

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Bendungan

Bendungan adalah bangunan yang dibuat dengan tujuan untuk menampung air yang dibuat untuk memenuhi berbagai keperluan masyarakat. Menurut Peraturan Pemerintah No. 37 Tahun 2010 tentang bendungan, bendungan adalah bangunan yang berupa urugan tanah, urugan batu, beton, dan atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk. Berikut adalah salah satu gambaran bendungan yang ada di Indonesia seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar 2.1**.



**Gambar 2.1** Bendungan Jati Gede

Sumber: *Database* Pembangunan Bendungan, 2016

Bendungan merupakan serangkaian struktur kompleks yang terdiri dari struktur bangunan utama dan struktur bangunan pelengkap. Struktur bangunan utama bendungan terdiri dari badan bendungan sedangkan struktur bangunan pelengkapnya terdiri dari bangunan pelimpah, pintu air, bangunan pengeluaran, jalan masuk, jalan hantar, dan bangunan prasarana.

## 2.2 Bangunan Pelimpah

Bangunan pelimpah merupakan bangunan hidraulik yang digunakan untuk melindungi kesatuan bangunan pada bendungan. Bangunan pelimpah berfungsi untuk membuang kelebihan air pada bendungan sehingga terhindar dari melimpasnya air pada puncak bendungan (*overtopping*). Pengendalian pembuangan air pada pelimpah dibedakan menjadi dua jenis yaitu pelimpah berpintu (*gated spillway*) dan pelimpah bebas (*free overflow spillway*) yang cukup dikendalikan oleh mercu pelimpah itu sendiri.

Dalam beberapa kasus tertentu memungkinkan juga untuk merencanakan bangunan campuran (sebagian berpintu dan sebagian tak berpintu). Kondisi ini terjadi apabila bangunan dibuat di sungai yang sangat lebar dengan perbedaan debit yang besar, atau bangunan dibuat di sungai dengan dasar air normal yang sempit tetapi memiliki bantaran lebar yang digunakan jika harus mengalirkan banjir tinggi. Berikut merupakan salah satu contoh bangunan pelimpah yang ada di Indonesia yang ditunjukkan oleh **Gambar 2.2**.



**Gambar 2.2** Bangunan pelimpah berpintu Bendungan Sei Gong di Kepulauan Riau

Sumber: Media Indonesia, 2018

Kapasitas suatu pelimpah didesain menggunakan banjir dengan kala ulang tertentu sesuai dengan pedoman yang berlaku. Berikut merupakan beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam mendesain bangunan pelimpah, seperti:

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

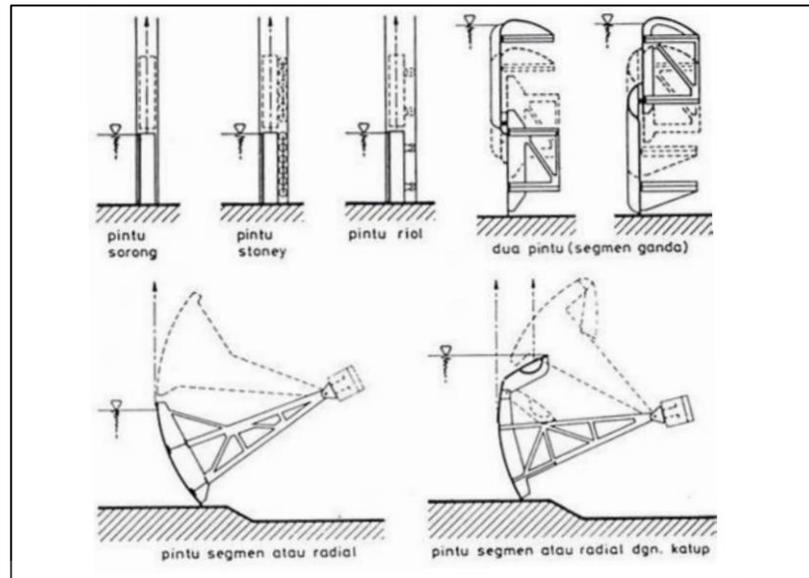
Kondisi daerah hilir saat pelepasan air banjir juga perlu mendapatkan perhatian khusus, terutama bila cukup padat populasinya (resiko sangat tinggi).

Bangunan pelimpah terdiri dari beberapa bagian utama di antara lain adalah pintu (*gate*), saluran pengarah aliran (*control structures*), saluran pengatur, saluran peluncur (*chute, discharge carrier, flood way*), dan bangunan peredam energi (*energy dissipator*).

### 2.2.1 Pintu (*Gate*)

Bangunan pelimpah berpintu berfungsi untuk mengatur debit yang akan dialirkan dari bendungan, sehingga perancangan dimensi sebuah pintu dan cara pengoperasiannya harus sangat di perhatikan. Pelimpah berpintu ini paling sedikit harus memiliki 2 pintu agar bangunan itu tetap dapat berfungsi bila salah satu pintunya rusak. Oleh karena itu bangunan ini harus teruji keamanannya saat mengalirkan debit maksimum apabila terjadi kerusakan pada salah satu pintunya.

Dalam pembuatan sebuah pelimpah berpintu harus dirancang dalam kondisi kritis dimana sebuah pintu akan rusak dalam kondisi tertutup. Ada berbagai jenis pintu yang dapat digunakan diantaranya adalah pintu sorong, pintu rangkap, pintu radial, dan lainnya yang dapat dilihat pada **Gambar 2.3**. Pada pintu radial (pintu segmen) memiliki keuntungan yaitu tidak adanya gaya gesek yang harus diperhitungkan. Oleh karena itu alat-alat angkatnya bisa dibuat kecil dan ringan (Kumala, 2019).



Gambar 2.3 Macam-macam jenis pintu

Sumber: (Kumala, 2019)

### 2.2.2 Saluran Pengarah Aliran

Saluran pengarah aliran bertujuan untuk mengarahkan aliran air agar selalu tetap dalam kondisi hidraulik yang baik. Pada saluran ini kecepatan aliran air yang masuk tidak boleh melebihi 4m/s dan lebar saluran didesain semakin mengecil ke hilir. Kedalaman dasar saluran pengarah aliran harus dibuat 1,5 kali lebih besar, atau sama dengan tinggi rencana limpasan di atas mercu ambang pelimpah.

Perencanaan pengarah aliran tidak memiliki acuan yang digunakan sebagai landasan pembuatannya, sehingga perencanaan saluran ini biasanya didasarkan pada hasil pengujian model hidraulik.

### 2.2.3 Saluran Pengatur

Saluran pengatur merupakan bagian yang berfungsi untuk mengatur debit air yang melewati bangunan pelimpah. Saluran ini digunakan untuk menghantarkan air dari saluran pengarah menuju saluran peluncur.

### 2.2.4 Saluran Peluncur

Saluran peluncur merupakan bagian dari bangunan pelimpah yang berfungsi untuk mengatur air agar tetap mengalir tanpa hambatan dari saluran pengatur menuju bangunan peredam energi. Saluran ini harus dibuat sedemikian agar aliran

merata dengan tidak menimbulkan aliran silang dan gejala kavitasi, juga harus dibuat dengan biaya ekonomis namun tanpa mengurangi faktor keamanannya.

### 2.2.5 Bangunan Peredam Energi

Bangunan peredam energi adalah bagian dari bendungan yang berfungsi untuk meredam energi air yang timbul akibat pembendungan agar aliran air tidak menimbulkan penggerusan setempat yang membahayakan bendungan dan kelengkapannya (Kumala, 2019). Aliran air yang datang dari saluran peluncur merupakan aliran dengan kecepatan tinggi dengan kondisi superkritis, jika aliran ini langsung mengalir kembali ke dalam sungai akan membahayakan kestabilan alur sungai tersebut. Oleh karena itu dibutuhkan bangunan peredam energi untuk memperlambat aliran tersebut dari yang semula berjenis superkritis menjadi aliran subkritis, sehingga energi dan daya gerusan yang besar bisa berkurang hingga mencapai tingkat aliran yang normal kembali dengan adanya bangunan ini. Pada dasarnya upaya untuk mengurangi energi pada suatu aliran air oleh bangunan peredam energi ini adalah sebagai berikut:

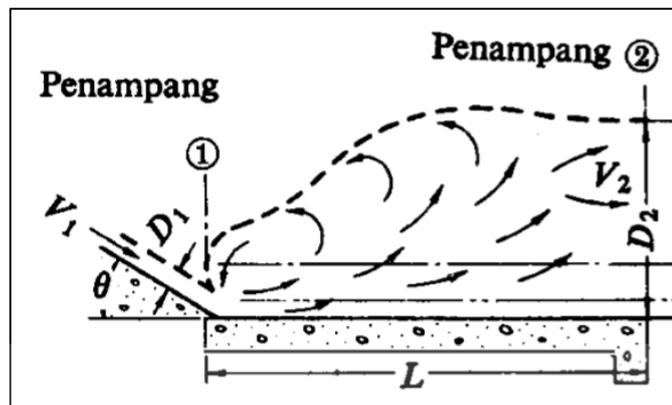
1. Membuat loncatan air (*hydraulic jump*) di dalam ruang olakan.
2. Membuat gesekan antara air dan permukaan dengan menambah kekasaran pada lantai dan dinding struktur salurannya.
3. Mengurangi energi pada air dengan membenturkannya baik itu dengan udara maupun dengan benda fisik agar energinya berpindah ke benda yang ditabraknya tersebut.

Peredam tipe USBR merupakan salah satu jenis bangunan peredam energi, yang dikembangkan oleh *United States Bureau of Reclamation* (USBR). Peredam energi tipe ini mempunyai tembok vertikal dengan lantai yang biasanya panjang dan pada beberapa tipe dilengkapi blok-blok dan ambang hilir biasa atau ambang hilir bergigi. Pada tipe USBR sendiri terbagi lagi menjadi beberapa tipe yang dibedakan berdasarkan alirannya dan kondisi konstruksinya sebagai berikut:

1. USBR tipe I

Pada tipe ini memiliki ruang olakan datar dan bekerja dengan cara melakukan benturan langsung antara aliran air dengan permukaan dasar kolam sehingga

diperlukannya ruang olah yang lebih panjang. Peredam energi tipe ini biasanya berdimensi kecil karena hanya sesuai dipakai untuk debit aliran yang relative rendah ( $Q < 18,5 \text{ m}^3/\text{s/m}$ ), dengan tekanan hidrostatis kecil ( $P_w < 60 \text{ m}$ ), dan bilangan Froude  $< 4,5$ . Peredam energi tipe ini dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.

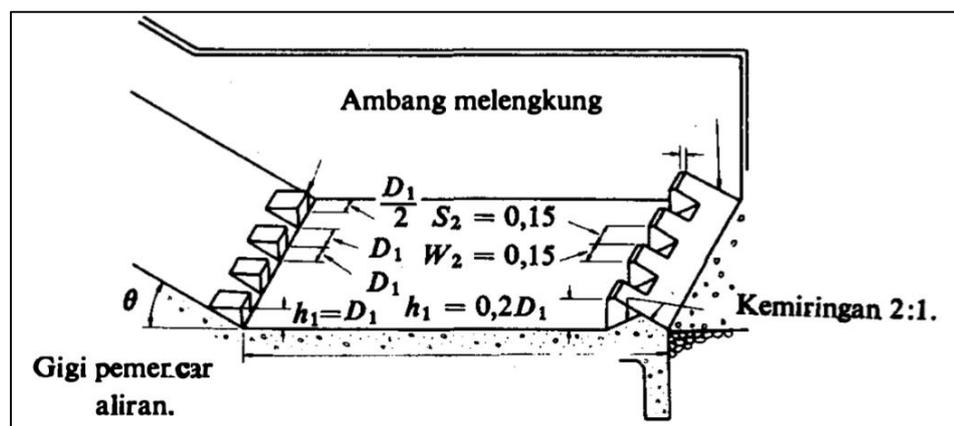


**Gambar 2.4** Peredam Energi USBR Tipe I

Sumber: (Sosrodarsono dan Takeda, 1977)

## 2. USBR tipe II

Pada tipe ini dilengkapi dengan gigi –gigi pemencar di pinggir udik dasar kolam dan ambang bergerigi di bagian hilirnya. Tipe ini cocok untuk aliran dengan tekanan hidraustatis yang tinggi ( $P_w > 60 \text{ m}$ ), dengan debit besar ( $Q > 45 \text{ m}^3/\text{s/m}$ ), dan bilangan Froude  $> 4,5$ . (Kumala, 2019). Peredam energi tipe ini dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.

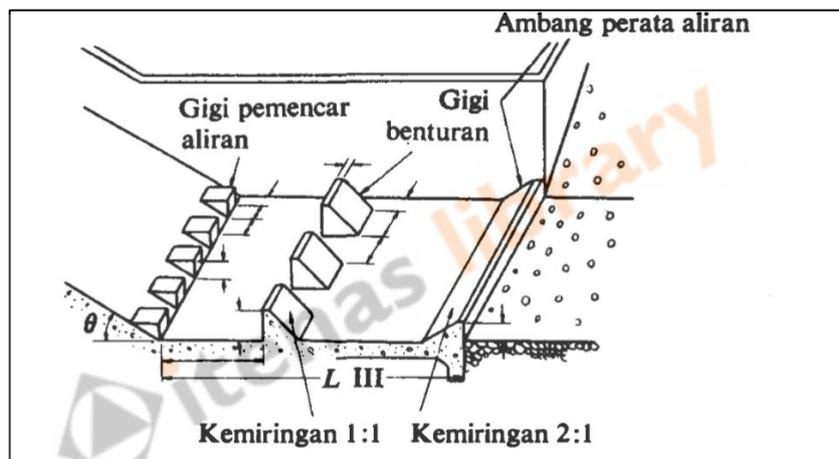


**Gambar 2.5** Peredam Energi USBR Tipe II

Sumber: (Sosrodarsono dan Takeda, 1977)

### 3. USBR tipe III

Tipe ini biasanya digunakan untuk bangunan pelimpah bendungan urugan rendah, pada prinsipnya kerja ruang olakan ini sama dengan tipe II tetapi biasanya digunakan untuk mengalirkan air dengan tekanan lebih rendah, debit yang lebih kecil ( $Q < 18,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ), kecepatan  $< 18 \text{ m/s}$  dan bilangan Froude  $> 4,5$ . Biasanya ruang olakan tipe ini juga dipasang gigi pemancar aliran di tepi udik dasar yang biasa disebut balok muka (*chute blocks*) dan gigi penghadang aliran (gigi benturan) pada dasar ruang olakan yang biasa disebut balok lantai (*floor blocks/baffle blocks*) untuk mengurangi panjang ruang olakan. Peredam energi tipe ini dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.

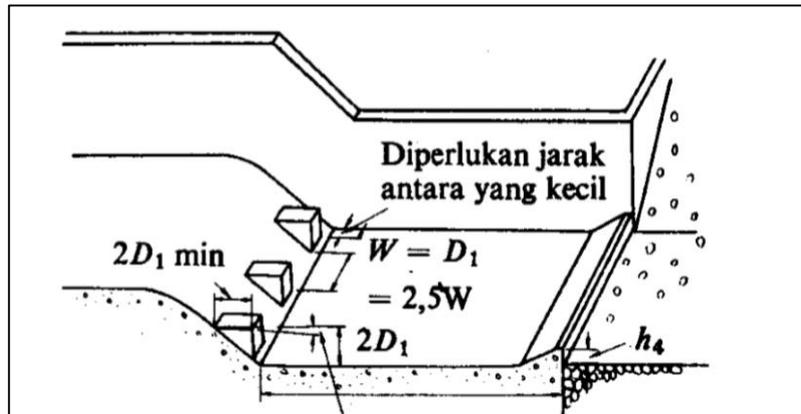


**Gambar 2.6** Peredam energi USBR tipe III

Sumber: (Sosrodarsono dan Takeda, 1977)

### 4. USBR tipe IV

Pada tipe ini ruang olak di desain dengan gigi pemancar balok muka di ujung hulunya yang bertujuan agar meratakan aliran air. Penggunaan tipe ini cocok untuk aliran dengan tekanan hidrostatis yang rendah, debit yang besar, dan untuk aliran super kritis dengan bilangan Froude antara 2,5 - 4,5. (Kumala, 2019). Peredam energi tipe ini dapat dilihat pada **Gambar 2.7**.



**Gambar 2.7** Peredam energi USBR tipe IV

Sumber: (Sosrodarsono dan Takeda, 1977)

Perencanaan peredam energi USBR didasarkan pada nilai bilangan Froude pada kaki bidang miring saluran peluncur. Bilangan Froude (*Froude Number*) merupakan sebuah bilangan yang digunakan untuk menentukan suatu jenis aliran yaitu aliran kritis, superkritis, dan subkritis. Berikut merupakan rumus yang digunakan untuk menghitung bilangan Froude:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times h}} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

- $Fr$  : Bilangan Froude
- $v$  : Kecepatan aliran air (m/s)
- $g$  : Percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )
- $h$  : Kedalaman air (m)

Untuk mengetahui kecepatan aliran air dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$v = \sqrt{2g \times \left(\frac{1}{2} \times H + z\right)} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

- $v$  : Kecepatan aliran air (m/s)
- $g$  : Percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )
- $H$  : Tinggi energi diatas mercu (m)
- $z$  : Tinggi jatuh (m)

Setelah didapatkan bilangan Froude dengan rumus yang ada, maka selanjutnya akan dilakukan perhitungan tinggi konjugasi. Tinggi konjugasi merupakan kedalaman aliran setelah terjadinya loncatan air. Loncatan air sendiri merupakan kejadian dimana aliran superkritis berubah menjadi aliran subkritis. Berikut merupakan rumus yang digunakan untuk menghitung tinggi konjugasi pada suatu bangunan peredam energi:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right] \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana:

- $y_2$  : Kedalaman air di hilir loncatan air (m)
- $y_1$  : Kedalaman air di hulu loncatan air (m)
- $Fr_1$  : Bilangan Froude di hulu loncatan air

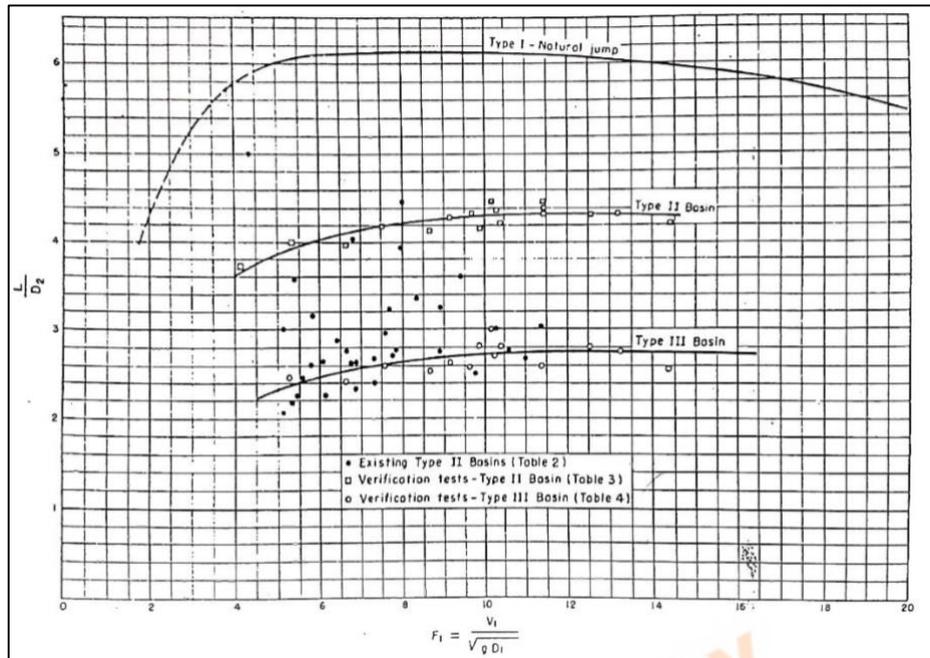
Panjang loncatan hidraulis air merupakan jarak antara aliran superkritis ke aliran subkritis yang terjadi di bagian hilir. Menurut *United States Bureau of Reclamation* (USBR), panjang loncatan air dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$L = An \times (y_2 - y_1) \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

- $L$  : Panjang loncatan hidraulis (m)
- $An$  : Konstanta bernilai (5 – 6,9)
- $y_1$  : Kedalaman air sebelum loncatan air (m)
- $y_2$  : Kedalaman air setelah loncatan air (m)

Untuk mencari panjang loncatan hidraulik juga dapat diperoleh dengan menggunakan grafik yang ditunjukkan pada **Gambar 2.8**.



**Gambar 2.8** Panjang lantai peredam energi tipe USBR

Sumber: (Kumala, 2019)

Tahap Berikutnya setelah mendapatkan bilangan Froude dan panjang lantai merupakan menentukan tipe loncatan air dan tipe peredam energi. 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** Tipe loncatan air berdasarkan bilangan Froude

Jenis Loncatan Air	Bilangan Froude (Fr)	Tampak Loncatan Air
Loncatan air ombak	1-1,7	
Loncatan air lemah	1,7-2,5	
Loncatan air bergoyang	2,5-4,5	
Loncatan air seimbang (tetap)	4,5-9	
Loncatan kuat	$\geq 9$	

### 2.3 Mercu Ogee

Mercu atau pelimpah pada suatu bendungan berfungsi untuk melimpahkan air berlebih dari bendungan. Sehingga, desain mercu harus sesuai dengan kriteria desain karena kapasitas pelimpah bendungan bergantung pada bentuk mercunya. Pada umumnya bentuk mercu yang ada di Indonesia berbentuk bulat dan Ogee. Pemilihan bentuk ini sesuai keperluan desain yang dibutuhkan nantinya.

Mercu Ogee berbentuk tirai luapan bawah dari mercu pelimpah bendungan. Oleh karena itu, mercu ini tidak akan memberikan tekanan subatmosfir pada permukaan mercu sewaktu bendungan mengalirkan air pada debit rencana (Kumala, 2019). Untuk debit yang lebih rendah, air akan memberikan tekanan ke bawah pada mercu. Untuk merencanakan permukaan mercu Ogee digunakan rumus sebagai berikut:

$$\frac{y}{Hd} = \frac{1}{K\left(\frac{x}{Hd}\right)^n} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana:

$x$  dan  $y$  : Koordinat-koordinat permukaan hilir

$Hd$  : Tinggi energi rencana diatas mercu (m)

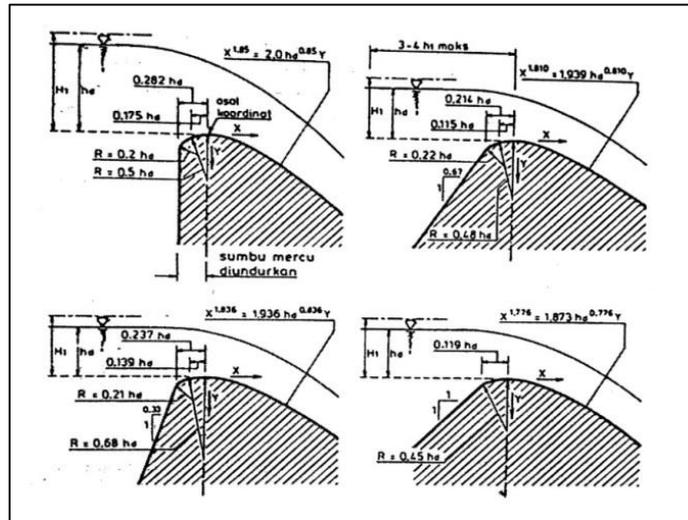
$K$  dan  $n$  : Parameter yang bergantung pada kecepatan dan kemiringan permukaan hilir mercu (**Tabel 2.2**).

**Tabel 2.2** Nilai K dan n

Kemiringan permukaan hilir	K	n
Vertikal	2,000	1,850
3:1	1,936	1,836
3:2	1,939	1,810
1:1	1,873	1,776

Sumber: (Kumala, 2019)

Terdapat berbagai bentuk mercu Ogee berdasarkan kemiringan permukaan hilir seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.9 Bentuk-bentuk mercu Ogee

Sumber: (Kumala, 2009)

Berikut merupakan persamaan untuk mengetahui lebar efektif mercu:

$$B_{eff} = B_n - 2(n \cdot K_p + K_a)H \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

- $B_{eff}$  : Lebar efektif mercu (m)
- $B_n$  : Lebar netto / lebar mercu yang sebenarnya (m)
- $n$  : Jumlah pilar
- $K_p$  : Koefisien kontraksi pada pilar
- $K_a$  : Koefisien kontraksi pangkal bendung
- $H$  : Tinggi energi di udik pelimpah (m)

Selain harus mengetahui lebar mercunya kita juga harus mengetahui tinggi muka airnya agar nantinya dapat menghitung kapasitas limpahnya, berikut merupakan persamaan untuk menghitung tinggi muka air di atas mercu:

$$H = h_u + \frac{Q^2}{((h_u + p)B_{eff})^2 \times 2g} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

- $H$  : Tinggi energi total di atas mercu pelimpah (m)
- $Q$  : Debit aliran (m<sup>3</sup>/s)
- $B_{eff}$  : Lebar efektif mercu (m)

$h_u$  : Tinggi air di atas mercu (m)

$p$  : Tinggi pengempangan (m)

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

Dari persamaan lebar dan tinggi energi yang ada pada mercu maka didapatkan kapasitas limpahan dengan rumus sebagai berikut.

$$Q = \frac{2}{3} \times C_d \times \sqrt{\frac{2}{3}g} \times B_{eff} \times H^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana:

$Q$  : Debit aliran ( $m^3/s$ )

$B_{eff}$  : Lebar efektif mercu (m)

$C_d$  : Koefisien debit

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

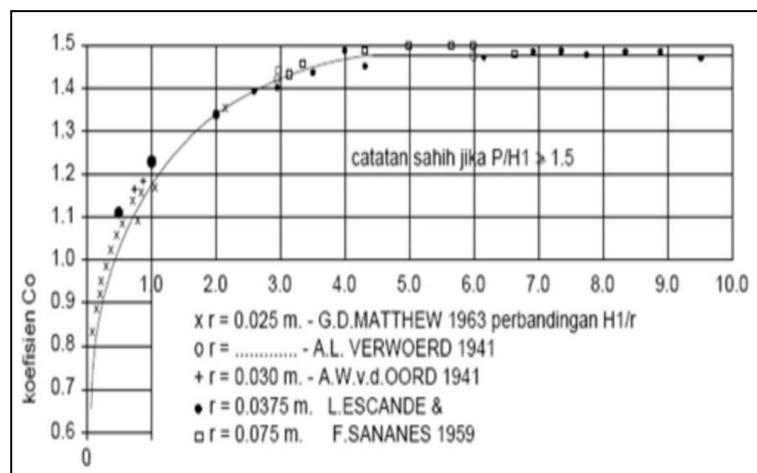
$H$  : Tinggi energi total di atas mercu bendung (m)

Faktor lain yang mempengaruhi suatu kapasitas limpahan adalah koefisien debit, yaitu angka yang menunjukkan hambatan yang terjadi pada saat air mengalir. Koefisien debit  $C_d$  merupakan hasil perkalian dari  $C_0 \times C_1 \times C_2$ .

Nilai  $C_0$  diperoleh berdasarkan fungsi  $H/r$ , terdapat pada **Gambar 2.10**

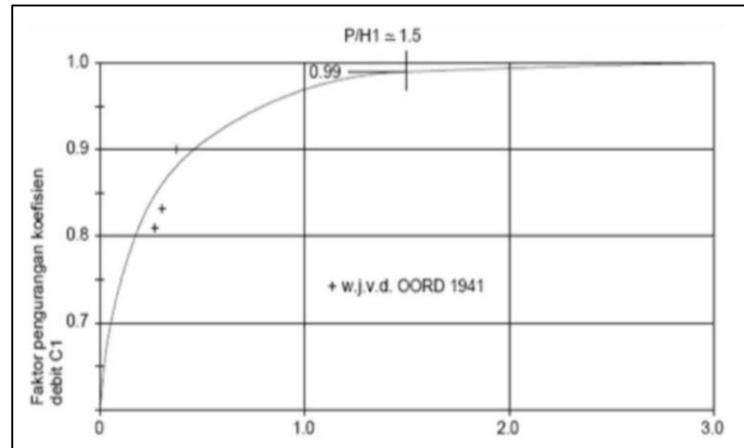
Nilai  $C_1$  diperoleh berdasarkan fungsi  $p/H$ , terdapat pada **Gambar 2.11**

Nilai  $C_2$  diperoleh berdasarkan fungsi  $p/H$  dan kemiringan muka udik mercu, terdapat pada **Gambar 2.12**



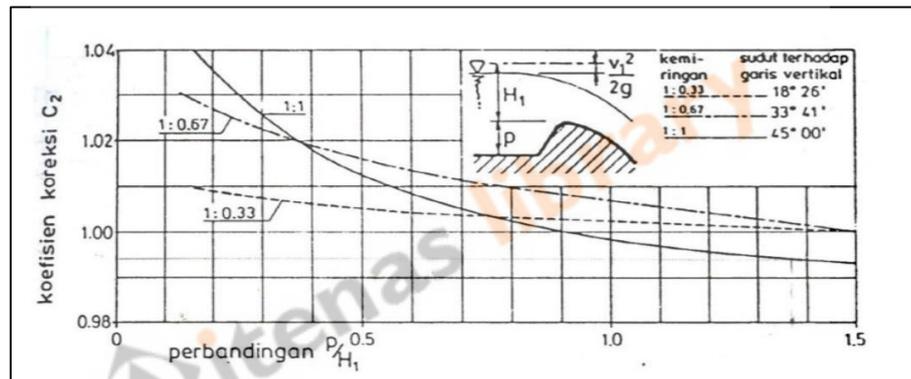
**Gambar 2.10** Nilai koefisien  $C_0$

Sumber: (Kumala, 2019)



Gambar 2.11 Nilai koefisien  $C_1$

Sumber: (Kumala, 2019)



Gambar 2.12 Nilai koefisien  $C_2$

Sumber: (Kumala, 2019)

## 2.4 Uji Model Fisik Hidraulik

Model fisik hidraulik merupakan replika keadaan sebenarnya dari suatu bangunan air di lapangan dengan skala yang lebih kecil. Pengujian model fisik dilakukan untuk mensimulasi perilaku hidraulik yang akan terjadi di lapangan, sehingga kejadian yang ada di model sebangun dengan kondisi sebenarnya.

Skala model ( $n$ ) adalah perbandingan antara ukuran sebenarnya di lapangan dan ukuran di model. Berdasarkan perbandingan skala yang digunakan, model fisik terbagi menjadi 2 jenis yaitu:

### 1. Skala model distorsi (*distorted model*)

Pada model ini perbandingan skala yang dibuat tidak sama antara skala sebenarnya dan skala model. Model jenis ini pada umumnya digunakan jika

prototip mempunyai dimensi horizontal jauh lebih besar dari dimensi vertikal.

2. Skala model tak distorsi (*undistorted model*)

Perbandingan skala pada model jenis ini dibuat sama antara skala horizontal dan vertikalnya, sehingga bentuk dari model tak distorsi lebih mudah diubah kedalam bentuk prototip. Skala besaran dan parameter model tak distorsi ditunjukkan pada **Tabel 2.3**.

**Tabel 2.3** Skala besaran model tak distorsi

Parameter	Lambang Notasi	Skala Besaran
Panjang/Tinggi	L/h	$n_L = n_h$
Volume	V	$n_V = n_h^3$
Debit	Q	$n_Q = n_h^{5/2}$
Kecepatan aliran	v	$n_v = n_h^{1/2}$
Waktu aliran	t	$n_t = n_h^{1/2}$
Diameter butiran	d	$n_d = n_h$
Kekasaran	k	$n_k = n_h$
Koefisien Chezy	C	$n_C = 1$
Koefisien Manning	n	$n_n = n_h^{1/6}$

Dalam merencanakan suatu model fisik terdapat sifat-sifat kesebangunan model yang amat menentukan ketelitian model tersebut. Yang dimaksudkan dengan kesebangunan adalah:

1. Sebangun geometris (sebangun bentuk), merupakan perbandingan antara ukuran sebenarnya (*prototype*) dengan model harus sama besarnya. Perbandingan yang digunakan adalah panjang, luas dan volume.

$$n = \frac{\text{ukuran di prototipe}}{\text{ukuran di model}} = \frac{n_p}{n_m} \dots \dots \dots (2.9)$$

2. Sebangun kinematis (sebangun gerakan), dimana perbandingan yang digunakan adalah waktu, kecepatan dan debit.
3. Sebangun dinamis, yaitu kesebangunan gaya-gaya yang terjadi bila gerakan dan rasio dari massa yang bergerak serta gaya penyebabnya sudah homolog besarnya.

Apabila hubungan antar skala dan kesebangunan telah dipenuhi, maka tingkat ketelitian perlu diperhatikan sehubungan dengan besarnya nilai skala yang

digunakan. Pemilihan skala model umumnya didasarkan pada beberapa pertimbangan sebagai berikut:

1. Tujuan dari pengujian.
2. Ketelitian yang diharapkan.
3. Fasilitas yang tersedia di laboratorium.
4. Waktu dan biaya yang tersedia.

## 2.5 Kriteria Perencanaan Hidraulik

Kriteria perencanaan hidraulik merupakan persyaratan yang digunakan untuk mengetahui apakah hasil pengujian suatu desain dapat dikatakan layak atau tidak.

### 2.5.1 Tinggi Jagaan

Tinggi jagaan direncanakan untuk menghindari limpasan yang terjadi pada elevasi permukaan air saat mengalirkan debit banjir rencana ditambah potensi kenaikan akibat gelombang yang disebabkan oleh angin serta kemungkinan adanya benda terapung (Sudarsono dan Takeda, 1989). Selain itu tinggi jagaan juga dibuat untuk mengantisipasi adanya pengaliran debit abnormal. Batas tinggi jagaan yang baik adalah antara 0,75 sampai 1,5 tergantung dari kurva debit sungai pada bendungan tersebut. Untuk kurva datar tinggi jagaan 0,75 m sudah cukup, tetapi jika memiliki kurva yang curam diperlukan tinggi jagaan 1,5 agar memberikan tingkat keamanan yang sama.

### 2.5.2 Jenis Aliran

Berdasarkan kedalaman saluran, bilangan Froude, kecepatan aliran dan kemiringan saluran, jenis Aliran pada saluran terbuka dapat dibedakan menjadi 3 yaitu:

1. Airan Kritis

Ciri aliran kritis yaitu  $y_n = y_c$  atau  $Fr = 1$  atau  $V = V_c$

2. Aliran Subkritis

Ciri aliran subkritis yaitu  $y_n > y_c$  atau  $Fr < 1$  atau  $V < V_c$

3. Aliran Superkritis

Ciri aliran superkritis yaitu  $y_n < y_c$  atau  $Fr > 1$  atau  $V > V_c$

Berikut merupakan rumus yang digunakan untuk menentukan jenis aliran pada saluran berpenampang segi empat:

1. Kedalaman normal ( $y_n$ )

$$y_n = \frac{Q}{b \cdot v} \dots \dots \dots (2.10)$$

2. Kedalaman kritis ( $y_c$ )

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \dots \dots \dots (2.11)$$

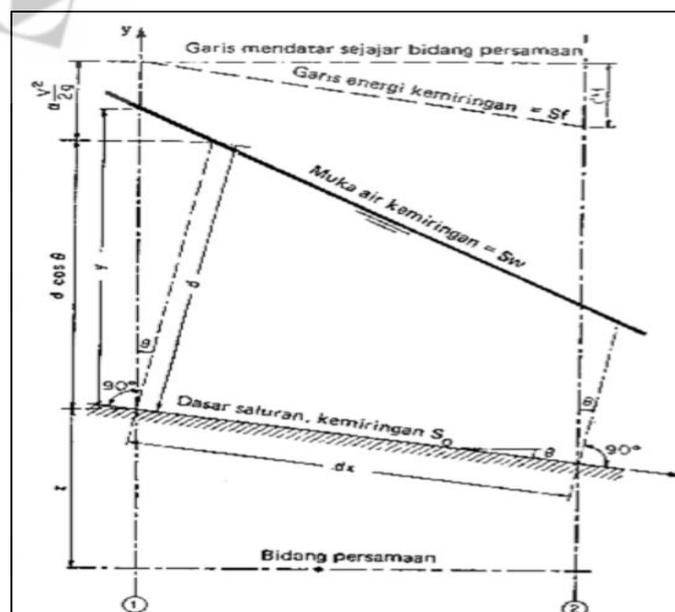
3. Kecepatan normal ( $V$ )

$$v = \frac{Q}{b \cdot y_n} \dots \dots \dots (2.12)$$

4. Kecepatan kritis ( $V_c$ )

$$v_c = \sqrt{g \cdot D_c} \dots \dots \dots (2.13)$$

Berdasarkan laju perubahan kecepatan terhadap jarak, jenis aliran dapat dibedakan menjadi aliran berubah lambat laun (*gradually varied flow*) dan aliran berubah tiba-tiba (*rapidly varied flow*). Aliran berubah lambat laun perubahan kecepatannya terjadi secara *gradual* terhadap jarak, sehingga pengaruh kecepatan pada aliran antara dua potongan yang berdekatan dapat diabaikan (Suripin, 2004).



**Gambar 2.13** Penurunan persamaan aliran berubah lambat laun

(Sumber: Triatmodjo, 2003)

Penurunan persamaan aliran berubah lambat laun ditunjukkan pada **Gambar 2.13**. Sehingga total energi dapat dinyatakan dengan persamaan 2.14.

$$H = z + d \cos \theta + \alpha \frac{v^2}{2g} \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana:

- $H$  = Tinggi tekan energi total (m)
- $z$  = Jarak vertikal dasar saluran terhadap garis referensi (m)
- $d$  = Kedalaman aliran dihitung terhadap garis tegak lurus (m)
- $\theta$  = Sudut kemiringan dasar saluran
- $\alpha$  = Koefisien energi
- $v$  = Kecepatan aliran (m/s)
- $g$  = Percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

Pada penelitian ini nantinya perhitungan profil aliran akan menggunakan metode tahapan standar (*standard step method*). Metode ini dikembangkan dari persamaan energi total dari aliran pada saluran terbuka (Suripin, 2004). Dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + hf \dots \dots \dots (2.15)$$

$$E_1 = E_2 + hf \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana:

- $hf$  = Kehilangan energi karena gesekan saluran (m)
- $E$  = Energi total