamma = \rho \times g \dots\dots\dots(2.5)$$

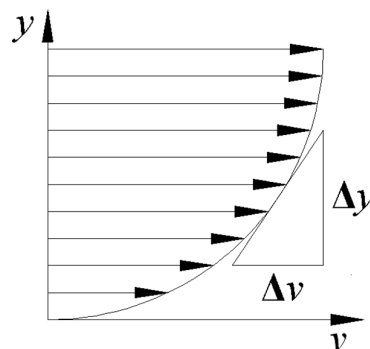
Dengan,  $\gamma$  = berat jenis ( $\text{N/m}^3$ )  
 $\rho$  = densitas ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $g$  = percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

Dimana  $g$  adalah percepatan grafitasi lokal. Berat jenis digunakan untuk mengkarakteristikkan berat dari sistem tersebut.

### 2.2.8.3. Viskositas

Viskositas adalah tahanan suatu fluida terhadap deformasi, apabila fluida semakin susah dideformasi maka kekentalannya semakin besar. Viskositas zat cair menyebabkan terbentuknya gaya geser antara elemen-elemennya. Bila suatu fluida mengalami geseran, ia mulai bergerak dengan laju regangan yang berbanding terbalik dengan suatu besaran yang disebut koefisien viskositas, viskositas dinamis atau viskositas mutlak (White, 1998). Cairan, dengan molekul-molekul yang jauh lebih rapat daripada gas, mempunyai gaya-gaya kohesi yang jauh lebih besar daripada gas. Kohesi merupakan penyebab utama viskositas dalam cairan dan karena kohesi berkurang dengan naiknya suhu, maka demikian pulalah viskositas (Streeter, 1985).

Menurut Newton, tegangan geser dalam suatu fluida sebanding dengan laju perubahan kecepatan normal aliran. Laju kecepatan sering disebut dengan gradien kecepatan seperti yang ditunjukkan Gambar 2.4.



Gambar 2.6. Aliran di dalam sublapisan viskos di dekat dinding kasar dan mulus. (Munson dkk., 2003)

Dari Gambar 2.6 gradien kecepatan pada setiap harga yang melalui sumbu y didefinisikan sebagai (Olson, 1990)

$$\frac{du}{dy} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta u}{\Delta y} \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

Tegangan geser fluida yang timbul diformulasikan sebagai (Olson, 1990)

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \dots\dots\dots (2.7)$$

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

Persamaan di atas disebut persamaan Newton untuk viskositas. Faktor  $\mu$  pada persamaan di atas disebut dengan viskositas absolut (*absolute viscosity*) atau viskositas dinamik (*dynamic viscosity*). Persamaan (2.7) juga dapat ditulis sebagai (Streeter, 1985)

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\mu = \frac{F/A}{du/dy} \dots\dots\dots (2.9)$$

Faktor  $\mu$  (*viskositas dinamik*) untuk air dapat dilihat pada lampiran 1. Dalam satuan SI, tegangan geser diekspresikan dalam N/m<sup>2</sup> (Pa) dan gradien kecepatan dalam (m/s). Oleh karena itu satuan SI untuk *viskositas dinamik* adalah (Olson, 1990)

$$\mu = \frac{N/m^2}{(m/s)/m} = \frac{N.s}{m^2} = \frac{Kg}{m.s} \dots\dots\dots (2.10)$$

Selain viskositas dinamis, kita juga mengenal adanya viskositas kinematis. Viskositas kinematik ( $\nu$ ) adalah perbandingan (ratio) antara *viskositas dinamik* ( $\mu$ ) dengan massa jenisnya ( $\rho$ ). Seperti yang terlihat pada persamaan 2.11 (Streeter, 1985)

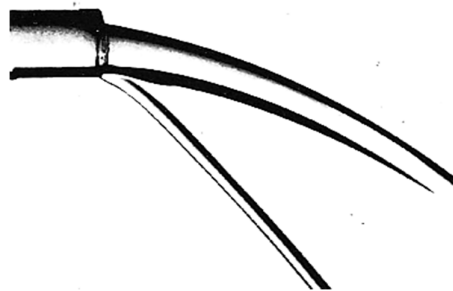
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots (2.11)$$



Viskositas kinematik muncul dalam banyak penerapan, misalnya dalam bilangan *Reynolds* yang tanpa dimensi untuk gerakan suatu benda melalui fluida,  $Vl/\nu$ , dimana  $V$  adalah kecepatan benda dan  $l$  ialah suatu ukuran linear yang mewakili ukuran benda tersebut. Dimensi  $\nu$  adalah  $L^2T^{-1}$ . Satuan SI, untuk *viskositas kinematik* adalah  $1 \text{ m}^2/\text{s}$ , dan satuan USC-nya ialah  $1 \text{ ft}^2/\text{s}$ . satuan cgs-nya yang dinamakan *stoke* (St) adalah  $1 \text{ cm}^2/\text{s}$  (Streeter, 1985).

### 2.2.9. Aliran Laminer dan Turbulent

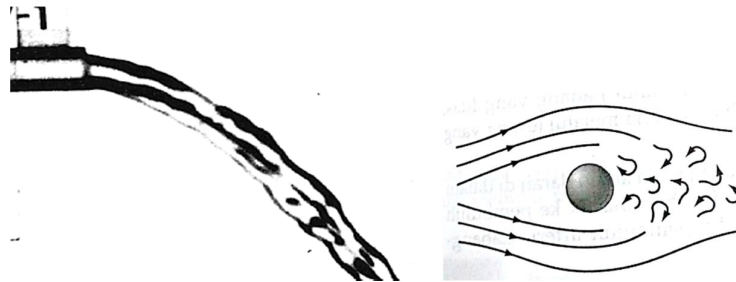
Aliran *laminer* berasal dari kata latin lamina yaitu lapisan-lapisan. Pada aliran *laminer*, partikel-partikel fluidanya bergerak disepanjang lintasan-lintasan lurus, sejajar dalam lapisan-lapisan atau laminae. Besarnya kecepatan-kecepatan dari *laminer* yang berdekatan tidak sama. Aliran laminar diatur oleh hukum yang menghubungkan tegangan geser ke laju perubahan bentuk sudut yaitu hasil kali kekentalan fluida dan gradient kecepatan. Viskositas fluida pada aliran laminar cenderung besar dan karenanya mencegah setiap kecenderungan menuju kondisi-kondisi turbulen (Giles, 1997). Gambar 2.7 menunjukkan bagaimana suatu aliran laminar melalui pipa.



Gambar 2.7. Aliran laminar keluar melalui pipa (Olson, 1990)

Aliran *turbulen* adalah aliran fluida yang partikel fluidanya bergerak tidak sejajar dan saling bersilangan satu sama lain sehingga terbentuk pusaran di dalam fluida, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Untuk mengkondisikan aliran turbulen maka kecepatannya dibuat tinggi dengan viskositas yang rendah. Tegangan geser ( $\tau$ ) yang timbul pada aliran *turbulent* relatif lebih besar dari pada tegangan geser yang terjadi pada aliran laminar sehingga kerugian aliran pun akan

besar pula. Jika pada aliran laminar memiliki kerugian sebanding dengan  $V$ , maka pada aliran *turbulent* sebanding dengan  $V^{(1,7 s/d 2)}$ .



Gambar 2.8. Aliran turbulent keluar melalui pipa (Olson, 1990)

Menurut Reynold, untuk membedakan apakah aliran itu turbulen atau laminar dapat menggunakan bilangan tak berdimensi yang disebut dengan bilangan Reynold (Streeter, 1985). Bilangan *Reynolds* adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskos yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu (Clifford, 1984).

$$Re_L = \frac{\rho \times V \times L}{\mu} \dots\dots\dots (2.12)$$

- dengan, -  $V$  : Kecepatan aliran (m/s)
- $\rho$  : Massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\mu$  : Viskositas dinamik (kg/m.s)
- $Re_L$  : Bilangan *Reynolds* pada pelat
- $L$  : Panjang aliran fluida (m)

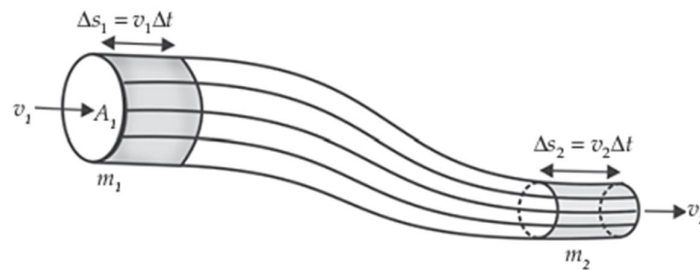
Batasan aliran di atas adalah untuk aliran *external* misalnya aliran air sungai atau air laut. Batasan bilangan *Reynolds* untuk aliran *internal* melalui pipa ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Batasan bilangan *Reynolds* ( $Re$ )

### 2.2.10. Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas merupakan salah satu penerapan hukum kelestarian massa. Terdapat dua tipe utama pada aliran fluida. Jika aliran lancar, hingga lapisan fluida yang saling berdekatan meluncur dengan lancar, aliran ini disebut aliran lurus (*streamline*). Diatas kecepatan tertentu, yang bergantung pada sejumlah faktor, aliran menjadi bergejolak yang disebut turbulen. Arus *steady* atau kisaran pada aliran tersebut akan menyerap energi dalam jumlah banyak dan meskipun sejumlah friksi internal tertentu yang disebabkan oleh kekentalan (*viscosity*) juga terdapat dalam aliran laminar dan akan lebih besar bila aliran adalah turbulen. Aliran laminar setimbang pada suatu fluida melalui tabung tertutup atau pipa pada Gambar 2.10 (Olson, 1990).



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

Pada suatu tabung alir seperti tampak pada Gambar 2.10. Air masuk dari ujung kiri dengan kecepatan  $v_1$  dan keluar di ujung kanan dengan kecepatan  $v_2$ . Jika kecepatan fluida konstan, maka dalam interval waktu  $\Delta t$  fluida telah menempuh jarak  $\Delta s_1 = v_1 \Delta t$ . Jika luas penampang tabung kiri  $A_1$  maka massa fluida pada daerah yang diarsir adalah (Streeter, 1985)

$$m = \rho_1 \times v_1$$

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

$$m_1 = \rho_1 \times A_1 \times \Delta s_1 = \rho_1 \times A_1 \times v_1 \times \Delta t \dots\dots\dots (2.13)$$

Demikian juga untuk fluida yang terletak di ujung kanan tabung, massanya pada daerah yang diarsir adalah

$$m_2 = \rho_2 \times A_2 \times \Delta s_2 = \rho_2 \times A_2 \times v_2 \times \Delta t \dots\dots\dots (2.14)$$

Karena alirannya *steady* dan dan massa konstan, maka massa yang masuk penampang  $A_1$  harus sama dengan massa yang keluar  $A_2$ . Sehingga menjadi:

$$\frac{m}{t} = \dot{m}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\rho_1 \times A_1 \times v_1 = \rho_2 \times A_2 \times v_2 \dots\dots\dots (2.15)$$

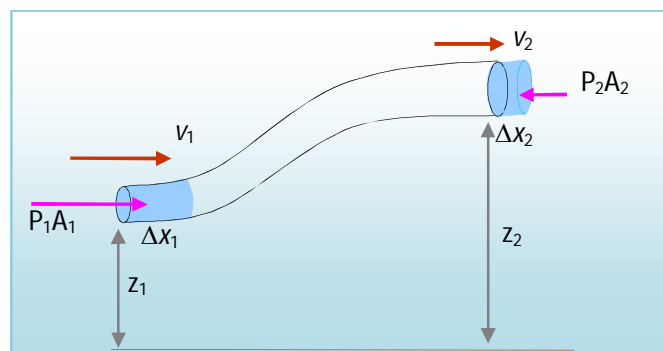
Persamaan (2.15) disebut dengan persamaan kontinuitas. Karena fluida *incompressible*, maka persamaan menjadi (Giancoli, 1996)

$$A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2 = Q \dots\dots\dots (2.16)$$

- dengan, -  $Q$  : Debit ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 -  $v$  : Kecepatan aliran ( $\text{m}/\text{s}$ )  
 -  $A$  : Luas penampang ( $\text{m}^2$ )

### 2.2.11. Persamaan Bernoulli

Prinsip *Bernoulli* merupakan salah satu bentuk penerapan hukum kelestarian energi. Persamaan *Bernoulli* digunakan untuk menganalisa penurunan tekanan yang terjadi pada suatu aliran fluida akibat mengalami peningkatan kecepatan dan ketinggian fluida terhadap suatu referensi. Untuk menurunkan persamaan *Bernoulli*, dapat diasumsikan bahwa aliran setimbang dan laminar, fluida tak mampu mampat, dan kekentalan cukup kecil untuk dapat diabaikan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.11 (Olson, 1990).



Gambar 2.11. Prinsip *Bernoulli* (Siddiqi, C. 2015)

Dengan meninjau Gambar (2.11), pada bagian luas penampang  $A_1$ , usaha yang dilakukan oleh  $P_1$  sejauh  $\Delta x_1$  adalah (Olson, 1990)

$$\Delta W_1 = P_1 \times A_1 \times \Delta x_1 = P_1 \times \Delta V_1 \dots\dots\dots(2.17)$$

Selanjutnya, pada bagian luas penampang  $A_2$ , usaha yang dilakukan  $P_2$  sejauh  $\Delta x_2$ , adalah (Olson, 1990)

$$\Delta W_2 = P_2 \times A_2 \times \Delta x_2 = P_2 \times \Delta V_2 \dots\dots\dots (2.18)$$

dengan, -  $P$  : Tekanan ( $Pa$ )  
 -  $A$  : Luas penampang ( $m^2$ )  
 -  $\Delta x$  : Panjang jarak fluida (m)  
 -  $\Delta V$  : Perubahan volume fluida ( $m^3$ )  
 -  $\Delta W$  : Perubahan kerja ( $Joule$ )

$$P_1 + \rho \times g \times z_1 + \frac{1}{2} \times \rho \times v_1^2 = P_2 + \rho \times g \times z_2 + \frac{1}{2} \times \rho \times v_2^2 . (2.19)$$

Atau,

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

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

Persamaan (2.19) di atas, disebut dengan persamaan *Bernoulli* yang digunakan untuk perhitungan aliran fluida ideal atau tanpa gesekan dan tak mampu mampat (*incompressible*). Jika persamaan (2.19) dikalikan dengan volume jenis (*Specific Volume*) dari suatu fluida atau zat, maka persamaan *Bernoulli* akan menjadi:

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

$$\frac{P_1}{\rho} + g \times z_1 + \frac{1}{2} \times v_1^2 = \frac{P_2}{\rho} + g \times z_2 + \frac{1}{2} \times v_2^2 \dots\dots\dots (2.20)$$

Selanjutnya, persamaan (2.20) kembali dikalikan dengan percepatan gravitasi ( $1/g$ ), maka bentuk persamaan *Bernoulli* menjadi

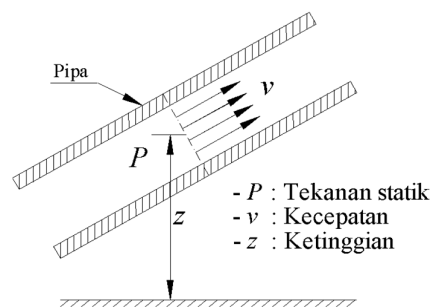
$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \times g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \times g} \dots\dots\dots (2.21)$$

atau,

$$H_1 = H_2 \dots \dots \dots (2.22)$$

dengan, -  $\gamma$  : Berat jenis zat cair persatuan volume ( $\text{kgf/m}^3$ )  
 -  $H_1$  : *Head* total 1  
 -  $H_2$  : *Head* total 2

Persamaan *Bernoulli* di atas juga disebut dengan persamaan *Head*. Pada tiap-tiap suku pada persamaan (2.21) yaitu  $P/\gamma$ ,  $v^2/2g$ , dan  $z$  berturut-turut disebut dengan *head tekanan*, *head kecepatan*, dan *head potensial* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12. *Head* adalah energi mekanik yang dikandung oleh satu satuan berat ( $1\text{kgf}$ ) zat cair yang mengalir pada sebuah luasan penampang. 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).



Gambar 2.12. Aliran melalui pipa (Sularso, 2006)

### 2.2.12. Kehilangan Energi (*Head Losses*)

*Head Loss* adalah kerugian tinggi tekan yang terjadi pada aliran internal dengan satuan meter. Aliran internal pada pemipaan sangat sering mengalami *head loss*. *Head loss* terjadi karena berbagai hal seperti gesekan fluida dengan dinding pipa dan adanya hambatan pada pipa seperti belokan, percabangan, katup, dan lain sebagainya.

Perubahan tekanan aliran air di sepanjang pipa akibat gesekan terhadap dinding pipa dapat dianalisa melalui persamaan *Bernoulli* yaitu (Clifford, 1984)

$$H_1 = H_2 + h_L$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2 x g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2 x g} + h_L \dots \dots \dots (2.23)$$

Persamaan (2.23) merupakan persamaan *Bernoulli* yang dimodifikasi karena adanya gesekan fluida terhadap dinding pipa. Gesekan akan menimbulkan penurunan tekanan atau kehilangan energi di sepanjang aliran. Kerugian tinggi-tekan terdiri atas kerugian tinggi-tekan mayor dan minor. *Head loss mayor* disebabkan karena kerugian gesek di dalam pipa-pipa, dan *head loss minor* disebabkan karena kerugian di dalam belokan-belokan, reduser, katup-katup, dan sebagainya (Sularso dan Tahara, 2006).

### 2.2.12.1. Head Loss Mayor

*Head loss mayor* merupakan kehilangan energi primer atau kehilangan energi akibat gesekan yang terjadi pada pipa lurus berdiameter konstan. Pada aliran *laminar* nilai koefisien gesek hanya sebagai fungsi bilangan *Reynolds* saja, karena aliran *laminar* tidak dipengaruhi oleh faktor kekasaran permukaan pipa. Namun dengan semakin tingginya bilangan *Reynolds*, maka koefisien gesekan ( $f$ ) hanya sebagai fungsi dari kekasaran relatif permukaan pipa. Pada kondisi ini, rezim aliran dikatakan mencapai kekasaran penuh sehingga alirannya adalah *turbulen*. Ada beberapa persamaan yang dapat digunakan dalam menentukan kehilangan longitudinal  $h_{LMY}$  apabila panjang pipa  $L$  meter dan diameter  $d$  mengalirkan kecepatan rata-rata  $V$ . Menurut White (1998), salah satu persamaan yang dapat digunakan adalah Persamaan Darcy-Weisbach yaitu: (Clifford, 1984)

$$h_{LMY} = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g} \dots\dots\dots (2.24)$$

- 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*. 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 *relative* (Munson dkk., 2003).

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

$$f = \frac{0,3164}{Re_d^{0,25}} \dots\dots\dots (2.25)$$

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

$$f = \frac{64}{Re} \dots\dots\dots (2.26)$$

#### 2.2.12.2. Head Loss Minor

*Head loss minor* merupakan kehilangan energi sekunder atau kehilangan energi akibat perubahan penampang dan aksesoris lainnya. Misalnya terjadi pada pembesaran penampang (*expansion*), pengecilan penampang (*contraction*), dan belokan atau tikungan. *Head loss minor* dapat dihitung secara umum melalui persamaan (Clifford, 1984)

$$h_L = K \times \frac{v^2}{2 \times g} \dots\dots\dots (2.27)$$

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 pada *head loss mayor* yaitu (Clifford, 1984)

$$h_L = f \times \frac{L_e}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g} \dots\dots\dots (2.28)$$

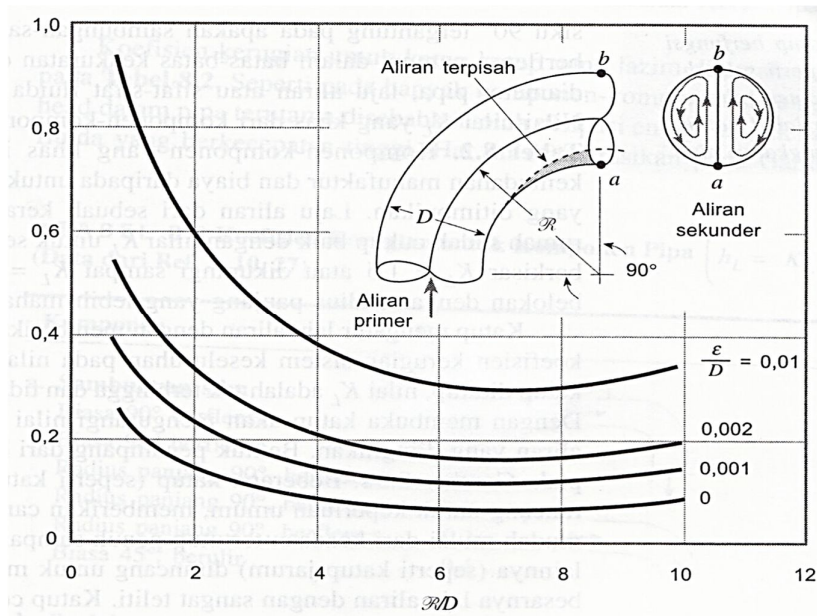
karena,

$$f \times \frac{L_e}{D} = K \dots\dots\dots (2.29)$$



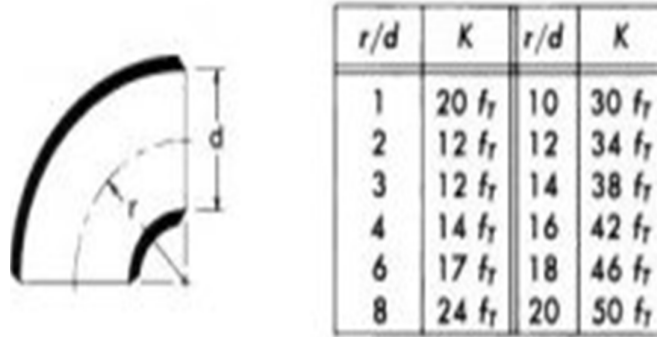
- Dengan: -  $L_e$  : Panjang ekuivalen dari komponen (m)  
 -  $D$  : Diameter komponen katup dan pipa (m)  
 -  $h_L$  : *Head loss minor* (m)  
 -  $K$  : Koefisien tahanan  
 -  $f$  : Kekasaran relatif dari diagram *Moody*

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 Gambar 2.13 yaitu:



Gambar 2.13. Koefisien tahanan ( $K$ ) pada belokan pipa (*bends*  $90^\circ$ ) (Munson dkk., 2003)

Sudut dengan perubahan arah yang terkesan berangsur-angsur (*bends*), kehilangan energi tergantung pada perbandingan antara jari-jari belokan dan diameter pipa. Perubahan arah secara berangsur-angsur (*bends*) pada pipa dapat dilihat pada Gambar 2.14.

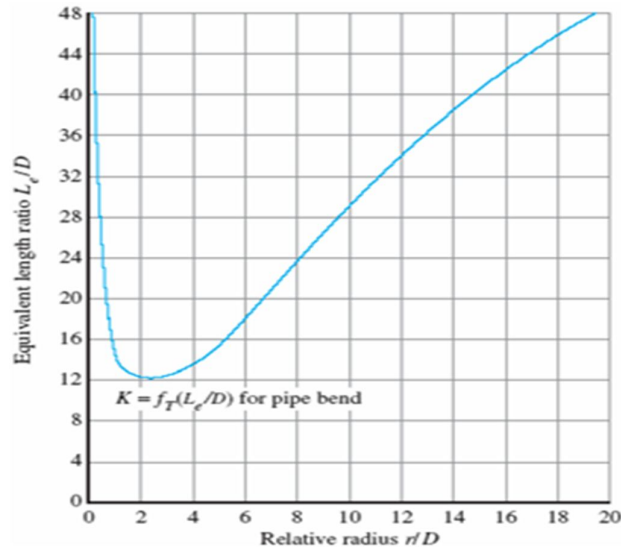


Gambar 2.14. Koefisien tahanan pada bends  $90^\circ$  (Clifford, 1984)

Tabel 2.1. Koefisien kerugian belokan pipa (Sularso dkk., 1987)

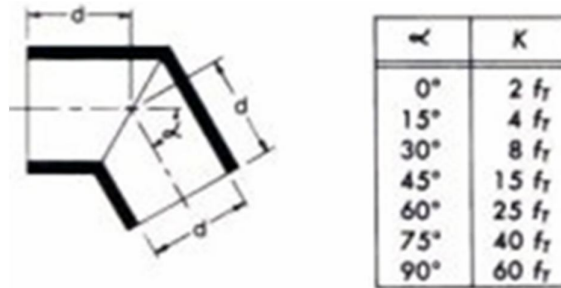
| Sudut ( $\theta^\circ$ ) |       | 5     | 10    | 15    | 22,5  | 30    | 45    | 60    | 90    |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $f$                      | Halus | 0,016 | 0,034 | 0,042 | 0,066 | 0,130 | 0,236 | 0,471 | 1,129 |
|                          | Kasar | 0,024 | 0,44  | 0,062 | 0,154 | 0,165 | 0,320 | 0,684 | 1,265 |

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 Gambar 2.15.



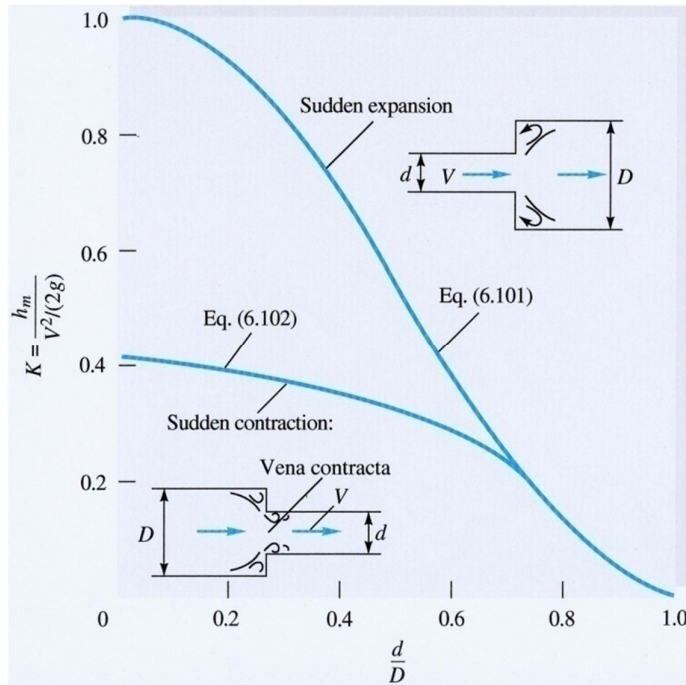
Gambar 2.15. Perbandingan antara panjang *ekuivalen* terhadap diameter dalam pipa ( $L_e/D$ ) pada belokan pipa  $90^\circ$  (White, 1998)

Aliran yang melewati belokan patah (*mitre bends*) koefisien tahanan *minor* ( $K$ ) merupakan fungsi dari sudut belokan ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Koefisien tahanan ( $K$ ) pada belokan patah (*mitre bends*) (Clifford, 1984)

Pada aliran yang melewati sebuah pipa mengalami pembesaran dan pengecilan penampang secara mendadak, koefisien tahanan ( $K$ ) merupakan *ratio* perbandingan antara diameter pipa kecil dengan diameter pipa besar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17.



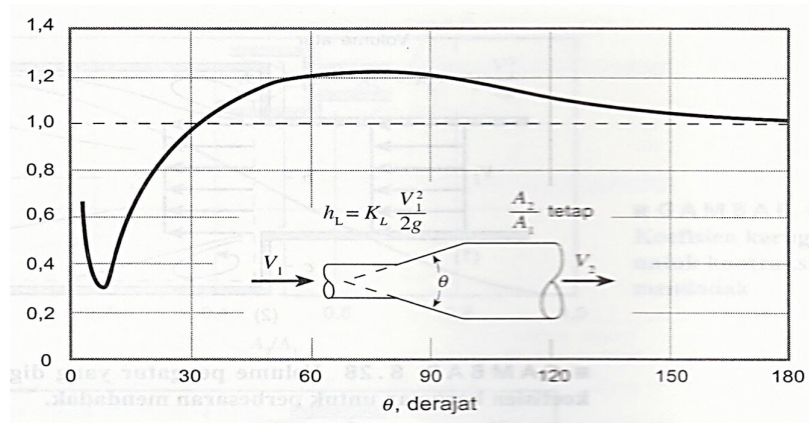
Gambar 2.17. Grafik koefisien tahanan pada pengecilan dan pembesaran penampang secara mendadak (White, 1998)

Pada aliran yang mengalami pembesaran penampang secara mendadak (*sudden expansion*), penurunan tekanan (*minor losses*) dihitung melalui persamaan 2.30 adalah

$$h_L = K \times \frac{(v_1 - v_2)^2}{2 \times g} \dots\dots\dots (2.30)$$

- 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 (2.30). Untuk perubahan penampang secara *gradual contraction*, koefisien tahanan ( $K$ ) dapat dicari melalui Gambar 2.18.



Gambar 2.18. Koefisien kerugian pada *gradual contraction* (Munson dkk., 2003)

Koefisien tahanan ( $K$ ) untuk *sudden expansion* juga dapat diketahui melalui analisis pada persamaan (2.31) (Munson dkk., 2003)

$$K = \left[ 1 - \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \right]^2 = \left[ 1 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \dots\dots\dots (2.31)$$

- 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*. 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 0 dibagi luas penampang di titik 2 (Munson dkk., 2003)

$$h_c = \left( \frac{1}{C_c} - 1 \right) \times \frac{V_2^2}{(2 \times g)} \dots\dots\dots (2.32)$$

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

$$h_c = K \times \frac{V_2^2}{(2 \times g)} \dots\dots\dots (2.33)$$

### 2.2.13. 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 (Clifford, 1984)

$$H_{Pump} = \frac{\Delta P}{\gamma} + h_L + \Delta z + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2 \times g} \dots\dots\dots (2.34)$$

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