

## **BAB II**

### **DASAR TEORI DAN KAJIAN PUSTAKA**

#### **A. Bendung**

Dalam Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan KP-02, bendung adalah bangunan air yang dibangun melintang sungai atau sudetan yang sengaja dibuat untuk meninggikan elevasi muka air untuk mendapatkan tinggi terjun, sehingga air dapat disadap dan dialirkan secara gravitasi ke daerah yang membutuhkan.

Bendung sebagai pengatur muka air dapat dibedakan menjadi bendung pelimpah dan bendung gerak. Bendung Kamijoro ini sendiri adalah jenis atau tipe bendung pelimpah, maka dalam penelitian ini yang dibahas adalah bendung pelimpah. Bendung pelimpah yaitu bangunan air yang dibangun melintang di sungai, akan memberikan tinggi air minimum kepada bangunan *intake* untuk keperluan irigasi. Merupakan penghalang selama terjadi banjir dan dapat menyebabkan genangan di udik bendung (Dirjen Pengairan DPU KP 02, 1986).

Sedangkan bendung gerak adalah bendung yang dilengkapi pintu air yang dapat dibuka maupun ditutup sesuai dengan kebutuhan debit air yang akan dialirkan. Bendung ini dipergunakan untuk mengatur tinggi rendah debit air sungai dengan pembukaan pintu-pintu yang terdapat pada bendung tersebut, biasanya pembukaan dan penutupan pintu ini sudah menggunakan teknologi komputer (Dirjen Pengairan DPU KP 02, 1986).

## **B. Bendung Pelimpah**

Bendung atau bangunan pelimpah adalah bangunan bendung yang dibangun melintang sungai yang akan memberikan tinggi air minimum kepada bangunan *intake* untuk keperluan irigasi. Bendung ini sendiri merupakan penghalang selama banjir dan dapat menyebabkan genangan di hulu bendung. Menurut Dirjen Pengairan DPU KP 02 (1986), bendung pelimpah ini terdiri dari antara lain:

### **1. Tubuh Bendung**

Tubuh bendung merupakan ambang tetap yang berfungsi untuk meninggikan taraf muka air sungai. Tubuh bendung ini diletakkan kurang lebih tegak lurus arah aliran sungai saat banjir besar dan sedang. Maksudnya agar arah aliran utama menuju bendung dan yang keluar dari bendung terbagi merata. Sehingga tidak menimbulkan pusaran-pusaran aliran di hulu bangunan pembilas dan *intake*, yang akibatnya dapat menyebabkan gangguan penyadapan aliran air ke *intake* dan pembilasan sedimen. Bila aliran utama yang keluar dari bendung ke hilir tidak merata, maka yang berakibat menimbulkan penggerusan setempat di hilir bendung lebih dalam di satu bagian dari bagian lainnya (Dirjen Pengairan DPU KP 02, 1986).

### **2. Lebar Bendung**

Lebar bendung, yaitu jarak antara pangkal-pangkalnya (abutment), sebaiknya sama dengan lebar rata-rata sungai pada bagian yang stabil. Dalam hal ini banjir *mean* tahunan dapat diambil untuk menentukan lebar rata-rata bendung. Lebar

maksimum bendung hendaknya tidak lebih dari 1,2 kali lebar rata-rata sungai pada ruas yang stabil (Dirjen Pengairan DPU KP 02, 1986).

Lebar efektif mercu ( $B_e$ ) dihubungkan dengan lebar mercu yang sebenarnya ( $B$ ), yakni jarak antara pangkal-pangkal bendung dan/atau tiang pancang, dengan persamaan berikut:

$$B_e = B - 2 (n K_p + K_a) H_1$$

Dimana:

$n$  = jumlah pilar

$K_p$  = koefisien kontraksi pilar

$K_a$  = koefisien kontraksi pangkal bendung

$H_1$  = tinggi energi (m)

Tabel 1. Harga-harga koefisien  $K_a$  dan  $K_p$

Bentuk Pilar	$K_p$
Untuk pilar berujung segi empat dengan sudut-sudut yang dibulatkan pada jari-jari yang hampir sama dengan 0,1 dari tebal plat	0,02
Untuk pilar berujung bulat	0,01
Untuk pilar berujung bulat	0
Bentuk Pangkal Tembok	$K_a$
Untuk pangkal tembok segi empat dengan tembok hulu pada 90° ke arah aliran	0,20
Untuk pangkal tembok bulat dengan tembok hulu pada 90° ke arah aliran dengan $0,5 H_1 > r > 0,15 H_1$	0,10
Untuk pangkal tembok bulat dimana $r > 0,5 H_1$ dan tembok hulu tidak lebih dari 450 ke arah aliran	0

(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)

### 3. Mercu Bendung

Mercu bendung adalah bagian teratas dari tubuh bendung, dimana aliran dari hulu dapat mengalir atau melimpah ke hilir. Fungsi mercu bendung itu sendiri adalah sebagai penentu tinggi muka air minimum di sungai bagian hulu bendung,

sebagai pengempang sungai dan sebagai pelimpah aliran air. Letak mercu bendung dan tubuh bendung diusahakan tegak lurus arah aliran sungai agar aliran yang menuju bendung terbagi merata (Dirjen Pengairan DPU KP 02, 1986).

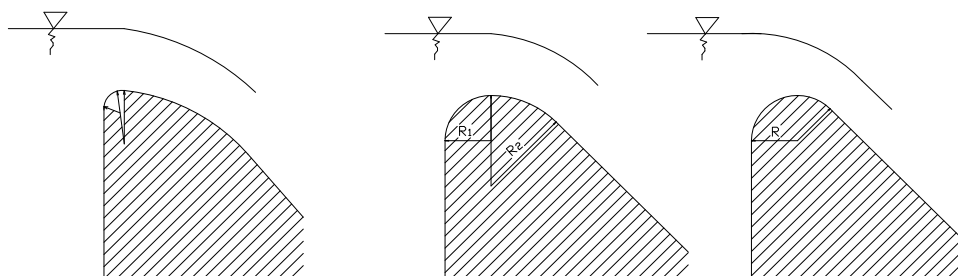
Di Indonesia pada umumnya digunakan dua tipe mercu untuk bendung pelimpah: tipe Ogee dan tipe bulat (lihat Gambar 1).

a. Mercu Ogee

Mercu Ogee berbentuk tirai luapan bawah dari bendung ambang tajam aerasi. Oleh karena itu mercu ini tidak akan memberikan tekanan subatmosfir pada permukaan mercu sewaktu bendung mengalirkan air pada debit rencana. Untuk debit yang lebih rendah air akan memberikan tekanan ke bawah pada mercu (Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986).

b. Mercu Bulat

Bendung dengan mercu bulat memiliki koefisien debit yang jauh lebih tinggi (44%) dibanding dengan koefisien bendung ambang lebar. Pada sungai, ini akan memberikan keuntungan karena bangunan ini akan mengurangi tinggi muka air hulu selama banjir. Harga koefisien debit menjadi lebih tinggi karena lengkung *streamline* dan tekanan negatif pada mercu (Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986).



Gambar 1. Bentuk-bentuk mercu bendung  
(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP – 02, 1986)

#### 4. Pelimpah Gigi Gergaji

Pada beberapa lokasi rencana pembuatan bendung, didapatkan sungai yang mempunyai karakteristik lebar sungai kecil, debit cukup besar dengan fluktuasi antara debit rendah dan debit tinggi yang tidak terlalu jauh, dan tidak membawa material bawaan yang besar (besarnya sungai di daerah hilir). Untuk karakteristik sungai yang demikian jika dibangun bendung dengan pelimpah alinyemen lurus akan memerlukan panjang pelimpah yang besar, sehingga perlu area yang besar dan biaya yang mahal. Dari hasil beberapa penelitian untuk sungai dengan karakteristik di atas lebih sesuai digunakan pelimpah dengan alinyemen berbentuk gigi gergaji, karena dengan bentuk seperti itu pada bentang sungai yang sama mempunyai panjang pelimpah yang lebih besar (Dirjen Pengairan DPU KP 02, 1986).

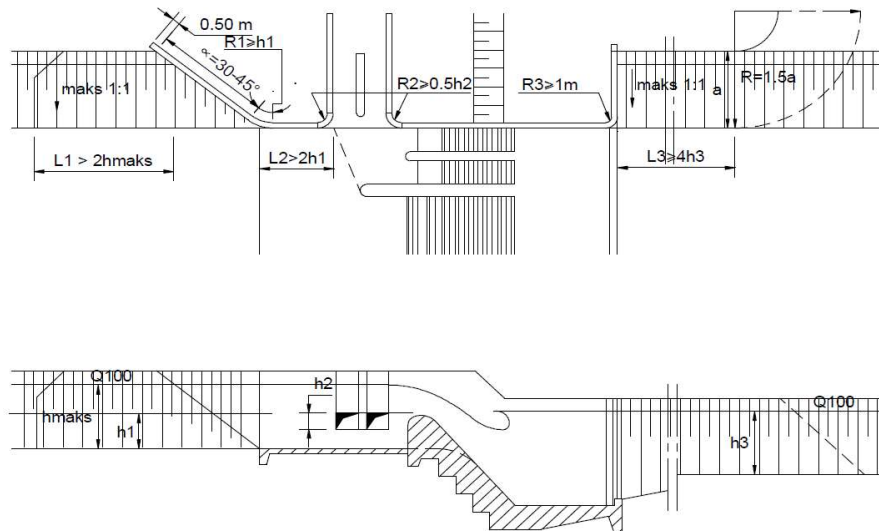
Parameter yang harus diperhatikan sebelum merencanakan tipe ini adalah:

- a. Lokasi, tinggi mercu, debit banjir rencana dan stabilitas perlu didesain dengan mengacu pada acuan yang ada pada pelimpah ambang tetap biasa.
- b. Bendung tipe gigi gergaji kurang sesuai untuk dibangun pada sungai dengan angkutan material dasar sungai batu gelinding, sungai yang membawa hanyutan batang-batang pohon dalam jumlah yang besar sehingga akan menimbulkan benturan yang dapat merusak tubuh bendung atau tumpukan sampah yang dapat mengakibatkan penurunan kapasitas pelimpahan bendung.
- c. Radius atau jari-jari mercu perlu diambil lebih besar atau sama dengan 0,10 m.

#### 5. Pangkal Bendung

Pangkal-pangkal bendung (abutment) menghubungkan bendung dengan tanggul-tanggul sungai dan tanggul-tanggul banjir. Pangkal bendung harus

mengarahkan aliran air dengan tenang di sepanjang permukaannya dan tidak menimbulkan turbulensi (Dirjen Pengairan DPU KP 02, 1986).



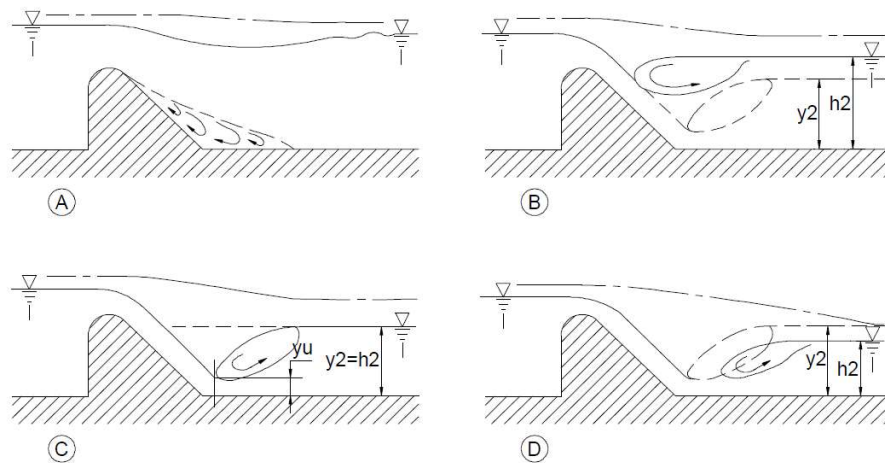
Gambar 2. Pangkal bendung  
(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP – 02, 1986)

Elevasi pangkal bendung di sisi hulu bendung sebaiknya lebih tinggi daripada elevasi air (yang terbendung) selama terjadi debit rencana. Tinggi jagaan yang harus diberikan adalah 0,75 m sampai 1,50 m, bergantung kepada kurve debit sungai di tempat itu, untuk kurve debit datar 0,75 m akan cukup, sedang untuk kurve yang curam akan diperlukan 1,50 m untuk memberikan tingkat keamanan yang sama.

## 6. Peredam Energi

Menurut Dirjen Pengairan DPU KP 02 (1986), aliran di atas bendung pada sungai dapat menunjukkan berbagai perilaku di sebelah bendung akibat kedalaman air yang ada  $h_2$ . Gambar 3 menyajikan kemungkinan-kemungkinan yang terjadi dari pola aliran di atas bendung.

Kasus A menunjukkan aliran tenggelam yang menimbulkan sedikit saja gangguan di permukaan berupa timbulnya gelombang. Kasus B menunjukkan loncatan tenggelam yang lebih diakibatkan oleh kedalaman air hilir yang lebih besar, daripada oleh kedalaman konjugasi. Kasus C adalah keadaan loncat air dimana kedalaman air hilir sama dengan kedalaman konjugasi loncat air tersebut. Kasus D terjadi apabila kedalaman air hilir kurang dari kedalaman konjugasi, dalam hal ini loncatan akan bergerak ke hilir.



Gambar 3. Peredam energi  
(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP – 02, 1986)

Semua tahap ini bisa terjadi di bagian hilir bendung yang di bangun di sungai. Kasus D adalah keadaan yang tidak boleh terjadi, karena loncatan air akan menghempas bagian sungai yang tak terlindungi dan umumnya menyebabkan penggerusan luas.

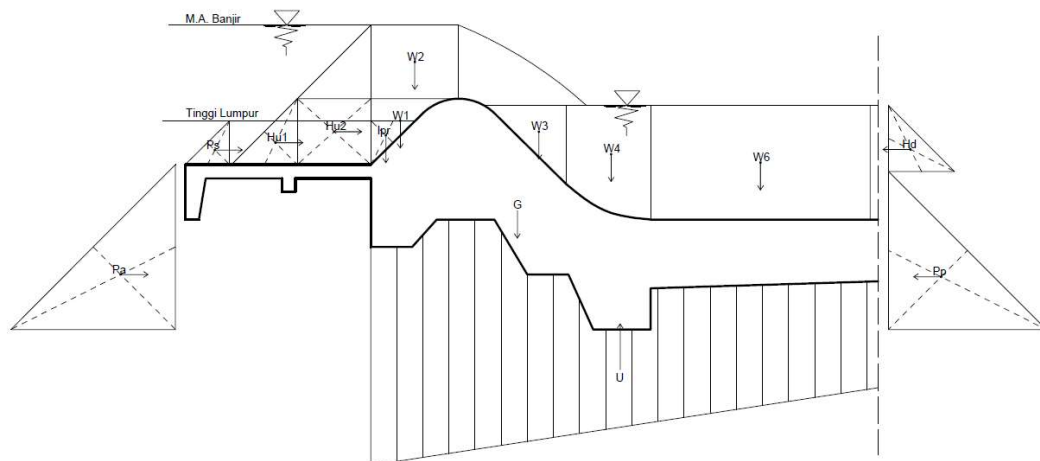
Untuk menemukan debit yang akan memberikan keadaan terbaik untuk peredaman energi, semua debit harus dicek dengan muka air hilirnya. Jika degradasi mungkin terjadi, maka harus dibuat perhitungan dengan muka air hilir terendah

yang mungkin terjadi untuk mengecek apakah degradasi mungkin terjadi. degradasi harus dicek jika:

- bendung dibangun pada sudetan (kopur).
- sungai itu sungai aluvial dan bahan tanah yang dilalui rawan terhadap erosi.
- terdapat waduk di hulu bangunan.

### C. Gaya-gaya yang bekerja pada bendung

Gaya maupun berat yang bekerja pada bangunan bendung yang juga dapat mempengaruhi stabilitas bangunan bendung adalah tersebut seperti yang terlihat pada Gambar 4 berikut:



Gambar 4. Gaya-gaya yang bekerja pada bendung  
(Sumber: Dokumen pribadi)

Dimana :

$H_{u1}$  = tekanan air normal di hulu bendung (kN)

$H_{u2}$  = tekanan air setinggi muka air banjir desain di hulu bendung (kN)

$W$  = berat air yang membebani bangunan (kN)

$G$  = berat bangunan itu sendiri (kN)



$H_d$  = tekanan air pasif di hilir bendung (kN)

$P_a$  = tekanan tanah aktif (kN)

$P_p$  = tekanan tanah pasif (kN)

U = gaya angkat ke atas/tekanan air di bawah bangunan (uplift) (kN)

$P_s$  = tekanan lumpur (kN)

$l_{pr}$  = berat lumpur yang membebani bangunan (kN)

## 1. Tekanan Air

Gaya tekan air ini dapat dibagi menjadi gaya hidrostatis dan gaya hidrodinamik. Gaya hidrostatis disebabkan oleh gaya tekan air yang menggenangi tubuh bendung sehingga menimbulkan gaya tekan air dari arah horizontal dan dari vertikan ke bawah. Gaya hidrostatis adalah fungsi kedalaman di bawah permukaan air yang selalu bekerja tegak lurus terhadap permukaan bangunan. Bendung juga mendapat tekanan gaya angkat ke atas yang dapat menyebabkan berkurangnya berat efektif bangunan tersebut (Dirjen Pengairan DPU KP 02, 1986).

Menurut Dirjen Pengairan DPU KP 02 (1986), rumus gaya tekan ke atas untuk bangunan yang didirikan di atas pondasi batuan adalah:

$$W_u = c \gamma_w [h_2 + \frac{1}{2} \xi (h_1 - h_2)]A$$

Dengan:

$c$  = proporsi luas di mana tekanan hidrostatis bekerja ( $c = 1$ , untuk semua tipe pondasi).

$\gamma_w$  = berat jenis air (kN/m<sup>3</sup>)

$h_2$  = kedalaman air hilir (m)

$\xi$  = proporsi tekanan (Tabel 2)

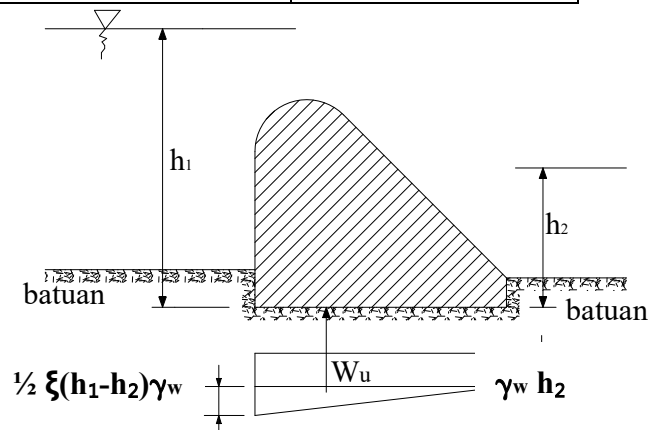
$h_1$  = kedalaman air hulu (m)

$A$  = luas dasar ( $m^2$ )

$W_u$  = gaya tekan keatas resultante (kN)

Tabel 2. Harga-harga  $\xi$

Tipe pondasi batuan	$\xi$ (proporsi tekanan)
Berlapis horizontal	1,00
Sedang, pejal ( <i>massive</i> )	0,67
Baik, pejal	0,50



Gambar 5. Gaya angkat untuk bangunan pada pondasi batuan  
(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)

Dalam teori angka rembesan Lane, diandaikan bahwa bidang horizontal memiliki daya tahan terhadap aliran (rembesan) 3 kali lebih lemah dibandingkan dengan bidang vertikal. Ini dapat dipakai untuk menghitung gaya tekan ke atas di bawah bendung dengan cara membagi beda tinggi energi pada bendung sesuai dengan panjang relatif di sepanjang pondasi (Dirjen Pengairan DPU KP 02, 1986).

Dalam bentuk rumus (lihat Gambar 7), gaya angkat pada titik x di sepanjang dasar bendung, dirumuskan oleh Dirjen Pengairan DPU KP 02 (1986) sebagai berikut:

$$P_x = Hx - \frac{Lx}{L} \cdot \Delta H$$

Dengan:

$P_x$  = gaya angkat pada titik x ( $\text{kg/m}^2$ )

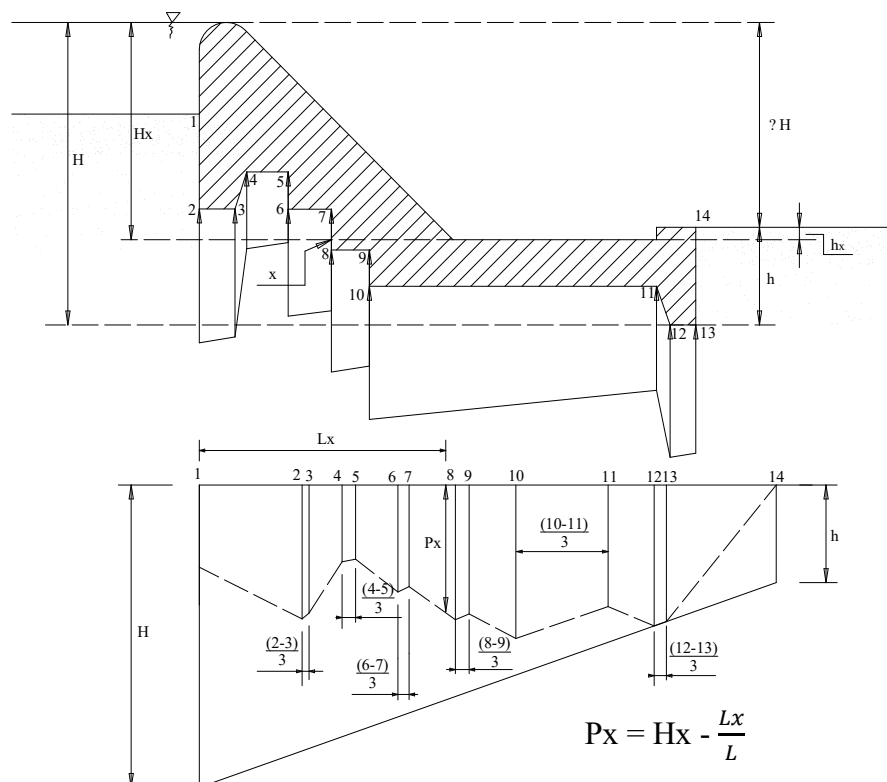
$L$  = panjang total bidang kontak dan tanah bawah (m)

$L_x$  = jarak sepanjang bidang kontak dari hulu sampai x (m)

$\Delta H$  = beda tinggi energi (m)

$H_x$  = tinggi energi di x (m)

Dimana  $L$  dan  $L_x$  adalah jarak relatif yang dihitung berdasarkan rumus Lane, bergantung pada arah bidang tersebut. Bidang yang membentuk sudut  $45^\circ$  atau lebih terhadap bidang horizontal dianggap vertikal.



Gambar 6. Gaya angkat pada pondasi bendung (Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)

## 2. Tekanan Lumpur

Menurut Dirjen Pengairan DPU KP 02 (1986), tekanan lumpur yang berkerja terhadap muka hulu bendung atau terhadap pintu dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_s = \frac{\gamma_s h^2}{2} \frac{1 - \sin\theta}{1 + \sin\theta}$$

Dimana:

$P_s$  = gaya yang terletak pada 2/3 kedalaman dari atas lumpur yang bekerja secara horizontal

$\gamma_s$  = berat lumpur (kN)

$h$  = kedalaman lumpur (m)

$\theta$  = sudut gesekan dalam ( $^\circ$ )

Beberapa andaian/asumsi dapat dibuat seperti berikut ini:

$$\gamma_s = \gamma_{s'} \frac{G-1}{G}$$

Dimana:

$\gamma_{s'}$  = berat volume kering tanah  $\approx 12,74 \text{ kN/m}^3$  ( $\approx 1274 \text{ kgf/m}^3$ )

$G$  = berat volume butir = 2,65

## 3. Tekanan Tanah

Menurut Dirjen Pengairan DPU (1986), tekanan tanah dari samping yang digunakan dalam suatu bangunan dapat dihitung dengan menggunakan cara pemecahan Rankine.

Menurut cara pemecahan Rankine, tekanan samping aktif dan pasif dapat kita ketahui sebagai berikut:

$$\text{Gaya tekan} = E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H_1^2 - 2cH_1\sqrt{K_a}$$

$$\text{Tahanan pasif} = E_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H_2^2 + 2cH_2\sqrt{K_p}$$

Dengan:

$E_a$  = tekanan aktif (kN/m)

$E_p$  = tekanan pasif (kN/m)

$K_a$  = koefisien tegangan aktif

$K_p$  = koefisien tegangan pasif

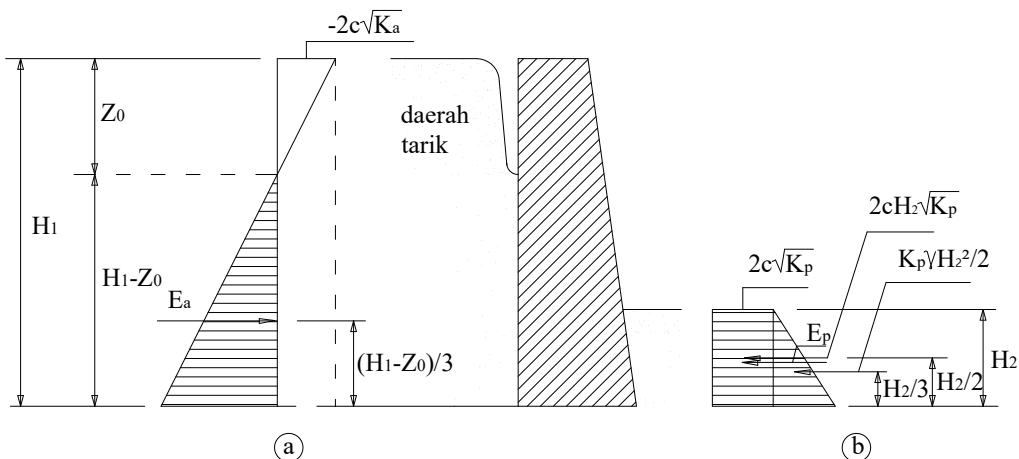
$\gamma$  = berat volume tanah (kN/m<sup>3</sup>)

$H_1$  = tinggi tanah untuk tekanan aktif (m)

$H_2$  = tinggi tanah untuk tekanan pasif (m)

$c$  = kohesi (kN/m<sup>2</sup>)

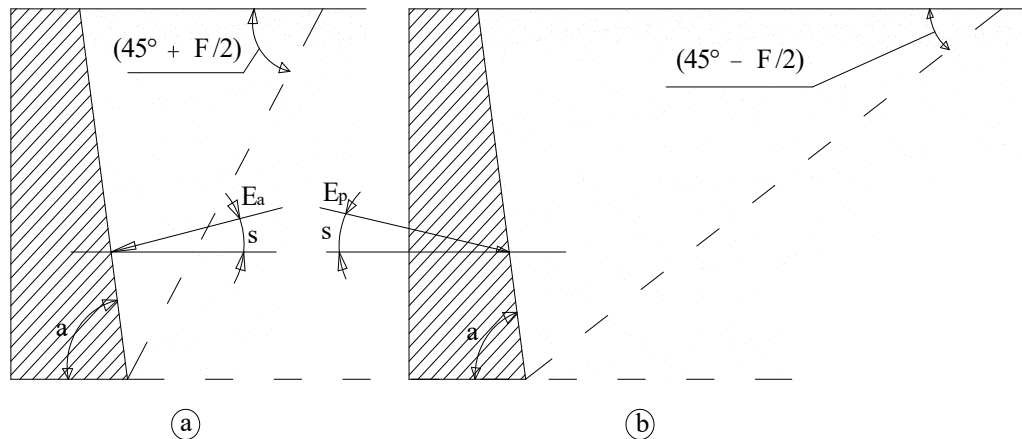
Titik tangkap untuk  $E_a$  dan  $E_p$  dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 7. Tegangan samping aktif dan pasif cara pemecahan Rankine:

(a) aktif, (b) pasif.  $z_0 = \frac{2c}{\gamma\sqrt{K_a}}$

(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)



Gambar 8. Tekanan aktif (a) dan Tekanan pasif (b) menurut Rankine  
(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)

Tabel 3. Harga-harga koefisien tegangan aktif  $K_a$  untuk dinding miring kasar dengan permukaan tanah datar/horizontal

$\alpha$	$\delta$	10°			20°			30°			40°		
		0°	5°	10°	0°	10°	20°	0°	15°	30°	0°	20°	40°
120°	$K_a$	0.40	0.43	0.44	0.27	0.24	0.23	0.13	0.12	0.12	0.06	0.05	0.05
110°		0.56	0.54	0.52	0.35	0.32	0.30	0.20	0.18	0.17	0.11	0.10	0.07
100°		0.65	0.61	0.59	0.42	0.39	0.37	0.26	0.24	0.24	0.16	0.14	0.15
90°		0.70	0.66	0.65	0.49	0.45	0.44	0.33	0.30	0.31	0.22	0.20	0.22
80°		0.72	0.70	0.68	0.54	0.51	0.50	0.40	0.37	0.38	0.29	0.27	0.29
70°		0.73	0.70	0.70	0.57	0.54	0.54	0.46	0.44	0.45	0.35	0.34	0.35
60°		0.72	0.69	0.69	0.60	0.57	0.56	0.50	0.48	0.50	0.42	0.41	0.47

(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)

Tabel 4. Harga-harga koefisien tegangan pasif  $K_p$  untuk dinding miring kasar dengan permukaan tanah datar/horizontal

$\alpha$	$\delta$	10°			20°			30°			40°		
		0°	5°	10°	0°	10°	20°	0°	15°	30°	0°	20°	40°
120°	$K_p$	1.52	1.71	1.91	2.76	3.67	4.51	5.28	9.07	13.50	11.30	28.40	56.60
110°		1.53	1.69	1.83	2.53	3.31	4.04	4.42	7.38	10.80	8.34	19.50	39.00
100°		1.49	1.64	1.77	2.30	2.93	4.53	3.65	5.83	8.43	6.16	13.80	26.60
90°		1.42	1.55	1.66	2.04	2.55	3.04	3.00	4.62	6.56	4.60	9.69	18.20
80°		1.31	1.43	1.52	1.77	2.19	2.57	2.39	3.62	5.02	3.37	6.77	12.30
70°		1.18	1.26	1.35	1.51	1.83	2.13	1.90	2.80	3.80	2.50	4.70	8.22
60°		1.04	1.10	1.17	1.26	1.48	1.72	1.49	2.08	2.79	1.86	3.17	5.43

(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)

#### 4. Gaya Gempa

Gaya gempa ditentukan oleh berat konstruksi bendung itu sendiri dan juga ditentukan oleh koefisien gempa. Gaya gempa ini dihitung dengan arah horizontal yang garis kerjanya melewati titik berat konstruksi. Dapat juga dikatakan bahwa harga gaya gempa diberikan dalam Parameter Bangunan, didasarkan pada peta Indonesia yang menunjukkan berbagai resiko. Faktor minimum yang akan dipertimbangkan adalah 0,1 g perapatan gravitasi sebagai harga percepatan. Dengan cara mengalikan massa bangunan sebagai gaya horizontal menuju arah paling tidak aman (arah hilir) (Dirjen Pengairan DPU KP 02, 1986). Dan untuk mencari koefisien gempa, dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$a_d = n(a_c * z)^m$$

$$E = \frac{a_d}{g}$$

Dimana:

$a_d$  = Percepatan gempa rencana (cm/dt<sup>2</sup>)

$n, m$  = Koefisien untuk jenis tanah (lihat Tabel 5)

$a_c$  = Percepatan kejut dasar, cm/dt<sup>2</sup> (untuk periode ulang, lihat Tabel 6)

$E$  = Koefisien gempa

$g$  = Percepatan gravitasi, cm/dt<sup>2</sup> ( $\approx 980$ )

$z$  = Faktor yang bergantung pada letak geografis daerah gempa

Tabel 5. Koefisien jenis tanah

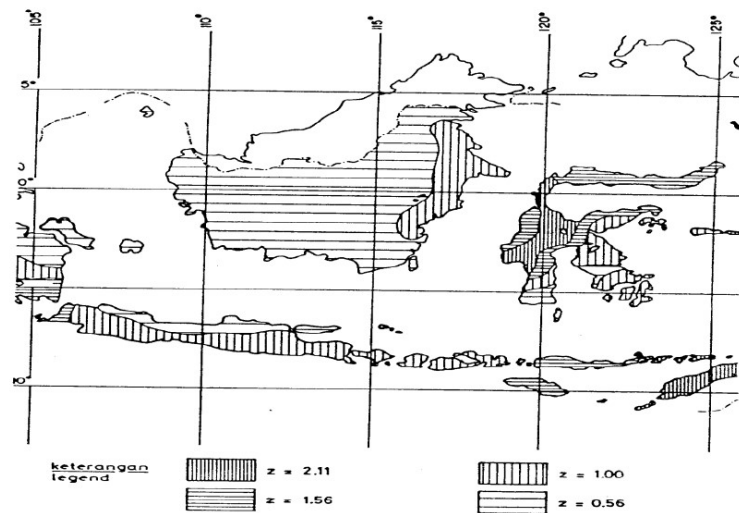
Jenis	n	m
Batu	2,76	0,71
Diluvium	0,87	1,05
Aluvium	1,56	0,89
Aluvium lunak	0,29	1,32

(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)

Tabel 6. Periode ulang dan percepatan dasar gempa ( $a_c$ )

Periode ulang tahun	$a_c$ ( gal = cm/dt <sup>2</sup> )
20	85
100	160
500	225
1000	275

(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)



Gambar 9. Koefisien zona gempa di Indonesia  
(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)

## 5. Berat Sendiri Bendung

Berat bangunan bergantung pada bahan yang digunakan untuk membuat bangunan tersebut. Dalam suatu perencanaan nilai berat volume dapat digunakan seperti yang tertera dalam Tabel 7.

Tabel 7. Nilai berat volume bahan

Jenis bahan	Berat volume	
	kN/m <sup>3</sup>	kgf/m <sup>3</sup>
Pasangan batu	22	2200
Beton tumbuk	23	2300
Beton bertulang	24	2400

(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)



Berat volume beton tumbuk bergantung kepada berat volume agregat serta ukuran maksimum kerikil yang digunakan. Untuk ukuran maksimum agregat 150 mm dengan berat volume 2,65 berat volumenya lebih dari  $24 \text{ kN/m}^3$  ( $\approx 2400 \text{ kgf/m}^3$ )

## 6. Reaksi Pondasi

Menurut Dirjen Pengairan DPU KP 02 (1986), reaksi pondasi yang bekerja pada bangunan bendung dapat diandaikan berbentuk trapesium dan tersebar secara linier. Besarnya tekanan yang terjadi dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$P = \frac{\sum(W)}{A} + \frac{\sum(W)e}{I} m$$

Dengan:

$P$  = tekanan vertikal pondasi ( $\text{kN/m}^2$ )

$\sum(W)$  = keseluruhan gaya vertikal termasuk tekanan ke atas, tetapi tidak termasuk reaksi pondasi ( $\text{kN}$ )

$A$  = luas dasar ( $\text{m}^2$ )

$e$  = eksentrisitas pembebanan, atau jarak dari pusat gravitasi dasar sampai titik potong *resultante* dengan dasar

$I$  = momen kelembaman (moment of inertia) dasar disekitar pusat gravitasi ( $\text{kgm}^2$ )

$m$  = jarak titik pusat luas dasar sampai ke titik dimana tekanan yang dikehendaki ( $\text{m}$ )

Untuk dasar segi empat dengan panjang  $\ell$  dan lebar = 1,0 m, maka:

$I = \ell^3/12$  dan  $A = 1$ , maka rumus tadi menjadi:

$$P = \frac{\sum(W)}{1} \left( 1 + \frac{12e}{\ell^2} m \right)$$

Dengan:

P = tekanan vertikal pondasi (kN/m<sup>2</sup>)

$\sum(W)$  = keseluruhan gaya vertikal termasuk tekanan ke atas, tetapi tidak termasuk reaksi pondasi (kN)

A = luas dasar (m<sup>2</sup>)

I = momen kelembaman (moment of inertia) dasar disekitar pusat gravitasi

m = jarak titik pusat luas dasar sampai ke titik dimana tekanan yang dikehendaki (m)

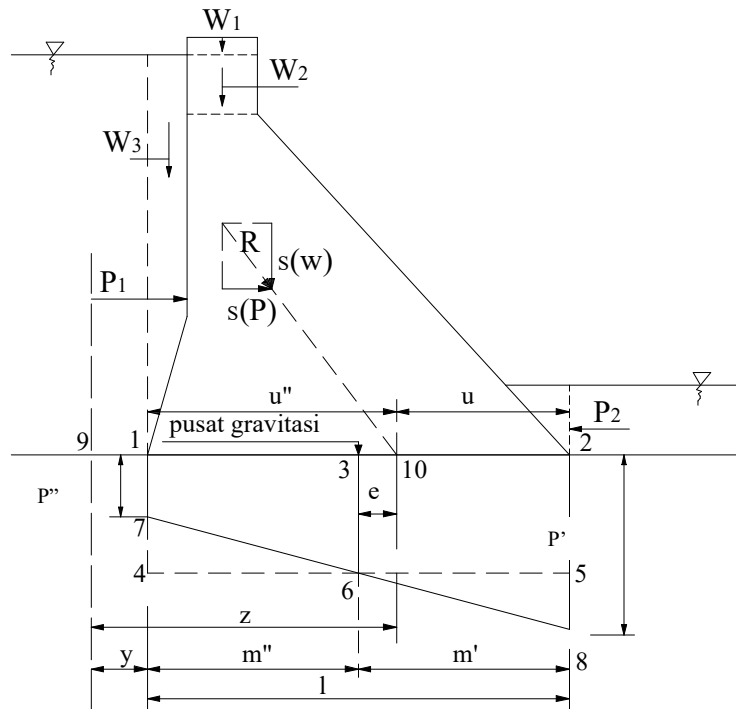
Sedangkan tekanan vertikal pondasi pada ujung bangunan ditentukan dengan rumus:

$$P' = \frac{\sum(W)}{\ell} \times \left(1 + \frac{6e}{\ell}\right)$$

dengan  $m' = m'' = \frac{1}{2}\ell$ , maka:

$$P'' = \frac{\sum(W)}{\ell} \times \left(1 - \frac{6e}{\ell}\right)$$

Bila harga e dari Gambar 10 dan Persamaan 8  $> \frac{l}{6}L$ , maka akan dihasilkan tekanan negatif pada ujung bangunan. Tekanan tarik pada tanah pondasi tidak diijinkan, irisan yang mempunyai dasar segi empat sehingga *resultante* gayanya untuk semua hingga kondisi pembebanan jatuh pada daerah inti.



Gambar 10. Unsur-unsur persamaan distribusi tekanan pada pondasi  
(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)

#### D. Stabilitas Bendung

Dalam stabilitas bendung, terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan, antara lain yaitu:

##### 1. Kontrol Terhadap Pergeseran

Bergesernya bangunan bendung disebabkan karena gaya horizontal lebih besar daripada gaya vertikal. Dan karena menurut Christady (2006) digunakan rumus:

$$Fk = \frac{f \cdot V}{H} > 1,5$$

Dimana perhitungan momen pada saat muka air banjir adalah:

$$V = G + W + lpr + U$$

$$H = Hu + Hd + Pa + Pp + Ps + Gp$$

Dan pada saat muka air normal atau muka air setinggi mercu bendung:

$$V = G + W + lpr + U$$

$$H = Hu + Pa + Pp + Ps + Gp$$

Dengan:

Fk = faktor keamanan

f =  $\text{tg } \delta$

koefisien gesek antara tanah dasar dan dasar pondasi (apabila tidak terdapat data koefisien sudut gesek internal dari pengujian geologi, maka dapat diambil dari perkiraan koefisien gesek seperti dalam tabel 6.4 KP-02, 1986)

$\delta$  = sudut gesek antara tanah dasar dan dasar pondasi, biasanya diambil  $1/3 - (2/3) \varphi$  ( $^{\circ}$ ) (Christady, 2006)

$\varphi$  = sudut gesek internal ( $^{\circ}$ ), (dari pengujian geologi setempat)

V = keseluruhan gaya vertikal yang bekerja pada bangunan (kN)

H = keseluruhan gaya horizontal yang bekerja pada bangunan (kN)

G = berat sendiri bangunan (kN)

W = berat air di atas bangunan (kN)

lpr = berat lumpur (kN)

U = gaya tekan ke atas (uplift) (kN)

Hu = tekanan air di hulu bendung (kN)

Hd = tekanan air di hilir bendung (kN)

Pa = tekanan tanah aktif (kN)

Pp = tekanan tanah pasif (kN)

$P_s$  = tekanan lumpur (kN)

$G_p$  = gaya gempa (kN)

## 2. Kontrol Terhadap Penggulingan

Agar bangunan aman terhadap guling, maka resultante semua gaya yang bekerja pada bagian bangunan di atas bidang horizontal, termasuk gaya angkat, harus memotong bidang pada teras. Tidak ada tarikan pada bidang irisan manapun. (Dirjen Pengairan DPU KP-02, 1986)

Oleh karena itu, stabilitas bangunan terhadap guling dapat dihitung dengan mempertimbangkan faktor keamanan yang telah ditentukan. Oleh Erman (2002) digunakan rumus:

$$(FK) = \frac{\sum MT}{\sum MG} \geq 1,5$$

Dimana perhitungan momen pada saat muka air banjir adalah:

$$\sum MT = MG + MW + Mlpr + MHd + MPp$$

$$\sum MG = MU + MHu + MPa + MPs + MGp$$

Dan pada saat muka air normal atau muka air setinggi mercu bendung:

$$\sum MT = MG + MW + Mlpr + MPp$$

$$\sum MG = MU + MHu + MPa + MPs + MGp$$

Dengan:

$FK$  = faktor keamanan

$\sum MT$  = momen tahan (kNm)

$\sum MG$  = momen guling (kNm)

$MG$  = momen berat sendiri bangunan (kNm)

MW = momen berat air di atas bangunan (kNm)

Mlpr = momen berat lumpur (kNm)

MHd = momen tekanan air di hilir bendung (kNm)

MPp = momen tekanan tanah pasif (kNm)

MU = momen gaya angkat ke atas (uplift) (kNm)

MHu = momen tekanan air di hulu bendung (kNm)

MPa = momen tekanan tanah aktif (kNm)

MPs = momen tekanan lumpur di hulu bendung (kNm)

MGp = momen gempa akibat struktur (kNm)

### 3. Kontrol Terhadap Eksentrisitas

Eksentrisitas yang terjadi pada bendung dapat pula menimbulkan penggulingan dan penggeseran, oleh karena itu dalam perencanaan bendung perlu adanya kontrol eksentrisitas titik berat bangunan bendung. Dalam Erman (2002) digunakan rumus:

$$e = \frac{B}{2} - \left( \frac{MT - MG}{V} \right) < \frac{B}{6}$$

Dimana:

e = besarnya eksentrisitas

B = lebar pondasi (m)

MT = momen tahan (kNm)

MG = momen guling (kNm)

V = keseluruhan gaya vertikal yang bekerja pada bangunan (kN)

#### 4. Kontrol Terhadap Daya Dukung Tanah

Kedudukan pondasi bangunan haruslah pada tanah keras yang sehingga dapat menahan bobot konstruksi bangunan di atasnya. Oleh sebab itu perlu adanya kontrol terhadap daya dukung tanah, oleh Erman (2002), digunakan rumus:

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

Dengan:

$\sigma_{1,2}$  = tegangan tanah (kN/m<sup>2</sup>)

V = gaya vertikal total (kN)

B = lebar pondasi (m)

e = eksentrisitas

Persyaratannya yaitu bila  $\sigma_1 < q_a$  dan  $\sigma_2 > 0$

Untuk mencari daya dukung tanah, dalam KP-06 (1986) digunakan rumus:

$$q_u = \alpha \cdot c \cdot N_c + z \cdot \gamma \cdot N_q + \beta \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma$$

Dengan:

$\alpha$  dan  $\beta$  adalah faktor tak berdimensi (KP-06)

$q_u$  = kapasitas dukung ultimate untuk pondasi memanjang (kN/m<sup>2</sup>)

c = kohesi tanah (kN/m<sup>2</sup>)

z = kedalaman pondasi (m)

$\gamma$  = berat volume tanah (kN/m<sup>3</sup>)

B = lebar pondasi (m)

$N_c, N_q$  dan  $N_\gamma$  = faktor-faktor kapasitas dukung Terzaghi yang dipengaruhi oleh sudut gesek dalam ( $\phi$ )

Tabel 8. Nilai-nilai faktor kapasitas dukung Terzaghi (1943)

$\Phi$	Keruntuhan geser umum			Keruntuhan geser lokal		
	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$N_{c'}$	$N_{q'}$	$N_{\gamma'}$
0	5,7	1,0	0,0	5,7	1,0	0,0
5	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2
10	9,6	2,7	1,2	8,0	1,9	0,5
15	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9
20	17,7	7,4	5,0	11,8	3,9	1,7
25	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2
30	37,2	22,5	19,7	19,0	8,3	5,7
34	52,6	36,5	35,0	23,7	11,7	9,0
35	57,8	41,4	42,4	25,2	12,6	10,1
40	95,7	81,3	100,4	34,9	20,5	18,8
45	172,3	173,3	297,5	51,2	35,1	37,7
48	258,3	287,9	780,1	66,8	50,5	60,4
50	347,6	415,1	1153,2	81,3	65,6	87,1

(Sumber: Christady, 2006)

Besarnya daya dukung izin bisa dicari dari:

$$q_a = \frac{q_u}{F} + \gamma z$$

Dengan:

F = faktor keamanan (2 sampai 3)

$q_u$  = kapasitas dukung ultimate untuk pondasi memanjang (kN/m<sup>2</sup>)

$q_a$  = daya dukung izin (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  = berat volume tanah (kN/m<sup>3</sup>)

z = kedalaman pondasi (m)

##### 5. Kontrol Terhadap Erosi Bawah Tanah (piping)

Bangunan-bangunan yang harus mengatasi beda tinggi muka air hendaknya kontrol stabilitasnya terhadap *piping*. Untuk mengetahui bahaya erosi bawah tanah itu sendiri digunakan metode Lane, yang menganggap jalur vertikal memiliki daya tahan 3 kali lebih kuat daripada jalur horizontal. Oleh karena rumusnya adalah:



$$C_L = \frac{\sum L_V + \frac{1}{3} L_H}{\Delta H}$$

Dimana:

$C_L$  = angka rembesan lane (lihat Tabel 9)

$\sum L_V$  = jumlah panjang vertikal (m)

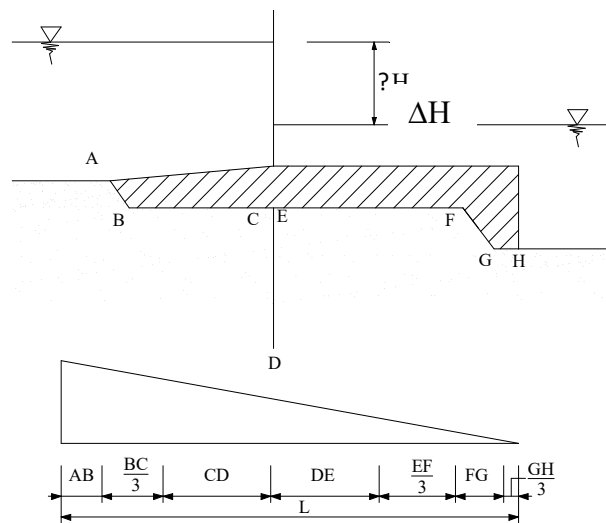
$\sum L_H$  = jumlah panjang horizontal (m)

$\Delta H$  = beda tinggi muka air (m)

Tabel 9. harga-harga minimum angka rembesan Lane ( $C_L$ )

Jenis Tanah	Angka Rembesan
Pasir sangat halus atau lanau	8,5
Pasir halus	7,0
Pasir sedang	6,0
Pasir kasar	5,0
Kerikil halus	4,0
Kerikil sedang	3,5
Kerikil kasar termasuk berangkal	3,0
Bongkah dengan sedikit berangkal dan kerikil	2,5
Lempung lunak	3,0
Lempung sedang	2,0
Lempung keras	1,8
Lempung sangat keras	1,6

(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP - 06, 1986)



Gambar 11. Metode angka rembesan Lane  
(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP-06, 1986)