

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Kajian Pustaka

pengujian tentang *sling pump* pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, skala laboratorium tipe kerucut dan tipe tabung dengan beberapa variasi diantaranya variasi putaran yaitu 30, 40, dan 50 rpm, variasi tinggi *delivery* yaitu 1, 2 dan 3 meter. Variasi ukuran selang yaitu 1/2'', 5/8'' dan 3/4'', variasi jumlah lilitan yaitu 5, 6, 7 dan 8 lilitan, sedangkan variasi jumlah inlet 1, 2, 3, dan 4 inlet.

Berdasarkan penelitian tersebut diperoleh hasil pada *sling pump* tipe kerucut dengan variasi kecepatan putaran hasil optimal terjadi pada putaran 50 rpm yaitu dengan debit 2,5 liter/menit (Rakhman, 2009). Pada variasi tinggi *delivery* hasil optimal terjadi pada ketinggian 1 meter yaitu dengan debit 4,58 liter/menit (Ginancar, 2009). Pada variasi diameter selang hasil optimal terjadi pada diameter selang 3/4'' yaitu dengan debit 3,6 liter/menit (Prabowo, 2009). Pada variasi jumlah lilitan hasil optimal terjadi pada jumlah lilitan 6 yaitu dengan debit 9,37 liter/menit (Hasbullah, 2010). Sementara pada variasi 4 inlet dengan ukuran selang 3/4'' hasil optimal menunjukkan pada variasi 2 inlet menghasilkan debit 8,4 liter/menit (Haryanto, 2010).

Pada *sling pump* tipe tabung dengan variasi kecepatan putaran hasil optimal terjadi pada putaran 50 rpm yaitu dengan debit 6,41 liter/menit (Hidayat, 2009). Pada variasi tinggi *delivery* hasil optimal terjadi pada ketinggian 1 meter yaitu dengan debit 6,22 liter/menit (Sajidin, 2009). Pada variasi diameter selang hasil optimal terjadi pada diameter selang 3/4'' yaitu dengan debit 6,41 liter/menit (Wahyudi, 2009).

Metode yang digunakan pada penelitian sebelumnya adalah memanfaatkan kecepatan putaran *sling pump*, jumlah lilitan selang dan banyaknya inlet yang digunakan. Sedangkan pada penelitian yang akan dilakukan ini menggunakan variasi jumlah inlet dan kondisi pencelupan *sling pump* di dalam air. Penelitian ini belum pernah dilakukan sebelumnya. Oleh sebab itu peneliti

ingin mengetahui perbandingan debit yang dihasilkan oleh penelitian sebelumnya dengan penelitian yang akan dilakukan.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Pendahuluan

Pada tahun 287–212 SM, seorang yang bernama *Archimedes* berhasil menemukan sebuah piranti untuk memindahkan air dari danau ke saluran irigasi pertanian *Syracuse* di *Sicily*, piranti yang berupa alat ini kemudian dikenal dengan sebutan “*Archimedean Screw Pumps*”.

Sejalan dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, metode *Archimedean Screw Pumps* hanya digunakan dalam *propulsi* kapal-kapal saja, namun demikian, metode pompa *archimedes* ini tidak hanya dapat digunakan dalam sistem *propulsi* saja, tetapi metode ini juga dapat digunakan sebagai metode pembuatan pompa air yang tidak memerlukan energi listrik atau energi fosil.

Mekanisme kerja *Archimedean Screw Pump* adalah dengan putaran ujung engkol, maka air akan naik dari daerah yang tingkat rendah ke daerah yang tingkatnya lebih tinggi.

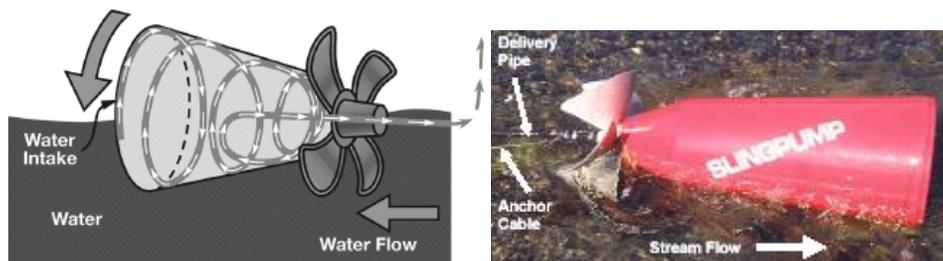


Gambar 2. 1. Arhimedean screw pump ([.animatedsoftware.com Pumpglos/air_lift.htm](http://.animatedsoftware.com/Pumpglos/air_lift.htm))

Berdasarkan prinsip kerja *Arhimedean screw pump* tersebut, diperlukan sedikit modifikasi untuk memperoleh sebuah pompa yang bersifat *non* konvensional namun tidak memerlukan energi dari minyak bumi. Modifikasi tersebut difokuskan pada penggantian ulir pipa pompa dengan lilitan selang yang dililitkan ke rangka pompa dan penggantian poros engkol

pompa dengan sebuah *propeller*. Namun demikian, pompa hasil modifikasi ini tidak dapat lagi diaplikasikan di danau, karena pompa ini memerlukan energi aliran untuk memutar propelernya. Dengan demikian, pompa hasil modifikasi ini hanya dapat diaplikasikan di sungai yang airnya mengalir sepanjang waktu.

Dengan adanya putaran *propeller*, maka selang 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 elevasinya rendah menuju daerah yang elevasinya lebih tinggi. Pompa hasil modifikasi ini disebut dengan *sling pump*.



Gambar 2. 2 Bagan sling pump 1(www.riferam.com/sling/indek.html).

Dengan adanya putaran *propeller*, maka selang sebagai pengganti ulir pipa akan merauk air secara terus-menerus. Akibatnya, timbul tekanan dan laju aliran massa air di sepanjang lilitan selang sehingga air berpindah dari daerah yang elevasinya rendah menuju daerah yang elevasinya lebih tinggi. Pompa hasil modifikasi ini disebut dengan *sling pump*.

2.2.2. Energi Air

Energi air merupakan sumber daya yang sangat penting setelah tenaga minyak dan uap panas bumi. Beberapa alat yang memanfaatkan tenaga air adalah pembangkit listrik tenaga air, turbin air, dan pompa. 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 hampir mencapai 70 % dari bumi.
3. Mudah didapat dan untuk memanfaatkan air menjadi suatu energi tidak terlalu rumit khususnya pada aplikasi alat tepat guna.

Walaupun energi air mempunyai banyak kelebihan, namun energi air tetap mempunyai kekurangan, antara lain :

1. Penggunaan tenaga air bergantung pada aliran sungai secara alamiah.
2. Energi aliran air sungai sangat bergantung pada kondisi cuaca dan topografi setempat.

Dari ketersediaannya air di muka bumi, yaitu (Patty, 1985):

1. Arus sungai menuju laut sesampainya dilaut sebagian air laut menguap dan terbentuk kumpulan uap air (awan)
2. Kumpulan awan menuju ke daratan. Pada ketinggian tertentu, temperatur turun sehingga uap air menjadi air dan mengakibatkan hujan turun.
3. Air hujan yang jatuh ke permukaan bumi akan terserap tanah dan akan menjadi sumber mataair kemudian air mengalir ke sungai dan ke laut.

Air sungai di daerah pengunungan mempunyai energi potensial, tetapi bila air mengalir maka sebageian energi potensial ini akan hilang. Energi potensial yang hilang ini antara lain disebabkan pergesekan anatara 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 :

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

Dengan, m = massa (Kg)

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

$$\frac{E_{air}}{t} = \frac{1}{2} \times \frac{m}{t} \times v^2 = P_{air}$$

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

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

Sehingga persamaan (2.1) menjadi:

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

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

dengan, - P_{air} : Daya air (Watt)

- ρ : Massa jenis air (kg/m^3)

- A : Luas penampang aliran air (m^2)

- v : Kecepatan aliran air (m/s)

2.2.3 Tekanan (P)

Dalam ilmu fisika, tekanan (P) diartikan sebagai gaya per satuan luas, dimana arah gaya tegak lurus dengan luas permukaan. Secara matematis, tekanan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

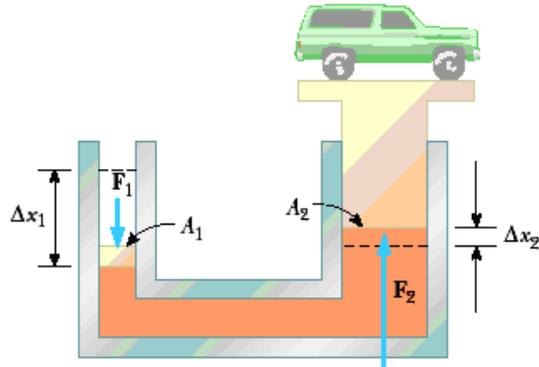
$$P = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.4)$$

dengan, - P : Tekanan (Pa)

- F : Gaya (N)

- A : Luas permukaan (m^2)

Persamaan (2.4) di atas merupakan penerapan dari hukum *Pascal* yang menyatakan bahwa “Perubahan tekanan yang dikenakan pada fluida akan diteruskan tanpa pengurangan ke setiap titik fluida dan ke dinding wadah”. Artinya, apabila satu bagian dari fluida statik mendapat tekanan tertentu, maka tekanan itu akan diteruskan ke semua titik atau ke semua bagian dari fluida tersebut. Hukum *Pascal* ini diterapkan untuk pompa hidrolik, yaitu untuk membangkitkan gaya yang besar dengan gaya (tekanan) yang kecil.

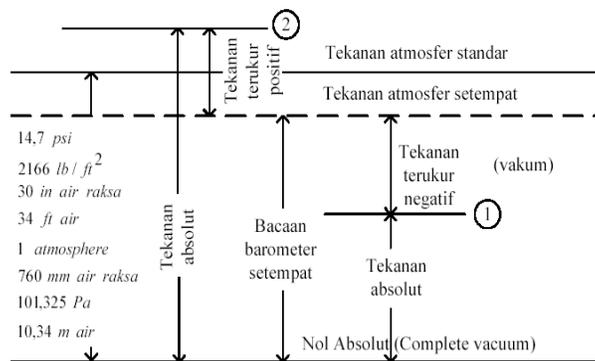


Gambar 2. 3.Pompa hidrolik (<http://i-elisa.ugm.ac.id>)

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.

2.2.3.1 Jenis jenis skala tekanan

Absolute Zero tekanan yang diukur pada waktu tekanan nol (hampa)/ absolute, sedangkan *gauge pressure* adalah tekanan yang diukur terhadap tekanan atmosfer sekitar. Tekanan terukur dapat lebih besar atau lebih kecil dari pada tekanan atmosfer sekitar. Yang lebih besar disebut tekanan positif sdangkan yang lebih kecil disebut tekanan negatif..



Gambar 2. 4. Skala tekanan (Streeter, 1985)

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

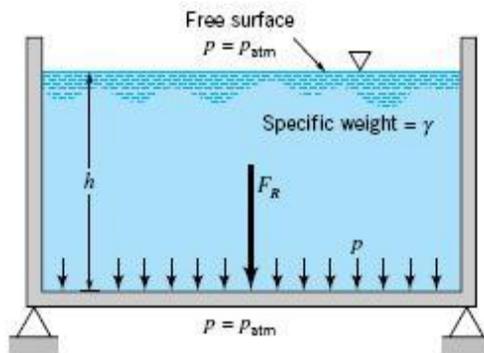
$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{gauge}} \dots \dots \dots (2.5)$$

Sedangkan pada titik 1:

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

2.2.3.2 Tekanan hidrostatik

Tekanan hidrostatik adalah tekanan yang terjadi di bawah [air](#). Tekanan ini terjadi karena adanya berat air itu sendiri yang membuat air tersebut mengeluarkan tekanan. Tekanan air bergantung pada kedalaman air (h) di dalam sebuah ruang dan [gravitasi](#) (g).



Gambar 2. 5. Tekanan hidrostatik (<http://www.ccitonline.com/mekanikal>)

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

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

dengan, - P : Tekanan hidrostatik (N/m^2)

- ρ : Massa jenis cairan (kg/m^3)

- g : Percepatan gravitasi (m/s^2)

- h : Kedalaman cairan (m)

2.2.4. Dinamika Fluida

Menurut *Newton*, [fluida](#) adalah suatu zat yang memiliki [tegangan](#) geser dan berbanding lurus secara *linier* dengan [gradien kecepatan](#) pada arah [tegak lurus](#) dengan bidang geser. Fluida seperti ini disebut dengan fluida *Newtonian*. Keunikan dari fluida *Newtonian* adalah fluida ini akan terus mengalir betapapun kecilnya [gaya](#) yang bekerja pada fluida. Fenomena ini disebabkan

karena viskositas dari suatu fluida *Newtonian* tidak berubah ketika terdapat gaya yang bekerja pada fluida tersebut. Viskositas dari suatu fluida *Newtonian* hanya bergantung pada temperatur (T) dan tekanan (P). Viskositas sendiri merupakan suatu konstanta yang menghubungkan besar tegangan geser terhadap gradien kecepatan.

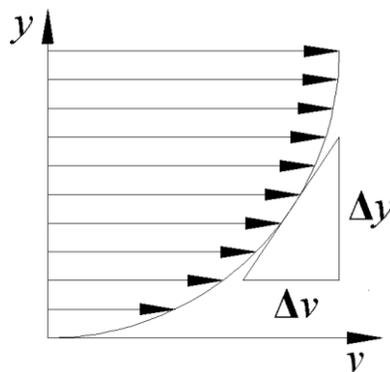
2.2.4.1. Viskositas (Kekentalan)

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.

2.2.4.1.1. Viskositas dinamik

Menurut *Newton*, tegangan geser dalam suatu fluida sebanding dengan laju perubahan kecepatan normal aliran. Laju kecepatan sering disebut dengan gradien kecepatan.



Gambar 2. 6. Profil kecepatan dan gradien kecepatan (Bruce R munson Dkk, 2005)

Dari gambar di atas, gradien kecepatan pada setiap harga yang melalui sumbu y didefinisikan sebagai:

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

Sehingga, tegangan geser fluida yang timbul diformulasikan sebagai:

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

dengan, - τ : Tegangan geser fluida (*Pa*)

- μ : 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:

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

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

Dengan faktor μ (viskositas dinamik) kesebandingan yang dikenal sebagai koefesien 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:

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

2.2.4.1.2. Viskositas Kinematik

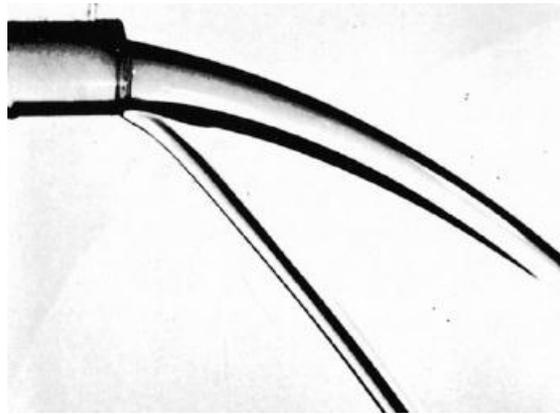
Viskositas kinematik (ν) adalah perbandingan (*ratio*) antara viskositas dinamik (μ) dengan massa jenisnya (ρ).

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

Satuan ν untuk SI adalah (m^2/s).

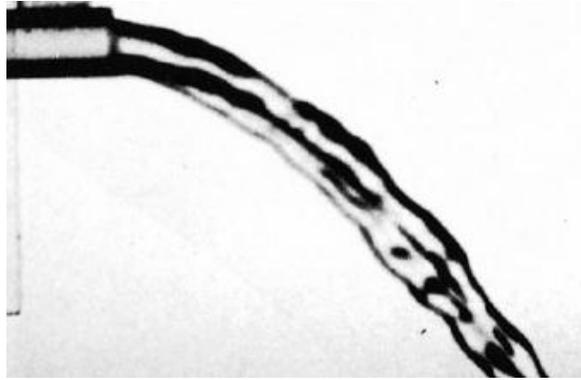
2.2.4.2. Aliran *Laminar* Dan *Turbulen*

Aliran *laminar* adalah suatu aliran fluida yang sifat alirannya cenderung stabil. Pada aliran *laminar*, partikel fluida bergerak pada lintasan yang halus (*smooth*) dan membentuk lamina-lamina atau lapisan-lapisan dimana satu lapis bergerak secara *smooth* di atas lapisan yang lain. Pengaruh viskositas akan meredam kecenderungan untuk tidak terjadinya *turbulensi* (*swirling motion*) pada aliran fluida kondisi *laminar*. Aliran *laminar* akan mengalami ketidakstabilan ketika memiliki viskositas dan kecepatan tinggi. Pada kondisi ini, aliran akan cenderung menjadi aliran *turbulen*.



Gambar 2. 7. Aliran Laminar keluar melalui pipa (Frank M. White, 1998)

Pada 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 (τ) 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. 8. Aliran turbulen keluar melalui pipa (Frank M. White, 1998)

Untuk mengetahui sebuah aliran bersifat *laminar* atau *turbulen* maka dapat dibedakan dengan menggunakan bilangan *Reynolds*, yaitu:

$$Re < 2300 \quad = \textit{Laminar}$$

$$2300 < Re < 4000 \quad = \textit{Transisi}$$

$$Re > 4000 \quad = \textit{Turbulen}$$

$$Re_d = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan, - v : Kecepatan aliran (m/s)

- ρ : Massa jenis (kg/m^3)

- μ : Viskositas dinamik ($kg/m.s$)

- Re_d : Bilangan *Reynolds*

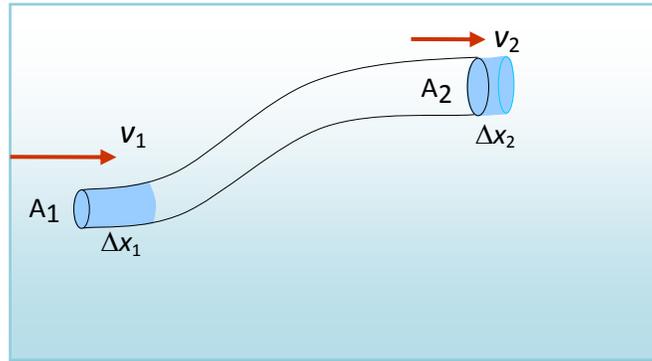
- d : Diameter dalam pipa (m)



Gambar 2. 9. Batasan bilangan Reynolds (Re_d)

2.2.4.3. Persamaan Kontinuitas

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 (elisa.ugm.ac.id)

Pada interval waktu sebesar Δt , laju aliran massa fluida yang berada di ujung bawah bergerak sejauh $\Delta x_1 = v_1 \Delta t$. Massa fluida yang berada di ujung bawah adalah:

$$\Delta \dot{m}_1 = \rho_1 A_1 \Delta x_1 = \rho_1 A_1 v_1 \Delta t \dots\dots\dots (2.15)$$

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

$$\Delta \dot{m}_2 = \rho_2 A_2 \Delta x_2 = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t \dots\dots\dots (2.16)$$

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

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

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \dots\dots\dots (2.17)$$

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

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = Q$$

$$D_1^2 \cdot v_1 = D_2^2 \cdot v_2 \dots\dots\dots (2.18)$$

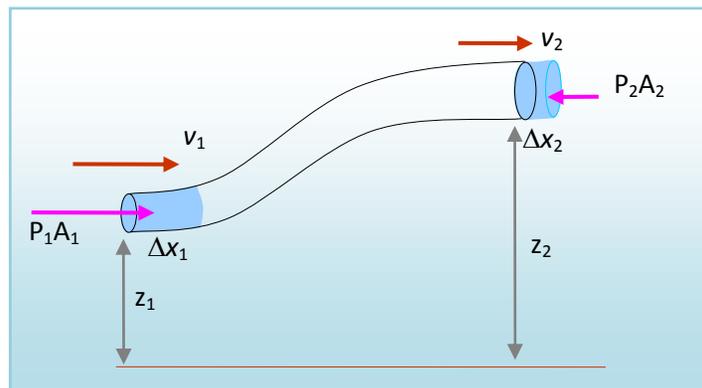
dengan, - Q : Debit (m^3/s)

- v : Kecepatan aliran (m/s^2)
- A : Luas penampang (m^2)

Persamaan (2.19) di atas disebut dengan persamaan *kontinuitas*.

2.2.4.4. Prinsip Bernoulli

Prinsip *Bernoulli* adalah sebuah istilah didalam [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 ini 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 (<http://i-elisa.ugm.ac.id>)

Dengan meninjau gambar (2.11) di atas, pada bagian luas penampang A_1 , usaha yang dilakukan oleh P_1 sejauh Δx_1 adalah:

$$\Delta W_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1 \Delta V_1 \dots\dots\dots (2.19)$$

Selanjutnya, pada bagian luas penampang A_2 , usaha yang dilakukan P_2 sejauh Δx_2 , adalah:

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

dengan, - P : Tekanan (Pa)

- A : Luas penampang (m^2)

- Δx : Panjang kolom fluida (m)

- ΔV : Volum fluida (m^3)

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

atau,

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

dengan, - v : Kecepatan fluida (m/s)

- g : [Percepatan gravitasi bumi](#) (m/s^2)

- z : Ketinggian relatif (m)

- P : [Tekanan](#) fluida (Pa)

Persamaan (2.23) di atas, disebut dengan persamaan *Bernoulli* yang digunakan untuk perhitungan aliran fluida ideal atau tanpa gesekan dan tak mampu mampat (*incompressible*). Jika persamaan (2.23) dikalikan dengan volum jenis (*Specific Volume*) dari suatu fluida atau zat, maka persamaan *Bernoulli* akan menjadi:

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

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

Selanjutnya, persamaan (2.24) kembali dikalikan dengan percepatan gravitasi ($1/g$), maka bentuk persamaan *Bernoulli* menjadi:

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

atau,

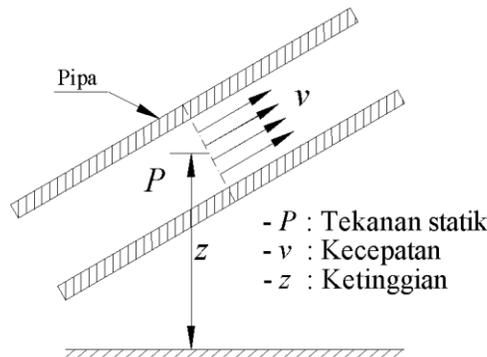
$$H_1 = H_2 \dots\dots\dots (2.25)$$

dengan, - γ : Berat jenis zat cair persatuan volum (N/m^3)

- H_1 : *Head* total 1 (m)

- H_2 : *Head* total 2 (m)

Persamaan *Bernoulli* di atas juga disebut dengan persamaan *Head*. Pada tiap-tiap suku pada persamaan (2.25) yaitu P/γ , $v^2/2g$, dan z berturut-turut disebut dengan *head tekanan*, *head kecepatan*, dan *head potensial*. *Head* adalah energi mekanik yang dikandung oleh satu satuan berat (1kgf) zat cair yang mengalir pada sebuah luasan penampang. Satuan energi persatuan berat adalah ekuivalen 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.



Gambar 2. 12. Aliran melalui pipa (Sularso, 2006)

2.2.5. 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:

$$H_1 = H_2 + h_L$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \dots\dots\dots (2.26)$$

Persamaan (2.27) merupakan persamaan *Bernoulli* yang dimodifikasi karena adanya gesekan fluida terhadap dinding pipa. Gesekan akan menimbulkan penurunan tekanan atau kehilangan energi 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*.

Kerugian *mayor* adalah kehilangan tekanan akibat gesekan aliran fluida pada pipa lurus. Disebut "*mayor*" karena pipa lurus sebagai komponen utamanya. Sedangkan kerugian *minor* adalah kehilangan tekanan yang terjadi di selain pipa lurus misalnya kerugian pada katup-katup, sambungan *T*, sambungan *L*, dan sebagainya. Disebut "*minor*" karena katup-katup, sambungan *T*, sambungan *L* merupakan komponen dari pipa pendukung. Dua kerugian aliran fluida akibat gesekan di sepanjang komponen aliran ini disebut dengan *head loss*.

2.5.5.1. Perhitungan *Head Loss Mayor*

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, rejim aliran dikatakan mencapai kekasaran penuh sehingga alirannya adalah *turbulen*.

Penurunan tekanan (*P*) pada aliran *turbulen* merupakan fungsi dari bilangan *Reynolds* (Re_d), perbandingan panjang dan diameter pipa (L/D), serta kekasaran relatif pipa (ϵ/D). *Head loss mayor* dihitung dari persamaan *Darcy-Weisbach*, yaitu:

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

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* yang disajikan pada Lampiran.

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:

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

Perhitungan besarnya angka kekasaran relatif (f) pada aliran *laminar* dapat dicari dengan menggunakan rumus dibawah ini:

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

2.5.5.2. Perhitungan *Head Loss Minor*

Head loss minor merupakan kerugian-kerugian aliran kecil yang dapat dihitung secara umum melalui persamaan:

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

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:

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

karena,

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

dengan, - L_e : Panjang ekuivalen dari komponen (m)

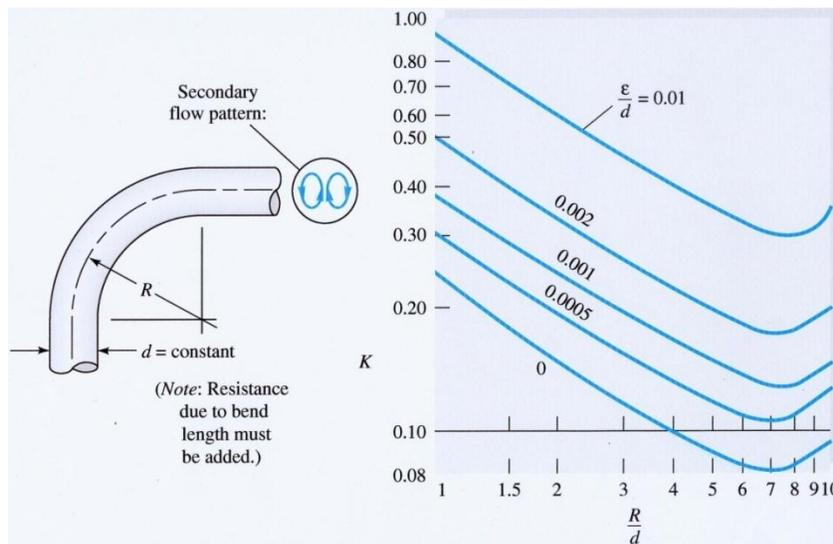
- D : Diameter komponen katup dan pipa (m)

- h_{LM} : *Head loss minor* (m)

- K : Koefisien tahanan

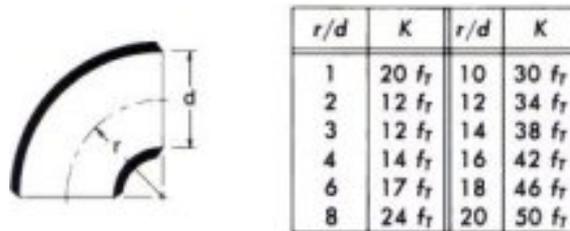
- f : Kekasaran relatif dari diagram *Moody*

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 bawah ini yaitu:



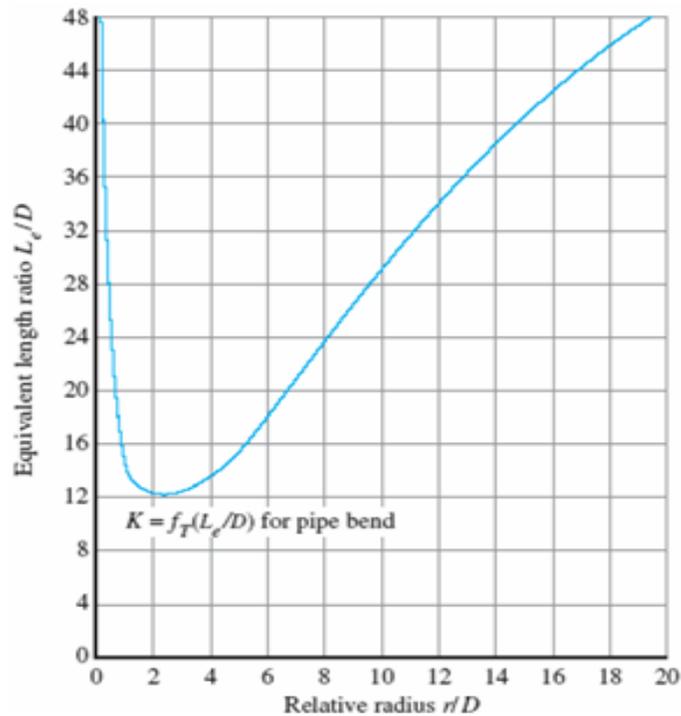
Gambar 2. 13. Koefisien tahanan (K) pada belokan pipa (bends 90°) (Frank M. White, 1998)

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*, koefisien tahanan akan lebih tinggi namun proses pembuatan yang lebih mudah dan harganya jauh lebih murah.



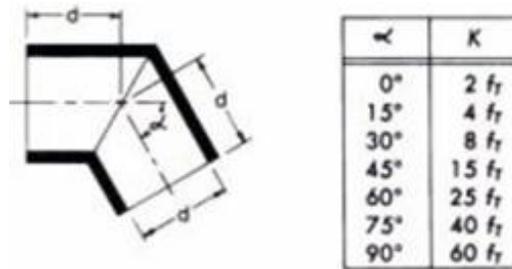
Gambar 2. 14. Koefisien tahanan pada bends 90° (www.cranevalve.com)

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° dapat dicari dari grafik di bawah ini:



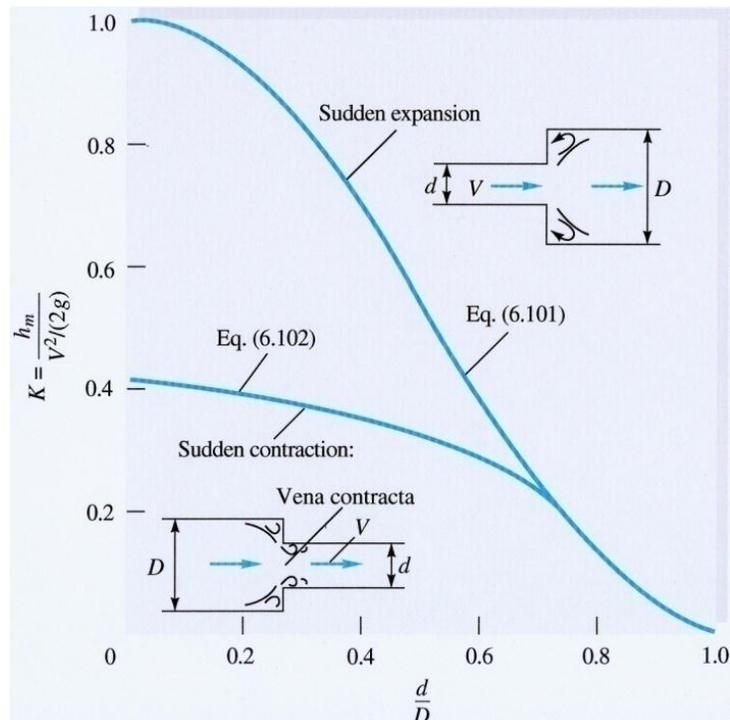
Gambar 2. 15. Perbandingan antara panjang ekuivalen terhadap diameter dalam pipa (L_e/D) pada belokan pipa 90° (Beji, K. H, 1938)

Aliran yang melewati belokan patah (*mitre bends*) koefisien tahanan *minor* (K) merupakan fungsi dari sudut belokan.



Gambar 2. 16 Koefisien tahanan (K) pada belokan patah (mitter bends) (cranevalve.com)

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.



Gambar 2. 17. Grafik koefisien tahanan pada pengecilan dan pembesaran penampang secara mendadak (M. White, 1998)

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

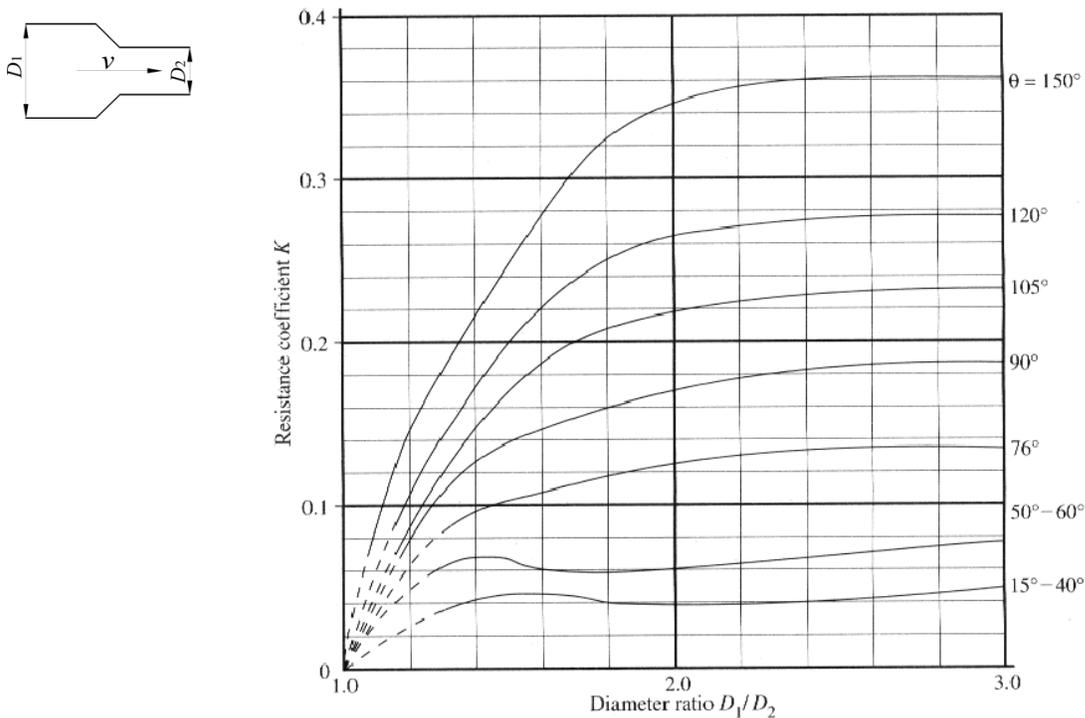
$$h_{LM} = K \cdot \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \dots\dots\dots (2.32)$$

dengan, - K : Faktor tahanan *head loss minor* pada *sudden expansion*

- v_1 : Kecepatan aliran pada pipa kecil (*m/s*)

- v_2 : Kecepatan aliran pada pipa besar (*m/s*)

Penurunan tekanan (P) akibat pengecilan penampang secara mendadak (*sudden contraction*) atau secara *gradual contraction*, perhitungan rugi *minor (head loss minor)* mengacu pada persamaan (2.33) di atas. Untuk perubahan penampang secara *gradual contraction*, koefisien tahanan (K) dapat dicari melalui grafik dibawah ini sebagai berikut:



Gambar 2. 18. Grafik koefisien tahanan pada gradual contraction (King, H, W., and E. F. Brater, 1963).

Koefisien tahanan (K) untuk *sudden expansion* juga dapat diketahui melalui analisis seperti pada persamaan (2.34) dibawah ini:

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

Dengan, - K : Faktor tahan *head loss minor*

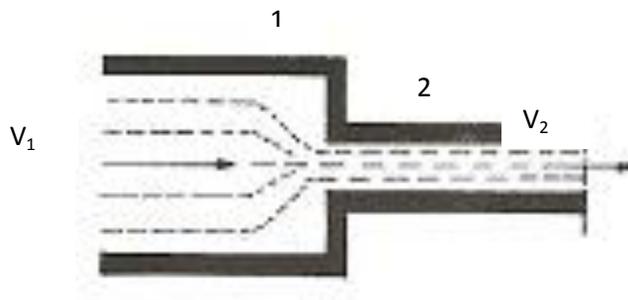
- A_1 : Penampang pipa kecil (m^2)

- 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. 19 Penyempitan mendadak (Santoso, 2012)

Dengan persamaan kontinuitas:

$$V_1 \cdot C_c \cdot A_2 = V_2 \cdot A_1$$

Dimana C_c sebagai koefisien penyempitan atau kontraksi yaitu luas jet di penampang 0 dibagi luas penampang di titik 2.

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

Untuk lubang masuk pipa dari reservoir

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

2.5.5.3. 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 Δz .

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:

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

dengan, - H_{Pump} : Head total pompa (m)

- z : Perbedaan ketinggian antar titik isap dan titik keluar (m)
- ΔP : Perbedaan tekanan statik (m)
- γ : 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)