

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Terhadap Penelitian Sebelumnya

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan penelitian terdahulu sebagai acuan untuk menyelesaikan penelitian ini, penelitian terdahulu memudahkan penulis dalam menentukan langkah-langkah yang sistematis untuk penyusunan penelitian ini dari segi teori maupun konsep. Melakukan tinjauan terhadap penelitian sebelumnya adalah untuk mengemukakan teori dan konsep yang masih relevan dengan perkembangan zaman dan menghindari duplikasi serta menghindari kesalahan yang pernah dibuat oleh peneliti - peneliti sebelumnya.

Penelitian pertama yang berhasil peneliti temukan adalah penelitian yang dilakukan oleh Ghea Wedya Rangga Dewa (2014) yang berjudul “Analisa Stabilitas Tubuh Bendungan Lolak Kabupaten Bolaang Mongondow Sulawesi Utara”. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui stabilitas tubuh bendungan dalam berbagai kondisi dengan aplikasi *Geostudio 2007* untuk mengetahui tubuh bendungan dapat tegak dengan aman. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pada kondisi kosong, muka air normal, muka air banjir dan surut tiba - tiba dibagian hulu dan hilir bendungan memiliki angka keamanan yang cukup aman.

Penelitian kedua yang peneliti temukan adalah penelitian dari Ali Imron (2017) yang berjudul “Analisa Geoteknik Bendungan Gongseng Terhadap Keamanan Rembesan, Stabilitas Lereng, dan Beban Gempa”. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui keamanan Bendungan Gongseng terhadap potensi rembesan, stabilitas lereng dan beban gempa. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan aplikasi *Plaxis 8.2* dan *Geostudio 2007*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa Bendungan Gongseng aman terhadap beban gempa yang ada namun tidak aman terhadap potensi rembesan yang akan terjadi sehingga perlu dilakukan grouting pada sisi bendungan untuk meningkatkan angka keamanan terhadap erosi buluh dan memperkecil debit rembesan.

Beberapa penelitian diatas memiliki persamaan dengan penelitian yang akan peneliti lakukan yaitu tema yang diteliti, yaitu sama - sama meneliti tentang stabilitas bendungan. Sedangkan yang menjadi perbedaan yaitu metode analisis

stabilitas lereng akibat beban gempa dan lokasi penelitian. Penelitian yang akan penulis lakukan akan menggunakan metode analisis stabilitas lereng akibat beban gempa dengan metode *Pseudo-static* dan dinamik sehingga berbeda dengan kedua penelitian sebelumnya yang hanya menggunakan metode *Pseudo-static*. Oleh karena itu, walaupun telah ada penelitian dengan tema yang serupa dengan yang peneliti lakukan namun tetap ada perbedaan yang akan peneliti lakukan sehingga peneliti tertarik untuk melakukan penelitian tentang Pengaruh Potensi Bahaya Rembesan Terhadap Stabilitas Bendungan pada Bendungan Sungai Tondano Sulawesi Utara.

2.2. Bendungan

Sebuah bendungan merupakan bangunan yang berfungsi sebagai penangkap air dan menyimpannya, saat musim hujan air sungai mengalir dalam jumlah besar yang melebihi daya tampung air dapat ditampung oleh bendungan. Berbeda dengan fungsi sebuah bendung yang hanya dapat mengalirkan sebagian aliran sungai ke arah saluran dalam dengan meninggikan muka air sungai, dengan memiliki daya tampung tersebut air sungai yang melebihi kebutuhan dapat disimpan dalam waduk dan dilepas mengalir kedalam sungai lagi di hilirnya sesuai dengan kebutuhan saja pada waktu yang diperlukan. Bendungan memiliki beberapa tipe, berikut ini adalah tipe-tipe bendungan.

2.2.1. Tipe Bendungan Berdasarkan Ukuran

1. Bendungan Besar (*Large Dam*)

Berdasarkan klasifikasi :

- a. Ketinggian bendungan > 45 m.
- b. Panjang puncak bendungan tidak kurang dari 500 m.
- c. Kapasitas waduk yang terbentuk tidak kurang dari 1 juta m^3 .

2. Bendungan Kecil (*Small Dam*)

Semua bendungan yang tidak termasuk klasifikasi bendungan besar.

2.2.2. Tipe Bendungan Berdasarkan Tujuan Pembangunan

1. Bendungan dengan tujuan tunggal (*Single purpose dam*) adalah bendungan yang dibangun untuk memenuhi satu tujuan saja, misalnya untuk PLTA, irigasi, pengendalian banjir dan kebutuhan lain.
2. Bendungan serba guna (*Multipurpose*) adalah bendungan yang dibangun untuk memenuhi beberapa tujuan, misalnya PLTA dan irigasi, irigasi dan pengendali banjir, dll.

2.2.3. Tipe Bendungan Berdasarkan Penggunaan

1. Bendungan untuk membentuk waduk (*Storage dam*) adalah bendungan yang dibangun untuk membentuk waduk guna menyimpan air waktu kelebihan agar dapat dipakai pada waktu yang diperlukan.
2. Bendungan penangkap/pembelok air (*Diversion dam*) bendungan yang dibangun agar permukaan airnya lebih tinggi sehingga dapat mengalir masuk kedalam saluran air atau terowongan air.
3. Bendungan untuk memperlambat jalannya air (*Detention dam*) adalah bendungan yang dibangun untuk memperlambat jalannya air, sehingga dapat mencegah banjir besar.

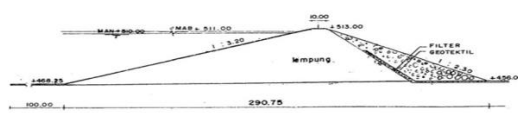
2.2.4. Tipe Bendungan Berdasarkan Jalannya Air

1. Bendungan untuk dilewati air (*Overflow dam*) adalah bendungan yang dibangun untuk dilewati air misalnya pada bangunan pelimpah.
2. Bendungan untuk menahan air (*Non Overflow dam*) adalah bendungan yang sama sekali tidak boleh dilewati air.

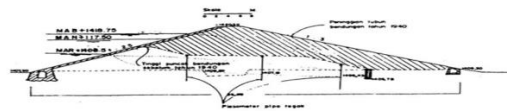
2.2.5. Tipe Bendungan Berdasarkan Konstruksi

1. Bendungan urugan (*Fill dam*) adalah bendungan yang dibangun dari hasil penggalian bahan tanpa bahan tambahan lain yang bersifat campuran secara kimia, jadi betul-betul bahan pembentuk bendungan asli. Bendungan urugan juga terbagi menjadi 3 (tiga):
 - a. Suatu bendungan urugan digolongkan dalam tipe homogen, apabila bahan yang membentuk tubuh bendungan tersebut terdiri dari tanah

yang hampir sejenis dan gradasinya (susunan ukuran butirannya) hampir seragam. Tubuh bendungan secara keseluruhannya berfungsi ganda, yaitu sebagai bangunan penyangga dan sekaligus sebagai penahan rembesan air.



Gambar A. 1 - Bendungan Pongkor, Jawa Barat



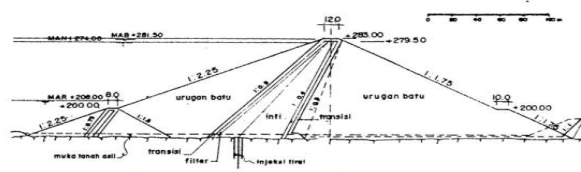
Gambar A.2 - Bendungan Cileunca, Jawa Barat

Gambar 2.1. Bendungan urugan tipe homogen

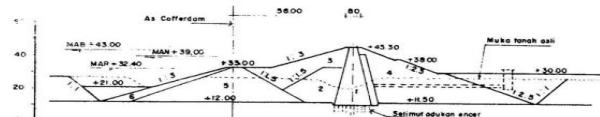
Sumber : Sosrodarsono, 1981

- b. Bendungan urugan digolongkan dalam tipe zonal, apabila timbunan yang membentuk tubuh bendungan terdiri dari batuan dengan gradasi (susunan ukuran butiran) yang berbeda-beda dalam urutan-urutan pelapisan tertentu. Pada bendungan tipe ini sebagai penyangga terutama dibebankan kepada timbunan yang lolos air (zona lolos air), sedang penahan rembesan dibebankan kepada timbunan yang kedap air (zona kedap air). Berdasarkan letak dan kedudukan dari zona kedap airnya, maka tipe ini masih dapat dibedakan menjadi 3 (tiga) yaitu:
 - Bendungan urutan zonal dengan tirai kedap air atau bendungan tirai (*Front core fill type dam*), ialah bendungan zonal dengan zona kedap air yang membentuk lereng udik bendungan tersebut.
 - Bendungan urugan zonal dengan inti kedap air miring atau “Bendungan inti miring” (*Inclined core fill dam*), ialah bendungan zonal yang zona kedap airnya terletak di dalam tubuh bendungan dan berkedudukan miring kearah hilir.
 - Bendungan urugan zonal dengan inti kedap air tegak atau “Bendungan inti tegak” (*Central core fill dam*), ialah bendungan zonal yang zona kedap airnya terletak di dalam tubuh bendungan

dengan kedudukan vertical. Inti tersebut terletak di bidang tengah dari tubuh bendungan.



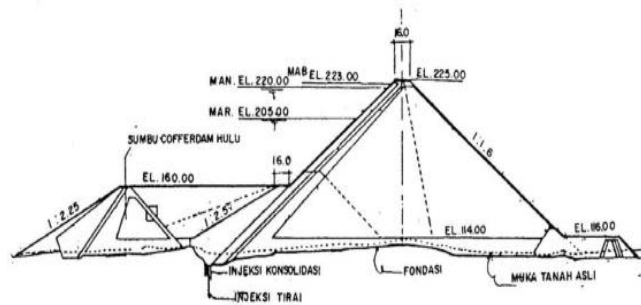
Gambar B.25 - Bendungan Batutege, Lampung



Gambar 2.2. Bendungan urugan tipe zonal
Sumber : Sosrodarsono, 1981

c. Bendungan Urugan Membran

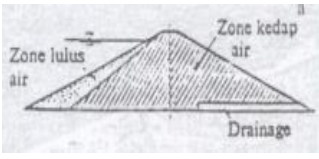
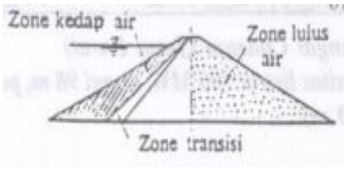
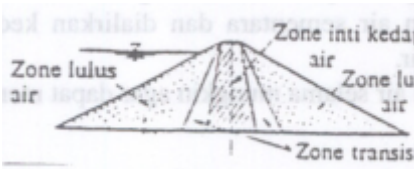
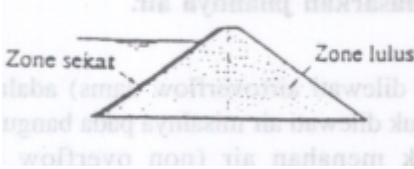
Bendungan urugan digolongkan dalam tipe membran apabila di lereng udik tubuh bendungan dilapisi dengan sekat tidak lulus air (dengan kedapapan yang tinggi) seperti lembaran baja tahan karat, beton aspal, lembaran beton bertulang, hamparan plastic, susunan beton blok, dan lain-lain.



Gambar C.1 - Bendungan Cirata, Jawa Barat

Gambar 2.3. Bendungan urugan tipe membran
Sumber : Sosrodarsono, 1981

Tabel 2.1. Klasifikasi Bendungan Urugan

Tipe		Skema Umum	Keterangan
Bendungan urugan homogen			Apabila 80% dari seluruh bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang bergradasi sama dan bersifat kedap air
Bendungan Zonal	Tirai		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lolos air, tetapi dilengkapi dengan tirai kedap air di udiknya
	Inti Miring		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lolos air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang miring ke hilir.
	Inti Vertikal		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lolos air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan vertikal
Bendungan urugan batu dengan membran			Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lolos air, tetapi dilengkapi dengan membrane kedap air di lereng udik, yang biasanya terbuat dari lembaran baja tahan karat, lembaran beton bertulang, aspal beton, lembaran plastik, dan lain-lain.

(Sumber : Sosrodarsono, 1981:170)

2. Bendungan beton (*Concrete dam*) adalah bendungan yang dibuat dengan konstruksi beton dengan tulangan ataupun tidak. Terdapat 4 (empat) tipe bendungan beton :
 - a. Bendungan beton berdasarkan berat sendiri (*Concrete gravity dam*) adalah bendungan beton yang direncanakan untuk menahan beban dan gaya yang bekerja padanya hanya berdasar atas berat sendiri.
 - b. Bendungan beton dengan penyangga (*Concrete buttress dam*) adalah bendungan beton yang mempunyai penyangga untuk menyalurkan gaya-gaya yang bekerja padanya. Tipe ini sering digunakan apabila sungainya sangat lebar dan kondisi geologinya baik.
 - c. Bendungan beton berbentuk lengkung atau busur (*Concrete arch dam*) adalah bendungan beton yang direncanakan untuk menyalurkan gaya yang bekerja padanya melalui pangkal tebing (*Abutment*) kiri dan kanan bendungan.
 - d. Bendungan beton kombinasi (*Combination concrete dam*) adalah kombinasi lebih dari satu tipe bendungan. Apabila suatu bendungan beton berdasar berat sendiri berbentuk lengkung disebut *Concrete arch gravity dam* dan kemudian apabila bendungan beton merupakan gabungan beberapa lengkung, maka disebut *Concrete multiple arch dam*.

2.2.6. Tipe Bendungan Berdasarkan Fungsi

1. *Primary Cofferdam* adalah bendungan yang pertama-tama dibangun di sungai pada debit air rendah agar lokasi rencana bendungan pengelak menjadi kering yang memungkinkan pembangunan secara teknis.
2. *Cofferdam* adalah bendungan yang dibangun sesudah selesainya bendungan pengelak primer (*Primary Cofferdam*) sehingga lokasi rencana bendungan utama menjadi kering, yang memungkinkan pembangunan secara teknis.
3. *Maindam* adalah bendungan yang dibangun untuk satu atau lebih tujuan tertentu.

4. *High leveledam* adalah bendungan yang terletak di sisi kiri atau kanan bendungan utama, yang tinggi puncaknya juga sama.
5. *Sadlle dam* adalah bendungan yang terletak di tepi waduk yang jauh dari bendungan utama yang dibangun untuk mencegah keluarnya air dari waduk, sehingga air waduk tidak mengalir ke daerah sekitarnya.
6. Tanggul adalah bendungan yang terletak di sisi kiri atau kanan bendungan utama dan di tempat yang dari bendungan utama yang tingginya maksimum 5 meter dengan panjang mercu maksimum 5 kali tingginya.
7. *Industrial Wastedam* adalah bendungan yang terdiri atas timbunan secara bertahap untuk menahan limbah yang berasal dari industri.
8. *Main Tailingdam* adalah bendungan yang terdiri atas timbunan secara bertahap untuk menahan hasil galian pertambangan dan bahan pembuatannya berasal dari hasil galian pertambangan itu.

2.3. Tanah

Tanah berdasarkan pengertian dari KBBI merupakan permukaan atau lapisan bumi yang berada di atas. Istilah tanah dalam konteks Teknik secara umum merupakan material yang terdiri dari butiran-butiran mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimiawi) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk beserta zat cair dan gas yang mengisi rongga-rongga kosong di antara partikel-partikel padat tersebut.

Ukuran setiap butiran padat tersebut sangat bervariasi dan sifat-sifat fisik dari tanah banyak tergantung dari faktor-faktor ukuran, bentuk, dan komposisi kimia dari butiran. Tanah berguna sebagai bahan bangunan pada berbagai macam pekerjaan Teknik dan juga sebagai pendukung pondasi dari bangunan. (Das,1993).

2.3.1. Sistem Klasifikasi Unified

Sistem ini pada mulanya diperkenalkan oleh Casagrande pada tahun 1942. Pada saat ini sistem klasifikasi tersebut digunakan secara luas oleh para ahli teknik. Sistem ini mengelompokkan tanah ke dalam dua kelompok besar, yaitu:

1. Tanah berbutir kasar (*Coarse grained soil*), yaitu : tanah kerikil dan pasir dimana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200 simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal G atau S. G adalah untuk kerikil (*Gravel*) atau tanah berkerikil, dan S adalah untuk pasir (*Sand*) atau tanah berpasir. Tanah berbutir kasar ditandai dengan kelompok, seperti: GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM dan SC. Jika persentase butiran yang lolos ayakan No. 200 adalah antara 5% sampai dengan 12%, diperlukan simbol ganda seperti: GW-GM, GP-GM, GW-GC, GP-GC, SW-SM, SW-SC, SP-SM, dan SP-SC.
2. Tanah berbutir halus (*Fine-grained soil*), yaitu tanah dimana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200 simbol dari kelompok tanah ini dimulai dari huruf awal M untuk lanau (*Silt*) anorganik, C untuk lempung (*Clay*) anorganik, dan O untuk lanau organik dan lempung organik. Symbol PT digunakan untuk tanah gambut (*Peat*), dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi. Klasifikasi tanah berbutir halus dengan symbol ML, CL, OL, MH, CH, dan OH didapat dengan cara menggambar batas cair dan indeks plastisitas tanah yang bersangkutan.

Untuk klasifikasi yang benar, perlu memperhatikan faktor-faktor berikut ini:

- Persentase butiran yang lolos ayakan No. 200
- Persentase fraksi kasar yang lolos ayakan No. 40
- Koefisien keseragaman (*Uniformity Coefficient*, Cu) dan koefisien gradasi (*Gradation Coefficient*, Cc) untuk tanah dimana 0-12% lolos ayakan No. 200.
- Batas cair (LL) dan Indeks Plastisitas (PI) bagian tanah yang lolos ayakan No. 40 (untuk tanah dimana 5 % atau lebih lolos ayakan No. 200)

Simbol – symbol lain yang digunakan untuk klasifikasi tanah unified adalah:

- W = *Well Graded* (Tanah dengan gradasi baik)
- P = *Poorly Graded* (Tanah dengan gradasi buruk)
- L = *Low Plasticity* (Plastisitas Rendah) (LL<50)
- H = *High Plasticity* (Plastisitas Tinggi) (LL>50)

Major Divisions (1) (2)		Letter (3)	Symbols		Name (6)	Value for Embankments (7)	Permeability cm per sec (8)
			Hatching (4)	Color (5)			
Coarse-Grained Soils	Gravel and Gravelly Soils	GW		Red	Well-graded gravels or gravel-sand mixtures, little or no fines	Very stable, pervious shells of dikes and dams	$k > 10^{-2}$
		GP			Poorly graded gravels or gravel-sand mixtures, little or no fines	Reasonably stable, pervious shells of dikes and dams	$k > 10^{-2}$
		GM		Yellow	Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures	Reasonably stable, not particularly suited to shells, but may be used for impervious cores or blankets	$k = 10^{-3}$ to 10^{-6}
		GC			Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures	Fairly stable, may be used for impervious core	$k = 10^{-6}$ to 10^{-8}
	Sand and Sandy Soils	SW		Red	Well-graded sands or gravelly sands, little or no fines	Very stable, pervious sections, slope protection required	$k > 10^{-3}$
		SP			Poorly graded sands or gravelly sands, little or no fines	Reasonably stable, may be used in dike section with flat slopes	$k > 10^{-3}$
		SM		Yellow	Silty sands, sand-silt mixtures	Fairly stable, not particularly suited to shells, but may be used for impervious cores or dikes	$k = 10^{-3}$ to 10^{-6}
		SC			Clayey sands, sand-silt mixtures	Fairly stable, use for impervious core or flood-control structures	$k = 10^{-6}$ to 10^{-8}
Fine-Grained Soils	Sils and Clays LL < 50	ML		Green	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands or clayey silts with slight plasticity	Poor stability, may be used for embankments with proper control	$k = 10^{-3}$ to 10^{-6}
		CL			Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays	Stable, impervious cores and blankets	$k = 10^{-6}$ to 10^{-8}
		OL			Organic silts and organic silt-clays of low plasticity	Not suitable for embankments	$k = 10^{-4}$ to 10^{-6}
	Sils and Clays LL ≥ 50	MH		Blue	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts	Poor stability, core of hydraulic-fill dam, not desirable in rolled-fill construction	$k = 10^{-4}$ to 10^{-6}
		CH			Inorganic clays of high plasticity, fat clays	Fair stability with flat slopes, thin cores, blankets and dike sections	$k = 10^{-6}$ to 10^{-8}
		OH			Organic clays of medium to high plasticity, organic silts	Not suitable for embankments	$k = 10^{-6}$ to 10^{-8}
Highly Organic Soils		Pt		Orange	Peat and other highly organic soils	Not used for construction	

Gambar 2.4. Klasifikasi Tanah berdasarkan Unified

Sumber : Unified Soil Classification System

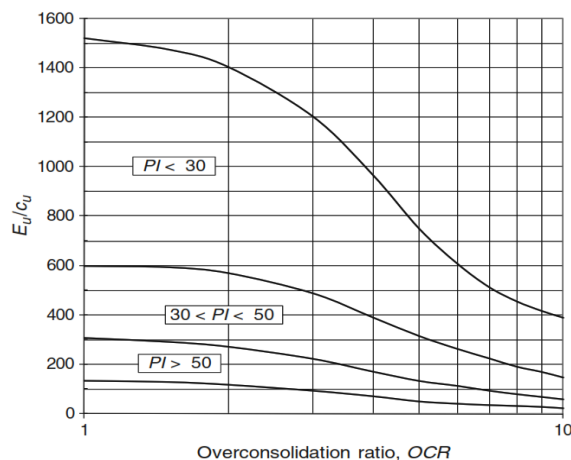
2.4. Parameter Kekuatan Tanah

2.4.1. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas tanah tak terdrainase (E_u) dari tanah kohesif ditentukan dari uji triaksial atau ditentukan secara empiris berdasarkan nilai kohesi, indeks plastisitas dan nilai OCR. Umumnya berkisar 200 – 400 dari nilai c_u . Nilai parameter E' dari tanah lempung didekati dengan menggunakan persamaan elastisitas dengan mengambil parameter modulus geser $G_u = G'$ dan $\nu_u = 0,5$ yang menghasilkan persamaan:

$$E' = \frac{2}{3} \times (1 + \nu') \times E_u \quad (2.1)$$

Sehingga dengan memperkirakan nilai ν' yang umumnya berkisar 0,2 – 0,35 maka nilai E' dapat diperkirakan



Gambar 2.5. Korelasi Modulus Elastisitas untuk tanah lempung berdasarkan nilai PI dan OCR

Sumber : Correlation Of soil and Rock properties in Geotechnical Engineering

Nilai modulus elastisitas untuk tanah pasir juga dapat digunakan melalui pendekatan empiris menurut Peck (1974) sebesar 800-1200 dari nilai N_{spt} yang dinyatakan dalam satuan kPa.

2.4.2. Angka Poisson

Angka poisson ditentukan berdasarkan tipikalnya, pada umumnya angka poisson tidak terlalu lebar dan tidak terlalu sensitif terhadap hasil yang diperoleh. Penentuan parameter tanah dapat dilakukan dengan berbagai macam metode, apabila tidak terdapat data laboratorium maka dapat digunakan dengan pendekatan

metode empiris, angka poisson dapat ditentukan berdasarkan jenis tanahnya seperti yang ada pada tabel dibawah ini.

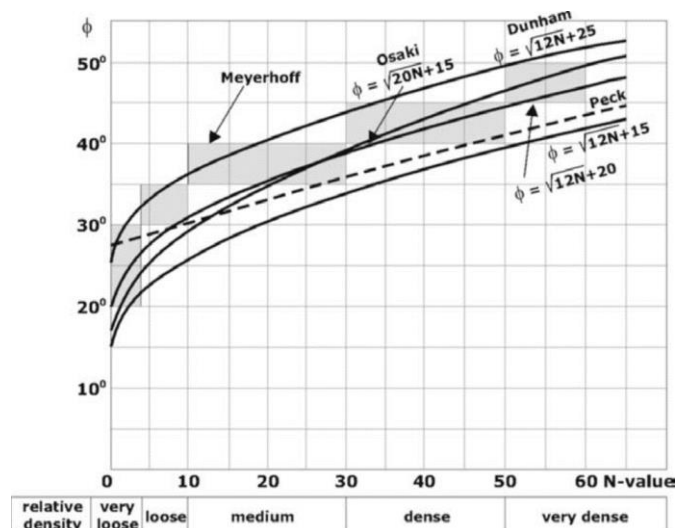
Tabel 2.2. Hubungan jenis tanah dengan angka poisson

Jenis tanah	Angka poisson
Pasir lepas	0,2 – 0,4
Pasir sedang	0,25 – 0,4
Pasir padat	0,3 – 0,45
Pasir kelanauan	0,2 – 0,4
Lempung lunak	0,15 – 0,25
Lempung sedang	0,2 – 0,5

Sumber : Braja M. Das, 2002

2.4.3. Sudut Geser Dalam

Sudut geser dalam dapat diperoleh secara langsung dari pengujian di laboratorium berupa uji triaksial atau uji geser langsung dan juga dibedakan menjadi sudut geser dalam tak terdrainase (ϕ_u) dan sudut geser dalam efektif (ϕ'). Dalam analisis jangka pendek untuk tanah kohesif nilai ϕ_u diabaikan dan lebih mengandalkan nilai kohesi *Undrained* jika tidak menemukan hasil uji laboratorium yang memadai. Pada tanah non kohesif, umumnya sampel tanah tak terganggu tidak dapat diperoleh sehingga sudut geser dalam untuk tanah pasiran dapat ditentukan dengan menggunakan korelasi dengan uji lapangan seperti SPT. Dari nilai N_{SPT} nilai ϕ dapat diperkirakan dari kurva yang dikemukakan oleh Peck, (1947). Pada tanah non kohesif juga nilai ϕ_u dianggap sama dengan nilai ϕ' karena tidak terbentuknya tekanan eksese air pori pada tanah berbutir kasar.



Gambar 2.6. Korelasi nilai N_{SPT} dengan ϕ untuk tanah non kohesif

Sumber : Sorensen, 2013

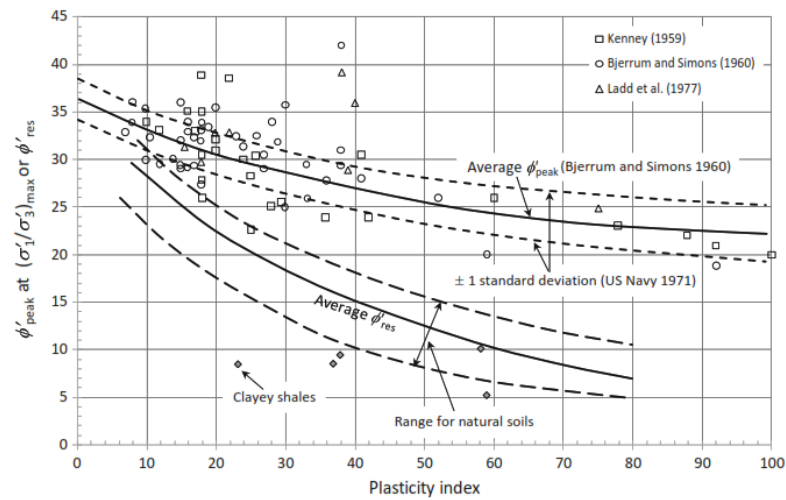


Fig. 3.5 Variation of ϕ'_{peak} and ϕ'_{res} with plasticity index for normally consolidated clays

Gambar 2.7. Korelasi ϕ pada tanah lempung *Normally Consolidated*
Sumber : Sorensen, 2013

Untuk lempung *Over Consolidated*, Sorensen Okkels (2013) menyarankan batas bawah dari nilai sudut geser dalam dapat ditemukan pada persamaan:

$$\phi'_{peak} = 44 - 14\log PI \quad (4 < PI < 50) \quad (2.2)$$

$$\phi'_{peak} = 30 - 6\log PI \quad (50 \leq PI < 150) \quad (2.3)$$

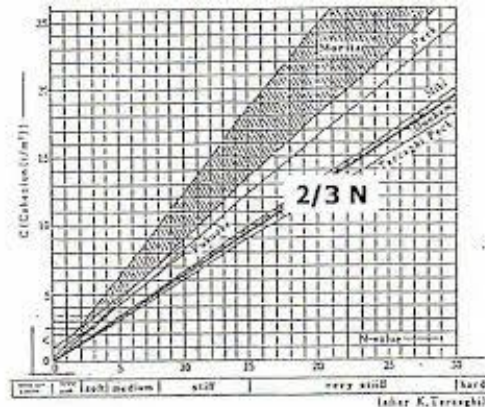
Untuk estimasi optimal Sorensen mengusulkan dengan:

$$\phi'_{peak} = 45 - 14\log PI \quad (4 < PI < 50) \quad (2.4)$$

$$\phi'_{peak} = 26 - 3\log PI \quad (50 \leq PI < 150) \quad (2.5)$$

2.4.4. Kohesi

Kohesi merupakan ukuran dari daya ikat antara partikel-partikel tanah. Kohesi dari tanah kohesif yang umumnya berupa tanah lempung dapat diperoleh secara langsung dari uji laboratorium berupa uji triaksial, uji kuat tekan bebas atau dari uji geser langsung. Kohesi dibedakan menjadi kohesi tak terdrainase (c_u) yang digunakan untuk analisis jangka pendek dan kohesi terdrainase (c') yang digunakan untuk analisis jangka Panjang. Kohesi efektif dapat diperoleh hanya melalui uji khusus seperti uji triaksial CU. Mengingat uji laboratorium sangat tergantung oleh kondisi sampel yang umumnya telah mengalami banyak gangguan, maka nilai kohesi juga ditentukan berdasarkan korelasinya dengan hasil uji lapangan seperti sondir atau SPT, nilai kohesi c_u dapat diperkirakan dari korelasinya dengan N_{SPT} seperti pada gambar dibawah ini



Gambar 2.8. Korelasi antara nilai N-SPT dan C_u pada tanah kohesif
Sumber : (Terzaghi & Peck, 1967)

Berdasarkan grafik yang ada, nilai C_u bisa didapatkan dari $2/3$ N-SPT

$$C_u = 2/3 \times N\text{-SPT (ton/m}^2\text{)} \quad (2.6)$$

$$C_u = 6 \times N\text{-SPT (kN/m}^2\text{)} \quad (2.7)$$

Tabel 2.3. Korelasi Nilai N-SPT dengan Nilai C_u tanah lempung

Konsistensi	N	C_u (kN/m ²)
Sangat Lunak	0 – 2	< 12
Lunak	2 – 4	12 – 25
Sedang	4 – 8	25 – 50
Kaku	8 - 15	50 – 100
Sangat Kaku	15 - 30	100 – 200
Keras	> 30	> 200

Sumber : *Correlation Of soil and Rock properties in Geotechnical Engineering*

Nilai kohesi efektif, c' untuk tanah lempung *Overconsolidated* menurut Sorensen dan Okkels (2013) bisa didapatkan dari persamaan berikut:

$$c' = 0,1c_u \quad (2.8)$$

2.5. Kekuatan Geser Tanah

Kekuatan geser tanah adalah perlawanan internal tanah tersebut per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser dalam tanah yang dimaksud. Untuk menganalisis masalah stabilitas tanah seperti daya dukung, stabilitas lereng, maka kita harus mengetahui sifat-sifat ketahanan penggesernya tersebut.

Kekuatan geser yang dimiliki oleh suatu tanah disebabkan oleh:

1. Pada tanah berbutir halus (kohesif) seperti lempung, kekuatan geser yang dimiliki tanah disebabkan adanya kohesi atau rekatan antara partikel-partikel tanah.

2. Pada tanah berbutir kasar (non-kohefif) seperti pasir lepas, kekuatan geser yang dimiliki tanah disebabkan adanya gesekan antara partikel-partikel tanah sehingga sering disebut juga sudut geser.
3. Pada tanah yang merupakan campuran antara tanah halus dan kasar seperti lempung berpasir, kekuatan geser disebabkan karena adanya rekatan dan gesekan antara partikel-partikel tanah

Pada saat terbebani terhadap tekanan atau tarikan yang ada disekitarnya, tanah akan mengalami pembebanan yang akan ditahan oleh:

1. Kohesi tanah yang bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, tidak bergantung dari tegangan normal yang bekerja pada bidang geser.
2. Gesekan antara partikel-partikel tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang geser.

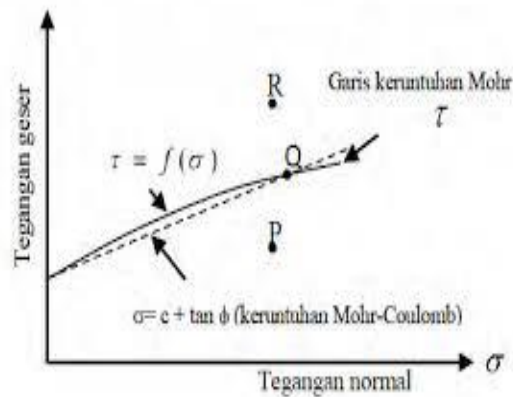
Ada beberapa pengujian untuk mendapatkan nilai kuat geser tanah, seperti:

1. Pengujian Geser Langsung (*Direct Shear Test*)
2. Pengujian Triaksial (*Triaxial Test*)
3. Pengujian Tekan Bebas (*Unconfined Compression Test*)
4. Pengujian Baling-baling (*Vane Shear Test*)

Nilai kekuatan geser tanah antara lain diperlukan untuk menghitung daya dukung tanah, stabilitas lereng, dan juga menyatakan kondisi keruntuhan. Menurut teori Mohr (1910) kondisi keruntuhan suatu bahan terjadi oleh akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser, sehingga dapat diambil hubungan fungsi antar tegangan normal dan tegangan geser pada bidang runtuhnya. Adapun persamaan yang menyatakan hubungan fungsi tersebut adalah:

$$\tau = f(\sigma) \quad (2.9)$$

Dengan τ adalah tegangan geser pada saat terjadinya keruntuhan dan σ adalah tegangan normal pada saat kondisi tersebut. Garis kegagalan yang ditunjukkan pada persamaan 2.9 diatas adalah kurva pada gambar 2.6.



Gambar 2.9. Kriteria Kegagalan Mohr dan Coloumb
Sumber : Das, 1994

Kemudian Coloumb mendefinisikan $f(\sigma)$ sebagai :

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.10)$$

Dimana : τ = kekuatan geser (kN/m^2)

c = Kohesi tanah (kN/m^2)

ϕ = Sudut geser dalam tanah ($^\circ$)

σ = tegangan normal total yang bekerja pada bidang geser (kN/m^2)

Persamaan 2.10 menunjukkan yang dimaksud dengan kriteria keruntuhan atau kegagalan Mohr-Coloumb, dimana garis selubung kegagalan dari persamaan tersebut digambarkan dalam bentuk garis lurus pada gambar 2.6.

Pengertian dari keruntuhan suatu bahan dapat diterangkan dengan melihat gambar 2.9., yaitu: Jika kedudukan tegangan-tegangan baru mencapai titik P, keruntuhan tanah akibat geser tidak akan terjadi. Keruntuhan tanah akibat geser akan terjadi, jika tegangan-tegangan mencapai titik Q yang terletak pada garis selubung kegagalan (*Failure Envelope*). Kedudukan tegangan yang ditunjukkan oleh titik R tidak akan pernah terjadi, karena sebelum tegangan yang terjadi mencapai titik R, bahan sudah mengalami keruntuhan.

Tegangan efektif yang terjadi di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh tekanan air pori. Terzaghi (1935) mengubah persamaan Coloumb dengan bentuk tegangan efektif sebagai berikut :

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.11)$$

Dimana : $\sigma' = \sigma - u$

τ = kekuatan geser (kN/m^2)

c' = Kohesi tanah (kN/m^2)

ϕ' = Sudut geser dalam tanah ($^\circ$)

σ' = tegangan normal total yang bekerja pada bidang geser (kN/m^2)

u = tegangan air pori

2.6. Lereng

Lereng merupakan suatu penampakan permukaan alam dengan beda tinggi dan elevasi. Akibat adanya perbedaan elevasi tersebut permukaan menjadi miring dan akan membentuk suatu sudut terhadap bidang horizontal. Lereng secara umum dibedakan menjadi dua yaitu, lereng alami dan lereng buatan. Lereng alami adalah lereng yang terbentuk secara alami akibat proses geologi misalnya lereng perbukitan dan tebing sungai. Sedangkan lereng buatan adalah lereng yang dibuat manusia untuk suatu keperluan tertentu misalnya sebagai tanggul sungai, urugan jalan raya atau lereng bendungan. Berikut adalah tabel pengklasifikasian lereng berdasarkan kemiringannya menurut *United Stated Soil System Management* (USSSM) dan *Universal Soil Loss Equation* (USLE).

Tabel 2.4. Klasifikasi kemiringan lereng menurut USSSM dan USLE

Kemiringan Lereng ($^\circ$)	Kemiringan Lereng (%)	Keterangan	Kualifikasi USSSM (%)	Kualifikasi USLE (%)
< 1	0 - 2	Datar	0 - 2	1 - 2
1 - 3	3 - 7	Sangat landai	2 - 6	2 - 7
3 - 6	8 - 13	Landai	6 - 13	7 - 12
6 - 9	14 - 20	Agak curam	13 - 25	12 - 18
9 - 25	21 - 55	Curam	25 - 55	18 - 24
25 - 56	56 - 140	Sangat curam	> 55	> 24
> 65	> 140	Terjal		

Sumber : *United Stated Soil System Management*

2.7. Analisis Stabilitas Lereng

Pada permukaan tanah yang tidak horizontal, komponen gravitasi cenderung untuk menggerakkan tanah ke bawah. Jika komponen gravitasi sedemikian besar sehingga perlawanan terhadap geseran yang dapat dikerahkan oleh tanah pada bidang longsornya terlampaui, maka akan terjadi kelongsoran lereng.

Analisis pada permukaan tanah dalam kondisi miring ini, disebut dengan Analisa stabilitas lereng. (Hardiyatmo, 2007b: 366).

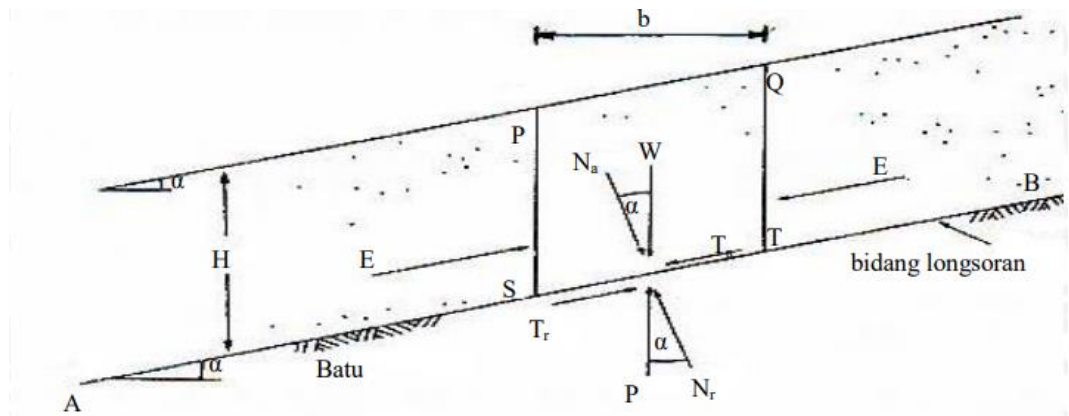
Kondisi gagal biasanya diasumsikan sebagai kondisi dimana gaya yang mendorong lebih besar daripada gaya yang menahan. Gambaran didapatkan dari analisis ini akan digunakan untuk menentukan desain lereng yang aman berdasarkan angka aman yang ada.

Dalam perhitungan stabilitas lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu: adanya faktor gempa dan adanya rembesan yang melalui bendungan. Faktor tersebut harus diperhitungkan pada keadaan bendungan tertentu yang nantinya sangat mempengaruhi tingkat keamanan dari bendungan.

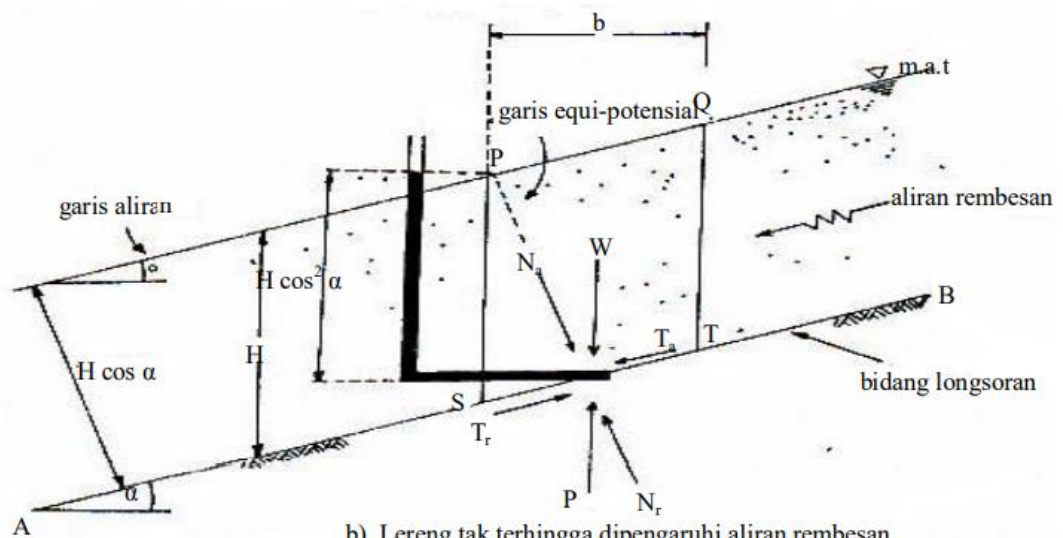
Analisis Stabilitas Lereng dibagi menjadi 2 macam, yaitu:

1. Analisis Stabilitas Lereng Tak Terbatas (*Infinite Slope*)

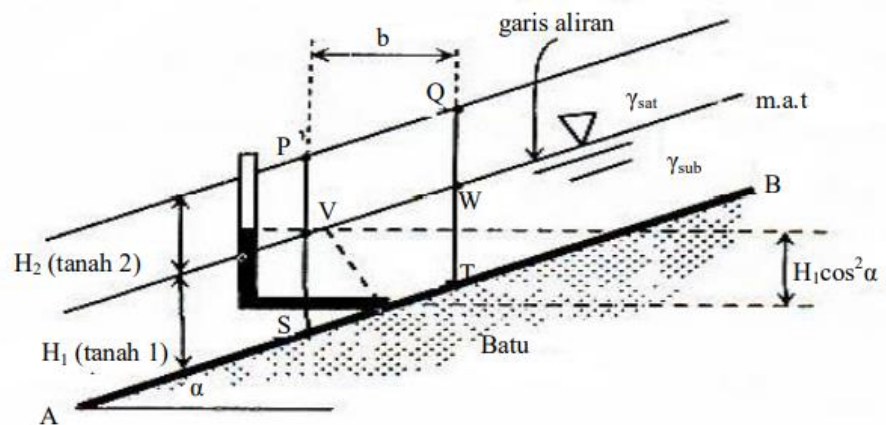
Lereng tak terbatas adalah suatu kondisi dimana panjang permukaan bidang miring dari lereng lebih panjang dari kedalamannya. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.7. yang memperlihatkan suatu kondisi tanah dengan tebal H yang mempunyai permukaan miring, terletak di atas lapisan batu dengan kemiringan permukaan yang sama. Lereng semacam ini disebut lereng tak terhingga karena mempunyai panjang yang sangat lebih besar dibanding dengan kedalamannya (H). Jika diambil elemen tanah selebar h , gaya-gaya yang bekerja pada dua bidang vertikalnya mendekati sama, karena pada lereng tak terhingga gaya-gaya yang bekerja di setiap sisi bidangnya dapat dianggap sama. (Hardiyatmo, 2007)



a) Lereng tak terhingga tanpa aliran air rembesan



b) Lereng tak terhingga dipengaruhi aliran rembesan



Gambar 2.10. Analisis Stabilitas Lereng tak terhingga

Sumber : Hardiyatmo, 2007

2. Analisis Stabilitas Lereng Terbatas (*Finite Slope*)

Analisis lereng terbatas (*Finite Slope*) adalah suatu lereng jika tinggi kritis (H_{cr}) mendekati tinggi lereng. Analisis stabilitas lereng terbatas pada tanah homogen disederhanakan dengan anggapan bentuk umum dari bidang keruntuhan yang potensial. Namun, ada pertimbangan bahwa keruntuhan lereng biasanya terjadi pada bidang kelongsoran lengkung.

Pada awal tahun 1875 Culman menyatakan bahwa keruntuhan lereng yang mendekati bidang potensial adalah terjadi pada bidang datar. Angka Keamanan (FS) dari pendekatan Culman memberikan hasil yang cukup bagus hanya untuk lereng yang mendekati vertical. Setelah melalui penelitian keruntuhan lereng yang cukup mendalam pada tahun 1920, *Swedish Geotechnical Commission* merekomendasikan bahwa bidang kelongsoran yang terjadi adalah mendekati bentuk lingkaran silindris. Sejak saat itu Analisis stabilitas lereng konvensional menganggap bidang kelongsoran potensial adalah busur lingkaran. Namun, ada beberapa keadaan tertentu misalnya bendungan zonal, pondasi pada tanah lunak dimana Analisis stabilitasnya menggunakan kelongsoran bidang datar dianggap lebih tepat dan menghasilkan hasil yang bagus.

Dengan begitu, Analisis stabilitas lereng terbatas berdasarkan keruntuhannya dibagi menjadi 2 jenis, yaitu:

- Analisis Stabilitas Lereng dengan Bidang keruntuhan Datar

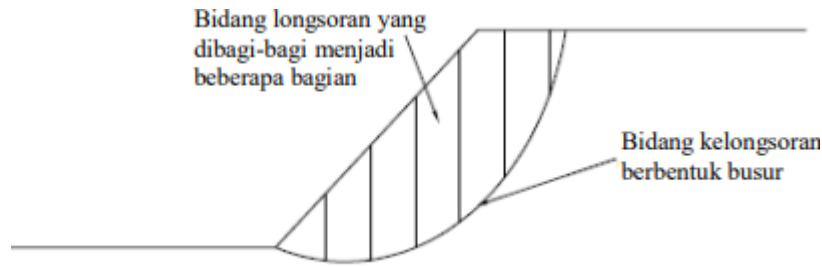
Analisis stabilitas lereng ini didasarkan pada anggapan bahwa keruntuhan lereng terjadi sepanjang bidang, bila tegangan geser rata-rata yang cenderung menyebabkan *Slip* lebih besar dari kuat geser tanah.

- Analisis Stabilitas Lereng dengan bidang keruntuhan Lingkaran Silindris

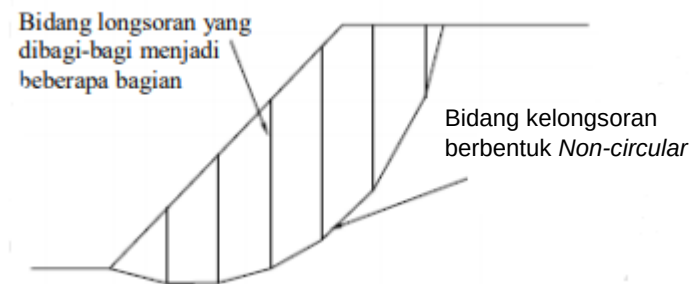
Pada umumnya keruntuhan lereng dengan bidang keruntuhan silindris terjadi mengikuti salah satu pola sebagai berikut:

- a. Bidang longsor memotong lereng pada dasar atau di atasnya, hal tersebut disebut sebagai keruntuhan lereng (*Slope Failure*).
- b. Bidang longsor melalui bawah ujung dasar lereng, hal tersebut disebut keruntuhan dasar (*Base Failure*).

Terdapat dua asumsi bidang kelongsoran berbentuk *Circular* dan bidang kelongsoran yang diasumsikan *Non-circular*.



Gambar 2.11. Bidang longsor *Circular*
Sumber : Herman, 2010



Gambar 2.12. Bidang Longsor *Non-circular*
Sumber : Herman, 2010

Prosedur untuk menganalisis stabilitas lereng, secara umum dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok:

- Prosedur massa (*Mass Procedure*). Dalam hal ini, massa tanah di atas bidang longsor diambil sebagai suatu kesatuan unit. Prosedur ini akan sangat berguna jika tanah yang membentuk lereng adalah tanah yang homogen.
- Metode Irisan (*Method of Slices*). Dalam prosedur ini, tanah diatas bidang longsor dibagi dalam sejumlah irisan sejajar vertical. Pada kondisi tanah tidak homogen dan memiliki tekanan air pori maka tetap dapat diperhitungkan.

2.7.1. Analisis Stabilitas Lereng Metode *Morgenstern-Price*

Metode ini adalah salah satu metode yang berdasarkan prinsip kesetimbangan batas yang dikembangkan oleh Morgenstern dan Price pada tahun 1965, dimana proses analisisnya merupakan hasil dari kesetimbangan setiap gaya-gaya normal dan momen yang bekerja pada tiap irisan dari bidang kelongsoran lereng yang di Analisis. Dalam metode ini, dilakukan asumsi penyederhanaan untuk

menunjukkan hubungan antara gaya geser di sekitar irisan (X) dan gaya normal di sekitar irisan (E) dengan persamaan :

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (2.12)$$

Gaya-gaya yang bekerja pada tiap irisan bidang kelongsoran ditunjukkan pada gambar 2.10. persamaan yang didapatkan adalah:

$$P = \frac{[Wn - (X_R - X_L) - \frac{1}{E}(c' \sin \alpha - u \tan \varphi' \sin \alpha)]}{\cos \alpha \left(l + \tan \alpha \frac{\tan \varphi'}{E} \right)} \quad (2.13)$$

Dimana :

P = Gaya Normal

c' = Kohesi tanah

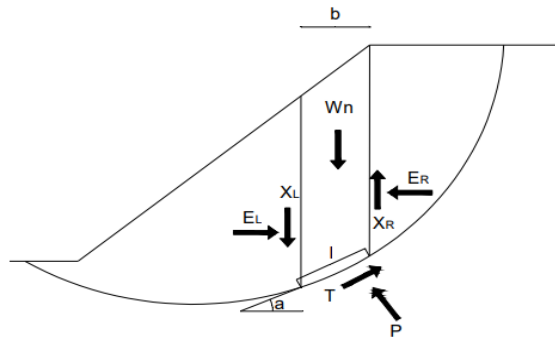
Wn = Gaya akibat beban tanah ke-n

α = sudut antara titik tengah bidang irisan dengan titik pusat busur bidang longsor

φ = Sudut geser dalam tanah

u = Tekanan air pori

X_R, X_L = Gaya gesek yang bekerja di tepi irisan



Gambar 2.13. Gaya yang bekerja pada irisan metode *Morgenstern-Price*

Sumber : Herman, 2010

Dalam metode ini Analisis faktor keamanan dilakukan dengan dua prinsip yaitu dengan kesetimbangan momen (F_m) dan kesetimbangan gaya (F_f). Faktor keamanan dari prinsip kesetimbangan momen adalah untuk bidang kelongsoran *Circular* :

$$F_m = \frac{\sum (c' l + (p - u) \tan \varphi')}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.14)$$

Dan nilai faktor keamanan dengan prinsip kesetimbangan gaya :

$$F_f = \frac{\Sigma [c' l + (P - u) \tan \varphi'] \cos \alpha}{\Sigma P \sin \alpha} \quad (2.15)$$

Pada proses iterasi pertama, gaya geser disekitaran irisan (X_L dan X_R) diasumsikan nol. Kemudian pada proses iterasi selanjutnya gaya tersebut didapatkan dari rumus:

$$(E_R - E_L) = P \sin \alpha \frac{1}{F} [c' + (P - u) \tan \varphi'] \cos \alpha \quad (2.16)$$

Kemudian gaya geser tersebut dihitung dengan mengasumsikan nilai λ dan $f(x)$.

2.7.2. Analisis Stabilitas Lereng Metode Spencer

Metode *Spencer* merupakan metode yang dapat digunakan untuk sembarang bentuk bidang longsor dan memenuhi di semua kondisi kesetimbangan gaya dan kesetimbangan momen pada setiap irisan. Spencer mengasumsikan bahwa gaya-gaya yang bekerja disekitar bidang irisan adalah parallel sehingga gaya-gaya tersebut memiliki sudut kemiringan yang sama yaitu:

$$\frac{X}{E} = \tan \theta = \lambda \quad (2.17)$$

Dimana :

θ = sudut kemiringan resultan gaya antar irisan

Perhitungannya adalah :

Kekuatan untuk menahan stabilitas lereng:

$$S = \frac{1}{F} (c \cdot l + (P - u \cdot l) \tan \varphi) \quad (2.18)$$

Kesetimbangan vertikal didapatkan rumus :

$$P \cos \alpha + S \sin \alpha = W - (X_r - X_l) \quad (2.19)$$

Untuk turunan rumus kesetimbangan vertikal dapat dijelaskan dengan:

$$(P - u \cdot l) = \frac{W - l \left(\left[\frac{c \cdot \sin \alpha}{F} \right] + u \cdot \cos \alpha \right)}{\cos \alpha + \frac{\tan \varphi}{F} \cdot \sin \alpha} \quad (2.20)$$

Kesetimbangan momen yang terjadi :

$$\Sigma WR \sin \alpha = \Sigma SR \quad (2.21)$$

Substitusi persamaan (2.20) dan (2.18) kemudian hasil substitusi di substitusi Kembali pada persamaan (2.21) sehingga didapat kesetimbangan momen:

$$FS = \frac{\Sigma [c \cdot b + (W - u \cdot b) \tan \varphi] \left(\frac{1}{\cos \alpha (1 + \tan \alpha \tan \varphi / F)} \right)}{\Sigma W \sin \alpha} \quad (2.22)$$

Kesetimbangan horizontal yang terjadi didapatkan :

$$FS = \frac{\sum(c.b + (w - u.b) \tan \varphi) \frac{\sec \alpha^2}{1 + \tan \alpha \tan \varphi/F}}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.23)$$

2.7.3. Analisis Stabilitas Lereng Metode *Simplified Bishop*

Metode *Simplified Bishop* menganggap gaya-gaya yang bekerja pada sisi-sisi irisan mempunyai resultan nol arah vertikal. Persamaan kuat gesernya adalah:

$$\tau = \frac{c'}{F} + (\sigma - \mu) \frac{\tan \varphi'}{F} \quad (2.24)$$

Untuk irisan ke-i, nilai $T_i = \tau a_i$, yaitu gaya geser yang dikarenakan tanah pada bidang longsor untuk kesetimbangan batas, karena itu:

$$\tau = \frac{c'a_i}{F} + (N_i - \mu_i a_i) \frac{\tan \varphi'}{F} \quad (2.25)$$

Keseimbangan momen dengan pusat rotasi O antara berat massa tanah yang akan longsor dengan gaya total yang dikerahkan tanah pada bidang longsor adalah:

$$\sum W_i x_i = \sum T_i R \quad (2.26)$$

Dengan x_i adalah jarak W_i ke pusat rotasi O, maka didapatkan:

$$F = \frac{R \sum_{i=1}^n [c' \alpha_i + (N_i - \mu_i a_i) \tan \varphi']}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \quad (2.27)$$

Pada kondisi kesetimbangan vertikal, jika $X_1 = X_i$ dan $X_r = X_{i+1}$

$$N_i \cos \theta_i + T_i \sin \theta_i = W_i + X_i - X_{i+1}$$

$$N_i = \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - T_i \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \quad (2.28)$$

Maka didapatkan nilai Faktor keamanan :

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c' b_i + W_i (1 - r_u) \tan \varphi'] \left(\frac{1}{\cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \varphi'/F)} \right)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \quad (2.29)$$

Dimana:

FS = Faktor keamanan

c = kohesi tanah

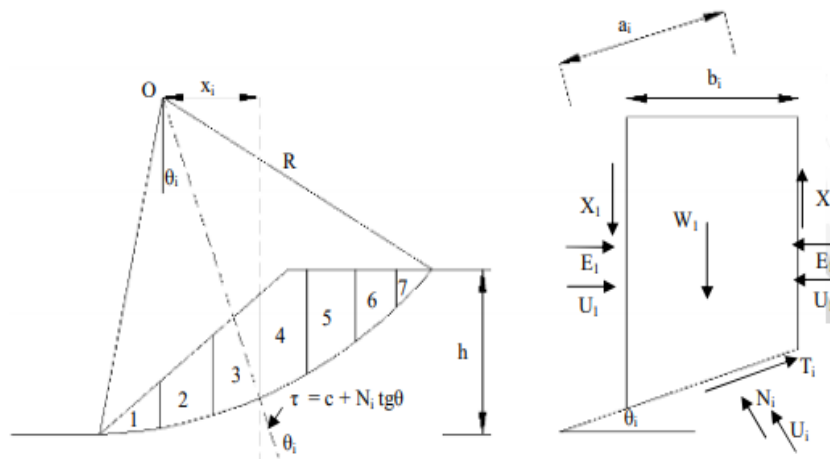
φ = sudut geser dalam tanah

a_i = panjang bagian lingkaran ke-i

W_i = berat irisan tanah ke-i

u_i = tekanan air pori pada irisan ke-i

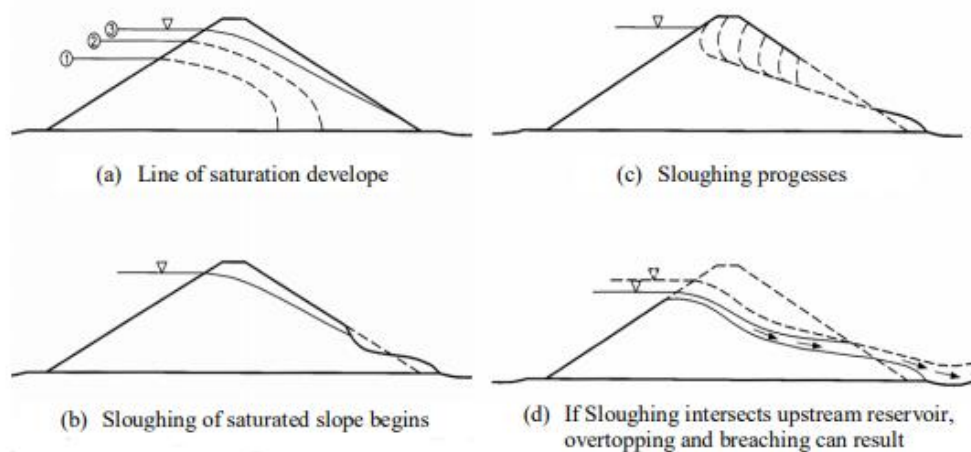
θ_i = sudut yang didefinisikan pada gambar 2.11



Gambar 2.14. Gaya-gaya yang bekerja pada irisan
Sumber : Anonim

2.8. Rembesan Pada Tubuh Bendungan

Dalam merencanakan sebuah bendungan perlu diperhatikan stabilitasnya terhadap bahaya longsor, erosi lereng dan kehilangan air akibat rembesan yang melalui tubuh bendungan. Baik tubuh bendungan dan juga pondasinya harus mampu mempertahankan bentuknya terhadap gaya-gaya yang ditimbulkan oleh adanya air filtrasi yang mengalir melalui celah-celah antara partikel-partikel tanah pembentuk tubuh bendungan dan pondasinya tersebut. (Hardiyatmo, 2007)



Gambar 2.15. Contoh Kegagalan pada bendungan tipe urugan akibat rembesan
Sumber : Anonim

Kapasitas aliran filtrasi adalah kapasitas rembesan air yang mengalir ke hilir melalui tubuh bendungan dan pondasi bendungan. Kapasitas aliran filtrasi suatu bendungan mempunyai batas-batas tertentu yang mana apabila kapasitas aliran

filtrasi tersebut melampaui batas tersebut, maka kehilangan air yang terjadi akan cukup besar dan dapat mengakibatkan gejala sufosi (*Piping*) dan semburan (*Boiling*).

Apabila material pembentuk tubuh bendungan dan pondasi bendungan memiliki harga k_v dan k_h yang berbeda, maka untuk menghitung kapasitas aliran filtrasi dilakukan dengan harga k yang telah dimodifikasi (k),

$$k = \sqrt{k_h} \times k_v \quad (2.30)$$

dimana :

k = Koefisien filtrasi yang telah dimodifikasi (cm/s)

k_v = Koefisien filtrasi vertikal (cm/s)

k_h = Koefisien filtrasi horizontal (cm/s)

Sedangkan untuk memperkirakan besarnya kapasitas filtrasi yang mengalir melalui tubuh dan pondasi bendungan yang didasarkan pada jaringan trayektori aliran filtrasi, dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$Q_f = \frac{N_f}{N_p} \times k \times H \times L \quad (2.31)$$

Dimana :

Q_f = Debit Rembesan (cm^3/s)

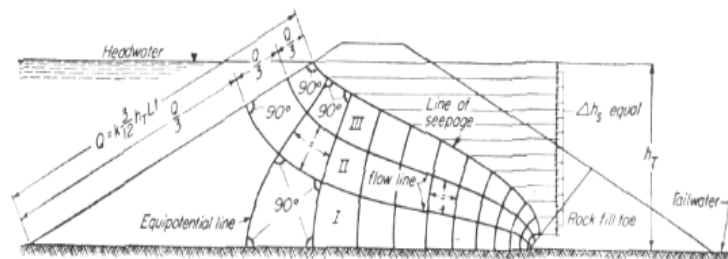
N_f = Angka pembagi dari garis trayektori aliran filtrasi

N_p = Angka pembagi dari garis equi-potensial

k = Koefisien filtrasi (cm/s)

H = Tinggi tekanan air total (m)

L = Panjang profil melintang tubuh bendungan (m)



Gambar 2.16. Jaringan Trayektori pada sebuah bendungan urugan
Sumber : BPSDM PUPR

Sebuah bendungan urugan dapat disebut aman terhadap rembesan yang terjadi pada bagian tubuh bendungannya apabila kecepatan rembesan kritis (V_c) > kecepatan rembesan yang terjadi (V_s).

Untuk mengetahui kecepatan rembesan yang terdapat dalam tanah jenuh (*Saturated soil*) Darcy ditahun 1856 menemukan suatu persamaan sederhana yaitu:

$$v = k \times i \quad (2.32)$$

Dimana :

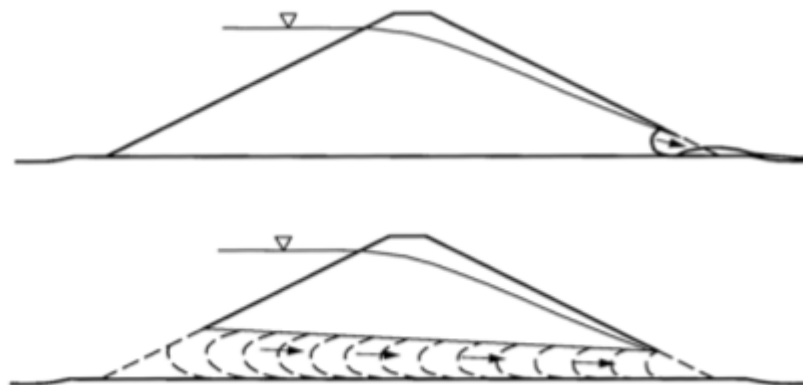
v = kecepatan pada bidang aliran keluarnya filtrasi (cm/s)

k = koefisien filtrasi (cm/s)

i = gradien hidrolik (m)

2.8.1. Erosi Buluh (*Piping*)

Erosi buluh (*Piping*) terjadi bila air waduk mengalir atau merembes melalui pori-pori tanah timbunan atau pondasi menghasilkan suatu gaya Tarik yang cukup kuat membawa butiran tanah keluar melalui titik keluaran. Penggerusan atau erosi tersebut berlangsung terus menerus kemudian membentuk semacam pipa didalam timbunan atau pondasi. Pipa tersebut terus membesar sebagai hasil dari gerusan dan membuat bendungan mengalami keruntuhan.



Gambar 2.17. Proses Terjadinya Erosi Buluh (*Piping*)

Sumber : BPSDM PUPR

Beberapa kondisi yang membuat terjadinya *Piping*, yaitu:

- Terbentuknya alur aliran air.
- Gradien hidrolik pada tempat keluaran telah melebihi dari nilai batas yang tergantung dari jenis tanahnya.

- Tempat keluaran dalam kondisi bebas dan tidak dilindungi filter secara memadai.
- Terdapat tanah yang rawan *Piping* pada alur aliran rembesan.
- Telah terbentuk “pipa” atau tanah di atasnya telah membentuk seperti “atap” untuk menjaga terbukanya “pipa”

Piping sangat berbahaya terhadap stabilitas bendungan, karena dapat menyebabkan kegagalan. Untuk mengetahui bendungan urugan aman terhadap gejala *Piping* dapat kita temukan dengan rumus, yaitu:

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{cal}} \quad (2.33)$$

Dimana :

i_{cr} = gradien hidrolik kritis (tanpa dimensi)

i_{cal} = gradien keluaran dari hasil Analisis rembesan (tanpa dimensi)

FS = Faktor keamanan terhadap gejala *Piping* (>4 bila tanpa filter, >2 dengan filter)

2.9. Material Timbunan

Material untuk bendungan urugan, merupakan material batu atau tanah yang digali dari daerah sekitar tempat kedudukan calon bendungan dan tipe dari bendungan tersebut biasanya tergantung dari jenis, kualitas dan kuantitas material yang tersedia di daerah tersebut. (Sosrodarsono, 1981:127)

Material bendungan dibagi menjadi empat kategori yang akan dijelaskan pada sub bab dibawah ini.

2.9.1. Material Zona Kedap Air

Material kedap air merupakan material yang mutlak diperlukan untuk pembangunan bendungan urugan dan tipe serta stabilitas bendungan tersebut sangat tergantung pada karakteristik, kualitas, dan kuantitas dari material yang dapat digali untuk penimbunan pada zona kedap air tersebut. (Sosrodarsono, 1981).

Beberapa kriteria dari persyaratan tersebut antara lain adalah:

1. Koefisien Permeabilitas

Koefisien permeabilitas (k) dari bahan yang digunakan untuk zona kedap air supaya lebih kecil dari 1×10^{-5} cm/s. Pada hakikatnya semakin halus

butiran suatu material, maka koefisien permeabilitasnya semakin rendah dan nilai k biasanya sudah dapat diperkirakan berdasarkan besarnya presentase butiran pada material yang dapat melalui saringan No. 30.

2. Kekuatan geser

Kekuatan geser suatu material terutama ditentukan oleh daya kohesi (c) dan sudut geser dalamnya (ϕ). Pada umumnya suatu material dengan nilai $D = 95$ s/d 98 merupakan nilai yang cukup baik untuk digunakan pada penimbunan tubuh bendungan. Material-material dengan nilai $D = 90$ s/d 95 biasanya digunakan untuk pembangunan bendungan rendah (< 30 m) atau untuk bendungan dari timbunan material berbutir halus, dimana penimbunannya dilakukan pada kondisi kelembapan di daerah yang lebih basah dari angka kadar air optimumnya.

3. Karakteristik proses konsolidasi

Semakin halus gradasi suatu material dan semakin tinggi nilai kadar airnya, maka tingkat konsolidasinya akan menjadi lebih besar dan tekanan air pori mungkin dapat terjadi pada saat proses konsolidasi berlangsung. Tubuh bendungan yang baru selesai ditimbun, selain timbul tekanan yang dihasilkan dari proses pemadatan maka timbul pula tekanan tambahan yang diakibatkan oleh adanya proses konsolidasi (tekanan konsolidasi). Terutama untuk material calon tubuh bendungan yang kondisi kelembapannya terletak pada daerah yang lebih basah dari angka kadar air optimumnya, dimana pada saat pelaksanaan pemadatan tekanan air porinya rendah. Akan tetapi, pada saat berlangsungnya proses konsolidasi, maka tekanan air pori akan meningkat dan kemungkinan dapat melampaui batas – batas kemampuan stabilitas dari tubuh bendungan tersebut.

4. Kondisi bahan pada saat penimbunan

Pada saat penimbunan dan pemadatan umumnya material berbutir kasar lebih mudah dilaksanakan dibandingkan dengan material berbutir halus. Demikian pula tingkat kelembapan suatu material dapat mempengaruhi kondisi penggarapannya, dimana dalam kondisi kelembapan yang terletak di sekitar angka kadar air optimumnya, penimbunan dan pemadatan material tersebut akan lebih mudah dilaksanakan dibandingkan dengan bahan yang

tingkat kelembapannya mungkin hanya beberapa persen saja bergeser ke arah yang lebih basah dari titik optimum tersebut.

5. Zat – zat yang terkandung di dalam material

Zat – zat organik, merupakan zat yang mudah terurai dan mengakibatkan terjadinya perubahan – perubahan fisik dari zat tersebut, dan akan menurunkan stabilitas dari material dimana zat organik tersebut berada. Berdasarkan penjelasan tersebut, maka kandungan dari zat organik yang terdapat dalam material tidak boleh lebih dari 5 %.

2.9.2 Material Zona Filter

Zona timbunan tanah dan zona timbunan batu pada tubuh suatu bendungan, biasanya dipisahkan dengan suatu zona peralihan. Zona yang tipis biasanya disebut lapisan filter, sedangkan yang tebal disebut lapisan transisi. Sebagai bahan filter, disamping kualitasnya yang harus memadai seperti bahan-bahan lainnya, juga harus memenuhi persyaratan kriteria filter yang disyaratkan oleh SHERAD (USBR,1987) sebagai berikut:

1. $D_{15f}/D_{85b} < 9$
2. $D_{5f} > 0,0075 \text{ mm}$
3. $D_{60f} < 4,75 \text{ mm}$ atau $D_{60f}/D_{10f} < 20$
4. $D_{maxf} < 50$

Dimana :

D_{15f} = ukuran butiran filter yang terletak pada garis 15 % pada kurva gradasinya.

D_{85b} = ukuran butiran bahan zona yang dilindungi yang terletak digaris 85% pada kurva gradasinya.

D_{5f} = ukuran butiran filter yang terletak di garis 5% pada kurva gradasinya.

D_{60f} = ukuran butiran filter yang terletak di garis 60% pada kurva gradasinya.

D_{10f} = ukuran butiran filter yang terletak di garis 10% pada kurva gradasinya.

Tebal filter biasanya disesuaikan dengan kemudahan dalam pelaksanaan (*Workability*) dan gempa bumi. Tebal filter horizontal minimum 2,00 – 3,00 m dan tebal minimum miring adalah 2,00 dekat puncak bendungan.

2.9.3. Material Batu

Material bongkahan batu yang diperoleh dengan cara memecahkan lapisan batuan massif. Material batu akan dianggap idela apabila memenuhi persyaratan sebagai berikut:

1. Ukuran diameter batu antara 40 – 60 cm dengan berat 250 – 500 kg
2. Batu yang berdiameter kurang dari 10 cm tidak melebihi 5% jumlahnya
3. Material baru yang mudah pecah, baik dalam pengangkutan maupun pada saat penuangan
4. Berat jenisnya tidak kurang dari 2,5
5. Kuat tekan batu tidak kurang dari 700 kg/cm².
6. Daya tahan terhadap pelapukan tinggi

Mengenai kekuatan geser material batu, biasanya diperoleh angka – angka sebagai berikut:

- Apabila material batu cukup keras dan stabil, biasanya untuk $D_{50} = 2 - 10$ cm, maka sudut geser dalamnya sekitar 40°.
- Sedangkan untuk $D_{50} > 15$ cm, maka nilai sudut geser dalamnya diambil 45°.
- Untuk material batu yang memiliki kuat tekan tidak terlalu besar maka sudut geser dalamnya dapat diambil 30° sudah cukup aman.

2.9.4. Material Lain - lain

Selain material yang berkualitas baik seperti yang dijelaskan diatas, untuk penimbunan bendungan kadang-kadang digunakan pula material yang kualitasnya lebih rendah, antara lain :

1. Material baru yang dihasilkan dari batuan lunak yang mudah lapuk.
2. Lebih dari dua jenis bahan tanah, pasir, atau kerikil yang tidak mungkin dapat diambil secara terpisah.
3. Material hasil galian dari pondasi zona kedap air atau pondasi bangunan pelengkap bendungan,

Material yang seperti diatas tersebut biasanya digunakan pada penimbunan zona sembarang (*Random Zone*).

2.10. Pengaruh Gempa

Gempa disebabkan oleh pergerakan relatif yang terjadi secara tiba-tiba pada sesar atau zona patahan dalam kerak bumi, yang disebut sesar aktif (yang menimbulkan gempa). Mekanisme pergerakan sesar mengikuti proses regangan elastis (*Elastic Rebound*), sebagai akibat pelepasan energi regangan secara tiba-tiba dalam kerak bumi. Peningkatan energi regangan dalam kerak bumi melalui pergerakan relative antara bagian-bagian kerak bumi, disebut juga lempeng tektonik. Pelepasan energi regangan ini disebut tkeruntuhan sesar (*fault rapture*), yang terjadi sepanjang zona keruntuhan. Bila terjadi keruntuhan sesar, akan terjadi regangan elastis pada batuan. Pantulan ini menyebabkan getaran melalui kerak bumi dan sepanjang permukaan bumi, dan menimbulkan guncangan gempa permukaan sebagai sumber kerusakan gempa secara umum. Jika sesar sepanjang keruntuhan mengarah ke atas permukaan tanah dan permukaan tidak terlapisi sedimen, maka pergerakan relative dapat memicu keruntuhan permukaan, sebagai sumber kerusakan gempa terhadap infrastruktur yang telah dibangun. Sejak 30 tahun terakhir ini, banyak kemajuan tentang pemahaman pengaruh gempa bumi terhadap bendungan beton dan bendungan tipe urugan. Kemajuan ini terutama didukung oleh banyaknya perangkat lunak (*Software*) komputer yang telah dikembangkan oleh berbagai instansi untuk melakukan analisis dinamik bendungan. Namun untuk melakukan prediksi perilaku bendungan akibat gempa sangat kuat, masih tetap mengalami kesulitan, hal ini disebabkan karena sulitnya untuk melakukan pemodelan sifat non-elastik dari bendungan, variasi guncangan gempa yang melewati fondasi bendungan dan faktor lainnya yang belum diketahui secara akurat. Oleh karena itu, untuk mengetahui hasil kerusakan yang dialami dari gempa secara besar cukup sulit untuk diprediksi, kerusakan akibat gempa bumi sendiri dapat berupa kerusakan secara langsung dari gempa itu sendiri dan kerusakan tidak langsung sebagai dampak dari kerusakan langsung. Dampak dari kerusakan langsung terbagi menjadi dua bagian, yaitu kerusakan primer dan kerusakan sekunder. Kerusakan primer dapat berupa guncangan permukaan dan deformasi yang besar, sedangkan kerusakan sekunder dapat berupa longsor dan likuifaksi. Untuk kerusakan tidak langsung akibat gempa bumi umumnya memicu

dampak sosial-ekonomi seperti hilangnya pelayanan public seperti pelayanan transportasi dan pelayanan energi.

2.10.1. Gempa Dasar Operasi (*Operational basis Earthquake, OBE*)

Gempa dengan Batasan guncangan dengan Batasan guncangan di permukaan tanah pada lokasi studi dengan 50% kemungkinan tidak terlampaui dalam 100 tahun, yang sebaiknya ditentukan secara probabilistik. Bendungan dan bangunan pelengkap serta peralatannya harus tetap berfungsi dengan baik dan mudah perbaikannya jika terjadi gempa dasar operasi, tetapi tanpa memperhitungkan tinjauan keamanan terhadap kehidupan manusia.

2.10.2. Gempa Desain Maksimum (*Maximum design Earthquake, MDE*)

Gempa yang memberikan guncangan terbesar di lokasi studi yang akan digunakan untuk desain atau analisis. Untuk bendungan yang keruntuhannya akan mengancam kehidupan, gempa desain maksimum sebaiknya diambil pada batas yang sama dengan *CMCE*, untuk mempertahankan kapasitas pengisian waduk. Jika keruntuhan bendungan tidak mengancam kehidupan, dapat diambil gempa yang lebih kecil dari *CMCE* sebagai *MDE*.

2.10.3. Gempa Boleh Jadi Maksimum Penentu (*CMCE*)

Gempa maksimum boleh jadi paling kritis yang dapat mempengaruhi suatu lokasi studi. *CMCE* ini ditentukan sesudah diperkirakan besarnya gempa maksimum yang terjadi sepanjang sesaran atau di daerah tektonik terdekat dengan daerah studi. Untuk daerah tektonik dengan laju aktifitas rendah dan tanda-tanda identifikasi yang kurang nyata, konsep *CMCE* merupakan gempa maksimum boleh jadi yang menjadi signifikan di daerah studi. Evaluasi untuk kondisi ini sebaiknya dilakukan dengan cara probabilistik bencana gempa.

2.10.4. Klasifikasi Kelas Resiko

Resiko beban gempa yang harus digunakan dalam desain ditentukan oleh tingkat resiko bangunan. Empat faktor resiko yang harus dipertimbangkan dalam analisis adalah kapasitas waduk, tinggi bendungan, kebutuhan evakuasi dan kerusakan di bagian hilir. Tiap-tiap faktor resiko terbagi lagi menjadi kondisi resiko

ekstrem, kondisi resiko tinggi, kondisi resiko moderat dan kondisi resiko rendah dengan nilai bobot yang sudah ditentukan. Penentuan kelas beban gempa dilakukan dengan menghitung faktor resiko total (FR_{tot}) yang merupakan penjumlahan dari faktor resiko pengaruh kapasitas (FR_k), tinggi bendungan (FR_t), kebutuhan evakuasi (FR_e) dan faktor kerusakan dibagian hilir (FR_h) dengan persamaan:

$$FR_{tot} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h \quad (2.34)$$

Dimana:

FR_{tot} = faktor resiko total

FR_k = faktor resiko pengaruh kapasitas

FR_t = faktor pengaruh tinggi bendungan

FR_e = faktor resiko kebutuhan evakuasi

FR_h = faktor resiko tingkat kerusakan hilir

Tabel 2.5. Kriteria faktor resiko untuk evaluasi keamanan bendungan

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

Sumber : Pedoman Analisis Stabilitas dinamik bendungan tipe urugan

Berdasarkan nilai faktor resiko total, kelas resiko untuk desain terbagi menjadi 4 kelas seperti pada tabel berikut ini:

Tabel 2.6. Kelas resiko bendungan dan bangunan air

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

Sumber : Pedoman Analisis Stabilitas dinamik bendungan tipe urugan

Persyaratan tanpa kerusakan dengan periode ulang T ditentukan (OBE), sehingga beban gempa dapat diperoleh dari peta zona gempa. Analisis dilakukan dengan cara koefisien gempa. Kestabilan bendungan harus lebih tinggi dari faktor keamanan minimum yang dipersyaratkan, bendungan tidak mengalami kerusakan yang serius,

dan masih tetap beroperasi, serta tidak memerlukan pekerjaan perbaikan yang menyeluruh. Untuk persyaratan yang diperkenankan ada kerusakan tanpa terjadi keruntuhan dengan periode ulang T ditentukan untuk kelas I, II, III, dan IV sehingga percepatan gempa maksimum di permukaan tanah dapat diperoleh dari peta zona gempa. Analisis dilakukan dengan cara dinamik dengan menggunakan ragam sambutan gempa atau sejarah waktu percepatan gempa. Bendungan harus mampu menahan gempa desain MDE tanpa keruntuhan atau diperkenankan ada kerusakan dengan alihan tetap tidak melebihi 50% tinggi dari jagaan.

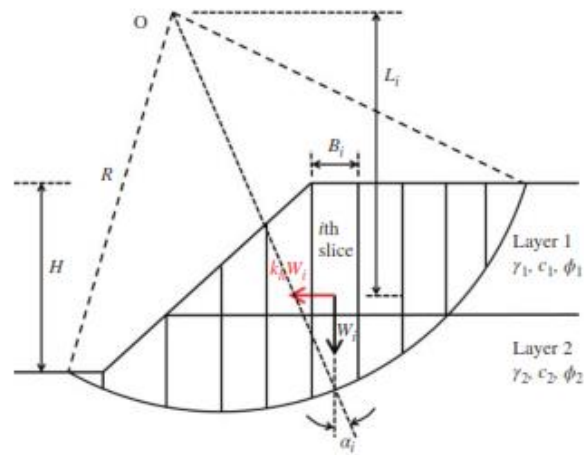
Tabel 2.7. Kriteria Beban gempa untuk desain bendungan

Kelas resiko dengan masa guna	Persyaratan tanpa kerusakan		Persyaratan diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan	
	T (Tahun)	Metode Analisis	T (Tahun)	Metode Analisis
IV N = 50 - 100	100 - 200 $a_d \geq 0,1 \text{ g}$	Koef. Gempa	10.000 (MDE)	Koef. Gempa atau dinamik
III N = 50 - 100	50 - 100 $a_d \geq 0,1 \text{ g}$	Koef. Gempa	5.000 (MDE)	Koef. Gempa atau dinamik
II N = 50 - 100	50 - 100 $a_d \geq 0,1 \text{ g}$	Koef. Gempa	3.000 (MDE)	Koef. Gempa atau dinamik
I N = 50 - 100	50 - 100 $a_d \geq 0,1 \text{ g}$	Koef. Gempa	1000 (MDE)	Koef. Gempa atau dinamik

Sumber : Pedoman Analisis Stabilitas dinamik bendungan tipe urugan

2.10.5. Metode Analisis Stabilitas Statis Semu (*Pseudostatic Stability Analysis*)

Metode *Pseudostatic* adalah metode yang paling sederhana dalam mengevaluasi stabilitas lereng akibat gempa. Muatan seismik diasumsikan memperbesar gaya horizontal yang bekerja pada bendungan dengan arah yang paling kritis. Untuk bendungan besar, USBR mengkombinasikan gaya horizontal tersebut dengan gaya vertikal yang besarnya diambil 50% gaya horizontal.



Gambar 2.18. Stabilitas Lereng dengan pengaruh gempa metode irisan
Sumber : Ming Xiao, 2015

Faktor Keamanan yang digunakan pada metode irisan dengan beban gempa adalah:

$$FS = \frac{\sum_{i=2}^n (c \cdot B_i \sec \alpha_i + W_i \cos \alpha_i \tan \phi)}{\sum_{i=1}^n \left[W_i \sin \alpha_i + k_h W_i \left(\frac{L_i}{R} \right) \right]} \quad (2.34)$$

Dimana :

c = kohesi tanah

ϕ = sudut geser dalam tanah

k_h = Koefisien gempa horizontal

W_i = Berat dari irisan

i = Jumlah irisan

α_i = Sudut dari tiap irisan

B_i = Lebar dari irisan

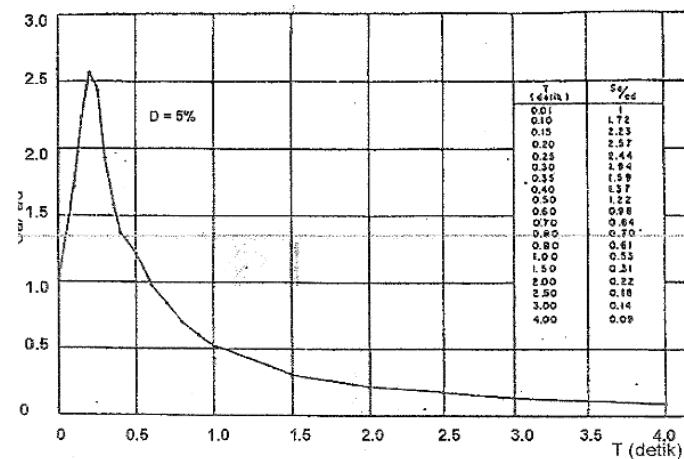
L_i = Jarak dari koefisien gempa horizontal ke pusat rotasi tiap irisan

2.10.6. Analisis Respons Dinamik Simplifikasi

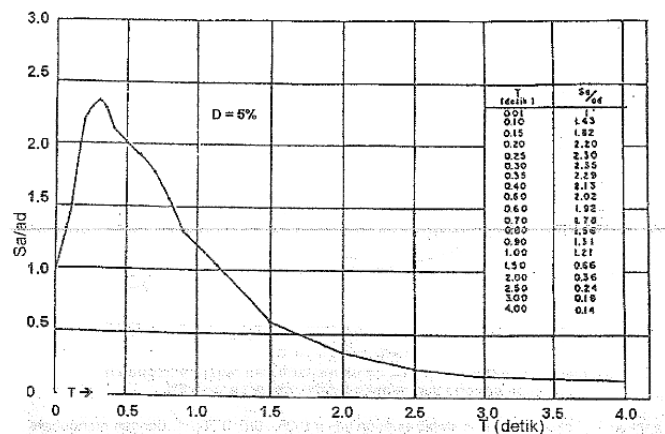
Untuk analisis pendahuluan pengaruh kondisi tanah setempat terhadap respons dinamik dapat diprediksi dengan cara simplifikasi, menggunakan hubungan empirik antara guncangan gempa di permukaan tanah dan batuan dasar. Hubungan ini dikembangkan berdasarkan pengamatan guncangan gempa di permukaan tanah dan batuan dasar serta hasil analisis respons dinamik satu dimensi. Dari hasil pengamatan dan analisis ini diperoleh faktor-faktor amplifikasi untuk memperkirakan secara kasar percepatan gempa pada daerah bebas (tidak dipengaruhi oleh bangunan atau topografi). Faktor amplifikasi ini dapat dipakai

untuk memperkirakan percepatan puncak di permukaan tanah lunak atau kaku, menggunakan percepatan puncak pada batuan dasar dari hasil analisis bahaya gempa pada kondisi lapangan bebas. Selain itu, telah dikembangkan pula hubungan empirik untuk faktor amplifikasi percepatan gempa pada puncak bendungan tipe urugan tanah.

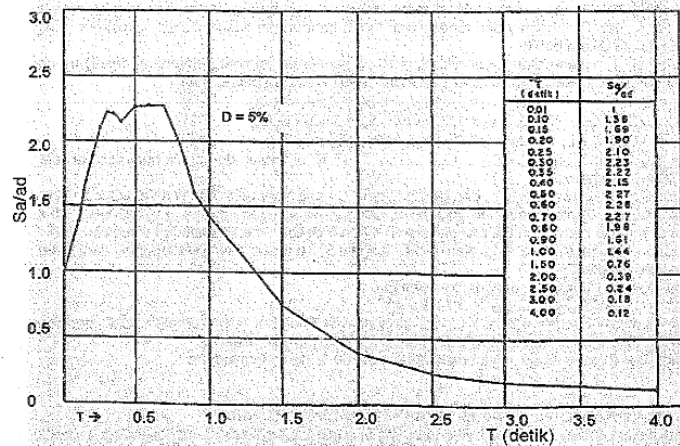
Dalam analisis dinamik bendungan urugan tanah tidak hanya dibutuhkan percepatan puncak di permukaan tanah, tetapi juga besaran spektrum guncangan gempa. Untuk memperoleh besaran spektrum diperlukan data sejarah waktu yang lengkap. Dalam analisis geoteknik biasanya hanya diperlukan pengetahuan tentang percepatan puncak di permukaan tanah dasar atau kombinasi percepatan puncak tanah dasar dengan magnitudo gempa. Magnitudo gempa dan percepatan puncak pada singkapan batuan dasar di lapangan, pada umumnya dievaluasi sebagai bagian dari analisis bahaya gempa.



Gambar 2.19. Spektrum Percepatan gempa penormalan untuk pondasi Batuan
Sumber : Pedoman Konstruksi dan Bangunan PUPR



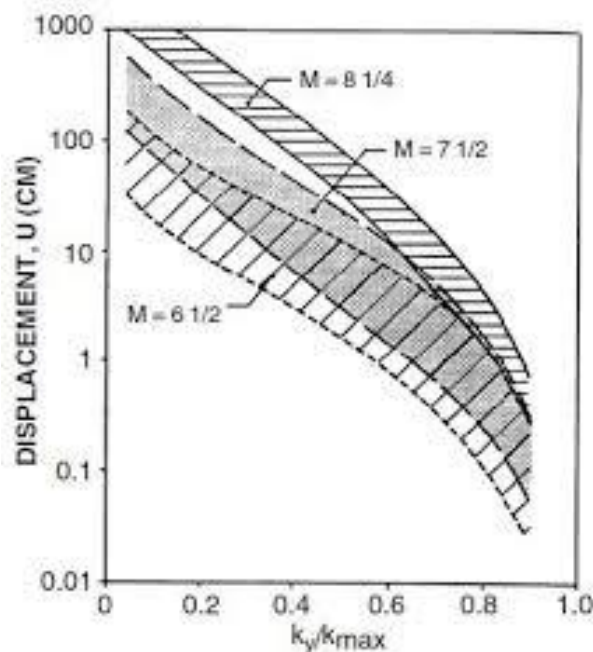
Gambar 2.20. Spektrum Percepatan gempa penormalan untuk pondasi Aluvium
Sumber : Pedoman Konstruksi dan Bangunan PUPR



Gambar 2.21. Spektrum Percepatan gempa penormalan untuk pondasi Aluvium Lunak

Sumber : Pedoman Konstruksi dan Bangunan PUPR

Pada analisis respons dinamik simplifikasi, digunakan metode analisis Makdisi-Seed. Analisis makdisi-seed berdasarkan metode keruntuhan blok untuk bendungan urugan dan timbunan. Makdisi dan Seed (1978) menemukan grafik untuk memperkirakan deformasi yang terjadi akibat beban gempa. Gambar dibawah ini merupakan hubungan deformasi dengan percepatan gempa.



Gambar 2.22. Hubungan antara U dan k_y/k_{maks}

Sumber : Pedoman Konstruksi dan Bangunan

Dimana :

M = Magnitudo gempa

U = Deformasi yang terjadi

k_{maks} = Percepatan gempa maksimum

k_y = Percepatan gempa kritis yang terjadi

T_o = Periode yang terjadi pada bendungan urugan atau timbunan. Nilai ini dapat dihitung berdasarkan frekuensi natural (ω_n) berdasarkan Gazetas (1982).

$$\omega_n = \frac{\bar{V}_s \beta_n}{H} (4 + m)(2 - m) \quad (2.35)$$

dimana:

$\bar{V}_s$ = rata-rata kecepatan gelombang geser

H = tinggi bendungan urugan atau timbunan

Untuk menghitung frekuensi awal: $m = 0$, $\beta_n = 2,404$. Sehingga:

$$\omega_1 = 2,404 \frac{\bar{V}_s}{H} \quad (2.36)$$

$$T_o = \frac{2\pi}{\omega_1} \quad (2.37)$$

2.11. Angka Keamanan

Faktor keamanan (*Safety Factor*) didefinisikan sebagai nilai banding antara gaya yang menahan dengan gaya yang menggerakkan.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (2.35)$$

Dimana :

FS = Faktor Keamanan terhadap kekuatan tanah

τ_f = Kekuatan geser material

τ_d = Tegangan geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor

Tabel 2.8. Persyaratan Faktor keamanan minimum stabilitas bendungan urugan

No	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air Pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa*
1	Selesai Pembangunan tergantung: 1. Jadwal Pembangunan 2. Hub. Antara tekanan pori dan waktu Lereng U/S dan D/S Dengan Gempa tanpa kerusakan digunakan 50% koef. Gempa desain	Efektif	Peningkatan tek. Air pori pada timbunan dan pondasi dihitung menggunakan data lab. Dan pengawasan instrumen	1,30	1,20
			Idem hanya tanpa pengawasan instrumen	1,40	1,20
			Hanya pada timbunan tanpa data lab. Dan dengan/tanpa pengawasan instrumen	1,30	1,20
		Total	Tanpa pengawasan instrumen	1,30	1,20
2	Aliran langgeng tergantung : 1. Elevasi Muka air normal sebelah udik 2. Elevasi Muka air sebelah hilir Lereng U/S dan D/S Dengan Gempa tanpa kerusakan digunakan 100% Koef. Gempa desain	Efektif	Dari analisis rembesan	1,50	1,20
3	Pengoperasian Waduk tergantung: 1. Elev. Muka air maksimum di udik 2. Elev. Muka air minimum di udik (<i>Dead Storage</i>) Lereng U/S harus dianalisis untuk kondisi surut cepat	Efektif	Surut cepat dari Elev. Muka air normal sampai muka air minimum Lereng U/S dan D/S	1,30	1,10
			Surut cepat dari Elev. Muka air maks. sampai muka air min. Pengaruh gempa diambil 0% dari Koef. Gempa desain	1,30	-
4	Kondisi darurat tergantung 1. Pembuntuan pada drainase 2. surut cepat penggunaan air melebihi kebutuhan 3. surut cepat keprluan darurat	Efektif	Surut cepat dari Elev. Muka air maksimum hingga Elev. Terendah. Pengaruh gempa diabaikan	1,20	-

*) untuk OBE; sedangkan untuk MDE, $FK \geq 1$

Sumber : Pedoman Analisis Stabilitas dinamik bendungan tipe urugan