

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Analisis Hidrologi

Perancangan bendung memerlukan perhitungan hidrologi untuk menentukan debit banjir rancangan. Pemilihan debit banjir rancangan sangat bergantung pada analisa statistik dari curah hujan, luas daerah pengaliran (DAS), tata guna lahan, dan karakteristik dari daerah pengaliran tersebut.

3.1.1 Data Curah Hujan Yang Hilang

Pengisian curah hujan yang hilang dilakukan dengan *Reciprical method*.

Reciprical method ditunjukkan oleh rumus berikut :

$$P_A = \frac{\frac{PB}{dAB^2} + \frac{PC}{dAC^2} + \frac{PD}{dAD^2}}{\frac{1}{dAB^2} + \frac{1}{dAC^2} + \frac{1}{dAD^2}} \quad (3-1)$$

Keterangan :

PA : data hujan yang dicari
PB, PC, PD : data hujan stasiun yang menjadi patokan
dAB, dAC, dAD : jarak masing-masing stasiun ke stasiun A

3.1.2 Analisis Curah Hujan Rerata

Curah hujan adalah jumlah air yang jatuh di permukaan bumi selama periode tertentu dan diukur dengan satuan tinggi (mm). Besarnya curah hujan tercatat pada stasiun hujan di wilayah-wilayah tertentu. Metode yang dapat digunakan untuk mencari curah hujan rata-rata adalah metode Aritmatika/Rata-Rata Aljabar dan metode Poligon *Thiessen*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode Poligon *Thiessen*. Pengukuran curah hujan dengan metode ini

dilakukan dengan menjumlahkan curah hujan di beberapa stasiun yang termasuk dalam suatu DAS kemudian dibagi dengan jumlah stasiun yang ada.

$$\bar{P} = \frac{A_1}{A} \times P_1 + \frac{A_2}{A} \times P_2 + \frac{A_3}{A} \times P_3 + \frac{A_n}{A} \times P_n \quad (3-2)$$

Keterangan :

P : curah hujan rata – rata (mm)

A : luas DAS total (km²)

P_{1 s/d n} : curah hujan stasiun hujan 1 sampai n (mm)

A_{1 s/d n} : luas sub DAS yang diwakili masing – masing stasium (km²)

3.1.3 Analisis Frekuensi

Analisis ini digunakan untuk mengetahui probabilitas curah hujan di masa yang akan datang berdasarkan karakteristik kejadian hujan di masa lalu. Secara umum terdapat empat metode untuk mencari distribusi probabilitas tersebut yakni metode distribusi Normal, metode Log Normal, metode Gumbel, dan metode Log Pearson III. Parameter statistik yang digunakan dalam ke-empat metode tersebut adalah sebagai berikut :

- Rata-Rata

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3-3)$$

- Standar Deviasi

$$Sd = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-4)$$

- Koefisien Variansi

$$Cv = \frac{Sd}{\bar{X}} \quad (3-5)$$

- Koefisien *Skewness*

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)S_d^3} \quad (3-6)$$

- Kurtosis

$$C_k = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)(n-3)S_d^4} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4 \quad (3-7)$$

Keterangan :

n : jumlah data

X_i : data ke-i

Penentuan jenis distribusi yang digunakan sesuai dengan syarat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Karakteristik Jenis Distribusi

No.	Distribusi	Persyaratan
1.	Normal	$C_s \approx 0$ $C_k \approx 3$
2.	Log Normal	$C_s \approx C_v^3 + 3C_v$ $C_k \approx C_v^8 + 6C_v^6 + 15C_v^4 + 16C_v^2 + 3$
3.	Gumbel	$C_s \approx 1,14$ $C_k \approx 5,4$
4.	Log Pearson III	Selain dari nilai di atas

Sumber : Triatmodjo (2013)

Rumus untuk mendapatkan hujan rencana kala ulang metode Log Pearson III

adalah

$$\text{Log}X_T = \text{Log}\bar{X} + k_1 \cdot S_d \quad (3-8)$$

Keterangan :

X_T : hujan rancangan dalam periode ulang n tahun (mm)

\bar{X} : hujan rata-rata (mm)

k_1 : koefisien kemencengan distribusi Log Pearson III (Lampiran 2)

S_d : standar deviasi

3.1.4 Pengujian Kesesuaian Jenis Sebaran

Uji kesesuaian data dilakukan untuk menentukan apakah distribusi frekuensi dari sampel data cocok dengan jenis sebaran distribusi yang dipilih. Pengujian dapat meliputi uji Chi-Kuadrat (*chi-square*) dan *Smirnov-Kolmogorov*.

1. Uji Chi-Kuadrat

Uji ini merupakan uji statistik untuk mengukur kecocokan antara dua variabel dengan mengikuti kurva distribusi Chi-Kuadrat. Cara perhitungannya adalah sebagai berikut

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (3-9)$$

Keterangan :

- X : parameter chi-kuadrat hitung
- k : jumlah kelas
- O_i : nilai pengamatan pada kelas ke-i
- E_i : nilai teoritis pada kelas ke-i

Uji kecocokan dapat diterima jika nilai X^2 yang dihitung kurang dari nilai X^2 pada tabel distribusi Chi-Kuadrat (Lampiran 3).

2. Uji *Smirnov-Kolmogorov*

Uji ini digunakan untuk menentukan kecocokan antara dua sampel data berdasarkan distribusi probabilitas. Hasil dapat diterima jika jarak penyimpangan (Δ_{\max}) lebih kecil dari Δ_{kritik} pada tabel (Lampiran 4).

$$\Delta_{\max} = \max|P(x) - P_o(x)| \quad (3-10)$$

Keterangan :

- Δ_{\max} : jarak penyimpangan terbesar
- P(x) : probabilitas sampel
- P_o(x) : probabilitas teoritis

3.1.5 Perhitungan Debit Banjir Rencana

Metode yang digunakan untuk menghitung debit banjir rencana adalah metode Haspers, dengan ketentuan luas Daerah Aliran Sungai (DAS) harus kurang dari 100 km². Persamaannya adalah sebagai berikut

$$Q_{\max} = \gamma \times \beta \times f \times q \quad (3-11)$$

Keterangan :

- Q_{\max} : debit banjir rencana (m³/s)
 γ : koefisien aliran
 β : koefisien reduksi
 f : luas daerah aliran (km²)
 q : hujan maksimum (m³/km²/s)

3.2 Analisis Hidraulika

3.2.1 Perencanaan Mercu Bendung

1. Menentukan Tinggi Muka Air Banjir di Atas Mercu Bendung

Tinggi muka air banjir dicari dengan menggunakan sistem *trial and error* berdasarkan rumus berikut

$$Q_d = C_d \times 2/3 \times \sqrt{2/3 \times g} \times B_e \times H_e^2 \quad (3-13)$$

Keterangan :

- Q_d : debit banjir sungai rencana (m³/det)
 C_d : koefisien debit ($C_d = C_0 C_1 C_2$)
 g : percepatan gravitasi (m/det²) ($g = 9,8$)
 B_e : lebar efektif mercu bendung (m)
 H_e : tinggi energi (m)

Koefisien debit (C_d) merupakan hasil uraian dari :

- C_0 : ketetapan = 1,3
- C_1 : didapat dari perbandingan H_e/H_d dan p/H_d (Lampiran 5)

- C_2 : didapat dari perbandingan p/H_e terhadap kemiringan muka hulu bendung (Lampiran 6)

2. Menentukan Dimensi Mercu Bendung

Mercu bendung didesain menjadi tipe ogee dengan rumus permukaan mengikuti persamaan berikut:

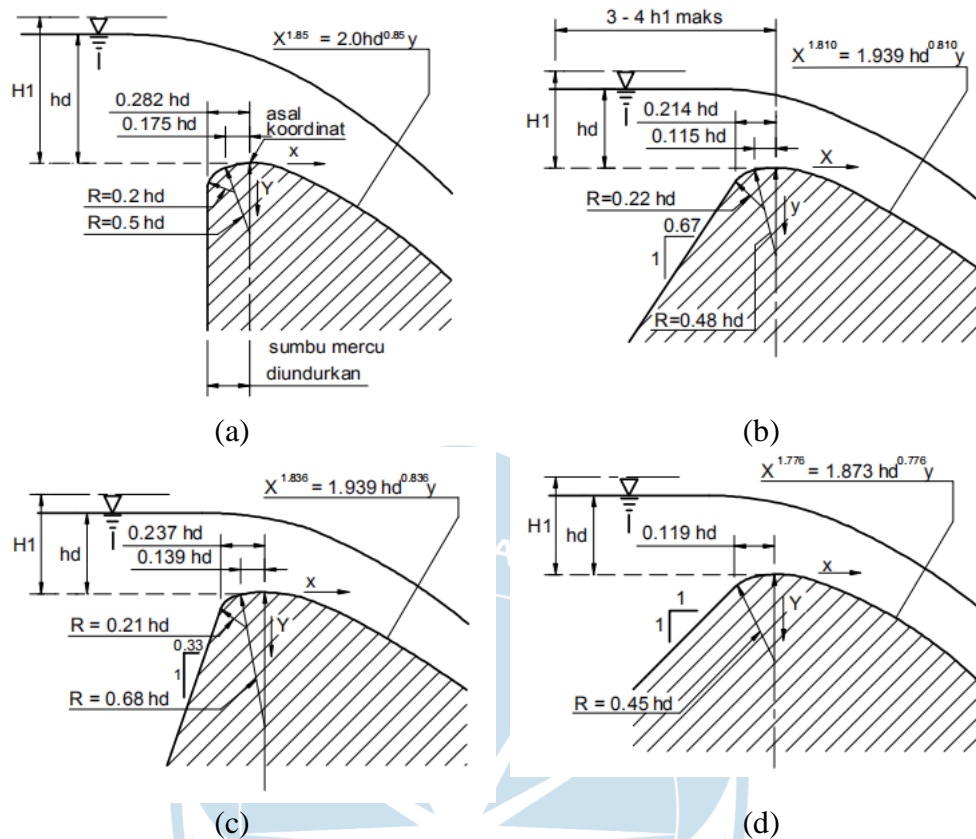
$$\frac{Y}{H_d} = \frac{1}{K} \left[\frac{X}{H_d} \right]^n \quad (3-14)$$

X dan Y adalah koordinat permukaan hilir dan H_d adalah tinggi energi rencana di atas mercu. Harga K dan n adalah parameter sesuai kemiringan permukaan belakang seperti pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2. Harga K dan n untuk Berbagai Kemiringan

	Kemiringan permukaan hulu	K	n
a	vertikal	2	1,850
b	3 : 1	1,936	1,836
c	3 : 2	1,939	1,810
d	3 : 3	1,873	1,776

Sumber : KP-02,1986



Sumber : KP-02,1986

Gambar 3.1. Bentuk-Bentuk Bendung Mercu Ogee

3.2.2 Perencanaan Pelimpah Bertangga

1. Menentukan jenis aliran

Pelimpah bertangga umumnya dirancang pada kondisi *skimming flow*.

Skimming flow pada pelimpah bertangga terjadi saat

$$\frac{h}{d_c} < \frac{7}{6} (\tan\theta)^{1/6} \quad (3-15)$$

Berlaku untuk $5,7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$

$$\frac{h}{d_c} < \frac{1}{(1,2-0,325 \tan\theta)} \quad (3-16)$$

Berlaku untuk $3,4^\circ < \theta < 60^\circ$

Keterangan :

h : tinggi anak tangga (m)

d_c : kedalaman kritis (m) = $d_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot B e^2}}$

θ : sudut kemiringan pelimpah

2. Menentukan titik awal pemasukan udara

Titik awal pemasukan udara atau yang biasa disebut *inception point* didefinisikan sebagai titik awal dimana udara dari atmosfer masuk ke dalam air. Ini ditandai dengan adanya air putih (*white waters*) dalam aliran. Dalam mendesain pelimpah bertangga, lokasi *inception point* perlu diperhitungkan untuk memastikan bahwa aliran mengalami aerasi sebelum mencapai hilir bendung. Titik awal pemasukan udara dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\frac{L_1}{h \cdot \cos \theta} = 9,719 \cdot (\sin \theta)^{0,0796} \cdot \left(\frac{q_w}{\sqrt{g \cdot \sin \theta \cdot (h \cdot \cos \theta)^3}} \right)^{0,713} \quad (3-17)$$

Rumus di atas berlaku untuk $27^\circ < \theta < 53^\circ$

Keterangan :

L_1 : jarak titik awal pemasukan udara dihitung dari puncak mercu (m)

θ : sudut kemiringan pelimpah

q_w : debit per satuan panjang (m^2/s)

g : percepatan gravitasi (m/det^2) ($g = 9,8$)

3. Menentukan kedalaman air setelah *inception point*

Pengaruh aerasi (masuknya udara ke dalam air) berdampak terhadap kedalaman air setelah *inception point*. Kedalaman air yang perlu diperhitungkan adalah kedalaman air bersih (y_{cw}). Saat kondisi $L/L_i \geq 1$, kedalaman air bersih (y_{cw}) adalah sama dengan kedalaman air pada *inception point* (d_i).

$$\frac{d_i}{k_s} = \frac{y_{cw}}{k_s} = 0,34 (\sin \theta)^{0,13} F_*^{0,62} \quad (3-18)$$

dengan, $k_s = h \cos\theta$ dan $F_* = q/\sqrt{g(\sin\theta)k_s^3}$. Mengetahui nilai $d_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot Be^2}}$ maka

nilai y_{cw} dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{y_{cw}}{d_c} = 0,34 \left(\frac{h}{d_c}\right)^{0,063} (\cos\theta)^{0,063} (\sin\theta)^{-0,18} \quad (3-19)$$

Rumus di atas berlaku untuk $L/L_i \geq 1$; $0,035 \leq h/d_c \leq 1,1$; dan $10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$.

Keterangan :

- y_{cw} : kedalaman air bersih (m)
- L : panjang pelimpah dari puncak mercu hingga ujung pelimpah (m)
- L_i : jarak titik awal pemasukan udara dihitung dari puncak mercu (m)
- h : tinggi anak tangga (m)
- θ : sudut kemiringan pelimpah
- d_c : kedalaman kritis (m)
- q : debit per satuan panjang (m^2/s)
- g : percepatan gravitasi (m/det^2) ($g = 9,8$)

4. Kehilangan energi pada pelimpah bertangga

Kehilangan energi dihitung dengan menggunakan rumus

$$\Delta H = H_0 - H \quad (3-20)$$

$$H_0 = y_0 + V_0^2/2g \quad (3-21)$$

$$H = y_{cw} \cos\theta + \alpha(V^2/2g) \Delta H = H_0 - H \quad (3-22)$$

Sedangkan kehilangan energi relatif dihitung berdasarkan persamaan berikut

$$\text{Kehilangan energi relatif tangga} = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (3-23)$$

Keterangan :

- ΔH : kehilangan energi (m)
- H_0 : tinggi energi di atas ambang (m)
- H : tinggi energi di hilir bendung (m)
- y_0 : ketinggian air dari atas datum (m)

- y_{cw} : kedalaman air bersih (m)
 V_0 : kecepatan awal aliran (m/det)
 V : kecepatan awal loncatan (m/det) ($V = q/y_{cw}$)
 θ : sudut kemiringan pelimpah
 t : koefisien energi ($\alpha = 1,025 (h/dc)^{-0,128 \sin \theta}$)
 g : percepatan gravitasi (m/det²) ($g = 9,8$)

3.2.3 Kolam Olak

Penentuan tipe kolam olak didasarkan pada besarnya energi di hilir bendung, yang dinyatakan dengan *Froude Number* (Fr) (KP-02, 1986).

Pengelompokan tipe kolam olak berdasarkan *Froude Number* dibagi menjadi :

- a. Untuk $Fr \leq 1,7$ tidak diperlukan kolam olak.
- b. Untuk $1,7 < Fr \leq 2,5$, diperlukan kolam olak. Pada umumnya kolam olak dengan ambang ujung dapat bekerja dengan baik.
- c. Untuk $2,5 < Fr \leq 4,5$, diperlukan kolam olak. Penggunaan blok USBR tipe IV cocok untuk mengurangi energi pada kisaran Fr ini.
- d. Untuk $Fr \geq 4,5$ diperlukan kolam olak. Kolam olak yang cocok adalah USBR tipe III.

Nilai bilangan Froude dapat dihitung berdasarkan rumus berikut

$$Fr = \frac{v_1}{\sqrt{gy}} \quad (3-24)$$

Keterangan :

Fr : bilangan Froude

v_1 : kecepatan awal loncatan (m/det) ($V=q/y_{cw}$ untuk pelimpah bertangga)

y : kedalaman air di awal locatan (m) ($y=y_{cw}$ untuk pelimpah bertangga)

g : percepatan gravitasi (m/det²) ($g = 9,8$)

Kecepatan awal loncatan dihitung menggunakan persamaan berikut

$$v_1 = \sqrt{2g(0,5H_1+z)} \quad (3-25)$$

Keterangan :

- v_1 : kecepatan awal loncatan (m/det)
 g : percepatan gravitasi (m/det²) ($g = 9,8$)
 H_1 : tinggi energi di atas ambang (m)
 z : tinggi jatuh (m)

Dengan $q = v_1 y_1$, rumus untuk kedalaman konjugasi dalam loncat air adalah :

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1+8Fr^2} - 1 \right) \quad (3-26)$$

Keterangan :

- y_1 : kedalaman air di awal loncatan air (m)
 y_2 : kedalaman konjugasi (m)
 Fr : bilangan Froude

Kehilangan energi pada kolam olak dihitung berdasarkan persamaan berikut

$$\Delta H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_2 y_1} \quad (3-27)$$

Panjang kolam olak dihitung berdasarkan persamaan berikut

$$L_j = 5(n + y_2) \quad (3-28)$$

$$n = y_1 \times \frac{18 + Fr_1}{18} \quad (3-29)$$

Keterangan :

- L_j : panjang kolam olak (m)
 y_1 : kedalaman air di awal loncatan air (m)
 y_2 : kedalaman konjugasi (m)
 Fr_1 : bilangan Froude untuk kecepatan awal loncat 1

Kehilangan energi relatif di kolam olak dihitung berdasarkan persamaan berikut

$$\text{Kehilangan energi relatif} = \frac{\Delta H}{E_1} \quad (3-30)$$

dimana E_1 adalah $\frac{v_1^2}{2g}$

3.3 Analisis Stabilitas

Analisis stabilitas dihitung berdasarkan gaya-gaya yang bekerja pada struktur bendung. Gaya-gaya yang bekerja pada bangunan bendung dan mempunyai arti penting dalam perencanaan adalah :

- (a) Berat sendiri bangunan
- (b) Gaya gempa
- (c) Gaya hidrostatis
- (d) Gaya angkat (uplift)
- (e) Gaya sedimen dan tekanan tanah

Perhitungan gaya-gaya tersebut menghasilkan angka aman terhadap bahaya-bahaya yang mungkin dapat terjadi.

3.3.1 Berat Sendiri Bangunan

Berat bangunan bergantung pada bahan yang digunakan untuk membuat bangunan tersebut. Harga berat volume yang dapat digunakan dalam perencanaan adalah sebagai berikut :

pasangan batu kali = $22 \text{ kN/m}^3 (\approx 2200 \text{ kgf/m}^3)$

beton tumbuk = $23 \text{ kN/m}^3 (\approx 2300 \text{ kgf/m}^3)$

beton bertulang = $24 \text{ kN/m}^3 (\approx 2400 \text{ kgf/m}^3)$

3.3.2 Gaya Gempa

Faktor mengenai beban gempa didasarkan pada peta Indonesia yang menunjukkan berbagai daerah dan risiko. Faktor minimum yang dipertimbangkan adalah 0,1g. Faktor ini hendaknya dipertimbangkan dengan cara mengalikannya dengan massa bangunan sebagai gaya horizontal menuju ke arah hilir.

Koefisien gempa dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$a_d = n(a_c \times z)^m \quad (3-31)$$

$$E = \frac{a_d}{g} \quad (3-32)$$

Keterangan :

- a_d : percepatan gempa rencana, (cm/det²)
- n, m : koefisien untuk jenis tanah (lihat Tabel 3.3)
- a_c : percepatan kejut dasar, (cm/det²) (harga per periode ulang lihat Tabel 3.4)
- E : koefisien gempa
- g : percepatan gravitasi (m/det²) ($g = 9,8$)
- z : faktor yang bergantung kepada letak geografis (lihat Tabel 3.5)

Tabel 3.3. Koefisien Jenis Tanah

Jenis Tanah	n	m
Batu	2,76	0,71
Diluvium	0,87	1,05
Aluvium	1,56	0,89
Aluvium lunak	0,29	1,32

Sumber : KP-06,1986

Tabel 3.4. Periode Ulang dan Perencanaan Kejut Dasar Gempa

Periode Ulang (tahun)	a_c
20	85
100	160
500	225
1000	275

Sumber : KP-06,1986

Tabel 3.5. Koefisien Zona Gempa

Zona	Koefisien Zona (z)
A	0,10-0,30
B	0,30-0,60
C	0,60-0,90
D	0,90-1,20
E	1,20-1,40
F	1,40-1,60

Sumber : KP-06,1986

3.3.3 Gaya Hidrostatik

Gaya hidrostatik merupakan tekanan air yang bekerja secara tegak lurus terhadap permukaan air. Gaya hidrolis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_h = \tau_w \times z \quad (3-33)$$

Keterangan :

P_h : gaya hidrostatik (kN/m^2)

τ_w : berat volume air (kN/m^3)

z : jarak dari permukaan air (m)

3.3.4 Gaya Angkat (*Uplift*)

Gaya angkat pada pondasi dapat ditemukan dengan membuat jaringan aliran (*flownet*), atau dengan asumsi yang digunakan oleh Lane untuk teori angka rembesan. Dalam teori angka rembesan Lane, bidang horizontal memiliki daya tahan terhadap rembesan 3 kali lebih lemah dibandingkan dengan bidang vertikal.

Gaya angkat pada titik x di dasar bendung dapat dirumuskan menjadi:

$$P_x = H_x - (L_x/L)\Delta_H \quad (3-34)$$

$$L_x = L_v + 1/3 L_H \quad (3-35)$$

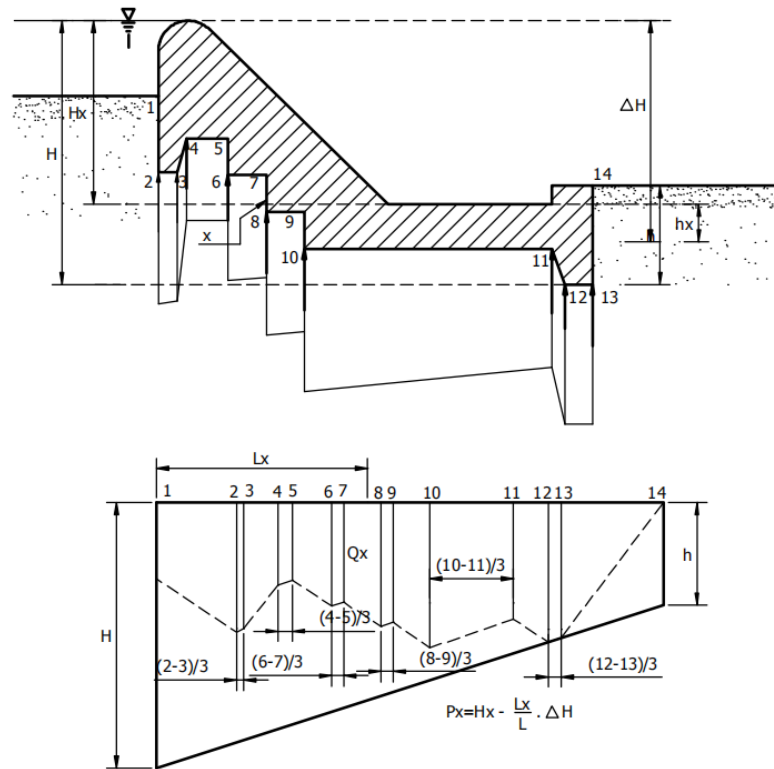
Keterangan :

P_x : gaya tekanan ke atas di titik x (kg/m)

H_x : tinggi energi di udik bendung (m)

L_x : jarak sepanjang bidang kontak dari udik sampai titik x (m)

- L : panjang total bidang kontak (m)
 ΔH : beda tinggi energi (m)
 L_v : panjang bidang vertikal (m)
 L_H : panjang bidang horizontal



Sumber : KP-02,1986

Gambar 3.2. Gaya Angkat pada Pondasi Bendung

3.3.5 Gaya Sedimen dan Tekanan Tanah

Tekanan lumpur yang bekerja terhadap muka hulu bendung dihitung menggunakan rumus berikut :

$$P_s = \frac{\tau_s h^2}{2} \frac{1 - \sin\theta}{1 + \sin\theta} \quad (3-36)$$

Jika sudut gesekan dalam adalah 30° maka gaya tekanan lumpur adalah :

$$P_s = 1,67 h^2 \quad (3-37)$$

Keterangan :

- P_s : gaya sedimen (kN)
 τ_s : berat lumpur (kN/m³)
 h : dalamnya lumpur (m)
 θ : sudut gesekan dalam (derajat)

Gaya tekanan tanah pada bagian bawah struktur beton dihitung berdasarkan metode Rankine dengan rumus berikut :

$$E_a = 1/2 K_a \gamma H_1 - 2C \sqrt{K_a} \quad (3-38)$$

$$E_p = 1/2 K_p \gamma H_2 - 2C \sqrt{K_p} \quad (3-39)$$

Keterangan :

- E_a : tekanan tanah aktif (kN/m)
 E_p : tekanan tanah pasif (kN/m)
 K_a : koefisien tegangan aktif (lihat Lampiran 7)
 K_p : koefisien tegangan pasif (lihat Lampiran 8)
 γ : berat jenis tanah (kN/m³)
 H_1 : tinggi tanah tekanan aktif (m)
 H_2 : tinggi tanah tekanan pasif (m)
 C : kohesi (kN/m²)

3.3.6 Faktor Aman Stabilitas

Pemeriksaan stabilitas bendung untuk keadaan air banjir dilakukan terhadap bahaya :

1) Guling

$$\frac{MT}{MG} \geq 1,25 \quad (3-40)$$

Keterangan :

- MT : momen tahan (ton.m)
 MG : momen pengguling (ton.m)

2) Geser

$$\frac{\sum V}{\sum H} f \geq 1,25 \quad (3-41)$$

Keterangan :

$\sum V$: total gaya vertikal (ton)
 $\sum H$: total gaya horizontal (ton)
 f : koefisien gesekan

3) Daya dukung tanah

$$\sigma_{1,2} = \frac{V}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) \quad (3-42)$$

Persyaratannya yaitu apabila $\sigma_1 < \bar{\sigma}$ dan $\sigma_1 > 0$

Keterangan :

$\sigma_{1,2}$: tegangan tanah (ton/m^2)
 V : gaya-gaya vertikal (ton)
 B : lebar dasar (m)
 e : eksentrisitas ; $e = \frac{1}{2} B - \left(\frac{MT-MG}{\sum V} \right)$ (m)

4) Erosi bawah tanah (*piping*)

$$C_L = \frac{\sum L_v + 1/3 \sum L_H}{H} \quad (3-43)$$

Keterangan :

C_L : angka rembesan Lane
 $\sum L_v$: jumlah panjang vertikal (m)
 $\sum L_H$: jumlah panjang horizontal (m)
 H : beda tinggi muka air (m)

Nilai rembesan Lane hasil perhitungan harus lebih besar dari angka rembesan Lane yang disyaratkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6. Harga Minimum Angka Rembesan Lane

Jenis Tanah	Nilai CL
Pasir sangat halus atau lanau	8,5
Pasir halus	7,00
Pasir sedang	6,00
Pasir kasar	5,00
Kerikil halus	4,00
Kerikil sedang	3,50
Kerikil kasar termasuk berangkal	3,00
Bongkah dengan sedikit berangkal dan kerikil	2,50
Lempung lunak	3,00
Lempung sedang	2,00
Lempung keras	1,80
Lempung sangat keras	1,60

Sumber : KP-02,1986

5) Uplift

$$\frac{\sum \text{Berat bangunan}}{\sum \text{gaya uplift}} \geq 1,25 \quad (3-44)$$