

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Menurut Keputusan Direktur Jenderal Pengairan Nomor 185/KPTS/A/1986 tentang Standar Perencanaan Irigasi, bahwa bendung adalah bangunan air yang dibangun secara melintang pada sungai, dan dibuat untuk meninggikan muka air sehingga air sungai dapat disadap dan dialirkan secara gravitasi ke jaringan irigasi. Kelebihan airnya akan dilimpahkan ke bagian hilir dengan suatu terjunan yang dilengkapi kolam olak dengan tujuan untuk meredam energi.

Bendung kamijoro dibangun karena terdapat suatu permasalahan di hilir Intake Kamijoro yaitu penutupan sedimen Kali Progo di mulut intake yang kemungkinan akan mengancam keberfungsian Intake Kamijoro. Sehingga diperlukan modifikasi bangunan pengambilan. Salah satu modifikasi bangunan adalah dengan pembangunan Bendung Kamijoro (Balai Besar Wilayah Sungai Serayu-Opak, 2017).

Bendung yang dibangun harus memenuhi persyaratan-persyaratan untuk menjamin mutu dan umur bendung agar terhindar dari kerusakan dini. Kontrol stabilitas adalah persyaratan yang penting dan haruslah dipenuhi agar struktur bendung tetap stabil. Kontrol stabilitas bendung yang dilakukan haruslah stabil terhadap gelincir, guling maupun *piping*. Olehkarena itu diperlukan perhitungan gaya-gaya yang bekerja pada bangunan bendung itu sendiri. Adapun perhitungan gaya-gaya yang dilakukan adalah berupa perhitungan berat sendiri bangunan, tekanan air, tekanan lumpur, serta gaya gempa (Prasasti dkk., 2013).

Penelitian kestabilan suatu bendung perlu juga dilakukan tinjauan dari segi eksentrisitas, daya dukung tanah, serta rembesan. Hal ini penting dilakukan karena bendung haruslah terpenuhi keseimbangannya atau stabil terhadap eksentrisitas, daya dukung tanah untuk bendung harus aman terhadap penurunan tanah akibat beban struktur bangunan, selain itu bendung harus aman terhadap gaya *seepage* yang dapat menimbulkan *piping* akibat rembesan yang terjadi pada tanah bagian bawah bendung (Firnanda dkk., 2016).

Rembesan terjadi apabila terdapat beda tinggi muka air pada bangunan, sehingga aliran pada bagian hulu akan meresap masuk ke dalam tanah di sekitar bangunan, akibatnya akan timbul aliran di dalam tanah (Sukirman, 2014). Aliran air didalam tanah dapat menimbulkan suatu gaya angkat akibat dari terangkatnya butiran-butiran pasir yang disebut dengan *Seepage*, yang mana apabila terjadi di dalam lapisan tanah disebut dengan *Piping*. *Piping* akan sulit terjadi apabila dilakukan pemasangan *sheet pile* yang lebih dalam pada bendung, karena piping ini sangat bergantung kepada kekuatan tahanan terhadap aliran air di dalam tanah (Aziz dan Abdallah, 2017).

Tahanan terhadap aliran air di dalam tanah bergantung kepada jenis tanah, ukuran butiran, bentuk butiran, rapat massa, serta bentuk geometri rongga pori. Tanah berbutir halus memiliki rembesan yang kecil dan daya rembes yang besar, hal ini dikarenakan tanah tersebut memiliki rapat massa yang tinggi akibat sifat kohesif, sehingga rongga pori yang kecil mengakibatkan aliran rembesan yang masuk kedalam tanah akan sangat sedikit akan tetapi kecepatan aliran yang masuk akan besar, sehingga tahanan terhadap aliran air ini akan semakin kuat untuk jenis tanah tersebut. Sebaliknya dengan tanah berbutir kasar, karena memiliki rongga pori yang besar, maka tanah jenis ini akan mudah ditembus oleh air. Maka untuk jenis tanah berbutir kasar ini akan rawan terjadi erosi bawah tanah atau *piping* (Sompie dan Puntoring, 2014).

Seepage yang terjadi pada bagian bawah bendung biasanya juga membawa bebarapa hal, salah satunya adalah fenomena penyumbatan (*clogging*). Penyumbatan ini terjadi karena air yang meresap ke tanah pada bagian hulu memindahkan partikel-partikel yang tersimpan pada bagian pori tanah. Sehingga, kejadian tersebut mengakibatkan efektifitas pori tanah dan konduktifitas hidrolik tanah berkurang, sehingga terjadilah penyumbatan. Maka, hal ini membuat kemungkinan terjadinya *piping* pun berkurang, karena dengan adanya penyumbatan ini, *seepage* akan tereduksi secara perlahan (Sroka dkk., 2014).

2.2. Dasar Teori

Bendung adalah suatu bangunan air yang dibangun secara melintang pada sungai, dan dibuat untuk meninggikan muka air sehingga air sungai dapat disadap dan dialirkan secara gravitasi ke jaringan irigasi. Kelebihan airnya akan dilimpahkan ke bagian hilir dengan suatu terjunan yang dilengkapi kolam olak dengan tujuan untuk meredam energi (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013). Pada perhitungan stabilitas bendung kolam olak diasumsikan dalam keadaan kering apabila dilakukan perhitungan pada saat debit normal, yaitu dimana tinggi muka air hanya mencapai elevasi puncak mercu (Syofyan dan Frizaldi, 2017). Dilihat dari segi keamanan stabilitas bendung, ukuran pintu-pintu, tinggi tanggul banjir dan sebagainya, pada saat debit banjir untuk tinggi muka air banjir maksimum dianjurkan tidak lebih dari 4,5 meter (Mangroe dkk., 2013).

Gaya-gaya yang bekerja pada bendung mempunyai dampak yang sangat besar pada bangunan bendung itu sendiri, sehingga bendung haruslah direncanakan dengan baik dan memenuhi persyaratan stabilitasnya. Adapun gaya-gaya yang bekerja meliputi Tekanan air dalam dan luar, tekanan lumpur, gaya gempa, berat bangunan serta reaksi pondasi (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013).

2.2.1. Gaya Tekan Air

2.2.1.1. Gaya *Uplift* Air

Dalam hal mendesain struktur bangunan air sangatlah perlu untuk memperhitungkan rembesan (*seepage*) yang terjadi dibawah struktur bangunan itu sendiri, karena apabila hal tersebut tidak dipertimbangkan maka seluruh struktur dapat mengalami kegagalan akibat gaya tekan keatas dari air (*uplift*), maupun erosi bawah tanah yang mampu membuat terjadinya penurunan pondasi (Asl dkk., 2015).

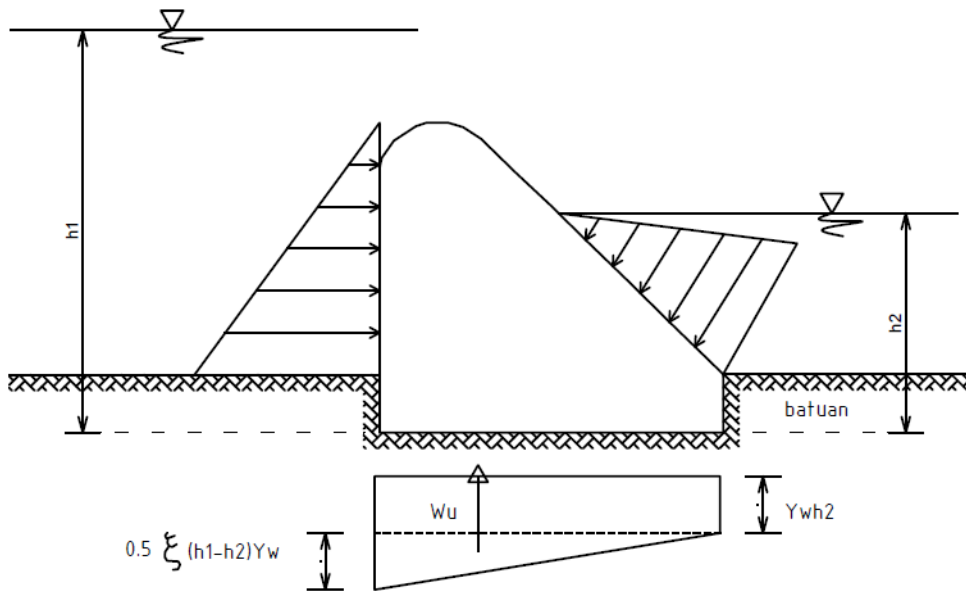
Seepage yang melalui bagian bawah bendung terjadi karena perbedaan tinggi muka air antara hulu dan hilir, sehingga hal itu menyebabkan terjadinya gaya *uplift* pada bagian pondasi bendung, Gaya *uplift* ini menyebabkan perlawanan gaya antara pondasi dengan tubuh bendung itu sendiri. Sebagai tambahan, proses ini dapat memberikan tekanan maupun tegangan pada tubuh bendung yang dapat menurunkan nilai dari faktor aman terhadap geser maupun guling (Shahrbanozadeh dkk., 2015).

Gaya tekan ke atas (*uplift*) menyebabkan berkurangnya berat efektif bangunan di atasnya. Gaya ini terdistribusi secara linier dibawah pondasi bendung (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013). Berikut diberikan Gambar 2.1 untuk gaya angkat air dan untuk persamaan gaya tekan ke atas suatu bangunan dapat dilihat pada Persamaan 2.1 berikut ini.

$$Wu = C \cdot \tau w [h_2 + \frac{1}{2} \xi (h_1 - h_2)] A \dots \dots \dots (2.1)$$

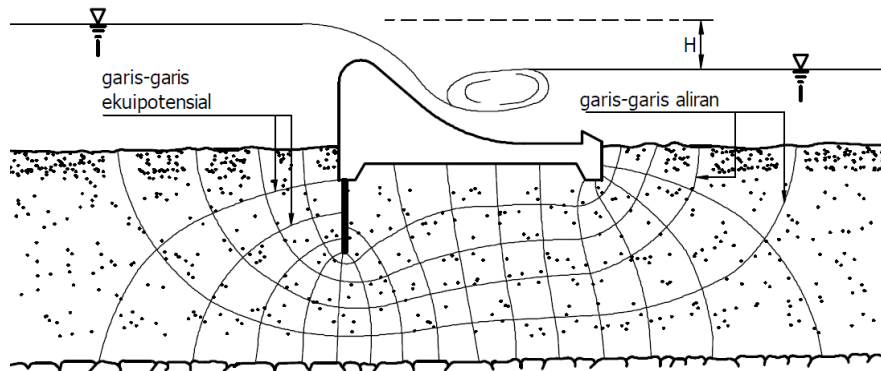
dimana:

- c = proporsi luas dimana tekanan hidrostatik bekerja (C = 1)
- h_1 = kedalaman air hulu (m)
- ξ = proporsi tekanan
- γ_w = berat jenis air (kN/m³)
- A = luas dasar (m³)
- h_2 = kedalaman air hilir (m)
- Wu = gaya tekan ke arah (kN)



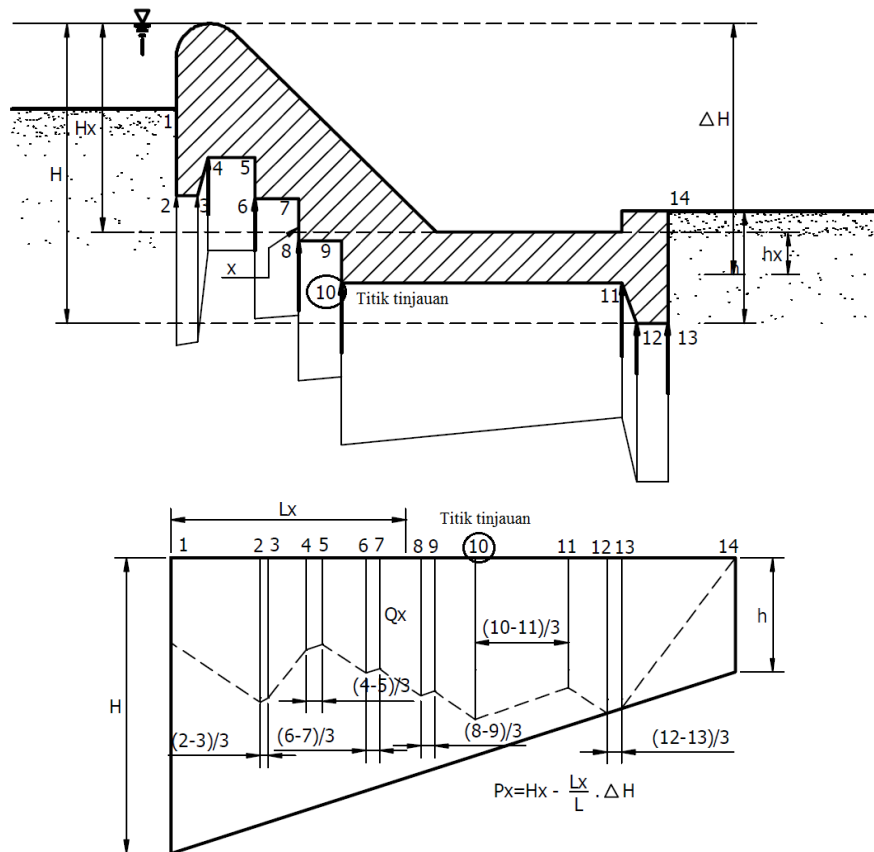
Gambar 2.1 Gaya angkat untuk bangunan pada pondasi buatan (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013)

Gaya angkat ke atas pada pondasi dapat ditentukan dengan membuat jaringan aliran (*flownet*) atau dengan asumsi yang digunakan oleh Lane untuk teori angka rembesan (*weighted creep theory*). Untuk membuat suatu jaringan aliran dapat dilakukan dengan melakukan plot dengan manual, analog listrik, maupun menggunakan metode numeris pada komputer (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013). Berikut diberikan Gambar 2.2 untuk jaringan aliran di bawah bendung.



Gambar 2.2 Jaringan aliran di bawah bendung pada pasir
(Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013)

Pada teori angka rembesan Lane, dimisalkan bahwa suatu bidang horizontal memiliki daya tahan terhadap aliran (rembesan) 3 kali lebih lemah dibanding dengan bidang vertikal (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013). Berikut diberikan Gambar 2.3 untuk gaya angkat pada pondasi bendung.



Gambar 2.3 Gaya angkat pada pondasi bendung
(Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013)

Dalam bentuk persamaan maka gaya angkat pada titik x di sepanjang dasar bendung dapat dirumuskan dalam Persamaan 2.2 berikut.

$$Px = Hx - \frac{Lx}{L} \Delta H \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana:

- Px = gaya angkat pada x (kg/m²)
- L = panjang total bidang kontak bendung dan tanah bawah (m)
- Lx = jarak sepanjang bidang kontak dari hulu sampai x (m)
- ΔH = beda tinggi energi (m)
- Hx = tinggi energi di hulu bendung (m)

Selain teori angka rembesan Lane, gaya *uplift* dapat pula ditentukan dengan menentukan debit aliran menggunakan Hukum Darcy dari suatu jaringan aliran (*flow net*), yang mana hukum ini menyatakan bahwa jumlah air yang mengalir persatuan waktu adalah: *k.i.A.* Jadi persamaan dapat dituliskan lagi sebagai berikut.

$$\Delta q = k \left(\frac{H}{N_d} \right) \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana:

- Δq = debit aliran (m³/detik/m)
- k = koefisien permeabilitas tanah (m/detik)
- H = perbedaaan tinggi muka air hulu dan hilir (m)
- N_d = banyaknya bidang bagi kehilangan energi potensial

2.2.1.2. Gaya Berat Air

Gaya berat air disebabkan karena adanya air yang menggenangi tubuh bendung, sehingga menimbulkan gaya tekan dengan arah horizontal maupun vertikal ke bawah. Gaya berat air diperhitungan dengan cara mengalikan rapat massa air dengan volume air yang menggenangi tubuh bendung (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013).

2.2.2. Gaya Tekan Lumpur

Tekanan lumpur yang bekerja pada muka hulu bendung maupun terhadap pintu dapat dihitung dengan Persamaan 2.4 berikut.

$$P_S = \frac{\tau_s \cdot h^2}{2} \left(\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right) \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana:

P_s = gaya horizontal yang terletak $2/3$ kedalaman dari atas lumpur (kN)

τ_s = berat lumpur (kN)

h = kedalaman lumpur (m)

ϕ = sudut gesekan dalam

2.2.3. Gaya Gempa

Gaya gempa memiliki suatu harga-harga yang didasarkan pada peta indonesia yang menunjukkan daerah dan resiko. Faktor minimum adalah 0,1 percepatang gravitasi yang dipertimbangkan untuk mengalikan dengan massa bangunan sebagai gaya horizontal menuju ke arah yang paling tidak aman yakni arah hilir (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013).

2.2.4. Berat Bangunan

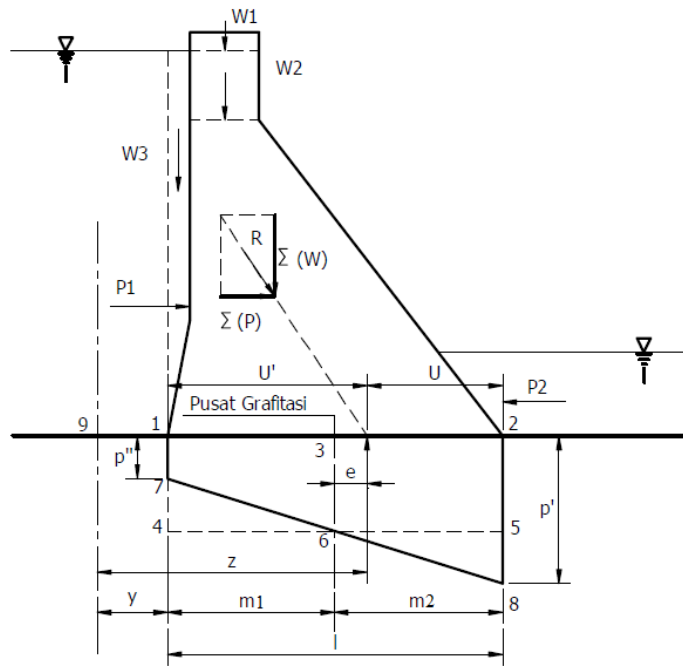
Gaya berat dihitung dengan arah vertikal kebawah yang garis kerjanya melewati titik berat konstruksi. Berat bangunan bergantung terhadap bahan yang dipakai untuk membuat bangunan ini. Berat jenis bahan-bahan bangunan dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1. Berat Jenis Bahan – Bahan Bangunan
(Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013)

Bahan Bangunan	Berat Jenis (t/m^3)
Beton bertulang	2,40
Beton biasa, tumbuk	2,20
Baja tulangan	7,85
Pasangan batu kali	2,20
Pasir padat	2,10
Air	1,00

2.2.5. Reaksi Pondasi

Suatu reaksi pondasi dapat diasumsikan sebagai bentuk trapesium dan penyebarannya secara linier. Berikut Gambar 2.4 untuk distribusi tekananya.



Gambar 2.4 Unsur-unsur persamaan distribusi tekanan pada pondasi
(Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013)

Suatu tekanan vertikal pondasi dapat dihitung dengan menggunakan mekanika sederhana seperti pada Persamaan 2.5 berikut.

$$p = \frac{\Sigma(W)}{A} + \frac{\Sigma(W)e}{I} m \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana:

- P = tekanan vertikal pondasi (kN)
- $\Sigma(W)$ = keseluruhan gaya vertikal, termasuk gaya tekan keatas tetapi tidak termasuk reaksi pondasi (kN)
- A = luas dasar (m^2)
- e = eksentrisitas pembebanan, atau jarak dari pusat gravitasi dasar sampai titik potong resultan dengan dasar (m)
- I = momen kelembaman dasar di sekitar pusat gravitasi ($kg.m^2$)
- m = jarak dari titik pusat luas dasar sampai ke titik dimana tekanan dikehendaki

untuk dasar segi empat dengan panjang dan lebar 1 m, $I = l^3/12$ dan $A=1$, sehingga persamaan seperti berikut.

$$p = \frac{\Sigma(W)}{A} \left\{ 1 + \frac{12e}{l^2} m \right\} \dots\dots\dots(2.6)$$

Sedangkan pada tekanan vertikal pondasi pada ujung bangunan ditentukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$p' = \frac{\Sigma(W)}{A} \left\{ 1 + \frac{6e}{l} m \right\} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan $m' = m'' = 1/2 l$

$$p'' = \frac{\Sigma(W)}{A} \left\{ 1 + \frac{6e}{l} m \right\} \dots \dots \dots (2.8)$$

Bila harga e dari Gambar 3.6 lebih besar daripada $1/6$, maka akan dihasilkan tekanan negatif pada ujung bangunan (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013).

2.2.6. Kebutuhan Stabilitas

Suatu bendung dapat mengalami keruntuhan apabila terdapat suatu gaya di luar tubuh yang mampu melampaui ketahanan suatu bendung. Ada tiga penyebab runtuhnya suatu bangunan bendung, yaitu:

1. Gelincir (*sliding*), terjadi di sepanjang sendi horizontal dan sepanjang pondasi.
2. Guling (*overturning*), terjadi di dalam tubuh bendung, pada dasar *base* dan pada bidang di bawah tanah.
3. Erosi Bawah Tanah (*Piping*), terjadi pada lapisan tanah bagian dalam

2.2.7. Ketahanan terhadap Gelincir (*Sliding*)

Suatu gaya angkat yang bekerja pada bendung di atas semua bidang horizontal haruslah kurang dari koefisien gesekan yang diijinkan pada bidang tersebut. Berikut persamaannya.

$$\frac{\Sigma(H)}{\Sigma(V-U)} = \tan \theta < \frac{f}{S} \dots \dots \dots (2.9)$$

dimana:

$\Sigma(H)$ = keseluruhan gaya horizontal pada bangunan (kN)

$\Sigma(V - U)$ = keseluruhan gaya vertikal, dikurangi gaya *uplift* pada bangunan (kN)

θ = sudut resultan semua gaya terhadap garis vertikal

f = koefisien gesekan

S = faktor keamanan

Harga perkiraan untuk koefisien gesekan (f) diberikan pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2. Harga-Harga Perkiraan Koefisien Gesekan
(Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013)

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

Menurut Direktorat Jenderal Sumber Daya Air (2013), Harga-harga faktor keamanan (S) yang dapat diterima adalah 2 untuk kondisi pembebanan normal dan 1,25 untuk kondisi pembebanan ekstrim. Apabila suatu bangunan terbuat dari beton yang harga aman untuk faktor gelincir yang hanya didasarkan pada gesekan saja ternyata terlampaui, maka bangunan dianggap aman apabila faktor keamanan dari rumus diatas mencakup geser. Berikut persamaannya.

$$\sum(H) \leq \frac{f \sum(V-U) + cA}{S} \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana:

c = satuan kekuatan geser bahan (kN/m^2)

A = luas dasar yang dipertimbangkan (m^2)

Harga keamanan jika geser dicakupkan maka harga-harga yang mencakup gesekan saja yakni 2,0 untuk kondisi normal dan 1,25 untuk kondisi ekstrem (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013).

2.2.8. Ketahanan terhadap Guling (*Overturning*)

Bangunan haruslah aman terhadap guling, maka resultan semua gaya yang bekerja pada bagian bangunan di atas bidang horizontal harus memotong bidang ini pada teras dan tidak boleh ada bidang tarikan manapun. Pada tiap bagian bangunan dianggap berdiri sendiri dan tidak mungkin ada distribusi gaya-gaya melalui momen lentur (*bending momen*) (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013). Maka, tebal lantai kolam olak dihitung sebagai Persamaan 2.11 berikut.

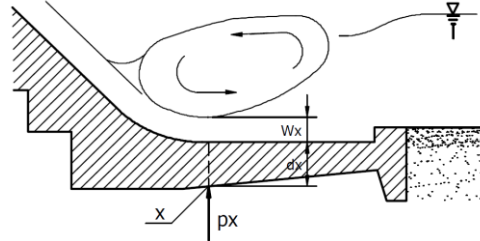
$$dx \geq S \frac{Px - Wx}{\tau} \dots\dots\dots(2.11)$$

dimana:

dx = tebal lantai pada titik x (m)

Px = gaya angkat pada titik x (kg/m^2)

- W_x = kedalaman air pada titik x (m)
 τ = massa jenis bahan (kg/m^3)
 S = faktor keamanan (1,5 untuk kondisi normal; 1,25 untuk kondisi ekstrem)



Gambar 2.5 Tebal lantai kolam olak
(Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013)

2.2.9. Ketahanan terhadap Erosi Bawah Tanah (*Piping*)

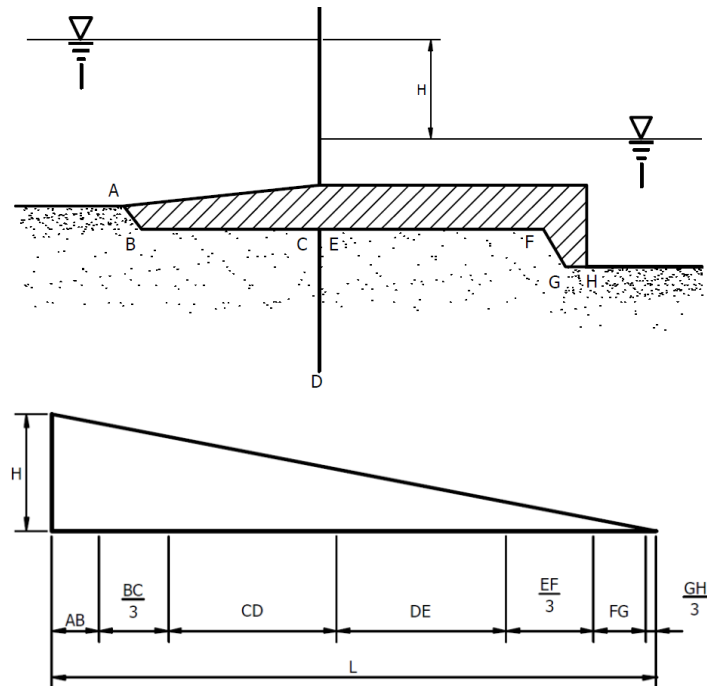
Suatu bangunan bendung haruslah memiliki ketahanan terhadap erosi bawah tanah yang mengakibatkan runtuhnya bangunan tersebut akibat kenaikan dasar galian ataupun rekahan pangkal hilir bangunan. Erosi bawah tanah dapat dilakukan penelitian dengan menggunakan jaringan aliran (*flownet*). Selain itu ada beberapa metode empiris yang dapat diterapkan seperti Metode Bligh, Metode Lane, maupun Metode Koshia (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013).

Metode Lane adalah yang dianjurkan untuk mengecek bangunan-bangunan utama untuk mengetahui adanya suatu erosi bawah tanah. Metode ini membandingkan panjang jalur rembesan di bawah bangunan di sepanjang bidang kontak bangunan/pondasi dengan beda tinggi muka air antara kedua sisi bangunan. Pada sepanjang jalur perkolasi ini, kemiringan yang lebih curam daripada 45° dianggap vertikal dan kurang dari 45° dianggap horizontal (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013). Metode Lane dapat diilustrasikan pada Gambar 2.6 dan Tabel 2.3. Berikut adalah Persamaan 2.12 untuk Metode Lane.

$$C_L = \frac{\sum L_v + 1/3 \sum L_H}{H} \dots\dots\dots(2.12)$$

dimana:

- C_L = angka rembesan Lane (berdasarkan Tabel 3.7)
 $\sum L_v$ = jumlah panjang vertikal (m)
 $\sum L_H$ = jumlah panjang horizontal (m)
 H = beda tinggi muka air (m)



Gambar 2.6 Metode angka rembesan Lane
(Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013)

Tabel 2.3. Harga Minimum Rembesan Lane (C_L)
(Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013)

Material	Rembesan C	
	Lane	Blight
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 berangkalampur 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	-

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 ujung ambang. Keamanan terhadap rekahan bagian hilir bangunan dapat diperhitungkan dengan Persamaan 2.13 berikut.

$$S = \frac{s(l + \frac{a}{s})}{h_s} \dots \dots \dots (2.13)$$

dimana:

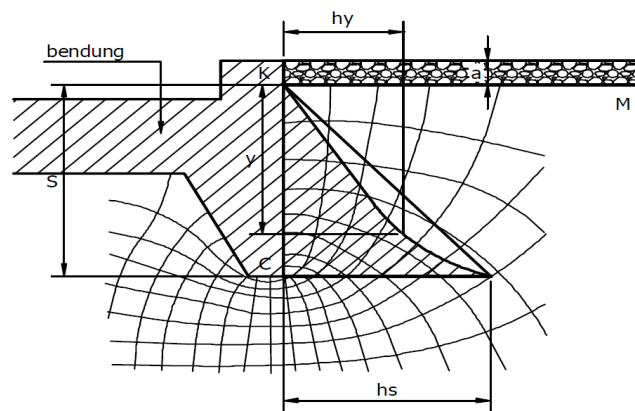
S = faktor keamanan

s = kedalaman tanah (m)

a = tebal lapisan pelindung (m)

h_s = tekanan air pada kedalaman (kg/m^2)

Persamaan diatas mengasumsikan bahwa volume tanah dibawah air dapat diambil 1 ($\tau_w = \tau_s = 1$). Berat volume bahan lindung di bawah air adalah 1, sehingga harga S sekurang-kurangnya adalah 2. Berikut sketsa parameter-parameter stabilitas pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Sketsa parameter-parameter stabilitas
(Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013)

Berdasarkan pada Gambar 2.7 tersebut tekanan air pada titik C dapat ditentukan dari jaringan aliran atau garis angka rembesan Lane (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013).

Ukuran butiran tanah berbanding lurus dengan garis aliran (*flow net*) dan berbanding terbalik dengan kecepatan aliran rembesan. Sehingga, semakin besar ukuran butiran maka semakin besar pula garis alirannya dan semakin kecil kecepatan aliran rembesannya. Selain itu, kecepatan aliran rembesan ini juga bergantung pada gradien hidrolis & elevasi muka air, yang mana saling berbanding lurus (Sukirman, 2014).