

## BAB III

### LANDASAN TEORI

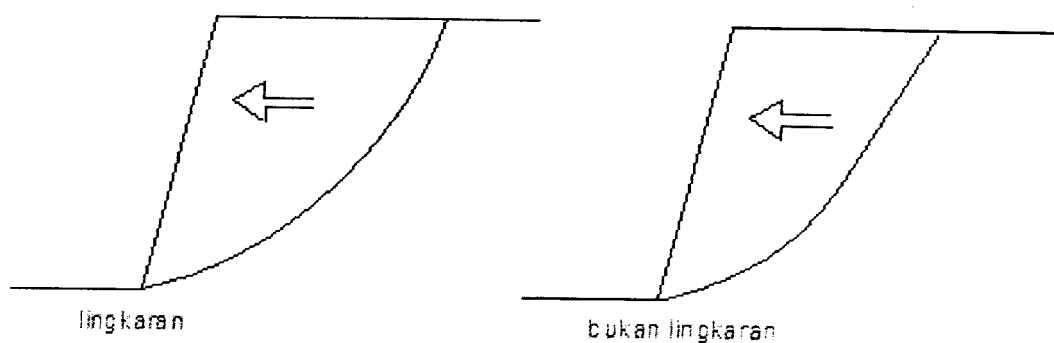
#### 3.1 Tinjauan Umum

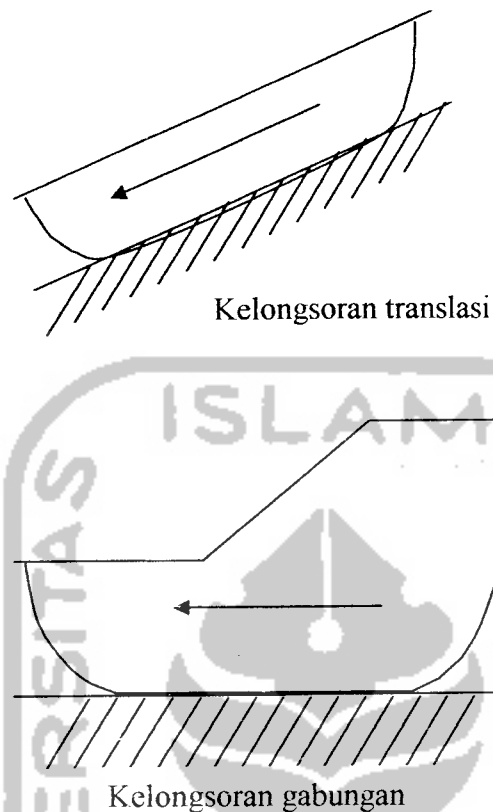
Penyebab utama terjadinya kelongsoran tanah pada lereng yang dikemukakan oleh Luthfi Hasan dalam Kuliah Umum Kelongsoran Tanah dan Lereng (2001) adalah karena meningkatnya tegangan geser (*shear stress*), menurunnya tahanan geser (*shear strength*) pada bidang longsornya atau keduanya (Abramson, et. al., 1996). *The Highway Research Board* (1978) secara rinci mengemukakan beberapa hal penyebab kelongsoran, yaitu:

1. Berkurangnya daya dukung lereng yang disebabkan oleh:
  - a. Erosi, baik yang disebabkan oleh aliran air sungai, hujan maupun perbedaan suhu yang sangat drastis.
  - b. Pergerakan alami dari lereng akibat pergeseran bidang longsor maupun akibat penurunan (*settlements*).
  - c. Aktivitas manusia, antara lain:
    - 1) Penggalian dasar lereng yang dapat mempertajam sudut kemiringan lereng.
    - 2) Pergeseran/pengrusakan terhadap struktur penahan tanah yang ada.
    - 3) Penurunan seketika tinggi muka air pada lereng.

2. Penambahan beban pada lereng, oleh:
  - a. Kondisi alam, seperti:
    - 1) Peningkatan berat volume tanah akibat pengaruh air hujan.
    - 2) Akumulasi sedimen di atas lereng.
  - b. Aktivitas manusia, seperti:
    - 1) Pengurugan tanah di atas lereng.
    - 2) Pembangunan gedung, jalan dan sejenisnya di sekitar lereng.
3. Pengaruh terjadinya gempa atau sumber getaran yang lain.
4. Pemindahan material di sekeliling dasar lereng, yang disebabkan oleh:
  - a. Aliran sungai maupun gelombang laut.
  - b. Terjadinya peristiwa *piping*.
  - c. Aktivitas manusia seperti penggalian dan penambangan.
  - d. Hilangnya kuat geser tanah di sekeliling dasar lereng.
5. Terjadinya tekanan tanah lateral, yang disebabkan oleh:
  - a. Retakan – retakan tanah.
  - b. Beban yang bekerja di sekitar muka lereng,
  - c. Mengembangnya tanah lempung.

Tipe keruntuhan lereng yang paling penting digambarkan pada gambar 3.1.





**Gambar 3.1 Tipe-tipe keruntuhan lereng (Sumber: R. F. Craig, 1989)**

Kelongsoran translasi (*translation slip*) dan kelongsoran gabungan (*compound slip*) terjadi bila bentuk permukaan runtuh dipengaruhi oleh adanya kekuatan geser yang berbeda pada lapisan tanah yang berbatasan. Kelongsoran translasi cenderung terjadi bila lapisan tanah yang berbatasan berada pada kedalaman yang relatif lebih dangkal di bawah permukaan lereng. Kelongsoran gabungan biasanya terjadi bila lapisan tanah yang berbatasan berada pada kedalaman yang lebih besar dan permukaan runtuhnya terdiri dari bagian – bagian lengkung dan bidang.

## **3.2 Tanah**

### **3.2.1 Umum**

Istilah tanah yang dimaksud dalam bidang mekanika tanah dimaksudkan adalah mencakup semua bahan/unsur tanah seperti lempung, pasir, kerikil, dan batu-batuan yang besar (L.D. Wesley, 1977).

Pembentukan tanah dari bahan induknya, dapat berupa proses fisik maupun kimia. Proses pembentukan tanah secara fisik yaitu proses yang mengubah batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil yang terjadi akibat adanya pengaruh erosi, air, angin, manusia atau hancurnya partikel tanah akibat perubahan suhu atau cuaca. Sedangkan pelapukan akibat proses kimia dapat terjadi oleh pengaruh oksigen, karbon dioksida, air yang mengandung asam atau alkali dan proses kimia lain (Hardiyatmo H.C., 1992).

Istilah pasir, lempung, lanau atau lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada batas yang telah ditentukan, walaupun istilah yang sama juga digunakan menggambarkan sifat tanah yang khusus. Misalnya lempung adalah jenis unsur tanah yang bersifat kohesif dan plastis, sedangkan pasir digambarkan sebagai tanah yang tidak kohesif dan tidak plastis (Hardiyatmo H.C., 1992).

### **3.2.2 Klasifikasi Tanah**

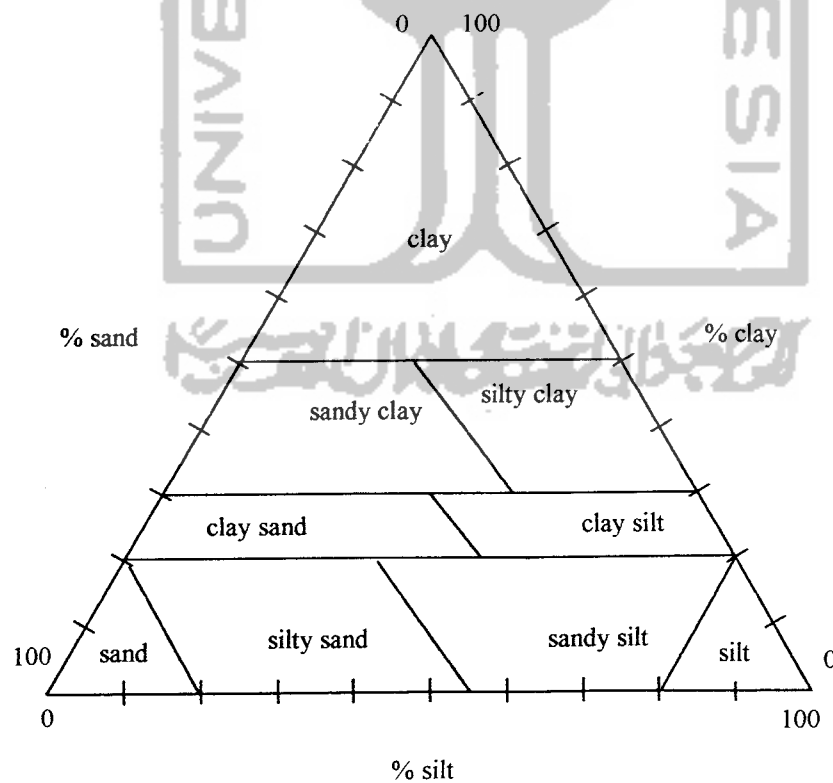
Sistem klasifikasi tanah merupakan suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tetapi mempunyai sifat yang serupa dalam kelompok-kelompok dan subkelompok-subkelompok berdasarkan pemakaiannya. Sistem

klasifikasi untuk tujuan rekayasa didasarkan pada sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran dan plastisitasnya.

### 1. Klasifikasi Berdasarkan Tekstur

Tekstur tanah merupakan keadaan permukaan tanah, dimana tekstur tanah ini dipengaruhi oleh ukuran-ukuran tiap butir yang ada pada tanah. Dalam sistem klasifikasi ini tanah diberi nama atas dasar komponen utama yang dikandungnya.

Klasifikasi tanah menurut USCS dapat dilihat pada gambar 3.2 dan pada tabel 3.1, sedangkan klasifikasi tanah menurut *Triangular Clasification Cent* (segitiga pedoman) didasarkan pada batas dari butiran tanah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2.



**Gambar 3.2 Triangular Clasification Cent (Sumber: Bowles, 1993)**

Tabel 3.1 Klasifikasi tekstur tanah berdasarkan USDA (Sumber: Mek. Tanah I, Christady, H., 1992)

Diameter Butiran Tanah (mm)	
Pasir	2,00 – 0,05
Lanau	0,05 – 0,002
Lempung	< 0,002

## 2. Klasifikasi berdasarkan Unified (USCS)

Sistem ini diperkenalkan oleh Cassagrande (1942) yang kemudian dimodifikasi oleh *United States Bureau of Reclamation* (1952).

Sistem klasifikasi *Unified* mengelompokkan tanah kedalam dua kelompok besar, seperti berikut ini:

### a. Tanah berbutir kasar (*coarse grained soil*)

Kerikil dari pasir termasuk dalam golongan tanah ini dimana kurang dari 50% berat contoh tanah lolos ayakan no. 20. Simbol dari kelompok ini diawali dengan huruf **G** untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil dan huruf **S** untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir.

### b. Tanah berbutir halus (*fine grained soil*)

Merupakan tanah dimana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan no. 200. Simbol dari kelompok ini diawali huruf **M** untuk lanau (*silt*) anorganik, huruf **C** untuk lempung (*clay*) anorganik dan huruf **O** untuk lanau organik dan lempung organik. Simbol **PT** digunakan untuk tanah gambut (*peat*) dan tanah-tanah lain dengan kadar organik tinggi.

Simbol lain yang digunakan pada klasifikasi menurut USCS adalah:

- W = *Well graded* (tanah dengan gradasi baik).
- P = *Poorly graded* (tanah dengan gradasi buruk).
- L = *Low plasticity* (plastisitas rendah).
- H = *High plasticity* (plastisitas tinggi).

Tabel 3.2 Sistem Klasifikasi Unified (Sumber: Bowles, 1993)

Divisi utama		Simbol kelompok	Nama umum			
Tanah Berbutir Kasar Lebih dari 50% butiran tertahan pada ayakan no. 200	Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos ayakan No. 4	Kerikil bersih (hanya kerikil)	GW	Kerikil bergradasi baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		
			GP	Kerikil bergradasi buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		
		Kerikil dengan	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau		
			GC	Kerikil berlempung campuran kerikil-pasir-lempung		
	Kerikil 50% atau lolos dari fraksi kasar tertahan pada ayakan No. 4	Pasir bersih (hanya pasir)	SW	Pasir bergradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		
			SP	Pasir bergradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		
		Pasir dengan	SM	Pasir berlanau, campuran pasir lanau		
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lanau		
			Tanah Berbutir Halus 50% atau lebih lolos ayakan no. 200	Lanau dan Lempung Batas cair 50% atau kurang	ML	Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung
					CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus"
OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah					
Lanau dan Lempung Batas cair lebih dari 50%		MH	Lanau anorganik atau pasir halus diatomae atau lanau diatomae, lanau yang elastis			
		CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk			
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi			
Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi		PT	Peat (gambut), muck dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi			

### 3.2.3 Ukuran Partikel Tanah

Tanah secara umum dapat diklasifikasikan sebagai kerikil, pasir, lanau dan lempung tergantung dari ukuran partikel yang paling dominan. Pada tabel 3.4 diberikan batas rentang besar ukuran butiran tanah menurut beberapa spesifikasi.

Fraksi yang sangat halus tersusun dari butiran yang berukuran lebih kecil dari satu  $\mu\text{m}$ . Untuk dapat melihat ukuran butiran tanah yang sedemikian kecilnya harus menggunakan mikroskop elektron.

Tabel 3.3 Batasan Ukuran Golongan Tanah (Sumber: Mek. Tanah I, Christady, H., 1992)

Klasifikasi	Ukuran Butiran Tanah (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
MIT	>2	2,0 – 0,06	0,06 – 0,002	<0,002
USDA	>2	2,0 – 0,05	0,05 – 0,002	<0,002
AASHTO	76,2 – 2,0	2,0 – 0,075	0,075 – 0,002	<0,002
Unified (USCS)	7,62 – 4,75	4,74 – 0,075	<0,075	<0,0075

### 3.2.4 Tingkat Plastistas Tanah

Perilaku tanah berbutir halus sangat dipengaruhi oleh kandungan airnya. Tingkatan plastis tanah dapat ditentukan apabila batas plastisnya dan batas cairnya telah diketahui. Dengan melihat perbedaan antara batas cair dan batas plastis suatu tanah dapat ditentukan indeks plastisitasnya (PI) yaitu :

$$PI = LL - PL$$

keterangan:

PI = *Plasticity Index*.

LL = *Liquid Limit*.

PL = *Plastic Limit*.



Berdasarkan nilai indeks plastisitasnya, Atterberg membagi tingkatan plastis tanah dalam selang antara 0% sampai lebih besar 17%, sedangkan menurut Burmsiter tingkat plastis tanah dibedakan dalam selang antara 0% sampai lebih besar dari 40% (tabel 3.5 dan tabel 3.6).

Tabel 3.4 Tingkat Plastisitas Tanah Menurut Atterberg (1911)

Indeks Plastisitas	Tingkat Plastisitas	Jenis Tanah
0	Non Plastis	Pasir
$0 < PI < 7$	Rendah	Lanau
$7 < PI < 17$	Sedang	Lempung Berlanau
$PI > 17$	Sangat Plastis	Lempung / Tanah Liat

Tabel 3.5 Tingkat Plastisitas Tanah Menurut Burmsiter (1976)

Indeks Plastisitas	Tingkat Plastis
0	Tidak Plastis
1 – 5	Sedikit Plastis
5 – 10	Plastis Rendah
10 – 20	Plastis Sedang
20 – 40	Plastis Tinggi
> 40	Sangat plastis

### 3.3 Kuat Geser Tanah

Teori kekuatan pada keruntuhan Mohr (1910) digunakan untuk mengevaluasi problem mekanika tanah seperti stabilitas lereng tanah, daya dukung tanah ultimate dan tekanan lateral tanah. Analisis sejenis ini meliputi penentuan tegangan suatu bidang keruntuhan yang dipandang dan membandingkan terhadap kuat geser tanah. Jika kekuatan dari tanah lebih besar daripada tegangan terhitung, maka massa tanah aman terhadap keruntuhan pada

bidang yang ditinjau. Jika tegangan tersebut lebih besar dari kekuatan tanah, maka akan terjadi keruntuhan.

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Keruntuhan geser (*shear failure*) dalam tanah diakibatkan oleh gerakan relatif antar butiran. Dengan demikian kuat geser tanah tergantung dari gaya-gaya yang bekerja antara butirannya. Dari pengertian ini kuat geser tanah dapat terdiri dari dua bagian, yaitu:

1. Bagian yang bersifat kohesif yang tergantung pada kepadatannya dan kepadatan butirannya.
2. Bagian yang mempunyai sifat gesekan (*friction*) yang sebanding dengan tegangan vertikal yang bekerja pada bidang gesernya.

Berdasarkan uraian diatas Coloumb (1736), kuat geser tanah adalah sebagai berikut:

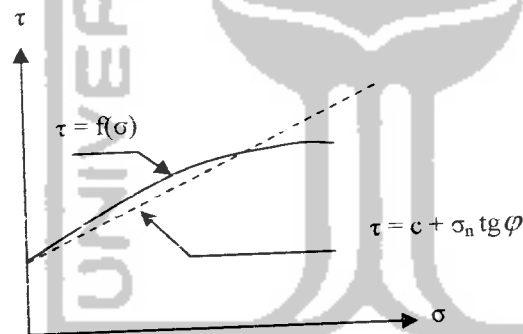
$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

keterangan:

- $\tau$  = kuat geser tanah.  
 $\sigma_n$  = tegangan normal pada bidang runtuh.  
 $c$  = kohesi tanah.  
 $\varphi$  = sudut geser dalam tanah.

Persamaan diatas tersebut kriteria keruntuhan atau kegagalan Mohr-Coulomb (1910) yang menyatakan bahwa keruntuhan akibat geser akan terjadi bila tegangan geser pada suatu bidang mencapai syarat tertentu.

Berdasarkan pengertian tersebut bila tegangan dan geser pada sebuah bidang dalam massa tanah sedemikian rupa sehingga tegangan tersebut dapat digambarkan sebagai titik a, maka keruntuhan tidak akan terjadi pada bidang tersebut, tetapi bila tegangan normal dan geser yang bekerja pada bidang suatu bidang lain dapat digambarkan sebagai titik b (tepat berada pada garis keruntuhan), maka keruntuhan geser akan terjadi pada bidang tersebut. Suatu keadaan kombinasi tegangan yang berwujud titik c, keruntuhan geser tidaklah mungkin terjadi karena titik tersebut tergambar diatas garis keruntuhan, keruntuhan sudah terjadi sebelumnya. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Garis Keruntuhan Mohr-Coulomb dan Hukum Keruntuhan dari Mohr-Coulomb (Sumber: DAS BM, 1983)

### 3.4 Teori Analisis Stabilitas Lereng

Dalam praktek, analisis stabilitas lereng didasarkan pada konsep keseimbangan plastis batas (*limit plastic equilibrium*). Adapun maksud analisis stabilitas ini adalah untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor yang potensial.

Dalam analisis stabilitas lereng, beberapa anggapan telah dibuat, yaitu:

1. Kelongsoran lereng terjadi disepanjang permukaan bidang longsor tertentu dan dianggap sebagai masalah bidang dua dimensi.
2. Massa tanah yang longsor dianggap berupa benda yang masif.
3. Tahanan geser dari massa tanah pada setiap titik sepanjang bidang longsor tidak tergantung dari orientasi permukaan longsor atau dengan kata lain kuat geser tanah dianggap isotropis.
4. Faktor aman didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang longsor yang potensial dan kuat geser tanah rata-rata sepanjang permukaan longsor. Jadi, kuat geser tanah mungkin terlampaui di titik-titik tertentu pada bidang longsornya, padahal faktor aman hasil hitungan lebih besar 1.

Faktor aman didefinisikan sebagai nilai banding antara gaya yang menahan dan gaya yang menggerakkan atau menjadi persamaan:

$$F = \frac{\tau}{\tau_d} \dots\dots\dots (3.2)$$

keterangan:

$\tau$  = tahanan geser yang dapat dikerahkan oleh tanah.

$\tau_d$  = tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang longsor dan F adalah faktor aman.

Menurut Mohr-Coulomb (1910), tahanan terhadap tegangan geser adalah:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi \dots\dots\dots (3.3)$$

dengan cara yang sama, dapat dituliskan persamaan tegangan geser yang terjadi ( $\tau_d$ ) akibat beban tanah dan beban-beban lain pada bidang longsornya:

$$\tau_d = c_d + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d \dots\dots\dots (3.4)$$

dengan  $c_d$  dan  $\varphi_d$  adalah kohesi dan sudut gesek dalam yang terjadi atau yang dibutuhkan untuk keseimbangan pada bidang longsornya.

Substitusi persamaan (3.3) dan (3.4) diperoleh persamaan faktor aman:

$$F = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi / c_d + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d \dots\dots\dots (3.5)$$

Persamaan (3.5) dapat pula dituliskan dalam bentuk:

$$c_d + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d = (c / F) + \sigma (\operatorname{tg} \varphi / F) \dots\dots\dots (3.6)$$

untuk maksud memberikan faktor aman terhadap masing-masing komponen kuat geser, faktor aman dapat dinyatakan oleh:

$$F_c = \frac{c}{c_d} \dots\dots\dots (3.7a)$$

$$F_\varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_d} \dots\dots\dots (3.7b)$$

keterangan:

$F_c$  = faktor aman pada komponen kohesi.

$F_\varphi$  = adalah faktor aman pada komponen gesekan, umumnya faktor aman terhadap kuat geser tanah diambil lebih besar atau sama dengan 1,0.

$c$  = kohesi tanah.

$c_d$  = kohesi tanah yang terjadi atau yang dibutuhkan untuk keseimbangan pada bidang longsor.

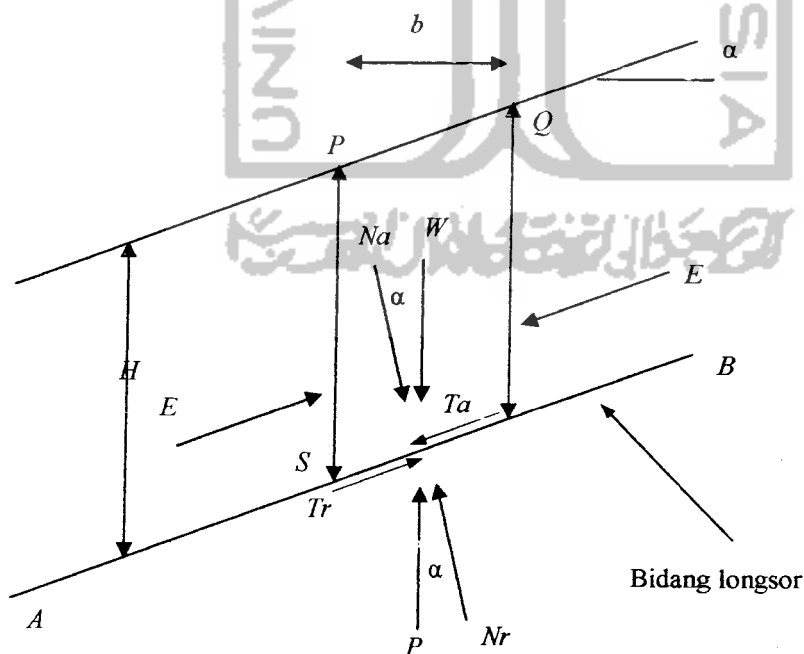
$\varphi$  = sudut gesek dalam tanah.

$\phi_d$  = sudut gesek dalam yang terjadi atau yang dibutuhkan untuk keseimbangan pada bidang longsor.

### 3.5 Analisis Stabilitas Lereng dengan Bidang Longsor Datar

#### 3.5.1 Lereng Tak Terhingga (*Infinite Slope*)

Gambar 3.4 memperlihatkan suatu kondisi di mana tanah dengan tebal  $H$  yang mempunyai permukaan miring, terletak diatas 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  $b$ , gaya-gaya yang bekerja pada dua bidang vertikalnya akan sama, karena pada lereng tak terhingga gaya-gaya yang bekerja di setiap sisi bidangnya dapat dianggap sama.



Gambar 3.4 Lereng tak terhingga tanpa aliran air rembesan (Sumber:

Mekanika Tanah II, Christady, H., 1992)

### 1. Kondisi Tanpa Rembesan

Dalam masalah ini akan ditentukan besarnya faktor aman dari lereng setebal  $H$  pada bidang longsor  $AB$  (Gambar 3.4). Pada lerengnya dianggap tidak terdapat aliran air tanah.

Berat elemen tanah  $PQTS$  adalah:

$$W = \gamma bH \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

Gaya berat  $W$  dapat diuraikan menjadi:

$$N_a = W \cos \alpha = \gamma bH \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

$$T_a = W \sin \alpha = \gamma bH \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

Tegangan normal  $\sigma$  dan gaya geser  $\tau$  pada bidang  $AB$  per satuan lebar adalah:

$$\sigma = \frac{N_a}{(b/\cos\alpha)} = \gamma H \cos^2 \alpha \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

$$\tau = \frac{T_a}{(b/\cos\alpha)} = \gamma H \cos \alpha \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

Reaksi akibat gaya berat  $W$  adalah gaya  $P$  yang besarnya sama dengan  $W$ , dengan arah yang berlawanan. Uraian gaya  $P$  memberikan:

$$N_r = P \cos \alpha = W \cos \alpha = \gamma Hb \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

$$T_r = P \sin \alpha = W \sin \alpha = \gamma Hb \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

Dalam kondisi seimbang, gaya geser yang bekerja pada bidang  $AB$  adalah:

$$\tau_d = \frac{T_r}{(b/\cos\alpha)} = \gamma H \sin \alpha \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

Gaya geser yang terjadi ini dapat dituliskan dalam persamaan:

$$\tau_d = C_d + \sigma \operatorname{tg} \phi_d \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

Substitusi persamaan persamaan (3.15) dan persamaan (3.16), diperoleh:

$$\gamma H \sin \alpha \cos \alpha = c_d + \gamma H \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \varphi_d \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

Persamaan (3.17) dapat disusun dalam bentuk persamaan:

$$C_d/\gamma H = \cos^2 \alpha (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi_d) \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

Dari persamaan (3.16), bila faktor aman diberikan pada masing-masing komponen gesekan dan kohesi akan mendapatkan persamaan:

$$\operatorname{tg} \varphi_d = \operatorname{tg} \varphi/F \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

$$c_d = c/F \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

Substitusi persamaan (3.20) ke dalam persamaan (3.18), diperoleh:

$$F = \frac{c}{\gamma H \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \alpha} + \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \dots\dots\dots (3.21)$$

keterangan:

$F$  = faktor aman.

$c$  = kohesi tanah.

$\varphi$  = sudut gesek dalam tanah.

$\alpha$  = sudut kemiringan lereng.

$\gamma$  = berat volume tanah.

Untuk tanah yang mempunyai  $\varphi$  dan  $c$ , kedalaman elemen tanah pada kondisi

kritis ( $H_c$ ) terjadi bila  $F = 1$ , yaitu:

$$H_c = \frac{c}{\gamma \cos^2 \alpha (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi)} \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

keterangan:

$H_c$  = kedalaman maksimum, dimana lereng dalam kondisi kritis akan longsor.

$c$  = kohesi tanah.

$\gamma$  = berat volume tanah.



Untuk tanah granuler, nilai kohesi  $c = 0$ , persamaan (3.21) menjadi:

$$F = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \dots \dots \dots (3.23)$$

Persamaan (3.23) memberi pengertian bahwa pada lereng tak terhingga untuk lereng granuler selama  $\alpha < \phi$ , maka lereng masih dalam kondisi stabil, karena faktor aman  $F > 1$ .

Untuk tanah kohesif dengan  $\phi = 0$ , persamaan (3.21) menjadi:

$$F = \frac{c}{\gamma \cos^2 \alpha H} \dots \dots \dots (3.24)$$

Pada kondisi kritis  $F = 1$ , maka untuk tanah dengan  $\phi = 0$  dapat diperoleh persamaan:

$$c/\gamma H = \cos^2 \alpha \tan \alpha \dots \dots \dots (3.25)$$

Parameter  $c/\gamma H$  disebut angka stabilitas, yaitu parameter yang menyatakan nilai banding komponen kohesi dari tahanan geser terhadap  $\gamma H$  yang dibutuhkan guna memelihara stabilitas untuk faktor aman  $F=1$ .

## 2. Kondisi dengan Rembesan

Suatu lereng tak terhingga dengan kemiringan lereng sebesar  $\alpha$ , di mana air rembesan dianggap tedapat pada permukaan tanah, diperlihatkan ddalam gambar 3.5. Dengan adanya pengaruh air, kuat geser tanah dapat dituliskan sebagai:

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan \phi \dots \dots \dots (3.26)$$

atau:

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi \dots \dots \dots (3.27)$$

keterangan:

$\sigma$  = tegangan normal.

$\sigma'$  = tegangan efektif.

$u$  = tekanan air pori.

Ditinjau dari element  $PQTS$ . Gaya-gaya yang bekerja pada permukaan-permukaan  $PS$  dan  $QT$  besarnya sama, jadi saling meniadakan. Selanjutnya, akan dievaluasi faktor aman terhadap kemungkinan longsor di sepanjang bidang  $AB$  yang terletak pada kedalaman  $H$ , dibawah permukaan tanah.

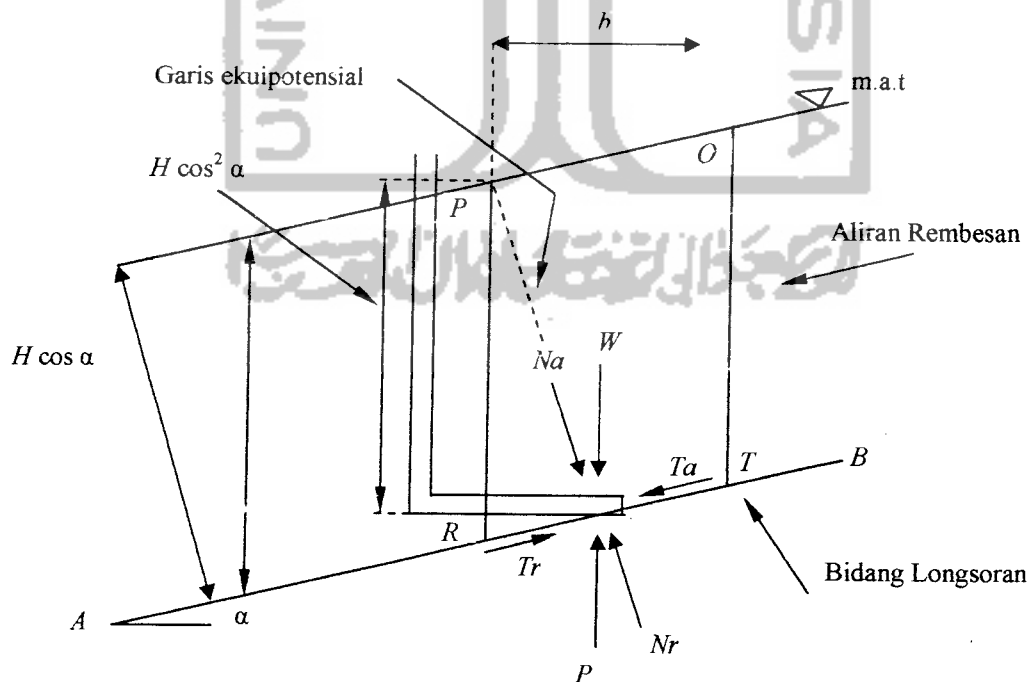
Berat tanah pada elemen  $PQTS$ , adalah:

$$W = \gamma_{sat} bH(1) \dots\dots\dots (3.28)$$

Gaya berat  $W$  dapat diuraikan menjadi:

$$N_a = W \cos \alpha = \gamma_{sat} bH \cos \alpha \dots\dots\dots (3.29)$$

$$T_a = W \sin \alpha = \gamma_{sat} bH \sin \alpha \dots\dots\dots (3.30)$$



**Gambar 3.5** Lereng tak terhingga dipengaruhi aliran rembesan (Sumber:

**Mekanika Tanah II, Christady, H., 1992)**

Reaksi akibat gaya berat  $W$ , adalah  $P$  dengan arah yang melawan gaya  $W$ . gaya  $P$  dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu :

$$N_r = P \cos \alpha = \gamma_{sat} bH \cos \alpha \dots\dots\dots (3.31)$$

$$T_r = P \sin \alpha = \gamma_{sat} bH \sin \alpha \dots\dots\dots (3.32)$$

Tegangan normal total  $\sigma$  dan gaya geser  $\tau$  pada bidang AB, adalah:

$$\sigma = \frac{N_r}{(b/\cos \alpha)(1)} = \gamma_{sat} H \cos^2 \alpha \dots\dots\dots (3.33)$$

$$\tau_d = \frac{T_r}{(b/\cos \alpha)(1)} = \gamma_{sat} H \cos \alpha \sin \alpha \dots\dots\dots (3.34)$$

Gaya geser yang terjadi atau gaya geser yang dibutuhkan untuk memelihara keseimbangan pada bidang AB dapat pula dituliskan dalam bentuk :

$$\tau_d = c_d + (\sigma - u) \tan \phi_d \dots\dots\dots (3.35)$$

keterangan:

$u$  = tekanan air pori yang besarnya  $= \gamma_w H \cos^2 \alpha$  (lihat gambar 3.6).

Substitusi persamaan (3.33) ke dalam persamaan (3.35), diperoleh:

$$\begin{aligned} \tau_d &= c_d + (\gamma_{sat} H \cos^2 \alpha - \gamma_w H \cos^2 \alpha) \tan \phi_d \\ &= c_d + \gamma' H \cos^2 \alpha \tan \phi_d \dots\dots\dots (3.36) \end{aligned}$$

Substitusi persamaan (3.34) ke dalam persamaan (3.35), diperoleh:

$$\gamma_{sat} H \cos \alpha \sin \alpha = c_d + \gamma' H \cos^2 \alpha \tan \phi_d$$

$$\frac{c_d}{\gamma_{sat} H} = \cos^2 \alpha \left[ \tan \alpha - \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \tan \phi_d \right] \dots\dots\dots (3.37)$$

dengan memberikan faktor aman pada komponen kuat geser:

$$\text{tg}\phi_d = \text{tg}\phi / F \text{ dan } c_d = c / F \dots\dots\dots (3.38)$$

Maka dapat diperoleh persamaan faktor aman, sebagai berikut:

$$F = \frac{c}{\gamma_{sat} H \cos^2 \alpha \text{tg}\alpha} + \frac{\gamma g \phi}{\gamma_{sat} \text{tg}\alpha} \dots\dots\dots (3.39)$$

keterangan:

- F = faktor aman.
- c = kohesi tanah.
- $\phi$  = sudut gesek dalam tanah.
- $\alpha$  = sudut kemiringan lereng.
- $\gamma_{sat}$  = berat volume jenuh tanah.
- $\gamma$  = berat volume tanah terendam air.

Dari persamaan (3.39), untuk tanah granuler dengan  $c = 0$ , maka besarnya faktor aman dapat dihitung dengan persamaan:

$$F = \frac{\gamma \text{tg}\phi}{\gamma_{sat} \text{tg}\alpha} \dots\dots\dots (3.40)$$

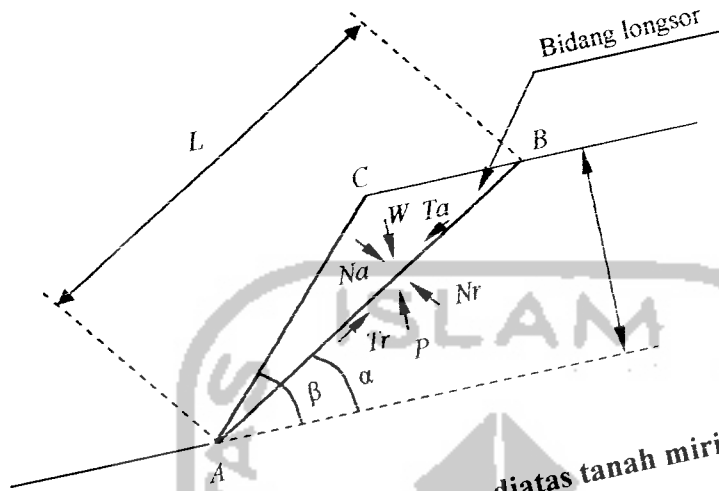
### 3.5.2 Lereng Terbatas (*Finite Slope*)

Gambar 3.6 memperlihatkan timbunan yang terletak diatas tanah asli yang miring. Akibat permukaan tanah asli yang miring, timbunan akan longsor disepanjang bidang dasar AB. Contoh dari kondisi ini adalah jika suatu tanah timbunan diletakkan pada tanah asli yang miring, di mana pada lapisan tanah asli masih terdapat lapisan lemah yang berada didasar timbunannya.

Berat massa tanah yang akan longsor:

W  
ket  
W  
 $\alpha$   
 $\beta$   
pad  
 $\sigma =$   
 $\tau =$





Gambar 3.6 Analisis stabilitas timbunan diatas tanah miring (Sumber: Mekanika Tanah II, Christady, H., 1992)

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{1}{2} H \overline{CB} \\
 &= H\gamma \left( \frac{H}{\text{tg}\alpha} - \frac{H}{\text{tg}\beta} \right) \\
 &= \frac{1}{2} \gamma H^2 \left( \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin \alpha} \right) \quad (3.41)
 \end{aligned}$$

keterangan:

$W$  = berat tanah diatas bidang longsor.

$\alpha$  = sudut longsor terhadap horisontal.

$\beta$  = sudut lereng tanah.

Tegangan normal ( $\sigma$ ) dan tegangan geser ( $\tau$ ) yang terjadi akibat berat tanah pada bidang AB adalah:

$$\sigma = \frac{N_a}{H/\sin \alpha (l)} = \frac{\frac{1}{2} \gamma H \sin \alpha \cos \alpha \sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin \alpha} \quad (3.42)$$

$$\tau = \frac{T_a}{H/\sin \alpha (l)} = \frac{\frac{1}{2} \gamma H \sin^2 \alpha \sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin \alpha} \quad (3.43)$$

tahanan geser yang terjadi pada bidang  $AB$ , adalah:

$$\begin{aligned}\tau_d &= c_d + \sigma g \varphi_d \\ &= c_d + \frac{1}{2} \gamma H \left( \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin \alpha} \right) \cos \alpha \sin \alpha g \varphi_d \dots\dots\dots (3.44)\end{aligned}$$

pada saat keseimbangan batas tercapai,  $\tau = \tau_d$ . Substitusi Persamaan (3.43) ke

Persamaan (3.44), diperoleh:

$$\begin{aligned}\frac{\frac{1}{2} \gamma H \sin^2 \alpha \sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin \alpha} &= c_d + \frac{1}{2} \gamma H \left( \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin \alpha} \right) \cos \beta \sin \alpha g \varphi_d \\ c_d &= \frac{1}{2} \gamma H \left( \frac{\sin(\beta - \alpha)(\sin \alpha - \cos \alpha g \varphi_d)}{\sin \beta} \right) \dots\dots\dots (3.45)\end{aligned}$$

Dari Persamaan (3.45) terlihat bahwa  $c_d$  adalah fungsi dari suatu sudut  $\alpha$ , karena nilai – nilai  $\beta, \gamma, H, \varphi_d$  konstan.

Dengan mengambil  $\frac{\delta c_d}{\delta \alpha} = 0$ , diperoleh nilai sudut kritis ( $\alpha_c$ ) sebesar:

$$\alpha_c = (\beta + \varphi_d) / 2 \dots\dots\dots (3.46)$$

Substitusi persamaan  $\alpha = \alpha_c$ , ke persamaan (3.45), diperoleh:

$$c_d = \left( \frac{1 - \cos(\beta - \varphi_d)}{\sin \beta \cos \varphi_d} \right) \frac{\gamma H}{4} \dots\dots\dots (3.47)$$

saat kondisi kritis  $F = 1$ . Dari substitusi  $c_d = c$  dan  $\varphi_d = \varphi$  ke persamaan (3.47),

diperoleh persamaan tinggi  $H$  yang paling kritis, sebesar:

$$H_c = \frac{4c}{\gamma} \left( \frac{\sin \beta \cos \varphi}{1 - \cos(\beta - \varphi)} \right) \dots\dots\dots (3.48)$$

keterangan:

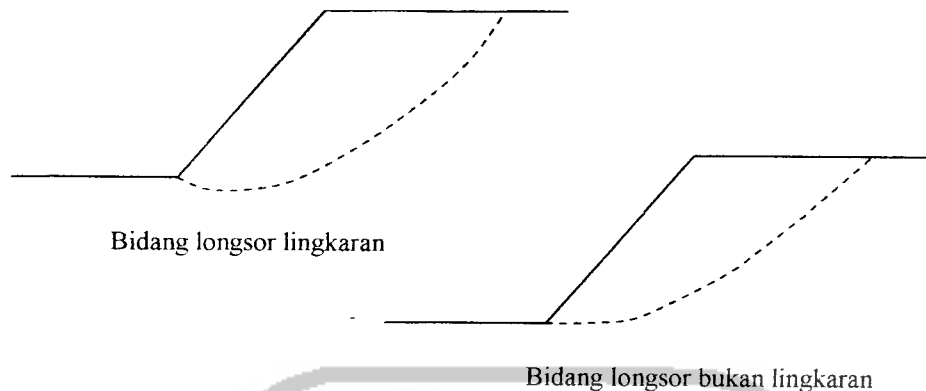
$H_c$  = tinggi lereng kritis.

- $\alpha$  = sudut longsor terhadap horisontal.
- $\beta$  = sudut lereng tanah.
- $c$  = kohesi tanah.
- $\gamma$  = berat volume tanah.
- $\varphi$  = sudut geser dalam tanah.

### 3.6 Analisis Stabilitas dengan Bidang Longsor Berbentuk Lingkaran

Pengamatan kelongsoran lereng yang dilakukan oleh Collin (1846) menunjukkan bahwa peristiwa longsor tanah terjadi dengan bentuk bidang longsor yang berupa lengkungan. Keruntuhan lereng dari jenis tanah kohesif banyak terjadi karena bertambahnya kadar air tanah. Sebab terjadinya kelongsoran adalah karena tidak tersedianya kuat geser tanah yang cukup untuk menahan tanah longsor ke bawah, pada bidang longornya.

Lengkungan bidang longsor yang dapat berupa bentuk bidang lingkaran (silinder), log spiral ataupun kombinasi keduanya. Kadang-kadang, dijumpai pula suatu bidang longsor yang tidak berupa kurva menerus akibat perpotongan dari bidang longsor dengan lapisan tanah keras (seperti: lempung sangat kaku, pasir padat, permukaan batu atau lapisan yang sangat lunak). Bentuk-bentuk bidang longsor ini diperlihatkan dalam gambar 3.7.



**Gambar 3.7 Bentuk-bentuk bidang longsor (Sumber: Mekanika Tanah II, Christady, H., 1992)**

Bentuk anggapan bidang longsor berupa lingkaran dimaksudkan untuk mempermudah hitungan analisis stabilitasnya secara matematik dan dipertimbangkan mendekati bentuk sebenarnya dari bidang longsor yang sering terjadi di alam. Kesalahan analisis stabilitas lereng tidak banyak disebabkan oleh bentuk anggapan bidang longsornya, akan tetapi banyak ditentukan pada penentuan sifat-sifat tanah dan pencarian lokasi longsoran kritisnya (Bowles, 1984)

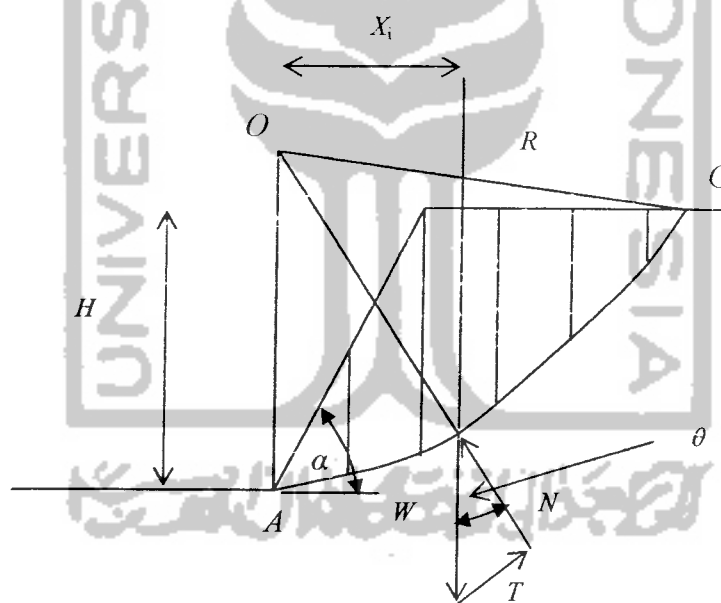
### 3.7 Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Irisan (*Method of Slice*)

Cara-cara analisis stabilitas yang telah dibahas sebelumnya hanya dapat digunakan bila tanah homogen. Bila tanah tidak homogen dan aliran rembesan terjadi di dalam tanahnya memberikan bentuk aliran dan berat volume tanah yang tidak menentu, cara yang lebih cocok adalah dengan metode irisan.

Gaya normal yang bekerja pada suatu titik di lingkaran bidang longsor, terutama dipengaruhi oleh berat tanah di atas titik tersebut. Dalam metode irisan,



massa tanah yang longsor dipecah-pecah menjadi beberapa irisan vertikal. Kemudian, keseimbangan dari tiap-tiap irisan diperhatikan. Gambar 3.8 memperlihatkan satu irisan dengan gaya-gaya yang bekerja padanya. Gaya-gaya ini terdiri dari gaya geser ( $X_r$  dan  $X_l$ ) dan gaya normal efektif ( $E_l$  dan  $E_r$ ) disepanjang sisi irisannya, dan juga resultan gaya geser efektif ( $T_i$ ) dan resultan gaya normal efektif ( $N_i$ ) yang bekerja di sepanjang dasar irisannya. Pada irisannya, tekanan air pori  $U_l$  dan  $U_r$  bekerja di kedua sisinya, dan tekanan air pori  $U_i$  bekerja pada dasarnya. Dianggap tekanan air pori sudah diketahui sebelumnya.



**Gambar 3.8 Gaya-gaya yang bekerja pada irisan (Sumber: Mekanika Tanah II, Christady, H., 1992)**

### 3.7.1 Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Fellenius

Analisis stabilitas lereng cara Fellenius (1927) menganggap gaya-gaya yang bekerja pada sisi kanan-kiri dari sembarang irisan mempunyai resultan nol pada arah tegak lurus bidang longsornya. Dengan anggapan ini, keseimbangan arah vertikal dari gaya-gaya yang bekerja dengan memperhatikan tekanan air pori adalah:

$$N_i + U_i = W_i \cos \theta_i$$

atau

$$\begin{aligned} N_i &= W_i \cos \theta_i - U_i \\ &= W_i \cos \theta_i - u_i a_i \end{aligned} \quad (3.49)$$

keterangan:

$N_i$  = resultan gaya normal efektif.

$U_i$  = tekanan air pori.

$W_i$  = berat irisan tanah ke- $i$ .

$\theta_i$  = sudut yang didefinisikan pada gambar 3.8.

Faktor aman didefinisikan sebagai:

$$F = \frac{\sum M_r}{\sum M_d}$$

keterangan:

$\sum M_r$  = Jumlah momen dari tahanan geser sepanjang bidang longsor.

$\sum M_d$  = Jumlah momen dari berat massa tanah yang longsor.

Lengan momen dari berat massa tanah tiap irisan adalah  $R \sin \theta$ , maka didapat:

$$\sum M_d = R \sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i \dots\dots\dots (3.50)$$

keterangan:

$R$  = jari-jari lingkaran bidang longsor.

$n$  = jumlah irisan.

$W_i$  = berat massa tanah irisan ke- $i$ .

$\theta_i$  = sudut yang didefinisikan pada Gambar 3.8.

Dengan cara yang sama, momen yang menahan tanah yang akan longsor, adalah:

$$\sum M_r = R \sum_{i=1}^{i=n} (ca_i + N_i \text{tg} \varphi) \dots\dots\dots (3.51)$$

Karena itu, persamaan untuk faktor amannya menjadi,

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (ca_i + N_i \text{tg} \varphi)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \dots\dots\dots (3.52)$$

Bila terdapat air pada lerengnya, tekanan air pori pada bidang longsor tidak berpengaruh pada  $M_d$ , karena resultan gaya akibat tekanan air pori lewat titik pusat lingkaran. Substitusi Persamaan (3.49) ke Persamaan (3.52), diperoleh:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} ca_i + (W_i \cos \theta_i - u_i a_{ii}) \text{tg} \varphi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \dots\dots\dots (3.52)$$

keterangan:

$F$  = faktor aman.

$c$  = kohesi tanah.

- $\varphi$  = sudut gesek dalam tanah.
- $a_i$  = panjang bagian lingkaran pada irisan ke- $i$ .
- $W_i$  = berat irisan tanah ke- $i$ .
- $u_i$  = tekanan air pori pada irisan ke- $i$ .
- $\theta$  = sudut yang didefinisikan pada Gambar 3.8.

Jika terdapat gaya-gaya selain berat lereng tanahnya sendiri, seperti beban bangunan di atas lereng, maka momen akibat beban ini diperhitungkan sebagai  $M_d$ . Metode Fellenius memberikan faktor aman yang relatif rendah dari cara hitungan yang lebih teliti. Batas-batas nilai kesalahan dapat mencapai kira-kira 5 sampai 40% tergantung dari faktor aman, sudut pusat lingkaran yang dipilih, dan besarnya tekanan air pori. Walaupun analisisnya ditinjau dalam tinjauan tegangan total, kesalahannya masih merupakan fungsi dari faktor aman dan sudut pusat dari lingkarannya (Whitman dan Baily, 1967). Cara ini telah banyak digunakan dalam prakteknya. Karena, cara hitungannya yang sederhana dan kesalahan yang terjadi pada sisi yang aman.

### 3.7.2 Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Bishop Disederhanakan

Metode irisan yang disederhanakan diberikan oleh Bishop (1955). Metode ini menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi-sisi irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal.

Persamaan kuat geser dalam tinjauan tegangan efektif yang dapat dikerahkan tanah, hingga tercapainya kondisi keseimbangan batas dengan memperhatikan faktor aman, adalah:

$$\tau = \frac{c'}{F} + (\sigma + u) \frac{tg\varphi'}{F} \dots\dots\dots (3.53)$$

keterangan:

$\sigma$  = tegangan normal total pada bidang longsor.

$u$  = tekanan air pori.

Untuk irisan ke- $i$ , nilai  $T_i = \tau a_i$ , yaitu nilai gaya geser yang berkembang pada bidang longsor untuk keseimbangan batas. Karena itu didapat:

$$T_i = \frac{c' a_i}{F} + (N_i - u_i a_i) \frac{tg \phi'}{F} \quad (3.54)$$

Kondisi keseimbangan momen terhadap pusat rotasi O antara berat massa tanah yang akan longsor dengan gaya geser total pada dasar bidang longsornya dapat dinyatakan oleh (Gambar 3.9):

$$\sum W_i x_i = \sum T_i R \quad (3.55)$$

keterangan:

$x_i$  = jarak  $W_i$  ke pusat rotasi O.

Dari persamaan (3.53) dan (3.55) dapat diperoleh:

$$F = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} [c' a_i + (N_i - u_i a_i) tg \phi']}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i x_i} \quad (3.56)$$

Dari kondisi keseimbangan vertikal, jika  $X_1 = X_i$  dan  $X_r = X_{i+1}$ :

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

$$N_i = \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - T_i \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \quad (3.57)$$

Jika  $N_i' = N_i - u_i a_i$  substitusi persamaan (3.54) ke persamaan (3.57), dapat diperoleh persamaan:

$$N_i' = \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - u_i a_i \cos \theta - c' a_i \sin \theta / F}{\cos \theta_i + \sin \theta_i \operatorname{tg} \varphi' / F} \quad (3.58)$$

Substitusi Persamaan (3.58) ke persamaan (3.56), diperoleh:

$$F = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} (c' a_i + \operatorname{tg} \varphi' \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - u_i a_i \cos \theta_i - c' a_i \sin \theta_i / F}{\cos \theta_i + \sin \theta_i \operatorname{tg} \varphi' / F})}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i x_i} \quad (3.59)$$

Untuk penyederhanaan dianggap  $X_i - X_{i+1} = 0$  dan dengan mengambil:

$$x_i = R \sin \theta_i \quad (3.60)$$

$$b_i = a_i \cos \theta_i \quad (3.61)$$

Substitusi Persamaan (3.60) dan (3.61) ke Persamaan (3.59) diperoleh persamaan faktor aman:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + (W_i - u_i b_i) \operatorname{tg} \varphi'] x_i \left( \frac{1}{\cos \theta_i (1 + \operatorname{tg} \theta_i \operatorname{tg} \varphi' / F)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (3.62)$$

keterangan:

$F$  = faktor aman.

$c'$  = kohesi tanah efektif.

$\varphi'$  = sudut gesek dalam tanah efektif.

$b_i$  = lebar irisan ke- $i$ .

$W_i$  = berat irisan tanah ke- $i$ .

$\theta_i$  = sudut yang didefinisikan dalam Gambar 3.8.

$u_i$  = tekanan air pori (*pore pressure*) didefinisikan sebagai:

$$r_u = \frac{ub}{W} = \frac{u}{\gamma h} \dots\dots\dots (3.63)$$

keterangan:

$r_u$  = nilai banding tekanan pori.

$u$  = tekanan air pori.

$b$  = lebar irisan.

$\gamma$  = berat volume tanah.

$h$  = tinggi irisan rata-rata.

Dari Persamaan (3.63), bentuk lain dari persamaan faktor aman untuk analisis stabilitas lereng cara Bishop adalah:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + W_i (1 - r_u) \text{tg } \phi'] x \left( \frac{1}{\cos \theta_i (1 + \text{tg } \theta_i \text{tg } \phi' / F)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W \sin \theta_{ii}} \dots\dots\dots (3.64)$$

dan nilai fungsi  $M_i$  adalah:

$$= \cos \theta_i (1 + \text{tg } \theta_i \text{tg } \phi' / F) \dots\dots\dots (3.65)$$

jadi:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + W_i (1 - r_u) \text{tg } \phi'] x \left( \frac{1}{M_i} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W \sin \theta_{ii}} \dots\dots\dots (3.66)$$

### 3.8 Penggunaan Program *Excell* dan *Slope/W*

Sebuah analisis diperlukan hitungan yang akurat, cepat dan sistematis. Ada beberapa cara perhitungan untuk menyelesaikan suatu kasus hitungan, seperti:

#### 1. Manual

Cara manual adalah cara konvensional dan tidak memakai program komputer. Cara ini memerlukan ketelitian dan ketepatan yang tinggi, karena banyaknya hitungan-hitungan yang diselesaikan. Kesalahan-kesalahan hitungan akan menyebabkan hitungan menjadi tidak tepat.

#### 2. Penggunaan Aplikasi Komputer, seperti:

- a. Program komputer MRSS.
- b. Program komputer *Excel*.
- c. Program komputer *Slope/W*.

Ketiga program di atas mempunyai kesamaan yaitu mempercepat sebuah hitungan dengan memasukkan data yang diperlukan dan formula atau rumus yang diperlukan.

Untuk menghitung stabilitas lereng tanah dengan *Excel* dan *Slope/W* diperlukan data-data:

#### 1. Data masukan (*input*)

Dalam penggunaan program ini diperlukan data masukan berupa data lereng, karakteristik tanah, dan data tambahan yang diperlukan:

- a. Sudut miring lereng.
- b. Tinggi lereng.



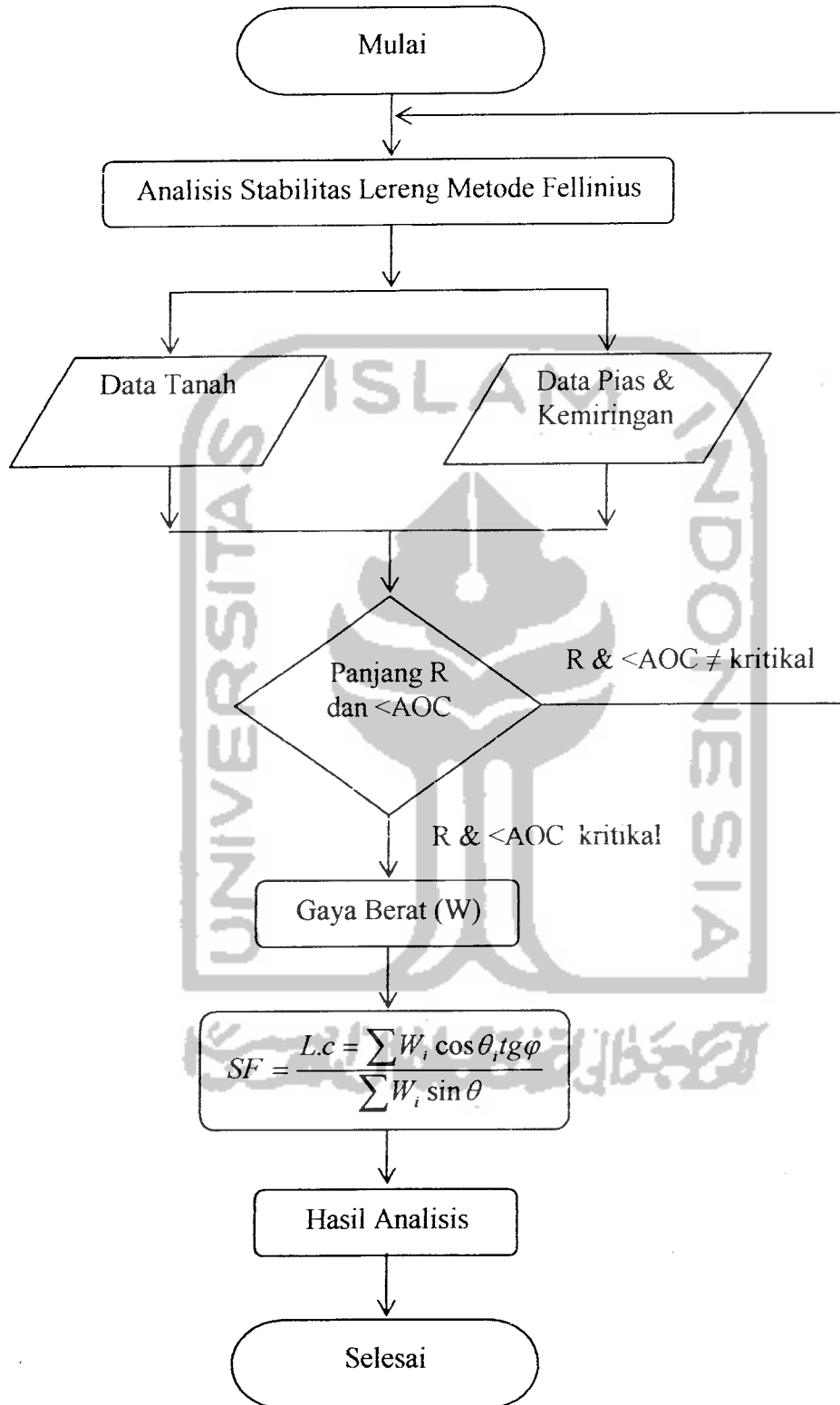
- c. Jumlah pias dan lebar pias.
- d. Data karakteristik tanah: data propertis tanah.
- e. Data tambahan berupa absis awal (XO), ordinat awal (YO).

## 2. Keluaran (*output*)

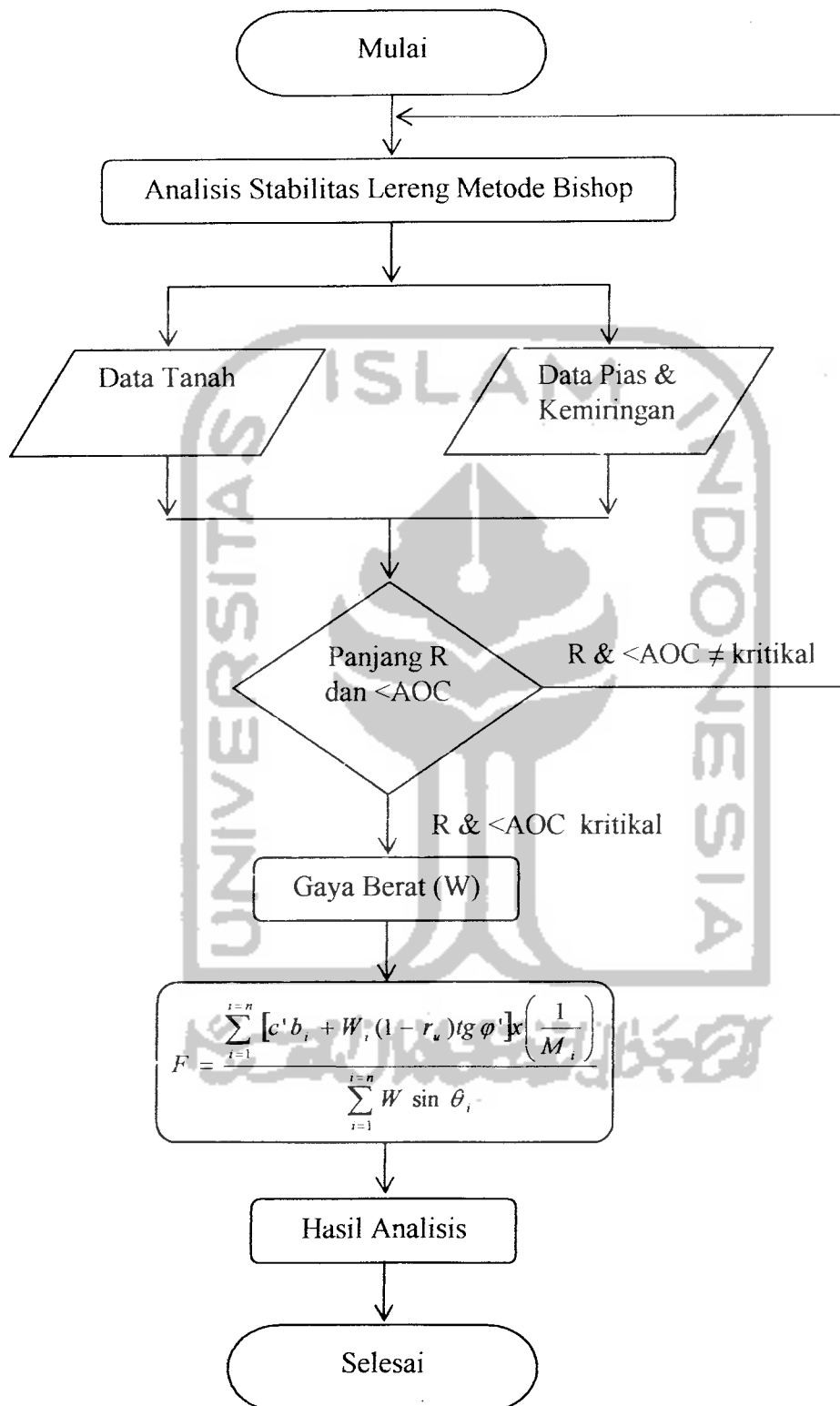
Keluaran yang diperoleh berupa panjang jari-jari lingkaran kritis, angka aman dan gambar lereng yang telah dihitung angka amannya.

Langkah - langkah pemakaian program dengan *Excel* dan *Slope/W* untuk analisis stabilitas lereng dengan cara Fellenius dan Bishop dapat dilihat pada *flowchart* berikut:





**Gambar 3.9 Diagram Alur Analisis dengan Metode Fellenius**



**Gambar 3.10 Diagram Alur Analisis dengan Metode Bishop**