

## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Bendungan Urugan Tipe Zonal

Suatu bendungan dikategorikan kedalam tipe zonal, apabila timbunan yang membentuk tubuh bendungan terdiri dari batuan dengan gradasi (susunan ukuran butiran) yang berbeda-beda dalam urutan-urutan pelapisan tertentu. Menurut Sosrodarsono, S. (1977), bendungan urugan tipe zonal terbagi menjadi 3 bagian :

1. Bendungan urugan zonal dengan tirai kedap air (*front core fill type dam*) merupakan bendungan zonal yang tubuh bendungannya terdiri dari bahan yang lulus air namun dilengkapi dengan bahan yang kedap air pada lereng udiknya.
2. Bendungan urugan zonal dengan inti kedap air miring (*inclined-core fill type dam*) merupakan bendungan zonal yang tubuh bendungannya terdiri dari bahan yang lulus air tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan miring kearah hilir.
3. Bendungan urugan zonal dengan inti kedap air tegak (*central-core fill type dam*) merupakan bendungan yang tubuh bendungannya terdiri dari bahan yang lulus air tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan vertikal.

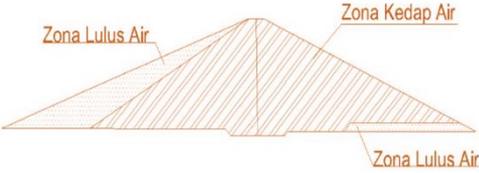
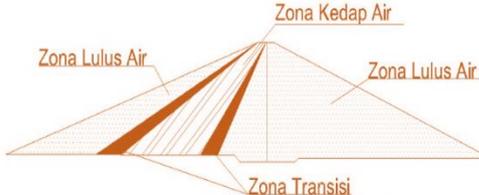
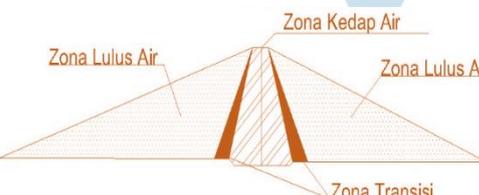
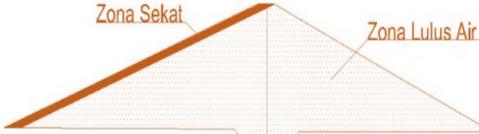
##### 3.1.1 Bendungan urugan zonal inti kedap air tegak (*central-core fill type dam*)

Bendungan tipe ini memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Perpotongan garis lingkaran bidang luncur dengan inti akan lebih kecil sehingga akan menguntungkan stabilitas tubuh bendungan, terutama untuk bendungan urugan yang tinggi sehingga kedua lerengnya dapat dibuat lebih curam.

2. Memiliki kemampuan penyesuaian dengan gejala konsolidasi serta getaran-getaran yang baik sehingga resiko munculnya rekahan-rekahan pada tubuh bendungan dapat diminimalisir.
3. Dibandingkan dengan bendungan tirai, kebutuhan bahan inti kedap air relatif lebih sedikit sehingga pekerjaan penggalian dan volume pekerjaan sementara akan berkurang.
4. Lebih aman terhadap gejala sufosi sehingga ketebalan inti kedap air dapat diperkecil.

Tabel 3.1 Klasifikasi umum bendungan urugan

| Tipe              |                         | Skema umum  | Keterangan   |
|-------------------|-------------------------|---|--|
| Bendungan Homogen |                         |   | Apabila 80% dari seluruh bahan pembentuk bendungan terdiri dari bahan yang bergradasi hampir sama.   |
| Bendungan Zonal   | Bendungan Tirai         |  | Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan tirai kedap air di udiknya.  |
|                   | Bendungan Inti Miring   |  | Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan miring ke hilir.                            |
|                   | Bendungan Inti Vertikal |  | Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan vertikal.                                   |
| Bendungan Sekat   |                         |  | Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air tetapi dilengkapi dengan dinding tidak lulus air dilereng udiknya, misalnya lembaran baja tahan karat. |

### 3.2 Penentuan Parameter Bahan Timbunan untuk Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan

Terdapat beberapa pengujian yang harus dilakukan untuk setiap material timbunan tubuh bendungan yang akan dilakukan dengan tujuan agar dapat mempermudah penentuan parameter desain untuk analisis stabilitas tubuh bendungan. Misalnya untuk timbunan tanah wajib dilakukan uji kadar air, berat jenis, berat volume, batas cair, batas plastis, batas susut, pemadatan standar, triaxial, permeabilitas, konsolidasi dan dispersif, sedangkan untuk pasir kerikil wajib dilakukan uji kadar air, berat jenis, berat volume, gradasi, kepadatan relative maksimum, kepadatan relative minimum, uji triaxial, dan uji permeabilitas.

#### 3.2.1 Kadar air (SNI 03-1965-1990)

Kadar air tanah ialah perbandingan berat air yang terkandung dalam tanah dengan berat kering tanah tersebut. Kadar air tanah dapat digunakan untuk menghitung parameter sifat-sifat tanah. Besarnya kadar air dapat dihitung dengan rumus:

$$W_n = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_3} \times 100\% \quad (3-1)$$

Keterangan:

|         |                                     |
|---------|-------------------------------------|
| W1      | = berat cawan + tanah basah (gram)  |
| W2      | = berat cawan + tanah kering (gram) |
| W3      | = berat cawan kosong (gram)         |
| W1 – W2 | = berat air (gram)                  |
| W2 – W3 | = berat bahan kering (gram)         |

#### 3.2.2 Berat volume (SNI 03-3637-1994)

Berat volume ialah angka perbandingan antara berat tanah dan isi tanah. Besarnya kadar air dapat dihitung dengan rumus:

$$\gamma_n = \frac{B_2 - B_1}{V} \quad (3-2)$$

Keterangan:

- $\gamma_n$  = berat volume tanah (kN/m<sup>3</sup>)  
 B1 = berat cetakan uji (kN)  
 B2 = berat cetakan dan benda uji (kN)  
 V = volume tanah (m<sup>3</sup>)

### 3.2.3 Triaxial (SNI 03-4813-1998)

Uji triaxial adalah pengujian dari benda uji berbentuk silinder yang dibungkus karet kedap air diberi tekanan ke semua arah dan kemudian diberi tekanan aksial sampai terjadi suatu keadaan dimana tegangan deviator telah mencapai 15% regangan aksial (keruntuhan). Uji triaxial dilakukan untuk memperoleh parameter berupa  $\Phi_u$ ,  $C_u$ ,  $\Phi'_{cu}$ ,  $C'_{cu}$ .

### 3.2.4 Permeabilitas (SNI 03-2435-1991)

Permeabilitas adalah kemampuan yang dimiliki oleh suatu zat/membran untuk meloloskan sejumlah partikel yang menembus atau melaluinya. Perhitungan koefisien kelulusan air benda uji tanah dengan tekanan tetap di laboratorium dilakukan dengan menggunakan persamaan:

$$k = \frac{q}{A \times \frac{h_1 - h_2}{L} \times 60} \quad (3-3)$$

Keterangan:

- k = koefisien kelulusan air (cm/s)  
 q = debit air rata-rata (cm<sup>3</sup>/s)  
 h1 = tinggi tekanan konstan pada lubang pemasukan air (cm)  
 h2 = tinggi tekanan pada lubang pengeluaran air (cm)  
 L = panjang benda uji tanah (cm)  
 i = kemiringan hidraulik  
 A = luas penampang benda uji tanah (cm<sup>2</sup>)

### 3.3 Metode Analisa Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan Berdasarkan RSNI M-03-2002

#### 3.3.1 Kondisi pembebanan

Berdasarkan pasal 4.2, terdapat 4 kondisi pembebanan yang disyaratkan untuk ditinjau dalam analisa stabilitas lereng statik bendungan yaitu:

##### 1. Kondisi masa konstruksi

Stabilitas lereng statik bendungan harus dianalisis pada kondisi selesai konstruksi, atau bila diperlukan pada kondisi selesai sebagian pengurugan, yang tergantung pada jadwal konstruksi dan hubungan antara tekanan air pori dengan waktu.

##### 2. Kondisi aliran langgeng

Stabilitas lereng udik dan hilir bendungan harus dianalisis pada elevasi muka air waduk normal di udik dan muka air minimum di hilir yang mengatur garis freatik dalam tubuh bendungan.

##### 3. Kondisi operasional

Elevasi muka air waduk maksimum pada dasarnya lebih tinggi dari puncak permukaan air pada kapasitas konservasi aktif. Karena itu, stabilitas lereng hilir bendungan dianalisis pada kondisi muka air waduk maksimum. Lereng udik dianalisis pada kondisi penurunan muka air waduk secara cepat dari puncak permukaan air pada kapasitas konservasi aktif (M.A Normal) ke puncak permukaan air pada kapasitas inaktif (M.A Minimum), dan dari permukaan air maksimum ke puncak permukaan air pada kapasitas konservasi inaktif. Jika digunakan berm udik (upstream berms), maka lereng udik juga dianjurkan dianalisis pada kondisi penurunan muka air secara cepat dari puncak permukaan air pada kapasitas konservasi aktif ke elevasi antara (intermediate).

#### 4. Kondisi darurat

Kondisi pembebanan lain juga harus dianalisis, jika terjadi hal-hal sebagai berikut:

- a) Pembuntuan pada sistim drainase internal atau pembuntuan sebagian.
- b) Penurunan muka air pada kondisi penggunaan air yang berlebihan.
- c) Penurunan muka air untuk pelepasan air darurat dari waduk (emergency release).

#### 3.3.2 Parameter kondisi pembebanan

Berdasarkan pasal 4.3, petunjuk umum penentuan elevasi muka air waduk, sifat teknis material tanah, dan parameter tekanan air pori untuk analisis stabilitas pada berbagai kondisi pembebanan adalah sebagai berikut:

##### 1. Kondisi masa konstruksi

Pada kondisi selesai dan selama konstruksi berlangsung, analisis dapat dilaksanakan baik dengan konsep tegangan efektif maupun dengan konsep tegangan total.

##### a. Metode kuat geser efektif

Material tubuh bendungan atau fondasi dapat menimbulkan peningkatan tekanan air pori berlebih pada waktu pembebanan (pengurugan) selama konstruksi pelaksanaan berlangsung. Metode tegangan efektif membutuhkan perhitungan perubahan tekanan air pori selama konstruksi yang merupakan fungsi dari waktu. Karena itu, tekanan air pori harus diamati selama konstruksi agar dapat diketahui apakah tidak melebihi batas yang telah ditentukan. Metode perhitungan tekanan air pori pada kondisi pembebanan selama konstruksi berlangsung dan selesai konstruksi adalah seperti berikut ini.

- Mengadakan uji laboratorium pada contoh uji yang mewakili material tubuh bendungan dan fondasi untuk mengetahui tekanan udara pori dan tekanan air pori.
- Mengadakan uji laboratorium pada setiap contoh uji material untuk memperkirakan perilaku tekanan air pori terhadap waktu dan pembebanan.
- Menyusun jadwal konstruksi, menghitung tekanan air pori material sebagai fungsi waktu memeriksa stabilitas lereng udik dan hilir.
- Jika diperlukan, melakukan penyusunan ulang jadwal berdasarkan pelaksanaan konstruksi yang aktual dan memeriksa ulang stabilitas.

b. Metode kuat geser total

Analisis dengan metode kuat geser total tidak memperhitungkan tekanan air pori dalam uji laboratorium yang mendekati kondisi di lapangan, dan dinyatakan sebagai kuat geser material. Uji kuat geser sebaiknya dilakukan pada contoh uji yang dikompaksi untuk mengantisipasi kadar air dan kepadatan yang sesuai dengan di lapangan. Kuat geser total yang digunakan dalam analisis harus berada dalam rentang tegangan normal yang sesuai dengan di lapangan.

### 3.3.3 Faktor keamanan minimum

Kriteria faktor keamanan minimum menurut pasal 4.4 dipertimbangkan terhadap hal-hal seperti berikut ini:

- a. Berdasarkan analisis dari USBR dengan menggunakan cara keseimbangan batas.
- b. Bila cara analisis berbeda maka faktor keamanan berbeda, sekalipun untuk bendungan yang sama dengan sifat fisik material dan kondisi pembebanan yang sama.
- c. Untuk kondisi pembebanan pada waktu selesai konstruksi, tekanan air pori berlebih akan meningkat di dalam zona kedap air dari bendungan atau fondasi. Hal ini disebabkan karena tanah tidak dapat terkonsolidasi

sepenuhnya selama masa konstruksi berlangsung. Oleh karena itu, penggunaan parameter kuat geser efektif sangat berpengaruh terhadap faktor keamanan.

- (a) Faktor keamanan minimum sebesar 1,3 cukup memadai, jika tekanan air pori diawasi selama konstruksi berlangsung atau untuk analisis pada kondisi kuat geser total.
  - (b) Jika digunakan kuat geser efektif tanpa pengawasan tekanan air pori di lapangan, maka faktor keamanan minimum diambil 1,4 untuk mengurangi pengaruh tekanan air pori berlebih.
- d. Untuk kondisi aliran langgeng pada elevasi muka air waduk normal, harus diperhitungkan faktor keamanan minimum sebesar 1,5 . Hal ini untuk mengantisipasi pengaruh ketidakpastian kuat geser material , tekanan air pori di dalam material kedap air, dan pembebanan jangka panjang , serta keruntuhan lereng hilir dan pelepasan air darurat.
- e. Untuk kondisi surut cepat, pembebanan mengalami ketidakseimbangan, sehingga lereng udik tidak stabil walaupun pembebanan ini berlangsung singkat. Namun, keruntuhan pada lereng udik tidak menimbulkan pelepasan air waduk. Karena itu faktor keamanan minimum dapat diambil sebesar 1,3 atau lebih rendah sesuai dengan kondisi pembebanan.

Tabel 3.2 Persyaratan faktor keamanan minimum untuk stabilitas bendungan tipe urugan

| No. | Kondisi   | Kuat Geser | Tekanan Air Pori  | FK Tanpa Gempa | FK Dengan Gempa |
|-----|---|------------|---|----------------|-----------------|
| 1   | Selesai konstruksi tergantung:<br>1. Jadwal Konstruksi<br>2. Hubungan antara tekanan air pori dan waktu #lereng upstream dan downstream<br>#dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 50% koef. gempa desain         | 1. Efektif | Peningkatan tekanan air pori pada urugan dan fondasi dihitung menggunakan data lab. dan pengawasan instrument | 1.3            | 1.2             |
|     |   |            | Hanya pada urugan tanpa data lab. dan dengan/tanpa pengawasan   | 1.3            | 1.2             |
|     |   |            | Idem hanya tanpa pengawasan   | 1.4            | 1.2             |
|     |   | 2. Total   | Tanpa pengawasan instrumen  | 1.3            | 1.2             |
| 2   | Aliran langgeng tergantung:<br>1. Elevasi muka air normal sebelah udik<br>2. Elevasi muka air sebelah hilir<br>#lereng upstream dan downstream<br>#dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 100% koef. gempa desain | 1. Efektif | Dari analisis rembesan  | 1.5            | 1.2             |

Tabel 3.2 Lanjutan

| No. | Kondisi   | Kuat Geser | Tekanan Air Pori  | FK Tanpa Gempa | FK Dengan Gempa |
|-----|---|------------|---|----------------|-----------------|
| 3   | Pengoperasian waduk tergantung:<br>1. Elevasi muka air maksimum di udik<br>2. Elevasi muka air minimum di udik<br>#lereng upstream harus dianalisis untuk kondisi surut cepat | 1. Efektif | Surut cepat dari elevasi muka air normal sampai elevasi muka air minimum (lereng upstream dan downstream)                 | 1.3            | 1.1             |
|     |   |            | Surut cepat dari elevasi muka air maksimum sampai muka air minimum. Pengaruh gempa diambil 0% dari koefisien gempa desain | 1.3            | -               |
| 4   | Kondisi darurat tergantung:<br>1. Pembuntuan pada system drainase<br>2. Surut cepat karena penggunaan air melebihi kebutuhan<br>3. Surut cepat keperluan darurat              | 1. Efektif | Surut cepat dari elevasi muka air maksimum sampai elevasi terendah bangunan pengeluaran. Pengaruh gempa diabaikan         | 1.2            | -               |

### 3.4 Metode Analisa Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa Berdasarkan Pd T-14-2004-A

#### 3.4.1 Klasifikasi kelas risiko beban gempa

Terdapat empat faktor risiko yang harus dipertimbangkan dalam analisis stabilitas bendungan akibat beban gempa. Tiap-tiap faktor terbagi lagi menjadi empat kondisi dengan nilai bobot yang berbeda-beda yang dapat dilihat pada Tabel 3.3.

3.3. Penentuan kelas beban gempa dilakukan dengan persamaan berikut:

$$FR_{tot} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h \quad (3-4)$$

Keterangan:

$FR_{tot}$  = faktor risiko total (bobot)

$FR_k$  = faktor risiko pengaruh kapasitas waduk (bobot)

$FR_t$  = faktor risiko pengaruh tinggi bendungan (bobot)

$FR_e$  = faktor kebutuhan evakuasi (bobot)

$FR_h$  = faktor risiko tingkat kerusakan hilir (bobot)

Tabel 3.3 Kriteria faktor risiko untuk evaluasi keamanan bendungan

| Faktor Risiko                                      | Angka bobot dalam kurung |                   |                       |                |                  |
|--|--------------------------|-------------------|-----------------------|----------------|------------------|
|  | Ekstrem                  | Tinggi            | Moderat               | Rendah         |                  |
| Kapasitas ( $10^6 \text{ m}^3$ )<br>( $FR_k$ )     | > 100<br>(6)             | 100 - 1,25<br>(4) | 1,00 - 0,125<br>(2)   | < 0,125<br>(0) |                  |
| Tinggi (m)<br>( $FR_t$ )                           | > 45<br>(6)              | 45 – 30<br>(4)    | 30 – 15<br>(2)        | < 15<br>(0)    |                  |
| Kebutuhan evakuasi<br>(jumlah orang)<br>( $FR_e$ ) | > 1000<br>(12)           | 1000 – 100<br>(8) | 100 – 1<br>(4)        | 0<br>(0)       |                  |
| Tingkat kerusakan<br>hilir<br>( $FR_h$ )           | Sangat tinggi<br>(12)    | Tinggi<br>(10)    | Agak<br>Tinggi<br>(8) | Moderat<br>(4) | Tidak ada<br>(0) |

Berdasarkan faktor risiko total, kelas risiko untuk desain terbagi menjadi 4 kelas seperti yang diuraikan pada tabel 3.4 berikut:

Tabel 3.4 Kelas risiko bendungan dan bangunan air

| Faktor risiko total | Kelas risiko |
|---------------------|--------------|
| (0 – 6)             | I (Rendah)   |
| (7 – 18)            | II (Moderat) |
| (19 – 30)           | III (Tinggi) |
| (31 – 36)           | IV (Ekstrem) |

### 3.4.2 Percepatan gempa maksimum di permukaan tanah

Percepatan gempa dapat diperoleh berdasarkan pada peta zona gempa, koefisien zona gempa, dan percepatan gempa dasar. Di Indonesia terdapat enam zoan gempa dengan tiap-tiap koefisien gempunya yang dapat dilihat pada tabel 3.5. Percepatan gempa dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$a_d = Z \times a_c \times v \quad (3-5)$$

Keterangan:

- $a_d$  = percepatan gempa maksimum yang terkoreksi di permukaan tanah (gal)
- $a_c$  = percepatan gempa dasar (tabel 3.6)
- $Z$  = koefisien zona (tabel 3.5)
- $v$  = koreksi pengaruh jenis tanah setempat (tabel 3.7)

Tabel 3.5 Koefisien zona gempa Indonesia

| Zona | Koefisien zona (Z) |
|------|--------------------|
| A    | 0,10 – 0,30        |
| B    | 0,30 – 0,60        |
| C    | 0,60 – 0,90        |
| D    | 0,90 – 1,20        |

Tabel 3.5 Lanjutan

| Zona | Koefisien zona (Z) |
|------|--------------------|
| E    | 1,20 – 1,40        |
| F    | 1,40 – 1,60        |

Tabel 3.6 Percepatan gempa dasar untuk berbagai periode ulang

| T<br>(tahun) | $A_c$<br>(gal) |
|--------------|----------------|
| 10           | 90             |
| 20           | 120            |
| 50           | 160            |
| 100          | 190            |
| 200          | 220            |
| 500          | 250            |
| 1000         | 280            |
| 5000         | 330            |
| 10000        | 350            |

Tabel 3.7 Faktor koreksi pengaruh jenis tanah setempat

| Kelompok | Jenis tanah   | Periode Pradominan<br>$T_s$ (detik) | Koreksi<br>(v) |
|----------|---|-------------------------------------|----------------|
| 1        | <p><b>Batuan</b></p> <p>a) Perlapisan terbentuk sebelum periode kuarter disebut batuan</p> <p>b) Lapisan diluvial diatas lapisan batuan dengan tebal kurang dari 10 m</p> | $T_s \leq 0,25$                     | 0,80           |

Tabel 3.7 Lanjutan

| Kelompok | Jenis tanah   | Periode Pradominan<br>$T_s$ (detik) | Koreksi<br>(v) |
|----------|---|-------------------------------------|----------------|
| 2        | <b>Diluvium</b><br>a) Lapisan diluvial diatas lapisan batuan dengan tebal lebih dari 10 m<br>b) Lapisan alluvial diatas lapisan batuan dengan tebal kurang dari 10 m  | $0,25 \leq T_s \leq 0,50$           | 1,00           |
| 3        | <b>Aluvium</b><br>a) Lapisan alluvial diatas lapisan batuan dengan tebal kurang dari 25 m<br>b) Lapisan alluvial diatas lapisan batuan dengan tebal kurang dari 25 m dan lapisan alluvial lunak kurang dari 5 m   | $0,50 \leq T_s \leq 0,75$           | 1,10           |
| 4        | <b>Aluvium lunak</b><br>a) Lapisan tanah pasiran jenuh air dengan tebal kurang dari 10 m dari permukaan dengan $N_{SPT} \leq 10$ pkl/30 cm penetrasi<br>b) Lapisan tanah kohesif atau lanauan lunak ditemukan mulai pada kedalaman 3 m dari permukaan dengan nilai $c_u \leq 0,25$ kg/cm <sup>2</sup> dari uji lapangan | $T_s \geq 0,75$                     | 1,20           |

### 3.4.3 Metode analisis dengan koefisien gempa termodifikasi

Metode analisis ini merupakan metode lanjutan dari metode koefisien gempa yang dianggap sudah tidak sesuai lagi sehingga dilakukan modifikasi. Koefisien gempa dasar yang tergantung pada periode ulang  $T$  dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$K_h = \frac{ad}{g} \quad (3-6)$$

Keterangan:

ad = percepatan gempa terkoreksi oleh pengaruh jenis tanah (gal)  
g = gravitasi (=980 cm/det<sup>2</sup>)

Koefisien gempa desain terkoreksi pada tubuh bendungan dapat dihitung dengan persamaan:

$$K_o = \alpha_2 \times K_h \quad (3-7)$$

Dimana:

$K_o$  = koefisien gempa desain terkoreksi di permukaan tanah  
 $\alpha_2$  = koreksi pengaruh jenis struktur (untuk bendungan tipe urugan = 0,5)  
 $K_h$  = koefisien gempa dasar yang tergantung periode ulang T

Dalam analisis stabilitas ini koefisien gempa pada kedalaman Y dari puncak bendungan berbeda-beda. Untuk analisis stabilitas, peninjauan dilakukan pada Y = 0,25H; 0,50H; 0,75H; dan H (H adalah tinggi bendungan) dengan menggunakan  $K_h$  pada periode ulang sesuai dengan yang dipersyaratkan. Koefisien gempa rata-rata K pada Y yang berbeda-beda dapat dihitung dengan persamaan-persamaan berikut:

1. Untuk  $0 < Y/H \leq 0,4$

$$K = K_o \times \{2,5 - 1,85 \times (Y/H)\} \quad (3-8)$$

2. Untuk  $0,4 < Y/H \leq 1,0$

$$K = K_o \times \{2,0 - 0,60 \times (Y/H)\} \quad (3-9)$$

Analisis stabilitas akan dilakukan dengan metode keseimbangan batas dengan menggunakan koefisien gempa K yang akan menghasilkan angka faktor keamanan.