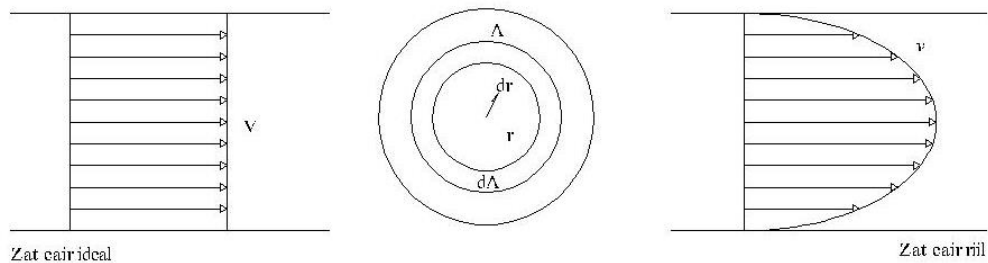


## BAB III LANDASAN TEORI

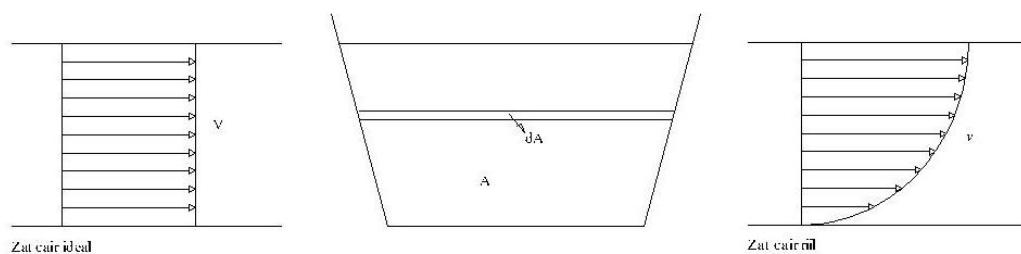
### 3.1 Debit

Secara mendasar, debit adalah besaran satuan air yang keluar dari daerah-daerah aliran sungai (Triatmodjo, 1996). Sementara untuk debit aliran adalah jumlah zat cair yang mengalir melalui tampang lintang aliran per-satuan waktu. Debit aliran diukur dalam volume zat cair tiap satuan waktu, sehingga satuannya adalah meter kubik per detik ( $m^3/detik$ ) atau dapat dengan satuan yang lain seperti liter/detik dan liter/menit.

Di dalam zat cair ideal, ketika tidak terjadi gesekan, kecepatan aliran ( $V$ ) adalah sama di setiap titik pada tampang lintang. Pada gambar 3.1 dan 3.2 ditunjukkan gambar distribusi kecepatan aliran untuk zat cair ideal dan zat cair riil melalui pipa dan saluran terbuka.



**Gambar 3.1 Kecepatan aliran melalui pipa**  
(Sumber : Triatmodjo, 1996)



**Gambar 3.2 Kecepatan aliran melalui saluran terbuka**  
(Sumber : Triatmodjo, 1996)

Apabila tampang aliran tegak lurus pada arah aliran  $A$ , maka debit aliran diberikan dalam bentuk persamaan (3.1) sebagai berikut.

$$Q = A \cdot V \text{ (m}^3\text{/det)} \quad (3.1)$$

Pada zat cair yang riil, kecepatan pada dinding batas adalah nol dan bertambah dengan jarak dari dinding batas. Pada aliran melalui pipa, kecepatan maksimum terjadi di sumbu pipa. Apabila  $v$  merupakan kecepatan di pias setebal  $dr$  dan berjarak  $r$  dari sumbu, maka debit aliran melalui pias seperti persamaan (3.2) berikut ini :

$$dQ = dA \cdot v = 2\pi r \cdot dr \cdot v \quad (3.2)$$

Integrasi dari persamaan (3.2) tersebut menghasilkan debit aliran total di seluruh tampang pipa  $A$ , yaitu pada persamaan (3.3) berikut.

$$Q = 2\pi \int_0^r v \cdot r \cdot dr \quad (3.3)$$

Apabila terdapat hubungan antara  $v$  dan  $r$ , maka debit aliran dapat dihitung.

Dalam praktek yang dilakukan, variasi kecepatan pada tampang lintang sering diabaikan dan kecepatan aliran dianggap seragam di setiap titik pada tampang lintang yang besarnya sama dengan kecepatan rerata di  $V$ , sehingga debit aliran yang didapat adalah :

$$Q = A \cdot V \quad (3.4)$$

dengan :

$Q$  = debit aliran (m<sup>3</sup>/detik)

$A$  = luas Penampang (m<sup>2</sup>)

$V$  = kecepatan Aliran (m/detik)

Dalam sistem satuan SI, besar debit dinyatakan dalam satuan meter kubik per detik (m<sup>3</sup>/detik). Dalam laporan-laporan teknis, debit aliran biasanya ditunjukkan dalam bentuk hidrograf aliran. Hidrograf aliran merupakan perilaku debit sebagai bentuk respon adanya perubahan karakteristik biogeofisik yang

berlangsung dalam suatu DAS karena adanya kegiatan pengelolaan DAS dan atau adanya perubahan fluktuasi musiman atau tahunan iklim lokal (Asdak, 2010)

Salah satu fungsi dari debit adalah menjadi sebuah alat yang berfungsi untuk melakukan monitoring atau evaluasi neraca air di suatu daerah, dengan metode pendekatan potensi pada sumber daya air permukaan.

Dalam penerapannya, ada beberapa faktor yang mempengaruhi besar-kecilnya debit aliran, yaitu meliputi intensitas hujan, penggundulan hutan, evaporasi dan transpirasi, dan juga intersepsi.

### **3.2 Pengukuran Debit**

Untuk mengetahui besaran debit yang terjadi dibutuhkan pengukuran debit. Manfaat pengukuran debit adalah untuk mengetahui seberapa besar air yang mengalir di suatu tempat dan seberapa cepat air itu mengalir per satuan detik. Hasil dari pengukuran debit yang didapat akan berguna sebagai alat monitoring serta evaluasi neraca air di suatu kawasan melalui pendekatan potensi sumber daya air permukaan yang tersedia.

Ada beberapa metode pengukuran debit aliran, diantaranya adalah sebagai berikut.

1. *Area-Velocity Method*
2. *Tracer Method*
3. *Slope Area Metode*
4. *Weir and Flume*
5. *Volumetric Method Area*
6. *Float Area Method*
7. *Metode Kontinyu.*

Dari metode-metode di atas, penerapan pengukuran debit aliran tergantung pada tujuan dari pengukuran yang akan dilakukan. Apabila dalam penerapannya peneliti ingin mengukur debit aliran untuk percobaan, metode yang harus digunakan adalah *weir and flume*, begitupula sebaliknya.

### 3.3 Peluap

Definisi Peluap adalah sebuah bukaan yang terdapat pada salah satu sisi kolam atau tangki sehingga zat cair di dalam kolam tersebut melimpah di atas peluap (Triatmodjo, 1996). Adapun peluap ini serupa dengan lubang besar dimana elevasi permukaan zat cair di sebelah hulu terlihat lebih rendah dari sisi atas lubang.

Lapis zat cair yang melimpah di atas ambang peluap disebut dengan tinggi peluapan. Fungsi peluap ini adalah untuk mengukur debit aliran yang mengalir pada suatu kolam. Dalam penerapannya, yaitu pada bangunan irigasi, peluap ditempatkan pada saluran irigasi yang memiliki fungsi untuk mengukur debit aliran melalui saluran.

Berdasarkan bentuk puncaknya, peluap dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu ambang tipis dan ambang lebar. Peluap dapat dikatakan sebagai ambang tipis apabila tebal dari peluap adalah  $t < 0,5 H$ . Peluap dapat dikatakan sebagai ambang lebar apabila tebal peluap adalah  $t > 0,66 H$ . Dalam realita yang terjadi di lapangan, biasanya terjadi kondisi dimana  $0,5 H < t < 0,66 H$ . Jika demikian, maka dapat dikatakan keadaan aliran tersebut adalah tidak stabil, sehingga dapat terjadi aliran melalui peluap ambang tipis ataupun peluap ambang lebar.

Menurut elevasi muka air di hilir, peluap dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu peluap terjunan (sempurna) dan peluap terendam (tidak sempurna). Peluap dikatakan sebagai peluap terjunan apabila muka air hilir berada di bawah puncak peluap, sedangkan dikatakan peluap terendam apabila muka air hilir di atas puncak peluap.

Sementara untuk bentuk, peluap dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu peluap segiempat, trapesium, dan segitiga.

### 3.4 Ambang

Secara teoritis, ambang merupakan salah satu jenis bangunan air yang dapat digunakan untuk menaikkan tinggi muka air dan untuk menentukan debit aliran (Triatmodjo, 1996). Pada umumnya, aliran air yang melewati suatu tempat harus

diketahui sifat dan karakteristiknya jika dalam penerapannya hendak merancang bangunan air. Berdasarkan hal tersebut, pengetahuan mengenai ambang sangat diperlukan dalam merencanakan bangunan air untuk distribusi ataupun pengaturan sungai.

Bangunan ambang banyak digunakan dalam saluran terbuka dan berfungsi untuk mengendalikan tinggi muka air di bagian hulu serta dapat digunakan untuk mengukur debit aliran. Berdasarkan dua hal yang dijabarkan tersebut maka ambang dapat digunakan sebagai penghambat/rintangan yang membantu terciptanya kondisi energi minimum dalam suatu aliran.

Ketika terjadi banjir, ambang yang berada pada suatu saluran dapat berhenti berfungsi sebagai bangunan pengendali, dimana muka air di sebelah hilir meninggi dan menenggelamkan ambang tersebut. Perubahan geometri aliran air yang tinggi akhirnya menyebabkan tidak tercapainya kondisi energi minimum, yang dinyatakan melalui perbandingan antara kedalaman di hilir dan di hulu.

Ada dua macam jenis ambang yang sering digunakan dalam pengukuran karakteristik aliran, yaitu :

#### 1. Ambang Lebar

Alat ukur ambang lebar merupakan salah satu bangunan aliran atas atau biasa disebut *over flow*. Pada model ambang lebar ini, tinggi energi yang terdapat pada hulu aliran lebih kecil daripada panjang mercu itu sendiri. Syarat peluap dapat dikatakan sebagai ambang lebar apabila :

$$t > 0,66 H \quad (3.5)$$

#### 2. Ambang Tajam.

Alat ukur ambang tajam merupakan salah satu bangunan pengukur debit yang sering sekali ditemukan di saluran-saluran irigasi ataupun laboratorium hidraulika. Syarat peluap dapat dikatakan sebagai ambang tajam apabila :

$$t < 0,5 H \quad (3.6)$$

Namun, jika dalam penerapannya ditemukan persamaan dari tebal peluap sebesar :

$$0,5 H < t < 0,66 H \quad (3.7)$$

dengan :

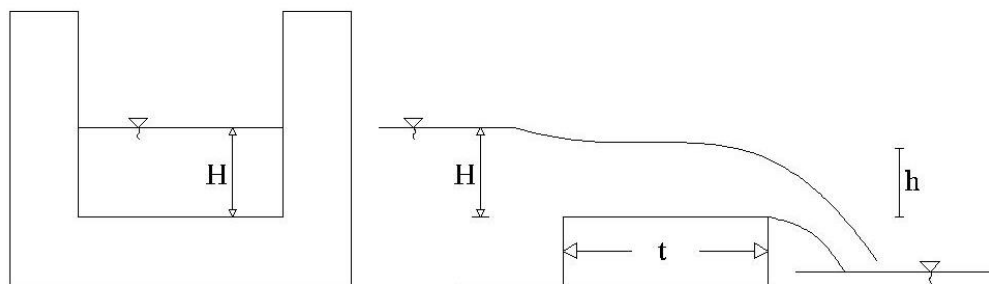
t = Tebal Ambang

H = Tinggi Muka Air terhadap Ambang

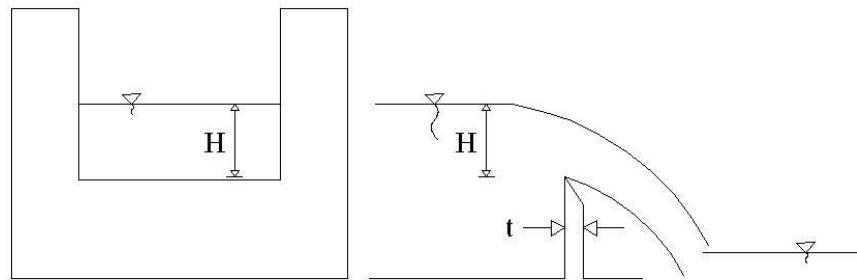
Maka aliran tersebut dapat dikategorikan sebagai aliran yang tidak stabil, sehingga dapat terjadi kondisi aliran melalui peluap ambang tipis ataupun ambang lebar (Triatmodjo, 1996).

Secara garis besar, fungsi dari kedua ambang tersebut kurang lebih sama mengingat ambang dapat digunakan sebagai model untuk aplikasi dalam perancangan bangunan pelimpah di suatu waduk dan bendungan. Selain itu, bentuk ambang dari kedua model ini termasuk bentuk yang sederhana untuk meninggikan muka air.

Perbedaan bentuk fisik dari ambang lebar dan ambang tajam dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan 3.4 dibawah ini :



**Gambar 3.3 Aliran Melalui Ambang Lebar**  
(Sumber : Triatmodjo, 1996)



**Gambar 3.4 Aliran Melalui Ambang Tajam**  
(Sumber : Triatmodjo, 1996)

### 3.5 Persamaan *Bernoulli*

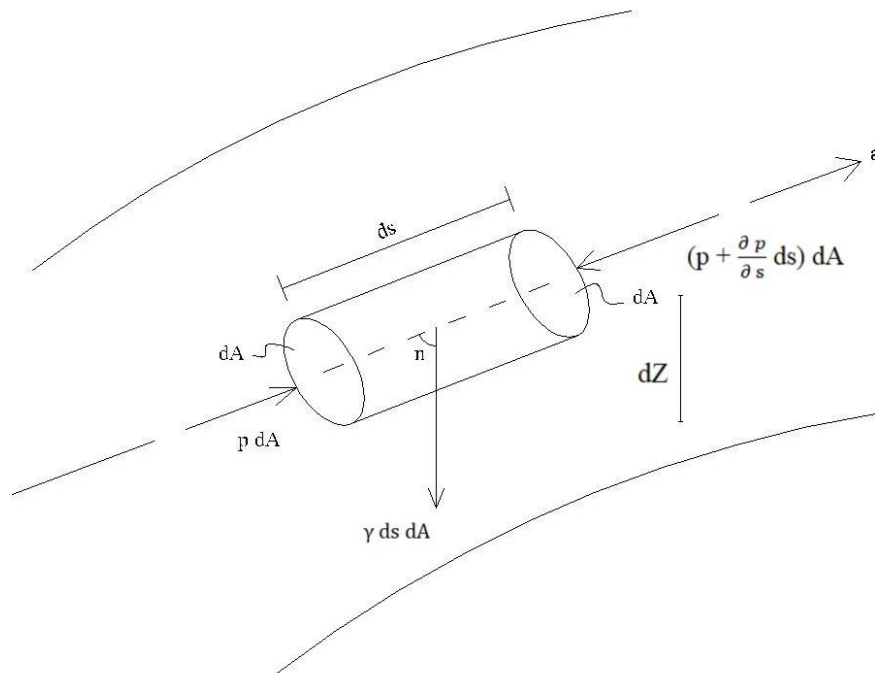
Pada zat cair yang mengalir, terdapat gaya-gaya yang bekerja dengan hitungan yang terbilang sulit mengingat ada faktor yang mempengaruhinya. Tidak hanya kecepatan maupun arah partikel zat cair yang mengalir, faktor yang mempengaruhi gaya pada zat cair yang mengalir dapat dikarenakan adanya kekentalan yang menyebabkan geseran antara partikel-partikel zat cair dan juga antara zat cair dan dinding batas.

Persamaan-persamaan energi yang berguna untuk menggambarkan gerak partikel ini dapat diturunkan dari persamaan gerak. Persamaan energi inilah yang merupakan persamaan dasar untuk menyelesaikan masalah yang terdapat dalam ilmu hidraulika. Persamaan-persamaan energi ini dapat ditunjukkan oleh persamaan Euler maupun persamaan *Bernoulli* (Triatmodjo, 1996).

Karena pada penelitian hanya akan dijabarkan tentang aliran dari satu dimensi saja, maka rumus yang digunakan berasal dari persamaan yang telah diintegalkan, yaitu persamaan *Bernoulli*.

Penurunan persamaan *Bernoulli* untuk aliran yang terjadi pada sepanjang garis arus mengacu pada dasar-dasar yang terdapat pada hukum Newton II, yaitu tentang gerak massa ( $F = M \cdot a$ ). Persamaan *Bernoulli* ini pun diturunkan atas dasar beberapa anggapan sebagai berikut.

1. Zat cair merupakan sesuatu hal yang ideal, yaitu tidak mempunyai kekentalan (Kehilangan energi akibat gesekan adalah nol)
2. Zat cair bersifat homogen dan tidak dapat memampatkan. (Rapat massa zat cair adalah konstan)
3. Aliran bersifat kontinyu atau menerus dan sepanjang garis arus.
4. Gaya yang bekerja hanyalah gaya berat dan tekanan.



**Gambar 3.5 Elemen Zat Cair Bergerak Sepanjang Garis Arus**  
(Sumber : Triatmodjo, 1996)

Gambar 3.5 di atas menunjukkan elemen berbentuk silinder dari suatu tabung arus yang bergerak sepanjang garis arus dengan kecepatan dan percepatan di suatu tempat dan suatu waktu adalah  $V$  dan  $a$ . Panjang, tampang lintang, dan rapat massa elemen tersebut adalah  $ds$ ,  $dA$ , dan  $\rho$  sehingga berat elemen adalah  $ds dA \rho g$ . Dikarenakan tidak ada gesekan, maka gaya-gaya yang bekerja hanya gaya tekanan pada ujung elemen dan gaya berat. Hasil kali dari massa elemen dan percepatan harus sama dengan gaya-gaya yang bekerja pada elemen.

$$F = M \cdot a \quad (3.8)$$



Dengan memperhitungkan gaya-gaya yang bekerja pada elemen, maka Hukum Newton II untuk gerak partikel di sepanjang garis arus pun menjadi :

$$-\rho g ds dA \cos\alpha + p dA - (p + \frac{\partial p}{\partial s} ds) dA = \rho ds dA \alpha \quad (3.9)$$

Persamaan (3.9) di atas dibagi dengan  $ds dA$  menjadi :

$$-\rho g \cos\alpha - \frac{\partial p}{\partial s} = \rho \alpha \quad (3.10)$$

Oleh karena :

$$\cos\alpha = \frac{\partial z}{\partial s} \quad (3.11)$$

Kemudian substitusi dari persamaan  $\alpha = \frac{dV}{dt}$  untuk percepatan ke dalam persamaan (3.11) di atas, maka akan didapat :

$$-\rho g \frac{\partial z}{\partial s} - \frac{\partial p}{\partial s} = \rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial s} \right) \quad (3.12)$$

atau

$$g \frac{\partial z}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + V \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (3.13)$$

Untuk aliran mantap, diferensial terhadap waktu adalah nol, sehingga persamaan (3.14) menjadi :

$$g \frac{\partial z}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + V \frac{\partial V}{\partial s} = 0 \quad (3.14)$$

Oleh karena variabel-variabel dari persamaan di atas adalah hanya tergantung pada jarak  $s$ , maka diferensial partiil dapat diganti oleh diferensial total,

$$g \frac{dz}{ds} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{ds} + V \frac{dV}{ds} = 0 \quad (3.15)$$

Apabila masing-masing suku dikalikan dengan  $ds$ , maka akan didapatkan persamaan (3.16) :

$$g dz + \frac{dp}{\rho} + V dV = 0 \quad (3.16)$$

Persamaan (3.14) dikenal dengan persamaan Euler untuk aliran mantap satu dimensi dan zat cair ideal. Apabila kedua ruas dari persamaan (3.16) dibagi dengan  $g$  dan kemudian diintegrasikan maka akan didapatkan hasil persamaan (3.17) sebagai berikut.

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = C \quad (3.17)$$

dengan :

$z$  = elevasi / tinggi tempat (m)

$\frac{p}{\gamma}$  = tinggi tekanan (m)

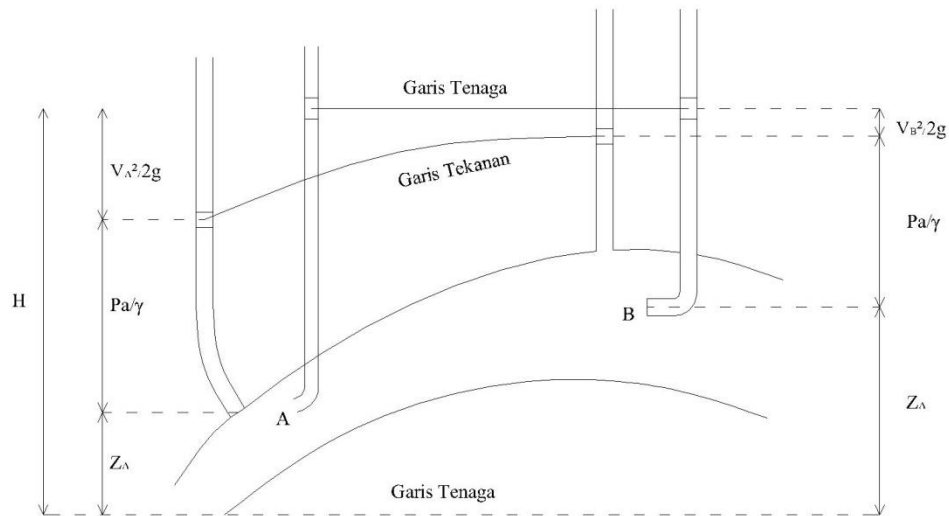
$\frac{V^2}{2g}$  = tinggi kecepatan (m)

Konstanta integrasi  $C$  adalah tinggi energi total yang merupakan jumlah dari tinggi tempat, tinggi tekanan dan tinggi kecepatan, yang berbeda dari garis arus satu ke garis arus yang lain. Persamaan tersebut hanya berlaku untuk titik-titik pada suatu garis arus.

Persamaan (3.17) dikenal dengan persamaan *Bernoulli* untuk aliran mantap satu dimensi, zat cair ideal dan tak kompresibel. Persamaan tersebut merupakan bentuk matematis dari kekekalan energi di dalam aliran zat cair.

Persamaan *Bernoulli* dapat digunakan untuk menentukan garis tekanan dan tenaga (Gambar 3.6). Garis tenaga dapat ditunjukkan oleh elevasi muka air pada tabung pivot yang besarnya sama dengan tinggi total dari konstanta *Bernoulli*. Garis tekanan dapat ditunjukkan oleh elevasi muka air di dalam tabung vertikal yang disambung pada pipa.

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \quad (3.18)$$



**Gambar 3.6** Garis Tenaga dan Tekanan Pada Zat Cair Ideal  
(Sumber : Triatmodjo, 1996)

Pada aliran zat cair ideal, garis tenaga mempunyai tinggi tetap yang menunjukkan jumlah dari tinggi elevasi, tinggi tekanan, dan tinggi kecepatan. Garis tekanan menunjukkan jumlah dari tinggi elevasi dan juga tinggi tekanan  $z + p/\gamma$  yang dapat naik atau turun pada arah aliran dan tergantung pada luas tampang aliran. Di titik A di mana tampang aliran lebih kecil dari titik B akan menyebabkan tinggi kecepatan di A lebih besar daripada di B, mengingat  $V_A$  lebih besar dari  $V_B$ . Akibatnya tinggi tekanan di titik A lebih kecil dari B.

Tinggi tekanan di titik A dan B yaitu  $h_A = p_A/\gamma$  dan  $h_B = p_B/\gamma$  adalah tinggi kolom zat cair yang beratnya tiap satuan luas memberikan tekanan sebesar  $p_A = \gamma h_A$  dan  $p_B = \gamma h_B$ . Oleh karena itu tekanan  $p$  yang ada pada persamaan *Bernoulli* biasa disebut dengan tekanan statis.

Aplikasi persamaan *Bernoulli* untuk kedua titik di dalam medan aliran akan menghasilkan persamaan (3.19) sebagai berikut.

$$z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} \quad (3.19)$$

yang menunjukkan bahwa jumlah tinggi elevasi, tinggi tekanan dan tinggi kecepatan di kedua titik adalah sama. Dengan demikian, garis tenaga pada aliran zat cair ideal adalah konstan.

Pada Zat Cair Riil, dalam aliran zat cair akan terjadi kehilangan tenaga yang harus diperhitungkan dalam aplikasi persamaan Bernoulli. Kehilangan tenaga dapat terjadi karena adanya gesekan antara zat cair dan dinding batas ( $h_f$ ) atau karena adanya perubahan tampang lintang aliran ( $h_e$ ). Kehilangan tenaga yang disebabkan oleh gesekan disebut dengan kehilangan tenaga primer, sedangkan kehilangan tenaga yang disebabkan karena perubahan tampang aliran disebut dengan kehilangan tenaga sekunder (Triatmodjo, 1996).

Kehilangan tenaga biasanya dinyatakan dalam tinggi zat cair. Dengan memperhitungkan kedua kehilangan tenaga tersebut, maka persamaan Bernoulli antara dua tampang aliran menjadi :

$$z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + \Sigma h_e + \Sigma h_f \quad (3.20)$$

Kehilangan tenaga dinyatakan dalam bentuk :

$$h = k \frac{V_A^2}{2g} \quad (3.21)$$

Kehilangan tenaga primer,

$$k = f \frac{L}{D} \quad (3.22)$$

Kehilangan tenaga sekunder,

$$k = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (3.23)$$

dengan :

$k$  = konstanta

$V$  = kecepatan aliran (m/s)

$F$  = koefisien gesekan

$L$  = panjang pipa (m)

$D$  = diameter pipa (m)

$A_1$  = luas tampang pipa 1 (hulu) ( $m^2$ )

$A_2$  = luas tampang pipa 2 (hilir) ( $m^2$ )

### 3.6 Lintasan Aliran

Dalam ilmu hidraulika dipelajari tentang kinematika aliran yang mempelajari gerak partikel zat cair tanpa meninjau gaya-gaya yang menyebabkan gerak itu terjadi. Pada ilmu tersebut, dipelajari kecepatan di setiap titik di dalam medan aliran pada setiap waktu.

Menurut Bambang Triatmojo dalam bukunya berjudul Hidraulika I, aliran zat cair dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam yaitu sebagai berikut.

1. Aliran Invisid dan Viskos
2. Aliran Kompresibel dan Tak Kompresibel
3. Aliran Laminer dan Turbulen
4. Aliran Mantap dan Tidak Mantap
5. Aliran Seragam dan Tak Seragam
6. Aliran Satu, Dua, dan Tiga Dimensi
7. Aliran Rotasional dan Tak Rotasional

Aliran zat cair tersebut kemudian mengalir melalui lintasan yang telah dibentuk berdasarkan desain ataupun model dari fungsi aliran itu sendiri.

### 3.7 Perhitungan Debit

Secara umum, perhitungan debit paling mendasar adalah dengan menggunakan rumus :

$$Q = A \cdot V \quad (3.24)$$

dengan :

Q = Debit Aliran ( $m^3/s$ )

A = Luas Penampang Aliran ( $m^2$ )

V = Kecepatan Aliran ( $m^2/s$ )

Rumus perhitungan debit tergantung pada kondisi permukaan, metode yang digunakan, dan juga penampang permukaan tempat air mengalir. Berdasarkan hal tersebut, rumus-rumus untuk perhitungan debit berbagai macam, namun tetap berlandaskan pada konsep dari rumus dasar yang telah dijabarkan di atas.

Contoh perhitungan debit untuk aliran melalui ambang lebar dan ambang tajam tertera pada Modul Praktikum Hidraulika 1 FTSP UII tahun 2017 berikut ini.

1. Perhitungan Debit untuk Aliran Melalui Ambang Lebar

$$Q = 1,705 \cdot C_d \cdot b \cdot H^{\frac{3}{2}} \quad (3.25)$$

dengan :

Q = Debit Aliran ( $m^3/s$ )

H = Tinggi Peluapan (m)

Cd = Koefisien Debit ( $m^3/s$ )

b = Lebar Ambang (m)

2. Perhitungan Debit untuk Aliran Melalui Ambang Tajam

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot b \cdot \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (3.26)$$

dengan :

Q = Debit Aliran ( $m^3/s$ )

Cd = Koefisien Debit ( $m^3/s$ )

H = Tinggi Peluapan (m)

b = Lebar Ambang (m)

Secara pemahaman, rumus-rumus tersebut dapat langsung digunakan untuk perhitungan debit. Apabila diterapkan di lapangan, kondisi alam tentu tidak dapat diperhitungkan mengingat pada kondisi tertentu, aliran yang melewati ambang terjadi terjunan karena kemiringan saluran yang terlalu besar. Hal inilah yang dimaksud dengan aliran super kritis, di mana kondisi tersebut menjadi sangat membahayakan karena dasar saluran akan tergerus oleh terjunan.

Untuk mengetahui tingkat kekritikan aliran dapat ditentukan dengan mencari bilangan Froude yang persamaannya adalah sebagai berikut.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot H}} \quad (3.27)$$

dengan :

- Fr = angka froude  
 V = kecepatan (m/s)  
 g = gravitasi (9.81 m/s<sup>2</sup>)  
 D = tinggi muka air (m)

Sementara untuk mengetahui keadaan aliran laminer atau turbulen dapat ditentukan dengan mencari angka Reynolds yang persamaannya adalah sebagai berikut.

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu} \quad (3.28)$$

dengan :

- Re = angka reynolds  
 V = kecepatan aliran (m/s)  
 R = Jari-jari hidraulis (m)  
 $\nu$  = Kekentalan kinematik (m<sup>2</sup>/s)

### 3.8 Mengontrol Kavitasasi

Kavitasasi merupakan fenomena terjadinya tekanan lebih kecil dari 1 atm yang mengakibatkan gelembung-gelembung udara pada permukaan badan bendung, sehingga menimbulkan lubang-lubang karena terlepasnya butiran-butiran agregat dari permukaan konstruksi.

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mencegah kavitasasi adalah dengan menghilangkan sumber dari penurunan tekanan yang terjadi pada lintasan aliran. Desain formasi dasar pun juga dapat digunakan untuk mengurangi penurunan tekanan yang akan terjadi. Mengurangi kecepatan aliran dengan nilai yang lebih rendah pun merupakan salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi tingkat kerusakan permukaan konstruksi akibat dari kavitasasi itu sendiri.

Karena memberikan dampak kerusakan yang cukup signifikan, beberapa cara dilakukan untuk dapat menghindari gejala kavitasasi, yaitu diantaranya sebagai berikut.

1. Pada daerah batas yang sering terjadi gejala kavitasasi sedapat mungkin di desain sedemikian rupa agar pada daerah tersebut terjadi tekanan tinggi yang berguna untuk mereduksi penurunan tekanan yang akan terjadi.
2. Gunakan sistem pengudaraan ke dalam aliran, sehingga hal ini akan berdampak pada pengurangan letupan-letupan udara yang muncul karena disebabkan oleh kavitasasi.
3. Menggunakan material dasar yang jauh lebih tahan terhadap kavitasasi, misalnya beton berlapis fiber, *stainless fiber*, dan beberapa material lain yang dapat mengurangi angka kavitasasi meskipun pada akhirnya gejala tersebut masih tetap ada.

Berdasarkan cara-cara di atas, maka didapatkan kesimpulan bahwa untuk mengontrol dan mereduksi gejala kavitasasi pada dinding dan dasar permukaan bangunan, perlu penggunaan sistem pengudaraan yang jauh lebih tepat agar dapat menghindari terjadinya penurunan tekanan sampai pada tekanan uap yang dapat menyebabkan kavitasasi.

Suatu bentuk persamaan untuk memperkirakan kavitasasi dapat berupa parameter tak berdimensi. Hubungan antara gaya pelindung terhadap kavitasasi (*ambient pressure*) dan penyebab kavitasasi (*dynamic pressure*) disebut indeks kavitasasi. Adapun perhitungan kavitasasi dijabarkan dengan persamaan (3.29) dan (3.30) berikut (Chaudry dkk., 1998) :

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\rho \frac{V_o^2}{2}} \quad (3.29)$$

$$C_p = \frac{P_g - P_o}{\rho \frac{V_o^2}{2}} \quad (3.30)$$

Jika  $P \approx P_v$  , Maka  $\sigma_1 = -C_p$

dengan :

$\sigma$  = Indeks Kavitasasi

$P_o$  = Ambient Pressure (kPa)

$P_a$  = Tekanan Atmosfir (101 = kPa)



- $P_g$  = Tekanan Setempat (kPa)  
 $h$  = Tinggi Muka Air (m)  
 $P_v$  = Tekanan Uap (kPa)  
 $\rho$  = Massa Jenis Cairan (Kg/m<sup>3</sup>)  
 $V_o$  = Kecepatan Aliran (m/dt)  
 $C_p$  = Koefisien Kavitasasi  
 $\sigma_1$  = Angka Batas Kavitasasi

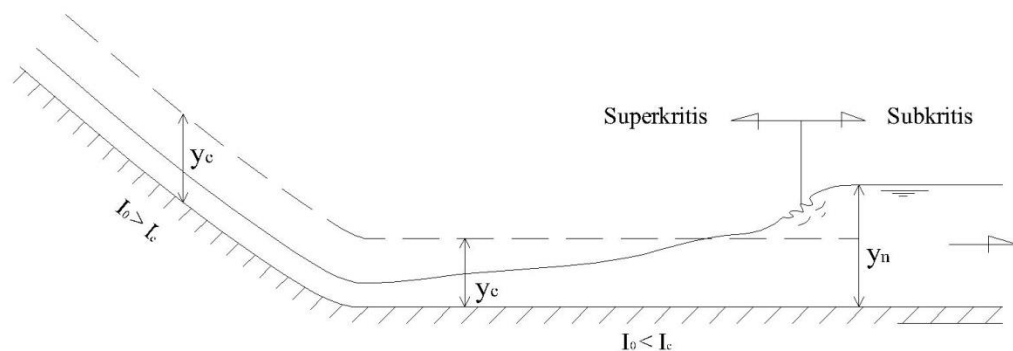
Kriteria Kavitasasi :

$\sigma > \sigma_1$  = Tidak Terjadi Kavitasasi

$\sigma \leq \sigma_1$  = Terjadi Kavitasasi

### 3.9 Loncat Air

Menurut Triatmodjo (2003), apabila tipe aliran di saluran berubah dari aliran superkritis menjadi subkritis maka akan terjadi loncat air. Loncat air merupakan salah satu contoh bentuk aliran berubah dengan cepat (*rapidly varied flow*). Keadaan ini terjadi pada kaki bangunan pelimpah. Untuk lebih jelasnya, pada Gambar 3.7 Menunjukkan tampang memanjang saluran dengan kemiringan berubah dari kemiringan curam menjadi landai. Aliran di bagian hulu adalah aliran superkritis sedangkan di bagian hilir adalah aliran subkritis. Di antara kedua tipe aliran tersebut terdapat daerah transisi di mana loncat air terjadi.



**Gambar 3.7 Loncat Air**  
 (Sumber : Triatmodjo, 2003)

Pada fenomena loncat air, kecepatan aliran berkurang secara mendadak dari  $V_1$  menjadi  $V_2$ . Sejalan dengan itu, kedalaman aliran juga bertambah dengan cepat dari  $y_1$  menjadi  $y_2$ .

Pada loncat air dapat dilihat olakan air yang sangat besar, disertai dengan berkurangnya energi aliran. Setelah loncat air, aliran menjadi tenang dengan kedalaman besar dan kecepatan kecil. Karena olakan yang sangat besar, maka loncat air dapat menyebabkan terjadinya erosi di lokasi tersebut (Triatmodjo, 2003).

Di dalam mempelajari loncat air, parameter yang akan dicari adalah kedalaman air awal  $y_1$ , kedalaman air akhir  $y_2$ , dan panjang loncat air. Dipandang aliran pada loncat air yang dibatasi oleh tampang 1 dan 2, gaya-gaya yang bekerja adalah gaya tekanan hidrostatik di tampang 1 dan 2. Debit aliran adalah  $q$ , sedangkan debit tiap satuan panjang adalah  $q = Q/B$  dengan  $B$  adalah lebar saluran (Triatmodjo, 2003). Gaya tekanan hidrostatik tiap satuan lebar pada tampang 1 adalah :

$$F_1 = \frac{1}{2} \gamma y_1^2 = \frac{1}{2} \rho g y_1^2 \quad (3.31)$$

Gaya tekanan hidrostatik tiap satuan lebar pada tampang 2 adalah :

$$F_2 = \frac{1}{2} \gamma y_2^2 = \frac{1}{2} \rho g y_2^2 \quad (3.32)$$

Persamaan momentum untuk gaya-gaya tiap satuan lebar adalah :

$$F = \rho q (V_2 - V_1)$$

$$\frac{1}{2} \rho g y_1^2 - \frac{1}{2} \rho g y_2^2 = \rho q (V_2 - V_1) = \rho q \left( \frac{q}{y_2} - \frac{q}{y_1} \right)$$

$$(y_2^2 - y_1^2) = \frac{2q^2}{g} \left( \frac{1}{y_1} - \frac{1}{y_2} \right)$$

$$(y_2^2 - y_1^2) = \frac{2q^2}{g y_1 y_2} (y_2 - y_1)$$

$$(y_2 + y_1)(y_2 - y_1) = \frac{2q^2}{g y_1 y_2} (y_2 - y_1)$$

$$y_2 + y_1 = \frac{2q^2}{g y_1 y_2}$$

$$y_2^2 + y_1 y_2 = \frac{2q^2}{g y_1}$$

$$y_2^2 + y_1 y_2 - \frac{2q^2}{g y_1} = 0 \quad (3.33)$$

Penyelesaian dari persamaan di atas (persamaan kuadrat) akan didapat nilai  $y_2$  :

$$y_2 = \frac{-y_1 \pm \sqrt{y_1^2 + 4 \times 2q^2 / g y_1}}{2} \quad (3.34)$$

Dari kedua nilai  $y_2$  diambil yang positif, sehingga :

$$\begin{aligned} y_2 &= -\frac{1}{2} y_1 + \sqrt{\frac{y_1^2}{4} + \frac{2q^2}{g y_1}} \\ &= -\frac{1}{2} y_1 + \sqrt{\frac{y_1^2}{4} + \frac{2y_1 V_1^2}{g}} \\ &= y_1 \left( -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2V_1^2}{g y_1}} \right) \\ \frac{y_2}{y_1} &= \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8 Fr^2} - 1) \end{aligned} \quad (3.35)$$

Dengan  $Fr_1 = \frac{V_1^2}{\sqrt{g y_1}}$  adalah angka froude pada saluran sebelah hulu, sehingga dengan demikian apabila  $y_1$  diketahui maka dapat dihitung  $y_2$ . Kehilangan tenaga pada loncat air adalah :

$$\begin{aligned} E_{s1} - E_{s2} &= \left[ y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right] - \left[ y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right] \\ &= (y_1 + y_2) + \frac{q^2}{2g y_1^2} - \frac{q^2}{2g y_2^2} \end{aligned}$$

$$= (y_1 + y_2) + \frac{q^2}{2g y_1^2 y_2^2} (y_2^2 + y_1^2) \quad (3.36)$$

Dengan menggunakan persamaan untuk mengeliminasi  $q$ , maka persamaan di atas menjadi :

$$\Delta E_s = E_{s1} - E_{s2} = \frac{(y_1 - y_2)^2}{4 y_1 y_2} \quad (3.37)$$

Menurut Triatmodjo (2003), Panjang loncat air dapat ditentukan dengan percobaan di laboratorium. Untuk saluran segiempat, panjang loncat air diambil antara 5 dan 7 kali tinggi loncat air :

$$L_j = 5 \text{ sampai } 7 (y_2 - y_1) \quad (3.38)$$

Dalam prakteknya, panjang loncat air digunakan untuk menentukan panjang perlindungan saluran di mana loncat air terjadi.

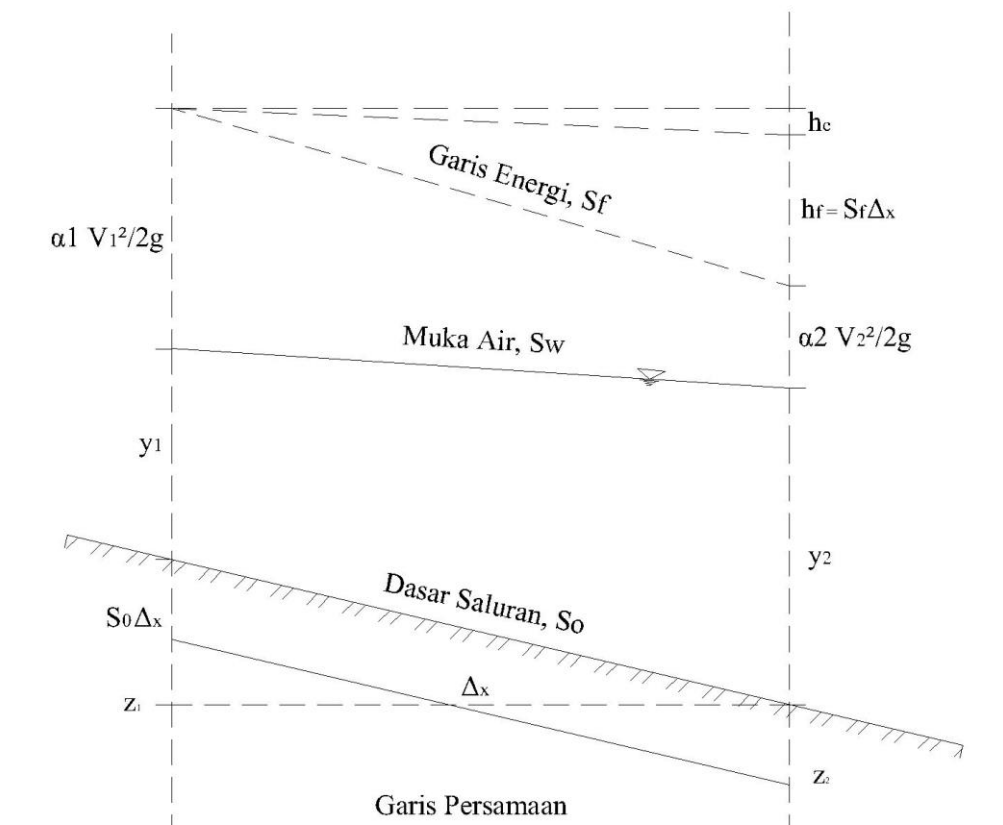
### 3.10 Profil Muka Air

#### 3.10.1 Standar Step

Menurut Chow (1985), perhitungan profil aliran berubah lambat laun (*gradually varied flow*) pada dasarnya meliputi penyelesaian persamaan dinamis dari aliran berubah lambat laun. Sasaran utama dari perhitungan ini adalah menentukan bentuk profil aliran. Bila digolongkan secara umum, ada tiga metoda perhitungan, yakni metoda integrasi grafis (*graphical integration method*), metoda integrasi langsung (*direct integration method*), dan metoda pentahapan (*step method*).

Pada penelitian ini, dilakukan perhitungan profil muka air dengan metode tahapan standar (*standart step*) yaitu perhitungan yang dilakukan tahap demi tahap dari suatu pos pengamat ke pos berikutnya yang sifat-sifat hidrolisnya telah ditetapkan. Dalam hal ini, jarak setiap post diketahui dan dilakukan penentuan kedalaman aliran di tiap pos. Cara semacam ini biasanya dibuat berdasarkan perhitungan coba-coba (Chow, 1985).

Metode ini selain bisa digunakan untuk saluran prismatis, pun juga bisa digunakan untuk saluran tidak prismatis. Pada saluran tidak prismatis, elemen hidrolis tergantung pada jarak di sepanjang saluran. Pada saluran alam, biasanya perlu dilakukan penelitian lapangan untuk mengumpulkan data yang diperlukan di setiap penampang yang perlu dihitung.



**Gambar 3.8 Bagian Saluran Sepanjang  $\Delta x$**   
(Sumber : Chow, 1985)

Untuk menjelaskan cara ini, dianggap bahwa permukaan air terletak pada suatu ketinggian dari bidang datar. Melalui Gambar 3.8, tinggi muka air di atas bidang datar pada kedua ujung penampang adalah.

$$Z_1 = S_0 \Delta x + y_1 + z_2 \quad (3.39)$$

dan

$$Z_2 = y_2 + z_2 \quad (3.40)$$

Kehilangan tekanan akibat gesekan adalah.

$$h_f = S_f \Delta x = \frac{1}{2} (S_1 + S_2) \Delta x \quad (3.41)$$

Dengan kemiringan gesekan  $S_f$  diambil sebagai kemiringan rata-rata pada kedua ujung penampang, atau  $S_f$  rerata.

$S_f$  diambil berdasarkan rumus dasar manning, yaitu :

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S_f^{1/2}$$

Persamaan di atas dikalikan dua lalu diturunkan menjadi :

$$S_f = \frac{V^2 \cdot n^2}{R^{4/3}}$$

$$S_f = \frac{Q^2 \cdot n^2}{A^2 R^{4/3}}$$

Sehingga didapatkan rumus  $S_f$  sebagai berikut :

$$S_f = \frac{Q^2 \cdot n^2 \cdot P^{4/3}}{A^{10/3}}$$

Berdasarkan sket gambar 3.8 dan rumus kehilangan tenaga akibat gesekan, maka persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

$$Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_e \quad (3.42)$$

Dengan  $h_e$  ditambahkan untuk kehilangan tekanan akibat pusaran yang cukup besar di saluran tidak prismatis. Sampai pada saat ini, belum ada metoda rasional untuk menghitung kehilangan tekanan akibat pusaran. Kehilangan tekanan ini tergantung pada perubahan tinggi kecepatan dan dapat dinyatakan sebagai bagian dari padanya, atau  $k (\Delta\alpha V^2/2g)$  dengan  $k$  suatu koefisien. Untuk bagian saluran yang lambat laun melebar atau menyempit, berturut-turut  $k = 0$  sampai 0,1 atau 0,2. Untuk pelebaran atau penyempitan secara tiba-tiba, nilai  $k$

sekitar 0,5. Untuk saluran prismatis yang umum kehilangan tekanan akibat pusaran praktis tidak ada, atau  $k = 0$ . Untuk mempermudah perhitungan, nilai  $h_e$  dianggap sebagai bagian dari kehilangan tekanan akibat gesekan dan nilai  $n$  dari koefisien manning akan meningkat pula dalam menghitung  $h_f$ . Berdasarkan hal tersebut, lalu dalam perhitungan  $h_e$  diambil angka nol.

Tinggi tekanan total pada kedua ujung penampang adalah.

$$H_1 = Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \quad (3.43)$$

dan

$$H_2 = Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.44)$$

Sehingga, persamaan (3.45) menjadi.

$$H_1 = H_2 + h_f + h_e \quad (3.45)$$

Metode tahapan standar akan memberi hasil yang terbaik bila dipakai untuk menghitung saluran alam. Namun pemilihan saluran prismatis dalam contoh semata-mata agar mempermudah penguraian dan membuat perbandingan dengan hasil yang diperoleh dengan metode lain yang telah diuraikan.

### 3.10.2 Profil Muka Air Peluapan

Perhitungan tinggi profil muka air peluapan, penurunan rumus mengacu pada rumus debit teoritis, yaitu :

$$Q = 1,705 \cdot Cd \cdot b \cdot H^{\frac{3}{2}} \quad (3.46)$$

Untuk mencari tinggi peluapan, maka  $H$  dipindah ke ruas kiri sehingga persamaan 3.47 menjadi.

$$H = \left( \frac{Q}{1,705 \cdot Cd \cdot b} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.47)$$

### 3.10.3 Profil Muka Air di $H_c$

Perhitungan tinggi profil muka air di  $H_c$ , penurunan rumus mengacu pada rumus angka froude, yaitu :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (3.48)$$

$$Fr = \frac{\frac{Q}{A}}{\sqrt{g \cdot D}}$$

$$Fr^2 = \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{g \cdot \frac{A}{B}}$$

$$Fr^2 = \frac{B \cdot Q^2}{g \cdot A^3}$$

$$Fr^2 = \frac{Q^2}{g \cdot B^2 \cdot H^3} \quad (3.49)$$

Sehingga persamaan 3.50 menjadi.

$$H_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot B^2 \cdot 1^2}} \quad (3.50)$$

### 3.10.4 Profil Muka Air Pada Loncat Air

Sementara untuk mencari profil muka air di  $y_2$ , penurunan rumusnya adalah sebagai berikut.

$$Fs_1 = Fs_2$$

$$\frac{Q^2}{g A_1} + Z_1 A_1 = \frac{Q^2}{g A_2} + Z_2 A_2$$

$$\frac{Q^2}{g B y_1} + \frac{1}{2} y_1 B y_1 = \frac{Q^2}{g B y_2} + \frac{1}{2} y_2 B y_2$$

$$\frac{Q^2}{g B} \left[ \frac{1}{y_1} - \frac{1}{y_2} \right] = \frac{1}{2} B (y_2^2 - y_1^2)$$



$$\frac{2Q^2}{gB^2} \left[ \frac{y_1 - y_2}{y_1 y_2} \right] = (y_2 + y_1)(y_2 - y_1)$$

$$(y_1 y_2^2) + (y_1^2 y_2) - \frac{2Q^2}{gB^2} = 0 \quad (3.51)$$

$$y_{1,2} = \frac{-y_1^2 \pm \sqrt{y_1^4 + 4y_1 \frac{2Q^2}{gB^2}}}{2y_1}$$

$$y_{1,2} = \frac{-y_1^2}{2y_1} \pm \frac{\sqrt{y_1^4 + 8 \frac{y_1 Q^2}{gB^2}}}{2y_1}$$

$$y_{1,2} = \frac{-y_1}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{y_1^4}{y_1^2} + \frac{8y_1 Q^2}{y_1^2 gB^2}}$$

$$y_{1,2} = \frac{-y_1}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{y_1^2 + \frac{8Q^2}{y_1^2 gB^2}}$$

$$y_{1,2} = \frac{-y_1}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{y_1^2 \left(1 + \frac{8Q^2}{y_1^2 gB^2}\right)}$$

$$y_{1,2} = \frac{-y_1}{2} \pm \frac{1}{2} y_1 \sqrt{1 + 8 Fr^2}$$

$$y_2 = \frac{-y_1}{2} + \frac{y_1}{2} \sqrt{1 + 8 Fr^2}$$

Sehingga persamaan 3.52 menjadi.

$$y_2 = \frac{1}{2} y_1 (\sqrt{1 + 8 Fr^2} - 1) \quad (3.52)$$

