

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Bendungan

Bendungan adalah bangunan yang posisinya tegak lurus terhadap arah aliran sungai yang terbentuk secara buatan atau alamiah. 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.

Tipe-tipe bendungan dibedakan berdasarkan beberapa penggolongan. Berdasarkan fungsinya bendungan dibedakan menjadi empat jenis yaitu sebagai penampung air, pengalih aliran (*differsion dam*), pengendali banjir, dan bendungan serbaguna. Berdasarkan aspek hidraulik, bendungan dibedakan menjadi dua yaitu bendungan yang boleh dilimpasi air (*overflow dam*), dan bendungan yang mercunya tidak boleh dilimpasi air (*non overflow dam*). Berdasarkan aspek materialnya tipe bendungan dibedakan berdasarkan beton gaya berat, beton dengan penyangga, beton pelengkung, dan bendungan urugan tanah atau urugan batu.

2.2 Bangunan Pelimpah

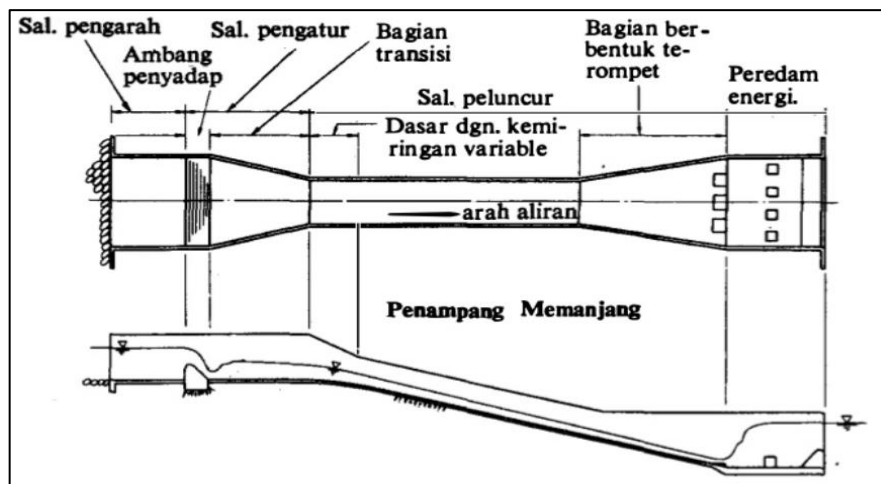
Bendungan pada umumnya dilengkapi dengan bangunan pelengkap berupa bangunan pelimpah. Bangunan pelimpah berfungsi untuk mengalirkan kelebihan debit banjir yang sudah tidak mampu ditampung lagi oleh waduk (*reservoir*). Limpahan air dialirkan melalui mercu pelimpah ke sungai atau drainase alam melalui suatu saluran. Bangunan pelimpah harus didesain secara matang agar bisa mengalirkan kelebihan air dari waduk kembali ke sungai dengan aman tanpa memberikan kerusakan yang berarti pada bangunan pelimpah dan bagian-bagian pelimpah lainnya.

Perencanaan pelimpah sangat penting untuk diperhatikan, karena apabila perencanaan pelimpah kurang baik atau kapasitas pelimpah tidak mencukupi, maka hal tersebut dapat menyebabkan kegagalan struktur bendungan akibat erosi pada tubuh bendungan. Untuk memberikan kapasitas limpasan yang mencukupi, maka

pelimpah harus memiliki perencanaan yang baik secara struktural, hidraulik, dan penempatan lokasinya harus dipilih pada tanah yang tidak mudah longsor.

Bangunan pelimpah suatu bendungan memiliki beberapa bagian-bagian utama seperti terlihat pada **Gambar 2.1**, dengan bagian-bagian sebagai berikut:

- 1) Saluran pengarah aliran (*control structures*),
- 2) Saluran pengatur,
- 3) Saluran transisi,
- 4) Saluran peluncur (*chute, discharge carrier, flood way*)
- 5) Bangunan peredam energi (*energy dissipator*)



Gambar 2.1 Bagian-bagian bangunan pelimpah

(Sumber : Sosrodarsono dan Takeda, 1989)

2.2.1 Saluran Pengarah Aliran

Bangunan pengarah aliran berfungsi membuat arah aliran yang melewati mercu memiliki kondisi hidraulik yang baik berupa aliran yang seragam tanpa terjadi aliran turbulen. Pada saluran pengarah, kecepatan aliran air masuknya diusahakan di bawah 4 m/s. 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.

Desain saluran pengarah belum memiliki standar yang dapat dipergunakan sebagai landasan untuk perencanaannya, sehingga pembuatan rencana teknisnya

didasarkan pada desain pendekatan dari bangunan yang telah ada, yang nantinya desain tersebut dicek kesesuaian terhadap syarat berdasarkan hasil uji model fisik.

2.2.2 Saluran Pengatur/Peralihan

Saluran Pengatur adalah bangunan yang digunakan untuk melewatkan air dari saluran pengarah ke saluran transisi. Saluran ini digunakan agar kapasitas pelimpah yang dipakai memiliki kemampuan limpasan yang besar karena air yang melimpas di atas mercu tidak terpengaruhi oleh saluran di bawahnya. Tipe saluran pengatur yang biasanya dipakai adalah tipe ambang lebar.

Saluran pengatur dengan tipe pengatur pelimpah memiliki bentuk mirip dengan perhitungan untuk mercu bendung. Rumus debit yang dipakai untuk menghitung kapasitas mercu pelimpah adalah.

$$Q = C.L.H^{3/2} \quad (2.1)$$

dengan

Q = debit rencana *outflow* (m³/s)

C = koefisien limpahan

L = lebar mercu pelimpah bendung (m)

H = total tinggi energi air di atas mercu pelimpah, termasuk tinggi tekanan dan kecepatan aliran pada saluran pengarah aliran (m).

2.2.3 Saluran Transisi

Bangunan ini berfungsi menghubungkan antara saluran pengatur ke saluran peluncur. Saluran transisi didesain dengan fungsi agar debit banjir rancangan yang disalurkan memiliki kecepatan aliran yang rata dan aliran air yang baik. Aliran air yang baik dimaksudkan agar pada aliran tersebut tidak timbul aliran balik (*back water*) berlebih di bagian hilir saluran yang dapat menyebabkan luapan air akibat permukaan air yang meninggi akibat *back water*.

2.2.4 Saluran Peluncur

Saluran peluncur berfungsi memindahkan debit air akibat perbedaan elevasi dari saluran peralihan ke sungai atau saluran alami lainnya, saluran ini harus didesain secara aman dan ekonomis, jika terlalu curam maka tingkat keamanannya akan menurun, namun jika terlalu panjang maka penampang akan menjadi tidak ekonomis karena panjang saluran menjadi terlalu besar.

Persyaratan yang harus dipenuhi ketika merencanakan saluran peluncur yaitu:

1. Air yang melimpah dari saluran peralihan dapat mengalir dengan lancar, tidak ada konsentrasi aliran dan tidak ada aliran silang.
2. Konstruksi saluran peluncur cukup kokoh dan stabil dalam menahan beban-beban yang bekerja.
3. Biaya konstruksi diusahakan dapat ditekan hingga seekonomis mungkin tanpa mengurangi aspek keamanan.

Saluran peluncur dapat dibagi menjadi 3 tipe, yaitu:

1. Dengan saluran peluncur (*chute type discharge carrier*)
Desain bangunan ini berfungsi meluncurkan air dari hulu bangunan pelimpah ke bangunan peredam energi melalui saluran terbuka
2. Dengan terowongan (*conduit type discharge carrier*)
Saluran peluncur tipe terowongan merupakan saluran tertutup yang digunakan untuk mengakukan debit bagian hulu pelimpah ke bagian hilir. Saluran tertutup tipe ini dapat berbentuk vertikal atau kemiringan, dengan saluran horizontal melewati bagian bawah tubuh bendung. Pelimpah ini biasanya dibangun pada lokasi dengan lembah yang sempit dan tebing curam atau longsoran tebing.
3. Dengan sistem permukaan bendungan (*dam surface type*)
Bentuk saluran peluncur ini hanya bisa digunakan pada bendungan beton dan sering digabungkan dengan ambang pelimpah yang terdapat di tengah.

2.2.5 Bangunan Peredam Energi

Bangunan ini dibangun untuk menghubungkan antara saluran peluncur ke sungai, bangunan ini memiliki fungsi untuk mengurangi besarnya energi akibat beda elevasi yang ada, agar tidak terjadi gerusan berlebih yang dapat merusak tebing atau bangunan dan instalasi lain di sebelah hilir bangunan pelimpah. Prinsip dasar yang digunakan dalam perencanaan peredam energi dalam upaya untuk mengurangi energi akibat beda elevasi, yaitu:

- Membentuk loncatan air (*hydraulic jump*)
- Menambah kekasaran pada lantai saluran sehingga timbul gesekan antar air dan permukaan.

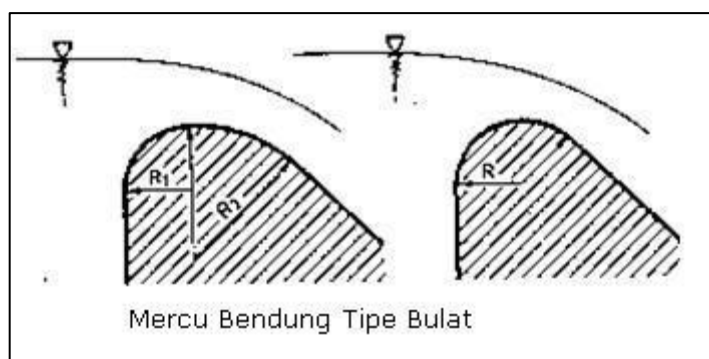
- Membenturkan air dengan benda fisik sehingga energi pada air ditransferkan ke benda fisik yang ditabrak.
- Membenturkan air dengan udara sehingga energinya berkurang.

2.3 Mercu

Besarnya kapasitas pelimpah bendungan dipengaruhi salah satunya oleh bentuk mercu yang didesain. Tipe mercu yang cocok digunakan untuk mercu pelimpah diantaranya mercu bulat, Ogee, dan WES. Setiap bentuk mercu memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pemilihan jenis mercu yang hendak di pakai bergantung pada kebutuhan desain yang kita miliki. Contohnya apabila kita menginginkan agar mercu kita memiliki nilai koefisien debit yang jauh lebih tinggi (44%) maka kita dapat menggunakan mercu bulat ketika perencanaan

- Tipe mercu bulat

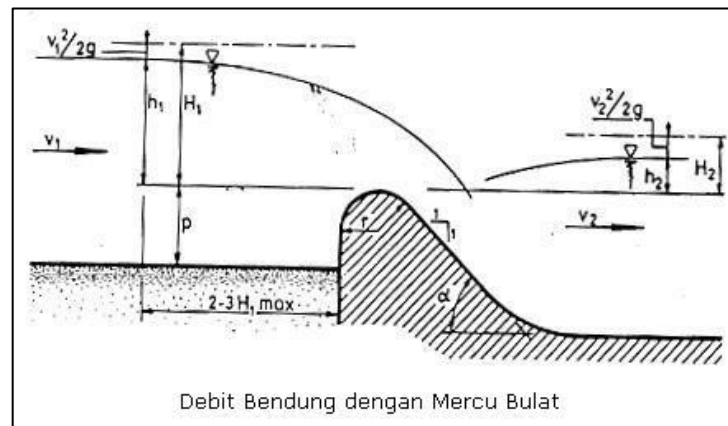
Pelimpah dengan mercu bulat memiliki nilai koefisien debit yang jauh lebih tinggi (44%) dibandingkan dengan koefisien mercu ambang lebar. Hal ini akan banyak memberikan keuntungan karena bangunan ini akan mengurangi tinggi muka air udik selama banjir. Mercu bulat dibedakan menjadi dua jenis yaitu satu radius dan dua radius seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.2**



Gambar 2.2 Tipe mercu bulat

(Bureau of Reclamation, 1987)

Parameter hidraulik dan sketsa aliran yang umumnya digunakan pada mercu tipe bulat dapat dilihat pada **Gambar 2.3**



Gambar 2.3 Mercu bulat
(Bureau of Reclamation, 1987)

Mercu memiliki kapasitas limpahan bergantung pada lebar dan tinggi energi yang terjadi pada mercu tersebut. Pada mercu bulat, perhitungan kapasitas dilakukan dengan rumus berikut.

$$Q = \frac{2}{3} \times C_d \times \left(\frac{2}{3}g\right)^{0,5} \times B \times H^{1,5} \quad (2.2)$$

dengan

Q = debit aliran (m³/s)

B = lebar mercu pelimpah bendungan (m)

C_d = koefisien debit

g = percepatan gravitasi (m/s²)

H = tinggi energi total di atas mercu pelimpah (m)

1. Lebar efektif mercu pelimpah (B_e)

Panjang efektif bendungan dipengaruhi oleh banyak atau tidaknya hambatan aliran air yang melewati suatu saluran pelimpah. Pada bendungan tipe urugan, pelimpah yang ada memiliki lebar bendung yang lebar, sehingga nilai kontraksi dapat diabaikan karena nilainya yang kecil. Hal tersebut berbeda apabila pada bangunan pelimpah memiliki bagian pengatur aliran yang dilengkapi dengan pintu-pintu atau kedalaman air di atas mercu pelimpah cukup tinggi dibandingkan dengan lebar bendung, maka pengaruh kontraksi dari aliran harus diperhatikan.

Rumus yang digunakan untuk menghitung panjang efektif mercu pelimpah (dari *Civil Engineering Department U.S. Army*) adalah sebagai berikut.

$$B_e = B_n - 2(n \cdot K_p + K_a) \cdot H \quad (2.3)$$

dengan

B_e = lebar efektif mercu pelimpah (m)

B_n = lebar netto mercu pelimpah (m)

n = jumlah pilar-pilar di atas mercu pelimpah

K_p = koefisien kontraksi pada pilar

K_a = koefisien kontraksi pada dinding samping

H = tinggi energi total di atas mercu pelimpah (m)

2. Tinggi muka air di atas mercu pelimpah

Tinggi muka air di atas mercu pelimpah adalah tingginya air dari dasar mercu ke permukaan. Perhitungan tinggi air dilakukan dengan rumus berikut.

$$H = h_u + \frac{Q^2}{\{(h_u + p)b_e\}^2 2g} \quad (2.4)$$

dengan

H = tinggi energi total di atas mercu pelimpah (m)

Q = debit aliran (m^3/s)

B_e = panjang efektif bendung (m)

h_u = tinggi air di atas mercu (m)

p = tinggi pengempangan (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

3. Tinggi muka air di hilir mercu pelimpah

Tinggi muka air di hilir mercu pelimpah dapat dihitung berdasarkan perhitungan teoritis. Nilai yang harus diketahui untuk menghitung tinggi muka air yaitu besarnya kecepatan aliran dan lebar efektif mercu pelimpah. **Gambar 2.4** menunjukkan profil aliran yang terjadi di bawah kaki mercu pelimpah. Rumus yang digunakan untuk menghitung kecepatan teoritis adalah sebagai berikut (Chow, 1985:378):

$$V_z = \sqrt{(2g(Z + H_d - H_z))} \quad (2.5)$$

dengan

$$V_z = \frac{Q}{L \cdot h_z} \quad (2.6)$$

dengan

Q = debit aliran (m^3/s)

L = lebar efektif pelimpah (m)

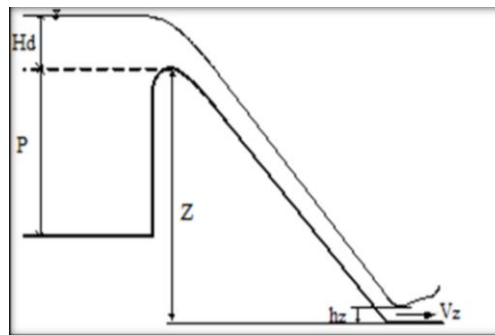
V_z = kecepatan aliran (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Z = tinggi jatuh atau jarak vertikal dari permukaan hulu sampai lantai kaki hilir (m)

H_d = tinggi energi di atas mercu pelimpah (m)

h_z = kedalaman aliran di kaki pelimpah (m)



Gambar 2.4 Muka air di atas tubuh pelimpah.

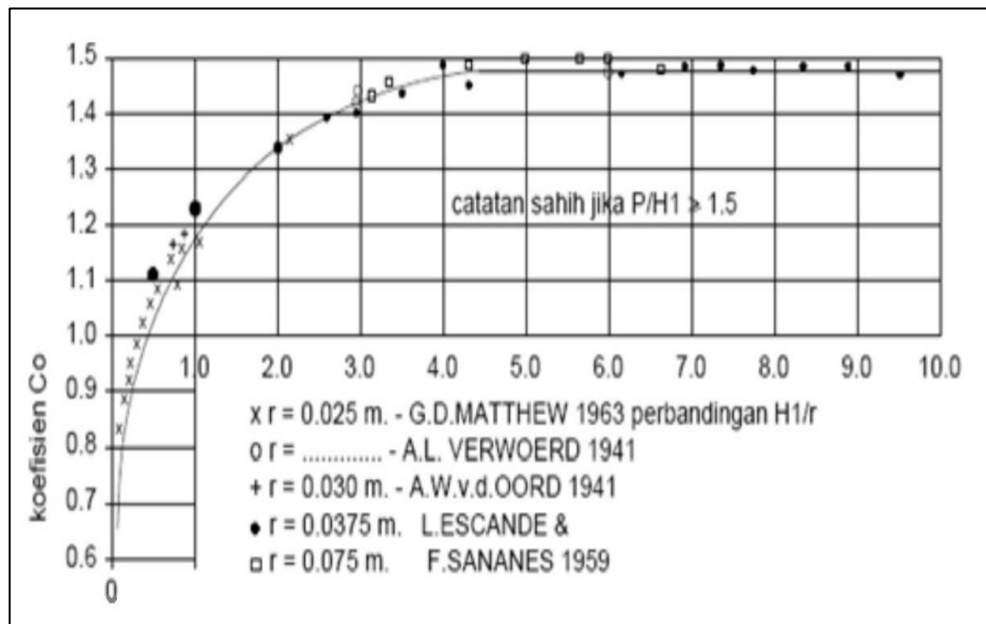
Sumber: Chow, 1985:363.

4. Koefisien Debit (C_d)

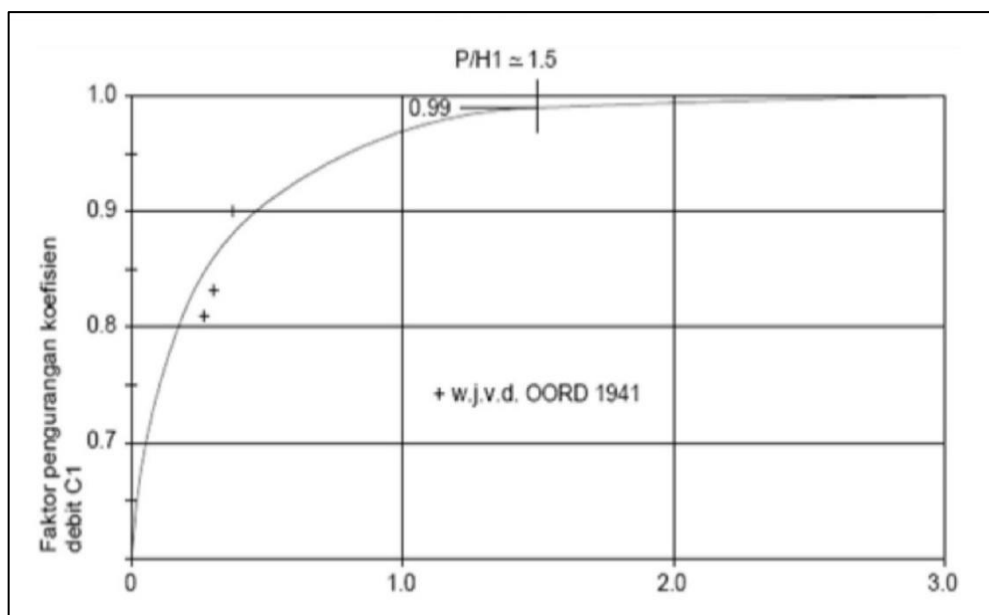
Koefisien debit yaitu angka yang menunjukkan hambatan yang terjadi pada saat air mengalir.

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 tiap koefisien didapat sebagai berikut.

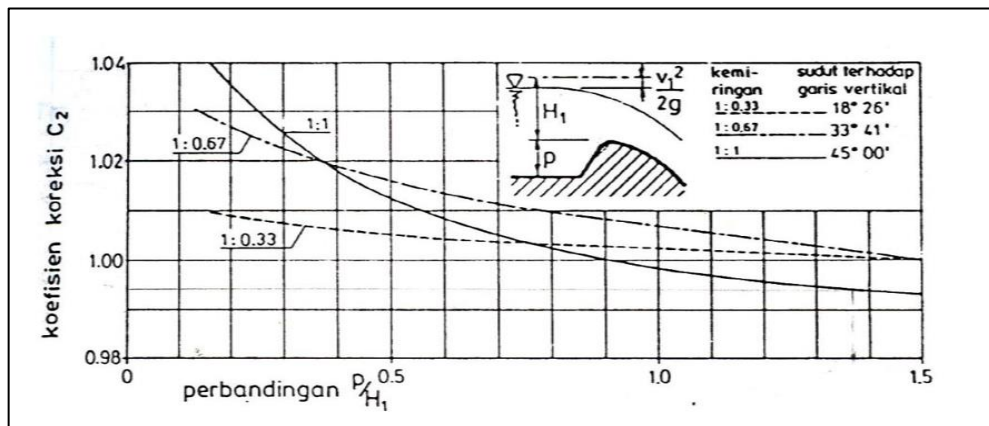
- C_0 diperoleh berdasarkan fungsi H/r , terdapat pada gambar **Gambar 2.5**
- C_1 diperoleh berdasarkan fungsi p/H , terdapat pada gambar **Gambar 2.6**
- C_2 diperoleh berdasarkan fungsi p/H dan kemiringan muka udik bendung, Terdapat pada **Gambar 2.7**



Gambar 2.5 Koefisien C_0
(Bureau of Reclamation, 1987)



Gambar 2.6 Koefisien C_1
(Bureau of Reclamation, 1987)



Gambar 2.7 Koefisien C_2
(Bureau of Reclamation, 1987)

2.4 Peredam Energi

Bangunan peredam energi adalah bangunan yang berfungsi meredam energi akibat pembendungan, sehingga aliran air dari saluran peluncur ke sungai tidak menimbulkan gerusan yang membahayakan tubuh bendungan dan kelengkapannya. Ada beberapa tipe bangunan peredam energi, salah satunya yaitu tipe lantai datar, dimana tipe ini terdiri atas tipe Vlugter, tipe Schoklitsch, tipe MDO dan MDS, tipe USBR, tipe SAF. Dalam desain peredam energi beberapa hal yang penting untuk diperhatikan adalah tinggi konjugasi atau tinggi air setelah terjadi peredaman energi, panjang loncatan air, dan tipe loncatan air.

2.4.1 Froude Number

Froude number yaitu nilai dengan fungsi untuk menggolongkan jenis aliran yang terjadi pada suatu saluran adalah sub kritis, kritis, atau super kritis. Berikut rumus untuk menghitung *froude number*.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times D}} \quad (2.7)$$

dengan

Fr = bilangan Froude (*Froude number*)

v = kecepatan aliran air (m/s)

D = kedalaman hidraulik (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

2.4.2 Tinggi Konjugasi

Loncatan air merupakan fenomena dimana didapat aliran air dengan jenis aliran superkritis bertemu dengan aliran air subkritis dengan jarak aliran yang pendek. Secara teoritis, loncatan air dihitung berdasarkan prinsip momentum. Tinggi loncatan air dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$y_2 = \frac{1}{2} \cdot y_1 \left[\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right] \quad (2.8)$$

dengan

y_2 = kedalaman air di hilir loncatan air (m)

Fr_1 = bilangan Froude di hulu loncatan air

y_1 = kedalaman air di hulu loncatan air (m)

2.4.3 Panjang Loncatan Air

Panjang loncatan air dapat didefinisikan sebagai jarak peralihan aliran air dari superkritis menjadi subkritis. Panjang loncatan air secara teoritis tidak dapat ditentukan secara pasti, namun telah dilakukan beberapa percobaan oleh ahli hidraulika yang dapat digunakan sebagai acuan. Untuk saluran segi empat, terdapat beberapa teori yang dapat digunakan untuk menghitung panjang loncatan air.

- Menurut *United States Bureau of Reclamation (USBR)*

$$L = A_n \times (y_2 - y_1) \quad (2.9)$$

dengan

L = panjang loncatan air (m)

A_n = konstanta bernilai (5 – 6,9)

y_1 = kedalaman air di hulu loncatan air (m)

y_2 = kedalaman air di hilir loncatan air (m)

- Menurut Silvester (1964)

$$L = 9,75 \times (Fr - 1)^{1,01} \times y_1 \quad (2.10)$$

dengan

L = panjang loncatan air (m)

Fr = nilai bilangan Froude

y_1 = kedalaman air di hulu loncatan air (m)

- Menurut Woyeski (1931)

$$L = \{8 - 0,05(y_2/y_1)\}(y_2 - y_1) \quad (2.11)$$

dengan

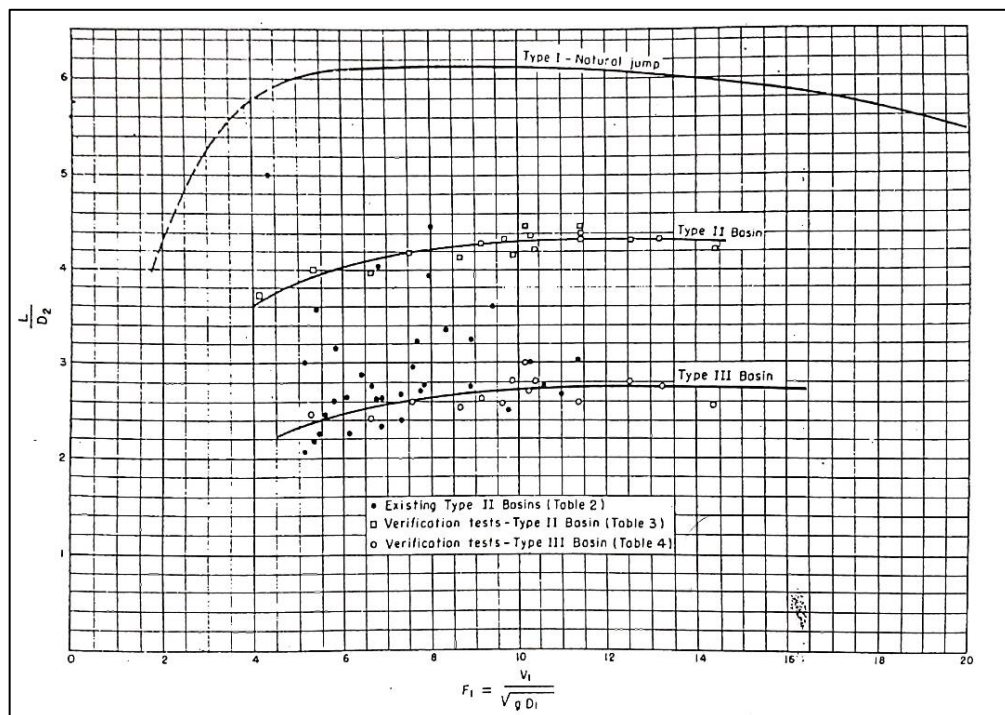
L = panjang loncatan air (m)

y_1 = kedalaman air di hulu loncatan air (m)

y_2 = kedalaman air di hilir loncatan air (m)

- Grafik USBR

Pada peredam energi tipe USBR, panjang lantai dapat dicari dengan menggunakan grafik pada **Gambar 2.8** dengan cara memasukkan nilai Fr saluran yang telah dihitung, sehingga didapatkan nilai L/D_2 , nilai L/D_2 tersebut selanjutnya dikalikan dengan nilai D_2 hasil perhitungan agar didapatkan nilai L .




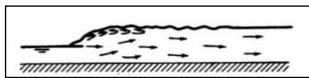
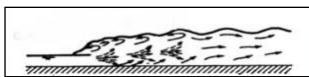
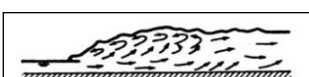

Gambar 2.8 Panjang lantai peredam energi tipe USBR

(Sumber : Kumala, Y.E, 2018)

2.4.4 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). Penggolongan jenis loncatan air terdapat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Tipe loncatan air menurut *USBR*

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

2.5 Model Fisik

Model fisik adalah pembuatan miniatur keadaan sebenarnya ke kondisi yang lebih sederhana untuk mensimulasikan kondisi yang akan terjadi. Pemodelan fisik berbeda dengan model numerik, pada pemodelan fisik parameter-parameter yang akan diuji diwakili dengan perwakilan yang sesungguhnya, contohnya ketika hendak memodelkan banjir di model fisik maka pemodelan banjir yang digunakan pada prototip digunakan banjir juga namun dengan skala yang lebih kecil, hal tersebut berbeda halnya jika pemodelan dilakukan dengan model numerik (matematis), ketika memodelkan kondisi di lapangan seperti banjir, yang akan kita lakukan adalah memasukan persamaan matematis ke dalam model yang kita miliki.

Model fisik dapat diklasifikasikan dalam dua tipe, berdasarkan perbandingan skala yang digunakan yaitu, model distorsi dan model tak distorsi. Pada model tak distorsi nilai perbandingan antara model dan prototip memiliki nilai yang sama, baik dalam arah vertikal maupun horizontal. Sedangkan pada model distorsi perbandingan antara model dan prototip dipisahkan dalam dua skala, yaitu skala yang digunakan ketika memperhitungkan kesebangunan vertikal, dan skala yang digunakan ketika memperhitungkan kesebangunan horizontal.

Berdasarkan gaya yang terjadi, model dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok, yaitu:

1. Model Froude
2. Model Euler
3. Model Reynolds
4. Model Newton
5. Model Weber, dan sebagainya.

Berdasarkan jenis dasarnya, model dapat dibedakan menjadi 2 kelompok, yaitu:

1. Model dasar tetap (*Fixed bed model*)
2. Model dasar berubah atau bergerak (*Moveable bed model*)

2.5.1 Skala Model

Skala model adalah perbandingan antara besaran yang ada di model (kenyataan) dibandingkan dengan besaran yang ada di prototip (laboratorium). Besarnya nilai skala model bergantung kepada hasil penelitian yang diharapkan baik ketelitian maupun data yang ingin didapat, fasilitas yang tersedia di laboratorium, dan waktu serta biaya yang tersedia.

Besaran pokok yang dipakai dalam perhitungan skala model:

- Massa (M)
- Panjang (L)
- Waktu (T)

Skala yang umumnya dipakai dalam pembuatan model fisik

1. Skala Luas (A)

Yaitu perbandingan luas sesungguhnya dengan luas yang di buat prototipnya

$$\text{Luas (A)} = L^2$$

$$nA = nL^2 \quad (2.12)$$

2. Skala Volume (nV)

Yaitu perbandingan antara Volume sesungguhnya terhadap Volume yang akan dibuat prototipnya

$$\text{Volume (V)} = L^3$$

$$nV = nL^3 \quad (2.13)$$

3. Skala Kecepatan

Besarnya gravitasi di prototip dan di laboratorium sama, maka pemodelan untuk kecepatan dapat diturunkan berdasarkan bilangan Froude, di mana bilangan Froude di prototip dan di model harus sama.

$$[Fr]_p = [Fr]_m$$

$$\left[\frac{v_p}{(g \cdot D)^{\frac{1}{2}}} \right]_p = \left[\frac{v_m}{(g \cdot D)^{\frac{1}{2}}} \right]_m$$

$$nv = nL^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

dengan

$$\begin{aligned} Fr &= \text{bilangan Froude} \\ v &= \text{kecepatan (m/s)} \\ g &= \text{percepatan gravitasi (m/s}^2\text{)} \\ D &= \text{kedalaman hidraulik (m)} \end{aligned}$$

4. Skala debit (nQ)

Skala debit didapatkan dari rumus $Q = A \cdot v$

Dalam bentuk skala

$$nQ = nv \cdot nL = nL^{\frac{1}{2}} \cdot nL^2$$

$$nQ = n \cdot L^{\frac{5}{2}} \quad (2.15)$$

5. Skala Waktu (nt)

Skala waktu didapatkan dari rumus $t = L/v$

Dalam bentuk skala

$$nt = nL / nv = nL / nL^{\frac{1}{2}}$$

$$nt = nL^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

2.5.2 Prinsip Kesebangunan Hidraulika

Kesebangunan yang dipakai pada hubungan antara model-prototip berdasarkan parameter tak berdimensi terdiri dari kesebangunan geometris, kinematis, dan dinamis.

1. Kesebangunan geometri,

Kesebangunan geometris tercapai apabila perbandingan antara model dan skala memiliki keterkaitan dalam hal skala, keterkaitan tersebut menjadi prasyarat

utama yang harus dipenuhi oleh skala model. Perbandingan ini dinamakan skala geometris.

$$nL = \frac{\text{panjang di prototip}}{\text{panjang di model}} = \frac{L_p}{L_m}, nL = \text{skala panjang}$$

Yang termasuk dalam kelompok kesebangunan geometris adalah:

- Panjang, lebar
- Tinggi, kedalaman
- Volume, isi
- Luas

2. Kesebangunan kinematis

Kesebangunan kinematis terpenuhi apabila garis aliran serupa secara geometris dan semua besaran yang bergantung waktu mempunyai perbandingan yang konstan. Perbandingan ini disebut skala waktu.

$$nv = \frac{\text{kecepatan di prototip}}{\text{kecepatan di model}} = \frac{V_p}{V_m}$$

Yang termasuk ke dalam kelompok kesebangunan kinematis adalah

- Waktu
- Kecepatan
- Frekuensi
- Percepatan
- Debit

3. Kesebangunan dinamis

Kesebangunan dinamis terpenuhi apabila gaya-gaya yang bekerja antara prototip dan model memiliki nilai perbandingan yang konstan, perbandingan ini disebut dengan skala gaya. Agar kesebangunan dinamis dapat tercapai perbandingan yang dipakai antara prototip dan model adalah sebagai berikut.

$$nF = \frac{\text{gaya di prototip}}{\text{gaya di model}} = \frac{F_p}{F_m}, nF = \text{skala gaya}$$

Yang termasuk dalam kelompok kesebangunan dinamis adalah:

- Massa
- Impuls

- Gaya
- Kerja
- Viskositasi dinamis
- Rapat massa

2.6 Kriteria Perencanaan Hidraulik

2.6.1 Tinggi Bendungan

Tinggi bendungan adalah perbedaan elevasi antara permukaan pondasi dan elevasi mercu bendungan. Permukaan pondasi sendiri adalah dinding yang kedap terhadap air. Apabila pada bendungan tidak memiliki dinding kedap air maka dianggap permukaan pondasi adalah garis perpotongan antara bidang vertikal udik puncak bendungan dengan permukaan pondasi alas bendungan tersebut.

Puncak bendungan sendiri adalah bidang teratas dari suatu bendungan yang tidak dilalui oleh luapan air akibat debit banjir rencana. Apabila pada bendungan terdapat tembok penahan untuk melindungi mercu bendungan dari limpasan ombak, maka elevasi puncak bendungan adalah tinggi jagaan waduk untuk mengantisipasi limpasan akibat ombak, ditambah tinggi air rencana akibat limpasan debit banjir rencana serta elevasi mercu pelimpah.

2.6.2 Tinggi Jagaan (*Free Board*)

Tinggi jagaan adalah perbedaan elevasi antara elevasi permukaan air maksimum rencana terhadap elevasi bendungan. Elevasi permukaan air maksimum rencana biasanya didapat berdasarkan elevasi banjir rencana ditambah dengan potensi kenaikan air akibat ombak.

2.6.3 Bentuk dan Kedalaman Aliran Air di Saluran Pengarah

Pada saluran pengarah, bentuk dan kedalaman aliran air merupakan komponen yang harus diperhatikan. Bentuk dari saluran pengarah mempengaruhi terhadap kecepatan aliran air yang akan mengalir, pada saluran pengarah kecepatan aliran air harus dijaga agar transisi aliran kritis dari mercu pelimpah ke aliran superkritis di bawah mercu pelimpah berlangsung secara baik agar tidak terjadi turbulensi yang mengakibatkan terbentuknya gelombang benturan (*shock wave*). Untuk menghindari hal tersebut “kecepatan aliran di saluran muka dibatasi

maksimum 4 m/s dan lebar salurannya dibuat berangsur-angsur mengecil (Pedoman Kriteria Umum desain Bendungan, 58). Selain itu perlu diperhatikan juga kedalaman aliran air yang ada, “Perbandingan kedalaman air di saluran muka dengan tinggi bangunan pelimpah, berpengaruh pada koefisien limpahan. Bila tinggi air di saluran muka diukur dari mercu pelimpah = h dan tinggi pelimpah = W, maka $W/h \geq 1/5$ ” (Pedoman Kriteria Umum Desain Bendungan, 58).

2.6.4 Jenis Aliran

Jenis aliran berdasarkan distribusi kecepatan yang terjadi, digolongkan atas tiga jenis aliran, yaitu kritis, subkritis, dan superkritis. Penggolongan tersebut dapat diperoleh dengan membandingkan nilai kedalaman aliran yang terjadi (y), atau juga nilai bilangan Froude (F_r) pada aliran serta kecepatan aliran yang terjadi (V). Kriteria yang digunakan ketika penggolongan jenis aliran diperoleh dengan cara sebagai berikut.

Kriteria aliran subkritis.

$$y_n > y_c \text{ atau } F_r < 1 \text{ atau } V_n > V_c$$

Kriteria aliran kritis.

$$y_n > y_c \text{ atau } F_r = 1 \text{ atau } V_n = V_c$$

Kriteria aliran superkritis.

$$y_n > y_c \text{ atau } F_r > 1 \text{ atau } V_n < V_c$$

Rumus bilangan Froude diperoleh pada rumus 2.7, sedangkan rumus kedalaman normal dan kedalaman kritis diperoleh berdasarkan rumus berikut.

Kedalaman Kritis (y_c)

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (2.17)$$

dengan

y_c = kedalaman kritis aliran (m)

q = debit per meter lebar (m^2/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Kedalaman normal (y_n)

$$y_n = \frac{Q}{b \cdot V} \quad (2.18)$$

dengan

y_n = kedalaman normal aliran (m)

Q = debit aliran (m^3/s)

b = lebar saluran (m)

v = kecepatan aliran (m/s)

Kecepatan kritis aliran (V_c)

$$V_c = \sqrt{g \cdot D_c} \quad (2.19)$$

dengan

V_c = kecepatan kritis aliran (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

D_c = Kedalaman hidraulik kritis pada aliran (m)

Kecepatan normal aliran (V_n)

$$V_n = \frac{Q}{b \cdot v} \quad (2.20)$$

dengan

V_n = kecepatan normal aliran (m/s)

Q = debit aliran (m^3/s)

b = lebar saluran (m)

V = kecepatan aliran (m/s)