

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Bendungan**

Dalam peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.37 Tahun 2010 tentang bendungan dijelaskan bahwa bendungan adalah bangunan yang berupa urukan tanah, urukan batu, beton dan / atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat juga bertujuan untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*) atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk.

Bendungan memiliki struktur bangunan utama, seperti tubuh bendungan dan juga struktur bangunan pelengkap dan peralatannya seperti bangunan pelimpah, pintu air dan katup, bangunan pengeluaran, jalan masuk, jalan hantar, dan bangunan prasarana.

#### **2.2 Bangunan Pelimpah (*Spillway*)**

Bangunan pelimpah merupakan bangunan yang mengalirkan kelebihan air di dalam waduk (Robert, 2010). Sehingga air tidak melimpas ke puncak bendungan (*overtopping*) yang dapat membahayakan bendungan, terutama bendungan tipe urukan tanah. Jika pelimpah tersebut dilengkapi dengan pintu untuk mengendalikan aliran banjir, disebut sebagai pelimpah berpintu (*gated spillway*). Jika aliran cukup dikendalikan oleh mercu pelimpah, disebut sebagai pelimpah tidak berpintu (*ungated spillway*). Terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam mendesain bangunan pelimpah yaitu:

1. Debit *inflow*, frekuensi, dan bentuk hidrografnya.
2. Tinggi mercu pelimpah yang direncanakan.
3. Kapasitas waduk pada beberapa variasi permukaan.
4. Kondisi geologi dan kondisi lapangan lainnya.
5. Lokasi berupa lereng yang terjal/ curam.
6. Bekas galian yang dapat dimanfaatkan sebagai material timbunan.
7. Daya dukung, stabilitas lereng, rembesan/ *uplift*.

Untuk menentukan profil aliran rencana pada bangunan pelimpah mempunyai beberapa metode yaitu metode tahapan langsung (*direct step method*) dan metode tahapan standar (*standar step method*)

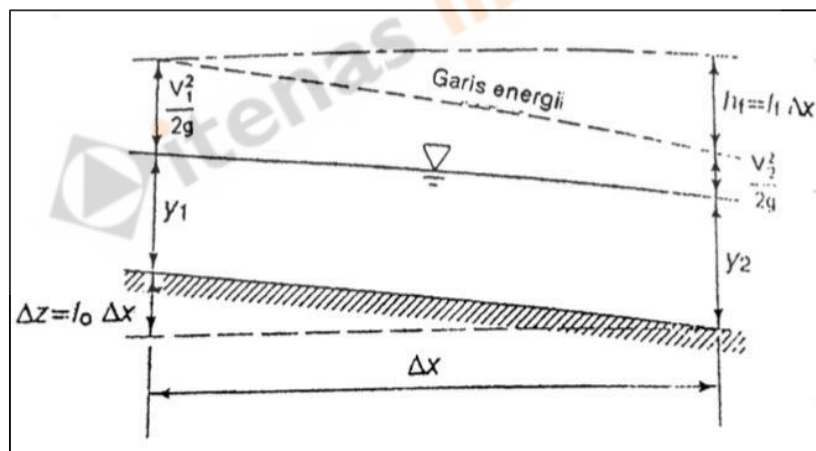
a. Metode Tahapan Langsung ( *Direct Step Method* )

Metode tahapan langsung berupa metode sederhana yang cara pengerjaannya lebih mudah dan praktis untuk menghitung profil muka air (AR Hakim,2008) seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.1** dan Persamaan 2.1 sebagai berikut ini:

$$z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} - z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + hf \quad \dots (2.1)$$

Keterangan :

- $z$  = ketinggian dasar saluran dan garis referensi (m)
- $h$  = kedalaman air dari dasar saluran (m)
- $V$  = kecepatan rata-rata (m/s)
- $g$  = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)
- $hf$  = kehilangan e (m)



**Gambar 2.1** Metode Tahapan Langsung

(Sumber: Triatmodjo,2008)

b. Metode Tahapan Standar ( *Standar Step Method* )

Metode ini dikembangkan dari persamaan energi total dari aliran pada saluran terbuka. Dapat dituliskan dengan persamaan 2.2 dan 2.3 sebagai berikut ini:

$$z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + hf \quad \dots (2.2)$$

$$E_1 = E_2 + hf \quad \dots (2.3)$$

Keterangan:

$h_f$  = kehilangan energi karena gesekan dasar saluran (m)

$E$  = energi total (m)

### 2.2.1 Saluran Pengarah

Saluran pengarah berfungsi untuk mengarahkan aliran agar aliran tersebut saat melewati mercu memiliki kondisi hidraulik yang baik yaitu aliran yang seragam. Perbandingan nilai kedalaman saluran pengarah dari puncak mercu pelimpah diusahakan memiliki nilai 1,5 kali lebih besar, atau sama dengan tinggi limpasan air di atas puncak mercu pelimpah. Dan pada saluran pengarah diusahakan kecepatan masuknya aliran air di bawah 4 m/s.

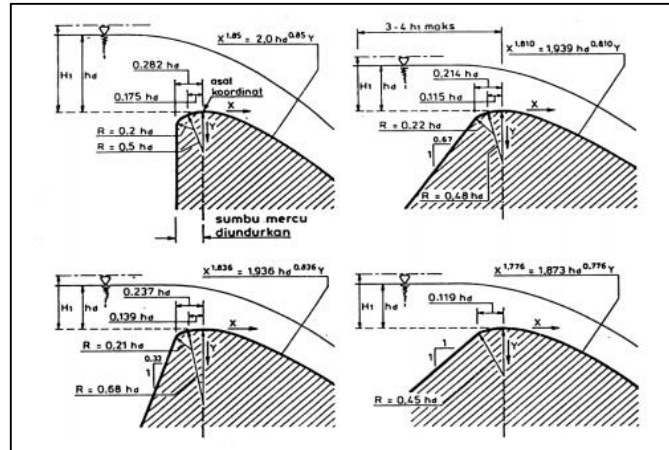
### 2.2.2 Mercu

Mercu yang digunakan di Indonesia pada umumnya digunakan dua tipe mercu yaitu mercu tipe Ogee dan tipe bulat. Kedua bentuk mercu tersebut dapat dipakai untuk konstruksi beton maupun pasangan batu atau kombinasi dari keduanya. Penentuan elevasi mercu bendungan ditentukan pertimbangan faktor – faktor seperti panjang bendungan untuk mengalirkan debit rencana  $Q_{PMF}$ , untuk mendapatkan sifat aliran sempurna, elevasi sawah tertinggi yang akan dialiri, keadaan tinggi air di sawah, kehilangan tekanan mulai dari *intake* sampai dengan saluran tersier dan tekanan yang diperlukan agar dapat membilas sedimen.

#### 1. Mercu Ogee

Mercu Ogee berbentuk tirai luapan bawah dari bendungan ambang tajam. Sehingga mercu ini tidak akan memberikan tekanan sub atmosfer pada permukaan mercu sewaktu bendungan mengalirkan air pada debit rencana. Untuk bagian hulu mercu bervariasi sesuai dengan kemiringan permukaan hilir. Salah satu alasan dalam perencanaan digunakan tipe Ogee adalah karena tanah di sepanjang kolam olah, tanah berada dalam keadaan baik, maka tipe mercu yang cocok adalah tipe mercu Ogee karena memerlukan lantai muka untuk menahan penggerusan,

digunakan tumpukan batu sepanjang kolam olak sehingga lebih hemat. Beberapa bentuk mercu Ogee ditunjukkan pada **Gambar 2.2**



**Gambar 2.2** Bentuk-bentuk Bendung Mercu Ogee

(Sumber: *U.S Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station*)

Mercu memiliki kapasitas pelimpah yang bergantung dengan tinggi energi yang terjadi pada mercu tersebut. Persamaan rumus tinggi energi – debit ditunjukkan pada persamaan 2.4.

$$Q = C_d x \frac{2}{3} x \sqrt{\frac{2}{3} g} x b_c x H_1^{1.50} \quad \dots (2.4)$$

Keterangan:

$Q$  = debit aliran ( $m^3/s$ )

$b_c$  = lebar mercu (m)

$C_d$  = koefisien debit

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

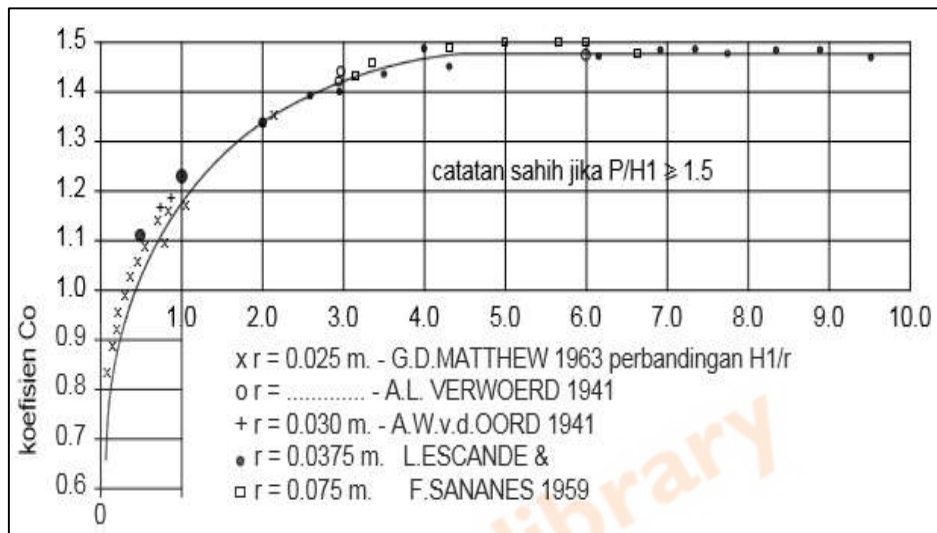
$H$  = tinggi energi total di atas mercu bendungan (m)

## 2. Koefisien Debit

Koefisien debit ( $C_d$ ) merupakan angka tak berdimensi sebagai koreksi dari hasil formulasi matematika debit aliran yang mengalir pada bangunan air terhadap hasil pengukuran debit aliran. Untuk mengetahui hambatan yang terjadi pada saat air mengalir yaitu menggunakan koefisien debit. (Subyantoro, Isbandi, 2012)

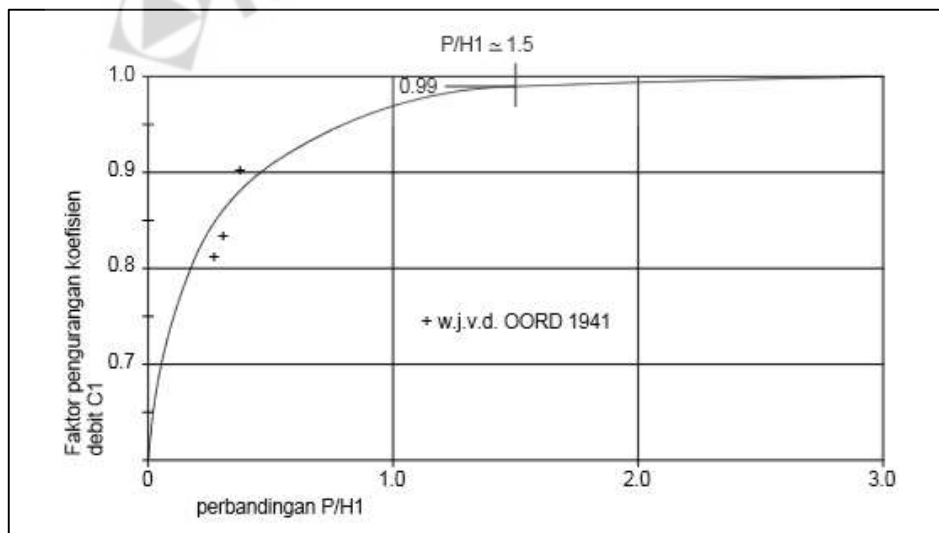
Koefisien debit  $C_d$  adalah hasil dari perkalian antara  $C_0 \times C_1 \times C_2$ . Dimana tiap angka dari koefisien tersebut didapatkan dengan cara melihat ke grafik. Penjabaran mencari nilai setiap koefisien didapat sebagai berikut.

$C_0$  diperoleh berdasarkan fungsi  $H/r$ , terdapat pada gambar **Gambar 2.3**  
 $C_1$  diperoleh berdasarkan fungsi  $p/H$ , terdapat pada gambar **Gambar 2.4**  
 $C_2$  diperoleh berdasarkan fungsi  $p/H$  dan kemiringan muka udik bendungan, terdapat pada **Gambar 2.5**



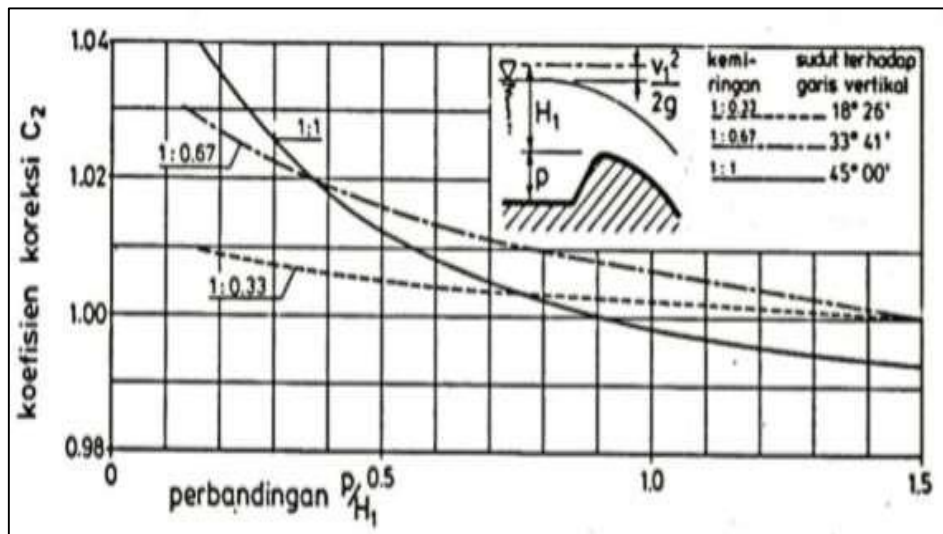
**Gambar 2.3** Grafik  $C_0$  Sebagai Fungsi Perbandingan  $H/r$

(Sumber: Kumala Y.E ,2018)



**Gambar 2.4** Grafik  $C_1$  Sebagai Fungsi Perbandingan  $P/H_1$

(Sumber: Kumala Y.E ,2018)



Gambar 2.5 Grafik C2

(Sumber: Kumala Y.E ,2018)

### 2.2.3 Saluran Transisi

Saluran transisi berfungsi agar debit banjir rencana yang disalurkan memiliki kecepatan aliran yang rata dan aliran air yang baik tidak mengalami aliran balik berlebih pada bagian hilir saluran yang dapat menyebabkan luapan air.

### 2.2.4 Saluran Peluncur

Saluran peluncur berfungsi memindahkan aliran debit air dengan perbedaan elevasi dari saluran peralihan ke sungai atau saluran lainnya, saluran ini harus direncanakan secara aman dan ekonomis, jika saluran terlalu panjang maka biaya perencanaan menjadi tidak ekonomis karena panjang saluran menjadi besar. Namun jika saluran terlalu curam maka tingkat keamanannya akan menurun.

### 2.2.5 Bangunan Peredam Energi

Bangunan peredam energi adalah bangunan yang berfungsi meredam energi akibat pembendungan, sehingga aliran air dari saluran peluncur ke sungai tidak menimbulkan penggerusan yang membahayakan tubuh bendungan dan kelengkapannya (Prastumi, 2012). Peredam energi mempunyai beberapa bentuk yaitu lantai datar, cekung masif atau cekung bergigi, berganda atau bertangga, dan kolam loncat air.

Prinsip peredam energi dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu:

1. Menimbulkan gesekan air dengan lantai dan dinding struktur.
2. Membentuk loncatan air di dalam ruang olakan.
3. Menambah kekasaran pada lantai/bidang.
4. Menimbulkan benturan air ke bidang, air atau udara.

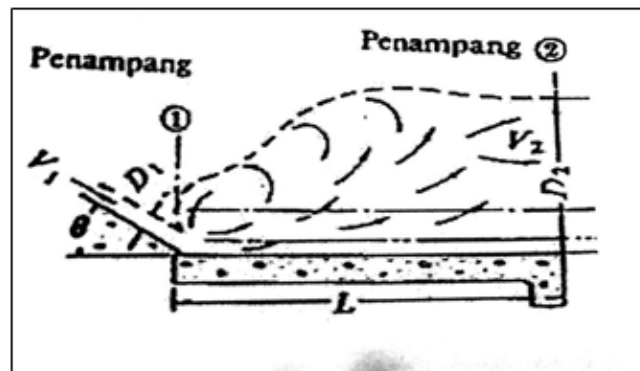
### 2.2.6 Peredam Energi USBR

Peredam energi yang digunakan untuk bendungan adalah peredam energi tipe USBR yang dikembangkan oleh *United States Bureau of Reclamation* (USBR). Kolam olak tipe USBR mempunyai tembok tepi vertikal, dengan lantai yang biasanya panjang dan beberapa tipe dilengkapi dengan balok-balok yang terdiri dari balok miring dan balok tengah. Balok miring yang berfungsi untuk menaikkan pancaran dari lantai ruang olakan dan menstabilkan loncatan air, sedangkan balok tengah untuk memecah pancaran yang menabraknya dan menambah kekasaran pada lantai. Dan kolam olak tipe USBR mempunyai ambang hilir biasa atau ambang hilir bergerigi yang berfungsi untuk mengurangi panjang lantai dan jika alirannya mempunyai kecepatan tinggi masih dapat memecah sisa pancaran yang sampai pada ambang ini.

Peredam energi tipe USBR, dibedakan menjadi 4 (empat) berdasarkan hidraulik alirannya dan kondisi konstruksinya seperti yang diuraikan di bawah ini.

#### 1. Peredam Energi USBR tipe I

Peredam energi USBR tipe I adalah suatu peredam energi dengan dasar yang datar dan terjadinya peredaman energi yang terkandung dalam aliran air dengan benturan secara langsung, aliran tersebut ke atas permukaan dasar kolam. Benturan langsung tersebut menghasilkan peredaman energi yang cukup tinggi sehingga perlengkapan – perlengkapan lainnya guna peredaman tidak diperlukan lagi pada kolam olakan tersebut. (Kumala, Y.E 2018). Penampang peredam energi USBR tipe I ditunjukkan pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6 Peredam Energi USBR tipe I

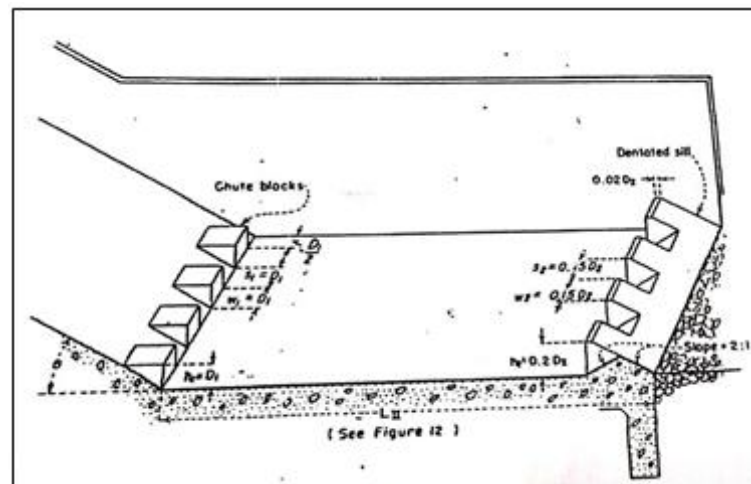
(Sumber: Kumala, Y.E 2018)

Penyempurnaan peredaman terjadi akibat gesekan-gesekan yang terjadi antara molekul-molekul air di dalam kolam olakan, maka air yang meninggalkan kolam olakan tersebut mengalir memasuki alur sungai dalam kondisi yang sudah tenang. Akan tetapi kolam olakan menjadi lebih panjang oleh karena itu tipe ini hanya sesuai untuk mengalirkan debit yang relatif kecil dengan kapasitas peredam yang kecil sehingga dimensinya menjadi kecil. Peredam energi tipe ini biasanya dibangun untuk kondisi yang tidak memungkinkan pembuatan perlengkapan-perengkapan lainnya pada kolam olak tersebut.

## 2. Peredam Energi USBR tipe II

Peredam energi USBR tipe II terjadi peredam energi yang terkandung dalam aliran akibat gesekan-gesekan di antara molekul-molekul air di dalam kolam dan dibantu dengan perlengkapan lain yang dibuat berupa gigi-gigi pemancar di pinggir udik dasar kolam dan ambang bergerigi di pinggir hilirnya, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.7**. Kolam olak tipe ini cocok untuk aliran dengan tekanan hidraustatis yang tinggi dengan debit yang besar. Peredam energi tipe ini cocok untuk aliran dengan  $q > 45 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , tekanan hidrostatik  $> 60 \text{ m}$ , dan bilangan Froude  $> 4,5$ . (Kumala, Y.E 2018).



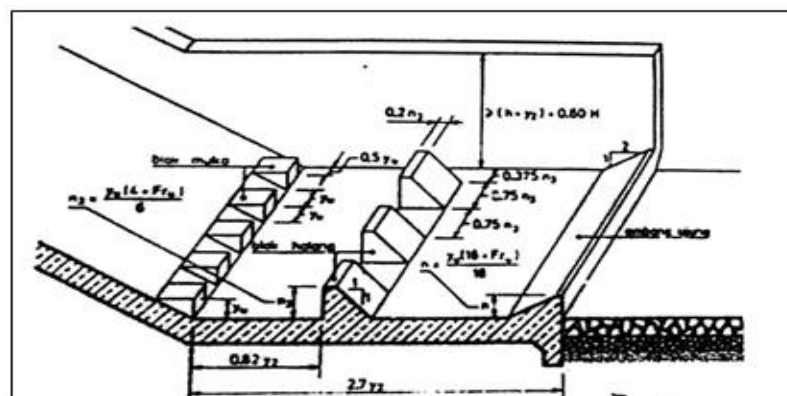


**Gambar 2.7** Peredam Energi USBR Tipe II

(Sumber: Kumala, Y.E,2018)

### 3. Peredam Energi USBR tipe III

Peredam energi USBR tipe III yang ditunjukkan pada **Gambar 2.8** mempunyai prinsip kerja dari kolam olakan ini sangat mirip dengan sistem kerja dari kolam olakan tipe II, akan tetapi lebih sesuai untuk mengalirkan air dengan tekanan hidrostatis yang lebih rendah dan debit yang agak kecil dengan  $q < 18,5$   $m^3/s/m$ , dan bilangan Froude  $> 4,5$ . Untuk mengurangi panjang kolam olakan, biasanya dibuatkan gigi pemancar aliran di tepi udik dasar, gigi penghadang aliran (gigi benturan) pada dasar kolam olakan, dan di ujung hilir dibuat perata aliran. Kolam olakan ini biasanya digunakan untuk bangunan pelimpah pada bendungan urukan yang rendah. (Kumala, Y.E 2018)

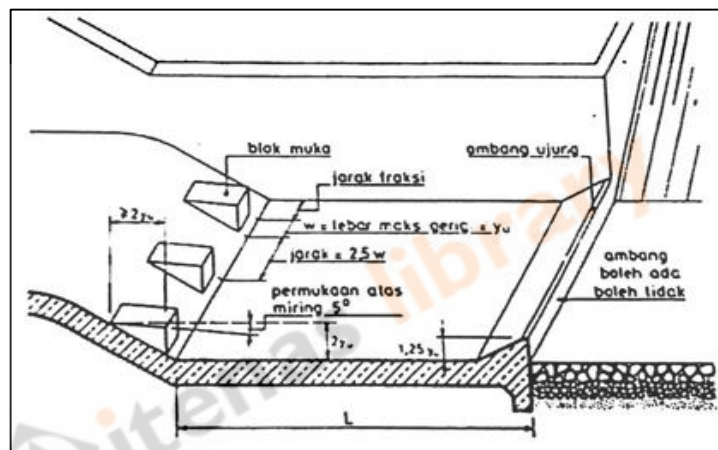


**Gambar 2.8** Peredam Energi USBR Tipe III

(Sumber: Kumala, Y.E ,2018)

#### 4. Peredam Energi USBR tipe IV

Sistem kerja olakan tipe ini sama saja dengan sistem kerja kolam olakan datar USBR tipe III, dipasang gigi pemancar di ujung hulu dan diujung hilir sebagai perata aliran seperti terlihat pada **Gambar 2.9**. Tetapi penggunaannya paling cocok adalah untuk aliran dengan tekanan hidrostatik yang rendah dan debit yang besar per unit lebar yaitu  $q > 18,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  untuk aliran dalam kondisi superkritis dengan bilangan Froude antara 2,5 - 4,5. Berhubung peredam energi untuk aliran air dengan bilangan Froude 2,5 - 4,5 umumnya sangat sulit karena hidraulik yang terjadi pada aliran tersebut tidak dapat dicegah secara sempurna.



**Gambar 2.9** Peredam Energi USBR tipe IV

(Sumber: Kumala, Y.E ,2018)

Dalam perencanaan peredam energi USBR, didasarkan pada bilangan Froude. Akibat gaya tarik bumi terhadap keadaan aliran dinyatakan dengan perbandingan gaya inersia dengan gaya tarik bumi. Perbandingan ini ditetapkan sebagai bilangan Froude (Chow, 1985). Bilangan Froude adalah nilai yang fungsinya untuk menentukan aliran yang terjadi pada suatu saluran adalah kritis, super kritis, maupun sub kritis, yang ditentukan berdasarkan persamaan 2.5 berikut ini:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g x h}} \quad \dots(2.5)$$

Keterangan :

$Fr$  = bilangan Froude

$v$  = kecepatan awal loncatan (m/s)

- $h$  = kedalaman air (m)  
 $g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

Untuk mengetahui kecepatan awal loncatan air dapat ditentukan dari persamaan **2.6** seperti di bawah ini:

$$v_1 = \sqrt{2g x (1/2 x H + z)} \quad \dots(2.6)$$

Keterangan :

- $v_1$  = kecepatan awal loncatan (m/s)  
 $g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )  
 $H$  = tinggi energi di atas mercu (m)  
 $z$  = tinggi jatuh (m)

Setelah menentukan bilangan Froude. maka selanjutnya menghitung kedalaman air di atas ambang ujung / hilir menggunakan rumus kedalaman konjugasi dalam loncatan air. Kedalaman konjugasi adalah kedalaman aliran setelah loncatan. Untuk menjaga agar loncatan tetap dekat dengan bidang miring bendungan di atas lantai, maka lantai harus diturunkan hingga kedalaman air hilir sekurang-kurangnya sama dengan kedalaman konjugasi. Kedalaman air di atas ambang ujung dapat dihitung menggunakan persamaan **2.7** di bawah ini:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \quad \dots(2.7)$$

Keterangan :

- $y_2$  = Kedalaman air di atas ambang ujung / hilir (m)  
 $Fr$  = Bilangan Froude di hulu loncatan air  
 $y_1$  = Kedalaman air di hulu loncatan air (m)

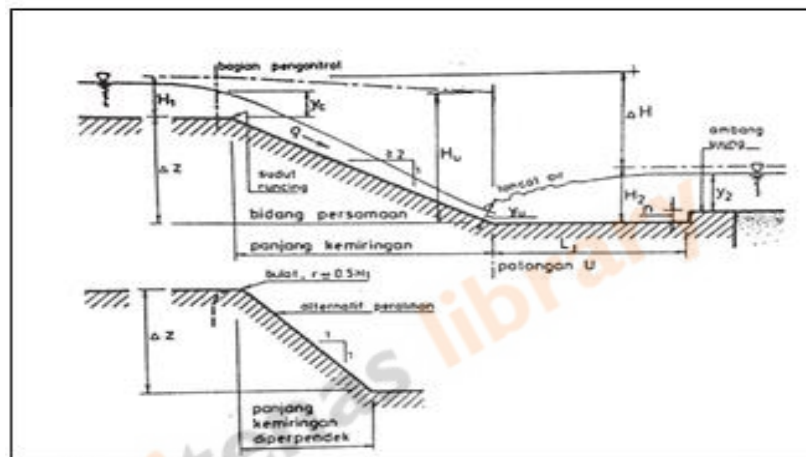
Panjang loncatan air dapat didefinisikan sebagai jarak peralihan aliran air dari superkritis menjadi subkritis. Panjang loncatan air di hilir potongan U, biasanya kurang dari panjang bebas loncatan tersebut karena adanya ambang hilir (*endsill*). Ambang yang berfungsi untuk menetapkan aliran ini, dapat memperpendek loncatan dan ditempatkan pada jarak (diukur dari perpotongan

bidang miring dan lantai) seperti pada persamaan 2.8 dan ditunjukkan pada **Gambar 2.10** berikut ini.

$$L = A x (y_2 - y_1) \quad \dots(2.8)$$

Keterangan :

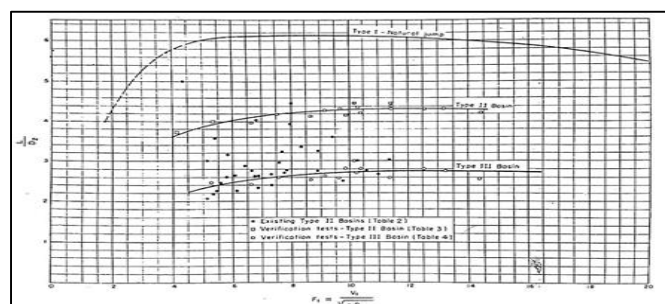
- $L$  = Panjang loncatan air (m)  
 $A$  = Konstanta bernilai (5 – 6,9)  
 $y_1$  = Kedalaman air di hulu loncatan air (m)  
 $y_2$  = Kedalaman air di hilir loncatan air (m)



**Gambar 2.10** Parameter Loncat Air

(Sumber: Kriteria Perencanaan 02 – Bagian Bangunan Utama, 2014)

Panjang loncat air dapat didefinisikan sebagai jarak yang diukur dari awal loncat air hingga suatu titik di bagian hilir gelombang loncat air (Chow, V.T, 1959). Panjang loncatan air atau panjang lantai dari peredam energi tipe USBR dapat dicari dengan menggunakan grafik seperti pada **Gambar 2.11** dengan cara memasukan nilai  $Fr$  saluran yang telah dihitung, sehingga didapatkan nilai  $L/D_2$ .


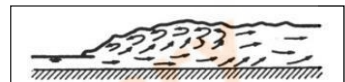
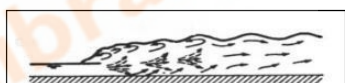
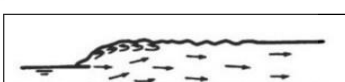
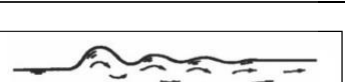


**Gambar 2.11** Grafik Panjang Lantai Peredam Energi USBR

(Sumber: Sosrodarsono, 1997)

Setelah mendapatkan nilai panjang lantai dan bilangan Froude maka menentukan tipe loncatan air. Menurut *United States Bureau of Reclamation* (USBR), pada saluran horizontal atau lantai datar, loncatan air dibedakan menjadi lima macam. Dasar penggolongan macam loncatan air didasarkan pada bilangan Froude sebelum loncatan air ( $Fr_1$ ) seperti ditunjukkan pada **Tabel 2.1** di bawah ini.

**Tabel 2.1** Jenis Loncatan Air Berdasarkan Bilangan Froude

Jenis loncatan air	Fr	Tampak loncatan Air
Loncatan kuat	$\geq 9,0$	
Loncatan air seimbang (tetap)	4,5 – 9,0	
Loncatan air bergoyang	2,5 – 4,5	
Loncatan air lemah	1,7 – 2,5	
Loncatan air berombak	1 – 1,7	

(Sumber: Ven Te Chow, 1985)

### 2.3 Tikungan Saluran

Pada tikungan saluran akan menimbulkan gaya sentrifugal yang mengakibatkan kemiringan permukaan air tidak sama (Kumala, Y.E 2018). Pada kondisi aliran tikungan, kemiringan permukaan air dalam arah melintang sungai ditunjukkan pada persamaan 2.9.

$$\frac{dh}{dr} = \frac{\alpha U^2}{gR} \quad \dots(2.9)$$

Keterangan:

dh = Perbedaan tinggi air (m)

- $dr$  = Perbedaan panjang pada jari – jari tikungan (m)  
 $U$  = Kecepatan rata – rata penampang (m/s)  
 $R$  = Jari – jari tikungan (m)  
 $g$  = Percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)  
 $\alpha$  = Koefisien *Coriolis*

#### 2.4 Bangunan Terjun

Bangunan terjun adalah bangunan yang membawa air dari ruas hulu ke ruas hilir saluran yang berfungsi menurunkan muka air dipusatkan di suatu tempat. Bangunan terjun merupakan bangunan yang mempunyai terjunan tegak atau miring. (Wirosoedarmo, 2019).

Bangunan terjun dibuat jika ada perbedaan elevasi dasar saluran yang satu dengan lainnya atau apabila kemiringan permukaan tanah lebih curam dari kemiringan maksimum yang diizinkan. Bangunan terjun tegak digunakan jika perbedaan tinggi energi (dalam hal ini boleh dianggap perbedaan dasar saluran) kurang dari 1,5 m. Jika tinggi energi lebih tinggi dari 1,5 m maka digunakan bangunan terjun miring. Adapun rumus yang digunakan yaitu seperti pada persamaan 2.10 dan 2.11 di bawah ini.

$$\Delta z = (\Delta H + Hd) - H_1 \quad \dots(2.10)$$

$$Hd = 1,67 H_1 \quad \dots(2.11)$$

Keterangan:

- $\Delta H$  = Perbedaan tinggi energi (m)  
 $\Delta z$  = Perbedaan tinggi elevasi (m)  
 $H_1$  = Tinggi energi (m)

Setelah mendapatkan hasil perbedaan tinggi elevasi maka dilakukan perhitungan panjang lantai kolam olak. Rumus yang digunakan seperti pada persamaan 2.12 di bawah ini.

$$L_j = 5 (n + y_2) \quad \dots(2.12)$$

Keterangan:

- $L_j$  = Panjang kolam loncatan air (m)  
 $n$  = Tinggi ambang hilir (m)

$y_2$  = kedalaman air hilir (m)

Kedalaman aliran air pada hilir bangunan terjun berfungsi untuk mengetahui apakah pada bangunan tersebut aman dan tidak terjadi limpasan air setelah melewati kolam olak. Perhitungan pada kedalaman aliran air diawali dengan perhitungan kedalaman kritis di atas mercu yang ditunjukkan pada persamaan **2.13**. Untuk perhitungan kedalaman aliran air pada hilir bangunan ditunjukkan pada persamaan **2.14**.

$$hc = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad \dots(2.13)$$

Keterangan:

$hc$  = Kedalaman kritis (m)

$q$  = Debit per meter lebar ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}'$ )

$g$  = Percepatan gravitasi ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$$t = 2,4 hc + 0,4 z \quad \dots(2.14)$$

Keterangan:

$hc$  = Kedalaman kritis (m)

$t$  = kedalaman di hilir bangunan (m)

$z$  = Tinggi terjun (m)

## 2.5 Model Fisik

Model fisik dibuat apabila fenomena fisik permasalahan yang ada di prototipe dapat dibuat dengan skala yang lebih kecil dengan keserupaan yang memadai (Kumala, Y.E 2018). Model fisik digunakan untuk simulasi perilaku hidraulik bangunan air yang akan dilaksanakan. Model fisik hidraulik pada bangunan air terdapat dua model yaitu model 2 dimensi dan model 3 dimensi.

Model fisik hidraulik bertujuan untuk memprediksi kemungkinan yang akan terjadi setelah bangunan dibuat dan untuk mengetahui berbagai permasalahan yang belum dapat diformulasikan fenomenanya yang dapat dipecahkan melalui pemodelan.

Adapun beberapa jenis model hidraulik yaitu:

1. Model Matematis (*mathematical modelling*) dibuat jika permasalahan dapat dirumuskan dengan formulasi matematis secara detail.
2. Model Fisis (*hydraulic scale model / physical modelling*) dibuat jika fenomena fisik dari permasalahan yang ada di prototipe dapat dibuat dengan skala yang lebih kecil dengan kesebangunan yang memadai.
3. Model Campuran (*hybrid model*), yaitu model campuran antara model matematis dan model fisis atau sebaliknya.

Prinsip permodelan pada model fisik hidraulik yaitu *modelling*, *solving*, *interpretation*.

1. *Modelling* adalah proses peniruan masalah yang ada di prototipe dengan skala yang lebih kecil dan dilakukan dengan cara yang benar.
2. *Solving* yaitu usaha penyelesaian masalah yang ada di model hanya berlaku untuk di model.
3. *Interpretation* yaitu usaha untuk memindahkan hasil penyelesaian masalah yang akan dikerjakan di model untuk keperluan pemecahan masalah yang berlaku di prototipe.

Tahap – tahap untuk pengecekan model fisik hidraulik yaitu:

1. Kalibrasi yaitu pengaturan model supaya data-data yang ada di prototipe sesuai dengan keadaan yang ada di model.
2. Verifikasi adalah pembuktian bahwa model sudah sesuai dengan yang ada di prototipe tanpa merubah atau mengatur modelnya lagi.

### 2.5.1 Prinsip Skala

Skala yaitu rasio antara nilai parameter yang ada di prototipe dengan nilai parameter tersebut pada model. Dasar skala model adalah membentuk kembali model yang ada di prototipe dalam skala yang lebih kecil sehingga kondisi yang ada di model tersebut mendekati dengan yang ada di prototipe. Kesebangunan tersebut dapat berupa.

1. Sebangun Geometrik yaitu model dan prototipe mempunyai bentuk yang sama tetapi berbeda ukuran.



- Model tanpa distorsi yaitu jika skala panjang arah horizontal dan skala panjang arah vertikal adalah sama.
- Model dengan distorsi yaitu jika skala panjang arah horizontal tidak sama dengan skala panjang arah vertikal.

$$nL = \frac{L_p}{L_m} \quad \dots (2.15)$$

Pada sebangun geometrik sempurna dapat ditentukan:

- a. Skala luas

$$nA = \frac{A_p}{A_m} \quad \dots (2.16)$$

- b. Skala volume

$$nV = \frac{V_p}{V_m} \quad \dots (2.17)$$

Penurunan skala model tanpa distorsi adalah proses dalam menentukan skala yang akan digunakan. Berikut ini adalah contoh dalam penurunan skala dengan penurunan bilangan Froude dan skala debit.

1. Penurunan bilangan Froude (*Froude Number*)

$$\begin{aligned} Fr_{prototype} &= Fr_{model} \\ \frac{V_{prototip}}{\sqrt{g \times D_{prototip}}} &= \frac{V_{model}}{\sqrt{g \times D_{model}}} \\ \frac{V_{prototipe}}{V_{model}} &= \frac{\sqrt{g \times D_{prototip}}}{\sqrt{g \times D_{model}}} = \left( \frac{D_{prototip}}{D_{model}} \right)^{1/2} \\ n_v &= n_d^{\frac{1}{2}} \quad \dots (2.18) \end{aligned}$$

Pada saluran berpenampang persegi kedalaman hidraulik (D) pada saluran memiliki nilai yang sama dengan kedalaman aliran (h), sehingga  $n_d = n_h$ .

2. Penurunan skala debit

$$\begin{aligned} Q &= v \times A \\ nQ &= n_v \times n_h^2 \\ nQ &= n_h^{1/2} \times n_h^2 \\ nQ &= n_h^{\frac{5}{2}} \quad \dots (2.19) \end{aligned}$$

## **2.6 Kriteria Perencanaan Hidraulik**

Kriteria perencanaan hidraulik bendungan meliputi tubuh bendungan yaitu kapasitas bangunan pelimpah, tinggi bendungan, tinggi jagaan, dan jenis aliran.

### **2.6.1 Tinggi Bendungan**

Tinggi bendungan merupakan elevasi dari permukaan pondasi hingga puncak bendungan. Untuk mencegah terjadinya limpasan di atas puncak bendungan harus diupayakan agar tinggi puncak bendungan setelah terjadi penurunan akhir masih cukup tinggi sehingga tinggi jagaan yang tersedia masih memenuhi standar yang diperlukan. Tinggi jagaan haruslah cukup untuk menahan limpasan air banjir.

### **2.6.2 Tinggi Jagaan**

Tinggi jagaan adalah perbedaan antara elevasi permukaan maksimum rencana air dalam waduk dan elevasi puncak bendungan. Elevasi permukaan air maksimum rencana biasanya merupakan elevasi banjir rencana waduk (Sosrodarsono dan Takeda, 1989).

Tinggi jagaan harus memperhatikan beberapa faktor yaitu tinggi gelombang karena angin dengan memperhatikan jangkauan, peningkatan tinggi muka air karena angin dengan memperhatikan jangkauan, tinggi gelombang karena gempa dan tinggi cadangan. Tinggi jagaan yang harus diberikan adalah 0,75 m sampai 1,5 m bergantung kepada kurva debit di sungai tersebut.

### **2.6.3 Saluran Pengarah**

Saluran pengarah aliran berfungsi sebagai pengarah aliran agar aliran tersebut dapat mengalirkan debit rencana  $Q_{PMF}$  dalam kondisi hidraulika yang baik. Dengan kecepatan aliran maksimum 4 m/s dan lebar saluran semakin mengecil ke hilir. Apabila melebihi kecepatan aliran maksimum itu berakibat aliran akan bersifat helisoidal dan kapasitas pengalirannya menurun.

### **2.6.4 Kapasitas Bangunan Pelimpah**

Kapasitas bangunan pelimpah yang baik dan aman adalah mampu mengalirkan debit rencana yaitu  $Q_{PMF}$ .

### 2.6.5 Saluran Peluncur

Saluran peluncur berfungsi untuk mengatur aliran air yang melimpah dari mercu agar dapat mengalir dengan lancar tanpa hambatan - hambatan hidrolis. Dalam merencanakan saluran peluncur harus memenuhi syarat seperti tampak atas lurus dan penampang melintang berbentuk persegi empat, agar air yang melimpah mengalir dengan lancar tanpa hambatan-hambatan hidrolis.

### 2.6.6 Bangunan Peredam Energi

Bangunan peredam energi yang berfungsi untuk meredam energi dengan adanya loncatan air yang berada di kolam olak, loncatan air berupa perubahan kondisi aliran dari superkritis ke subkritis. Aliran superkritis terjadi akibat kecepatan aliran yang sangat tinggi pada saat aliran tersebut berada di saluran peluncur, maka dengan adanya bangunan peredam energi dapat mengubah kondisi aliran air menjadi aliran subkritis dengan pembuktian berdasarkan perhitungan bilangan Froude. Perubahan kondisi aliran tersebut bertujuan agar tidak terjadi gerusan yang membahayakan geometri sungai pada bagian dasar dan tebing sungai saat mengalirkan debit banjir sesuai rencana  $Q_{PMF}$ .

Aliran melalui saluran terbuka dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu aliran kritis, superkritis dan subkritis.

#### a. Aliran kritis

Aliran dikatakan kritis apabila kecepatan aliran sama dengan kecepatan gelombang gravitasi. Dikatakan aliran kritis jika mempunyai bilangan Froude  $=1$  ( $Fr = 1$ )

#### b. Aliran Subkritis

Aliran Subkritis terjadi kecepatan aliran lebih kecil daripada kecepatan kritis, maka alirannya disebut subkritis. Dikatakan aliran subkritis jika mempunyai bilangan Froude  $< 1$  ( $Fr < 1$ )

#### c. Aliran Superkritis

Aliran subkritis terjadi jika kecepatan alirannya lebih besar daripada kecepatan kritis, maka alirannya disebut superkritis.

Dikatakan aliran superkritis jika mempunyai bilangan Froude  $> 1$  ( $Fr > 1$ ).

### **2.6.7 Tikungan Pada Saluran Pelimpah**

Tikungan yang aman dan baik pada bendungan adalah tikungan stabil mampu tikungan aliran di mana tidak terjadi erosi oleh arus. Untuk jari-jari minimum lengkung saluran pasangan diambil tiga kali lebar permukaan air. Jika dibutuhkan tikungan yang lebih tajam, maka diperlukan kincir pengarah (*guide vane*) agar sebaran aliran di ujung tikungan itu lebih merata.

### **2.6.8 Bangunan Terjun**

Bangunan terjun miring pada bendungan digunakan jika tinggi energi jatuh melebihi 1,5 m. Pada bangunan terjun, kemiringan permukaan belakang dibuat securam mungkin dan relatif pendek. Jika peralihan ujung runcing dipakai di antara permukaan pengontrol dan permukaan hilir disarankan untuk memakai kemiringan yang tidak lebih curam dari 1:2.

