

BAB II

KAJIAN PUSTAKAN DAN DASAR TEORI

2.1. Kajian Pustaka

Sebelumnya pernah dilakukan penelitian *sling pump* skala laboratorium tipe kerucut dengan variasi kecepatan putaran yaitu 30, 40, dan 50 rpm. Dari hasil penelitian tersebut diperoleh *sling pump* tipe kerucut dengan variasi kecepatan putaran hasil optimal terjadi pada putaran 50 rpm yaitu dengan debit 2,5 liter/menit (Rahkman, 2009). Kondisi pencelupan *sling pump* didalam air yaitu 16 cm (40%) dari diameter besar *sling pump*. Penelitian ini diduga mengakibatkan udara banyak masuk ke selang, sehingga menghambat aliran air

Efendi (2015) melakukan penelitian unjuk kerja *sling pump* menggunakan jumlah variasi yaitu 1 inlet, 2 inlet, 3 inlet dan 4 inlet dengan kondisi variasi pencelupan 50% sampai 80%. Putaran *sling pump* dibuat konstan 40 rpm. Dari hasil penelitian diketahui bahwa debit terbesar diperoleh pada variasi 2 inlet dan kondisi variasi pencelupan 80% menghasilkan debit 10,39 liter/menit.

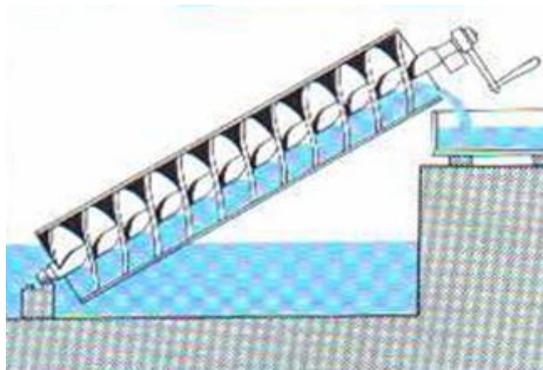
Syamsuddin (2015) melakukan penelitian unjuk kerja *sling pump* menggunakan variasi jumlah lilitan selang yaitu 5 lilitan, 6 lilitan, dan 7 lilitan. Diameter selang yang digunakan yaitu $\frac{3}{4}$ inch dan putaran *sling pump* dibuat konstan 40 rpm. Dari hasil penelitian diketahui bahwa debit terbesar diperoleh pada 6 lilitan dengan debit 7,29 liter/menit.

Kurniawan (2015) mengembangkan penelitian *sling pump* dengan variasi kecepatan putar konstan 30, 40, dan 50 rpm dan kondisi pencelupan 50-90% serta menggunakan *manifold* melingkar. Hasil penelitiannya adalah kecepatan putar *sling pump* 30 dan 40 rpm pada kondisi pencelupan 50% - 80% debit yang dihasilkan semakin bertambah. Pada kecepatan putar 50 rpm debit yang keluar semakin turun. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi putaran semakin tinggi juga gaya *sentrifugalnya* sehingga terjadi muntahan air pada corong inlet. Debit optimal yang dihasilkan *sling pump* dengan variasi kecepatan putar dan kondisi pencelupan yaitu pada kecepatan putar 50 rpm kondisi pencelupan 50% - 70%.

Menurut beberapa penelitian di atas, penelitian yang berhubungan dengan variasi kecepatan putar dan kondisi pencelupan *sling pump* dengan *manifold* segaris belum dilakukan. Oleh sebab itu peneliti ingin mengetahui hasil unjuk kerjanya (debit) dan membandingkan dengan penelitian sebelumnya yang memakai *manifold* melingkar.

2.2. Dasar Teori

Archimedes memperkenalkan konsep *sling pump* pada kisaran tahun 287-212 SM. Alat ini digunakan untuk memindahkan air dari danau keseluruh irigasi pertanian Syracuse di Sicily seperti yang terlihat pada gambar 2.1. (Wikipedia).



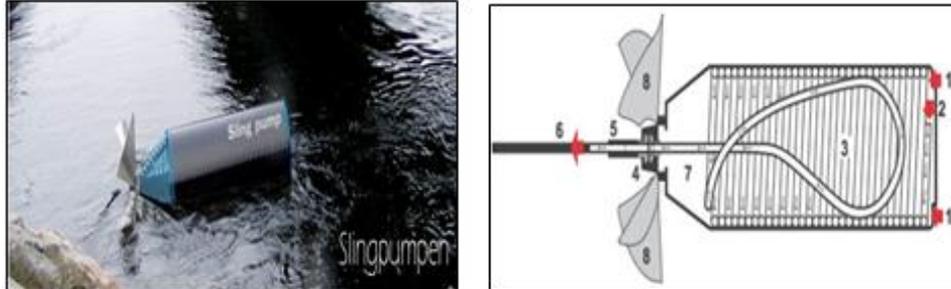
Gambar 2.1. *Archimedean Screw pumps*
(www.renewablefirst.co.uk)

Ujung engkol diputar sehingga air akan naik dari ketinggian elevasi rendah ke elevasi yang lebih tinggi. Alat ini kemudian dikenal dengan sebutan “*Archimedean Screw pumps*” pada gambar 2.1.

2.2.1. *Sling Pump*

Munurut prinsip kerja *Arhimedean screw pump*, 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 yang terlihat pada gambar 2.2 ini memerlukan energi aliran untuk memutar *propellernya*. Oleh

karena itu, hasil modifikasi pompa ini hanya dapat diaplikasikan pada air yang mengalir sepanjang waktu seperti sungai.



Gambar 2.2. Kerangka *sling pump* jenis kerucut
(www.jtminvest.se/slingpump.htm)

Sling pump memiliki beberapa kelebihan yaitu konstruksi *sling pump* sederhana, mudah perawatan, jumlah komponen sedikit, biaya murah, pengoperasiannya aman dan mampu beroperasi terus menerus selagi ada aliran sungai. Sedangkan kekurangan *sling pump* yaitu debit yang dihasilkan relatif kecil, debit yang dihasilkan tergantung oleh kecepatan arus sungai, dan relatif digunakan untuk *head* yang rendah.

2.2.2. Mekanika Fluida

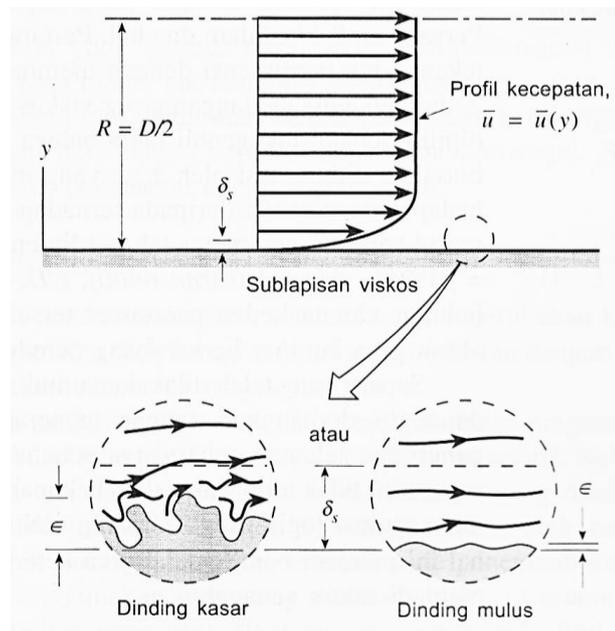
Mekanika fluida adalah telaah fluida yang bergerak atau diam dan akibat yang ditimbulkan oleh fluida tersebut pada batasnya. Sedangkan fluida adalah suatu zat yang mengalami perubahan bentuk secara *continue* apabila terkena tegangan geser (*shear stress*) betapapun kecilnya. Menurut Giles (1977) fluida adalah zat-zat yang mampu mengalir dan yang menyesuaikan diri dengan bentuk wadah tempatnya. Fluida dapat digolongkan ke dalam cairan dan gas. Perbedaan-perbedaan utama antara cairan dan gas adalah (a) cairan praktis tak kompresibel, sedangkan gas *kompresibel* dan seringkali harus diperlakukan demikian dan (b) cairan mengisi volume tertentu dan mempunyai permukaan-permukaan bebas sedangkan gas dengan massa tertentu mengembang sampai mengisi seluruh bagian wadah tempatnya.

2.2.3. Kekentalan (*viscosity*) Fluida

Kekentalan adalah sifat dari fluida untuk melawan tegangan geser pada waktu bergerak/mengalir. Kekentalan disebabkan oleh kohesi antara partikel fluida (Robert dkk, 2003). Tahanan suatu fluida terhadap tegangan geser tergantung pada kohesinya dan pada laju perpindahan momentum molekulnya. 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)

2.2.3.1. Viskositas Dinamik

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



Gambar 2.3. Aliran di dalam sublapisan viskos di dekat dinding kasar dan mulus. (Munson dkk., 2003)

Dari gambar 2.3, gradien kecepatan pada setiap harga yang melalui sumbu y didefinisikan sebagai berikut (Olson, 1990)

$$\frac{du}{dy} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta u}{\Delta y} \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

Tegangan geser fluida yang timbul diformulasikan sebagai (Olson, 1993)

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan,

- τ : Tegangan geser fluida (Pa)
- μ : Viskositas fluida (kg/m.s)
- du/dy : Gradien kecepatan (s^{-1})

Persamaan di atas disebut persamaan Newton untuk viskositas. Faktor μ pada persamaan di atas disebut dengan viskositas absolut (*absolute viscosity*) atau viskositas dinamik (*dynamic viscosity*). Persamaan (2.1) juga dapat ditulis sebagai (Streeter, 1985)

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\mu = \frac{F/A}{du/dy} \dots\dots\dots (2.4)$$

Faktor μ (*viskositas dinamik*) untuk air dapat dilihat pada lampiran I. Dalam satuan SI, tegangan geser diekspresikan dalam N/m^2 (Pa) dan gradien kecepatan dalam (m/s). Oleh karena itu satuan SI untuk *viskositas dinamik* adalah (Olson, 1990)

$$\mu = \frac{N/m^2}{(m/s)} = \frac{N.s}{m^2} = \frac{Kg}{m.s} \dots\dots\dots (2.5)$$

2.2.3.2. Viskositas Kinematik

Viskositas kinematik (ν) adalah perbandingan (ratio) antara *viskositas dinamik* (μ) dengan massa jenisnya (ρ). Seperti yang terlihat pada persamaan berikut (Streeter, 1985)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots (2.6)$$

Viskositas kinematik muncul dalam banyak penerapan, misalnya dalam bilangan *Reynolds* yang tanpa dimensi untuk gerakan suatu benda melalui fluida,

Vl/ν , dimana V adalah kecepatan benda dan l ialah suatu ukuran linear yang mewakili ukuran benda tersebut. Dimensi ν 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)

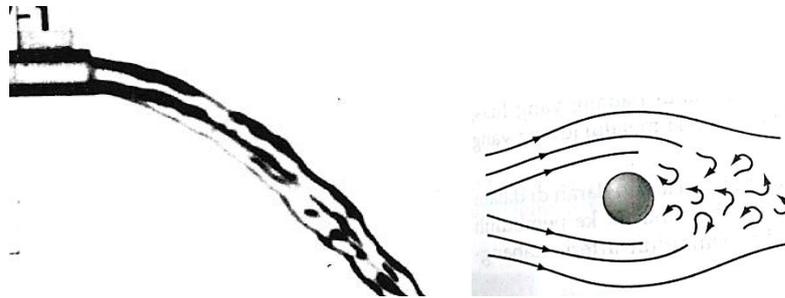
2.2.4. Aliran *Laminar* dan *Turbulent*

Aliran *laminar* adalah suatu aliran fluida yang sifat alirannya cenderung stabil. Pada gambar 2.4, aliran *laminar* dimana partikel-partikel fluidanya bergerak disepanjang lintasan-lintasan lurus, sejajar dalam lapisan-lapisan atau laminae. Besarnya kecepatan-kecepatan dari laminae 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. Kekentalan fluida tersebut dominan dan karenanya mencegah setiap kecenderungan menuju kondisi-kondisi turbulen (Giles, 1977).



Gambar 2.4. Aliran *Laminar* keluar melalui pipa (Olson, 1990)

Gambar 2.5 adalah aliran *turbulen* yang merupakan aliran fluida yang partikel-partikelnya bergerak secara acak dan tidak stabil dengan kecepatan berfluktuasi yang saling interaksi. Akibat dari hal tersebut garis alir antar partikel fluidanya saling berpotongan. Tegangan geser (τ) 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 $V^{(1,7 \text{ s/d } 2)}$.



Gambar 2.5. Aliran *turbulent* keluar melalui pipa (Olson, 1990)

Sifat pokok aliran, yaitu apakah laminar atau turbulen, serta posisi relatifnya pada skala yang menunjukkan pentingnya secara relatif kecenderungan turbulen terhadap kecenderungan laminar ditunjukkan oleh bilangan *Reynolds* (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)

$$Re_L = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \dots\dots\dots (2.7)$$

- dengan, - V : Kecepatan aliran (m/s)
 - ρ : Massa jenis (kg/m³)
 - μ : 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 seperti gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.6. Batasan bilangan *Reynolds* (Re_d)

2.2.5. Tegangan Permukaan

Molekul-molekul zat cair saling tarik- menarik diantara sesamanya dengan gaya berbanding lurus dengan massa. Dan berbanding terbalik dengan kuadrat

jarak antara pusat-pusat massa. Gaya tarik-menarik tersebut adalah setimbang. Tetapi pada permukaan zat cair dan udara, atau antara zat satu dengan zat lainnya, gaya tarik keatas dan kebawah tidak setimbang. Ketidakseimbangan tersebut menyebabkan terjadinya lapisan tipis pada permukaan zat cair yang mempunyai kemampuan untuk menahan tegangan tarik. Sifat zat cair tersebut dikenal dengan tegangan permukaan. Tegangan permukaan σ (sigma) bekerja pada bidang permukaan yang sama besar disemua titik. Gaya tarik yang bekerja pada permukaan akan berusaha meminimumkan luas permukaan. Oleh karena itu tetesan zat cair akan berusaha untuk berbentuk bulat agar luas permukaannya minimum (Triatmodjo, 1991).

2.2.6. Kapilaritas

Kapilaritas disebabkan oleh gaya kohesi dan adesi. Kohesi adalah gaya tarik menarik antar molekul yang sama jenisnya. Gaya ini menyebabkan antara zat yang satu dengan yang lain tidak dapat menempel karena molekulnya saling tolak menolak. Sedangkan adhesi adalah gaya tarik menarik antar molekul yang berbeda jenisnya. Gaya ini menyebabkan antara zat yang satu dengan yang lain dapat menempel dengan baik karena molekulnya saling tarik menarik atau melekat. Di dalam suatu tabung yang dimasukkan ke dalam zat cair, jika kohesi lebih kecil dari adesi maka zat cair akan naik, jika kohesi lebih besar dari adesi maka zat cair akan turun (Triatmodjo, 1991).

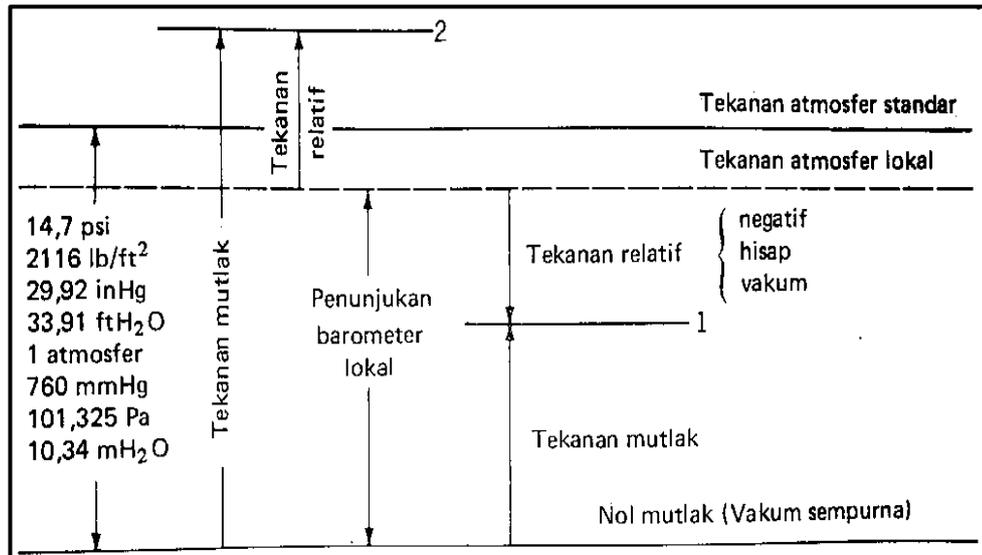
2.2.7. Tekanan Atmosfer, Relatif dan Mutlak

Telah diketahui bahwa udara di atmosfer ini mempunyai berat. Karenanya udara tersebut dapat menimbulkan tekanan pada permukaan bumi, rapat massa tidak konstan sehingga membuat ketergantungan pada ketinggian, suhu dan kelembaban.

Tekanan relatif atau tekanan terukur adalah tekanan yang diukur berdasarkan tekanan atmosfer. Tekanan ini bisa lebih besar atau lebih kecil dari tekanan atmosfer lokal. Fluida yang berhubungan dengan udara luar (atmosfer)

bertekanan nol, sehingga dapat diartikan tekanan relatif positif apabila lebih besar dari tekanan atmosfer dan negatif jika lebih kecil dari tekanan atmosfer.

Tekanan mutlak merupakan jumlah tekanan atmosfer dengan tekanan relatif. Apabila tekanan relatif negatif, maka tekanan mutlak adalah tekanan atmosfer dikurangi tekanan relatif (Triatmodjo, 1991).



Gambar 2.7. Satuan dan Skala tekanan (Streeter, 1985)

Standard atmospheric pressure pada gambar 2.7 adalah tekanan rata-rata pada permukaan air laut. Pada titik 1, memiliki tekanan *absolute* sebesar (Streeter, 1985)

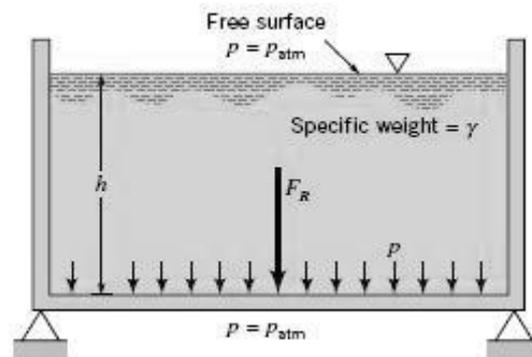
$$P_{abs} = P_{atm} - P_{vakum} \dots\dots\dots (2.8)$$

Sedangkan pada titik 2:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{gauge} \dots\dots\dots (2.9)$$

2.2.7.1. Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik adalah suatu tekanan yang terjadi di bawah air. Tekanan tersebut terjadi karena adanya berat air itu sendiri yang membuat air tersebut mengeluarkan tekanan tertentu dan bergantung pada kedalaman air (*h*) di dalam sebuah ruang dan gravitasi (*g*) seperti pada gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2.8. Tekanan dan gaya hidrostatis resultan yang timbul pada permukaan dasar sebuah tangki terbuka (Munson dkk., 2003)

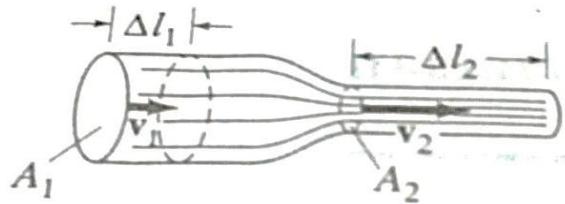
Hubungan berat air terhadap ruangan dan gravitasi ini dirumuskan sebagai berikut:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \dots \dots \dots (2.10)$$

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

2.2.8. Persamaan Kontinuitas

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 *stedy* 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 2.9.



Gambar 2.9. Fluida mengalir melalui pipa diameter bervariasi (Olson, 1990)

Laju aliran massa didefinisikan sebagai massa fluida Δm yang melalui titik tertentu per satuan waktu Δt : laju aliran massa = $\Delta m/\Delta t$. Dalam gambar 2.9, volume fluida yang melalui titik 1 (melewati luasan A_1) dalam waktu Δt adalah $A_1\Delta l_1$, dengan Δl_1 adalah jarak gerakan fluida dalam waktu Δt . Jika kecepatan fluida yang melewati titik 1 adalah $v_1 = \Delta l_1/\Delta t$, laju aliran massa $\Delta m/\Delta t$ melalui luasan A_1 adalah (Giancoli, 1996)

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\rho_1 \cdot \Delta V_1}{\Delta t} = \frac{\rho_1 a_1 \Delta l_1}{\Delta t} = \rho_1 A_1 v_1 \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan,

$\Delta V_1 = A_1 \Delta l_1$: volume massa

Δm dan ρ_1 : kerapatan fluida

Hal yang sama terjadi pada titik 2 (melalui luasan A_2), laju alir massa adalah $\rho_2 A_2 v_2$. karena tidak ada aliran fluida di dalam atau di luar isi, laju alir melalui A_1 dan A_2 haruslah sama. Dengan demikian persamaan kontinuitas: (Giancoli, 1996)

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \dots\dots\dots (2.12)$$

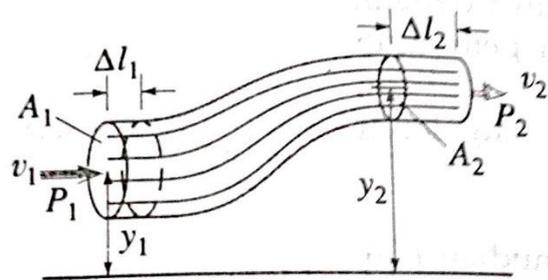
Jika fluida tak dapat mampat, yang adalah sebuah pendekatan yang sangat bagus untuk berbagai keadaan cairan, kemudian $\rho_1 = \rho_2$ maka persamaan kontinuitas menjadi: (Giancoli, 1996)

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad [\rho = \text{tetap}] \dots\dots\dots (2.13)$$

2.2.9. Persamaan Bernoulli

Prinsip *Bernoulli* menyatakan bahwa bilamana kecepatan fluida tinggi, tekanannya rendah, dan bilamana kecepatannya rendah, tekanannya tinggi.

Bernoulli mengembangkan persamaan yang menekankan prinsip ini secara kuantitatif. Untuk menurunkan persamaan Bernoulli seperti gambar 2.10, dapat diasumsikan bahwa aliran setimbang dan laminar, fluida tak dapat mampat, dan kekentalan cukup kecil untuk dapat diabaikan (Olson, 1990).



Gambar 2.10. Prinsip *Bernoulli* (Olson, 1990)

Dengan meninjau gambar 2.10 di atas, pada bagian luas penampang A_1 , usaha yang dilakukan oleh P_1 sejauh Δx_1 adalah (Olson, 1990)

$$\Delta W_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1 \Delta V_1 \dots\dots\dots (2.14)$$

Selanjutnya, pada bagian luas penampang A_2 , usaha yang dilakukan P_2 sejauh Δx_2 , adalah (Olson, 1990)

$$\Delta W_2 = P_2 A_2 \Delta x_2 = P_2 \Delta V_2 \dots\dots\dots (2.15)$$

- dengan, - P : Tekanan (Pa)
 - A : Luas penampang (m^2)
 - Δx : Panjang kolom fluida (m)
 - ΔV : Volum fluida (m^3)

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \dots\dots\dots (2.16)$$

atau,

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

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

Persamaan (2.16) di atas, disebut dengan persamaan *Bernoulli* yang digunakan untuk perhitungan aliran fluida ideal atau tanpa gesekan dan tak

mampu mampat (*incompressible*). Jika persamaan (2.15) dikalikan dengan volum jenis (*Specific Volume*) dari suatu fluida atau zat, maka persamaan *Bernoulli* akan menjadi:

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

$$\frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \frac{1}{2}v_1^2 = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \frac{1}{2}v_2^2 \dots\dots\dots (2.17)$$

Selanjutnya, persamaan (2.17) kembali dikalikan dengan percepatan gravitasi ($1/g$), maka bentuk persamaan *Bernoulli* menjadi:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \dots\dots\dots (2.18)$$

atau,

$$H_1 = H_2 \dots\dots\dots (2.19)$$

dengan, γ : Berat jenis zat cair persatuan volum (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 (2.19) 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 (1 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).

2.2.10. *Head Loss*

Head loss merupakan suatu fenomena rugi-rugi aliran di dalam sistem pemipaan. Rugi-rugi aliran selalu terjadi pada sistem pemipaan dengan menggunakan berbagai macam fluida, seperti fluida cair dan gas. Pada umumnya, rugi aliran yang terbesar terjadi pada fluida cair, hal ini dikarenakan sifat

molekulnya yang padat dibandingkan gas dan memiliki gesekan lebih besar terhadap media yang dilalui itu lebih besar, maka gesekan yang terjadi pun akan semakin besar. *Head loss* sangat merugikan dalam aliran fluida di dalam sistem pemipaan, karena head loss dapat menurunkan tingkat efisiensi aliran fluida.

Salah penyebab *head loss* adalah konstruksi desain dari sistem pemipaan tersebut. Jika konstruksi memiliki percabangan yang lebih banyak maka akan memperbesar rugi alirannya, selain itu aliran yang semula dalam keadaan laminar pada saat melalui pipa lurus yang koefisien gesekannya besar kan berubah menjadi aliran turbulen. Selain itu akibat yang paling mendasar dengan adanya rugi-rugi aliran (*head loss*) ialah dapat menyebabkan besarnya energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan aliran fluida yang berdampak meningkatnya penggunaan listrik pada mesin penggerak fluida seperti pompa.

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)

$$H_1 = H_2 + h_L$$

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

Persamaan (2.20) 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*.

2.2.10.1. 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 (Clifford, 1984)

$$h_{\text{LMY}} = f \cdot \frac{L_e}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \dots\dots\dots (2.21)$$

- 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 (Robert 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)

$$f = \frac{0,3164}{Re_d^{0,25}} \dots\dots\dots (2.22)$$

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

$$f = \frac{64}{Re} \dots\dots\dots (2.23)$$

2.2.10.2. Head Loss Minor

Head loss minor merupakan kerugian-kerugian aliran kecil pada sistem pipa yang dapat dihitung secara umum melalui persamaan (Clifford, 1984)

$$h_L = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \dots\dots\dots (2.24)$$

- Dengan: - h_L : *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)

$$h_L = f \cdot \frac{L_e}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (2.25)$$

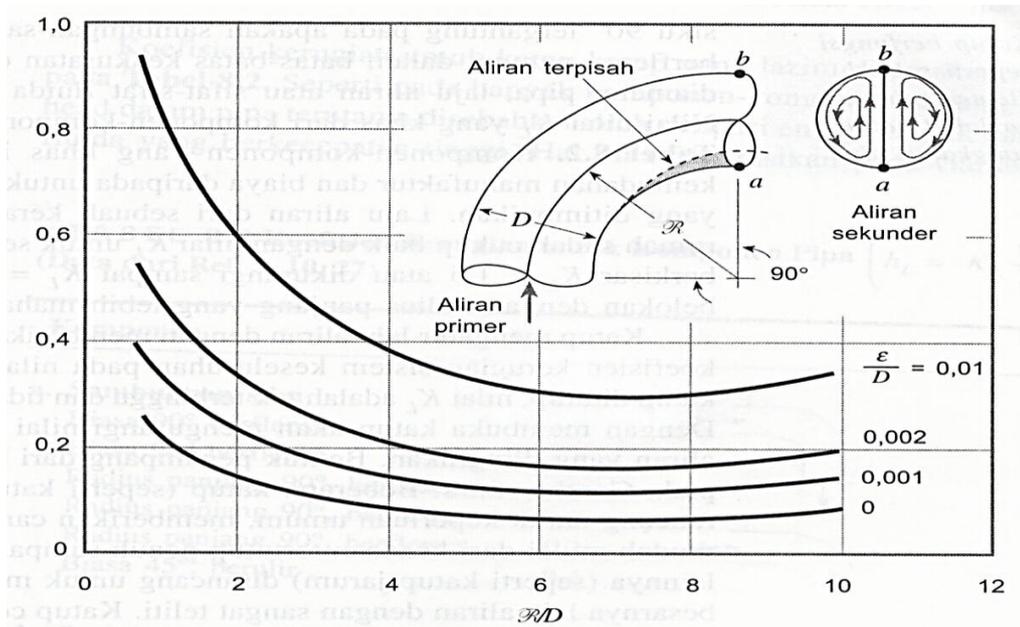
karena,

$$f \cdot \frac{L_e}{D} = K \dots\dots\dots (2.26)$$

- 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*

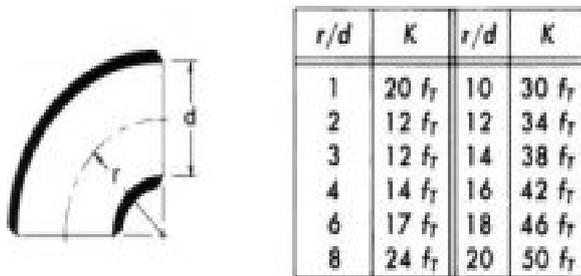
Aliran fluida yang melewati belokan atau *elbow* menimbulkan *head loss* yang lebih besar dari pada aliran yang mengalami pengecilan maupun mengalami pembesaran secara mendadak. Pada aliran fluida yang melewati belokan, harga koefisien tahanan dipengaruhi oleh *radius* kelengkungan atau kurva belokan pipa.

Semakin kecil *radius* kelengkungan belokan maka semakin besar koefisien tahanan belokan. Koefisien tahanan tersebut dapat diketahui melalui gambar 2.11 seperti di bawah ini yaitu:



Gambar 2.11. Koefisien tahanan (K) pada belokan pipa (*bends* 90°) (Munson dkk., 2003)

Untuk sambungan yang kelengkungannya halus, koefisien tahanan seperti pada gambar 2.12 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 muda dan harganya jauh lebih murah.



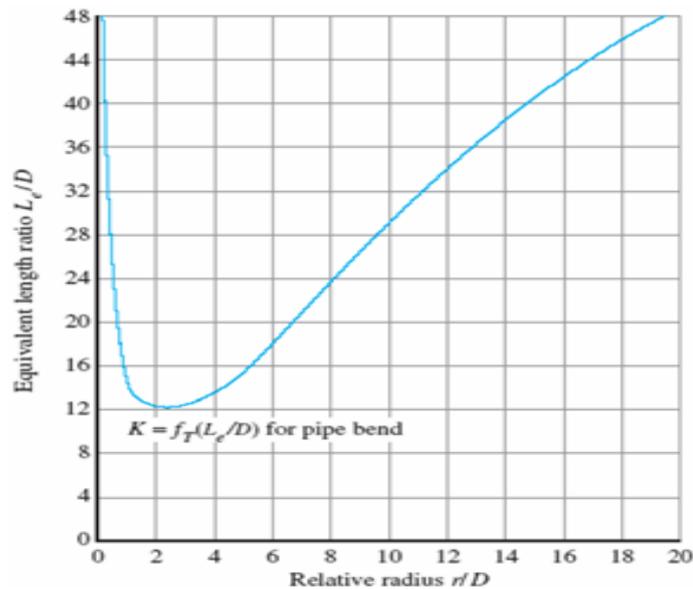
Gambar 2.12. Koefisien tahanan pada *bends* 90° (Clifford, 1984)

Tabel 2.1. Koefisien kerugian belokan pipa

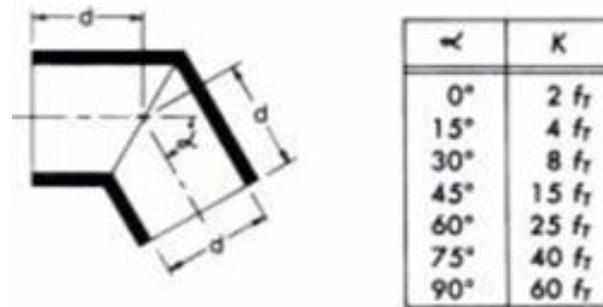
Sudut (θ°)	5	10	15	22,5	30	45	60	90
f Halus	0,016	0,034	0,042	0,066	0,130	0,236	0,471	1,129
Kasar	0,024	0,44	0,062	0,154	0,165	0,320	0,684	1,265

Sularso dkk. (1987)

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 gambar 2.13 di bawah ini:

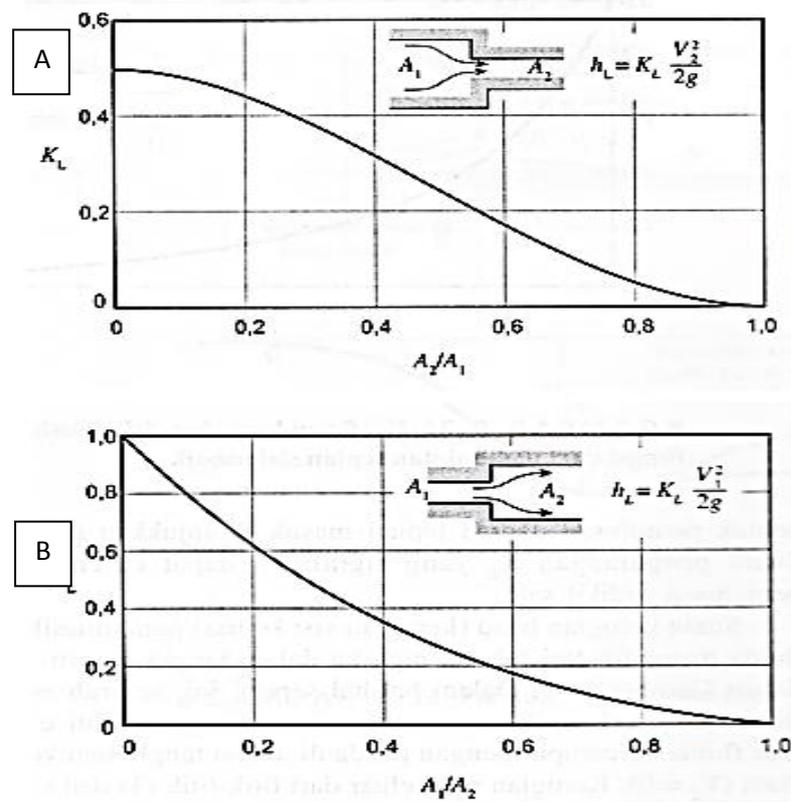
Gambar 2.13. Perbandingan antara panjang *ekuivalen* terhadap diameter dalam pipa (L_e/D) pada belokan pipa 90° (White, 1998)

Aliran yang melewati belokan patah (*mitre bends*) koefisien tahanan *minor* (K) merupakan fungsi dari sudut belokan seperti pada gambar 2.14 di bawah ini.



Gambar 2.14. Koefisien tahanan (K) pada belokan patah (*mitre bends*) (Clifford, 1984)

Pada gambar 2.15, 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.



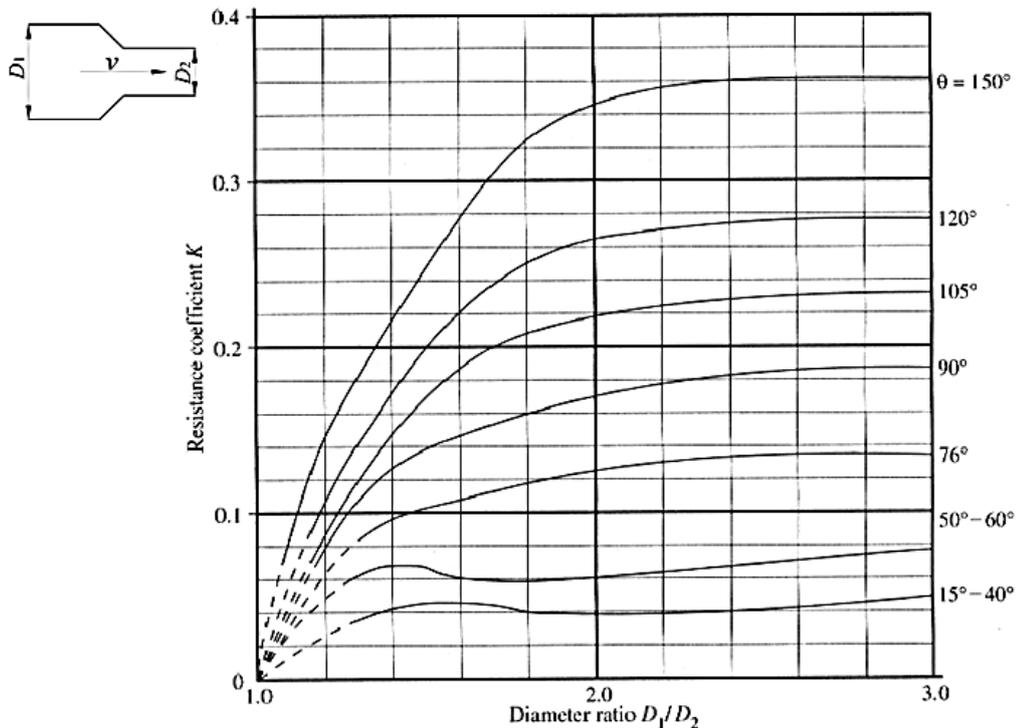
Gambar 2.15. Grafik koefisien tahanan pada pengecilan (A) dan pembesaran penampang secara mendadak.(B) (Munson dkk., 2003)

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

$$h_{LM} = K \cdot \frac{(v_1 - v_2)^2}{2 \cdot g} \dots\dots\dots (2.27)$$

- 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 (2.27) di atas. Untuk perubahan penampang secara *gradual contraction*, koefisien tahanan (K) dapat dicari melalui gambar 2.16 dibawah ini.



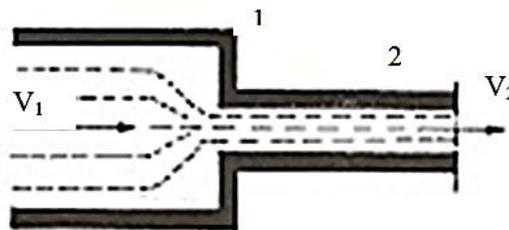
Gambar 2.16. Grafik koefisien tahanan pada *gradual contraction* (King and Brater, 1963)

Koefisien tahanan (K) untuk *sudden expansion* juga dapat diketahui melalui analisis seperti pada persamaan (2.29) di bawah ini (Munson dkk., 2003)

$$K = \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \dots\dots\dots (2.28)$$

- 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* seperti gambar 2.17 di bawah ini.



Gambar 2.17. Penyempitan mendadak (Santoso, 2012)

Dengan persamaan kontinuitas: (Munson dkk., 2003)

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

Dimana C_c sebagai koefisien penyempitan atau kontraksi yaitu luas jet di penampang 0 dibagi luas penampang di titik 2. (Munson dkk., 2003)

$$h_c = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right) \cdot \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \dots\dots\dots (2.29)$$

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

$$h_c = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \dots\dots\dots (2.30)$$

2.2.11. 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 (Clifford, 1984)

$$H_{Pump} = \frac{\Delta P}{\gamma} + h_L + \Delta z + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2 \cdot g} \dots\dots\dots (2.31)$$

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