

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1.Uraian Teori**

##### **2.1.1 Pendahuluan**

Bendung gerak adalah jenis bendung yang tinggi pembendungannya dapat diubah sesuai dengan yang dikehendaki. Pada bendung gerak, elevasi muka air di hulu bendung dapat dikendalikan naik atau turun sesuai yang dikehendaki dengan membuka atau menutup pintu air (gate). Bendung gerak biasanya dibangun pada daerah hilir sungai atau muara. Pada daerah hilir sungai atau muara sungai kebanyakan tebing-tebing sungai relatif lebih landai atau datar dari pada di daerah hilir. Pada saat kondisi banjir, maka elevasi muka air sisi hulu bendung gerak yang dibangun di daerah hilir bisa diturunkan dengan membuka pintu-pintu air (gate) sehingga air tidak meluber kemana-mana (tidak membanjiri daerah yang luas) karena air akan mengalir lewat pintu yang telah terbuka kearah hilir (downstream).

Berikut adalah contoh kasus dalam hal Analisis Stabilitas Bendung.

1. Tinjauan Analisis Stabilitas Bendung Tetap (Studi Kasus Bendung Njaen Pada Sungai Brambangan Sukoharjo) ; Sularno ; Universitas Sebelas Maret ; 2011
2. Kajian Ulang Stabilitas Geser dan Guling Parafet Di Sungai Grindulu Kabupaten Pacitan ; Robyadiansah ; Universitas Negeri Yogyakarta ; 2012
3. Evaluasi Hidrolis Bendung Lama Terhadap Rencana Bendung Baru Pada Bendung Timbang Lawan di Kabupaten Langkat ; Trisnafia Siagian, dkk ; Universitas Sumatera Utara ; 2012

4. Perencanaan Bendung Untuk Daerah Irigasi Sulu; E. M. Wuisan, dkk ; Universitas Sam Ratulangi Manado ; 2013
5. Perhitungan Stabilitas Bendung Pada Proyek Pltm Aek Silang II Doloksanggul ; Tumpal Alexander Pakpahan, dkk ; Universitas Sumatera Utara ; 2013

## **2.1.2 Analisis Stabilitas**

### **2.1.2.1 Gaya-gaya yang bekerja pada bangunan**

Gaya-gaya yang bekerja pada *bangunan bendung* dan mempunyai arti penting dalam perencanaan adalah:

- (a) tekanan air, dalam dan luar
- (b) tekanan lumpur (*sediment pressure*)
- (c) gaya gempa
- (d) berat bangunan
- (e) reaksi pondasi.

### **2.1.2.2 Tekanan air**

**Gaya tekan air** dapat dibagi menjadi gaya hidrostatis dan gaya hidrodinamik. Tekanan hidrostatis adalah fungsi kedalaman di bawah permukaan air. Tekanan air akan selalu bekerja tegak lurus terhadap muka bangunan. Oleh sebab itu agar perhitungannya lebih mudah, gaya horisontal dan vertikal dikerjakan secara terpisah.

Tekanan air dinamik jarang diperhitungkan untuk stabilitas *bangunan bendung* dengan tinggi energi rendah.

**Gaya tekan ke atas.** *Bangunan bendung* mendapat tekanan air bukan hanya pada permukaan luarnya, tetapi juga pada dasarnya dan dalam tubuh bangunan itu. Gaya tekan ke atas, yakni istilah umum untuk tekanan air dalam, menyebabkan berkurangnya berat efektif bangunan di atasnya.

Rumus gaya tekan ke atas untuk bangunan yang didirikan pada pondasi batuan adalah (lihat Gambar 2.1):

$$W_u = c\tau_w [h_2 + \frac{1}{2} \xi (h_1 - h_2)] A \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

di mana:

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

$\tau_w$  = berat jenis air,  $\text{kN/m}^3$

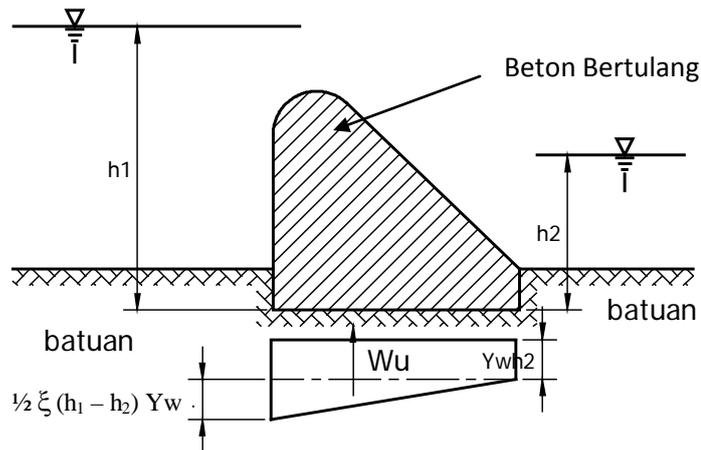
$h_2$  = kedalaman air hilir, m

$\xi$  = proporsi tekanan (*proportion of net head*) diberikan pada Tabel 6.3

$h_1$  = kedalaman air hulu, m

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

$W_u$  = gaya tekan ke atas resultante, kN



Gambar 2.1 Gaya angkat untuk bangunan yang dibangun pada pondasi buatan  
**Sumber:** Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP-02, Kementerian Pekerjaan Umum, 1986

Tabel 2.1 Harga-harga  $\xi$

Tipe pondasi batuan	$\xi$ (proporsi tekanan)
berlapis horisontal	1,00
sedang, pejal (massive)	0,67
baik, pejal	0,50

Gaya tekan ke atas untuk bangunan pada permukaan tanah dasar (*subgrade*) lebih rumit. Gaya angkat pada pondasi itu dapat ditemukan dengan membuat jaringan aliran (*flownet*), atau dengan asumsi-asumsi yang digunakan oleh Lane untuk teori angka rembesan (*weighted creep theory*).

Gaya tekan ke atas untuk bangunan pada permukaan tanah dasar (*subgrade*) lebih rumit. Gaya angkat pada pondasi itu dapat ditemukan dengan membuat jaringan aliran (*flownet*). Dalam hal ditemui kesulitan berupa keterbatasan waktu pengerjaan dan tidak tersedianya perangkat lunak untuk menganalisis jaringan aliran, maka perhitungan dengan asumsi-asumsi yang digunakan oleh Lane untuk teori angka rembesan (*weighted creep theory*) bisa diterapkan.

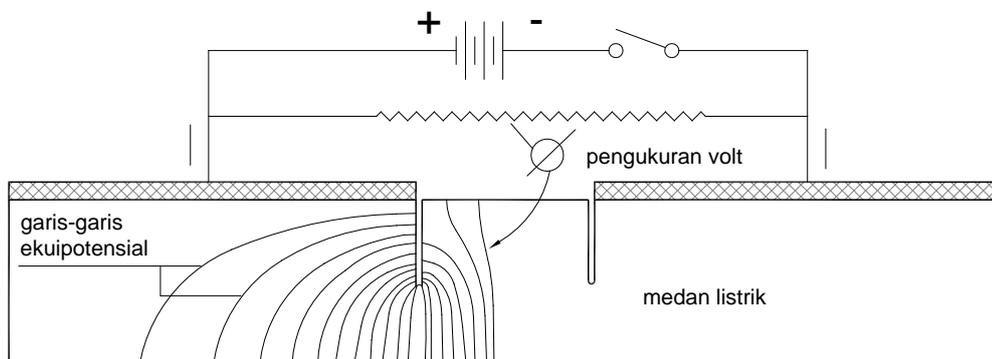
Jaringan aliran dapat dibuat dengan:

- (1) plot dengan tangan
- (2) analog listrik
- (3) menggunakan metode numeris (*numerical method*) pada komputer.

Dalam metode analog listrik, aliran air melalui pondasi dibandingkan dengan aliran listrik melalui medan listrik daya-antar konstan. Besarnya voltase sesuai dengan tinggi piezometrik, daya-antar dengan kelulusan tanah dan aliran listrik dengan kecepatan air (lihat Gambar 2.2)

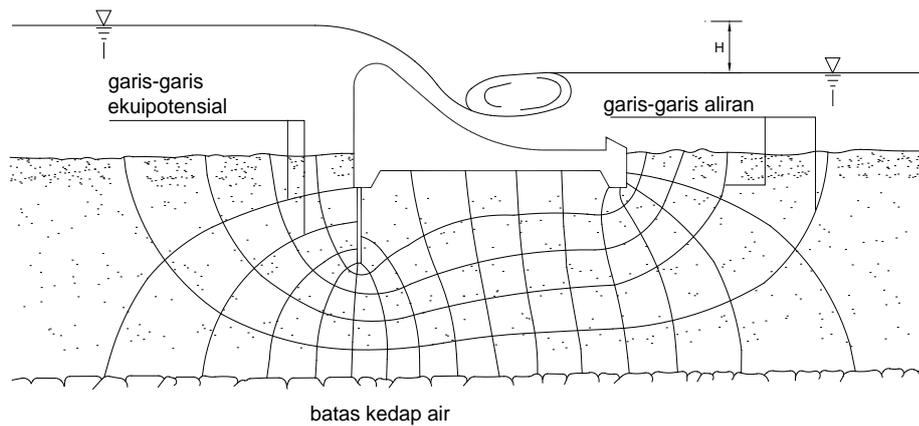
Untuk pembuatan jaringan aliran bagi bangunan utama yang dijelaskan disini, biasanya cukup diplot dengan tangan saja.

Contoh jaringan aliran di bawah bendung pelimpah diberikan pada Gambar 2.3.



*Gambar 2.2 Konstruksi jaringan aliran menggunakan analog listrik*

**Sumber:** Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP-02, Kementerian Pekerjaan Umum, 1986

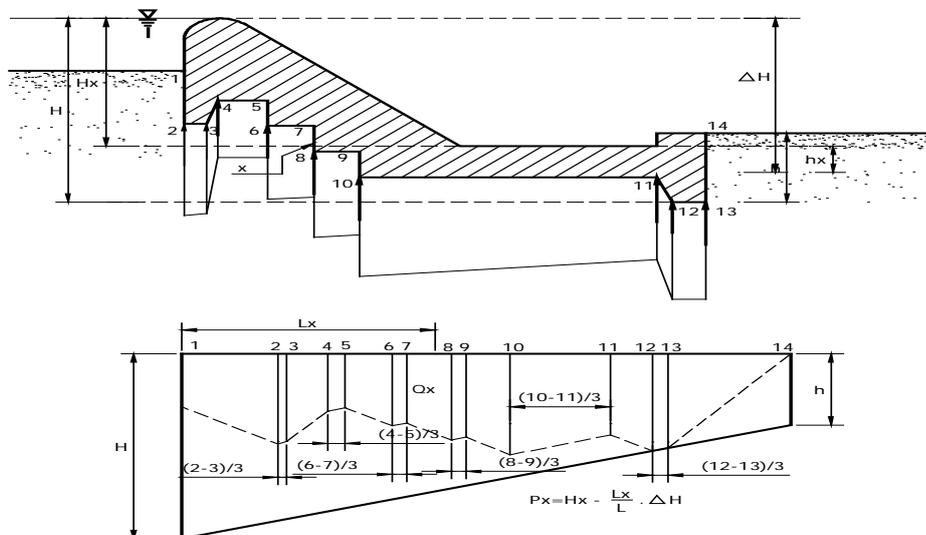


Gambar 2.3 Contoh jaringan aliran di bawah dam pasangan batu pada pasir

Sumber: Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP-02, Kementerian Pekerjaan Umum, 1986

Dalam teori angka rembesan Lane, diandaikan bahwa bidang horisontal 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.



Gambar 2.4 Gaya angkat pada pondasi bendung

Sumber: Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP-02, Kementerian Pekerjaan Umum, 1986

Dalam bentuk rumus, ini berarti bahwa gaya angkat pada titik x di sepanjang dasar bendung dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_x = H_x - \frac{L_x}{L} \Delta H \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

di mana:

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

$L$  = panjang total bidang kontak bendung 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 hulu bendung, m

Dan di mana  $L$  dan  $L_x$  adalah jarak relatif yang dihitung menurut cara Lane, bergantung kepada arah bidang tersebut. Bidang yang membentuk sudut  $45^0$  atau lebih terhadap bidang horisontal, dianggap vertikal.

### 2.1.2.3 Tekanan lumpur

Tekanan lumpur yang bekerja terhadap muka hulu bendung atau terhadap pintu dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_s = \frac{\tau_s h^2}{2} \left( \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \right) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

di mana:

$P_s$  : gaya yang terletak pada 2/3 kedalaman adri atas lumpur yang bekerja secara horisontal

$\tau_s$  : berat lumpur, kN

$h$  : dalamnya lumpur, m

$\Phi$  : sudut gesekan dalam, derajat.

Beberapa andaian/asumsi dapat dibuat seperti berikut:

$$\tau_s = \tau_s' \frac{G-1}{G} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

di mana:  $\tau_s'$  = berat volume kering tanah  $\approx 16 \text{ kN/m}^3 (\approx 1.600 \text{ kgf/m}^3)$

$\lambda$  = berat volume butir = 2,65

menghasilkan  $\tau_s = 10 \text{ kN/m}^3 (\approx 1.000 \text{ kgf/m}^3)$

Sudut gesekan dalam, yang bisa diandaikan  $30^0$  untuk kebanyakan hal, menghasilkan:

$$P_s = 1,67 h^2 \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

#### 2.1.2.4 Gaya gempa

Harga-harga gaya gempa diberikan dalam bagian Parameter Bangunan. Harga-harga tersebut didasarkan pada peta Indonesia yang menunjukkan berbagai daerah dan risiko. Faktor minimum yang akan dipertimbangkan adalah 0,1 g perapatan gravitasi sebagai harga percepatan. Faktor ini hendaknya dipertimbangkan dengan cara mengalikannya dengan massa bangunan sebagai gaya horisontal menuju ke arah yang paling tidak aman, yakni arah hilir.

### 2.1.2.5 Berat bangunan

Berat bangunan bergantung kepada bahan yang dipakai untuk membuat bangunan itu.

Untuk tujuan-tujuan perencanaan pendahuluan, boleh dipakai harga-harga berat volume di bawah ini.

pasangan batu  $22 \text{ kN/m}^3 (\approx 2.200 \text{ kgf/m}^3)$

beton tumbuk  $23 \text{ kN/m}^3 (\approx 2.300 \text{ kgf/m}^3)$

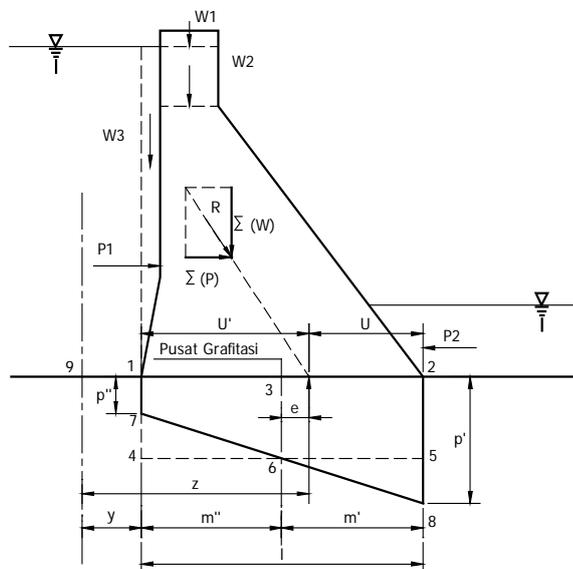
beton bertulang  $24 \text{ kN/m}^3 (\approx 2.400 \text{ kgf/m}^3)$

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  $24 \text{ kN/m}^3 (\approx 2.400 \text{ kgf/m}^3)$ .

### 2.1.2.6 Reaksi Pondasi

Reaksi pondasi boleh diandaikan berbentuk trapesium dan tersebar secara linier.



Gambar 2.5 Unsur-unsur persamaan distribusi tekanan pada pondasi

Sumber: Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP-02, Kementerian Pekerjaan Umum, 1986

Gambar 2.5, rumus-rumus berikut dapat diturunkan dengan mekanika sederhana.

Tekanan vertikal pondasi adalah:

$$p = \frac{\Sigma(W)}{A} + \frac{\Sigma(W)e}{I} m \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana:

$p$  = tekanan vertikal pondasi

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

$A$  = luas dasar,  $m^2$

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

$I$  = momen kelembaban (*moment of inertia*) dasar di sekitar pusat gravitasi

$m$  = jarak dari titik pusat luas dasar sampai ke titik di mana tekanan dikehendaki

Untuk dasar segi empat dengan panjang  $\ell$  dan lebar 1,0 m,  $I = \ell^3/12$  dan  $A = 1$ ,

rumus tadi menjadi:

$$p = \frac{\Sigma(W)}{A} \left\{ 1 + \frac{12e}{\ell^2} m \right\}$$

sedangkan tekanan vertikal pondasi pada ujung bangunan ditentukan dengan

rumus:

$$p' = \frac{\Sigma(W)}{\ell} \left\{ 1 + \frac{6e}{\ell} \right\}$$

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

$$P'' = \frac{\Sigma(W)}{\ell} \left\{ 1 + \frac{6e}{\ell} \right\} \dots\dots\dots (2.7)$$

Bila harga  $e$  dari Gambar 2.5 dan persamaan (2.6) lebih besar dari  $1/6$  (lihat pula Gambar 2.5), maka akan dihasilkan tekanan negatif pada ujung bangunan. Biasanya tarikan tidak diizinkan, yang memerlukan irisan yang mempunyai dasar segi empat sehingga resultante untuk semua kondisi pembebanan jatuh pada daerah inti.

### **2.1.2.7 Analisis Stabilitas Bendung Karet**

#### **(a) Fondasi**

Fondasi bendung karet dapat dibedakan yaitu fondasi langsung yang dibangun diatas lapisan tanah yang kuat dan fondasi tidak langsung (dengan tiang pancang) yang dibangun pada lapisan lunak.

Pada fondasi langsung menahan bangunan atas dan relatif ringan membutuhkan massa yang lebih besar untuk menjaga stabilitas terhadap penggulingan dan penggeseran. Untuk menghemat biaya konstruksi, fondasi dibuat dari beton bertulang sebagai selimut dan diisi dengan pasangan beton komposit.

#### **(b) Gaya-gaya yang bekerja pada bangunan**

(1) Gaya-gaya yang bekerja pada bangunan pelimpah adalah:

- a. Tekanan air, dari dalam dan luar
- b. Gaya gempa
- c. Berat bangunan
- d. Reaksi pondasi

Lantai pondasi pada bendung karet mendapat tekanan air bukan hanya pada permukaan luarnya, tetapi juga pada dasarnya dan dalam tubuh bangunan itu. Gaya tekan ke atas, yakni istilah umum untuk tekanan air didalam menyebabkan berkurangnya berat efektif bangunan di atasnya.

### 2.1.3 Kebutuhan Stabilitas

Ada tiga penyebab runtuhnya bangunan gravitasi, yaitu:

- (1) gelincir (*sliding*)
  - (a) sepanjang sendi horisontal atau hampir horisontal di atas pondasi
  - (b) sepanjang pondasi, atau
  - (c) sepanjang kampuh horisontal atau hampir horisontal dalam pondasi.
- (2) guling (*overturning*)
  - (a) di dalam bendung
  - (b) pada dasar (*base*), atau
  - (c) pada bidang di bawah dasar.
- (3) erosi bawah tanah (*piping*).

#### 2.1.3.1 Ketahanan terhadap gelincir

Tangen  $\theta$ , sudut antara garis vertikal dan resultante semua gaya, termasuk gaya angkat, yang bekerja pada bendung di atas semua bidang horisontal, harus kurang dari koefisien gesekan yang diizinkan pada bidang tersebut.

$$\frac{\Sigma(H)}{\Sigma(V-U)} = \tan \theta < \frac{f}{S} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

di mana:

$\sum (H)$	keseluruhan gaya horizontal yang bekerja pada bangunan, kN
$\sum (V-U)$	keseluruhan gaya vertikal (V), dikurangi gaya tekan ke atas yang bekerja pada bangunan, kN
$\theta$	sudut resultante semua gaya, terhadap garis vertikal, derajat
f	koefisien gesekan
S	faktor keamanan

Harga-harga perkiraan untuk koefisien gesekan f diberikan pada Tabel 2.2

*Tabel 2.2 Harga-harga perkiraan untuk koefisien gesekan*

Bahan	f
Pasangan batu pada pasangan batu	0,60 – 0,75
Batu keras berkualitas baik	0,75
Kerikil	0,50
Pasir	0,40
Lempung	0,30

Untuk bangunan-bangunan kecil, seperti bangunan-bangunan yang dibicarakan di sini, di mana berkurangnya umur bangunan, kerusakan besar dan terjadinya bencana besar belum dipertimbangkan, harga-harga faktor keamanan (S) yang dapat diterima adalah: 2,0 untuk kondisi pembebanan normal dan 1,25 untuk kondisi pembebanan ekstra.

Kondisi pembebanan ekstrem dapat dijelaskan sebagai berikut:

- (1) Tak ada aliran di atas mercu selama gempa, atau
- (2) Banjir rencana maksimum.

Apabila, untuk bangunan-bangunan yang terbuat dari beton, harga yang aman untuk faktor gelincir yang hanya didasarkan pada gesekan saja (persamaan 2.8) ternyata terlampaui, maka bangunan bisa dianggap aman jika faktor keamanan dari rumus itu yang mencakup geser (persamaan 2.9), sama dengan atau lebih besar dari harga-harga faktor keamanan yang sudah ditentukan.

$$\Sigma (H) \leq \frac{f \Sigma (V - U) + c A}{S} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

di mana:  $c$  = satuan kekuatan geser bahan,  $\text{kN/m}^2$

$A$  = luas dasar yang dipertimbangkan,  $\text{m}^2$

arti simbol-simbol lain seperti pada persamaan 2.14.

Harga-harga faktor keamanan jika geser juga dicakup, sama dengan harga-harga yang hanya mencakup gesekan saja, yakni 2,0 untuk kondisi normal dan 1,25 untuk kondisi ekstrem.

Untuk beton,  $c$  (satuan kekuatan geser) boleh diambil  $1.100 \text{ kN/m}^2$  ( $= 110 \text{ Tf/m}^2$ )

Persamaan 2.9 mungkin hanya digunakan untuk bangunan itu sendiri. Kalau rumus untuk pondasi tersebut akan digunakan, perencana harus yakin bahwa itu kuat dan berkualitas baik berdasarkan hasil pengujian. Untuk bahan pondasi nonkohesi, harus digunakan rumus yang hanya mencakup gesekan saja (persamaan 2.8).

### 2.1.3.2 Guling

Agar bangunan aman terhadap guling, maka resultante semua gaya yang bekerja pada bagian bangunan di atas bidang horisontal, termasuk gaya angkat, harus memotong bidang ini pada teras. Tidak boleh ada tarikan pada bidang irisan mana pun.

Besarnya tegangan dalam bangunan dan pondasi harus tetap dipertahankan pada harga-harga maksimal yang dianjurkan.

Untuk pondasi, harga-harga daya dukung yang disebutkan dalam Tabel 2.3 bisa digunakan. Harga-harga untuk beton adalah sekitar  $4,0 \text{ N/mm}^2$  atau  $40 \text{ kgf/cm}^2$ , pasangan batu sebaiknya mempunyai kekuatan minimum  $1,5$  sampai  $3,0 \text{ N/mm}^2$  atau  $15$  sampai  $30 \text{ kgf/cm}^2$ .

*Tabel 2.3 Harga-harga perkiraan daya dukung yang diizinkan (disadur dari British Standard Code of Practice CP 2004)*

Jenis	daya dukung	
	$\text{kN/m}^2$	$\text{kgf/cm}^2$
1. batu sangat keras	10,000	100
2. batu kapur/batu pasir keras	4,000	40
3. kerikil berkerapatan sedang atau pasir dan kerikil	200 – 600	2- 6
4. pasir berkerapatan sedang	100 – 300	1-3
5. lempung kenyal	150 – 300	1,5-3
6. lempung teguh	75 – 150	0,75-1,5
7. lempung lunak dan lumpur	$1 < 75$	$< 0,75$

Tiap bagian bangunan diandaikan berdiri sendiri dan tidak mungkin ada distribusi gaya-gaya melalui momen lentur (*bending moment*). Oleh sebab itu, tebal lantai kolam olak dihitung sebagai berikut (lihat Gambar 2.6):

$$d_x \geq S \frac{P_x - W_x}{\tau} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

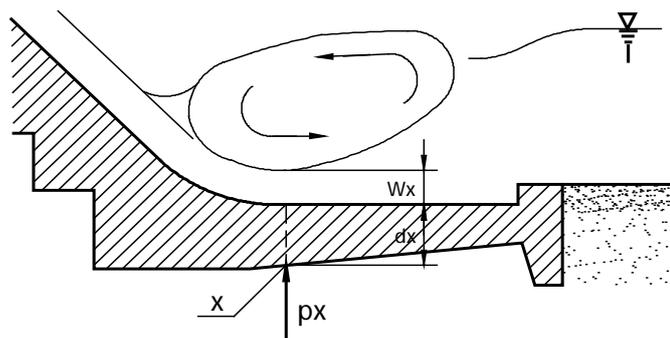
di mana:  $d_x$  = tebal lantai pada titik  $x$ , m

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

$W_x$  = kedalaman air pada titik  $x$ , m

$\tau$  = berat jenis bahan,  $\text{kg/m}^3$

$S$  = faktor keamanan (= 1,5 untuk kondisi normal, 1,25 untuk kondisi ekstrem)



Gambar 2.6 Tebal lantai kolam olak

### 2.1.3.3 Stabilitas terhadap erosi bawah tanah (piping)

Bangunan-bangunan utama seperti bendung dan bendung gerak harus dicek stabilitasnya terhadap erosi bawah tanah dan bahaya runtuh akibat naiknya dasar galian (*heave*) atau rekahnya pangkal hilir bangunan.

Bahaya terjadinya erosi bawah tanah dapat dianjurkan dicek dengan jalan membuat jaringan aliran/*flownet*. Dalam hal ditemui kesulitan berupa keterbatasan waktu pengerjaan dan tidak tersedianya perangkat lunak untuk menganalisis jaringan aliran, maka perhitungan dengan beberapa metode empiris dapat diterapkan, seperti:

- Metode Bligh
- Metode Lane
- Metode Koshia.

Metode Lane, disebut metode angka rembesan Lane (*weighted creep ratio method*), adalah yang dianjurkan untuk mencek bangunan-bangunan utama untuk mengetahui adanya erosi bawah tanah. Metode ini memberikan hasil yang aman dan mudah dipakai. Untuk bangunan-bangunan yang relatif kecil, metode-metode lain mungkin dapat memberikan hasil-hasil yang lebih baik, tetapi penggunaannya lebih sulit.

Metode Lane diilustrasikan pada Gambar 2.7 dan memanfaatkan Tabel 2.4. Metode ini membandingkan panjang jalur rembesan di bawah bangunan di sepanjang bidang kontak bangunan/pondasi dengan beda tinggi muka air antara kedua sisi bangunan.

Di sepanjang jalur perkolasi ini, kemiringan yang lebih curam dari 45<sup>0</sup> dianggap vertikal dan yang kurang dari 45<sup>0</sup> dianggap horisontal. Jalur vertikal dianggap memiliki daya tahan terhadap aliran 3 kali lebih kuat daripada jalur horisontal.

Oleh karena itu, rumusnya adalah:

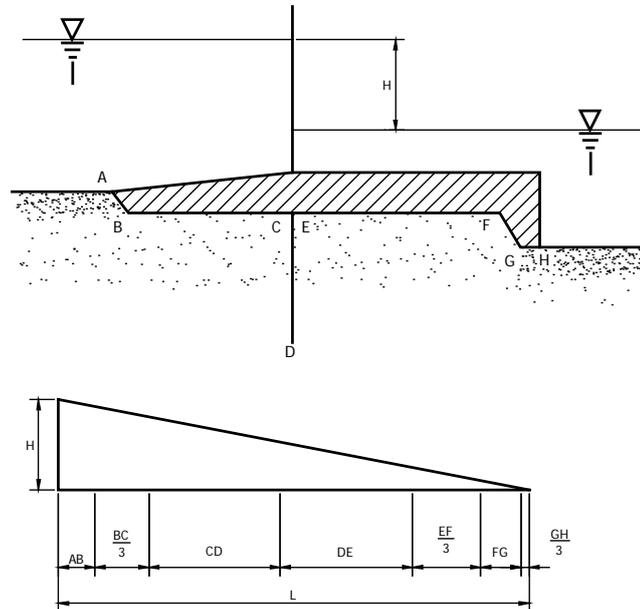
$$C_L = \frac{\Sigma L_v + 1/3 \Sigma L_H}{H} \dots\dots\dots (2.11)$$

di mana:  $C_L$  : Angka rembesan Lane (lihat Tabel 2.4)

$\Sigma L_V$  : jumlah panjang vertikal, m

$\Sigma L_H$  : jumlah panjang horisontal, m

H : beda tinggi muka air, m



Gambar 2.7 Metode angka rembesan Lane

Table 2.4 Harga-harga minimum angka rembesan Lane ( $C_L$ )

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

---

Angka-angka rembesan pada Tabel 2.4 di atas sebaiknya dipakai:

- a. 100% jika tidak dipakai pembuang, tidak dibuat jaringan aliran dan tidak dilakukan penyelidikan dengan model;
- b. 80% kalau ada pembuangan air, tapi tidak ada penyelidikan maupun jaringan aliran;
- c. 70% bila semua bagian tercakup.

Menurut Creagen, Justin dan Hinds, hal ini menunjukkan diperlukannya keamanan yang lebih besar jika telah dilakukan penyelidikan detail.

Untuk mengatasi erosi bawah tanah elevasi dasar hilir harus diasumsikan pada pangkal koperan hilir. Untuk menghitung gaya tekan ke atas, dasar hilir diasumsikan di bagian atas ambang ujung.

Keamanan terhadap rekah bagian hilir bangunan bisa dicek dengan rumus berikut:

$$S = \frac{s(1+a/s)}{h_s} \dots\dots\dots (2.12)$$

di mana: S = faktor keamanan

s = kedalaman tanah, m

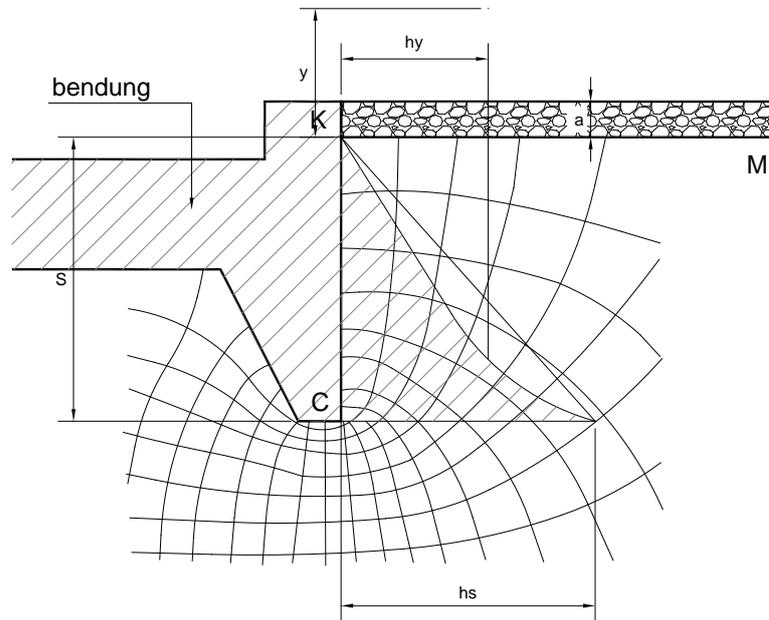
a = tebal lapisan pelindung, m

$h_s$  = tekanan air pada kedalaman s, kg/m<sup>2</sup>

Gambar 2.8 memberikan penjelasan simbol-simbol yang digunakan.

Tekanan air pada titik C dapat ditemukan dari jaringan aliran atau garis angka rembesan Lane.

Rumus di atas mengandaikan bahwa volume tanah di bawah air dapat diambil 1 ( $\tau_w = \tau_s = 1$ ). Berat volume bahan lindung di bawah air adalah 1. Harga keamanan S sekurang-kurangnya 2.



Gambar 2.8 Ujung hilir bangunan; sketsa parameter-parameter stabilitas

## 2.1.4 Detail Bangunan

### 2.1.4.1 Dinding penahan

Dinding penahan gravitasi setinggi tidak lebih dari 3 m bisa direncana dengan potongan melintang empiris seperti diberikan pada Gambar 2.9.

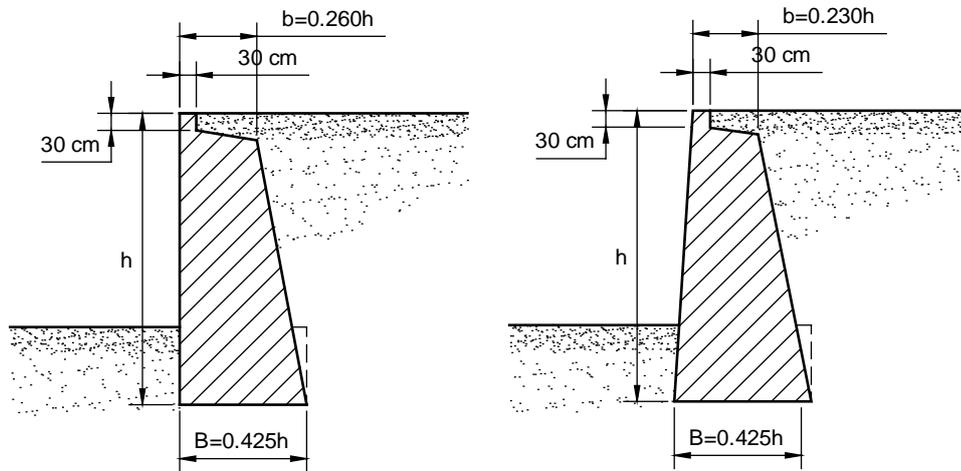
dengan :

$$b = 0,260 h \text{ untuk dinding dengan bagian depan vertikal}$$

$$B = 0,425 h$$

$B = 0,230 h$  untuk dinding dengan bagian depan kurang dari 1:1/3

$B = 0,460 h$ .



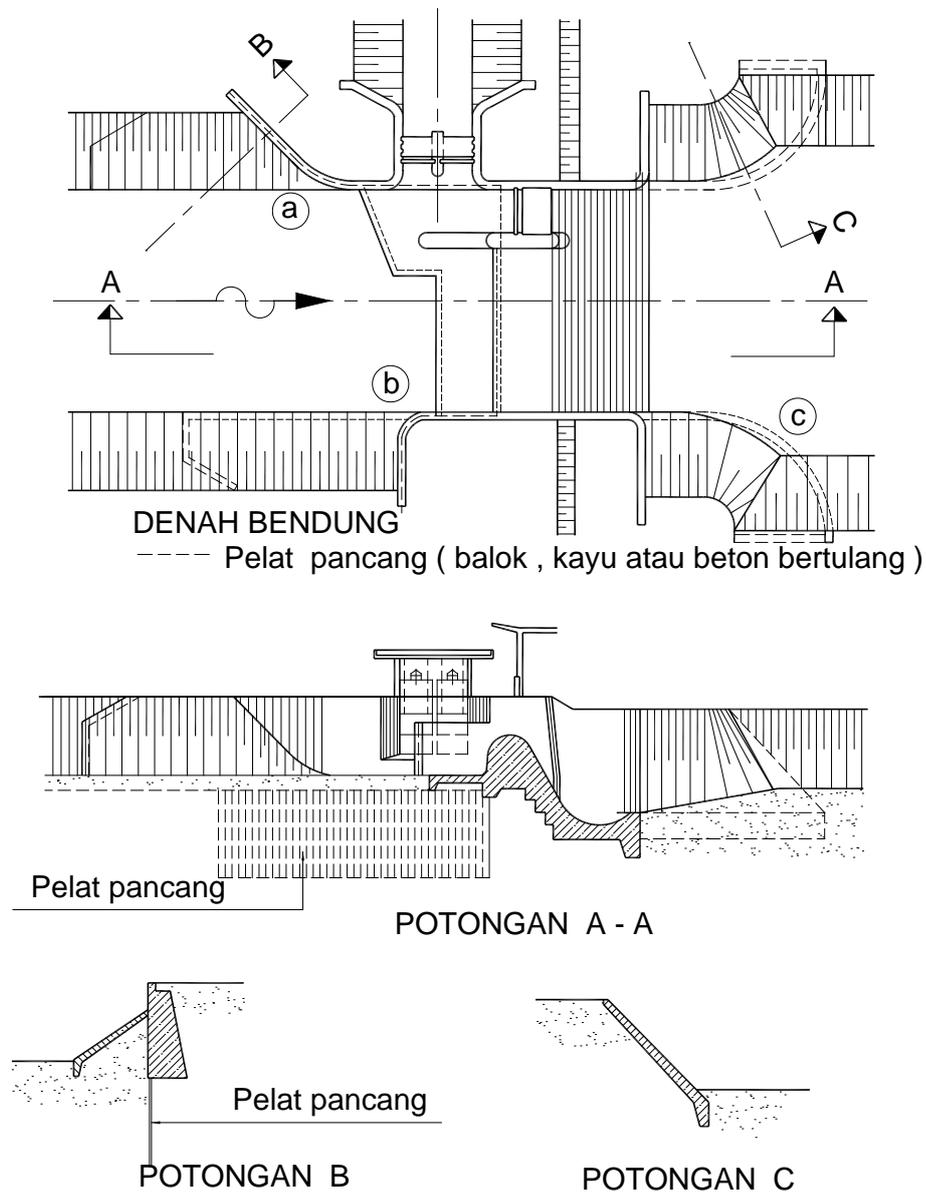
*Gambar 2.10 Dinding penahan gravitasi dari pasangan batu*

**Sumber:** Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP-02, Kementerian Pekerjaan Umum, 1986

#### **2.1.4.2 Peredam Energi**

Beda tinggi energi di atas bendung terhadap air hilir dibatasi sampai 7 m. Jika ditemukan tinggi terjunan lebih dari 7 m dan keadaan geologi dasar sungai relatif tidak kuat sehingga perlu kolam olak maka perlu dibuat bendung tipe cascade yang mempunyai lebih dari satu kolam olak. Hal ini dimaksudkan agar energi terjunan dapat direduksi dalam dua kolam olak sehingga kolam olak sebelah hilir tidak terlalu berat meredam energi.

Keadaan demikian akan mengakibatkan lantai peredam dan dasar sungai dihilir koperan (*end sill*) dapat lebih aman.



*Gambar 2.11 Perlindungan terhadap rembesan melibat pangkal bendung*

**Sumber:** Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP-02, Kementerian Pekerjaan Umum, 1986

Dinding penahan yang lebih tinggi dan dinding penahan yang mampu menahan momen lentur (beton bertulang atau pelat pancang baja) harus direncana berdasarkan hasil-hasil perhitungan stabilitas. Perhitungan pembebanan tanah dan

stabilitas di belakang dinding penahan dijelaskan dalam KP-06 Parameter Bangunan.

Karena dinding penahan di sebelah hulu bangunan utama mungkin tidak dilengkapi dengan sarana-sarana pembuang akibat adanya bahaya rembesan, maka dalam melakukan perhitungan kita hendaknya mengandaikan tekanan air penuh di belakang dinding.

Kebutuhan stabilitas untuk bangunan-bangunan ini dapat dijelaskan seperti dalam pasal 2.1.2.1.

#### **2.1.4.3 Perlindungan terhadap erosi bawah tanah**

Untuk melindungi bangunan dari bahaya erosi bawah tanah, ada beberapa cara yang bisa ditempuh. Kebanyakan bangunan hendaknya menggunakan kombinasi beberapa konstruksi lindung.

Pertimbangan utama dalam membuat lindungan terhadap erosi bawah tanah adalah mengurangi kehilangan beda tinggi energi per satuan panjang pada jalur rembesan serta ketidakterusan (*discontinuities*) pada garis ini.

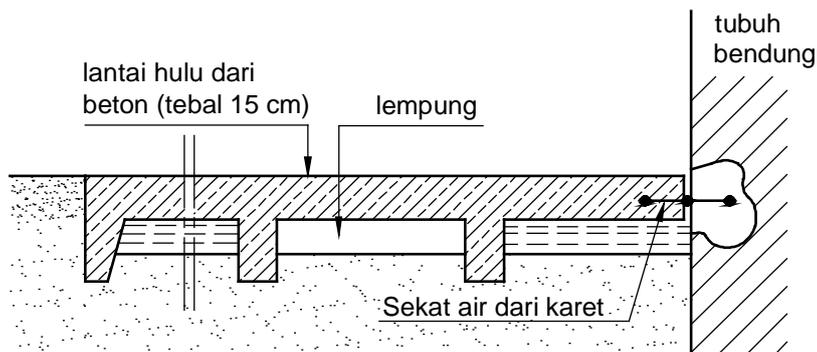
Dalam perencanaan bangunan, pemilihan konstruksi-konstruksi lindung berikut dapat dipakai sendiri-sendiri atau dikombinasi dengan:

- lantai hulu
- dinding halang
- filter pembuang
- konstruksi pelengkap.

Penting disadari bahwa erosi bawah tanah adalah masalah tiga dimensi dan bahwa semua konstruksi lindung harus bekerja ke semua arah dan oleh sebab itu termasuk pangkal bendung (*abutment*) dan bangunan pengambilan (lihat Gambar 2.10).

### Lantai hulu

Lantai hulu akan memperpanjang jalur rembesan. Karena gaya tekan ke atas di bawah lantai diimbangi oleh tekanan air di atasnya, maka lantai dapat dibuat tipis. Persyaratan terpenting adalah bahwa lantai kedap air, demikian pula sambungannya dengan tubuh bendung. Sifat kedap air ini dapat dicapai dengan foil plastik atau lempung kedap air di bawah lantai dan sekat karet yang menghubungkan lantai dan tubuh bendung. Contoh sambungan yang dianjurkan antara lantai dan tubuh bendung diberikan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Lantai hulu

Salah satu penyebab utama runtuhnya konstruksi ini adalah bahaya penurunan tidak merata (*diferensial*) antara lantai dan tubuh bendung.

Oleh sebab itu, sambungan harus direncanakan dan dilaksanakan dengan amat hati-hati.

Lantai itu sendiri dapat dibuat dari beton bertulang dengan tebal 0,10 m, atau pasangan batu setebal 0,20 – 0,25 cm. Adalah penting untuk menggunakan sekat air dari karet yang tidak akan rusak akibat adanya penurunan tidak merata.

Keuntungan dari pembuatan lantai hulu adalah bahwa biayanya lebih murah dibanding dinding halang vertikal yang dalam, karena yang disebut terakhir ini memerlukan pengeringan dan penggalian. Tapi, sebagaimana dikemukakan oleh Lane dalam teorinya, panjang horisontal rembesan adalah 3 kali kurang efektif dibanding panjang vertikal dengan panjang yang sama.

#### Dinding halang (Cut-off)

Dinding halang bisa berupa dinding beton bertulang atau pasangan batu, inti tanah kedap air atau pudel atau dengan pelat pancang baja atau kayu.

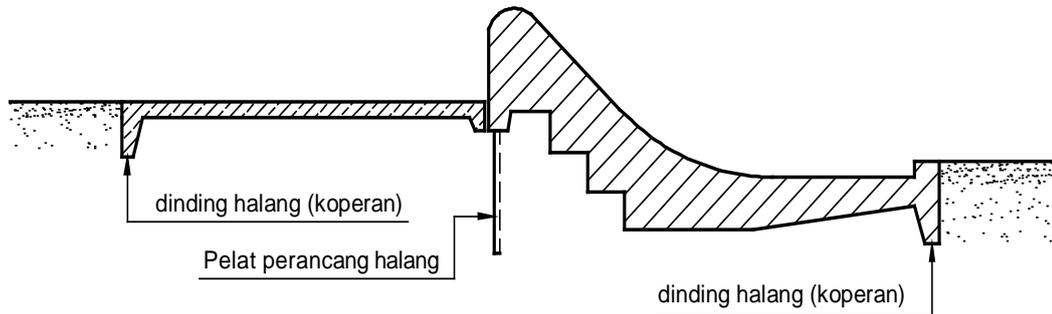
Pelat pancang mahal dan harus dibuat dengan hati-hati untuk menciptakan kondisi yang benar-benar tertutup. Terdapatnya batu-batu besar atau kerikil kasar di dasar sungai tidak menguntungkan untuk pelat pancang yang kedap air. Tanah yang paling cocok untuk pelat pancang adalah tanah berbutir halus dan tanah berlapis horisontal.

Pudel yang baik atau inti tanah kedap air bisa merupakan dinding halang yang baik sekali, tapi sulit disambung ke bangunan itu sendiri.

Metode yang dianjurkan untuk membuat dinding halang adalah dengan beton bertulang atau pasangan batu.

Agar gaya tekan ke atas pada bangunan dapat sebanyak mungkin dikurangi, maka tempat terbaik untuk dinding halang adalah di ujung hulu bangunan, yaitu di

pangkal (awal) lantai hulu atau di bawah bagian depan tubuh bendung. (lihat Gambar 2.13).



Gambar 2.13 Dinding – dinding halang di bawah lantai hulu atau tubuh bendung

**Sumber:** Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama KP-02, Kementerian Pekerjaan Umum, 1986

### 2.1.5 Tekanan Lumpur

Tekanan lumpur yang bekerja terhadap muka hulu bendung atau terhadap pintu dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_s = \frac{\tau_s h^2}{2} \left( \frac{1 - \sin \ell}{1 + \sin \ell} \right) \dots\dots\dots (2.13)$$

di mana:

$P_s$  : gaya yang terletak pada 2/3 kedalaman dan atas lumpur yang bekerja secara horisontal

$\tau_s$  : berat lumpur, kN/m

$h$  : dalamnya lumpur, m

$\ell$  : sudut gesekan, derajat.

Beberapa anggapan dapat dibuat seperti berikut:

$$\tau_s = \tau_s \left( \frac{G-1}{G} \right) \dots\dots\dots (2.14)$$

di mana  $\tau_s$  = berat volume kering tanah 16 kN/m<sup>3</sup> ( $\approx$  1600 kfg/m<sup>3</sup>)

G = berat jenis butir = 2,65

menghasilkan  $\tau_s = 10$  kN/m<sup>3</sup> ( $\approx$  1000 kfg/m<sup>3</sup>)

Sudut gesekan dalam, yang bisa diandaikan 30° untuk kebanyakan hal,

Menghasilkan :

$$PS = 1,67 h^2 \dots\dots\dots (2.15)$$

### 2.1.6 Tekanan Air

#### 2.1.6.1 Tekanan hidrostatik

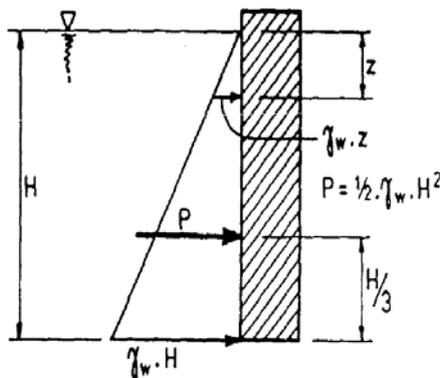
Tekanan hidrostatik adalah fungsi kedalaman di bawah permukaan air dan sama dengan:

$$PH = \gamma_w W z \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana : PH= tekanan hidrostatik, kN/m<sup>2</sup>

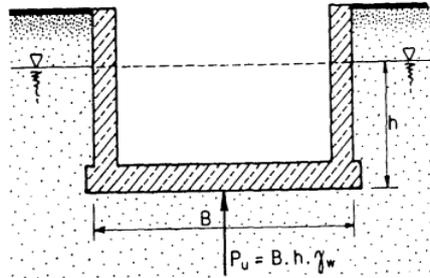
$\gamma_w$ = berat volume air, kN/m<sup>3</sup> ( $\approx$  10)

z = jarak dan permukaan air bebas, m.



Gambar 2.14 . Tekanan air pada dinding Tegak

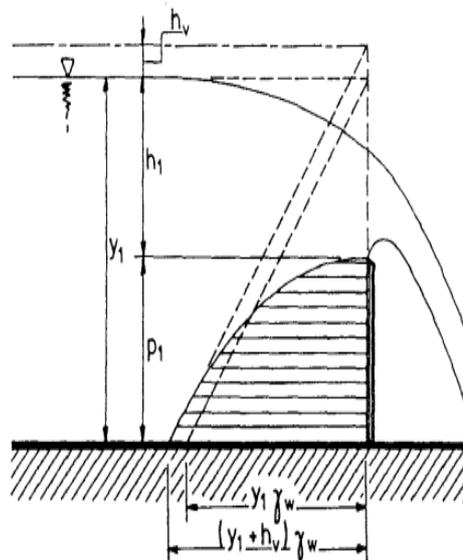
Gaya tekan ke atas (uplift) yang bekerja pada lantai bangunan adalah sama dengan berat volume air yang dipindahkan oleh bangunan.



Gambar 2.14 . Gaya Tekan air ke atas

### 2.1.6.2 Tekanan hidrodinamik

Harga pasti untuk gaya hidrodinamik jarang diperlukan karena pengaruhnya kecil saja pada jenis bangunan yang digunakan di jaringan irigasi. Prinsip gaya hidrodinamik adalah bahwa jika kecepatan datang (approach velocity) cukup tinggi dan oleh sebab itu tinggi energi besar, maka akan terdapat tekanan yang makin besar pada bagian-bagian dinding (lihat Gambar 2.15.).



Gambar 2.15 Tekanan hidrodinamik

### 2.1.7 Rembesan

#### Teori angka rembesan Lane

Dalam teori angka rembesan Lane, diandaikan bahwa bidang horisontal 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 bangunan dengan cara membagi beda tinggi energi pada bangunan sesuai dengan panjang relatif di sepanjang pondasi.

Dalam bentuk rumus, ini berarti bahwa gaya angkat pada titik x di sepanjang dasar bangunan dapat dirumuskan sebagai berikut

$$P_x = H_x - \frac{L_x}{L} \Delta H \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

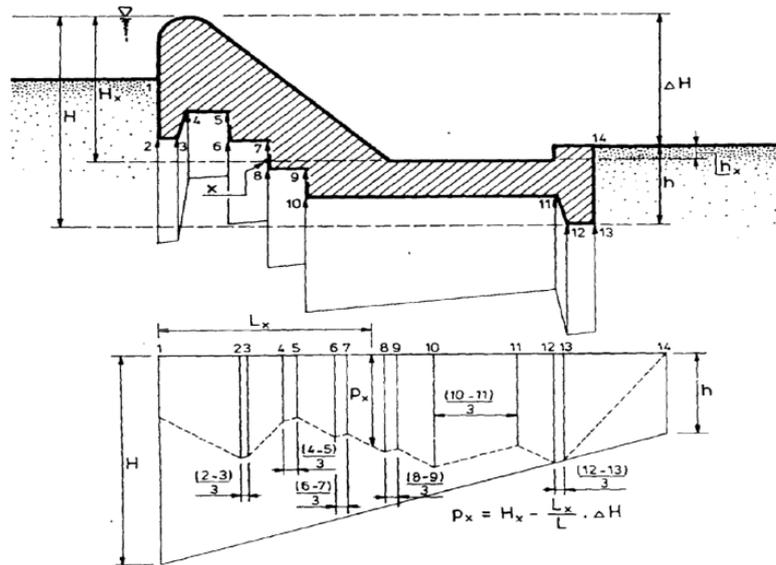
di mana :  $P_x$  = gaya angkat pada x , kg/m<sup>2</sup>

$L$  = panjang total bidang kontak bangunan dan tanah bawah, m

$L_x$  = jarak sepanjang bidang kontak dan hulu sampai x, m

$\Delta H$  = beda tinggi energi, m

$H_x$  = tinggi energi di hulu bendung, m.



Gambar 2.16 Gaya tekan ke atas pada pondasi bendung

### *Stabilitas terhadap erosi bawah tanah (piping)*

Bangunan-bangunan yang harus mengatasi beda tinggi muka air hendaknya dicek stabilitasnya terhadap erosi bawah tanah dan bahaya runtuh akibat naiknya dasar galian (heave) atau rckahnya pangkal hilir bangunan.

Bahaya terjadinya erosi bawah tanah dapat dicek dengan jalan membuat jaringan aliran/flownet dan dengan beberapa metode empiris, seperti:

- Metode Bligh
- Metode Lane, atau
- Metode Koshla

### Metode Lane

Metode Lane ini memberikan koreksi pada teori Bligh dengan menyatakan bahwa energy yang dibutuhkan oleh air untuk melewati jalan vertikal lebih besar

daripada jalan yang horizontal dengan perbandingan 3 : 1 Jadi dianggap bahwa  $L_v = 3 L_h$ .

Metode Lane, yang juga disebut metode angka rembesan Lane (weighted creep ratio method), adalah cara yang dianjurkan untuk mengecek bangunan guna mengetahui adanya erosi bawah tanah. Metode ini memberikan hasil yang aman dan mudah dipakai. Untuk bangunan-bangunan yang relatif kecil, metode-metode lain mungkin dapat memberikan hasil-hasil yang lebih baik, tetapi penggunaannya lebih sulit.

Di sepanjang jalur perkolasi ini, kemiringan yang lebih curam dan 45° dianggap vertikal dan yang kurang dan 45° dianggap horisontal. Jalur vertikal dianggap memiliki daya tahan terhadap aliran 3 kali lebih kuat daripada jalur horisontal.

Oleh karena itu, rumusnya adalah

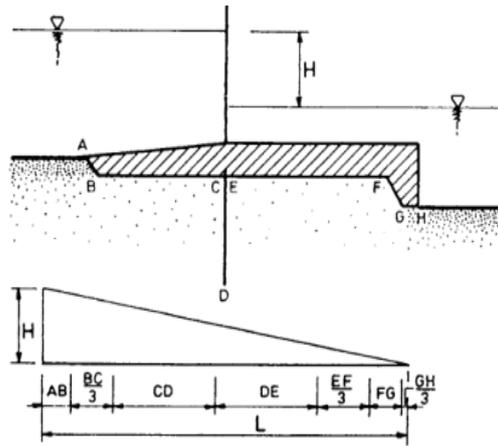
$$CL = \frac{\sum L_v + 1/3L_h}{H} \dots\dots\dots (2.18)$$

di mana: CL : Angka rembesan Lane (lihat Tabel 3.6)

$\sum L_v$  : jumlah panjang vertikal, m

$\sum L_h$  : jumlah panjang horisontal, m

H : beda tinggi muka air, m.



**Gambar 2.17 Metode angka rembesan Lane**

**Tabel 2.5 Harga-harga minimum angka rembesan lane (CL)**

Material	Rembesan C	
	Lane	Bligh
Pasir sangat halus atau lanau	8.5	18
Pasir halus	7.0	15
Pasir sedang	6.0	--
Pasir kasar	5.0	12
Kerikil halus	4.0	--
Kerikil sedang	3.5	--
Kerikil kasar termasuk berangkal campur pasir	3.0	9
Bongkah dengan sedikit berangkal dan kerikil	2.5	4 – 6
Lempung lunak	3.0	--
Lempung sedang	2.0	--
Lempung keras	1.8	--
Lempung sangat keras	1,6	

### 2.1.8 Beban akibat Gempa

Faktor-faktor beban akibat gempa yang akan digunakan dalam perencanaan bangunan-bangunan pengairan diberikan dalam bentuk peta yang diterbitkan oleh STANDAR INDONESIA yang berlaku . Karena DPMA dalam tahun 1981 dengan judul “Peta Zona Seismik untuk Perencanaan Bangunan Air Tahan Gempa” DPMA dalam tahun 1981, tidak berlaku lagi .

Berdasarkan SNI 03-1726-2002 , Tata Cara perencanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung dan dengan acuan normative lainnya seperti

- RSNI M-02-2002 Metode Analisis dan cara Pengendalian rembesan air untuk Bendung Urugan
- RSNI M – 03-2002 Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan tipe Urugan
- RSNI T-01-2002 Tata Cara desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan

Koefisien gempa dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut

$$a_d = n (a_C * Z)^m, \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

$$E = \frac{a_d}{g} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

di mana:

- $a_d$  = percepatan gempa rencana, cm/dt<sup>2</sup>
- $n, m$  = koefisien untuk jenis tanah (lihat Tabel 3.2)
- $a_C$  = percepatan kejut dasar, cm/dt (untuk harga per periode ulang lihat Tabel 3.12 ).
- $E$  = koefisien gempa

g = percepatan gravitasi, cm/dt<sup>2</sup> ( 980)

z = faktor yang bergantung kepada letak geografis (Koefisien Zona lihat Gambar 3.12, )

**Tabel 2.6 Koefisien Zona gempa pada Zona A,B,C,D,E,F**

ZON	KOEFISIEN ZONA Z
A	
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 : RPT 4, ANALIS STABILITAS BENDUNGAN TIPE URUGAN AKIBAT GEMPA*

Faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihan parameter evaluasi gempa ada 3 faktor yaitu :

- 1) Tingkat kerusakan di lokasi bending/ bangunan pengairan
- 2) Tingkat resiko dari bangunan yang sudah selesai dibangun;
- 3) Tipe bendungan dan potensi tipe keruntuhan.

Tingkat kerusakan di lokasi bending/ bangunan pengairan Secara geografis beberapa tempat kadang-kadang berbeda, Periode ulang dan percepatan dasar gempa, ac sesuai SNI 03-1726-2002 diuraikn dalam tabel 2.6a di bawah ini

**Tabel 2.6a Periode ulang dan percepatan dasar gempa,  $a_c$**

Periode ulang *) tahun	$a_c$ *) (gal = cm /dt <sup>2</sup> )
10	90
20	120
50	
100	190
200	220
500	250
1000	280
5000	330

Sumber : RPT 4, ANALIS STABILITAS BENDUNGAN TIPE URUGAN AKIBAT GEMPA

Faktor gempa E yang dicari dan rumus dan peta di atas dipakai dalam perhitungan stabilitas di mana faktor itu harus dikalikan dengan berat sendiri bangunan dan dipakai sebagai gaya horisontal.

Koreksi pengaruh jenis tanah setempat sesuai SNI 03-1726-2002 diuraikan dalam tabel 2.7 di bawah ini.

**Tabel 2.7 Faktor Koreksi pengaruh jenis tanah setempat**

Kelom pok	Jenis tanah	Periode Predominan $T_s$ (detik)	Koreksi V
1	Batuan : a) Perlapisan terbentuk sebelum periode kuarter disebut batuan; b) Lapisan diiluvial di atas lapisan batuan dengan tebal kurang 10 m	$T_s \leq 0,25$	0,80
2	Diiluvium : a) Lapisan diiluvial di atas lapisan batuan dengan tebal lebih dari 10 m; b) Lapisan alluvial diatas lapisan batuan tebal kurang dari 10 m	$0,25 < T_s \leq 0,50$	1,00
3	Alluvium:	$0,25 < T_s \leq 0,50$	1,10
4	Alluvium Lunak :	$T_s \geq 0,75$	1,20

Catatan :

(1) Yang termasuk dalam lapisan diiluvial adalah lapisan pasir padat; kerikil bongkahan; lempung keras;

(2) Yang termasuk lapisan alluvial adalah lapisan endapan baru seperti endapan sungai; longsor;

### 2.1.9 Kombinasi Pembebanan

Tabel 2.8 menunjukkan kombinasi pembebanan dan kenaikan dalam tegangan izin rencana.

No	Kombinasi pembebanan	Kenaikan tegangan izin
1	M + H 6 K T+ Thn	0%
2	M + H 6 K T+ Thn + G	20%
3	M + H 6 K T+ Thb	20%
4	M + H 6 K T+ Thb + G	50%
5	M + H 6 K T+ Thb + Ss	30%

Dalam Table 2.8:

M = Beban mati

H = Beban hidup

K = Beban kejut

T = Beban tanah

Thn = Tekanan air normal

Thb = Tekanan air selama banjir

G = Beban gempa

Ss = Pembebanan sementara selama pelaksanaan

### 2.1.10 Tegangan Izin dan Faktor Keamanan

#### 2.1.10.1 Tegangan izin

Tegangan izin untuk beton (bertulang), baja dan kayu diuraikan dalam standar persyaratan di bawah ini:

(1) **PBI-1971 (NI-2)** Peraturan Beton Bertulang Indonesia

- (2) **VOSB-1963** Peraturan-peraturan Perencanaan Bangunan Konstruksi Baja dan PPBBI-1983 Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia (Jembatan dan Bangunan)
- (3) PKKI-1961 (NI-5) Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia.

Untuk pasangan batu atau bata merah , tegangan-tegangan izin adalah:

- pasangan batu  $\sigma_d = 7 \text{ N/mm}^2 (= 7 \text{ kgf/cm}^2)$
- pasangan bata merah  $\sigma_d = 2,5 \text{ N/mm}^2 (= 25 \text{ kgf/cm}^2)$
- tidak boleh ada tegangan tarik pada bangunan dan pasangan.

#### 2.1.10.2 Faktor keamanan

- (a) Harga-harga faktor keamanan terhadap bahaya guling (overturning) diberikan pada Tabel 2.9 untuk berbagai kombinasi pembebanan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.8.

**Tabel 2.9 Faktor kearnanan  $M_1/M_g \leq Fg^*$  terhadap guling**

Kombinasi pembebanan	Faktor keamanan ( $F_g$ )
1	1.5
2	1.3
3	1.3
4	1.1
5	1.2

- \*)  $M_g$  = momen total sesungguhnya yang menyebabkan terjadinya guling
- $M_t$  = momen tahan terhadap guling
- $F_g$  = faktor keamanan terhadap guling.

(b) Harga-harga faktor keamanan terhadap gelincir (sliding)  $F_s$  diberikan pada Tabel 2.7 untuk berbagai kombinasi pembebanan.

**Tabel 2.10 Faktor keamanan terhadap gelincir /  $r \leq F_s$ \*\*)**

Kombinasi pembebanan	Faktor keamanan (Fg)
1	1.5
2	1.3
3	1.3
4	1.1
5	1.2

\*\* )  $\bar{r}$  = tegangan izin maksimum, kN/m<sup>2</sup>

$r$  = tegangan gelincir yang sesungguhnya, kN/m<sup>2</sup>

$F_s$  = faktor keamanan terhadap gelincir.

(c) Faktor keamanan terhadap gaya tekan ke atas sebaiknya diambil antara 1,1 dan 1,5 .